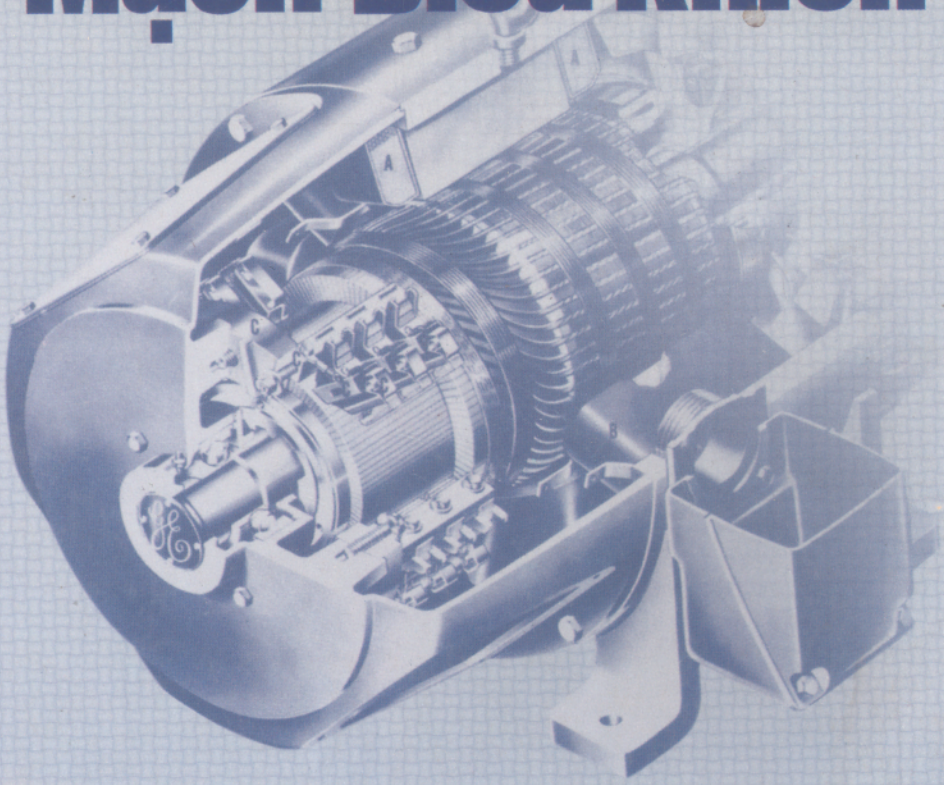
TRẦN THẾ SAN - NGUYỄN TRỌNG THẮNG
Khoa Điện Công Nghiệp - Điện Tử
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

MÁY ĐIỆN & Mạch Điều Khiển



TRẦN THẾ SAN - NGUYỄN TRỌNG THẮNG
TRƯỞNG KHOA ĐIỆN CÔNG NGHIỆP - ĐIỆN TỬ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

MÁY ĐIỆN & MẠCH ĐIỀU KHIỂN

NHÀ XUẤT BẢN THỐNG KÊ

MÁY ĐIỆN & MẠCH ĐIỀU KHIỂN

Trần Thế San – Nguyễn Trọng Thắng

***

Chịu trách nhiệm xuất bản :

Giám Đốc **CÁT VĂN THÀNH**

Biên tập : **NGUYÊN HẠNH**

Bìa : **DUY TRẦN**

Sửa bản in : **TÁC GIẢ**

In 1.000 cuốn khổ (14,5x20,5)cm tại Xưởng In Trung Tâm Hội Chợ Triển Lãm Việt Nam. GPXB số 224-104/XB-QLXB do Cục Xuất Bản cấp ngày 30/01/2002. In xong và nộp lưu chiểu quý 1/ 2003.

Lời Nói Đầu

Nội dung chính của cuốn sách là giới thiệu lý thuyết các thiết bị điện cơ, đặc biệt nhấn mạnh về các máy điện quay. Các khái niệm cơ bản về máy điện trong nhiều năm qua hầu như không thay đổi. Hầu hết các tiến bộ về ứng dụng và điều khiển máy điện đều trong lĩnh vực điện tử công suất và hệ thống vi xử lý. Các truyền động ac được dùng ngày càng nhiều trong các ứng dụng đòi hỏi tốc độ biến thiên và điều khiển linh hoạt. Các máy với nam châm vĩnh cửu và tổng trở biến thiên bắt đầu phát triển rộng rãi. Các tiến bộ đó sẽ được đề cập trong cuốn sách này.

***Chương 1** giới thiệu các xu hướng mới trong nghiên cứu và phát triển máy điện. **Chương 2** khái quát về vật liệu nam châm vĩnh cửu và các ứng dụng của chúng. **Chương 3** trình bày máy biến áp, giới thiệu loại máy biến áp tần số biến thiên và máy tự ngẫu thay đổi. **Chương 4** trình bày sự tính toán lực và moment trong các hệ thống sử dụng nam châm vĩnh cửu và nam châm điện. Các **Chương 5** và **6** đề cập những khái niệm cơ bản của máy điện quay và các cuộn dây phần ứng. Các **Chương 7, 8** trình bày động cơ điện dc, **Chương 9** khái quát về động cơ điện cảm ứng, và nội dung **Chương 10** là động cơ bước. **Chương 11** đề cập các vấn đề mới trong điều khiển máy điện. Nội dung mỗi chương trình bày trọn vẹn một vấn đề, các công thức, hình vẽ minh họa, cuối chương là các bài tập ứng dụng.*

Nội dung cuốn sách đề cập nhiều lĩnh vực của máy điện hiện đại. Bạn đọc sẽ gặp nhiều điều bổ ích, phù hợp yêu cầu học tập, nghiên cứu, và công tác của mình.

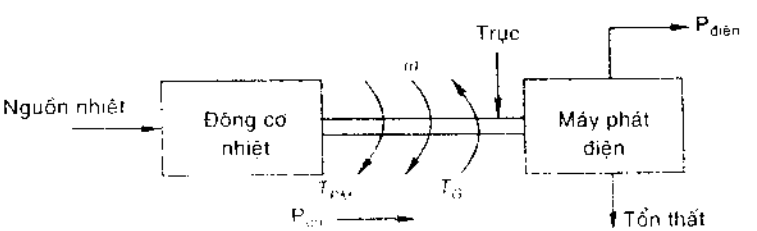
Chương 1

Giới thiệu

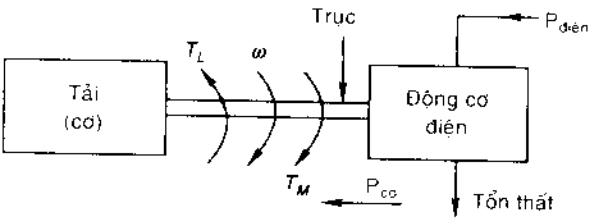
Điện không xảy ra trong tự nhiên dưới dạng sử dụng được và cũng không thể tích trữ được lượng điện lớn. Điện phải phát ra liên tục để cung cấp cho các nhu cầu về điện. Máy phát, phát ra điện bằng cách biến đổi cơ năng (quay) thành điện năng, đó là phương thức thích hợp và hiệu quả. Chỉ một phần nhỏ công suất bị mất do tổn hao trong máy phát điện (hiệu suất trong các máy phát điện trên 90%)

Trong turbine hơi nước, nhiệt động tạo ra công suất nhiệt cung cấp công suất cơ quay (hiệu suất khoảng 40-50% so với công suất tạo ra nhiệt động). Trong turbine nước, thế năng của nước tạo ra công suất cơ quay với tổn hao rất bé. Nguồn căn bản của công suất cơ - trong turbine nước hay hơi nước gọi là nguồn năng lượng (prime mover). Điện cũng có thể được phát ra từ dạng plasma của khí được đốt nóng, biến đổi công suất nhiệt trực tiếp ra công suất cơ (quay) (như nhà máy điện Bà Rịa). Quy trình cơ - điện của sự phát công suất điện được nêu trên Hình 1-1, dưới các điều kiện biến đổi đều, moment nguồn năng lượng $T_{PM} = T_G$ (moment máy phát) với turbine và máy phát điện chạy ở tốc độ đều

Ngoài việc thắp sáng và tạo nhiệt, điện năng được sử dụng chủ yếu để tạo cơ năng quay trong công nghiệp (điện năng biến đổi thành cơ năng). Các trạm phát điện trung tâm có hiệu năng lớn được sử dụng kết hợp để tăng công suất điện, chuyên tải đến vô số các điểm sử dụng điện. Quy trình biến đổi năng lượng điện - cơ là quy trình thuận nghịch với sự điều chỉnh đơn giản trục cơ



Hình 1-1. *Máy phát điện*

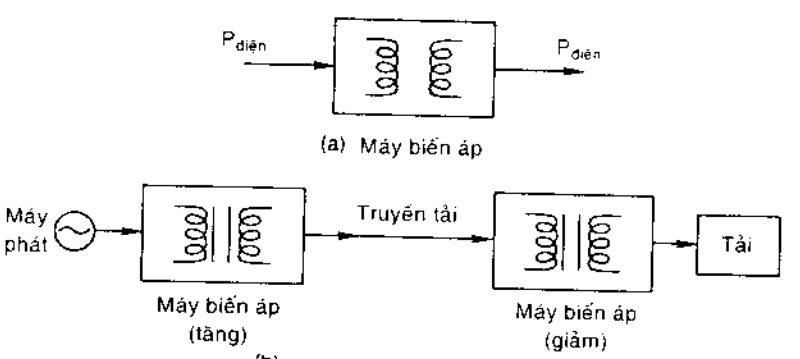


Hình 1-2 *Chế độ động cơ của sự vận hành máy điện*

quay và các điều kiện về điện ngược lại dòng dẫn công suất (Hình 1-2). Các thiết bị điện cơ được gọi chung là *máy điện*, như động cơ điện và các máy dưới dạng động cơ điện. Trong sự vận hành tốc độ đều, moment T_M(động cơ) = T_L (tải). Trong cả hai dạng máy phát và động cơ, đều có mất mát công suất trong máy điện, nhưng hiệu suất biến đổi năng lượng rất cao, hầu như toàn bộ (trên dưới 90%).

Máy điện được sử dụng hầu hết trong các quy trình sản xuất và công nghiệp. Máy phát điện cỡ rất lớn (50 MW hay cao hơn), động cơ công nghiệp vài MW đến thiết bị dân dụng vài kW và ngay cả các thiết bị ứng dụng tinh vi trong không gian vũ trụ đều cần đến sự vận hành nghiêm ngặt và đáng tin cậy.

Biến áp là thiết bị tĩnh, dùng để biến đổi điện năng từ một mức điện áp xoay chiều (ac) này đến một mức điện áp khác; được sử dụng phổ biến trong hệ thống điện. Công suất điện được phát ra ở mức điện áp thấp (tối đa là 33 kV), được biến áp nâng lên điện áp rất cao (chẳng hạn 500 kV) rồi truyền tải đi.



Hình 1-3. *Hệ thống công suất điện đơn giản*

Điện áp cao này có dòng điện thấp, làm giảm sự mất mát công suất khi truyền tải trên dây dẫn dài. Khi đến gần các điểm sử dụng, công suất điện phải giảm thành điện áp thấp an toàn (220/380 V) nhờ sử dụng biến áp giảm.

Mỗi pha sử dụng một máy biến áp (hệ thống điện 3 pha sử dụng 3 máy biến áp). Một biến áp cơ bản gồm hai cuộn dây được quấn trên lõi sắt từ. Hình 1-3a là ký hiệu một (máy) biến áp. Hình 1-3b biểu thị một đường truyền phát công suất điện đơn giản và hệ thống tiếp nhận điện. Thực tế, hệ thống công suất điện là một hệ thống tích hợp, phức tạp hơn nhiều, là mạng liên kết phù hợp với các điều kiện kinh tế, hiệu suất vận hành và độ tin cậy.

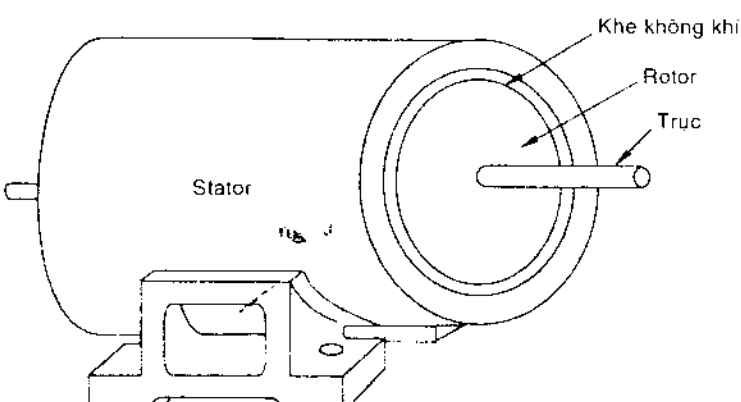
Các điểm cơ bản, phân loại, đặc điểm, cấu tạo máy điện

Cơ bản có ba loại máy điện (quay) là :

1. Máy điện một chiều (dc).
2. Máy điện đồng bộ nhiều pha.
3. Máy điện cảm ứng nhiều pha.

Có ba loại vật liệu chính trong máy điện là : *sắt từ* để dẫn từ thông, *đồng* (hay *nhôm*) để dẫn dòng điện và *chất cách điện* để cách điện dây dẫn.

Máy điện bao gồm hai phần : phần quay hình trụ gọi là *rotor* và phần đứng yên hình vòng bọc quanh rotor là *stator*, giữa rotor và stator cách nhau bởi một khe hở không khí (Hình 1-4). Rotor có một trục ở tâm được đặt trên

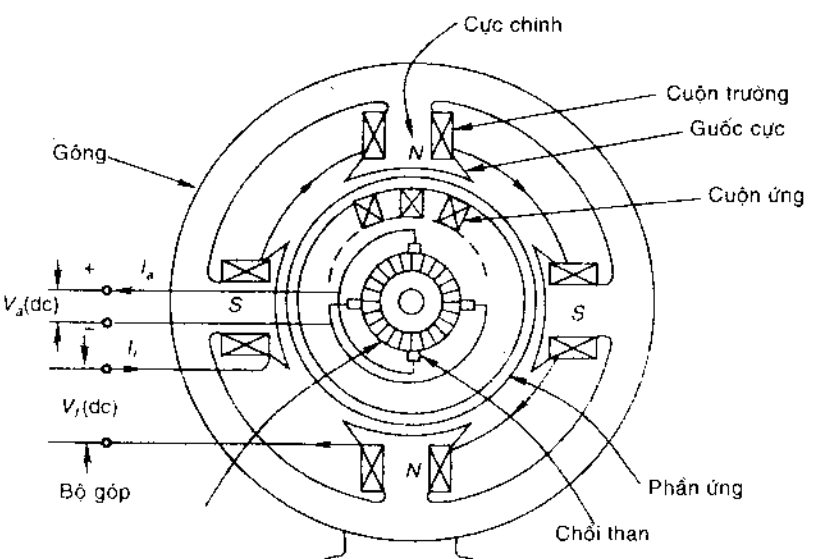


***Hình 1-4** Máy điện*

hai giá đỡ bằng ổ trục (bạc đạn) ở hai đầu lớp vỏ máy, lớp vỏ máy được gắn chặt bằng bulong với stator. Trục rotor dài hơn lớp vỏ máy ở một đầu và được ghép với nguồn năng lượng (đối với máy phát) hay với tải (đối với động cơ).

Rotor và stator được làm từ nguyên liệu sắt từ để dẫn từ thông, phụ thuộc vào quy trình biến đổi năng lượng. Trong hai loại, máy điện đồng bộ và máy điện dc, dòng dc kích thích cực từ tạo ra trường chính. Dây quấn trên cực từ gọi là *dây quấn kích thích* (field winding). Trường chuyển động tương đối qua cuộn dây thứ hai đặt trên phần còn lại, cảm ứng trên cuộn dây đó một sức điện động. Cuộn dây trao đổi dòng điện với hệ thống điện bên ngoài phụ thuộc vào điều kiện mạch. Dây quấn này gọi là *dây quấn phần ứng*, quyết định công suất tải của máy điện vì dây quấn kích thích tiêu thụ mức công suất tải nhỏ (0,5% đến 2%). Tải phụ thuộc vào dòng điện phần ứng, gọi là *dòng điện tải* (Hình 1-5).

Trong *máy điện dc*, cực từ nằm trên stator và phần ứng là rotor (Hình 1-5). Cực từ số lượng chẵn và từng cặp đối xứng nhau, cực tính Bắc và cực tính Nam xen kẽ nhau. Khi phần ứng quay, trong cuộn dây phần ứng xuất hiện sức điện động xoay chiều và dòng điện cảm ứng được chỉnh lưu bằng chuyển mạch cơ khí quay, gọi là bộ đổi nối (còn gọi là vành đổi chiều, hay cổ góp) được các chổi



Hình 1-5. *Mặt cắt máy dc*

than cố định cọ chạm vào. Vành đối chiều có dạng hình trụ, gồm các lá đồng ghép lại xung quanh trục rotor, có cách điện giữa các lá đồng và giữa lá đồng với trục quay rotor. Phần ứng gồm các lá sắt từ cán mỏng ghép lại, và các rãnh dọc trên mặt lõi để chứa các dây quấn phần ứng cách ly nhau. Các đầu dây phần ứng được nối với các lá đồng của vành đối chiều để tạo thành mạch kín trong dây quấn. Phần ứng khi mang dòng điện hình thành các cực cố định (giống như số cực từ) và tương tác với các cực từ tạo nên moment điện từ.

Trong *máy điện đồng bộ*, các cực từ có thể ở trên stator hoặc rotor, nhưng hầu hết các máy điện trong thực tế đều có các cực từ trên rotor (Hình 1-6). Các cực từ được kích thích bằng dòng điện dc. Stator là phần ứng mang dây quấn ba pha được quấn bằng với số cực từ của rotor. Dây quấn 3 pha độc lập với góc dịch chuyển pha. Khi rotor quay, sức điện động xoay chiều được tạo thành trên mỗi pha cân bằng nhau, và tần số được xác định bằng công thức :

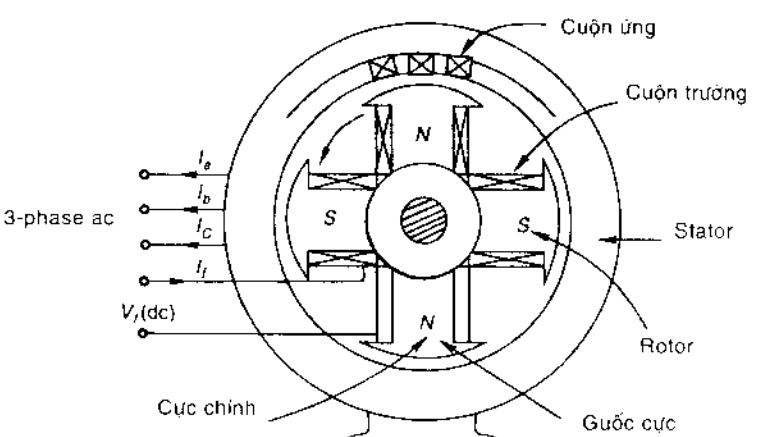
$$f = \frac{nP}{120} \qquad (1.1)$$

Với f = tần số (tính bằng Hz)

n = tốc độ rotor (tính bằng v/ph)

P = số lượng cực từ

Với số lượng cực từ đã cho, tốc độ rotor có quan hệ ổn định với tần số stator. Tốc độ rotor này là *tốc độ đồng bộ*. Khi dòng 3 pha cân bằng chạy trên



Hình 1-6 *Mặt cắt máy đồng bộ*

cuộn dây phần ứng, tạo ra từ trường quay đồng bộ, cố định đối với từ trường quay rotor, chúng tương tác tạo ra moment điện từ ngay từ lúc khởi động đầu tiên. Tuy nhiên, đối với động cơ đồng bộ thì *không thể tự khởi động*.

Trong máy điện dc và máy điện đồng bộ, điện áp và dòng điện trên cuộn dây phần ứng quyết định công suất, và trường kích thích chỉ sử dụng điện dc công suất thấp, do đó các loại máy điện này được kích thích kép. *Máy điện cảm ứng*, hoàn toàn khác với hai loại trên, chỉ được kích thích đơn bằng điện chính ba pha trên phần stator.

Dây quấn stator phải mang dòng điện tải và dòng điện kích thích tạo ra từ trường. Dây quấn stator là ba pha (tương tự với dây quấn phần ứng trong máy điện đồng bộ). Khi được kích thích sẽ tạo ra từ trường quay đồng bộ. Động cơ cảm ứng có hai loại cấu trúc rotor.

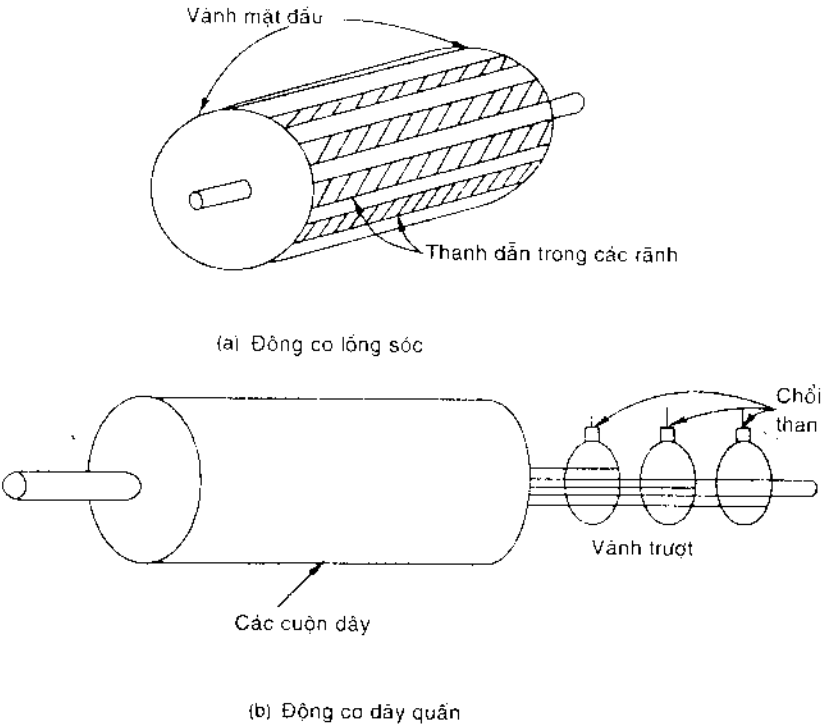
1. *Động cơ lồng sóc*: rotor là loại lồng sóc, có các thanh đồng (hay nhôm) được cài trong các rãnh và nối tắt ngắn mạch ở hai đầu (Hình 1-7a). Cấu trúc này tiết kiệm, kinh tế, nhưng moment khởi động tăng chậm.
2. *Động cơ rotor dây quấn* (hay *vòng trượt*) : rotor có ba cuộn dây ba pha được đấu tam giác hoặc hình sao; ba đầu ra nối với ba vòng trượt tiếp xúc với chổi than (Hình 1-7b)

Các đầu dây này bình thường ngắn mạch khi động cơ đang chạy. Ba điện trở được nối vào ba chổi than trên vòng trượt vào lúc khởi động để tăng moment khởi động

Dây quấn stator tạo từ trường quay, chuyển động qua dây quấn rotor ngắn mạch, sẽ cảm ứng dòng điện trễ hơn. Dòng điện cảm ứng này tạo từ trường riêng quay cùng tốc độ với từ trường dây quấn stator tạo ra. Sự tương tác hai từ trường ổn định này làm tăng moment quay. Rotor chạy ở tốc độ gần như đồng bộ nhưng luôn luôn thấp hơn so với từ trường quay. Ở tốc độ đồng bộ, không có dòng cảm ứng ở rotor nên không có moment quay.

Động cơ điện xoay chiều một pha có điện áp thấp, công suất thấp (vài kW); sự hoạt động của chúng tương tự động cơ ba pha, nhưng từ trường đập mạch một pha làm tăng tổn thất, làm giảm moment quay, và thành phần moment đập mạch làm tăng tiếng ồn trong động cơ.

Lớp cách điện trên máy điện có thể bị tổn hại do nhiệt độ tăng quá mức cho phép, đối với máy điện cỡ lớn, nhiệt độ ổn định quyết định bởi tải của máy điện, làm giảm công suất tổn thất dưới dạng nhiệt bằng cách làm mát máy điện với giới hạn tải cho phép, không để nhiệt độ vượt quá mức giới hạn.



Hình 1-7 *Động cơ lồng sóc và động cơ dây quấn.*

Điều khiển động cơ

Các thành phần và hệ thống dùng để điều khiển sự quay động cơ rất đa dạng và khác nhau. Điều khiển động cơ có thể là tắt mở đơn giản hoặc điều khiển một hay nhiều thông số ngõ ra như tốc độ trục, vị trí góc, gia tốc, moment quay và công suất cơ học ngõ ra. Với sự phát triển nhanh các thiết bị công suất điện tử, các mạch tích hợp (IC) và các module máy tính rẻ, phạm vi, chất lượng và và độ chính xác mạch điện tử điều khiển động cơ trở nên vô tận. Máy điện và các hệ thống điện cơ khác có độ chính xác và độ tin cậy cao nhất được dùng trong các ứng dụng điện hạt nhân và không gian. Sử dụng các bộ biến đổi công suất điện tử, để khởi động, dừng và đổi chiều động cơ de công suất cỡ MW chỉ trong một vài giây. Cuối cùng, khi các nguồn năng lượng như mặt trời, sức gió, ... sẽ trở nên kinh tế qua bộ biến đổi năng lượng điện cơ sẽ phù hợp với các đặc tính thực tiễn.

Kinh tế và các vấn đề khác

Trong một số thiết bị, tính kinh tế là yếu tố quan trọng để chọn máy điện và các bộ điều khiển tương ứng. Quan hệ giữa các đầu tư ban đầu với chi phí hoạt động và bảo trì phải được xét trong sự chọn lựa này. Quyết định chấp nhận động cơ hiệu suất cao có trị giá cao, đặc biệt trong môi trường giá trị năng lượng tăng cao. Biến áp xuất hiện tiếng ồn do từ trường, máy điện quay có tiếng ồn cơ khí do bánh răng, độ hở,... Trong các mức ô nhiễm tiếng ồn ngày nay tính bằng decibel, tiếng ồn máy điện có thể là một hệ số quan trọng để chọn máy điện.

Các xu hướng nghiên cứu và phát triển máy điện

Các tiến bộ hiện nay về mạng tích hợp, trí tuệ nhân tạo, hệ thống thông minh, cáp quang, chất siêu dẫn, các vật liệu sứ, ... tác động mạnh mẽ đến sự thiết kế và chế tạo các máy điện.

Yêu cầu duy trì từ thông theo các quỹ đạo xác định đòi hỏi sử dụng thép Si trong hầu hết các thiết bị điện. Các loại thép kỹ thuật điện hiện nay được chia thành các nhóm, gồm nhóm không định hướng, định hướng cấu trúc hạt, và làm nguội nhanh, trong đó hai nhóm đầu được sử dụng chủ yếu. Do các giới hạn về quỹ đạo từ thông, thép định hướng cấu trúc hạt được dùng chủ yếu trong các biến áp phân phối công suất lớn, còn thép không định hướng được dùng trong các máy quay và thiết bị nhỏ. Hàm lượng Si có tính quyết định đối với đặc tính của thép kỹ thuật điện do làm tăng điện trở suất, giảm tính dị hướng và từ trở, đồng thời làm giảm mức bão hòa từ, nhưng làm cho thép có tính dòn.

Sự phát triển các loại vật liệu mới, như thủy tinh kim loại, ferrite, sứ nhôm, vật liệu chịu nhiệt độ cao, vật liệu từ tính vĩnh cửu (Neomax, Nd-Fe-B,, Co-lantanide, ...) tác động đến cấu trúc và thiết kế của nhiều loại máy điện, không chỉ làm giảm chi phí vật liệu/kVA, mà còn tăng hiệu suất và độ tin cậy.

Có nhiều lĩnh vực tác động trực tiếp đến sự nghiên cứu máy điện:

a) Các linh kiện điện tử với dòng điện/điện áp cao ngày càng phát triển.

b) Các bộ vi xử lý với năng lực và tốc độ xử lý ngày càng cao nhưng chi phí ngày càng thấp.

c) Các công cụ trí tuệ nhân tạo

d) Các kỹ thuật CAĐ/CAM, ...

Các lĩnh vực này đã, đang và sẽ tạo ra cuộc cách mạng trong thiết kế, chế tạo, và vận hành máy điện.

Chương 2

Mạch từ và sự cảm ứng

Giới thiệu

Hệ thống điện từ là thành phần chủ yếu trong máy điện quay, thiết bị điện cơ và thiết bị tĩnh như máy biến áp. Vai trò của hệ thống điện từ là thiết lập và điều khiển điện từ trường để biến đổi, xử lý và truyền năng lượng. Từ trường trong các máy điện quay thực tế (từ vài chục watt trong gia dụng, vài MW trong công nghiệp nặng, hoặc máy phát điện vài trăm MW) là nguyên tắc để biến đổi giữa cơ năng và điện năng hoặc ngược lại. Máy biến áp là thiết bị truyền điện năng qua trung gian từ trường, không phải là thiết bị biến đổi điện cơ hay cơ điện.

Tất cả máy điện (kể cả máy biến áp) đều sử dụng từ trường trung gian để biến đổi và truyền năng lượng. Mạch điện, mạch từ và sự tương tác của chúng sẽ được nghiên cứu.

Nhiều thiết bị cơ bản khác như relay (rơle), bộ ngắt mạch, ... đều hoạt động nhờ vào từ trường.

Chương này tóm tắt các định luật vật lý chi phối từ trường, sự cảm ứng lực điện từ và tạo nên lực cơ học, trình bày khái quát các vật liệu từ tính và các mạch từ đơn giản. Trong các chương kế tiếp, các khái niệm trong chương này được dùng để phân tích biến áp và máy điện.

Mạch từ

Các phương trình Maxwell và quan hệ của môi trường thiết lập từ trường mô tả chính xác từ trường. Các phương trình Maxwell đối với trường là :

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \quad \text{và} \quad \vec{\nabla}.\vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad \text{và} \quad \vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

Trong đó:

$\vec{J}$: mật độ dòng điện dẫn.

$\vec{D}$: mật độ dòng điện dẫn dịch chuyển.

Trường trong máy điện thay đổi chậm (50 Hz), xác định theo Maxwell có thể không cần thiết vì dòng dịch chuyển D có thể bỏ qua. Từ trường có thể mô tả theo định luật Ampere chỉ với dòng dẫn chỉ phối. Phương trình định luật Ampere có dạng tích phân, sử dụng đại số vector như sau :

$$\int_s \vec{J}.d\vec{s} = \oint \vec{H}.d\vec{l} \qquad (2.1)$$

với $\vec{J}$ = mật độ dòng dẫn

$\vec{H}$ = mật độ từ trường

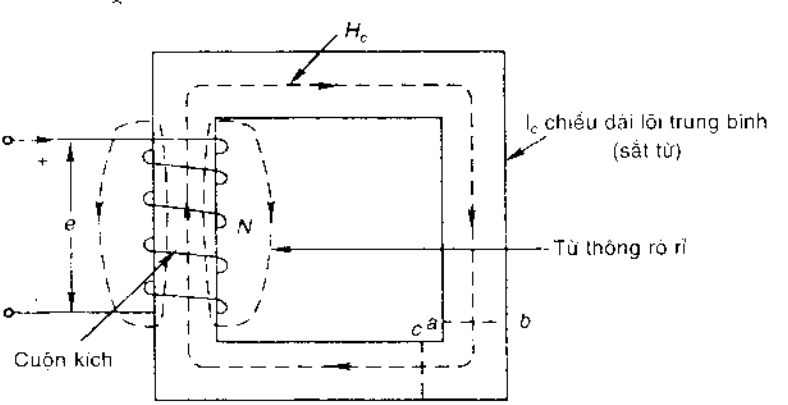
s = tiết diện đường dẫn khép kín có chiều dài l

$d\vec{s}$ = vi phân tiết diện

$d\vec{l}$ = vi phân chiều dài

Hình 2-1 giới thiệu hệ thống điện từ đơn giản gồm một cuộn dây kích thích tạo từ trường và lõi *sắt từ*. Cuộn dây có N vòng, tải dòng điện dc là i A, sẽ tạo ra từ trường trong không gian. Từ thông tập trung hầu hết trong lõi sắt từ. Lõi sắt từ khép kín là *đường dẫn* từ thông trung bình. Tổng dòng dẫn qua lõi sắt từ có tiết diện s là :

$$\int_s \vec{J}.d\vec{s} = Ni$$



Hình 2-1. *Hệ thống từ đơn giản*

Từ pt (2.1)

$$Ni = \oint_l \vec{H}.d\vec{l} \qquad (2.2)$$

Tích $\mathcal{F}$ = Ni có đơn vị là *amp-vòng* (AT) tạo nên từ trường, đó là *lực từ động* (mmf) tương tự lực điện động (emf) tạo ra dòng điện trong mạch điện.

Cường độ từ trường H tạo ra mật độ từ thông B (còn gọi là cường độ từ cảm) tại mỗi điểm trên đường dẫn từ thông.

Đối với đường dẫn từ là lõi :

$$B = \mu H = \mu_0\mu_r H \qquad (2.3a)$$

Đối với đường dẫn là không khí :

$$B = \mu_0 H \qquad (2.3b)$$

Đơn vị mật độ từ thông (hay cường độ từ cảm) B là Wb/m^2, được gọi là *tesla* (T). Đại lượng μ_0 là độ từ thẩm tuyệt đối của chân không, có trị số :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ H/m$$

$\mu = \mu_0\mu_r$ là độ từ thẩm tuyệt đối của vật liệu dẫn từ.

$\mu_r = \mu/\mu_0$ là hệ số từ thẩm tương đối của vật liệu dẫn từ, có giá trị khoảng 2000-6000 đối với sắt từ. Từ thông ϕ trên diện tích S là :

$$\phi = \oint_s \vec{B}.d\vec{s}$$

Trong Hình 2-1, từ thông trên đường dẫn không khí rất bé, có giá trị không đáng kể được gọi là *từ thông rò*. Từ thông do lực từ động Ni tạo ra, tập trung trên lõi sắt từ. Không thể tránh được rò từ nếu không có cách ly từ (rất khó thực hiện). Hiệu ứng từ thông rò trong máy điện là *điện cảm rò*.

Cường độ từ trường $\vec{H}$ là tiếp tuyến với đường từ thông dọc theo đường dẫn, nên phương trình tích phân vector khép kín trong pt (2.2) được chuyển thành tích phân vô hướng:

$$Ni = \oint_l H.dl \qquad (2.4)$$

Khi từ thông rò không đáng kể, từ thông qua tiết diện lõi là hằng số đối với mọi điểm trên đoạn lõi thẳng ở lân cận các góc vuông của lõi, đường dẫn từ thông không còn là đường thẳng, nên H bị giảm sau khi qua góc. Để đơn

giản hóa sự phân tích mạch từ, phải giả định H có cùng giá trị ở khắp chiều dài lõi.

Khi giả sử cường độ từ trường trong lõi là hằng số H_c, pt (2.4) trở thành:

$$\mathcal{F} = Ni = H_c l_c \qquad (2.5)$$

Với $\mathcal{F}$ = lực từ động, tính bằng amp-vòng và l_c = chiều dài lõi trung bình, tính bằng mét (m)

Suy từ Pt (2.5):

$$H_c = \frac{Ni}{l_c} \qquad AT/m \qquad (2.6)$$

Nếu dòng kích thích i biến thiên theo thời gian, H_c cũng biến thiên theo (Pt (2.6)). Kiểu trường này được gọi là trường *tựa tĩnh*. Nếu trường biến thiên chậm (50 Hz) thì dòng dịch chuyển không đáng kể. Trong trường tựa tĩnh, mô hình trường và chiều dài trường không thay đổi nhưng cường độ trường Hc biến thiên theo sự biến thiên dòng điện.

Mật độ từ thông trong lõi được tính theo công thức :

$$B_c = \mu_c H_c \qquad \text{tesla (T)}$$

Và từ thông trong lõi là :

$$\phi = \oint_s \vec{B}.d\vec{s} = B_c A_c \qquad Wb$$

Với A_c = tiết diện lõi

Từ pt (2.6) :

$$\phi = \mu_c H_c A_c = \frac{Ni}{\left(\frac{l_c}{\mu_c A_c}\right)} \quad \text{hoặc} \quad \phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \mathcal{F}\mathcal{P} \qquad (2.7)$$

Với $\mathcal{R} = \mathcal{F}/\phi = l_c/\mu_c A_c$ = *từ trở* của mạch từ (AT/Wb) (2.8)

$\mathcal{P} = 1/\mathcal{R}$ = *độ dẫn từ* của mạch từ

Hệ thống phân bố từ có thể được biểu diễn bằng một mạch từ tập trung theo pt (2.7), tương tự định luật Ohm trong mạch điện dc. Hình 2-2 trình bày mạch từ với lực từ động $\mathcal{F}$ (tương tự lực điện động E), từ trở $\mathcal{R}$ (tương tự điện trở R) và từ thông ϕ (tương tự dòng điện i).

Mạch từ này không hoàn toàn tương tự như mạch điện, vì có hai điểm khác nhau:

Từ trở $\mathcal{R}$ không tiêu tán năng lượng như điện trở R

Hình 2-2 *Sự tương tự điện của mạch từ đơn giản trên Hình 2-1.*

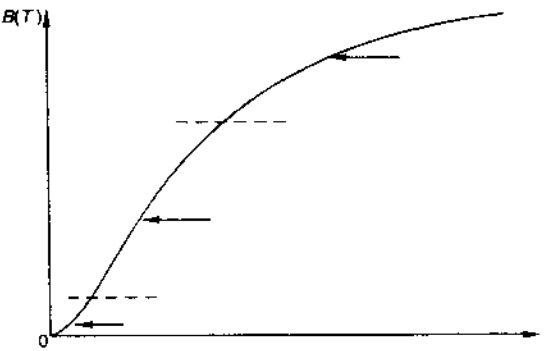
Khi lực từ động $\mathcal{F}$ biến thiên, mạch từ vẫn giữ từ trở cố định, trong khi mạch điện lại xuất hiện cảm ứng khi lực điện động biến thiên. Lý do là không có thời gian trễ giữa dòng điện kích thích và sự thiết lập từ thông (trường tựa tĩnh)

Mạch từ tập trung trong lõi được so sánh với mạch điện để hiểu rõ khái niệm độ từ thẩm μ của lõi và từ trở của lõi cố định theo các giả định nêu trên.

Trong những mạch từ phức hợp, như đa kích thích, và ghép lõi song song nối tiếp, có thể áp dụng các định lý chung về mạch điện như định luật Kirchhoff về điện áp (lực từ động) và định luật Kirchhoff về dòng điện (từ thông).

Đặc tuyến từ hóa (quan hệ B-H)

Trong chân không (và vật liệu không từ tính) độ từ thẩm μ_0 là hằng số, quan hệ B-H là tuyến tính. Nhưng đối với lõi sắt từ trong máy điện, quan hệ B-H không tuyến tính ở hai vùng - *bão hòa* và *từ trễ*. Khi H biến thiên tuần hoàn, do có từ trễ nên quan hệ B-H không tuyến tính. Khi tính toán mạch từ có thể bỏ qua quan hệ không tuyến tính này. Nhưng khi xét tổn thất công suất và dạng sóng dòng điện thì quan hệ này rất quan trọng. Hình 2-3 là đặc tuyến



Hình 2-3 *Đường cong từ hóa của vật liệu sắt từ*

từ hóa đặc trưng cho quan hệ B-H của vật liệu sắt từ. Khởi đầu là vùng không tuyến tính, đoạn giữa là vùng tuyến tính và cuối là vùng bão hòa. Ở vùng bão hòa B tăng chậm hơn H so với vùng tuyến tính. Ở vùng bão hòa sâu, vật liệu được xem như chân không.

Về mặt kinh tế, máy điện quay và biến áp được thiết kế với vật liệu từ có bão hòa nhẹ (ở trên vùng tuyến tính). Trong tính toán mạch từ thực tế, phải dùng đường cong từ hóa để phân giải đồ thị/số liệu.

Lõi có khe hở không khí

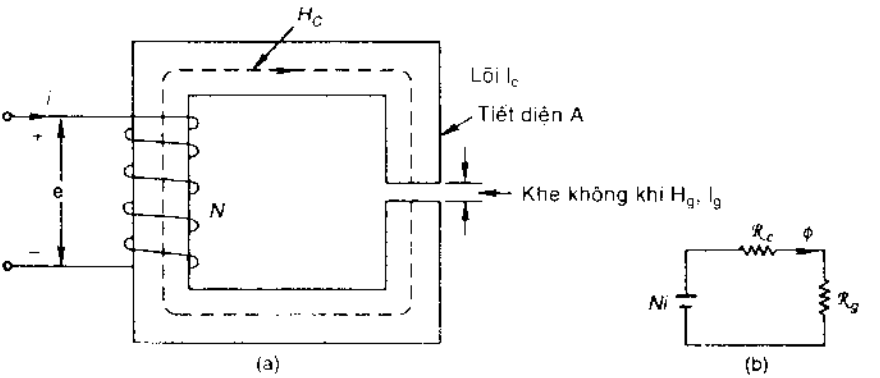
Hình 2-1 là biến áp có dây quấn trên lõi khép kín. Máy điện quay có phần tử chuyển động nên lõi phải có khe hở không khí. Hình 2-4 là mạch từ có một khe hở không khí. Khe hở không khí hẹp, nên từ thông chạy trong lõi đi thẳng qua khe hở. Mật độ từ thông trong khe hở bằng với trong lõi (thực tế hơi nhỏ hơn trong lõi). Độ từ thẩm μ_C của lõi xem như không đổi (đặc tuyến từ hóa tuyến tính).

Lõi và khe hở tiêu thụ lực từ động theo Hình 2-4

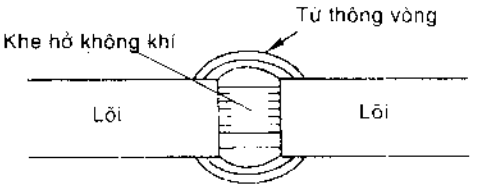
$$Ni = H_C l_C + H_g l_g \tag{2.9a}$$

$$Ni = \frac{B_C}{\mu_C} l_C + \frac{B_g}{\mu_0} l_g \tag{2.9b}$$

Giả sử toàn bộ từ thông đều đi thẳng qua khe hở không khí (từ thông ngoài biên khe hở xem như không đáng kể) (Hình 2-5)



Hình 2-4 *Mạch từ có khe hở không khí và mạch điện tương đương*



Hình 2-5 *Từ thông móc vòng ra biên ngoài ở khe hở không khí*

$$B_g = B_C$$

$$\phi = B_C \cdot A = B_g A \tag{2.10}$$

Từ Pt (2.9), (2.10)

$$Ni = \phi\left(\frac{l_C}{\mu_C A}\right) + \left(\frac{l_g}{\mu_0 A}\right) \tag{2.11}$$

hay

$$\mathcal{F} = \phi\,(\mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g) = \phi\,\mathcal{R}_{eg} \tag{2.12}$$

Từ Pt (2.12)

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g} = \frac{\mathcal{F} / \mathcal{R}_g}{1 + \mathcal{R}_C / \mathcal{R}_g} \tag{2.13}$$

Vì μ_C gấp 2000 - 6000 lần μ_0 trong vật liệu sắt từ và $l_C >> l_g$:

$$\phi \approx \mathcal{F} / \mathcal{R}_g \tag{2.14}$$

Phương trình (2.14) có ý nghĩa là trong mạch từ có khe hở không khí, từ trở của lõi có thể bỏ qua, độ chính xác không thay đổi đáng kể. Điều này được ứng dụng trong máy điện quay.

Tính toán mạch từ

Nói chung, các tính toán mạch từ thường gồm hai loại vấn đề:

- Xác định sự kích thích cần thiết để có lực từ động thiết lập từ thông mong muốn (hay mật độ từ thông) trong mạch từ. Đây là trường hợp thiết kế thiết bị điện cơ.
- Xác định dạng hình học mạch từ và lực điện từ, khi chưa biết mật độ từ thông

Trong mạch khuếch đại từ, từ thông hình thành cần xác định tương ứng với sự kích thích của một hay nhiều cuộn dây quấn. Đặc tuyến B-H của vật liệu sắt từ không tuyến tính nên khi tính toán cần dùng phương pháp đồ thị/số liệu.

Từ thông rò

Trong tất cả các mạch từ thực tiễn, hầu hết từ thông bị ràng buộc theo đường dẫn xác định bằng cách dùng các lõi từ, nhưng một lượng nhỏ từ thông luôn luôn rò rỉ ra bên ngoài, được gọi là từ thông rò. Rò rỉ là đặc tính của mọi mạch từ và không thể loại bỏ hoàn toàn. Các tính toán về mạch từ chính thường được thực hiện với hiệu ứng từ thông rò rỉ thường được bỏ qua hoặc xét theo thực nghiệm. Sự rò rỉ từ thông có ảnh hưởng xấu đến sự hoạt động của máy điện ac và máy biến áp.

Từ thông bên ngoài

Ở khe hở không khí trong lõi từ, từ thông móc vòng ra biên ngoài khe hở như Hình 2-5. Sự mở rộng khu vực hiệu ứng này làm suy giảm mật độ từ thông trung bình trong khe hở không khí, và gây nhiễu loạn từ thông trong lõi gần khe hở, hiệu ứng biên ngoài khe hở tăng khi chiều dài hở tăng. Các hiệu chỉnh hiệu ứng biên ngoài với khe hở ngắn (như trong máy điện) được thực hiện theo thực nghiệm bằng cách tăng một chiều dài khe hở cho hai chiều tạo ra diện tích đó.

Trong lõi có khe hở không khí, từ trở khe hở không khí được tính theo công thức:

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \qquad \text{với } A_g > A$$

Trong đó A = tiết diện lõi,

A_g = diện tích từ thông đi qua trên khe hở không khí.

Hệ số xếp chồng

Lõi từ gồm các lá sắt từ mỏng nhẹ, được phủ lớp sơn cách điện và ghép xếp chồng lên nhau thành lõi để giảm tổn thất công suất do dòng điện Eddy (hay Foucault) gây ra. Tỉ số giữa tổng các mặt cắt ngang các lá sắt từ với mặt cắt lõi nguyên khối được gọi là hệ số xếp chồng ($k<1$). Hệ số xếp chồng phụ thuộc bề dày lá sắt từ, bề dày càng tăng, hệ số xếp chồng càng lớn, thường từ 0,5 đến 0,95.

Ví dụ 2-1 Mạch từ Hình 2-4a có các kích thước : $A_c = 4 \times 4$ cm^2, $l_g = 0{,}06$ cm, $l_c = 40$ cm, N = 600 vòng. Giả sử $\mu_r = 6000$ đối với sắt. Tìm dòng kích thích để có $B_c = 1{,}2$ T, từ thông tương ứng và từ thông nối ghép.

Giải

Theo Pt (2.9)

$$Ni = \frac{B_c}{\mu_0\mu_r} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} l_g \qquad \text{(i)}$$

Nếu bỏ qua biên ngoài : $A_c = A_g$; do đó, $B_c = B_g$

$$i = \frac{B_c}{\mu_0 N}\left(\frac{l_c}{\mu_r} + l_g\right)$$

$$= \frac{1.2}{4\pi \times 10^{-7} \times 600}\left(\frac{40}{6000} + 0.06\right) \times 10^{-2} \qquad \text{(ii)}$$

$$= 1.06 \text{ A}$$

$$\phi = B_c A_c = 1.2 \times 1.6 \times 10^{-4} = 19.2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\lambda = N\phi = 600 \times 19.2 \times 10^{-4} = 1.152 \text{ Wb vòng}$$

Nếu tính từ thông biên ngoài, một chiều dài khe được cộng vào từng kích thước của diện tích khe hở không khí, lúc đó :

$$A_g = (4 + 0.06)(4 + 0.06) = 16.484 \text{ cm}^2$$

Hiệu ứng $A_g > A_c$ làm giảm từ trở khe không khí, do đó:

$$B_g = (19.2 \times 10^{-4})/(16.484 \times 10^{-4}) = 1.165 \text{ T}$$

Từ pt (i) :

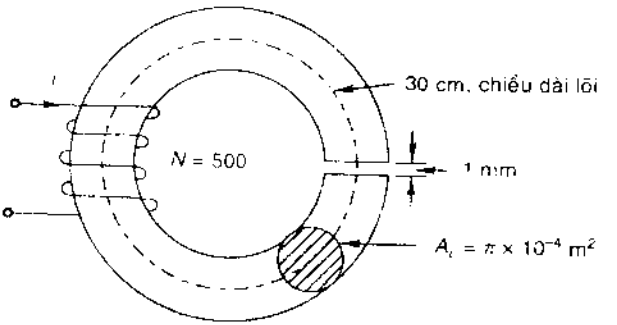
$$i = \frac{1}{\mu_0 N}\left(\frac{B_c l_c}{\mu_r} + B_g l_g\right)$$

$$= \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 600}\left(\frac{1.2 \times 40 \times 10^{-2}}{6000} + 1.165 \times 0.06 \times 10^{-2}\right) \qquad \text{(iii)}$$

$$= 1.0345 \text{ A}$$

Ví dụ 2-2

Một thanh sắt dài 30 cm, đường kính 2 cm, được uốn tròn (Hình 2-6). Dây quấn có 600 vòng. Hãy tính dòng kích thích để tạo từ thông 0,5 mWb trong mạch từ với các trường hợp sau.



Hình 2-6

(i) Không có khe hở không khí

(ii) Có khe hở không khí 1 mm; μ_r (sắt) = 4000 (giả sử là hằng số)

(iii) Có khe hở không khí 1 mm, giả sử các dữ liệu từ hóa của sắt như sau:

H (Amp-vòng/m)	2500	3000	3500	4000
B (T)	1.55	1.59	1.6	1.615

Giải

(i) Không có khe hở không khí :

$$\mathcal{R}_C = \frac{30 \times 10^{-2}}{400 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times 10^{-4}} = 1.9 \times 10^5$$

$$Ni = \varphi \mathcal{R}_C$$

$$i = \frac{\phi \mathcal{R}_C}{N} = \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 1.9 \times 10^5}{600} = 0.158A$$

(ii) Khe hở không khí = 1 mm, μ_r (sắt) = 4000 :

$$\mathcal{R}_C = 1.9 \times 10^5 \text{ (như phần i)}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{1 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times 10^{-4}} = 25.2 \times 10^5$$

$$\mathcal{R}\text{(tổng)} = \mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g = 27.1 \times 10^5$$

$$i = \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 27.1 \times 10^5}{600} = 2.258 \text{ A}$$

(iii) Khe hở không khí = 1 mm, dữ liệu B-H đã cho

$$B_c = B_g = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{\pi \times 10^{-4}} = 1.59\ T \text{ (bo qua từ thông bên ngoài khe)}$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.59}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$AT_g = H_g l_g = \frac{1.59 \times 1 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} = 1260$$

Lực từ động ở khe hở không khí 1260 amp-vòng

Với dữ liệu từ hóa B_c = 1.59 T

$$H_c = 3000 \text{ amp-vòng/m}$$

Lực từ động ở lõi sắt = $H_c\ l_c$ = 3000 x (30 x 10^{-2}) = 900 amp-vòng

Lực từ động tổng cộng = 900 + 1260 = 2160 amp-vòng

i = 2160/ 600 = 3.6 A

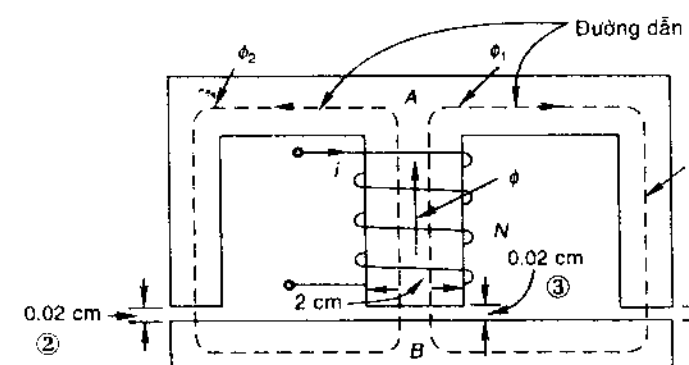
Tính tương tự cho các dữ liệu còn lại

Ví dụ 2-3

Mạch từ Hình 2-7 có lõi thép đúc với kích thước như sau :

Chiều dài từ A đến B qua nhánh ngõ ra = 0.5 m

Chiều dài từ A đến B qua nhánh trung tâm = 0.2 m



Hình 2-7

Từ thông được thiết lập trong khe hở không khí trung tâm là 0.75mWb. Xác định lực từ động của cuộn dây kích thích với vật liệu lõi có dữ liệu (bỏ qua vùng biên ngoài)

(a) $\mu_r = \infty$ (b) $\mu_r = 5000$

Giải

a. $\mu_r = \infty$, không có lực từ động rơi trên lõi từ. Hai nhánh ra là mạch từ song song. Mạch điện tương tự mạch từ này được nêu trên Hình 2-8a. Từ trở trong các khe hở là:

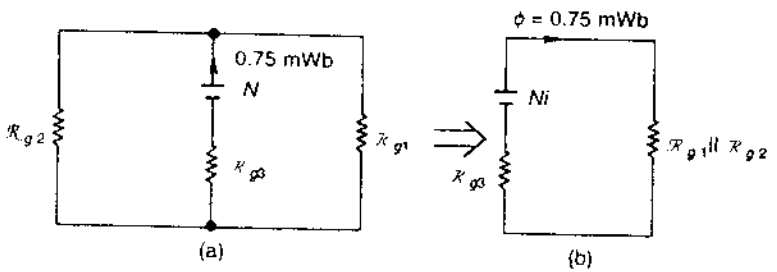
$$\mathcal{R}_{g1} = \frac{0.025 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 10^{-4}} = 1.99 \times 10^{6}$$

$$\mathcal{R}_{g2} = \frac{0.02 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 10^{-4}} = 1.592 \times 10^{6}$$

$$\mathcal{R}_{g3} = \frac{0.02 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2 \times 10^{-4}} = 0.796 \times 10^{6}$$

Từ Hình 2-8b

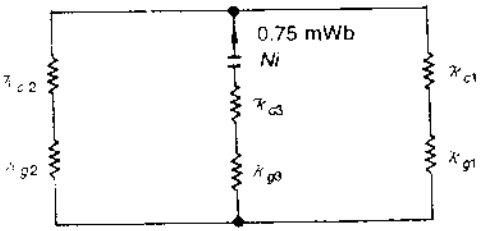
$$\begin{aligned} Ni &= 0{,}75 \times 10^{-3} (\mathcal{R}_{g3} + \mathcal{R}_{g1} \parallel \mathcal{R}_{g2}) \\ &= 0{,}75 \times 10^{-3} (0{,}796 + 0{,}844) \times 106 \\ &= 1260 \text{ amp-vòng} \end{aligned}$$



Hình 2-8 *Mạch điện tương tự mạch từ trên Hình 2-7*

b. $\mu_r = 5000$. Mạch điện tương tự trên Hình 2-9

Chiều dài khe hở được bỏ qua so với chiều dài lõi, từ trở lõi được tính như sau:



Hình 2-9

$$\mathcal{R}_{c1} = \frac{0.5}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 1 \times 10^{-4}} = 0.796 \times 10^{6}$$

$$\mathcal{R}_{c2} = \mathcal{R}_{c1} = 0.796 \cdot 10^{6}$$

$$\mathcal{R}_{c3} = \frac{0.2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0.159 \times 10^{6}$$

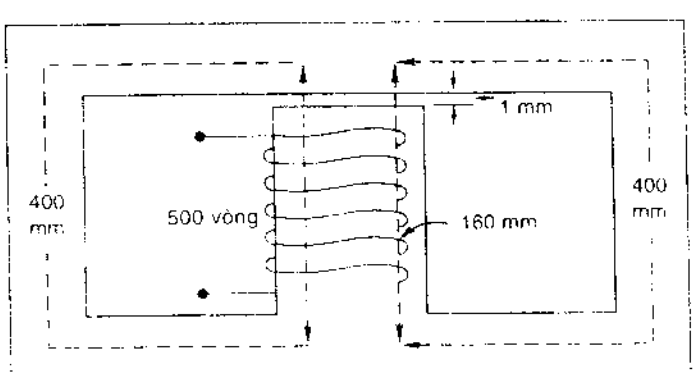
- Từ trở tổng cộng trên mạch từ :

$$\mathcal{R}_{eq} = (\mathcal{R}_{c1} + \mathcal{R}_{c2}) \parallel (\mathcal{R}_{c2} + \mathcal{R}_{g2}) + (\mathcal{R}_{c3} + \mathcal{R}_{g3})$$

$$= \frac{27.86 \times 23.86}{51.72} \cdot 10^{6} + 0.955 \times 10^{6} = 2.24 \times 10^{6}$$

$$Ni = \phi\mathcal{R}_{eq} = (0.75 \times 10^{-3}) \times (2{,}24 \times 10^{6}) = 1680 \text{ amp-vòng}$$

Ví dụ 2-4 Mạch từ Hình 2-10 có lõi bằng thép đúc. Tiết diện nhánh trung tâm là 800 mm² và mỗi nhánh ra là 600 mm². Hãy tính dòng kích thích để có từ thông 0.8 mWb trong khe hở không khí. Từ rò và biên ngoài khe hở được bỏ qua. Đặc tuyến từ hóa của thép được nêu trên Hình 2-16.



Hình 2-10

Giải

Ở khe không khí

$$B_g = \frac{0.8 \times 10^{-3}}{800 \times 10^{-6}} = 1T \quad \text{và} \quad H_g = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = AT/m$$

$$\mathcal{F}_g = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 1 \times 10^{-3} = 796AT$$

Ở nhánh trung tâm $B_c = B_g = 1T$

Từ Hình 2-16 : $H_c = 1000$ AT/m

$$\mathcal{F}_c = H_c \times l_c = 1000 \times 160 \times 10^{-3} = 160 \text{ AT}$$

Vì mạch từ đối xứng, từ thông chia đều cho hai nhánh ra :

Φ (nhánh ra) $= 0.8/2 = 0.4$ m Wb

B (nhánhra) $= (0.4 \times 10^{-3})/(600 \times 10^{-6}) = 0.667$ T

và từ hình 2.16 : $H_c = 375$

$\mathcal{F}$(nhánh ra) $= 375 \times 400 \times 10^{-3} = 150$ AT

$\mathcal{F}$(tổngcộng) $= 796 + 160 + 150 = 1106$ AT

Dòng kích thích $= 1106/500 = 2.21$ A

Ví dụ 2-5 Mạch từ Hình 2-11 có lõi thép với các kích thước sau :

Chiều dài (ab + cd)	= 50 cm; mặt cắt ngang	= 25 cm²
Chiều dài ad	= 20 cm; mặt cắt ngang	= 12.5 cm²
Chiều dài dea	= 50 cm; mặt cắt ngang	= 25 cm²

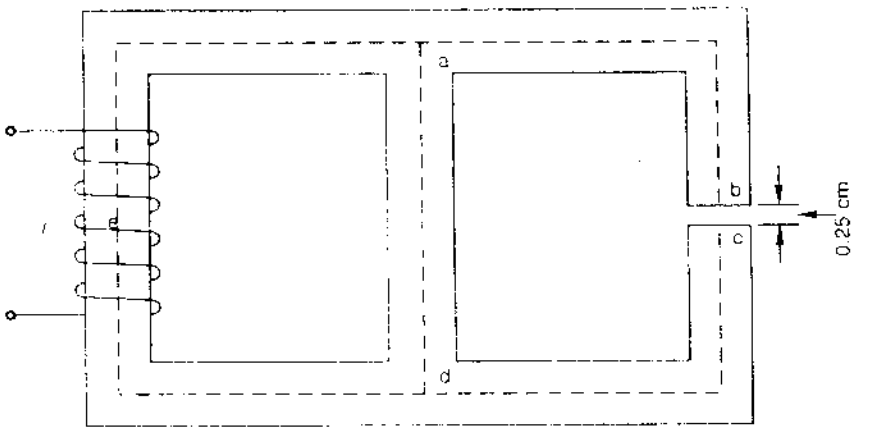
Hãy xác định lực từ động trong cuộn kích thích cần để thiết lập từ thông trong khe hở không khí là 0.75 m Wb. Sử dụng đặc tuyến B-H trên Hình 2-16.

Giải

Giả định không có từ thông biên ngoài khe hở và mật độ từ thông trên đường dẫn abcd là như nhau

$$B = \frac{0.75 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-4}} = 0.3 \text{ T}$$

$$\mathcal{F}_{bc} = \frac{B}{\mu_0} l_{bc} = \frac{0.3 \times 0.25 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} = 60 \text{ AT}$$



Hình 2-11

$H_{ab} = H_{cd}$ (từ Hình 2-16 đối với lõi thép B = 0.3 T) = 200 amp-vòng/m.

$\mathcal{F}_{ab + cd}$ = 200 x 50 x 10^{-2} = 100 amp-vòng

$\mathcal{F}_{ad}$ = 60 + 100 = 160 amp-vòng

H_{ad} = 160/(20 x 10^{-2}) = 800 amp-vòng/m

B_{ad} (từ Hình 2-16) = 1.04 T

ϕ_{ad} = 1.04 x 12.5 x 10^{-4} = 1.3 mWb

ϕ_{dea} = 0.75 x 1.3 = 2.05 mWb

B_{dea} = (2.05 x 10^{-3})/ (25 x 10^{-4}) = 0.82 T

H_{dea} (từ Hình 2-16) = 500 amp-vòng/m

$\mathcal{F}_{dea}$ = 500 x 50 x 10^{-2} = 250 amp-vòng

$\mathcal{F}$ = $\mathcal{F}_{dea}$ + $\mathcal{F}_{ad}$ = 250 + 160 = 410 amp-vòng

Ví dụ 2-6 : Một vòng thép có tiết diện tròn đường kính 3 cm và chu vi 80 cm, khe hở không khí 1mm cắt ngang vòng đó, cuộn dây quấn trên vòng lõi gồm 600 vòng.

(a) Tính dòng kích thích cần để thiết lập từ thông 0.75 mWb trong khe hở không khí, bỏ qua biên ngoài khe và rò từ

(b) Tìm từ thông được tạo trong khe hở không khí nếu dòng kích từ là 2A. Bỏ qua biên ngoài khe hở và rò từ.

Dữ liệu từ hóa :

H (amp-vòng/m) :	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2020
B (T) :	0.10	0.32	0.60	0.90	1.08	1.18	1.27	1.32	1.36	1.40

Giải

(a) $\phi = 0.75 \times 10^{-3}$ Wb

$$B_g = \phi/A = \frac{0.75 \times 10^{-3}}{\pi \times \left(\frac{0.03}{2}\right)^2} = 1.06\ T$$

$B_c = B_g$ (không có từ thông biên ngoài khe hở)

Từ đường cong B-H trên Hình 2-12.

$H_c = 900$ amp-vòng/m

$l_c = 0.8$ m (bỏ qua chiều dài khe hở không khí)

Lực từ động lõi $AT_c = H_c \cdot l_c = 900 \times 0.8 = 720$ amp-vòng

Lực từ động khe $AT_g = (1.06 \times 10^{-3})/(4\pi \times 10^{-7}) = 843$ amp-vòng

Ni = lực từ động lõi + lực từ động khe

= 720 + 843 = 1563 amp-vòng

Do đó i = 1063/ 600 = 2.6 A

(b) Khi biết dòng kích thích và từ thông được xác định từ đặc tuyến B-H đã cho, vấn đề được giải bằng đồ thị/số liệu :

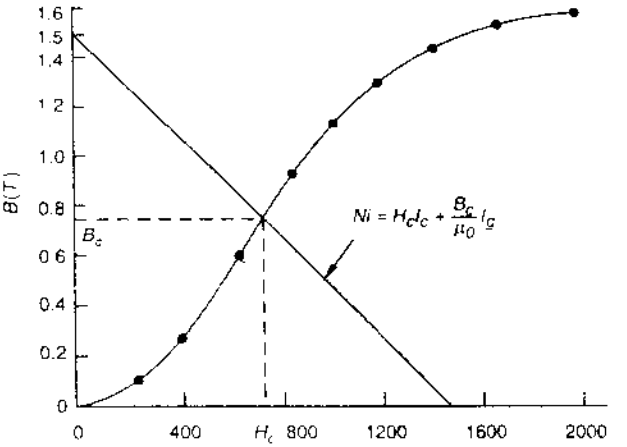
$$Ni = \frac{B_g}{\mu_0} l_g + H_c l_c ; (B_g = B_c) \qquad \text{(i)}$$

Với Ni = 600 x 2 = 1200 amp-vòng

Phương trình (i) trở thành :

$$1200 = \frac{B_c}{4\pi \times 10^{-7}} \times 10^{-3} + 0.8 H_c \qquad \text{(ii)}$$

Phương trình trên là tuyến tính, vẽ trên đồ thị là đường thẳng (Hình 2-12).



Hình 2-12

Phương trình dữ liệu từ hóa đã cho trong đề bài cũng vẽ trên đồ thị là đường cong (Hình 2-12)

Hai đường biểu diễn trên đồ thị cắt nhau tại điểm :

$$B_c = 0.78 \text{ T}$$

Từ đó, tính được từ thông : $\phi = B_c A = 0.78 \times \frac{\pi}{4}(0.03)^2 = 0.55$ mWb

Các vật liệu từ và tính chất của chúng

Vật liệu từ được phân loại dựa vào hệ số từ thẩm tương đối μ_r. Vật liệu *thuận từ* có μ_r hơi lớn hơn 1; vật liệu *nghịch từ* có μ_r hơi nhỏ hơn 1. Các vật liệu này có $\mu_r \approx 1$, nên tính chất từ của chúng gần như tương tự chân không.

Vật liệu có μ_r lớn hơn nhiều lần so với chân không là loại vật liệu sắt từ và ferrite từ, gồm từ *cứng* và *từ mềm*. Vật liệu sắt từ loại cứng gồm các vật liệu nam châm vĩnh cửu như alnico, thép crom, hợp kim Cu-Ni, và nhiều hợp kim khác. Vật liệu sắt từ mềm là sắt và các hợp kim của Fe với Ni, Co, W, và Al. Thép silic là vật liệu sắt từ quan trọng dùng trong biến áp và máy điện. Vật liệu ferrite từ là hỗn hợp ferrite với oxide sắt - MeO. Fe_2O_3. Ferrite cũng chia làm loại ferrite cứng (nam châm vĩnh cửu) và ferrite mềm (Ni-Zn, Mn-Zn). Ferrite mềm được dùng trong các biến áp cao tần, thiết bị sóng vi ba (microwave), ...

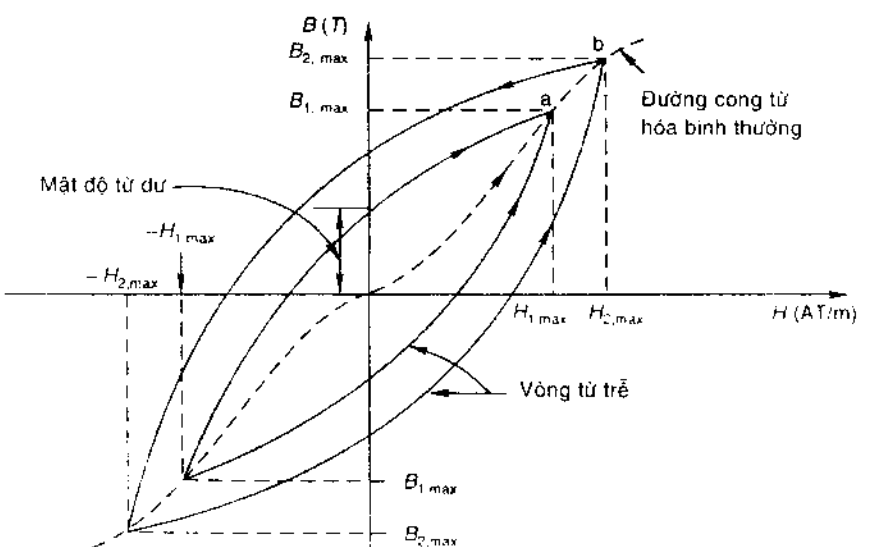
Loại thứ ba là *siêu thuận từ*, được làm từ bột sắt và các bột hạt từ khác, được dùng trong biến áp điện tử và lõi cuộn cảm. Hợp kim *permalloy* (bột Mo-Ni-Fe) là loại vật liệu này.

Tính chất vật liệu từ

Vật liệu từ có độ từ thẩm cao và quan hệ B-H không tuyến tính do bão hòa và từ trễ.

Quan hệ B-H theo sự biến đổi tuần hoàn H là vòng từ trễ, đồ thị trên Hình 2-13 có hai vòng từ trễ tương ứng hai giá trị cực đại mật độ từ thông B_{max}. Vòng từ trễ càng rộng khi B_{max} càng lớn. B là hàm hai giá trị đối xứng của H; với giá trị H cho trước, B tăng trên đường giảm từ và B giảm trên đường tăng từ. Đây là tính từ trễ cơ bản, với B tăng chậm hơn H.

Đường cong từ hóa (bình thường) là đường nét đứt nối tâm tọa độ với hai đầu phía âm và dương của vòng từ trễ. Đây là đường trung bình của chu trình từ hóa, là kết quả khử từ dư của đường tăng từ và giảm từ, và cũng là đường từ hóa một chiều của vật liệu từ nguyên thủy (chưa bị từ hóa). Đường cong từ hóa bình thường cho biết mức độ bão hòa từ.

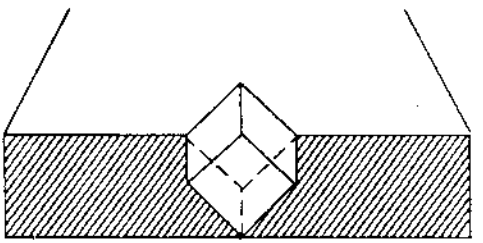


Hình 2-13 *Đường cong B-H và các vòng từ trễ*

Vòng từ trễ và đường cong từ hóa (bình thường) cho biết từ trễ và mức độ từ dư của vật liệu, diện tích vòng từ trễ càng lớn càng tốn hao năng lượng (dạng nhiệt năng) gọi là tổn thất do từ trễ. Tổn thất này phụ thuộc vào chất lượng vật liệu và mật độ từ thông cực đại. Vòng từ trễ thường dùng để minh họa dạng sóng dòng kích thích, đường cong từ hóa (bình thường) thường dùng để thiết kế và tính toán mạch từ. Tổn thất từ trễ cùng với tổn thất do dòng điện xoáy là tổn thất lõi (hay tổn thất sắt) phụ thuộc chiều dày vật liệu và tần số, được tính theo hệ số tổn thất trên đơn vị thể tích.

Lá thép

Hầu hết các biến áp và các bộ phận chính máy điện đều dùng thép silic dưới dạng lá mỏng có cách điện bề mặt. Silic được đưa vào thép để tăng điện trở suất và xếp chồng các lá thép mỏng đó để giảm tổn thất do dòng điện xoáy.



Hình 2-14 *Sự sắp xếp tinh thể trong thép định hướng hạt*

Thép silic có cấu trúc tinh thể theo kiểu lập phương tâm khối, ở các góc và ở tâm khối lập phương đều có nguyên tử. Các cạnh của khối dễ từ hóa (μ_r cao) trong khi đường chéo mặt khối và đường chéo xuyên tâm khối khó bị từ hóa. Nếu tinh thể thép silic được sắp xếp sao cho các cạnh khối song song theo hướng từ hóa, thì vật liệu có độ từ thẩm tương đối cao, hoạt động với mật độ từ thông cao và lượng tổn thất trong lõi giảm.

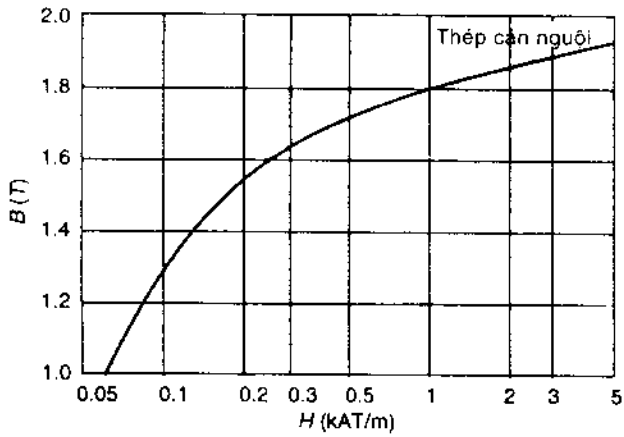
Các lá thép cán nguội đạt được sự sắp xếp tinh thể này, được gọi là *thép có hạt định hướng cán nguội*, được dùng trong thiết bị điện cơ. Sự ủ thép sau khi cán nguội sẽ tăng tính ổn định trong cấu trúc tinh thể. Mật độ từ thông bão hòa và điện trở suất độc lập với sự định hướng hạt.

Sự từ giảo

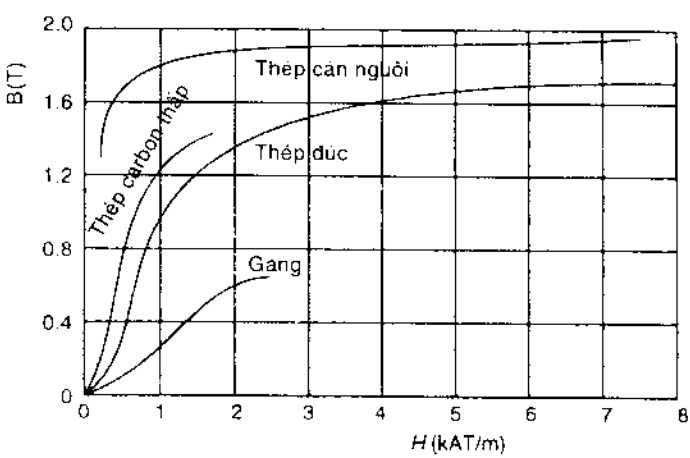
Khi vật liệu sắt từ bị lực từ động từ hóa, kích thước của chúng thay đổi đôi chút. Chiều dài thay đổi chừng 10^{-6} m và kéo theo thay đổi chiều ngang theo hướng ngược lại. Sự thay đổi này do từ giảo tạo nên. Kết quả là có sự tiêu tán năng lượng khi sự từ hóa xoay chiều. Hơn nữa, các ứng suất cơ học liên quan gây ra tiếng ồn trong dải tần số nghe được, ảnh hưởng xấu đến mật độ từ thông cao trong máy biến áp.

Đặc tuyến từ hóa

Hình 2-15 là đường cong từ hóa của thép biến áp và Hình 2-16 là tập hợp so sánh các đường cong từ hóa của một số vật liệu.



Hình 2-15 *Đường cong từ hóa: thép kỹ thuật điện*



Hình 2-16 *Đường cong từ hoá của một số vật liệu*

Lực điện động ứng (tự cảm) và lực điện từ

Định luật cảm ứng Faraday là dạng tích phân của phương trình Maxwell thứ tư, được cho như sau :

$$\int \vec{E}.d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.d\vec{s} \qquad (2.15)$$

Dạng sau khi lấy tích phân phương trình (2.15) đối với cuộn dây N vòng là

$$e = -N\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \qquad (2.16)$$

Với $\lambda = N\phi$ = từ thông liên kết của cuộn dây (Wb vòng) (λ còn được gọi là từ thông móc vòng)

Chiều dương của dòng điện trong cuộn dây là chiều thiết lập từ thông dương và từ thông liên kết. Dấu âm trong phương trình (2.16) có nghĩa là lực điện động ứng để tăng λ là ngược với chiều dương dòng điện. Theo định luật Lenz, phương trình (2.16) được viết thành :

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \qquad (2.17)$$

Với dấu của lực điện động được xác định theo định luật Lenz.

Từ thông liên kết của cuộn dây thay đổi theo ba cách:

(1) Cuộn dây giữ đứng yên, nhưng từ thông qua cuộn dây biến thiên. Lực điện động cảm ứng được gọi là *lực điện động ứng tĩnh* (lực điện động tự cảm tĩnh).

(2) Sự phân bố mật độ từ thông giữ không đổi và tĩnh tại, nhưng cuộn dây chuyển động trong từ thông. Lực điện động ứng được gọi là *lực điện động ứng động* (hoặc chuyển động).

(3) Cả hai thay đổi trên có thể xảy ra cùng lúc, nghĩa là cuộn dây chuyển động trong từ thông biến thiên. Cả hai lực điện động tĩnh và động đều hiện diện trong cuộn dây.

Lực điện động ứng động trong dây dẫn chiều dài l, đặt lệch 90^0 so với từ trường có mật độ từ thông B, và cắt ngang từ thông với tốc độ v được tính theo công thức :

$$e = \left|\vec{v} \times \vec{B}\right| l = Blv\sin\theta \qquad (2.18a)$$

Với θ là góc giữa chiều mật độ từ thông B và vận tốc dây dẫn

Trong máy điện, $\theta = 90^0$, nên :

$$e = Blv \tag{2.18b}$$

Đây là nguyên lý *cắt từ thông*, và chiều của lực điện động được cho theo $\vec{v} \times \vec{B}$, và được xác định theo *qui tắc bàn tay phải của Fleming*

Độ tự cảm

Phương trình (2.17) được viết thành

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = N\frac{d\phi}{di}\frac{di}{dt} = L\frac{di}{dt} \tag{2.19a}$$

với $$L = N\frac{d\phi}{di} = \frac{d\lambda}{di} \quad (H) \tag{2.19b}$$

L là *độ tự cảm* của mạch. Đối với mạch từ có quan hệ B-H tuyến tính (độ từ thẩm μ_r là hằng số) hoặc đối với khe hở không khí, độ tự cảm L = hằng số, độc lập với dòng điện và chỉ phụ thuộc vào hình dạng của mạch và độ từ thẩm của vật liệu; L có công thức :

$$L = \frac{\lambda}{i} \tag{2.20}$$

Theo dạng trường :

$$L = \frac{N^2BA}{Hl} = N^2\mu\frac{A}{l} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = N^2\mathcal{P} \quad (H) \tag{2.21}$$

Độ tự cảm L tỉ lệ với N^2

Độ tự cảm tương hỗ M của hai cuộn dây ghép gần nhau trong một mạch từ chung là :

$$M_{12} = \frac{\lambda_{12}}{i_2} \quad (H)$$

$$M_{21} = \frac{\lambda_{21}}{i_1} \quad (H) \tag{2.22}$$

Với λ_{12} = Từ thông liên kết cuộn dây 1 do dòng điện trong cuộn dây 2.

Với λ_{21} = Từ thông liên kết cuộn dây 2 do dòng điện trong cuộn dây 1.

M_{12} = Độ hỗ cảm giữa cuộn 1 với cuộn 2

M_{21} = Độ hỗ cảm giữa cuộn 2 với cuộn 1

Đối với mạch từ hai bên (ghép chặt hai cuộn dây), tất cả từ thông đều liên kết với hai cuộn dây (không có từ thông rò)

$$M = M_{12} = M_{21} = \sqrt{L_1 L_2} \tag{2.23a}$$

Tổng quát : $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ (2.23b)

Với k = hệ số ghép

Từ Pt (2.20) $\lambda = Li$

Trong cấu hình từ tĩnh, L cố định độc lập với thời gian, nên lực điện động cảm ứng được cho theo Pt (2.19a). Trong thiết bị quay, L và i đều biến thiên (theo thời gian), lực điện động cảm ứng được tính theo biểu thức:

$$e = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt} \tag{2.24}$$

Với $L\frac{di}{dt}$ = lực điện động tự cảm tĩnh

$i\frac{dL}{dt}$ = lực điện động ứng (tự cảm) động

Lực điện từ

Lực điện từ gốc được cho theo phương trình lực Lorentz :

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \tag{2.25}$$

Với I là dòng điện trong dây dẫn có chiều dài vi phân dl. Lấy tích phân theo chiều dài dây dẫn và giả sử B đồng dạng (đơn trị), tổng lực là :

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} = BIl \sin\theta\, \vec{a}_F N \tag{2.26a}$$

Với θ = góc giữa hướng dây dẫn với trường điện từ

$\vec{a}_F$ = vector đơn vị theo hướng được xác định bởi tích vector.

Trong cấu hình máy điện $\theta = 90^0$, Pt (2.26a) trở thành:

$$F = BIl \text{ newton (N)} \qquad (2.26b)$$

Chiều của lực được cho theo $I\vec{l} \times \vec{B}$ hay xác định theo qui tắc bàn tay trái của Fleming. Từ Pt (2.26b), B (Tesla) còn có đơn vị là N/Am.

Ví dụ 2-7 : Đối với mạch từ trên Hình 2-17 hãy tìm độ tự cảm và độ hỗ cảm giữa hai cuộn dây. Độ từ thẩm lõi = 1600 (tiết diện lõi bình thường).

Giải

$$l_1 = (6 + 0.5 + 1) \times 2 + (4 + 2) = 21 \text{ cm}$$

$$l_2 = (3 + 0.5 + 1) \times 2 + (4 + 2) = 15 \text{ cm}$$

$$l_0 = 4 + 2 = 6 \text{ cm}$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{21 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1600 \times 2 \times 2 \times 10^{-4}} = 0.216 \times 10^6$$

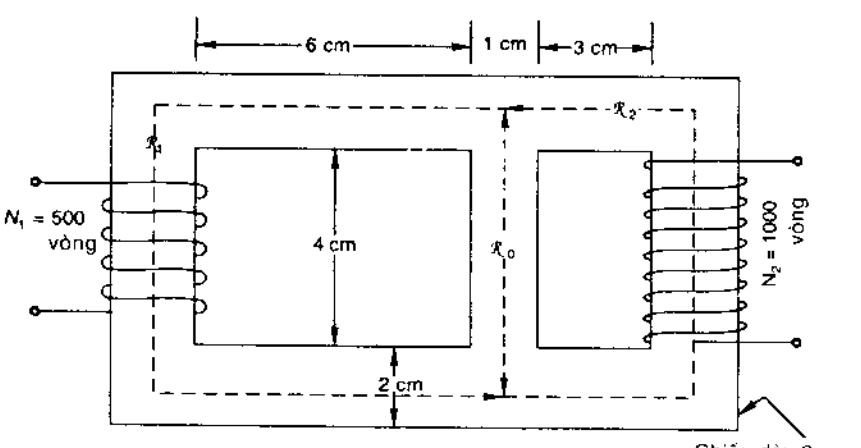
$$\mathcal{R}_2 = \frac{15 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1600 \times 2 \times 2 \times 10^{-4}} = 0.187 \times 10^6$$

$$\mathcal{R}_0 = \frac{6 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1600 \times 2 \times 2 \times 10^{-4}} = 0.149 \times 10^6$$

(i) Cuộn dây 1 được kích thích với dòng 1 A :

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0 \parallel \mathcal{R}_2 = 0.261 + (0.187 \parallel 0.149) = 0.344 \times 10^6$$

$$\phi_1 = (500 \times 1)/(0.344 \times 10^6) = 1.453 \text{ mWb}$$



Hình 2-17

$\phi_{21} = \phi_2 = 1.453 \times 0.149/(0.149 + 0.187) = 0.64$ mWb

$L_{11} = N_1\phi_1 = 500 \times 1.453 \times 10^{-3} = 0.762$ H

$M_{21} = N_2\phi_{21} = 1000 \times 0.649 \times 10^{-3} = 0.64$ H

(ii) Cuộn dây 2 được kích với 1 A

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_2 + (\mathcal{R}_6\mathcal{R}_4)/(\mathcal{R}_6 + \mathcal{R}_4)$$

$$= [0.187 + (0.149 \times 0.281)/(0.149 + 0.281)] \times 10^6$$

$$= 0.284 \times 10^6$$

$\phi_2 = (1000 \times 1)/(0.284 \times 10^6) = 3.52$ mWb

$L_{22} = N_2\phi_2 = 1000 \times 3.52 \times 10^{-3} = 3.52$ H

$M_{12} = N_2\phi_{21} = M_{21}$(ghép 2 bên) = 0.64 H

Mạch từ hoạt động với điện ac

Mạch từ trong biến áp, máy điện ac và nhiều thiết bị điện từ khác được kích thích bằng nguồn điện ac thay vì dc. Với hoạt động bằng điện ac, từ thông được xác định theo điện áp và tần số dòng điện từ hóa phải tự chỉnh điều hòa từ thông cho phù hợp với quan hệ B-H.

Để sử dụng vật liệu một cách kinh tế, từ thông (mật độ từ thông) phải trong vùng không tuyến tính bão hòa nhẹ (không trong vùng bão hòa sâu) trừ khi cần đến vùng tuyến tính. Để phân tích chính xác, không được dự đoán trên cơ sở điện cảm không đổi, mà phải sử dụng mạch tương đương với tham số không đổi. Xét Hình 2-1 với cuộn dây quấn trên lõi sắt có N vòng. Giả sử mạch từ hoàn toàn tuyến tính, dòng điện và từ thông biến thiên hình sine:

$$\phi = \phi_{max} \sin\omega t \qquad (2.27)$$

Với ϕ_{max} = giá trị cực đại của từ thông trong lõi (Wb)

$\omega = 2\pi f$ = tốc độ góc với f = tần số (Hz)

Theo định luật Faraday, lực điện động ứng (tự cảm) là :

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = \varpi N\phi_{max}\cos\varpi t \quad (V) \qquad (2.28)$$

và giá trị hiệu dụng

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \phi_{max} = 4.44 f N \phi_{max} \quad (2.29)$$

hay $$E = 4.44\ f N A_C B_{max} \quad (2.30)$$

Với B_{max} là giá trị cực đại mật độ từ thông B (còn gọi là cường độ từ cảm cực đại) và A_C = tiết diện lõi.

Theo định luật Lenz, cực tính của lực điện động ngược với sự biến đổi từ thông. Do dòng điện tạo ra từ thông tức thời và tỷ lệ với từ thông (trường giả tĩnh), chúng đồng pha với nhau. Từ Pt (2.27) và (2.28), có thể tìm được lực điện động ứng (tự cảm) dẫn từ thông (và dòng điện) với góc 90°. Lực điện động tự cảm (lực điện động ứng) và điện trở rơi trên cuộn dây ngược (pha) với điện áp. Tuy nhiên, điện trở rơi trong các thiết bị điện từ ac rất nhỏ nên có thể bỏ qua để có thể tính gần đúng.

Trên Hình 2-1, công suất điện ngõ vào qua cuộn dây là :

$$p = ie = i\frac{d\lambda}{dt} \quad (2.31)$$

Điện năng ngõ vào được chứa trong từ trường trong khoảng thời gian từ t_1 đến t_2 là :

$$W_f = \int_{t_1}^{t_2} p\,dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i\,d\lambda \quad (2.32)$$

Với W_f = sự tăng năng lượng trường là từ thông liên kết (từ thông móc vòng) trong cuộn dây thay đổi từ λ_1 đến λ_2

Với trường $$W_f = \int_{B_1}^{B_2} \left(\frac{H_C l_C}{N}\right)(A_C N)\,dB_C = A_C l_C \int_{B_1}^{B_2} H_C\,dB_C \quad (2.33)$$

Với $A_C l_C$ = thể tích lõi

Từ (2.33), mật độ năng lượng trường là:

$$W_f = \int_{B_1}^{B_2} H_C\,dB_C \qquad J/m^3 \quad (2.34)$$

Ví dụ 2-8

Trên mạch từ Ví dụ 2-1 và Hình 2-4a, hãy tìm:

(a) Lực điện động tự cảm ứng e đối với $B_C = 1.2 \sin 314t$ (Tesla)

(b) Từ trở $\mathcal{R}_C$ và $\mathcal{R}_g$

(c) Độ tự cảm cuộn dây L

(d) Năng lượng từ trường ở $B_C = 1.2$ T

Giải

(a) Trong Ví dụ 2-1, giá trị λ tìm được là 1.152 Wb-vòng với $B_C = 1.2$ T. B_C biến thiên hàm sine theo phương trình

$$\lambda = 1.152 \sin 314t \text{ Wb-vòng}$$

Lực điện động là : $e = \dfrac{d\lambda}{dt} = 361.7 \cos 341t$ V

(b) $$\mathcal{R}_C = \frac{l_C}{\mu_0 \mu_r A_C} = \frac{0.4}{4\pi \times 10^{-7} \times 6000 \times 16 \times 10^{-4}} = 3.317 \times 10^4$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{6 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7} \times 16 \times 10^{-4}} = 29.856$$

(c) Từ Ví dụ 2-1 :

$$i = 1.06 \text{ A}$$

$$L = \lambda/i = 1.152/1.06 = 1.08 \text{ H}$$

Cũng có thể dùng phương trình (2.21):

$$L = N^2 P = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g} = \frac{(600)^2}{(3.317 + 29.856) \times 10^4} = 1.08 \text{H}$$

(d) Năng lượng chứa trong từ trường tính theo Pt (2.32):

$$W_f = \int_0^{\lambda} i d\lambda = \int_0^{\lambda} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{(1.152)^2}{1.08} = 0.6144 \text{ J}$$

Tổn thất từ trễ và do dòng điện xoáy

Trong vật liệu từ, khi chu trình từ hóa xảy ra sẽ xuất hiện hai loại tổn thất: tổn thất từ trễ và tổn thất dòng điện xoáy, gọi chung là *tổn thất lõi*. Tổn

thất lõi quan trọng trong việc xác định nhiệt, nhiệt độ phát sinh, định mức và hiệu suất máy biến áp, máy điện và các thiết bị từ tính ac khác.

Tổn thất từ trễ

Hình 2-18 minh họa vòng từ trễ đặc trưng cho vật liệu sắt từ. Khi lực điện động tăng từ 0 đến cực đại, năng lượng trường chứa trên một đơn vị thể tích vật liệu là:

$$\int_{B_f}^{B_b = B_m} HdB = \text{diện tích } ofabgo$$

Khi H giảm đến 0, dB âm, từ trường sẽ có năng lượng là:

$$\int_{B_b = B_m}^{B_c} HdB = \text{diện tích } cbg$$

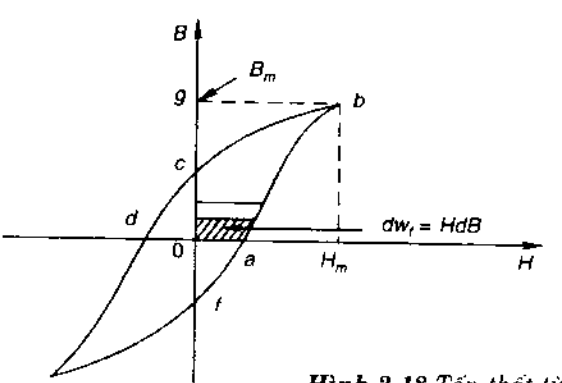
Năng lượng còn lại trong trường (là diện tích ofabco) bị tổn thất dưới dạng nhiệt do hiện tượng từ trễ. Đó là tổn thất từ trễ trong bán kỳ dương. Trong một chu kỳ, tổn thất từ trễ là diện tích vòng từ trễ abcdf, ký hiệu w_h.

Đối với thể tích V vật liệu làm việc ở tần số f (Hz), tổng tổn thất từ trễ là:

$$P_h = w_h . V.F \quad \text{Watt} \tag{2.35}$$

Theo công thức thực nghiệm của Steinmetz :

$$P_h = k_h f B_m^n \quad \text{W/m}^3 \tag{2.36}$$



Hình 2-18 *Tổn thất từ trễ*

Với k_h = hằng số đặc tính vật liệu lõi

B_m = từ thông cực đại

n = số mũ Steinmetz, trị số từ 1.5 đến 2.5 phụ thuộc vật liệu, thường lấy là 1.6.

Tổn thất dòng điện xoáy

Trong lõi từ, từ thông biến thiên theo thời gian sẽ cảm ứng điện áp xung quanh đường từ thông. Do lõi là khối dẫn điện, nên kết quả là có dòng điện chạy xoay tròn khép kín lõi. Đó là dòng điện xoáy (dòng Foucault hoặc Eddy). Dòng điện xoáy gây ra tổn thất công suất dưới dạng nhiệt (i^2R), gọi là tổn thất dòng điện xoáy, phụ thuộc vào điện trở suất vật liệu lõi và chiều dài đường dẫn dòng điện xoáy (trên các phần cắt ngang lõi). Điện trở suất của vật liệu càng cao và chiều dài đường dẫn càng dài, tổn thất dòng điện xoáy càng giảm (do hiệu ứng điện trở tăng). Điện trở suất tăng khi có silic trong thép và thép silic được dùng làm lõi dẫn từ thông. Chia lõi thành những lá mỏng, mỗi lá được sơn cách điện hai mặt, và ghép chúng lại theo đường dẫn từ, làm tăng chiều dài dẫn dòng điện xoáy để giảm tổn thất do dòng điện xoáy. Sự tổn thất thực sự chỉ phụ thuộc chiều dày lá thép. Chiều dày lá thường thay đổi từ 0.3 - 5 mm đối với thiết điện công suất, và từ 0.01 đến 0.5 mm đối với thiết bị dùng trong điện tử có tổn hao thấp.

Theo công thức thực nghiệm, tổn thất dòng điện xoáy là:

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \qquad W/m^3 \tag{2.37}$$

với

$$k_e = K'_e d^2/\rho \tag{2.38}$$

d = chiều dày lá thép.

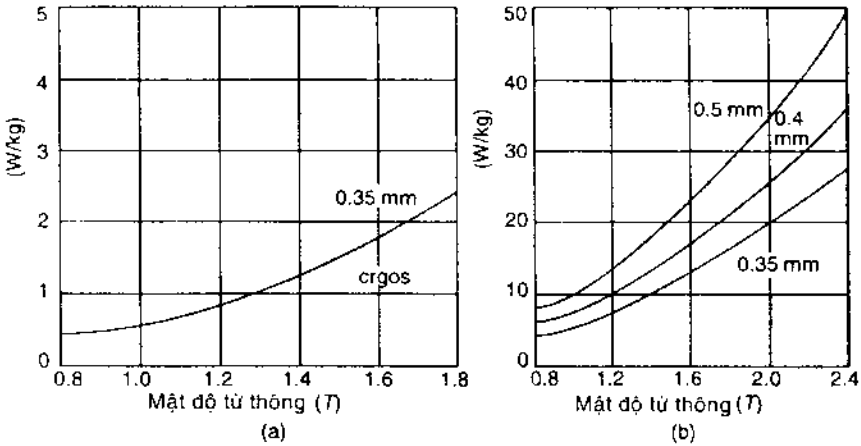
ρ = điện trở suất của vật liệu

Thực tế tổn thất lõi xuất phát từ hai loại biến đổi từ thông

(i) từ thông biến đổi hình sine ổn định (theo thời gian) như trong biến áp

(ii) mật độ từ thông là hằng số nhưng từ thông xoay quanh một trục.

Trong máy điện ac và trong phần ứng máy điện dc hai loại biến đổi từ thông như trên xảy ra cùng một lúc. Tổn thất lõi được đo đạc theo kinh nghiệm và thể hiện bằng đồ thị. Hình 2-19 trình bày giá trị đặc trưng tổn thất lõi xác định (W/kg) của thép (thép định hướng hạt cán nguội), trong đó tổn thất máy điện cao hơn biến áp



Hình 2-19 *Tổn thất lõi ở 50 Hz : (a) biến áp, (b) máy điện*

Ví dụ 2-9

Tổng tổn thất lõi của một mẩu thép Si là 1500 W ở 50 Hz, khi mật độ từ thông không đổi, tổn thất là 3000 W, với tần số tăng đến 75 Hz. Hãy tính riêng biệt tổn thất từ trễ và dòng điện xoáy ở hai tần số đó.

Giải

$P = Af + Bf^2$ hay $P/f = A + Bf$

$1500/50 = A + 50B$ hay $30 = A + 50\,B$ (i)

$3000/75 = A + 75\,B$ hay $40 = A + 75\,B$ (ii)

Giải hệ phương trình (i) và (ii) ta có A = 10, B = 2/5

Từ đó $P = 10f + 2/5f^2 = P_h + P_e$ (iii)

Ở 50 Hz $P_h = 10 \times 50 = 500$ W

$P_e = 2/5 \times 2500 = 1000$ W

Ở 75 Hz : $P_h = 10 \times 75 = 750$ W

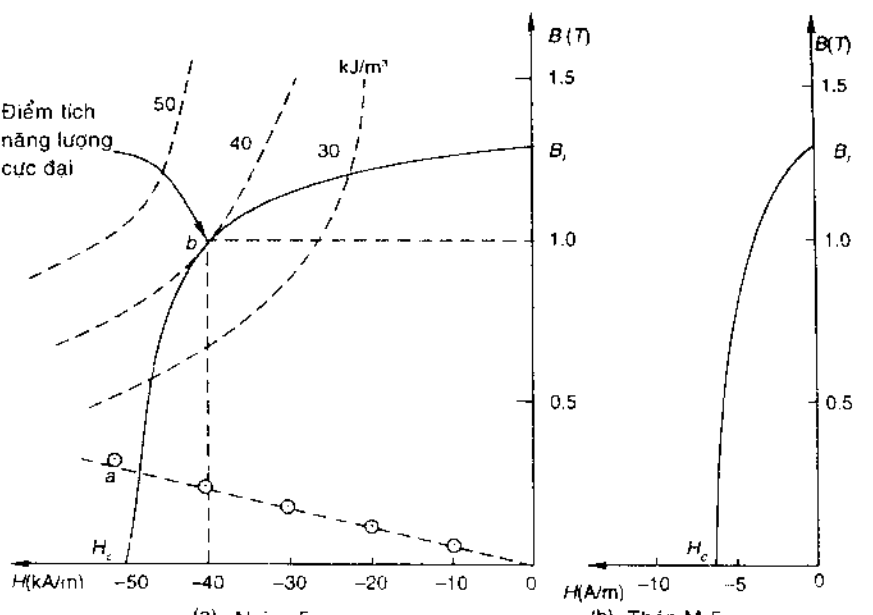
$P_e = 2/5 \times (75)^2 = 2250$ W

Nam châm vĩnh cửu

Nam châm vĩnh cửu là nguồn kích thích quan trọng được dùng để phân chia năng lượng trong mạch từ của máy điện quay và các loại thiết bị cơ điện khác. Có ba lớp vật liệu từ tính vĩnh cửu (vật liệu từ cứng) được dùng trong động cơ điện dc nam châm vĩnh cửu (PMDC) gồm alnico, gốm (ferrite) và vật liệu đất hiếm. Nam châm alnico được dùng trong động cơ đến 200 kW trong khi nam châm gốm rất hiệu quả trong động cơ vài kW. Vật liệu nam châm đất hiếm rất đắt tiền, chỉ kinh tế khi sử dụng trong động cơ rất nhỏ.

Nam châm mới nhất là loại Nd FeB. Ở nhiệt độ phòng, đây là tích năng lượng cao nhất trong tất cả các nam châm khả dụng. Độ dẫn từ cao và độ kháng từ cho phép giảm nhỏ kích cỡ khung động cơ so với động cơ nam châm gốm. Đối với nhiệt độ rất cao, nam châm alnico hoặc cobalt đất hiếm thường được sử dụng.

Hai đại lượng quan trọng của nam châm vĩnh cửu (PM) được xác định dưới đây quy chiếu theo góc phần tư thứ hai của vòng từ trễ.



Hình 2-20 *Phần tư thứ hai của vòng từ trễ. (a) Alnico 5, (b) Thép M-5*

Từ hóa vĩnh cửu hay mật độ từ dư B_r: đó là mật độ từ thông bị hút vào cấu trúc từ khép kín khi lực từ động (và cường độ từ trường H) giảm đến 0.

Độ kháng từ: là số đo lực từ động (hay H) khi mật độ từ thông giảm đến 0, sẽ khử từ vật liệu, và có giá trị âm, đơn vị là kA/m.

Góc phần tư thứ hai trên vòng từ trễ đối với Alnico 5 và thép M-5 được nêu trên Hình 2-20a và 2-20b. Mật độ từ dư và độ kháng từ như sau:

Almico 5 : $B_r \approx 1$ T, $H_C = -50$ kA/m

Thép M-5 : $B_r \approx 1.4$ T, $H_C = -6$ kA/m

Tuy B_r của thép M-5 cao hơn B_r của alnico, nhưng H_C của alnico lớn hơn H_C của thép M-5.

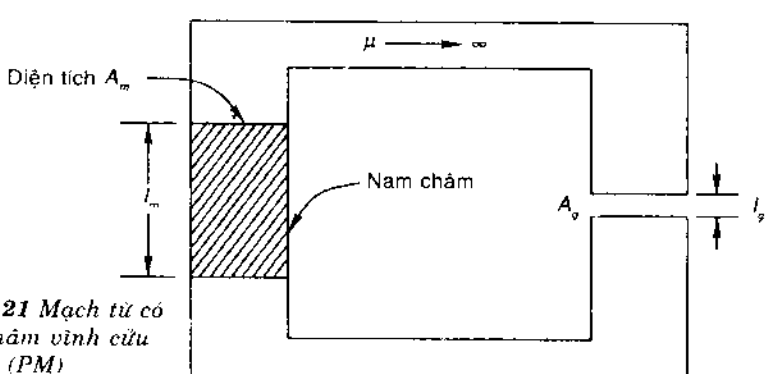
Tích năng lượng cực đại $(BH)_{max}$: là tích BH lớn nhất; đó là giá trị mật độ năng lượng (J/m³) cực đại tại một điểm trên phần tư thứ hai của vòng từ trễ. (Hình 2-20a). Tại điểm này vật liệu có thể tích nhỏ nhất cung cấp từ thông cho trước trong khe hở không khí.

Ví dụ 2-10 Mạch từ Hình 2-21 với lõi có độ từ thẩm rất cao. Chiều dài khe hở không khí $l_g = 0.5$ cm và phần nam châm vĩnh cửu (alnico 5) dài $l_m = 2.4$ cm. Giả sử μ của lõi = ∞. Hãy tính mật độ từ thông B_g trong khe hở không khí. $A_m = 4$ cm²

Giải

$$\mu_{lõi} = \infty \quad \Rightarrow H_{lõi} = 0$$

Từ định luật mạch của Ampere



Hình 2-21 *Mạch từ có nam châm vĩnh cửu (PM)*

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 = \mathcal{F} \quad (2.39)$$

Hoặc
$$H_g = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)H_m \quad (2.40)$$

H_g cường độ từ trường trong khe hở không khí

H_m cường độ từ trường trong nam châm vĩnh cửu

Phương trình (2-40) cho thấy trường trong khe hở không khí là trường âm (đối với nam châm vĩnh cửu). Từ thông liên tục ϕ :

$$\phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (2.41)$$

$$B_g = \mu_0 H_g$$

Từ (2.40) và (2.41), có :

$$B_m = -\mu_0\left(\frac{A_g}{A_m}\right)\left(\frac{l_m}{l_g}\right)H_m \quad (2.42)$$

Thay trị số:

$$B_m = -6\,\mu_0\,H_m = -7.54 \times 10^{-6}\,H_m \quad (2.43)$$

Đây là đường thẳng (được gọi là *đường tải*) trên Hình 2-20(a), cắt đường cong khử từ tại điểm a; do đó tìm được B_m tại điểm a trên đồ thị:

$$B_g = B_m = 0.33\ T$$

Chú ý: Trong bài tập trên nếu thay bằng thép M-5, kết quả đường tải tương tự như phương trình (2-43), và tìm được $B_m = 4 \times 10^{-5}$ T, rất thấp so với B_m của Alnico 5.

Từ phương trình (2.41):

$$B_g = \mu_0 H_g = -\mu_0\left(\frac{l_m}{l_g}\right)H_m \quad (2.44)$$

Từ (2.41) và (2.44) :

$$B_g = \mu_0\left(\frac{l_m A_m}{l_g A_g}\right)(-H_m B_m)$$

$$= \mu_0\left(\frac{V_0 l_m}{V_0 l_g}\right)(-H_m B_m) \quad (2.45)$$

$$V_0 l_m = \frac{B_g V_0 l_g}{\mu_0 (-H_m B_m)} \qquad (2.46)$$

Để tạo ra mật độ từ thông B_g trong khe hở không khí có thể tích $V_0 l_g$, thể tích nhỏ nhất của nam châm vĩnh cửu được tính theo Pt (2.46) với trạng thái hoạt động của nam châm ở giá trị cực đại của tích $H_m B_m$.

Trên Hình 2-20(a) có vẽ các đường cong hyperbol của tích BH không đổi.

Ví dụ 2-11: Đối với mạch từ Hình 2-21, hãy tìm thể tích từ cực tiểu cần thiết để tạo ra mật độ từ thông khe hở không khí là 0.6 T, với A_g = 3 cm².

Giải

Trên Hình 2-20(a), có thể xác định điểm có thể tích từ nhỏ nhất, tương ứng B_m = 1 T và H_m = - 40 kA/m

- Từ phương trình 2.41 :

$$A_m = B_g A_g / B_m = (0.7 \times 3)/1 = 2.1 \text{ cm}^2$$

Từ phương trình 2.39 :

$$l_m = -\frac{H_g l_g}{H_m} = -\frac{B_g l_g}{\mu_0 H_m}$$

$$= -\frac{0.7 \times 0.4}{4\pi \times 10^{-7} \times (-40 \times 10^3)} = 5.57\text{cm}$$

Thể tích từ cực tiểu = 2,1 x 5,57 = 11,7 cm³

Ví dụ 2-10 và 2-11 mô tả vật liệu từ (PM = nam châm vĩnh cửu) cứng.

Ứng dụng vật liệu nam châm vĩnh cửu

Các giá trị phổ biến của tính chất vật liệu từ tính vĩnh cửu được nêu trong Bảng 2-1, gồm mật độ từ dư B_r, lực kháng từ H_c, năng lượng cực đại (BH) max, và điện trở suất.

Bảng 2-1

Loại	Vật liệu	B_r (T)	H_c kA/m	$(BH)_{max}$ kJ/m³	ρ μ_m
A : Gốm	Bột carbinat Ba hoặc St	0.39	200	30	cao

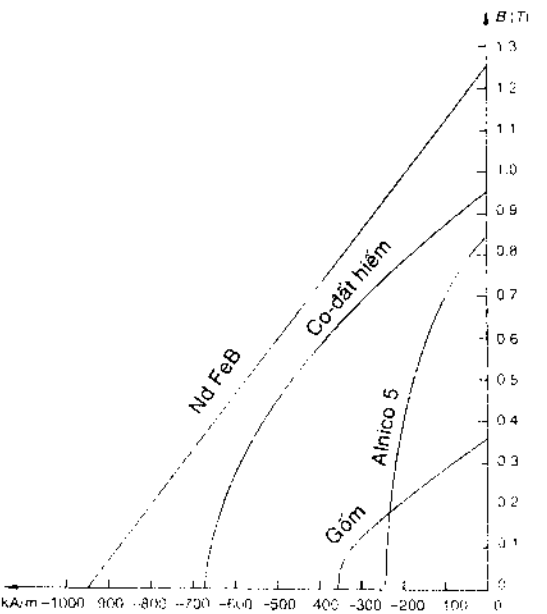
B : Kim loại	Alcomax	1,25	60	45	500
C : Kim loại	Hycomax	0.8	100	35	500
D : Đất hiếm	Somari-cobalt	0.75	600	130	60

Loại vật liệu A rẻ tiền và nặng, phù hợp với các động cơ định mức thấp

Loại vật liệu B và C cứng, chỉ được tạo hình dạng đơn giản.

Loại vật liệu D được dùng trong hầu hết động cơ điện.

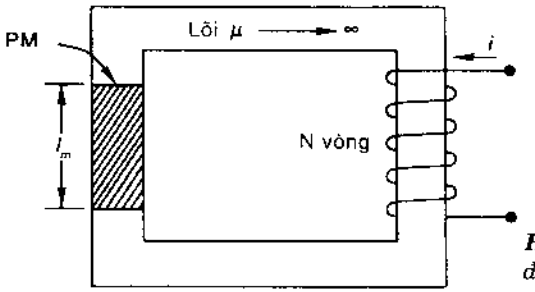
Vật liệu có độ kháng từ cao ít bị khử từ. Hình 2-22 minh họa đường cong từ hóa DC của một số vật liệu thông dụng.



Hình 2-22 *Các đường cong từ hóa dc đối với vài vật liệu từ tính vĩnh cửu*

Vật liệu từ tính đất hiếm là Nd FeB, có B_r, H_C, và $(BH)_{max}$ lớn hơn somari - cobalt; rẻ và có các tính chất cơ học rất tốt, được dùng nhiều trong các ứng dụng PM (từ vĩnh cửu).

Hãy xét mạch từ trên Hình 2-23, gồm một đoạn vật liệu PM trong lõi vật liệu từ mềm có độ từ thẩm cao, với cuộn dây kích thích N-vòng.

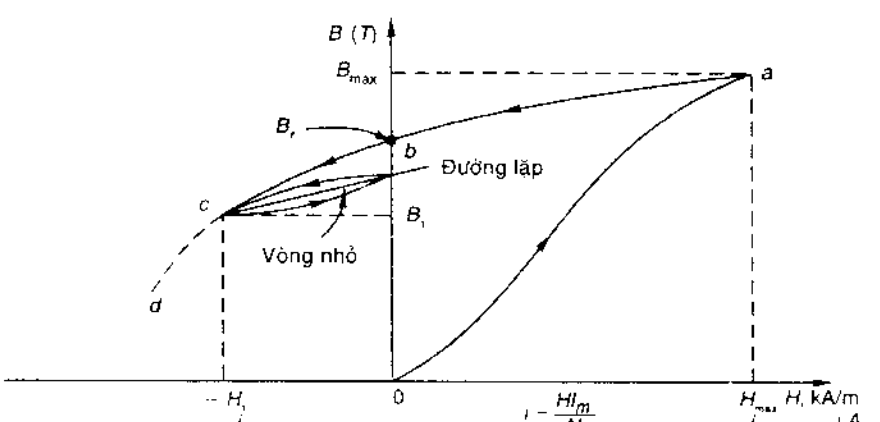


Hình 2-23 *Mạch từ có đoạn PM (từ vĩnh cửu)*

Trên Hình 2-24, giả sử là vật liệu PM ban đầu chưa được từ hóa và dòng điện được đưa vào cuộn kích thích. Lõi có độ từ thẩm $\mu = \infty$, trục hoành X biểu thị cả i và H .

Khi dòng i tăng đến giá trị cực đại (bão hòa), quỹ tích BH tăng từ gốc tọa độ đến giá trị cực đại ở điểm a. Nếu dòng điện giảm đến 0, đặc tuyến BH bắt đầu tạo nên vòng từ trễ gặp trục tung Y tại điểm b, ở điểm này $B = B_r$ và $H = 0$. Khi dòng điện giảm tiếp đến giá trị âm, đặc tuyến BH tiếp tục giảm theo vòng từ trễ trên Hình 2-24. Tại điểm $i = - i_1$, điểm hoạt động là c.

Nếu dòng điện tiếp tục giảm, quỹ đạo của đặc tuyến BH hướng về d (Hình 2.24). Tuy nhiên, nếu dòng từ i_1 trở về 0, quỹ đạo không phải là đường hướng về b. Thay vào đó, sẽ bắt đầu một vòng từ trễ con. Khi dòng điện từ 0 trở về i_1,



Hình 2-24 *Đường cong từ hóa với đường lặp*

vòng từ trễ con sẽ được thay thế bằng đường thẳng, là *đường lặp*. Độ dốc của đường này được gọi là *độ từ thẩm lặp* μ_{rec}, tương tự với đường cong BH nguyên thủy ở H = 0, nghĩa là ở B = B_r. Thực ra, đường lặp chính là tiếp tuyến của đường cong BH trong vùng làm việc hữu dụng của nhiều vật liệu như somari - colbalt, ceramic 7, ... có trị số kháng từ cao.

Khi cường độ từ trường âm không vượt quá H_1, nam châm được coi là vĩnh cửu. Nhưng nếu cường độ âm cao hơn H_1, mật độ từ thông giảm đến giá trị thấp hơn B_1, vòng lặp mới sẽ xuất hiện.

Hiệu ứng khử từ của kích thích âm tương đương sự khử từ của khe hở không khí trong mạch từ.

Các vật liệu này tạo đủ từ thông ngay cả trong mạch từ có khe hở không khí. Với thiết kế đúng, chúng có thể hoạt động ổn định ngay cả khi có sự không ổn định lực và lực từ động. Nam châm vĩnh cửu được dùng nhiều trong các thiết bị nhỏ như loa âm thanh, động cơ dc và ac, ống nói micro, đồng hồ đo điện analog, antene vô tuyến radio, ...

Chương 3

Máy biến áp

Giới thiệu

Biến áp là thiết bị tĩnh, gồm các cuộn dây ghép trung gian qua mạch từ, để nối kết hai cổng có điện áp khác nhau, trong hệ thống điện, cho phép trao đổi điện năng giữa các cổng thông qua từ trường. Biến áp là thành phần quan trọng trong mạch điện từ công suất thấp (như mạch điện tử dòng nhỏ, mạch điều khiển) đến các hệ thống có điện áp rất cao. Các biến áp cỡ nhỏ dùng trong hệ thống thông tin đến cỡ rất lớn dùng trong hệ thống truyền tải cao áp, nặng hàng trăm tấn. Mô hình mạch điện và phân tích sự hoạt động của biến áp là cần thiết đối với hệ thống điện tử, điều khiển và hệ thống công suất.

Biến áp là thiết bị điện từ, sự phân tích sẽ giúp hiểu sâu hơn về điện từ trường trong thiết bị điện cơ, là thiết bị sử dụng từ trường để biến đổi năng lượng giữa hai cổng điện và cơ.

Biến áp được sử dụng trong ba công việc cơ bản sau :

1. Biến đổi điện áp và dòng điện trong hệ thống công suất điện (hệ thống điện lực)
2. Tương hợp trở kháng giữa nguồn và tải để truyền công suất cực đại (trong mạch điện tử và mạch điều khiển).
3. Cách ly điện (giữa mạch này với mạch khác, giữa điện dc với điện ac).

Biến áp được dùng rộng rãi trong các hệ thống nguồn ac do có thể chuyển tải điện năng một cách kinh tế (220-1000kV) và tạo điện áp phân phối thuận tiện (220/380 V) cho công nghiệp, thương mại và gia dụng. Trong các hệ thống điện tử và truyền thông, biến áp được dùng cho nhiều mục đích. Biến áp là thiết bị có vai trò rất quan trọng trong mọi lĩnh vực điện năng.

Biến áp có dạng đơn giản nhất gồm hai cuộn dây cách ly, nối với nhau bằng từ trường chung hoặc hỗ cảm trong lõi vật liệu từ. Khi một cuộn dây (cuộn sơ cấp) nối nguồn điện áp ac, sẽ cảm ứng ra từ thông trong lõi, biến đổi

xoay chiều theo điện áp ac ở cuộn sơ, có biên độ phụ thuộc điện áp cuộn sơ, số vòng dây và tần số điện. Từ thông này liên kết hỗ cảm với cuộn dây khác (cuộn thứ cấp), sẽ tạo điện áp trên cuộn thứ có cùng tần số với điện áp cuộn sơ và có biên độ phụ thuộc số vòng dây cuộn thứ.

Tỉ số biến áp là tỉ số giữa điện áp cuộn sơ với cuộn thứ, đó cũng là tỉ số giữa số vòng cuộn sơ với cuộn thứ.

Nếu điện áp cuộn sơ < điện áp cuộn thứ : *biến áp tăng áp* (máy tăng áp)

Nếu điện áp cuộn sơ > điện áp cuộn thứ : *biến áp giảm áp* (máy hạ áp)

Nếu điện áp cuộn sơ = điện áp cuộn thứ, thì tỉ số biến áp là 1 : 1; biến áp dùng để cách ly điện hai phần mạch điện.

Để liên kết từ tính giữa hai cuộn dây đạt hiệu quả cao, lõi dẫn từ thông phải dùng loại sắt từ có độ từ thẩm cao, hoặc thép kỹ thuật điện (thép định hướng hạt cán nguội). Biến áp này được gọi là *biến áp lõi sắt*, tần số hoạt động 25 - 400 Hz.

Tuy nhiên, trong các trường hợp đặc biệt, mạch từ liên kết các cuộn dây có thể làm bằng vật liệu không từ tính, biến áp là loại có lõi không khí. Biến áp này được dùng trong các thiết bị radio và một số loại khí cụ đo kiểm.

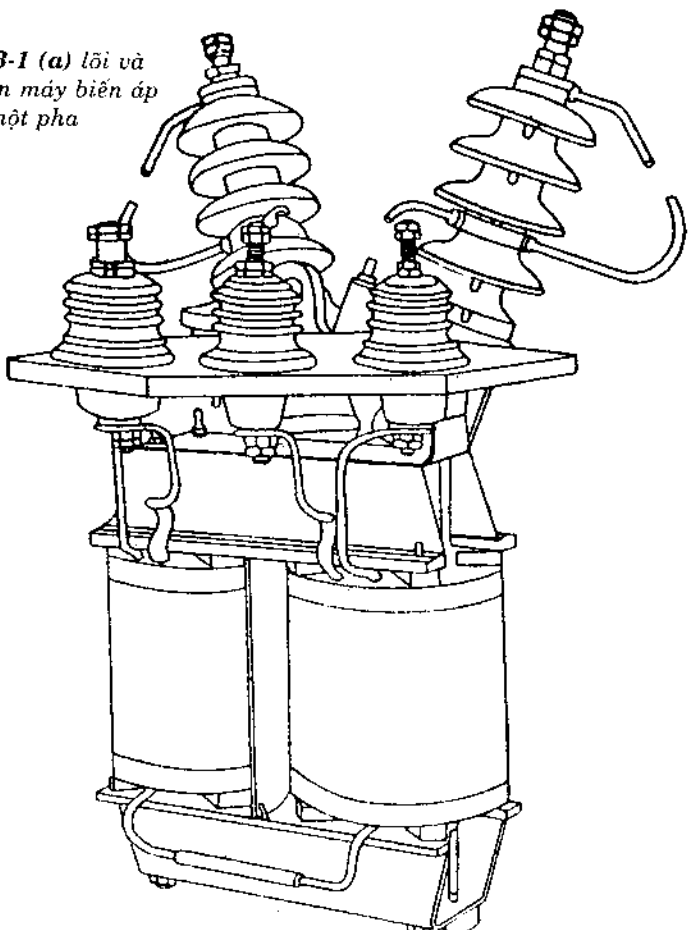
Các cấu trúc biến áp và các nghiên cứu thực hành

Cấu trúc biến áp phụ thuộc vào điện áp cuộn dây, cường độ dòng điện và tần số hoạt động. Cấu trúc phải đáp ứng yêu cầu giải nhiệt ở lõi và cuộn dây một cách hiệu quả; nhiệt độ phát sinh ở đó phải trong giới hạn cho phép theo cấp lớp cách điện. Đồng thời, độ ẩm phải không quá mức cho phép để tránh gây hỏng lớp cách điện. Trong biến áp công suất, hai chỉ tiêu này phải đạt được cùng lúc, bằng cách nhúng biến áp vào thùng kín chứa đầy dầu không cháy, cách điện, được gọi là *dầu biến áp*. Xung quanh phía ngoài thùng dầu này có các ống hay các cánh tỏa nhiệt, để tăng bề mặt tiếp xúc làm nguội, điều này sẽ làm dầu biến áp dễ lưu thông tự nhiên ở trong thùng. Đối với các biến áp lớn hơn, hệ thống làm nguội có bơm đẩy dầu lưu thông tuần hoàn từ nắp (phần đỉnh) thùng dầu đến thân, sau đó trở về đáy thùng. Máy biến áp cỡ nhỏ, được đặt trong nhà bảo vệ hay ngoài trời, được làm nguội bằng không khí. Hình 3-1 (a), (b), (c) minh họa các cấu trúc máy biến áp hiện hành.

Biến áp công suất được bảo vệ thông qua sự trao đổi không khí với khí quyển bên ngoài qua một thùng nhỏ đặt trên nắp thùng dầu chính và nối

thông dầu với thùng dầu chính. Sự bố trí này, bảo đảm diện tích mặt tiếp xúc của dầu với không khí bị giới hạn, để tránh oxide hóa và làm giảm các đặc tính cách điện của dầu.

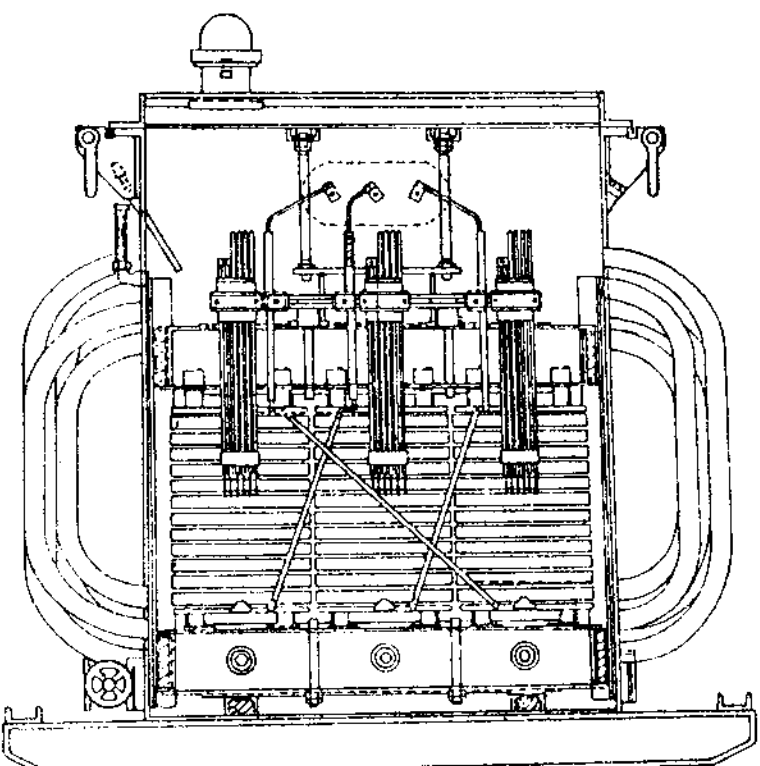
Lõi từ của biến áp là chồng các lá thép mỏng (dày 0.35 mm) bằng thép silic cán nguội, được sơn lớp cách điện mỏng ở hai mặt, có mật độ từ thông cao (1-1.5 T) và có tổn thất lõi thấp. Biến áp xung và biến áp điện tử cao tần có lõi từ là loại ferrite mềm.



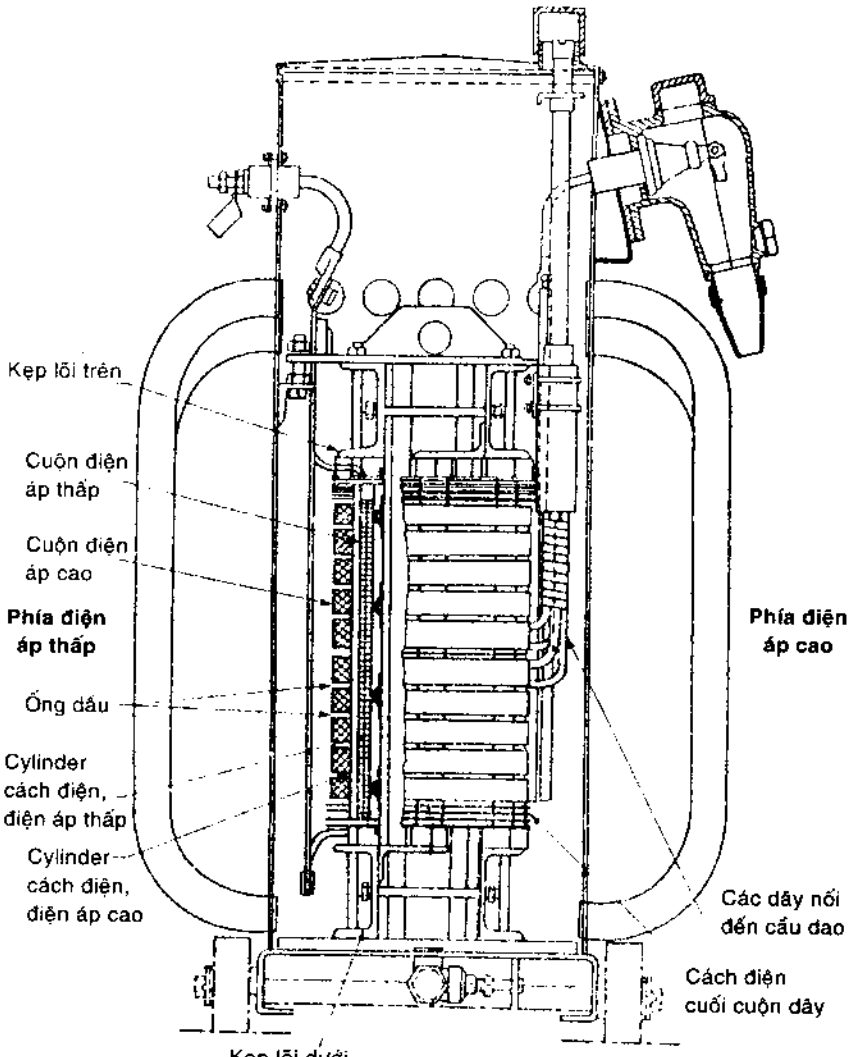
Hình 3-1 (a) *lõi và dây quấn máy biến áp một pha*

Các cuộn dây sơ cấp và thứ cấp được quấn trên lõi, cách điện với nhau và với lõi. Trong thực tiễn có hai kiểu lõi: *kiểu trụ* và *kiểu bọc*. Trong cấu trúc kiểu trụ (Hình 3-2a) các cuộn dây được quấn trên hai trụ của lõi từ hình chữ nhật. Trong kiểu bọc (Hình 3-2b) các cuộn dây được quấn trên trụ trung tâm của lõi từ chữ E (có ba trụ).

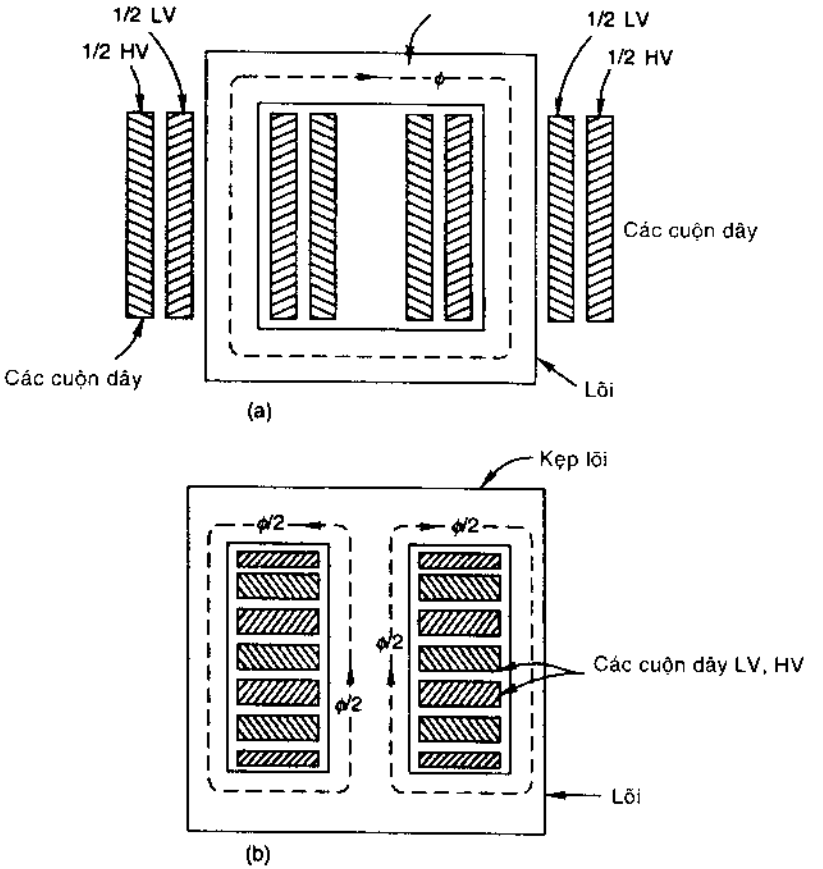
Hầu hết từ thông tập trung ở lõi có độ từ thẩm cao, một phần nhỏ từ thông luôn luôn rò rỉ qua lõi với các đường từ thông bao một phần lõi có dây quấn. Từ thông này chỉ liên kết một cuộn dây, dù nhỏ, nhưng vẫn có tác dụng xấu đối với biến áp. Có thể giảm sự rò rỉ bằng cách đặt hai cuộn dây gần nhau hơn. Trong biến áp kiểu trụ, điều này đạt được bằng cách quấn nửa cuộn cao áp (HV) và nửa cuộn áp thấp (LV) trên mỗi trụ của lõi (Hình 3.2a). Cuộn LV được



Hình 3-1b *Lõi và dây quấn biến áp ba pha*



Hình 3-1c *Biến áp và chi tiết cấu trúc*



Hình 3-2 *(a) biến áp kiểu trụ (b) biến áp kiểu bọc*

quấn ở phía trong và HV ở phía ngoài để giảm lượng cách điện cần dùng. Sự cách điện giữa lõi và cuộn phía trong bị ép theo điện áp thấp. Hai cuộn dây này được sắp xếp theo các cuộn đồng tâm. Trong cấu trúc kiểu vỏ, có thể giảm rò rỉ bằng cách chia từng cuộn dây thành các phần nhỏ và xếp xen kẽ các cuộn HV và LV với nhau (Hình 3.2b).

Cấu trúc kiểu lõi có chiều dài trung bình của các lõi dài hơn và chiều dài trung bình của vòng dây ngắn hơn. Kiểu này thích hợp với yêu cầu điện áp rất cao (EHV) do dễ sắp xếp sự cách điện. Cấu trúc kiểu bọc có tính cơ học tốt hơn,

dễ lắp các cuộn dây. Biến áp kiểu bọc yêu cầu các quy trình chế tạo chuyên biệt cao hơn kiểu lõi, còn kiểu lõi cho phép kiểm tra và sửa chữa các cuộn dây dễ dàng hơn. Trong thực tế thường dùng biến áp kiểu lõi trong các trạm biến áp điện áp cao.

Các cuộn dây biến áp được quấn bằng dây đồng hoặc nhôm. Đối với biến áp điện tử, "dây từ tính" thường được dùng làm dây dẫn. Dây từ tính được phân loại theo ký hiệu cấp cách nhiệt A, B, C, F, và H, biểu thị nhiệt độ vận hành an toàn. Cấp A có nhiệt độ 105^0C và cấp H đến 180^0C.

Các cuộn dây của biến áp công suất lớn sử dụng sự cách điện cao hơn, không chỉ cách điện trên bề mặt dây mà còn giữa các lớp dây quấn.

Làm mát biến áp (loại lớn)

Về cơ bản, có hai nơi gây ra tổn thất là:

(1) *Lõi*: nơi xảy ra tổn thất dòng điện xoáy và từ trễ (do từ thông xoay chiều)

(2) *Dây quấn*: xảy ra tổn thất dây đồng (I^2R) (do dòng điện chạy qua).

Nhiệt phát sinh do tổn thất từ hai phần trên phải được loại bỏ có hiệu quả theo lớp cách điện. Vấn đề làm mát biến áp càng khó khi kích cỡ biến áp càng lớn. Điều này được giải thích như sau:

Sự tổn thất trên mỗi đơn vị thể tích như nhau khi mật độ từ thông trong lõi và cường độ dòng điện trong dây dẫn không đổi bất kể kích thước biến áp. Nếu kích thước biến áp tăng lên k lần, mật độ từ thông và cường độ dây dẫn tăng lên k^2 lần, tổn thất sẽ tăng k^3 lần (tương tự thể tích) trong khi bề mặt tiếp xúc tản nhiệt chỉ tăng k^2 lần, nên tổn thất trên đơn vị diện tích tản nhiệt tăng k lần.

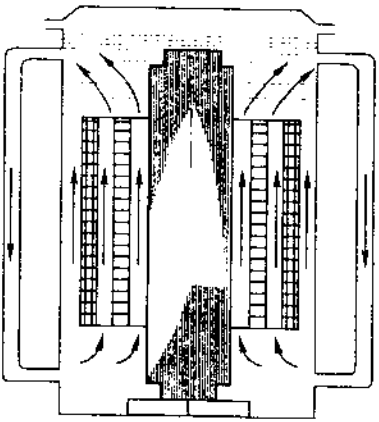
Máy lớn làm mát khó hơn máy nhỏ. Điều này có thể dẫn đến những điểm nóng sâu bên trong dây dẫn và lõi, gây nguy hiểm đến cách điện và đặc tính lõi. Hiệu ứng loại bỏ nhiệt được dùng với ống dẫn làm mát bên trong lõi và dây quấn để loại bỏ nhiệt tại nơi phát nhiệt cần được nghiên cứu kỹ.

Làm mát tự nhiên

Biến áp cỡ nhỏ được nhúng vào dầu trong thùng biến áp. Dầu ở xung quanh lõi và dây quấn nóng lên, dãn nở và di chuyển lên trên đến vùng làm mát ở xung quanh thùng, từ đó chuyển xuống đáy thùng. Chu trình làm nguội của dầu được thực hiện liên tục. Nhiệt thải ra vách thùng là do bức xạ nhiệt

nhưng hầu hết là do đối lưu không khí. Sự luân chuyển tuần hoàn đạt hiệu quả cao khi dầu biến áp có hệ số dãn nở lớn.

Đối với biến áp có kích cỡ lớn hơn, diện tích làm mát của thùng (lá cánh tản nhiệt, ống dẫn tỏa nhiệt) phải tăng lên (Hình 3-3). Sự phân bố này được dùng cho biến áp cỡ trung bình



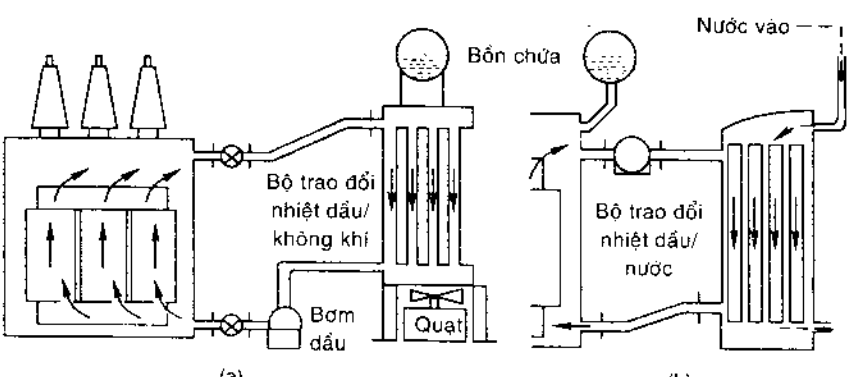
Hình 3-3 *Làm mát tự nhiên trong biến áp*

Làm mát bằng lực bơm

Đối với cỡ máy biến áp 5MVA cần phải tăng thêm hệ thống làm mát bằng bộ tản nhiệt tách riêng với thùng biến áp, dầu lưu thông từ thùng đến bộ tản nhiệt phải cần đến máy bơm. Hình 3-4a là bộ trao đổi nhiệt dầu/không khí. Đối với cỡ biến áp rất lớn, hệ thống làm mát là bộ trao đổi nhiệt dầu/nước (Hình 3-4b).

Ống dẫn dầu trong lõi và trong cuộn dây biến áp để giải nhiệt ột cách hiệu quả. Dòng chảy dọc hiệu quả cao hơn dòng chảy ngang, nhưng trong lõi biến áp kiểu bọc, ống dẫn được đặt ngang.

Vấn đề làm mát biến áp phức tạp hơn so với máy điện quay. Vì phần tử quay trong máy điện tạo gió thổi vào các bộ phận cơ khí gây hiệu ứng giải nhiệt.



Hình 3-4 *Làm mát bằng bơm trong biến áp*

Biến áp chạy không tải

Biến áp chạy không tải (Hình 3-5) có cuộn thứ hở mạch và cuộn sơ được nối với nguồn điện áp biến thiên theo hàm sine có tần số f Hz. Giả sử điện trở các cuộn dây không đáng kể.

Dòng điện ac cường độ nhỏ trong cuộn sơ là *dòng kích thích*, có giá trị tức thời i_0. Dòng kích thích tạo ra từ thông ϕ trong lõi. Giả sử không có từ thông rò, cuộn sơ có N_1 vòng, cuộn thứ có N_2 vòng .

Cuộn sơ có từ thông liên kết là:

$$\lambda_1 = N_1\phi$$

Lực điện động tự cảm là:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1\frac{d\phi}{dt} \qquad (3.1)$$

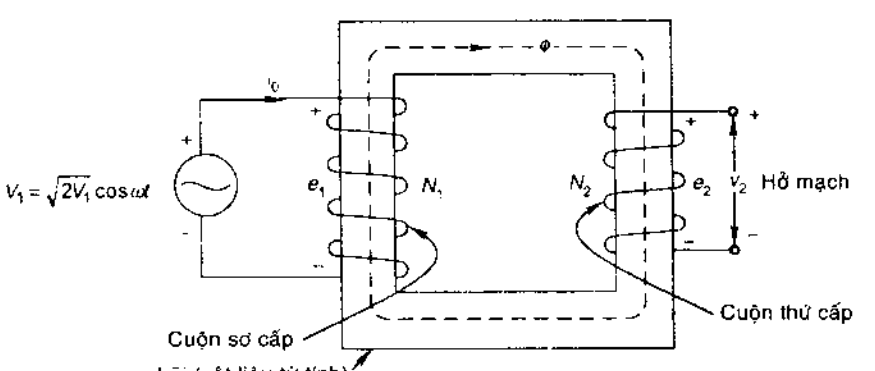
Theo định luật Lenz, chiều dương của lực điện động ngược với chiều dương dòng điện, được đánh dấu bằng dấu + và - trên sơ đồ (Hình 3-5).

Điện trở cuộn dây = 0, nên theo định luật Kirchhoff

$$v_1 = e_1 \qquad (3.2)$$

e_1 và ϕ có dạng hàm sine và có tần số là f Hz (như điện áp vào)

$$\phi = \phi_{max}\sin\omega t \qquad (3.3)$$



***Hình 3-5** Biến áp chạy không tải*

Với ϕ_{max} = giá trị cực đại của từ thông trong lõi

$\omega = 2\pi f$ rad/s (f = tần số điện áp nguồn vào)

Lực điện động tự cảm trong cuộn sơ là

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \varpi N_1 \phi_{max} \cos\varpi t \qquad (3.4)$$

Từ Pt (3.3) và (3.4) cho thấy lực điện động tự cảm sớm pha hơn từ thông theo góc 90^0 (Hình 3-6). Giá trị hiệu dụng của lực điện động tự cảm là :

$$E_1 = \sqrt{2}\pi f N_1 \phi_{max} = 4.44 f N_1 \phi_{max} \qquad (3.5)$$

Với $E_1 = V_1$, và theo Pt (3.2)

$$\phi_{max} = \frac{E_1 (= V_1)}{4.44 f N_1} \qquad (3.6)$$

Nếu tính đến điện trở cuộn sơ (điện trở rất nhỏ)

$$E_1 \approx V_1 \qquad (3.7)$$

Từ pt (3.6) có thể thấy φ_{max} phụ thuộc tỉ số V_1/f (điện áp/tần số)

Từ thông được xác định bởi điện áp nguồn, tần số và số vòng dây quấn. Pt (3.6) được sử dụng cho thiết bị điện từ khác, hoạt động với điện ac hàm sine và điện trở dây quấn không đáng kể.

Từ thông ϕ trên lõi cảm ứng lên cuộn thứ (không có từ thông rò) lực điện động là:

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \qquad (3.8)$$

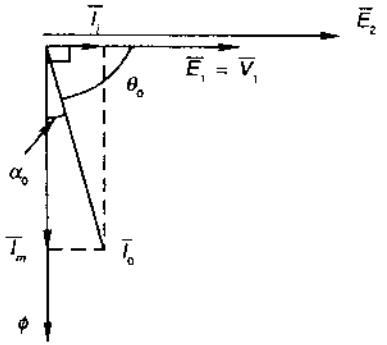
e_1 và e_2 cùng pha (Hình 3-6). Khi cuộn thứ hở mạch, điện áp sẽ là:

$$v_2 = e_2$$

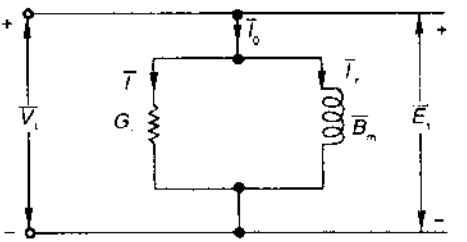
Từ (3.1) và (3.8), ta có tỉ số biến áp

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (3.9)$$



Hình 3-6 *Quan hệ pha giữa lực điện động tự cảm, từ thông và dòng điện kích thích*



Hình 3-7 *Mô hình mạch biến áp chạy không tải (dòng kích thích)*

Trên Hình 3-6, nếu quan hệ B-H của lõi là tuyến tính (không có từ trễ và bão hòa) dòng điện kích thích I_m từ hóa lõi tỉ lệ và đồng pha với từ thông ϕ. Nhưng vì có từ trễ và dòng điện xoáy, nên dòng kích thích chậm pha so với lực điện động theo góc $\theta_0 < 90^0$. Từ trễ tạo nên thành phần dòng điện I_i sớm pha hơn I_m theo góc 90^0. Dòng điện xoáy cũng bổ sung vào thành phần dòng I_i này. Hiệu ứng bão hòa không tuyến tính tạo nên một họ thành phần họa - tần lẻ (sóng hài lẻ) của dòng kích thích. Họa tần thứ ba trội hơn, có thể đạt tới 35 - 40% dòng kích thích. Ở đây, giả sử dòng I_0 và thành phần từ hóa I_m với thành phần tổn thất lõi I_i theo hàm sine và có giá trị tương đương hiệu dụng.

I_m là *dòng điện từ hóa* để tạo ra từ thông ϕ. I_i là *dòng tổn thất lõi* do công suất tác dụng gây ra.

Để tính họa tần, dòng kích thích I_0 là giá trị hiệu dụng sóng sine, xem như tương dòng điện một chiều, chỉ khoảng 5% dòng tải có dạng sine. Từ Hình 3-6, tổn thất lõi là :

$$P_i = E_1 I_0 \cos\theta_0 \qquad (3.10)$$

Trong biến áp thực tế, dòng từ hóa I_m rất thấp và tổn thất lõi bị giới hạn bằng cách sử dụng thép silic có độ từ thẩm cao ở dạng lá.

Từ sơ đồ pha không tải trong Hình 3-6, mô hình mạch song song của dòng kích thích trên Hình 3-7 là tương đương. Theo đó, điện dẫn G_i để tính dòng tổn thất lõi điện áp, cảm ứng B_m để tính dòng từ hóa I_m. Cả hai dòng này được vẽ ở điện áp V_1 bằng lực điện động tự cảm E_1 với điện trở dây dẫn bằng 0 và không có từ thông rò trên cuộn sơ cấp; trong mọi trường hợp, đều có giả thiết $E_1 \approx V_1$.

Ví dụ 3-1: Biến áp chạy không tải có tổn thất lõi 50 W, dòng điện kích thích là 2 A (hiệu dụng), lực điện động cảm ứng là 230 V (hiệu dụng). Xác định hệ số công suất không tải, dòng tổn thất lõi, và dòng từ hóa. Tính các thông số mạch không tải của biến áp. Điện trở dây quấn và từ thông rò không đáng kể.

Giải

Hệ số công suất:

$$\cos\theta_0 = \frac{50}{2 \times 230} = 0.108 \text{ (trễ)}$$

$$\theta_0 = 83.76^0$$

Dòng từ hóa : $I_m = I_0 \sin\theta_0 = 2 \sin(\cos^{-1}0.108) = 1.988$ A

Vì $\theta_0 \approx 90^0$ nên biên độ dòng kích thích và thành phần dòng từ hóa khác nhau. Dòng tổn thất lõi:

$$I_i = I_0 \cos\theta_i = 2 \times 0.108 = 0.216 \text{ A}$$

Trong mô hình mạch không tải (Hình 3-7), tổn thất lõi được tính theo:

$$G_i V_1^2 = P_i$$

$$G_i = \frac{P_i}{V_1^2} = \frac{50}{(230)^2} = 0.945 \times 10^{-3}$$

$$I_m = B_m V_1 \quad \text{hoặc} \quad B_m = \frac{I_m}{v_i} = \frac{1.988}{230} = 8.64 \times 10^{-3}$$

Ví dụ 3-2: Dữ liệu đường cong BH đối với lõi biến áp trên Hình 3-8 được cho theo Bảng dưới đây. Hãy tính dòng không tải với cuộn sơ được kích thích ở 200 V, 50 Hz. Giả sử tổn thất sắt trong lõi là 3 W/kg. Tính hệ số công suất của dòng không tải và biên độ công suất không tải. Mật độ vật liệu lõi = 7.9 g/cc.

Bảng B-H

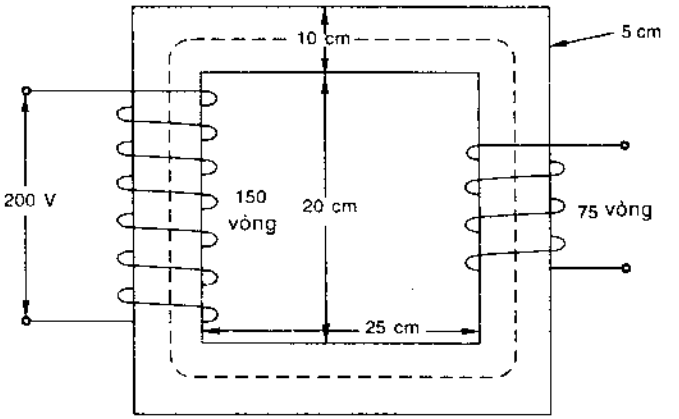
H (AT/m)	50	100	150	200	250	300	350
B (T)	0.14	0.36	0.66	1.00	1.22	1.32	1.39

Giải

Thay giá trị vào Pt (3.5) :

$$200 = 4.44 \times 50 \times 150 \times \phi_{max}$$

$$\phi_{max} = 6.06 \text{ mWb}$$



Hình 3-8

B_{max} = (6.06 x 10^{-3})/ (10 x 5 x 10^{-4}) = 1.212 T

Từ dữ liệu đường cong BH có:

H_{max} = 250 AT/m

AT_{max} = 250 l_C = 250 x 2 (30 + 35) x 10^{-2} = 325

$F_{m\,(max)}$ = 325/150 = 2.17A

Thể tích lõi = 2 (20 x 10 x 5) + 2 (45 x 10 x 5) = 6500 cm^3

Trọng lượng lõi = 6500 x 7.9 x 10^{-3} = 51.35 kg

Tổn thất lõi = 51.35 x 3 = 154 W

I_i = 154/200 = 0.77 A

Theo sơ đồ pha Hình 3-8

I_0 = 0.77 - j 2.17 = 2.3 ∠ -70.5° A

Hay I_0 = 2.3 A (dòng không tải)

Đối với không tải, hệ số công suất = cos 70.5° = 0.334 trễ

Biến áp lý tưởng

Biến áp lý tưởng không có thực, nhưng các đặc tính có thể áp dụng gần đúng cho biến áp thực tế. Các giả thiết lý tưởng hóa bao gồm:

(i) Điện trở cuộn sơ và cuộn thứ = 0, nghĩa là không có tổn thất công suất và sụt áp trên dây quấn, không có điện dung trong biến áp. (Biến áp thực có điện trở cuộn dây nhỏ, điện dung các vòng dây và các cuộn dây không đáng kể ở tần số 50 Hz)

(ii) Không có từ thông rò, từ thông tập trung trong lõi và liên kết với hai cuộn dây. (Biến áp thực có từ thông rò và được phân tích bằng mạch điện tương đương).

(iii) Lõi có độ từ thẩm lớn vô hạn, do đó chỉ cần dòng từ hóa zero để thiết lập từ thông (phương trình 3-6) trong lõi.

(iv) Tổn thất lõi (do từ trễ và dòng điện xoáy) không đáng kể.

Hình 3-9 là biến áp lý tưởng, cuộn sơ có N_1 vòng, cuộn thứ có N_2 vòng, quấn trên một lõi từ. Điện áp nguồn cấp cho cuộn sơ là:

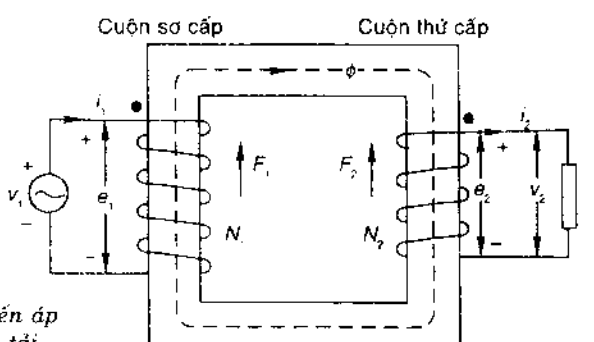
$$v_1 = \sqrt{2}\, V_1 \cos\omega t \qquad (3.11)$$

Khi cuộn thứ hở mạch, từ thông được thiết lập theo Pt (3.6), với giả thiết (i), lực điện động tự cảm sẽ là:

$$e_1 = v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad (3.12)$$

Từ thông ϕ hỗ cảm toàn bộ lên cuộn thứ (giả thiết (ii)), tạo nên lực điện động cảm ứng

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \qquad (3.13)$$



Hình 3-9 *Biến áp lý tưởng có tải*

Các lực điện động trên cuộn sơ và cuộn thứ được đánh dấu cực tính như trên Hình 3-9, dấu "•" ở đầu mỗi cuộn dây, biểu thị tại nơi đó các lực điện động có cùng cực tính. Từ Pt (3.12) và (3.13):

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ (tỉ số biến áp)} \tag{3.14}$$

Tỉ số biến áp là hằng số, e_1 và e_2 cùng pha. Điện áp cuộn thứ là :

$$v_2 = e_2 \tag{3.15}$$

Từ đó:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \tag{3.16}$$

Hay theo giá trị hiệu dụng:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad \text{(như Pt 3.9)} \tag{3.17}$$

Điện áp biến đổi trên hai cuộn dây tỉ lệ trực tiếp với số vòng hai cuộn dây.

Khi cuộn thứ có tải với trở kháng Z_2:

Lực điện động cảm ứng e_2 tạo ra dòng điện i_2 trong cuộn thứ. Dòng điện i_2 tạo ra lực từ động $F_2 = i_2N_2$ đối kháng với từ thông ϕ. Lúc này, dòng điện i_1 trong cuộn sơ (được cấp từ nguồn) tạo ra lực từ động $F_1 = i_1N_1$ có tác dụng khử N_2i_2, để từ thông hỗ cảm ϕ được duy trì không đổi, độc lập với dòng điện tải i_2. Hai lực từ động này có giá trị bằng nhau :

$$i_1N_1 = i_2N_2 \tag{3.18}$$

hay :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \tag{3.19}$$

i_1 và i_2 cùng pha, có chiều theo Hình 3-9

Từ thông ϕ độc lập với tải, và điện trở cuộn thứ = 0, nên $v_2 = e_2$, từ Pt (3.17) và (3.19):

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Hay

$$v_1i_1 = v_2i_2 \tag{3.20}$$

Điều đó có nghĩa là công suất tức thời trong cuộn sơ và cuộn thứ bằng nhau. Giá trị hiệu dụng từ Pt (3.19) sẽ có dạng:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3.21}$$

Có nghĩa là dòng điện biến đổi (trong biến áp lý tưởng) theo *tỉ số ngược* với số vòng dây quấn. Phương trình (3.20) viết theo giá trị hiệu dụng :

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \tag{3.22}$$

Nghĩa là công suất VA vào cân bằng với công suất VA ra

Hình 3-10a là sơ đồ tương đương máy biến áp lý tưởng Hình 3-9, với dấu "•" có cực tính đầu dây tương tự nhau. $\overline{V}_1$ và $\overline{V}_2$ cùng pha; I_1, I_2 cùng pha

$$\frac{\overline{V}_1}{\overline{V}_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{3.23a}$$

$$\frac{\overline{I}_1}{\overline{I}_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3.23b}$$

Từ Pt (3.23a) và (3.23b) suy ra:

$$\frac{\overline{V}_1/\overline{V}_2}{\overline{I}_1/\overline{I}_2} = \frac{N_1/N_2}{N_2/N_1}$$

$$\frac{\overline{V}_1}{\overline{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\overline{V}_2}{\overline{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \overline{Z}_2 \tag{3.24}$$

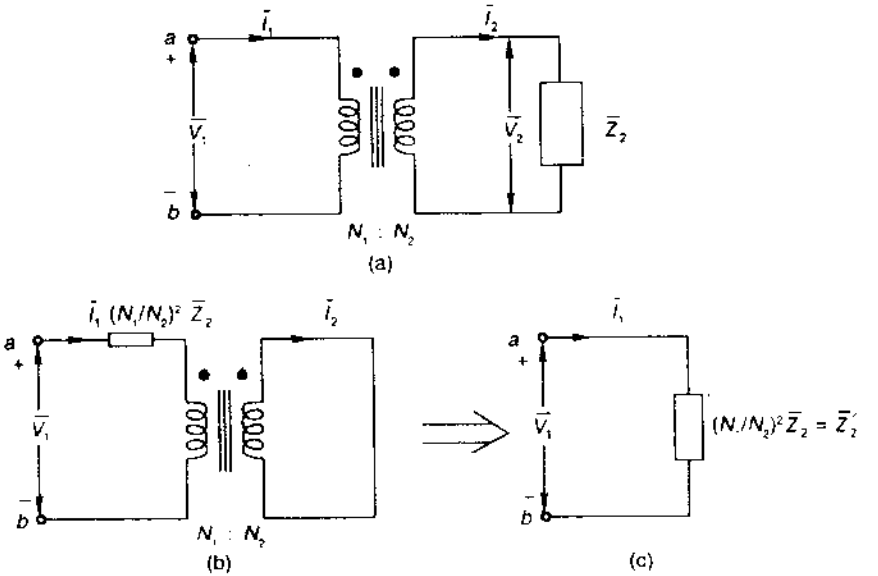
$$\text{hay } \overline{Z}_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \overline{Z}_2 = a^2 \overline{Z}_2 = \overline{Z}_2' \tag{3.25}$$

Trở kháng cuộn thứ khi nhìn từ phía cuộn sơ (nghĩa là trở kháng cuộn thứ đối chiếu với cuộn sơ) tỷ lệ thuận với bình phương tỉ số biến áp.

Pt (3.24) và (3.25) có mạch tương đương là Hình 3-10a được diễn giải bằng Hình 3-10b và 3-10c

Tương tự, trở kháng $\overline{Z}_1'$ của cuộn sơ khi đối chiếu với cuộn thứ là:

$$\overline{Z}_1' = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \overline{Z}_1 = \frac{1}{a^2} \overline{Z}_1 \tag{3.26}$$



Hình 3-10 *Biến áp lý tưởng, trở kháng cuộn thứ đối chiếu với cuộn sơ.*

Điện áp và dòng điện nhìn từ một phía như trên Pt (3.23a và b)

Tóm lại, trong biến áp lý tưởng, điện áp biến thiên theo tỉ số vòng dây, dòng điện theo tỉ số đảo, và trở kháng theo tỉ số bình phương của các số vòng dây, còn công suất và VA không đổi.

Ví dụ 3-3: Giả sử biến áp trên Hình 3-8 là biến áp lý tưởng. Cuộn sơ được nối với tải $5 \angle 30^0$. Hãy tính trở kháng phía cuộn sơ và cuộn thứ, dòng điện và hệ số công suất, công suất thực (công suất tác dụng), và điện áp cuộn thứ.

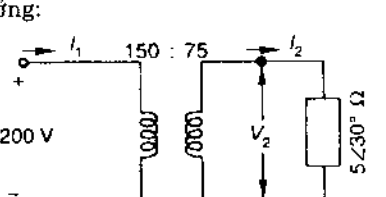
Giải

Hình 3-11 là mô hình của biến áp lý tưởng:

$$\bar{Z}_2 = 5 \angle 30^0 \Omega$$

$$a = N_1/N_2 = 150/75 = 2$$

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \frac{5 \angle 30^0}{(2)^2} = 1.25 \angle 30^0 \Omega$$



Hình 3-11

Điện áp cuộn thứ:

$V_2 = V_1/a = 200/2 = 100$ V

$\bar{I}_2 = 100\angle 0^0/5\angle 30^0 = 20\angle -30^0$ A

hay $I_2 = 20$A; hệ số công suất = $\cos(-30^0) = 0.866$ trễ pha

$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = 20\angle -30^0/2 = 10\angle -30^0$ A

hay $I_1 = 10$A; hệ số công suất = $\cos(-30^0) = 0.866$ trễ pha

Công suất cuộn thứ:

$P_2 = I22$ x trở kháng $5 \angle 30^0 = 202 \times 4{,}43 = 1.732$ kW

Đối với biến áp lý tưởng $P_1 = P_2 = 1.732$ kW

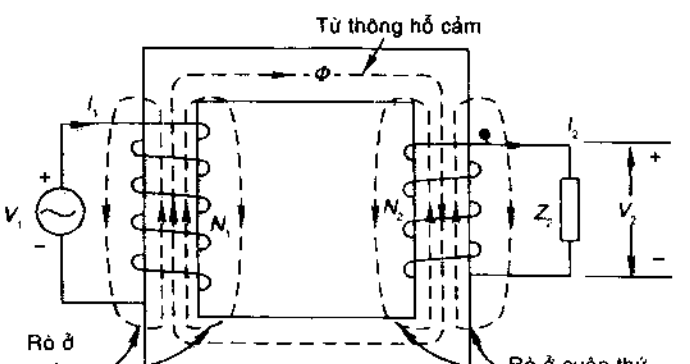
Hay tính theo cách khác:

$P_1 = V_1 I_1 \cos\theta_1 = 200 \times 10 \times 0.866 = 1.732$ kW

Biến áp thực tế và mạch tương đương

Hình 3-12 là biến áp thực, có tải cuộn sơ và cuộn thứ có điện trở là R_1 và R_2 khi có dòng điện chạy qua, xuất hiện tổn thất dây đồng (I^2R). Từ thông trong lõi là từ thông hỗ cảm ϕ liên kết cuộn sơ với cuộn thứ; ngoài ra còn có lượng từ thông nhỏ rò qua không khí ở mỗi cuộn dây (từ thông rò ϕ_{l1} (cuộn sơ) và từ thông rò cuộn thứ ϕ_{l2}) và không liên kết hỗ cảm hai cuộn dây.

Hình 3-12 có cuộn sơ và cuộn thứ quấn trên hai trụ riêng biệt của lõi hình vuông. Từ thông rò ϕ_{l1} (được tạo ra bởi lực từ động I_1N_1) khép kín cuộn sơ qua



Hình 3-12 Biến áp thực

đường không khí và từ thông rò φ_{l2} (do lực từ động I_2N_2 tạo ra) khép kín cuộn thứ qua đường dẫn không khí, chúng không có tác dụng hỗ cảm với hai cuộn dây. Quấn dây như trên Hình 3-2, từ thông rò qua không khí, có tác dụng liên kết hỗ cảm giữa hai cuộn sơ và cuộn thứ (như từ thông trong lõi)

Từ thông rò qua không khí tạo ra lực từ động cuộn dây và sự tự liên kết trong cuộn dây đó tuyến tính với nhau. Độ tự cảm rò của cuộn sơ và cuộn thứ đều là hằng số, hay điện kháng rò chỉ phụ thuộc vào tần số hoạt động. Điện kháng rò này phân bố đồng dạng giữa không khí và đoạn lõi trong cuộn dây đó.

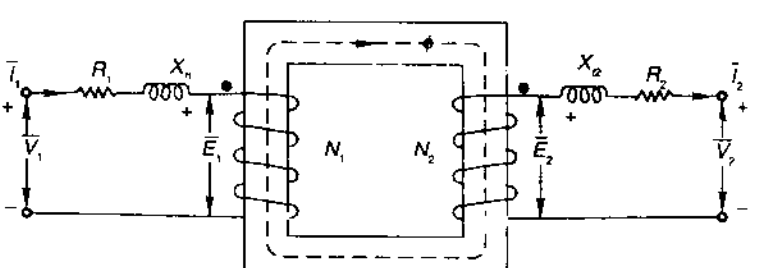
Điện trở và điện kháng rò trong các cuộn dây của biến áp có hiệu ứng nối tiếp, và đối với tần số hoạt động thấp (tần số nguồn 50 Hz), được xem là thông số tập trung. Biến áp Hình 3-12 là loại biến áp nửa lý tưởng, có điện trở tập trung là R_1 và R_2, và có điện kháng X_{l1}, X_{l2} được xem như nối tiếp với cuộn dây tương ứng với chúng (Hình 3-13). Dòng điện từ hóa lõi tạo nên từ thông hỗ cảm Φ và cấp cho tổn thất lõi lực điện động E_1, E_2 (tương ứng cuộn sơ, cuộn thứ) có quan hệ với V_1, V_2 bằng độ sụt áp trên điện trở cuộn dây và điện kháng rò (R_1, X_{l1} ở cuộn sơ và R_2, X_{l2} ở cuộn thứ).

Vì điện trở và điện kháng rò cuộn sơ và cuộn thứ rất nhỏ nên có thể coi $E_1 \approx V_1$ và $E_2 \approx V_2$, tỉ số biến áp sẽ là:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{V_1}{V_2} \qquad (3.27)$$

Mạch tương đương

Trong biến áp nửa lý tưởng (Hình 3-13), dòng điện $\bar{I}_1$ chạy trong cuộn sơ gồm hai thành phần :



Hình 3-13 *Mạch biến áp nửa lý tưởng*

(i) Dòng kích thích $\overline{I}_0$, có thành phần dòng từ hóa $\overline{I}_m$ tạo nên từ thông ϕ và thành phần $\overline{I}_i$ cấp cho tổn thất lõi do từ thông biến thiên.

(ii) Dòng tải $\overline{I}_2$ tạo ra lực từ động cân bằng với lực từ động $\overline{I}_2 N_2$, để từ thông hỗ cảm ϕ không đổi và độc lập với tải. I_2 được xác định bởi $\overline{E}_1$

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_0 + \overline{I}_2 \tag{3.28}$$

Với:

$$\frac{\overline{I}_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3.29}$$

Dòng kích thích $\overline{I}_0$ được thể hiện trong mô hình mạch trên Hình 3-7, tương ứng dòng điện kích không tải. Mạch tương đương của biến áp thực được nêu trên Hình 3-14a. (Khác với mạch tương đương của biến áp lý tưởng là có biểu thị các thông số lõi).

Trở kháng $R_2 + j X_{12}$ của cuộn thứ trong biến áp lý tưởng được đối chiếu với cuộn sơ (từ phía cuộn sơ) theo Hình 3-14b :

$$X_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{12} \tag{3.30a}$$

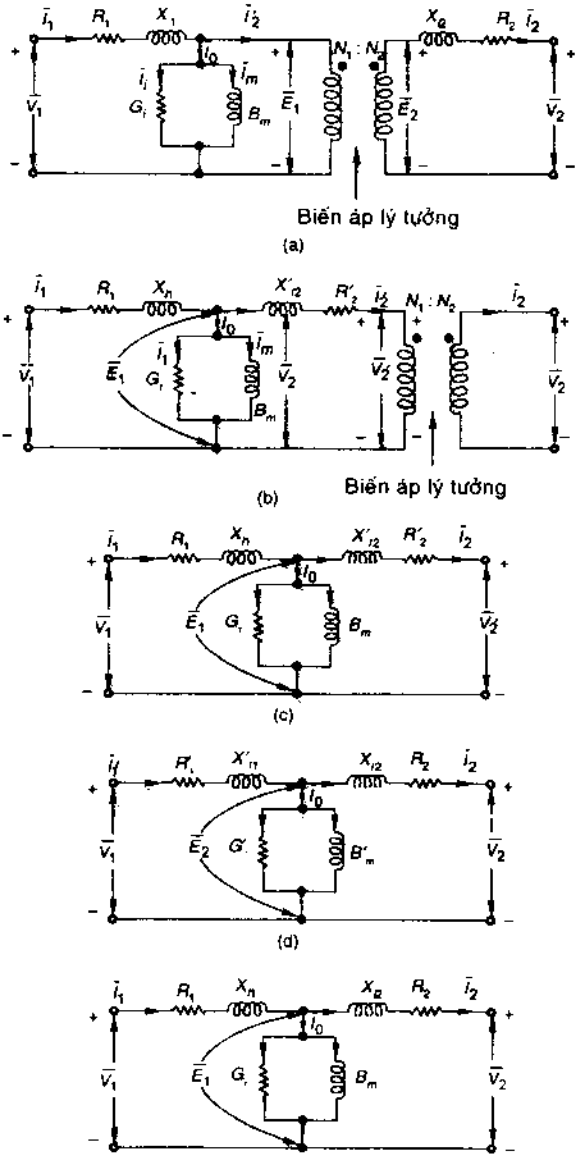
$$R_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \tag{3.30b}$$

Điện áp và dòng điện tải đối chiếu với cuộn sơ là :

$$\overline{V}_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \overline{V}_2 \tag{3.31a}$$

$$\overline{I}_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \overline{I}_2 \tag{3.31b}$$

Hình 3-14c minh họa mạch tương đương T khi đối chiếu theo phía 1. Mạch tương đương của biến áp cũng có thể đối chiếu tương tự từ phía 2 bằng cách biến đổi trở kháng (điện trở và điện kháng), điện áp và dòng điện như trên Hình 3-14d; chú ý là điện dẫn nạp (điện dẫn và điện nạp) biến đổi theo bình phương tỉ số đảo, ngược với trở kháng (điện trở và điện kháng) biến đổi theo bình phương tỉ số. Ta có:



Hình 3-14 *Triển khai mạch tương đương của biến áp thực*

$$G_i' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 G_i;\ B_m' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_m$$

$$R_2' = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R_2;\ X_{l1}' = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_{l1}$$

Hình 3-14e là mạch tương đương thu gọn hai mạch trên các Hình 14 c và 14 d

Trong mạch tương đương Hình 3-14c, nếu G_i = hằng số thì tổn thất lõi biến áp thay đổi theo E_1^2 hay $\phi^2_{max} f^2$ (Pt (3.6)). Chính xác hơn, từ Pt (2.36) và (2.37) có tổn thất lõi = tổn thất từ trễ + tổn thất dòng điện xoáy = $K_h\phi_{max}^{1.6} f + K_e\phi_{max}^2 f^2$. Dòng điện từ hóa đối với đặc tuyến B-H tuyến tính biến đổi phụ thuộc vào $\phi_{max} \propto \frac{E_1}{f}$. Nói cách khác, nếu độ tự cảm L_m phụ thuộc điện dẫn B_m là hằng số thì:

$$I_m = \frac{E_1}{2\pi f L_m}$$

Các biến đổi nêu trên sẽ không đúng khi hiệu ứng bão hòa không đáng kể, trong trường hợp B_m là hàm E_1/f không tuyến tính. Lúc đó, phải tìm các thông số G_i, B_m là không đổi ở giá trị điện áp và tần số xác định khi tần số và điện áp biến đổi nhỏ.

Mạch tương đương T nêu trên phù hợp với hầu hết các biến áp cao tần và biến áp công suất cao. Trong biến áp hoạt động ở tần số cao hơn, điện dung trong dây quấn xuất hiện và phải xét đến trong mạch tương đương.

Mạch tương đương ở đây có giá trị đối với sự phân tích trạng thái ổn định theo hàm sine. Trong phân tích chuyển tiếp, toàn bộ điện kháng phải chuyển đổi thành độ tự cảm tương đương. Mạch tương đương được triển khai ở trên cũng có thể xuất phát từ lý thuyết mạch ghép từ được đề cập ở phần sau.

Ví dụ 3-4 Xét biến áp trong Ví dụ 3-2 (Hình 3-8) với tải trở kháng được xác định trong Ví dụ 3-3. Sụt áp không đáng kể (do điện trở và điện kháng rò). Hãy tính dòng cuộn sơ và hệ số công suất. Hãy so sánh với dòng điện được tính trong Ví dụ 3-3.

Giải

Từ Pt (3.28) và (3.29) :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2 \quad \text{và} \quad \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Theo kết quả Ví dụ 3-3

$$\bar{I}_2 = 10 \angle -30^0 \text{ A}$$

Và kết quả Ví dụ 3-2

$$\bar{I}_0 = 2.3 \angle -70.5^0$$

Tính được: $\bar{I}_1 = 2.3 \angle -70.5^0 + 10\angle -30^0$

$$= (0.75 - j2.17) + (8.66 - j5)$$

$$= 9.41 - j7.17 = 11.83\angle -37^0 \text{A}$$

$$I_1 = 11.83\text{A}, \ \text{pf} = \cos 37^0 = 0.8 \text{ trễ pha}$$

So sánh với dòng điện sơ cấp được tính trong Ví dụ 3-3, kết quả có biên độ lớn hơn nhưng hệ số công suất nhỏ hơn.

Trong các biến áp cỡ lớn, biên độ của dòng điện từ hóa không quá 5% dòng điện tải toàn phần và ảnh hưởng lên dòng điện sơ cấp trong điều kiện có tải không gây tổn thất đáng kể. Đây là sự tính toán gần đúng trong hệ thống công suất của máy biến áp.

Ví dụ 3-5 Biến áp 20 kVA, 50 Hz, 2000/200 V có trở kháng rò là (0.42 + j 0.52) Ω ở cuộn dây cao áp (HV) và (0.004 + j 0.005) Ω ở cuộn dây hạ áp (LV). Khi nhìn từ phía LV, nhánh điện dẫn - nạp V_0 là (0,002 - j 0,015) Ω^{-1}. Hãy vẽ mạch tương đương từ phía HV và phía LV, biểu thị tất cả các trở kháng trên mạch

Giải

Phía HV được coi là phía 1 và phía LV là 2

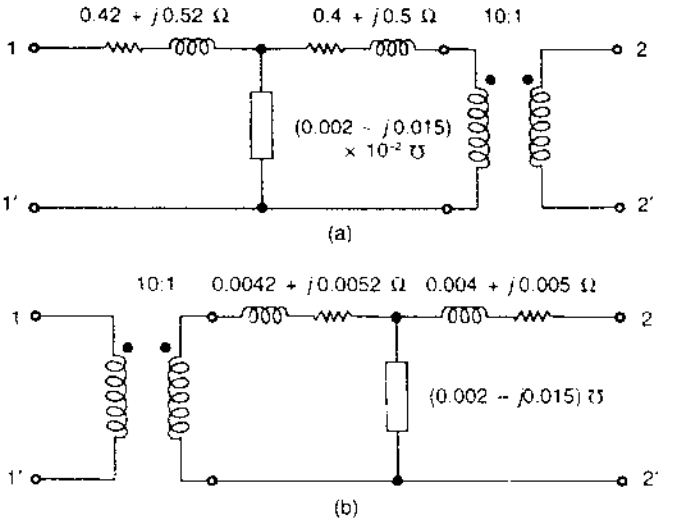
Tỉ số biến áp : $a = N_1/N_2 = 2000/200 = 10$

a. Mạch tương đương được đối chiếu từ phía HV (phía 1)

$$\bar{Z}_2 = 10^2(0.004 + j\,0.005) = (0.4 + j0.5)\Omega$$

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{10^2}(0.002 - j\,0.015)$$

Chú ý là điện dẫn nạp biến áp được chia cho a^2



Hình 3-15

Mạch tương đương được vẽ trên Hình 3-15a.

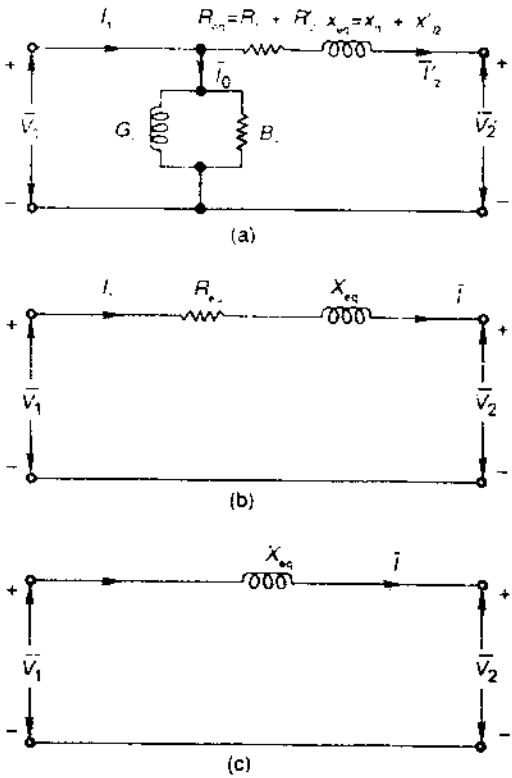
b. Mạch tương đương được đối chiếu từ phía LV (phía 2)

$$\overline{Z}_1 = \frac{1}{10^2}(0.42 - j\,0.52) = (0.0042 + j\,0.0052)\Omega$$

Mạch tương đương được vẽ trên Hình 3-15b

Mạch tương đương gần đúng

Trong biến áp công suất có tần số không đổi (50 Hz), mạch tương đương T của biến áp thường được dùng để phân tích các thông số biến áp. Trên Hình 3-14c, khi có tải, nếu điện trở và điện kháng rò của cuộn dây rất bé, $\overline{V}_1 \approx \overline{E}_E$, dòng kích thích trên nhánh từ hóa (Gi + Bm) không bị ảnh hưởng khi chuyển nhánh từ hóa đến cổng vào, nghĩa là I_0 được $\dot{V}_1$ kích thích thay vì $\overline{E}_1$ (Hình 3-16a). Với phép tính gần đúng, dòng chạy qua R_1, X_{11} là $\dot{I}_2$ thay vì $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2$. Vì $\dot{I}_0$ rất bé (dưới 5% dòng tải toàn phần), sự gần đúng này làm thay đổi độ sụt áp không đáng kể. Điện trở và điện kháng của cuộn dây mắc nối tiếp có thể phối hợp thành điện trở và điện kháng tương đương của biến áp khi được nhìn



Hình 3-16 *Mạch tương đương gần đúng của biến áp.*

(được đối chiếu) từ phía thích hợp (trường hợp này là từ phía 1). Nên nhớ là tất cả các đại lượng (thông số) trong mạch tương đương đều có thể đối chiếu từ phía cuộn sơ (phía 1) hay cuộn thứ (phía 2) như tương đương điện trở, điện kháng, và trở kháng trên Hình 3-16b.

Với R_{eq} (điện trở tương đương) = $R_1 + R_2$

X_{eq} (điện kháng tương đương) = $X_{l1} + X_{l2}$

Z_{eq} (trở kháng tương đương) = $R_{eq1} + JX_{eq2}$

Trong tính toán điện áp từ mạch tương đương gần đúng, nhánh từ hóa song song có thể bỏ qua (Hình 3-16b).

Mạch tương đương gần đúng dễ tính toán, sai số không đáng kể, kết quả vẫn chính xác. Hơn nữa, điện trở và điện kháng tương đương được dùng trong mạch tương đương gần đúng có thêm tiện lợi là có sẵn số liệu đo đạc theo kinh nghiệm.

Trong mạch tương đương gần đúng (Hình 3-16b), trở kháng nối tiếp tìm được hoàn toàn chính xác đối với hệ thống công suất [7]. Thực sự trong vài nghiên cứu hệ thống, biến áp có thể được biểu hiện theo mô hình điện kháng nối tiếp đơn giản (Hình 3-16c). Đây là sự xấp xỉ gần đúng của biến áp lớn, luôn luôn có điện trở tương đương rất bé không đáng kể so với điện kháng tương đương.

Từ phần này về sau, không cần ghi ký hiệu tương đương đối với điện trở và điện kháng tương đương được quy chiếu từ một phía biến áp.

Sơ đồ pha

Đối với mạch tương đương gần đúng Hình 3-16b :

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - \bar{I}Z \qquad (3.32a)$$

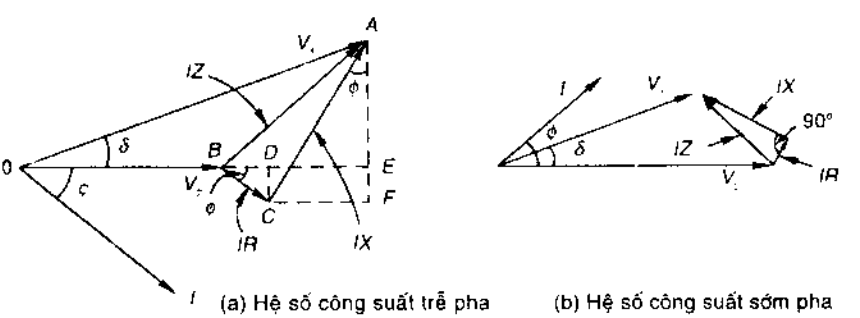
hay

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{I}(R + jX) \qquad (3.33b)$$

Sơ đồ pha tương ứng với phương trình này được nêu trên Hình 3-17a, có hệ số công suất chậm pha (trễ pha) (góc pha ϕ giữa V_2 và I) và sơ đồ trên Hình 3-17b có hệ số công suất (pf) sớm pha (nhanh pha).

Theo sơ đồ pha: $V_2 < V_1$ đối với hệ số công suất trễ pha.

Và $V_2 > V_1$ đối với hệ số công suất sớm pha.



Hình 3-17 *Sơ đồ pha của biến áp có mạch tương đương gần đúng trên Hình 3-16b*

$V_2 > V_1$ chỉ khi góc sớm pha ϕ lớn hơn $\tan^{-1}(R/X)$ (Pt (3.67))

Trong sơ đồ trên Hình 3-17a và b, V_1 sớm pha hơn V_2 theo góc δ. Điều này chứng tỏ công suất tác dụng (công suất thực) chạy từ phía 1 đến phía 2. Góc δ có giá trị rất bé và chỉ liên quan đến điện kháng tương đương (vì điện trở rất bé).

Định mức trên bảng tên biến áp

Tỉ số biến áp là V_1 (định mức)/V_2 (định mức), nghĩa là điện áp V_1 (định mức) cấp cho cuộn sơ, điện áp cuộn thứ với tải toàn phần ở hệ số công suất (pf) xác định là V_2 (định mức). V_1 (định mức)/V_2 (định mức) không bằng N_1/N_2 vì có sụt áp trên cuộn sơ và cuộn thứ. Sụt áp này không đáng kể nên trong thực tế được giả thiết là bằng nhau.

$$\frac{V_1(\text{định mức})}{V_2(\text{định mức})} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (3.33)$$

Định mức biến áp được xác định bằng đơn vị VA/ kVA/ MVA tùy theo kích cỡ.

$$\text{kVA (định mức)} = \frac{\text{V (định mức)} \times \text{I (đủ tải)}}{1000} \qquad (3.34)$$

Với V và I được đối chiếu lên một phía. Hiệu ứng dòng kích thích được bỏ qua.

Bảng tên biến áp còn được xác định theo trở kháng tương đương, nhưng không theo đơn vị Ω, mà là theo phần trăm sụt áp:

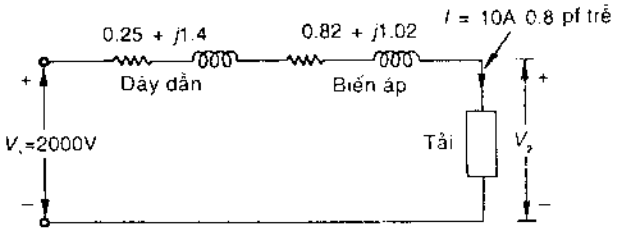
$$\frac{\text{I (đủ tải) Z}}{\text{V (định mức)}} \times 100\%$$

Với tất cả các đại lượng phải được đối chiếu lên một phía bất kỳ.

Ví dụ 3-6 : Biến áp trong Ví dụ 3-5 được dùng để giảm áp ở cuối tải của dây dẫn trở kháng $(0.25 + j\,1.4)\ \Omega$. Điện áp cuối tải truyền đến là 2 kV. Hãy tìm điện áp ra của biến áp khi tải có dòng biến áp với hệ số công suất 0.8 trễ pha. Sụt áp do dòng kích thích không đáng kể.

Giải

Mạch tương đương gần đúng được nhìn từ phía HV, với giá trị trở kháng theo Hình 3-15a được vẽ trên Hình 3-18. Dây dẫn phía HV.



Hình 3-18

Dòng tải định mức phía HV = 20/2 = 10 A

$$Z = (0.25 + j1.4) + (0.82 + j\,1.02)$$

$$= 1.07 + j\,2.42 = R + jX$$

Một cách khác là tính V_2 từ phương trình pha (3.32). Tuy sụt áp nhỏ, nhanh, gần đúng, nhưng nghiệm đủ chính xác từ sơ đồ pha trên Hình 3-17a, không cần tính số phức.

Từ Pt (3.17a) :

$$OE = \sqrt{(OA)^2 - (AE)^2}$$

Từ hình học sơ đồ pha

$$AE = AF - FE$$

$$= IX \cos \phi - IR \sin \phi$$

$$= 10\,(2.42 \times 0.8 - 1.07 \times 0.6) = 12.94 \text{ V}$$

Vì vậy : $OE = \sqrt{(2000)^2 - (12.94)^2} = 1999.96\text{V}$

$OE \approx OA = V_1$ (với độ chính xác cao, sai số 2 trong 10^5)

Tính V_2

$$V_2 = OE - BE$$

$$\approx V_1 - BE$$

$$BE = BD + DE$$

$$= I(R \cos \phi + X \sin \phi)$$

$$= 10\,(1.07 \times 0.8 + 2.43 \times 0.6) = 23.08 \text{ V}$$

Vì vậy $V_2 = 2000 - 23.08 = 1976.92$ V

Điện áp tải phía LV = 1976.92 / 10 =197.692 V.

Lưu ý Với độ chính xác đủ cao, sụt áp trên trở kháng có thể xấp xỉ bằng:

$$V_1 - V_2 = I(R \cos \phi + X \sin \phi); \text{ trễ pha} \quad (3.35a)$$

$$V_1 - V_2 = I(R \cos \phi - X \sin \phi); \text{ sớm pha} \quad (3.35b)$$

Tổn thất biến áp

Biến áp không có bộ phận chuyển động nên hiệu suất cao hơn nhiều so với máy điện quay. Các tổn thất trong biến áp gồm:

Tổn thất lõi: là tổn hao từ trễ và dòng điện xoáy do từ thông trong lõi biến đổi xoay chiều, như đã mô tả trong phần 2.6. Tổn hao lõi không đổi khi biến áp hoạt động ở điện áp và tần số không đổi, như các biến áp tần số công suất.

Tổn thất dây đồng (I^2R) : xảy ra trong điện trở dây quấn khi biến áp mang dòng tải, biểu hiện như một hệ số đủ tải.

Tổn thất tải (nhiễu): lớn, do từ trường rò cảm ứng ra dòng điện xoáy trên lớp vỏ thùng biến áp và các chất dẫn điện

Tổn hao điện môi: tổn hao này xuất hiện trong vật liệu cách điện, trong dầu và các chất cách điện rắn.

Hai tổn thất chính là tổn thất lõi và tổn thất dây đồng. Hai tổn thất này sẽ được khảo sát sau.

Thử nghiệm biến áp

Hai khó khăn chính không bảo đảm việc thử biến áp lớn bằng tải trực tiếp là:

(i) Lượng lớn năng lượng bị tổn thất khi thử nghiệm.

(ii) Rất khó có tải đủ lớn để thử nghiệm trực tiếp.

Vì thế các đặc tính cấu tạo biến áp phải được tính toán từ các thông số mạch tương đương. Các thông số mạch tương đương được xác định bằng các thử nghiệm đơn giản tiêu thụ công suất nhỏ, được gọi là *thí nghiệm không tải*. Hai thí nghiệm không tải là thí nghiệm hở mạch (OC) và thí nghiệm ngắn mạch (SC).

Trong hai thí nghiệm này, điện áp, dòng điện, và công suất được đo đạc với điện trở và điện kháng của trở kháng ngõ vào, vì thế chỉ có bốn thông số được xác định theo mạch tương đương gần đúng (Hình 3-16b).

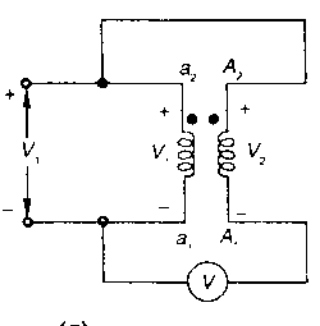
Trước khi mô tả thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch, cần thí nghiệm xác định đầu cực tính tương tự trên hai cuộn dây biến áp.

Thí nghiệm cực tính (khảo sát cực tính)

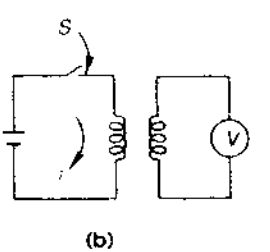
Các đầu dây có cực tính tương tự nhau của cuộn sơ và cuộn thứ là các đầu dây có cực tính lực điện động cảm ứng âm và dương xảy ra đồng thời, được ký hiệu bằng dấu "•" như trên Hình 3-19a, đầu dây a_2, A_2 có cực tính như nhau, đầu dây a_1, A_1 có cực tính như nhau.

Thiết lập mạch điện như trên Hình 3-19a, nếu cực tính của hai cuộn dây được đánh dấu như trên lược đồ thì Volt - kế sẽ chỉ $V = V_1 - V_2$. Nếu volt kế chỉ $V = V_1 + V_2$, thì điểm đánh dấu một cuộn dây phải đổi lại.

Phương pháp nêu trên không thuận tiện khi khảo sát trường của biến áp. Thiết lập mạch điện như trên Hình 3-19b, với nguồn dc, công tắc S và volt kế dc. Khi công tắc S đặt ở phần cuộn sơ đóng lại, dòng qua cuộn sơ gia tăng và tạo từ thông liên kết qua hai cuộn dây, cảm ứng lực điện động trong cả hai cuộn này. Cực tính dương của lực điện động tự cảm trong cuộn sơ ở cực dương của pin (theo định luật Lenxơ) và cực tính dương của lực điện động cảm ứng trong cuộn thứ được xác định theo volt kế dc. Hiện tượng xảy ra ngược lại khi công tắc hở, đầu cực tính dương chuyển thành cực tính âm.



Hình 3-19a *Thí nghiệm cực tính trên hai cuộn dây biến áp*

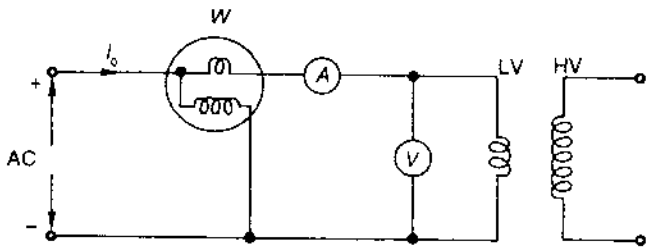


Hình 3-19b *Thí nghiệm cực tính đơn giản.*

Thí nghiệm hở mạch (OC) hoặc không tải

Mục đích thí nghiệm là xác định các thông số nhánh song song của mạch tương đương (Hình 3-14c). Một cuộn dây được mắc nối tiếp với nguồn có điện áp định mức, cuộn còn lại hở mạch. Phía thấp áp (LV) thường được cấp nguồn, phía cao áp hở mạch (Hình 3-20). Đồng hồ đo nối vào mạch để đo các giá trị sau:

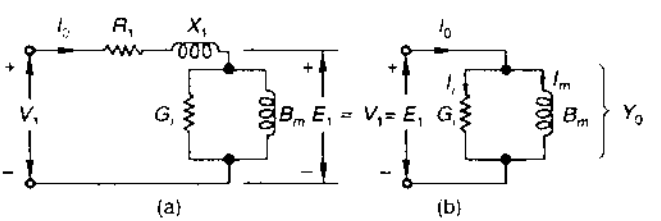
Điện áp = V_1; dòng điện = I_0; công suất vào = P_0 (3.36)



Hình 3-20 *Sơ đồ nối dây đối với thí nghiệm hở mạch*

Hình 3-21a là mạch tương đương được nhìn từ phía mạch hở và Hình 3-21b là mạch tương đương gần đúng. Dòng không tải I_0 rất nhỏ (từ 2-6% dòng định mức) và R_1, X_1 cũng nhỏ, nên $V_1 \approx E_1$ (vì trở kháng nối tiếp không đáng kể). Nghĩa là công suất vào khi không tải bằng tổn thất lõi:

$P_0 = P_1$ (tổn thất lõi) (3.37)



Hình 3-21 *Mạch tương đương được nhìn từ phía mạch hở*

Các thông số nhánh song song (G_i, B_m) dễ xác định từ ba số đo (Pt (3.36)), bằng các tính toán mạch tương đương và đối chiếu với sơ đồ pha không tải trên Hình 3-4:

$Y_0 = G_i - jB_m$ (3.38)

$$Y_0 = \frac{I_0}{V_1} \quad (3.39)$$

$$V_1^2 G_1 = P_0$$

hay

$$G_1 = \frac{P_0}{V_1^2} \quad (3.40)$$

$$B_m = \sqrt{Y_0^2 - G_1^2} \quad (3.41)$$

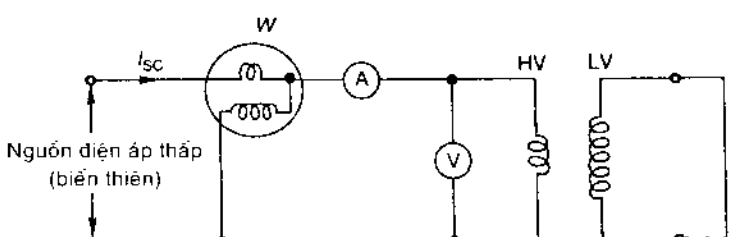
Các giá trị này được đối chiếu theo phía có dòng dẫn (điện áp thấp), và cũng dễ dàng điều chỉnh từ phía mạch hở theo bình phương tỉ số biến áp. Nếu không biết tỉ số biến áp, phải xác định bằng cách nối volt kế trên mạch HV để biết điện áp.

Tóm lại, kết quả thí nghiệm hở mạch là các giá trị tổn thất lõi và các thông số nhánh song song trong mạch tương đương.

Thí nghiệm ngắn mạch (SC)

Thí nghiệm này dùng để xác định các thông số nối tiếp của biến áp

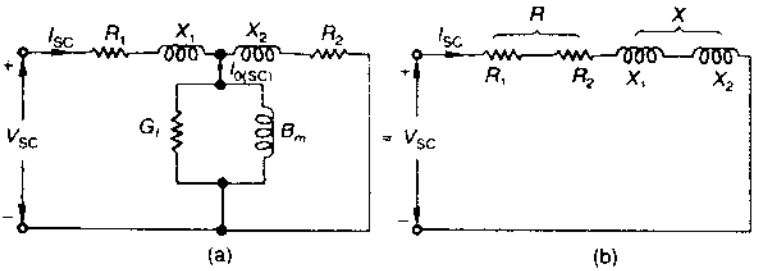
Hình 3-22 minh họa biến áp có phía điện áp thấp ngắn mạch, trong khi phía điện áp cao được nối vào nguồn có điện áp khống chế khoảng 5% giá trị định mức (do điện trở và điện kháng rò rất bé). Lúc đó dòng kích thích I_{0sc} chỉ bằng 0.1 - 0.5% dòng đủ tải (I_0 ở điện áp định mức là 2% dòng đủ tải).



Hình 3-22 *Thí nghiệm ngắn mạch biến áp*

Trong thí nghiệm ngắn mạch, không thể cấp điện cho phía điện áp thấp và nối tắt phía điện áp cao, vì cấp dòng điện lớn cho phía điện áp thấp rất khó.

Hình 3-23a là mạch tương đương được nhìn từ phía điện áp cao trong điều kiện ngắn mạch. Hình 3-23b là mạch tương đương thu gọn khi bỏ qua nhánh song song.



Hình 3-23 *Mạch tương đương ở điều kiện ngắn mạch*

Tăng điện áp nguồn lên từ từ cho đến khi biến áp có dòng đủ tải, các đồng hồ đo có các trị số.

điện áp = V_{SC}; dòng điện = I_{SC}; công suất vào = P_{SC}.

Biến áp được kích thích với điện áp rất thấp, nên tổn thất lõi không đáng kể (đó là lý do nhánh mạch song song được bỏ qua), công suất vào chỉ phụ thuộc tổn thất dây đồng:

$$P_{SC} = P_c \text{ (tổn thất đồng)} \qquad (3.43)$$

Từ Hình 3-23b, các thông số mạch được tính như sau :

$$Z = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad (3.43)$$

điện trở tương đương: $$R = \frac{P_{SC}}{(I_{SC})^2} \qquad (3.44)$$

điện kháng tương đương $$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \qquad (3.45)$$

Các giá trị này được đối chiếu với phía cao áp có dòng dẫn hoặc có thể đối chiếu với phía khác.

Thí nghiệm ngắn mạch cho biết điện trở và điện kháng tương đương, nhưng không có khả năng tách biệt chúng theo các giá trị cho cuộn sơ và cuộn thứ.

Kết hợp thí nghiệm ngắn mạch và hở mạch cho biết các thông số mạch tương đương gần đúng ở Hình 3-16b tương đối chính xác cho các tính toán quan trọng.

Ví dụ 3-7 Dữ liệu sau đây là của biến áp 20 kVA, 50 Hz, 2000/200 V.

	Điện áp (V)	Dòng điện (A)	Công suất (W)
Thí nghiệm hở mạch cao áp	200	4	120
Thí nghiệm ngắn mạch hạ áp	60	10	300

Hãy vẽ mạch tương đương gần đúng được đối chiếu từ phía cao áp và hạ áp

Giải

Thí nghiệm hở mạch (phía hạ áp)

$$Y_0 = \frac{4}{200} 2 \times 10^{-2}\ S; \qquad G_i = \frac{120}{(200)^2} = 0.3 \times 10^{-2}\ S$$

$$B_m = \sqrt{Y_0^2 - G_i^2} = 198 \times 10^{-2}\ S$$

Thí nghiệm ngắn mạch (phía cao áp)

$$Z = \frac{60}{10} = 6\ \Omega; R = \frac{300}{(10)^2} = 3\ \Omega$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = 5.2\ \Omega$$

Tỉ số biến áp $\frac{N_H}{N_L} = \frac{2000}{200} = 10$

Mạch tương đương được đối chiếu từ phía cao áp :

$$G_i(HV) = 0.3 \times 10^{-2} \times \frac{1}{(10)^2} = 0.3 \times 10^{-4}\ S$$

$$B_m(HV) = 1.98 \times 10^{-2} \times \frac{1}{(10)^2} = 1.98 \times 10^{-4}\ S$$

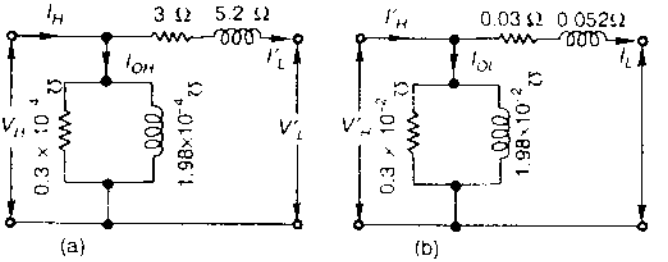
Mạch tương đương này được vẽ trên Hình 3-24a.

Mạch tương đương đối chiếu từ phía hạ áp:

$$R\ (LV) = 3 \times \frac{1}{(10)^2} = 0.03\ \Omega$$

$$X\ (LV) = 5.2 \times \frac{1}{(10)^2} = 0.052\ \Omega$$

Mạch tương đương này được vẽ trên Hình 3-24b.



Hình 3-24 *Mạch tương đương*
(a) đối chiếu từ cao áp, (b) đối chiếu từ hạ áp

Ví dụ 3-8 Các thông số mạch tương đương của biến áp 150 kVA 2400/240 V là :

$X_1 = 0.2\ \Omega$	$R_2 = 2 \times 10^{-3}\ \Omega$
$X_2 = 0.45\ \Omega$	$X_2 = 4.5 \times 10^{-3}\ \Omega$
$R_i = 10\ k\Omega$	$X_m = 1.6\ k\Omega$ (từ phía 2400 V)

Hãy tính:

a. Dòng điện, công suất và hệ số công suất mạch hở khi hạ áp được kích thích ở điện áp định mức.

b. Điện áp ở phía cao áp, trong thí nghiệm ngắn mạch phía hạ áp với dòng điện đủ tải. Tính công suất vào và hệ số công suất.

Giải

a. Tỉ số biến áp: a = 2400/240 = 10

$$R_i\ (LV) = \frac{10 \times 1000}{(10)^2} = 100\ \Omega$$

$$X_m\ (LV) = \frac{1.6 \times 1000}{(10)^2} = 16\ \Omega$$

$$\bar{I}_0\ (LV) = \frac{240\angle 0^0}{100} - j\frac{240\angle 0^0}{116}$$

$$= 2.4 - j15 = 15.2\angle -80.9^0\ A$$

$$I_0 = 15.2\ A, \qquad pf = \cos 80.9^0 = 0.158 \text{ trễ pha}$$

b. Hạ áp ngắn mạch, cao áp kích thích dẫn, dòng điện đủ tải : các thông số nhánh song song được bỏ qua. Các thông số nối tiếp tương đương được đối chiếu từ phía cao áp.

$$R = 0.2 + 2 \times 10^{-3} \times (10)^2 = 0.4\ \Omega$$

$$X = 0.45 + 4.5 \times 10^{-3} \times (10)^2 = 0.9\ \Omega$$

$$\overline{Z} = 0.4 + j0.9 = 0.985 \angle 66^0 \Omega$$

$$I_{ll}(HV) = \frac{150 \times 1000}{2400} = 62.5\ A$$

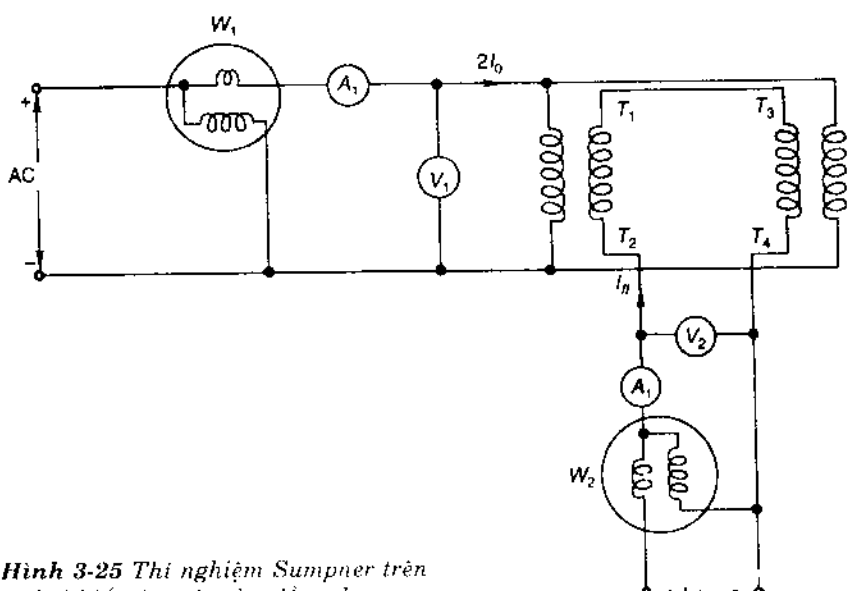
$$V_{SC}(HV) = 62.5 \times 0.958 = 59.9\ V \approx 60\ V$$

$$P_{SC} = (62.5)^2 \times 0.4 = 1.56\ kW$$

$$pf_{SC} = \cos 66^0 = 0.407 \text{ trễ pha}$$

Thí nghiệm của Sumpner

Các thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch cho biết các thông số mạch tương đương của biến áp, nhưng không thể sử dụng cho biến áp ở trạng thái nóng, nhằm xác định nhiệt độ tăng ổn định với tải toàn phần hoạt động liên tục. Vì trong các thí nghiệm này tổn hao công suất chỉ là tổn hao lõi hoặc tổn hao đồng, không thể bao gồm cả hai. Thí nghiệm Sumpner là thí nghiệm như có tải thực sự, với hai biến áp đồng dạng được dẫn điện đồng thời.



Hình 3-25 *Thí nghiệm Sumpner trên hai biến áp một pha đồng dạng.*

Theo thí nghiệm Sumpner, hai cuộn sơ cấp của hai biến áp được nối song song qua nguồn điện áp định mức V_1, trong khi hai cuộn thứ cấp được nối đồng pha đối ngẫu với nhau (Hình 3-25). Điện áp thấp V_2 được cấp vào mạch thứ cấp ở T_2 T_1

Theo định lý xếp chồng, nếu nguồn V_2 giả sử ngắn mạch đối với nguồn cấp V_1, cuộn thứ của V_2 biến áp xem như hở mạch (vì hai cuộn thứ đồng pha đối ngẫu nên không có dòng chạy qua). Dòng điện từ nguồn V_1 là $2I_0$ (I_0 là dòng không tải ở mỗi cuộn sơ cấp), công suất là 2 P_0 (= $2P_i$, hai lần tổn thất lõi của mỗi biến áp)

Khi V_1 được xem như nối tắt, đối với nguồn V_2 biến áp được mắc nối tiếp và bị ngắn mạch phía cuộn sơ. Trở kháng được nhìn ở V_2 là 2 Z. Khi V_2 được điều chỉnh đến dòng đủ tải, công suất là $2P_c$ (gấp đôi tổn thất đồng trên mỗi biến áp).

Mặc dù thí nghiệm của Sumpner không có tải cung cấp, nhưng tìm được cả hai tổn thất sắt trong lõi và tổn thất đồng trong dây quấn. Công suất vào biến áp = $2P_0$ + $2P_c$. Thí nghiệm này thực hiện trên hai biến áp, chỉ dùng để xác định tổn thất trong biến áp.

Ví dụ 3-9: Hai biến áp được nối theo thí nghiệm Sumpner, mỗi biến áp là 20 kVA. Tỉ số biến áp là 250 : 1000 và 250 : 1025. Hai cuộn sơ được cấp nguồn 250 V và hai cuộn thứ được nối đồng pha đối ngẫu. Một biến áp tăng áp có cuộn sơ được nối với nguồn 250 V, được dùng để chỉnh điện áp trong mạch cuộn sơ để tạo dòng 20 A. Tổn thất lõi của mỗi biến áp là 350 W và điện kháng mỗi biến áp gấp 2.5 lần trở kháng. Hãy tính số đo của watt-kế được nối để đo ở ngõ vào đến các cuộn sơ.

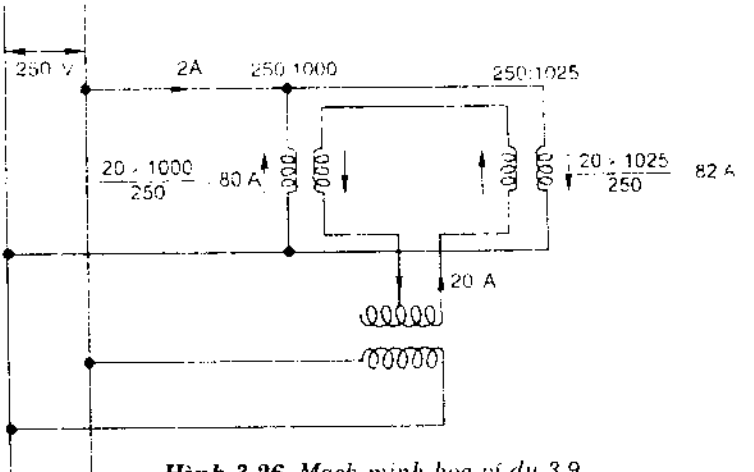
Giải

Trước hết cần tìm dòng điện chạy trong các cuộn sơ, khi điện áp cấp cuộn sơ ngắn mạch. Dòng điện phần sơ cấp này được tạo bởi dòng điện tuần hoàn ở cuộn thứ cấp, chúng có tác dụng cân bằng nhau và đồng pha (theo Hình 3-26). Hiệu của hai dòng điện ngắn mạch trong hai cuộn sơ là 2 A (= 82 - 80). 2A là dòng điện nối phần sơ cấp hai biến áp với nguồn điện chính, có hệ số công suất là:

$$\cos \tan^{-1} 2.5 = 0.371$$

Công suất tạo bởi dòng 2 A này là :

$$250 \times 2 \times 0.371 = 185.5 \text{ W}$$



***Hình 3-26**. Mạch minh họa ví dụ 3.9.*

Công suất này được cấp vào mạch thí nghiệm phụ thuộc vào cực tính của điện áp cấp cho phần thứ cấp.

Bây giờ xét dòng điện được tạo nên bởi điện áp nguồn cấp cho phần sơ cấp khi điện áp trên phần cuộn thứ ngắn mạch. Cuộn sơ có dòng từ hóa cấp cho tổn thất lõi.

Tổn thất lõi trên hai biến áp là 2 x 350 = 700 W

Dòng điện trong phần thứ cấp bé gây ra tổn thất nhỏ vì điện áp không cân bằng nhỏ (do tỉ số biến áp chênh lệch thấp)

Công suất là: 700 ± 185 = 885.5 W hoặc 514.4 W

Hệ thống đơn vị

Trong phân tích máy điện thường dùng các đại lượng điện áp, dòng điện, công suất biểu kiến VA, và trở kháng trên mỗi đơn vị (hoặc %) của đại lượng đó tính theo giá trị cơ bản hoặc giá trị quy chiếu.

Giá trị trên đơn vị (pu) của đại lượng bất kỳ là tỉ số:

$$\frac{\text{Giá trị thực}}{\text{Giá trị cơ bản hoặc quy chiếu (cùng đơn vị)}}$$

Sử dụng hệ thống này có hai tiện lợi:

- Dễ hiểu khi phân tích máy điện.
- Phù hợp với hệ thống công suất khi phân tích các đại lượng mạch quy chiếu với phía này hoặc phía khác của biến áp. Hệ thống đơn vị này được dùng trong hệ thống công suất tích hợp lớn và trong mô phỏng máy tính của hệ thống máy điện khi phân tích động hoặc phân tích chuyển tiếp.

Giá trị cơ bản của đại lượng liên quan đến các định luật điện thường dùng. Đối với hệ thống một pha :

$$P_{base}, Q_{base}, (VA)_{base} = V_{base}/I_{base} \quad (3.46),$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base}, = V_{base}/I_{base} \quad (3.47),$$

$$G_{base}, B_{base}, Y_{base} = I_{base}/V_{base} \quad (3.48)$$

$(VA)_{base}$, V_{base} được chọn trước sau đó chọn các giá trị cơ bản khác. Tiếp theo các phương trình trên là:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{(VA)_B}$$

$$Z(\text{đơn vị}) = \frac{Z(\Omega) \times (VA)_B}{V_B^2} \quad (3.49)$$

Trong thiết bị và hệ thống lớn, các giá trị cơ bản kVA/MVA và kV sẽ thuận tiện hơn, khi đó Pt (3.49) được viết thành:

$$Z(\text{đơn vị}) = \frac{Z(\Omega) \times (kVA)_B}{1000\,(kV)_B^2} \quad (3.50a)$$

$$Z(\text{đơn vị}) = \frac{Z(\Omega) \times (MVA)_B}{(kV)_B^2} \quad (3.50b)$$

Sau khi xác định (MVA)B và (kV)B, trở kháng Pu là:

$$Z(\text{đơn vị})_{new} = Z(pu)_{old} \frac{(MVA)_{B,new}}{(MVA)_{B,old}} \times \frac{(kV)_{B,old}^2}{(kV)_{B,new}^2} \quad (3.51)$$

Khi phân tích tính toán, các đại lượng được chuyển đổi theo giá trị tương ứng; các kết quả sau khi phân tích phải chuyển về đơn vị thực. Các thông số đơn vị của biến áp thường trong khoảng hẹp. Ví dụ, dòng từ hóa bình thương trong khoảng 0.02-0.05 trở kháng tương đương, và 0.05-0.1 điện kháng tương đương.

Trong hệ thống ba pha, có các đại lượng cơ bản :

$$(MVA)_B = 3 \text{ pha MVA}$$

$$(kV)_B = \text{điện áp dạng kV}$$

$$Z_B = \frac{((kV)_B / \sqrt{3})^2}{\frac{1}{3}(MVA)_B} = \frac{(kV)_B^2}{(MVA)_B}$$

$$Z(pu) = \frac{Z(\Omega) \times (MVA)_B}{(kV)_B^2} \qquad (3.52)$$

Xét ba trở kháng, Z trên mỗi pha, được nối Δ (tam giác), với $(MVA)_B$ ba pha và điện áp dây $(kV)_B$, có :

$$Z_B(\Delta) = \frac{(kV)_B^2}{(MVA)_B / 3} = \frac{3(kV)_B^2}{(MVA)_B}$$

$$Z(pu) = \frac{(Z/3)(MVA)_B}{(kV)_B^2}$$

Z/3 là trở kháng tương đương mắc sao. Trở kháng đơn vị đối với mắc tam giác hoặc sao tương tự nhau đối với điện ba pha MVA cơ bản và điện áp dây kV cơ bản

Ví dụ 3-10 Dòng kích thích 3 A khi đo trên phía thấp của biến áp 20 kVA, 2000/200 V. Trở kháng tương đương (từ phía cao áp) là 8.2 + j 10.2 Ω. Hãy chọn giá trị cơ bản của biến áp.

a. Tìm dòng kích thích theo đơn vị trên phía điện áp cao và phía áp thấp.

b. Biểu diễn tổng trở tương đương theo đơn vị ở phía các áp và phía áp thấp.

Giải

$V_B(HV) = 2000$ V $\qquad$ $V_B(LV) = 200$ V

$I_B(HV) = 10$ A $\qquad$ $I_B(LV) = 100$ A

$$Z_B(HV) = \frac{2000}{10} = 200\ \Omega$$

$$Z_B(LV) = \frac{200}{100} = 2\ \Omega$$

a. $I_0(LV) = \frac{3}{100} = 0.03$ pu

Dòng kích thích từ phía cao áp là 0.3 A:

$$I_0(HV) = \frac{0.3}{10} = 0.03 \text{ pu}$$

b. $Z(HV)_{pu} = \frac{3.2 + j\,10.2}{(10)^2} = 0.041 + j\,0.051$

$$Z(LV) = \frac{3.2 + j\,10.2}{(10)^2} = 0.082 + j\,0.102$$

$$Z(LV)_{pu} = \frac{0.082 + j\,0.102}{2} = 0.041 + j\,0.051$$

Hiệu suất và ổn định điện áp

Các biến áp công suất và phân phối được thiết kế để vận hành ở các điều kiện điện áp hiệu dụng và tần số không thay đổi, nên hiệu suất và ổn định điện áp là rất quan trọng.

Hiệu suất

Năng lực định mức của biến áp được xác định bằng tích điện áp định mức với dòng điện tải (toàn phần) ở đầu ra. Công suất ra phụ thuộc hệ số công suất của tải, hiệu suất được xác định bằng tỉ số giữa công suất ra hữu ích và công suất vào:

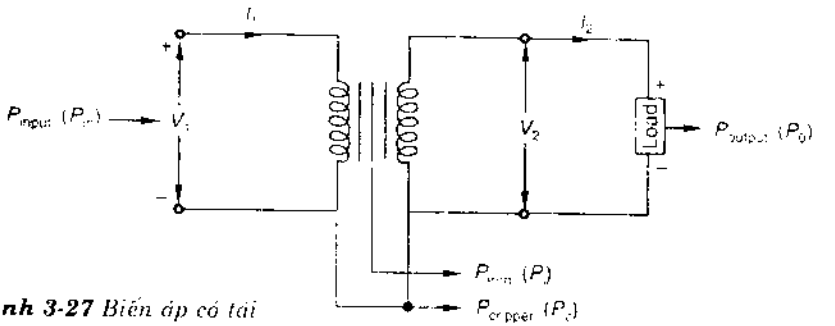
$$\eta = \frac{\text{công suất ra}}{\text{công suất vào}} \qquad (3.53)$$

Hiệu suất biến áp khoảng 96 - 99%. Không thể đo đạc công suất ra và công suất vào khi có tải, do Watt kế có sai số 1-2%. Phương pháp chính xác cho phép xác định η là tìm tổn thất từ thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch. Khi đó, hiệu suất được tính như sau:

$$\eta = \frac{\text{ngõ ra}}{\text{ngõ ra + tổn thất}} = 1 - \frac{\text{tổn thất}}{\text{ngõ ra + tổn thất}} \qquad (3.54)$$

Trong Pt (3.54), hiệu ứng từ số đo watt - kế chỉ xác định giá trị tổn thất, do đó hiệu suất toàn phần tính từ thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch có độ chính xác hơn so với đo trực tiếp tải.

Tổn thất biến áp gồm tổn thất sắt P_i và tổn thất đồng.



Hình 3-27 *Biến áp có tải*

Hiệu ứng tải và hệ số công suất tải

Tổn thất sắt (lõi) phụ thuộc mật độ từ thông và lực điện động cảm ứng. Khi $E_1 \approx V_1$ với mọi tải, tổn thất này được xem là hằng số (không phụ thuộc tải)

Tổn thất đồng trong hai cuộn dây

$$P_c = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$
$$= I_1^2 R_{eq}(2)$$

Với $R_{eq}(2)$ = điện trở tương đương từ phía cuộn thứ, tổn thất đồng tỉ lệ với bình phương dòng điện tải.

Công suất ra của biến áp: $P_o = V_2 I_2 \cos\theta_2$

Với $\cos\theta_2$ = hệ số công suất tải

Từ Pt (3.52) :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\theta_2}{V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_i + I_2^2 R_{eq}(2)} \qquad (3.55)$$

Với V_2 là điện áp định mức cuộn thứ, thay đổi theo tải (khoảng 3-5%), có thể bỏ qua khi tính toán hiệu suất.

Theo Pt (3.55), đối với hệ số công suất đã cho, hiệu suất biến thiên theo dòng điện tải, do đó:

$$\eta = \frac{V_2 \cos\theta_2}{V_2 \cos\theta_2 + \left(\frac{P_i}{I_2} + I_2 R_{eq}(2)\right)} \qquad (3.56)$$

Đối với giá trị η cực đại và $\cos\theta_2$ cho trước, mẫu số của Pt (3.56) có giá trị bé nhất:

$$I_2^2 R'^{2}_{eq} = P_i \qquad (3.57)$$

nghĩa là: tổn thất đồng (thay đổi) = tổn thất lõi (hằng số)

Do đó, hiệu suất đạt cực đại ở giá trị tải, khi tổn thất đồng (thay đổi) bằng tổn thất lõi (hằng số), sẽ là:

$$I_2^2 = \frac{P_i}{R_{eq}(2)}$$

$$\left(\frac{I_2}{I_{2fl}}\right)^2 = \frac{P_i}{I_{2fl}^2 R_{eq}(2)} = k^2$$

Hay $$k = \sqrt{\frac{P_i}{P_c(fl)}} \qquad (3.58)$$

Với $$k = I_2 / I_{2fl} \qquad (3.59a)$$

Và : $P_c(fl)$ = tổn thất đồng đủ tải.

Hiệu suất đạt cực đại ở phần số dòng điện tải được tính theo Pt (3.59a).

Nhân tử số và mẫu số của Pt (3.59a) với điện áp định mức V_2:

$$k = \frac{V_2 I_2}{V_2 I_{2fl}} \qquad (3.59b)$$

Hiệu suất đạt cực đại ở tải k ($V_2 I_{2fl}$) hay kS_2, với S_2 là công suất biểu kiến VA hoặc kVA của biến áp:

$$\eta_{max} = \frac{kS_2 \cos\theta_2}{kS_2 \cos\theta_2 + 2P_i} \qquad (3.60)$$

$\eta_{max} = 0$ khi $\cos\theta = 0$ (tải thuần điện kháng).

Biến áp công suất được sử dụng để truyền công suất, hoạt động gần như đủ tải với thời gian liên tục và được thiết kế có hiệu suất cực đại ở tải toàn phần. Mặt khác, biến áp phân phối cung cấp tải thay đổi rộng theo thời gian, do đó biến áp này được thiết kế để có hiệu suất cực đại khoảng 3-4 lần tải đủ.

Hiệu suất (năng lượng) tính theo ngày

Hiệu suất tính theo ngày của biến áp là tỉ số giữa tổng năng lượng đầu ra (kWh), trong 24 h (ngày) với tổng năng lượng đầu vào trong cùng thời gian. Tổn thất lõi là hằng số độc lập với tải, hiệu suất cả ngày phụ thuộc chu kỳ tải, được tính theo hệ số tải (tải trung bình/tải đỉnh), để dự đoán trước hiệu suất. Đó là điểm quan trọng khi biến áp cấp tải hằng ngày biến đổi rộng theo chu kỳ. Hiệu suất năng lượng cao hơn được tạo thành bằng cách thiết kế biến áp có hiệu suất năng lượng cực đại ở mức tải thấp (70% tải toàn phần). Điều này có thể đạt được bằng cách giới hạn mật độ từ thông theo các giá trị thấp, sử dụng tiết diện lõi tương đối lớn, nghĩa là tăng tỷ số trọng lượng sắt/đồng.

Ví dụ 3-11: Đối với biến áp trong Ví dụ 3-7, hãy tính hiệu suất nếu phần áp thấp là tải đủ với hệ số công suất 0.8. Tính hiệu suất cực đại theo hệ số công suất này.

Giải

Công suất ra $= V_2 I_2 \cos\theta_2$

$= 200 \times 100 \times 0.8 = 16000$ W

Tổng tổn thất $P_{L_t} = P_i + k^2 P_c$

$= 120 + (1 \times 300) = 420$ W

$$\eta = 1 - \frac{P_{L_t}}{P_0 + P_{L_t}}$$

$$= 1 - \frac{420}{16000 + 420} = 97.44\%$$

Đối với hiệu suất cực đại

$$k = \sqrt{\frac{P_i}{P_c}} = \sqrt{\frac{120}{300}} = 0.632$$

Nghĩa là ở tải đơn vị 0.632 (độc lập với hệ số công suất)

$$\eta_{max} (\text{với } \cos\theta_2 = 0.8) = 1 \quad \frac{2P_i}{P_0 + 2P_i}$$

$$= 1 \quad \frac{2 \times 120}{(16000 \times 0.632) + (2 \times 120)} = 97.68\%$$

Ví dụ 3-12 Biến áp 500 kVA, có hiệu suất 95% ở tải đủ và ở 60% tải đủ cả hai ở upf

a. Hãy phân biệt các tổn thất biến áp.

b. Xác định hiệu suất ở 3/4 tải toàn phần.

Giải

a.
$$\eta = \frac{500 \times 1}{500 \times 1 + P_i + P_c} = 0.95 \qquad \text{(i)}$$

$$\eta = \frac{500 \times 0.6}{500 \times 0.6 + P_i + (0.6)^2 P_c} = 0.95 \qquad \text{(ii)}$$

Giải hệ Pt (i) và (ii)

$$P_i = 9.87 \text{ kW}$$

$$P_c = 16.45 \text{ kW}$$

b. Ở 3/4 tải toàn phần upf :

$$\eta = \frac{500 \times 0.75}{500 \times 0.75 + 9.87 + (0.75)^2 \times 16.45} = 95.14\%$$

Ví dụ 3-13: Biến áp có hiệu suất cực đại là 0.98 ở 15 kVA ở upf. Hãy so sánh hiệu suất tính theo ngày với chu kỳ tải như sau:

a. Đủ tải 20 kVA 12h/ngày và không có tải trong 12 giờ còn lại.

b. Đủ tải 4h/ngày và 0.4 tải toàn phần trong 20 giờ còn lại.

Giải

$$\eta_{max} = \frac{P_0}{P_0 + 2P_i} \qquad \text{hoặc} \qquad 0.98 = \frac{15}{15 + 2P_i}$$

$$P_i = 0.153 \text{ kW}$$

$$k^2 = \frac{P_i}{P_c} \qquad \text{hoặc} \qquad \left(\frac{15}{20}\right)^2 = \frac{0.153}{P_c}$$

$$P_c = 0.272 \text{ kW}$$

a.

P_0	Thời gian, giờ	W_0	$P_{in} = P_0 + P_i + k^2P_c$	W_{in}
20	12	240	20 + 0.153 + 0.272 = 20.425	245.1
0	12	0	0 + 0.153 = 0.153	1.8
		240 kWh		246.9 kWh

$$\eta_{energy} = \frac{\sum W_0}{\sum W_{in}} = \frac{240}{246.9} = 97.2\%$$

b.

P_0	Thời gian, giờ	W_0	$P_{in} = P_0 + P_i + k^2P_c$	W_{in}
20	4	80	$20 + 0.153 + 0.272 = 20.425$	81.7
8	20	160	$8 + 0.153 + \left(\frac{8}{20}\right)^2 \times 0.272 = 8.196$	163.9
		240 kWh		245.6 kWh

$$\eta_{energy} = \frac{240}{245.6} = 97.7\%$$

Lưu ý: Dù hệ số tải như nhau trong cả hai trường hợp [(240/24)/20 = 0.5] các hiệu suất năng lượng vẫn khác nhau do sự khác biệt về bản chất giữa hai chu kỳ tải.

Ổn định điện áp

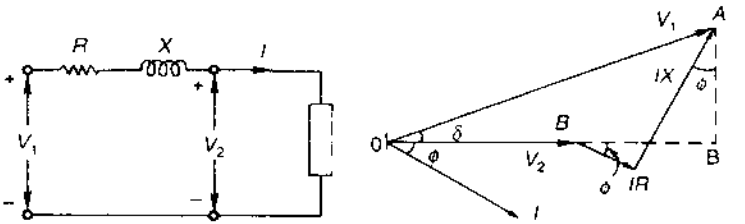
Điện áp không đổi là yêu cầu đối với các loại tải (dân dụng, kinh doanh, và công nghiệp). Điện áp ra của biến áp phải trong giới hạn cho phép khi tải và hệ số công suất thay đổi. Yêu cầu này đặc biệt quan trọng đối với biến áp phân phối khi cung cấp điện trực tiếp cho các tải tiêu thụ. Sụt áp trong biến áp có tải chủ yếu là do điện kháng rò, phải giữ ở mức thấp như thiết kế và kỹ thuật xuất xưởng cho phép.

Phương pháp điều khiển đặc tính sụt áp của biến áp là điều áp. Sự điều áp được định nghĩa là sự thay đổi điện áp ở cuộn thứ cấp, khi tải toàn phần (tải định mức) với hệ số công suất xác định được cung cấp theo điện áp định mức, phải ở mức thấp nhất, với điện áp (và tần số) ở cuộn sơ cấp không đổi, được tính theo phần trăm điện áp tải định mức.

$$\text{Độ ổn định điện áp (\%)} = \frac{V_{20} - V_{2,fl}}{V_{2,fl}} \times 100 \qquad (3.61)$$

Với $V_{2,fl}$ = Điện áp định mức thứ cấp, tải toàn phần (với hệ số công suất xác định).

V_{20} = điện thứ cấp khi ngắt tải (không tải).



(a) Mạch tương đương quy chiếu theo cuộn thứ

(b) Sơ đồ pha

Hình 3.28

Hình 3-28a là mạch tương đương được đối chiếu từ phía cuộn thứ. Hình 3-28b là sơ đồ pha. Sụt áp IR và IX (trên sơ đồ pha) rất nhỏ trong biến áp tốt (Ví dụ 3-6). Góc δ giữa V_1 và V_2 không đáng kể :

$$V_1 \approx OE$$

$$V_1 - V_2 \approx BE = I(R\cos\phi + X\sin\phi);\ \phi \text{ trễ pha} \qquad (3.62a)$$

$$= I(R\cos\phi - X\sin\phi);\ \phi \text{ sớm pha} \qquad (3.62b)$$

Khi tải bị ngắt

$$V_{20} = V_1.$$

$$V_{20} - V_2 = I(R\cos\phi \pm X\sin\phi) \qquad (3.63)$$

Với I là dòng thứ cấp tải toàn phần và V_2 là điện áp thứ cấp, tương đương giá trị V_2 định mức.

$$\text{Ổn định điện áp (\%)} = \frac{V_{20} - V_2}{V_2} \times 100$$

$$= \frac{I(R\cos\varphi \pm X\sin\varphi)}{V_2} \times 100 \qquad (3.64)$$

Với $\dfrac{IR}{V_2} = R(\text{đơn vị})$ và $\dfrac{IX}{V_2} = X(\text{đơn vị})$

Ổn định điện áp trên đơn vị = R(đơn vị) cos φ ± X(đơn vị) sine φ (3.65)

Từ Pt (3.64) có thể thấy sự điều áp thay đổi theo hệ số công suất và có giá trị cực đại khi:

$$\frac{d\,\mathrm{Reg}}{d\phi} = 0 = -R\sin\phi + X\cos\phi$$

Hoặc $\tan\varphi = \frac{X}{R}$; $\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$; trễ pha (3.66)

Pt (3.66) cho thấy sự ổn định điện áp là cực đại khi góc hệ số công suất tải (trễ pha) có cùng giá trị góc của trở kháng tương đương.

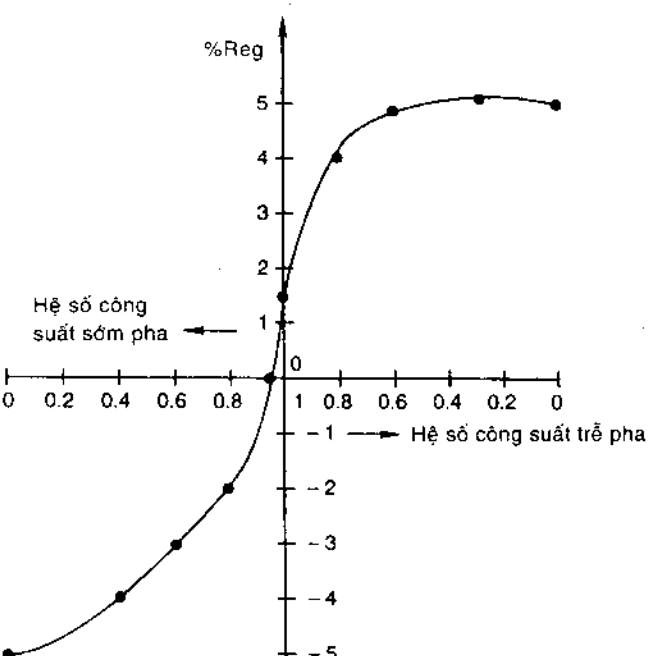
Từ Pt (3.65), ổn định điện áp bằng 0 khi :

$$R \cos \phi - X \sin \phi = 0$$

$$\tan \phi = \frac{R}{X}; \quad \text{sớm pha} \qquad (3.67)$$

Đối với φ (sớm pha) lớn hơn giá trị theo Pt (3.66), độ ổn định điện áp âm (nghĩa là điện áp thứ cấp đủ tải lớn hơn điện áp không tải).

Sự biến thiên độ ổn định hệ số công suất % được nêu trên Hình 3-29.



Hình 3-29 *Độ ổn định phần trăm hệ số công suất; R = 0.075 đơn vị, X = 0.05 đơn vị.*

Ví dụ 3-14: Xét biến áp ới dữ liệu từ Ví dụ 3-7.

a. Với tải toàn phần ở phía điện áp thấp LV theo điện áp định mức, hãy tính điện áp kích thích trên phía HV. Hệ số công suất là (i) trễ pha 0.8; (ii) sớm pha 0.8.
Tính độ ổn định điện áp trong mỗi trường hợp nêu trên.

b. Biến áp cấp dòng tải đủ ở hệ số công suất trễ pha 0.8 với 2000 V phía cao áp HV. Hãy tìm điện áp phía tải và hiệu suất làm việc.

Giải

a. Mạch tương đương phía HV được nêu trên Hình 3-24a:

$$V_L = 200V, I_L = \frac{20 \times 1000}{200} = 100A$$

$$V_L = 200V; I_L = 10A$$

$$V_H = V_L + I_L(R_H \cos\phi \pm X_H \sin\phi); R_H = 3\Omega, X_H = 5.2\Omega$$

(i) $\cos\phi = 0.8$ trễ pha; $\sin\phi = 0.6$

$$V_H = 2000 + 10\,(3 \times 0.8 + 5.2 \times 0.6) = 2055.2 \text{ V}$$

$$\text{Độ ổn định điện áp} = \frac{2055.2 - 2000}{2000} \times 100 = 2.76\%$$

(ii) $\cos\phi = 0.8$ sớm pha; $\sin\phi = 0.6$

$$V_H = 2000 + 10\,(3 \times 0.8 - 5.2 \times 0.6) = 1992.8 \text{ V}$$

$$\text{Độ ổn định điện áp} = \frac{1992.8 - 2000}{2000} \times 100 = -0.36\%$$

b. I_L (đủ tải) = 100 A, hệ số công suất trễ pha 0.8.

$$V'_L = V'_H - I'_L\,(R_H \cos\phi + X_H \sin\phi)$$

$$= 2000 - 10\,(3.8 \times 0.8 + 5.2 \times 0.6) = 1944.8 \text{ V}$$

$$V_L = 194.48 \text{ V}$$

Hiệu suất

Công suất ra, $P_o = V_L I_L \cos\phi$

$$= 194.48 \times 100 \times 0.8 = 15558.4 \text{ W}$$

$$P_{\text{tổn thất}} = P_i + P_c$$

P_i = 120 W (ví dụ 3.7)

$P_c = (10)^2 \times 3 = 300$ W

$P_{\text{tổn thất}} = 420$ W

$$\eta = 1 - \frac{420}{15558.4 + 420} = 97.38\%$$

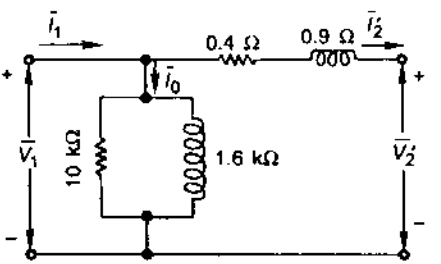
Ví dụ 3-15: Đối với biến áp 150 kVA, 2400/240 V, có các thông số mạch được cho theo Ví dụ 3-8, hãy vẽ mô hình mạch từ phía HV. Từ đó xác định độ ổn áp và hiệu suất khi biến áp được cấp đủ tải ở hệ số công suất (trễ pha) 0.8 phía cuộn thứ ở điện áp định mức. Trong các điều kiện này, hãy tính dòng điện phía HV và hệ số công suất tương ứng.

Giải

$R(HV) = 0.2 + 2 \times 10^{-3} \times (10)^2 = 0.4\ \Omega$

$X(HV) = 0.45 + 4.5 \times 10^{-3} \times (10)^2 = 0.9\ \Omega$

Sơ đồ mạch được vẽ trên Hình 3.30



Hình 3.30

$$I_{2(fl)} = \frac{150 \times 1000}{240} = 625\text{A}, \quad pf = 0.8 \text{ trễ pha}$$

$V_2 = 240$ V

$$I_2' = \frac{625}{10} 62.5\text{A}, \quad pf = 0.8 \text{ trễ pha}$$

$V_2 = 2400$ V

Độ sụt áp $= 62.5\,(0.4 \times 0.8 + 0.96 \times 0.6) = 53.75$ V

Độ ổn định điện áp $= \dfrac{53.75}{2400} \times 100 = 2.24\%$

$$V_1 = 2400 + 53.75 = 2453.75 = 2454 \text{ W}$$

$$P_{(ra)} = 150 \times 0.8 = 120 \text{ kW}$$

$$P_{c\,(\text{tổn thất đồng})} = (62.5)^2 \times 0.4 = 1.56 \text{ kW}$$

$$P_{i\,(\text{tổn thất lõi})} = \frac{(2454)^2}{10 \times 1000} = 0.60\text{kW}$$

$$P_L = P_i + P_c = 0.60 + 1.56 = 2.16 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{120}{120 + 2.16} = 98.2\%$$

$$\bar{I}_0 = \frac{2454\angle 0^0}{10 \times 1000} - j\frac{2454\angle 0^0}{1.6 \times 1000} = 0.245 - j1.53\text{A}$$

$$\bar{I}_2' = 62.5(0.8 - j0.6) = 50 - j\,37.5 \text{ A}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2 = 50.25 - j\,39.03 = 63.63\angle -37.8^0 \text{ A}$$

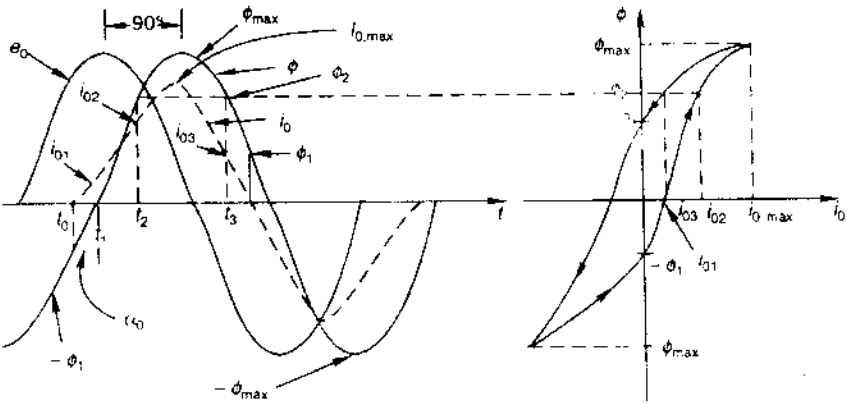
hoặc $I_1 = 63.63$ A, pf =0.79 trễ pha

Hiện tượng kích thích trong biến áp

Dòng điện không tải trong biến áp không có dạng hàm sine, nguyên nhân gây ra hiện tượng này là do từ trễ và sự bão hòa không tuyến tính của vật liệu lõi; có thể tìm hiểu điều này bằng cách dùng đồ thị.

Giả sử điện áp v_1 cấp cho biến áp trên Hình 3-5 là hàm sine. Điện áp rơi $(r_1 i_0)$ không đáng kể so với điện áp cấp v_1. Lực điện động cảm ứng cân bằng điện áp cấp nguồn này cũng là hàm sine, và thiết lập từ thông trong lõi. Từ thông trễ pha so với lực điện động cảm ứng là 90^0. Dạng sóng lực điện động và từ thông được nêu trên Hình 3-31. Dòng điện cần để thiết lập từ thông hàm sine vẽ trên đồ thị bằng cách dùng đường cong từ trễ (đường ϕ - i_0).

Giả sử sự vận hành tiến dần đến trạng thái ổn định, vòng từ trễ trên Hình 3-31 sẽ lặp lại trong các chu kỳ điện áp kế tiếp. Xét thời điểm từ thông có giá trị - ϕ_1, dòng kích thích tương ứng là 0. Ở thời điểm t_1, từ thông bằng 0,

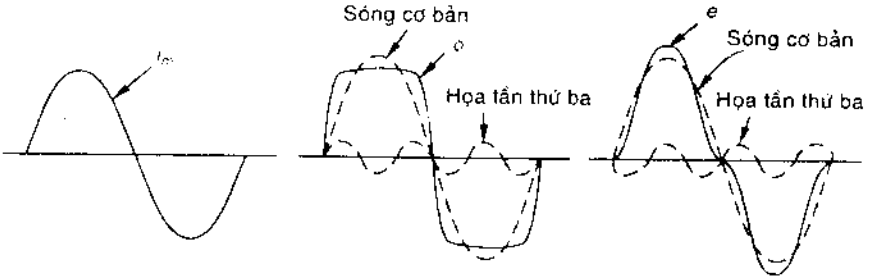


Hình 3-31 *Hiệu ứng từ trễ và bão hòa đối với dạng sóng dòng kích thích (từ thông theo hàm sine).*

dòng điện có giá trị dương nhỏ i_{01}. Khi từ thông có giá trị dương ϕ_2, có hai giá trị dòng điện dương i_{02} ứng với từ thông ở trên phần tăng đường vòng từ trễ và i_{03} khi ϕ ở trên đường giảm vòng từ trễ, $i_{02} > i_{03}$. Từ thông cực đại ϕ_{max} tương ứng dòng cực đại $i_{0\,max}$. Dòng bằng 0 khi từ thông là ϕ_1. Một bán kỳ dương của dòng kích thích i_0 được vẽ trên Hình. Bán kỳ âm sẽ đối xứng với bán kỳ dương (đối xứng lẻ) do vòng từ trễ đối xứng. Một chu kỳ hoàn chỉnh của dòng kích thích được vẽ phác trên Hình 3-31.

Dạng sóng dòng kích thích không theo hàm sine, có đỉnh sóng nhọn, có hai bán kỳ lẻ đối xứng với nhau và có điểm cực đại xảy ra đồng thời với điểm cực đại từ thông, là dòng zero tăng theo cùng lúc với dạng sóng từ thông. Đó là do tác động sóng hài lẻ. Dòng điện kích thích có dòng cơ bản và dòng họa tần lẻ (sóng hài) lớn nhất là họa tần thứ ba, khoảng 40% dòng cơ bản. Thành phần cơ bản của dòng kích thích sớm pha theo góc α_0 so với từ thông (Hình 3-6), nên dòng cơ bản có thành phần I_m cùng pha với từ thông, thành phần I_i nhỏ và sớm pha so với từ thông là 90^0 (hay cùng pha với điện áp). I_m tạo ra từ thông, I_m đánh giá sự tổn thất công suất trong lõi (gồm từ trễ và dòng điện xoáy).

Một phần dòng điện I_i cùng pha với V_1 là hàm sine, có tác dụng cân bằng hiệu ứng dòng điện xoáy do từ thông hàm sine trong lõi tạo ra. Vì thế dòng này được xem là dòng điện xoáy, không gây ra họa tần (sóng hài) trong dòng kích thích.



Hình 3-32 *Trường hợp dòng từ hóa hàm sine*

Khi biến áp dẫn dòng điện đến tải tuyến tính, dòng điện tải là hàm sine và lớn hơn nhiều so với dòng kích thích, sẽ "che khuất" sự không tuyến tính của dòng sơ cấp, nghĩa là dòng sơ cấp được coi là hàm sine khi có tải.

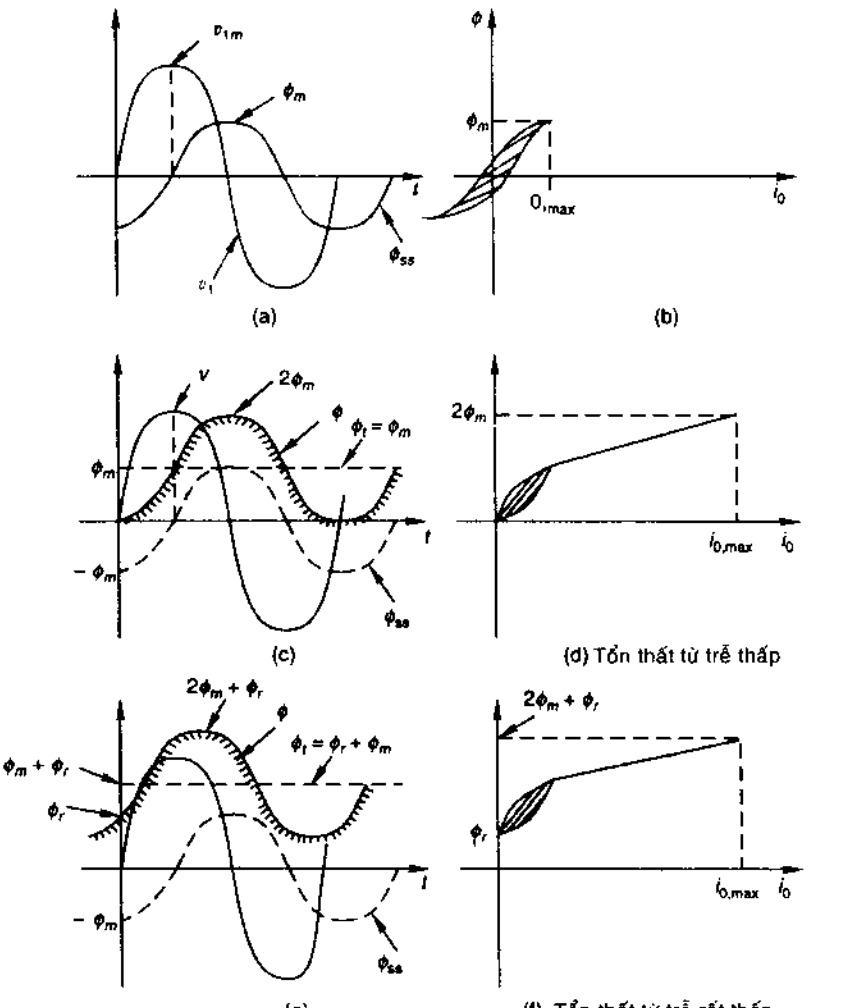
Trong biến áp ba pha, dòng họa tần thứ ba không chạy nên dòng từ hóa I_m là hàm sine. Theo đường cong B-H, từ thông trong lõi không phải là hàm sine, dạng sóng có đỉnh phẳng. Điều này được thẩm định bằng đặc tuyến từ hóa ϕ - i_m, với i_m hàm sine tìm được dạng sóng ϕ có đỉnh phẳng. Lực điện động là đạo hàm của từ thông, bây giờ có đỉnh nhọn vì có chứa họa tần thứ ba lớn, dạng sóng như trên Hình 3-32.

Đảo mạch chuyển tiếp

Ở trên là sự vận hành ở trạng thái ổn định với v_1 và ϕ đều theo hàm sine, ϕ chậm pha so với v_1 là 90^0 (Hình 3-33a). Quan hệ ϕ - i_0 trên Hình 3-33b, dòng kích thích bình thường dưới các điều kiện này là 0.05 đơn vị nếu biến áp được thiết kế với B_{max} = 1.4 T.

Khi điện áp v_1 được đóng mạch vào biến áp, từ thông ϕ trong lõi và dòng điện kích thích tương ứng trải qua giai đoạn chuyển tiếp trước khi đạt giá trị ổn định. Sự khắc nghiệt của giai đoạn này xảy ra rất nhanh khi sóng điện áp được cấp vào. Xấu nhất là điện áp cấp vào bằng 0 ở thời điểm đóng mạch (Hình 3-33c). Giả sử từ thông ban đầu bằng 0 ở thời điểm đóng mạch, từ hình vẽ, có thể thấy giá trị từ thông ở trạng thái ổn định vào thời điểm này là - ϕ_m, từ thông chỉ có thể bắt đầu từ giá trị 0 (trong mạch cảm ứng). Hệ quả là hình thành một thành phần từ thông chuyển tiếp (từ thông bù) $\phi_t = \phi_m$ để có (ϕ_t + ϕ_{ss}) = 0 ở thời điểm đóng mạch. ϕ_t suy giảm và triết tiêu, phụ thuộc hằng số

thời gian mạch (L/R) tương đối thấp trong biến áp. Giả sử tổn thất mạch (tổn thất lõi) không đáng kể, từ thông bù chuyển tiếp ϕ_t sẽ đi qua giá trị cực đại $2\phi_m$, hiện tượng này là *hiệu ứng kép* (doubling effect). Dòng kích thích tương ứng sẽ rất lớn khi lõi đi vào vùng từ hóa bão hòa sâu (B_m = 2 x 1.4 = 2.8 T); khoảng

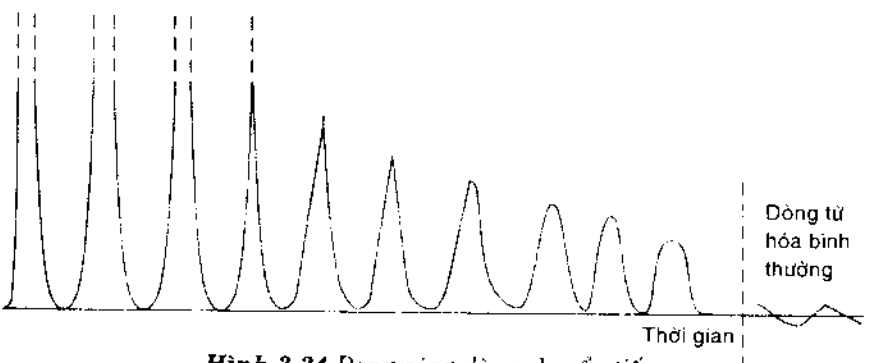


Hình 3-33 *Dòng chuyển tiếp trong biến áp*

100 lần so với dòng kích thích bình thường, nghĩa là dòng kích bình thường 0.05 đơn vị sẽ tạo ra lực điện từ gấp 25 lần so với bình thường. Đó là lý do các cuộn dây trong biến áp lớn phải được gia cường vững chắc. Cứ mỗi nửa chu kỳ, ϕ_t suy giảm dần cho đến lúc từ thông trong lõi đạt giá trị ổn định, vì hằng số thời gian mạch biến áp nhỏ, nên hiệu ứng biến dạng chuyển tiếp phải mất nhiều giây. Sự chuyển tiếp đảo mạch của biến áp được xem là *dòng điện chuyển tiếp bên trong*.

Từ thông ban đầu trong lõi sẽ không bằng zero, vì còn giá trị từ thông dư ϕ_r (Hình 3-33e và 3-33f). Sự chuyển tiếp sẽ có $\phi_t = \phi_m + \phi_r$ và từ thông lõi sẽ trải qua giá trị cực đại là $(2\,\phi_m + \phi_r)$.

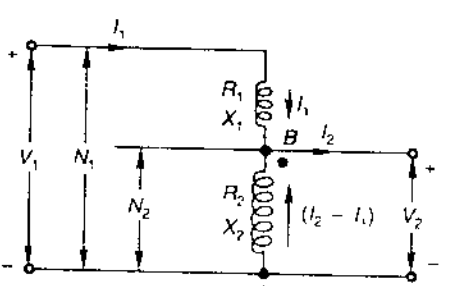
Quan sát Hình 3-33c và e có thể thấy từ thông ϕ_t là một chiều, do đó từ thông chuyển tiếp và dòng kích thích có dạng một chiều trong giai đoạn chuyển tiếp ban đầu. Hình 3-34 là sơ đồ dòng chuyển tiếp trong biến áp.



Hình 3-34 *Dạng sóng dòng chuyển tiếp.*

Biến áp tự ngẫu

Biến áp đã xét ở các phần trên có hai cuộn dây độc lập, cách ly điện với nhau và được gọi là biến áp cách ly. Khi các cuộn dây sơ cấp và thứ cấp được nối với nhau, có một phần cuộn dây chung cho sơ cấp và thứ cấp (Hình 3-35) được gọi là biến áp tự ngẫu. Biến áp tự



Hình 3-35 *Biến áp tự ngẫu*

ngẫu đặc biệt kinh tế khi tỷ số biến áp nhỏ hơn 2, trong trường hợp không có yêu cầu cao về cô lập điện giữa hai cuộn dây. Các ứng dụng chính bao gồm bộ khởi động trên động cơ cảm ứng, liên nối kết các hệ thống cao áp tại các mức điện áp với tỷ số thấp hơn 2, và trong các nguồn cung cấp điện áp biến thiên. Biến áp tự ngẫu có trở kháng thấp, tổn thất nhỏ, dòng kích thích thấp và sự điều áp tốt hơn so với các loại biến áp khác.

Hình 3-35 trình bày biến áp tự ngẫu một pha, có cuộn sơ N_1 vòng và cuộn thứ N_2 vòng cấp điện áp ra thấp hơn cuộn sơ. Dây quấn đoạn BC (N_2 vòng) dùng chung cho mạch sơ và thứ. Đoạn dây quấn AB có điện áp cao hơn, được cách điện tốt hơn. Có thể giả thiết dòng từ hóa là không đáng kể, nhưng có thể xác định bằng thí nghiệm không tải, nếu cần.

Đối với điện áp hai cuộn dây (cuộn sơ là đoạn AB, cuộn thứ là BC), và theo Hình 3-35, tỉ số biến áp a sẽ là:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_2} = \frac{N_1 - N_2}{N_2}; N_1 > N_2 \qquad (3.68)$$

Đối với biến áp tự ngẫu (Hình 3-35), tỉ số biến áp là:

$$a' = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} > 1 \qquad (3.69)$$

Từ Pt (3.68) và (3.69) :

$$a' = 1 + a \qquad (3.70)$$

Với biến áp hai cuộn dây được đấu dây theo kiểu biến áp tự ngẫu (Hình 3-35) có thể so sánh định mức công suất VA của hai loại.

Đối với biến áp hai cuộn dây

$$(VA)_{TW} = (V_1 - V_2)\, I_1 = (I_2 - I_1)\, V_2 \qquad (3.71)$$

Đối với biến áp tự ngẫu

$$(VA)_{auto} = V_1\, I_1 = V_2\, I_2 \qquad (3.72)$$

Pt (3.71) có thể viết :

$$(VA)_{TW} = \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right)(V_1 I_1) = \left(1 - \frac{N_2}{N}\right)(VA)_{auto}$$

hay

$$(VA)_{auto} = \left[\frac{1}{1 - (1/a')}\right](VA)_{TW}; a' = N_1 / N_2 > 1 \qquad (3.73)$$

Từ đó :

$$(VA)_{auto} > (VA)_{TW} \tag{3.74}$$

Biến áp có hai cuộn dây có định mức VA cho trước được đấu dây như biến áp tự ngẫu sẽ có công suất VA lớn hơn, do trong biến áp tự ngẫu có một phần công suất VA được truyền theo sự dẫn điện. Lưu ý, (Hình 3-74) khi $a' = N_1/N_2$ (tỉ số biến áp tự ngẫu) tiến tới 1, thì:

$$(VA)_{auto} >> (VA)_{TW} \tag{3.75}$$

Đó là lý do biến áp tự ngẫu thường được dùng khi tỉ số vòng nhỏ hơn 2, tương tự sự nối kết hai hệ thống điện áp cao ở các mức điện áp khác nhau.

Đối với điện áp thấp, biến áp tự ngẫu có VA nhỏ được sử dụng làm nguồn cung cấp điện áp biến thiên cho các ứng dụng thử nghiệm. Ở đây $a' = N_1/N_2$ biến thiên bằng cách thay đổi đầu ra N_2.

Giả sử mật độ dòng trong dây dẫn là hằng số, có thể so sánh biến áp tự ngẫu và biến áp hai cuộn dây được nối như biến áp tự ngẫu:

$$\frac{G_{auto}}{G_{TW}} = \frac{I_1(N_1 - N_2) + (I_2 - I_1)N_2}{I_1N_1 + I_2N_2}$$

$$= 1 - \frac{2I_1N_2}{2I_1N_1} (\because I_1N_1 = I_2N_2) = 1 - \frac{N_2}{N_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} \tag{3.76}$$

Với G là trọng lượng dây dẫn. Từ Pt (3.76) :

$$G_{TW} - G_{auto} = \frac{1}{a'} G_{TW}$$

phần dây dẫn có thể tiết kiệm khi sử dụng biến áp tự ngẫu.

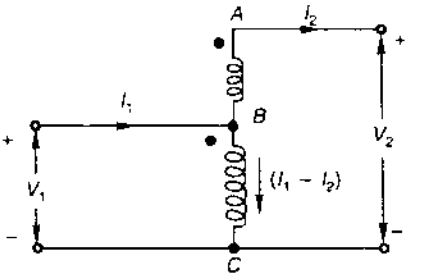
Nếu a' = 10, chỉ tiết kiệm 10%, nhưng a' = 1.1, bạn sẽ tiết kiệm đến 90%. Biến áp tự ngẫu sẽ kinh tế hơn khi tỉ số vòng tiến đến 1 (đơn vị).

Hệ thống điện lực cao áp (220 kV và 132 kV) được nối ghép bằng biến áp tự ngẫu ba pha có trọng lượng dây quấn biến áp ít hơn nhiều so với biến áp hai cuộn dây ba pha.

Từ Hình 3-30, có thể tính điện trở và điện kháng từ phía sơ cấp:

$$r'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} - 1\right)^2 r_2; \quad x'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} - 1\right)^2 x_2 \tag{3.77}$$

Ví dụ 3-16 Biến áp 2000/200 V, 20 kVA trong ví dụ 3-7 được nối như biến áp tự ngẫu tăng áp theo Hình 3-36 với AB là dây quấn 200 V và BC là dây quấn 2000 V, dây quấn 200 V có đủ cách điện với 2200 V so với đất. Hãy tính (a). Điện áp phía HV và LV của biến áp tự ngẫu (b). Công suất kVA. (c). kVA truyền theo cảm ứng và điện dẫn. (d). Hiệu suất tải toàn phần với hệ số công suất 0.8



Hình 3-36

Giải

a. $V_1 = 2000$ V.

$V_2 = 2000 + 200 = 2200$ V.

b.
$$I_2 = \frac{20 \times 1000}{200} = 100 \text{ A}$$
$$I_1 - I_2 = 10 \text{ A}; \quad I_1 = 110 \text{ A}$$
$$\text{Định mức kVA} = \frac{2200 \times 100}{1000} = 220$$
$$= \frac{2000 \times 110}{1000} = 220$$

Biến áp hai cuộn dây 20 kVA tương đương biến áp tự ngẫu 220 kVA, tăng áp 11 lần

c. kVA truyền dẫn theo cảm ứng $= \dfrac{V_1(I_1 - I_2)}{1000} = \dfrac{2000 \times 100}{1000}$

kVA truyền dẫn theo điện dẫn = 220 - 20 =200

d. Với dữ liệu từ Ví dụ 3-7

Tổn thất lõi (điện áp kích thích 2000 V) = 120 W

Tổn thất tải toàn phần ở dây đồng 300 W

($I_2 = 100$ A, $I_1 - I_2 = 10$ A)

Tổng tổn thất 420 W

Công suất ra đủ tải = 2200 x 100 x 0.8 = 176 kW

$$\eta = 1 - \frac{420}{176420} = 99.76\%$$

Trong Ví dụ 3-11, biến áp này là biến áp hai cuộn dây quấn cách ly có hiệu suất đủ tải 97.44%. Biến áp tự ngẫu có hiệu suất lớn hơn (99,76%) vì cùng điện áp kích thích và cùng dòng điện dây quấn, nghĩa là cùng tổn thất nhưng có công suất ra lớn hơn.

Biến áp biến tần

Các phần trước đã xét các biến áp vận hành với tần số cố định (50 Hz). Các biến áp này dùng để biến đổi công suất điện từ điện áp này sang điện áp khác. Biến áp nhỏ (lõi sắt) được dùng để ghép nối mạch điện tử trong truyền thông, đo đạc, và điều khiển. Các biến áp này xử lý tín hiệu trong phạm vi dải tần rộng (phụ thuộc tín hiệu đo đạc, điều khiển, âm thanh, hình ảnh ...) các biến áp này có hai ứng dụng cơ bản là:

- Ghép tải với nguồn để có công suất cực đại cấp cho tải. Các ứng dụng này sử dụng đặc tính biến đổi trở kháng của biến áp. Hiệu suất toàn phần của phối hợp trở kháng thấp, khoảng 50%. Nhưng trong mạch điện tử, tiêu chuẩn hoạt động là công suất cực đại, khác với trong hệ thống công suất là hiệu suất cực đại. Biến áp như thế là biến áp xuất (biến áp ngõ ra); trong mạch âm thanh, là *biến áp âm thanh*.
- Cung cấp đường dẫn cho dòng thiên áp dc qua mạch sơ cấp và tránh mạch thứ cấp.

Yêu cầu quan trọng của biến áp này là độ khuếch đại biên độ điện áp (bằng tỉ số biên độ điện áp ngõ ra/ngõ vào) giữ không đổi trong toàn bộ dải tần tín hiệu. Ngoài ra, độ dời pha tín hiệu ra so với tín hiệu vào phải nhỏ trên dải thông tín hiệu. Độ khuếch đại và đặc tuyến pha - tần số của biến áp được xem xét ở đây, kể cả ảnh hưởng của trở kháng ra (điện trở) ở tầng công suất. Trong các đặc tuyến này, dải tần rất lớn và thang đo tần số được tính theo logarit.

Hình 3-37a minh họa mô hình mạch biến áp được cấp nguồn điện V_s có điện trở ra R_3. Bỏ qua tổn thất lõi trong biến áp. Hiệu ứng từ thông rò và từ hóa phụ thuộc theo tần số ($X = \omega L$), với độ tự cảm từ hóa $L_m = L_{11}$ (là độ tự cảm lõi sơ cấp).

Đáp tuyến pha và tần số được chia thành ba vùng, các tính toán đáp tuyến được đơn giản hóa bằng các giả thiết sau:

Vùng tần số trung tâm. Trong vùng này điện kháng rò nối tiếp có thể bỏ qua (vì sụt áp không đáng kể) và điện kháng song song (điện kháng từ hóa) có thể xem như hở mạch. Với sự gần đúng này, mạch tương đương từ phía cuộn sơ được nêu trên Hình 3-37b, V_L và V_S đồng pha. Mạch chỉ có điện trở. Với khuếch đại biên độ, sẽ có :

$$V'_L = V_s\left[\frac{R'_L}{R + R_L}\right]; \quad R = R_s + R_1 + R'_2$$

$$\left[\frac{N_1}{N_2}\right]V_L = V_s\left[\frac{R'_L}{R + R'_L}\right]$$

$$A_0 = \frac{V_L}{V_s} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]\left[\frac{R'_L}{R + R'_L}\right]; \quad A_0 = 0 \qquad (3.78)$$

Vùng tần số cao. Trong vùng này, điện kháng nối tiếp phải được xét trong tính toán, nhưng điện kháng song song là đầu ra hở mạch, Hình 3-37c là mạch tương đương gần đúng. Biên độ và góc pha là hàm tần số và được tính toán như sau:

$$\overline{A}_H = \frac{\overline{V}_1}{\overline{V}_S} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]\frac{R'_L}{(R + R'_L) + j\omega L}$$

Với $\quad L = L_{l1} + L_{l2}$ = tổng điện kháng rò được nhìn từ phía cuộn sơ

$$\overline{A}_H = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]\left[\frac{R'_L}{R + R'_L}\right]\frac{1}{1 + j\omega[L/(R + R'_L)]}$$

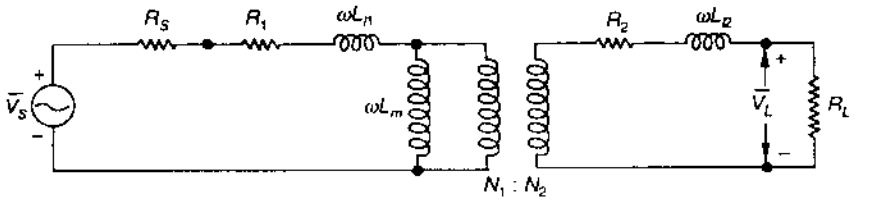
Có thể viết $\dfrac{R + R'_L}{L} = W_H =$ tần số góc (cạnh) của vùng tần số cao.

$$\left[\frac{N_2}{N_1}\right]\left[\frac{R'_L}{R + R_L}\right] = A_0$$

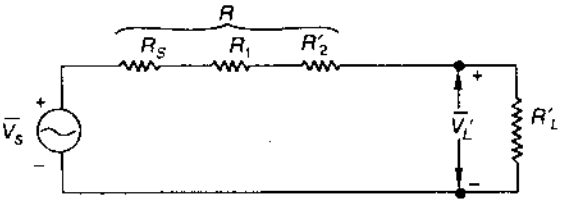
$$A_H = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_H} \qquad (3.79)$$

$$A_H = \frac{A_0}{\left[1 + (\omega/\omega_H)^2\right]^{1/2}}; A_H = \tan^{-1}\omega/\omega_H \qquad (3.80)$$

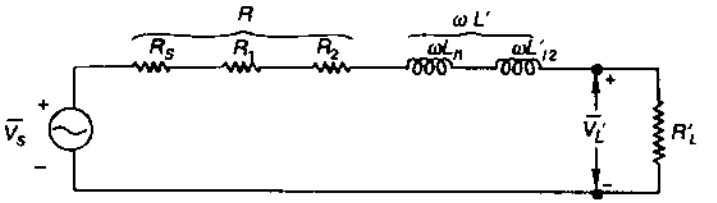
Theo Pt (3.80), độ khuếch đại giảm đến $A_0/\sqrt{2}$ tương ứng với tần số $\omega/\omega_H = 1$ và góc pha $\angle - 45^0$. Thực ra, đây là một nửa tần số công suất (ω_H).



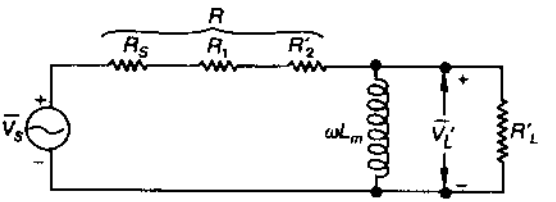
(a) Mạch biến áp



(b) Mạch gần đúng ở vùng tần số trung tâm



(c) Mạch gần đúng ở vùng tần số cao



Hình 3-37 (d) Mạch gần đúng ở vùng tần số thấp

Vùng tần số thấp. Trong vùng này, hiệu ứng điện kháng rò nối tiếp không có ảnh hưởng đáng kể, nhưng hiệu ứng điện kháng thấp song song (ωL_m) phải được tính đối với mạch tương đương gần đúng được nêu trên Hình 3-37d. Biên độ và góc pha của đáp tuyến tần số được tính như sau:

Tần số ω_L ở mạch này được tính theo phân tích nguồn điện áp khi ngắn mạch, khi đó, L_m song song với $R + R'_L$, vì vậy:

$$\omega_L = \left[\frac{R // R_L}{L_m}\right]$$

Độ khuếch đại dạng phức:

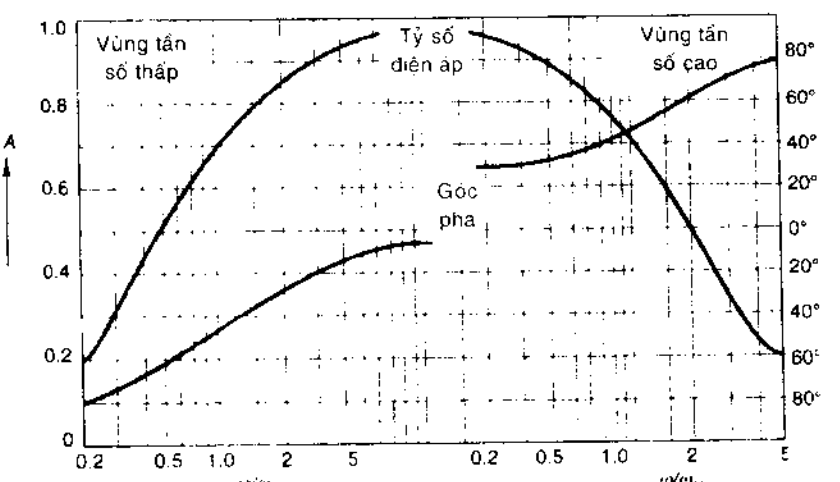
$$\overline{A}_L = \frac{A_0}{1 + j(\omega / \omega_L)} \qquad (3.81)$$

hay

$$A_L = \frac{A_0}{\left[1 - (\omega / \omega_L)^2\right]^{1/2}}; \angle \overline{A}_L = \tan^{-1} \omega / \omega_L \qquad (3.82)$$

Tần số góc thấp hơn là nửa tần số công suất.

Đáp tuyến pha và tần số hoàn chỉnh của biến áp (với nguồn cấp) theo giá trị logarit của tần số được vẽ trên Hình 3-38. Ở tần số cao, bắt đầu xuất hiện dung kháng gây nhiễu các cuộn dây biến áp. Trong thực tế, hỗn hợp cảm kháng và dung kháng tạo ra hiệu ứng cộng hưởng song song phải được tính đến ở đỉnh biên độ trên vùng tần số cao của đáp tuyến tần số. Không thể tạo mạch tương đương hiệu ứng này mà phải xác định theo các kết quả thực nghiệm. Đáp tuyến tần số minh họa trên Hình 3-38 chỉ có tính khái quát.



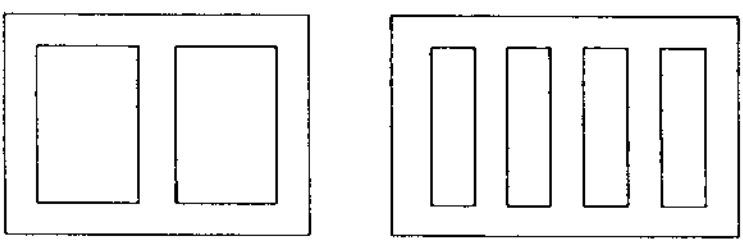
Hình 3-38 *Đặc tuyến chuẩn hóa hóa tần số của ngõ ra biến áp.*

Biến áp ba pha

Trong việc phát, biến đổi, truyền tải và khai thác sử dụng điện năng, hệ thống điện ba pha được sử dụng vì có tính kinh tế cao hơn hệ thống một pha. Biến áp ba pha cần cho sự biến đổi điện ba pha, có hai cách tạo lập biến áp ba pha là dùng tổ hợp ba biến áp một pha, hoặc một biến áp ba pha với cuộn sơ và cuộn thứ mỗi pha được quấn trên ba trụ của một lõi chung.

Biến áp ba pha có giá thấp hơn 15% so với ba biến áp một pha, và chiếm ít không gian hơn. Độ tin cậy khác nhau chút ít, nhưng phụ tùng thay thế của biến áp một pha rẻ tiền hơn biến áp ba pha. Tổ hợp biến áp một pha sử dụng dưới đất thuận tiện hơn.

Trong tổ hợp ba biến áp một pha, các pha được nối điện với nhau, nhưng ba mạch từ độc lập với nhau. Trong máy biến áp ba pha, ba nhánh biến áp kiểu trụ (Hình 3-39a) được dùng nhiều, có ba mạch từ liên kết nhau, nếu cần nhiều mạch từ, có thể dùng biến áp kiểu bọc năm nhánh (Hình 3-39b).



(a) kiểu trụ thường dùng (b) kiểu bọc (lõi năm nhánh)

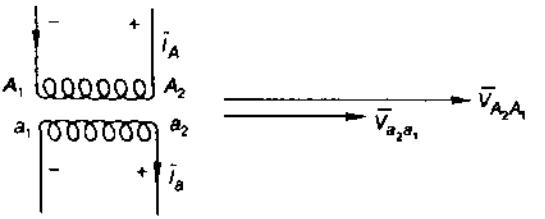
Hình 3-39 *Lõi biến áp ba pha*

Nối kết biến áp ba pha

Biến áp 3 - pha (một 3-pha hoặc tổ hợp ba biến áp 1-pha) có nhiều cách nối dây theo hình sao, tam giác, tam giác hở, và sao zigzac. Mỗi nhánh nối dây (đấu dây) thường có hai cuộn dây, có thể được nối tự động. Loại nối dây cần đến cuộn thứ ba, được gọi là tầng thứ ba.

Ghi nhãn các đầu dây biến áp

Các đầu dây phía HV (cao áp) của mỗi pha được ghi ký hiệu bằng chữ in hoa A, B, C và phía LV (hạ áp) bằng chữ thường a, b, c. Cực tính hai đầu dây

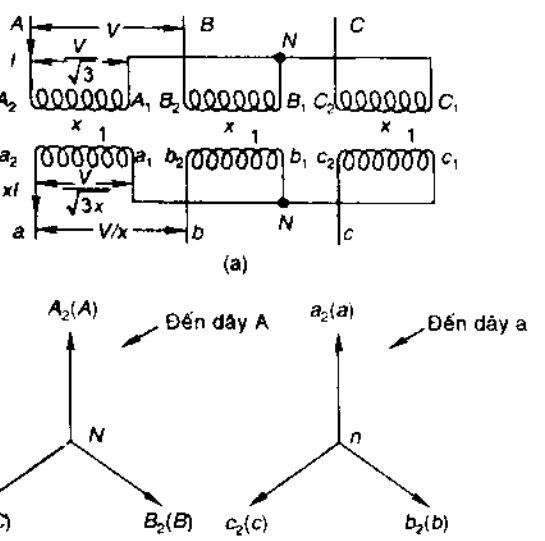


Hình 3-40 *Ghi nhãn các đầu dây biến áp*

biểu thị bằng số 1 và 2, với 1 là cực tính cuối (dây), 2 là cực tính đầu dây. Hình 3-40 minh họa các ký hiệu pha a. Giả sử biến áp là loại lý tưởng, V_{A2A1} (điện áp đầu A_2 so với A_1) cùng pha với V_{a2a1} và I_A cùng pha với I_a.

Nối sao - sao (Y/Y)

Nối sao là kiểu nối dây các cuộn dây pha có đầu cực tính cuối (số 1) được nối chung (Hình 3-41a). Sơ đồ pha là Hình 3-41b. Điện áp HV và LV trong một pha là cùng pha. Kiểu nối dây này được gọi là nối 0^0. Nếu hai đầu dây cuộn thứ đảo ngược (HV và LV nghịch pha), đó là nối 180^0.



Hình 3.41 *Nối kết sao / sao 0^0*

Nếu tỉ số biến áp pha là x : 1 thì tỉ số biến áp dây (dòng điện, điện áp từ dây đến dây) là x : 1.

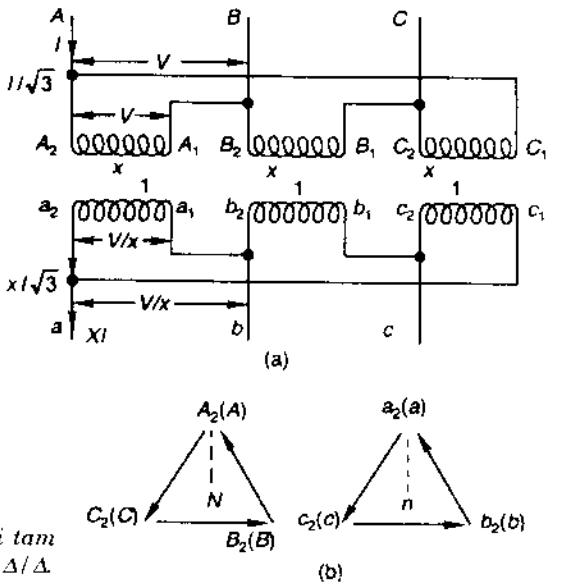
Nối tam giác/tam giác (Δ/Δ)

Hình 3-42a là kiểu nối tam giác/tam giác (Δ/Δ) và sơ đồ pha tương ứng trên Hình 3-42b. Tổng điện áp quanh tam giác thứ cấp là 0. Trên sơ đồ pha, điện áp dây cuộn sơ và cuộn thứ cùng pha, đó là nối 0^0. Nếu đầu ra thứ cấp a, b, c lấy từ các nút a_1b_2, b_1c_2, c_1a_2, điện áp cuộn thứ nghịch pha với điện áp cuộn sơ, đó là nối 180^0.

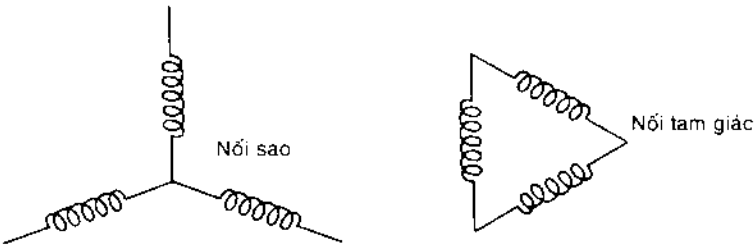
Nếu tỉ số biến áp pha là x : 1, tỉ số biến áp đối với các đại lượng dây cũng là x : 1.

Trong kiểu nối Δ/Δ, nếu một biến áp không nối, nối kết là loại tam giác hở. Giả sử biến áp pha b được loại bỏ, *tam giác hở* được cấp từ nguồn 3-pha cân bằng (Hình 3-44). Từ Hình 3-42 có $Vb_2b_1 = V_{bc}$, điện áp vẫn không thay đổi và bằng $-(V_{ca} + V_{ab})$. Vì thế điện áp cuộn sơ vẫn giữ 3-pha cân bằng. Nếu dòng điện pha cuộn sơ là I_{ph}, công suất VA của biến áp tam giác hở là:

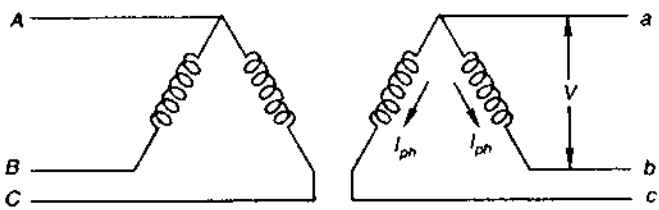
$$S_{\text{tam giác hở}} = \sqrt{3}VI_{ph}$$



Hình 3-42 *Nối tam giác/tam giác Δ/Δ*



Hình 3.43



Hình 3-44 *Nối tam giác hở, còn gọi là nối V*

Với nối Δ/Δ bình thường

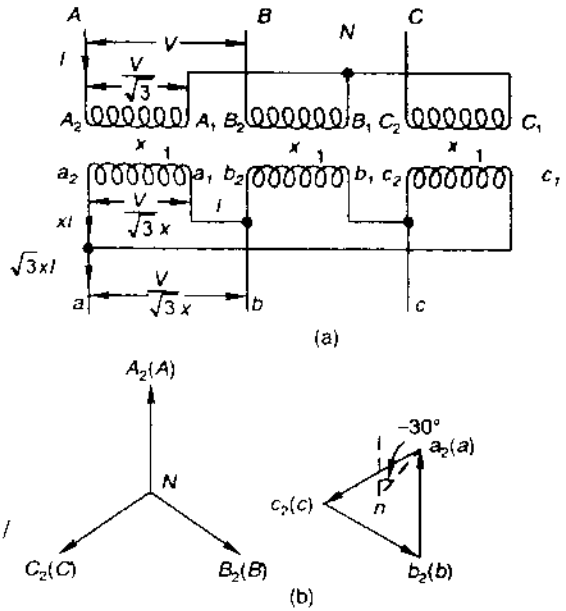
$$S_{\Delta} = 3\ VI_{ph}$$

Nối tam giác hở có công suất định mức VA bằng $1/\sqrt{3} = 0.58$ định mức nối Δ/Δ bình thường.

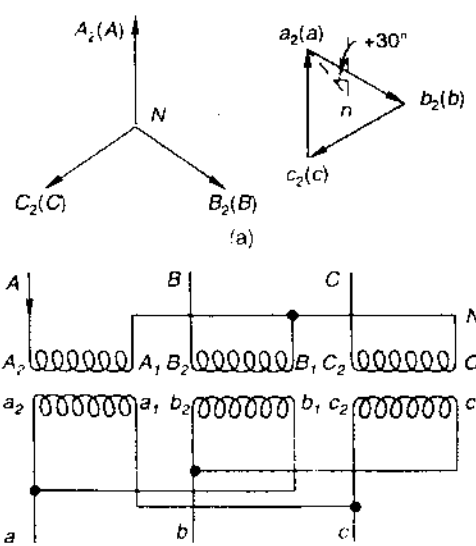
Nối sao/tam giác (Y/Δ)

Nối sao được thực hiện ở phía sơ cấp bằng cách nối các đầu dây 1 với nhau; các đầu dây 2 được nối vào các dây tương ứng; nối tam giác được thực hiện bằng cách nối c_1a_2, a_1b_2, và b_1c_2 với các dây được nối đến các tiếp giáp có ký hiệu a, b, c (Hình 3-45a). Sơ đồ pha được nêu trên Hình 3-45b. Từ sơ đồ pha có thể thấy ở phía tam giác tổng các điện áp quanh tam giác là zero. Điều này là cần thiết, nếu không đạt được, mạch tam giác kín sẽ bị ngắn mạch. Từ sơ đồ pha có thể thấy pha a đến điện áp trung hòa (tương đương cơ sở nối sao) ở phía tam giác bị trễ -30^0 so với điện áp pha-trung hòa ở phía sao; đây cũng là quan hệ pha giữa các điện áp dây-dây. Loại nối kết này được gọi là "nối kết 30^0".

Nối $+30^0$ theo sơ đồ nối và sơ đồ pha trên Hình 3-46b.



Hình 3-45 *Nối sao / tam giác - 30°*



Hình 3-46 *Nối sao / tam giác + 30°*

Tương tự, nối ± 90° cũng có khả năng nối sao/tam giác, bằng cách ghi nhãn phía tam giác. Ví dụ nối + 90°, ghi nhãn như sau: c → a, b → c, và a → b.

Ở Ấn Độ và Anh sử dụng nối ± 30°. Ở Mỹ sử dụng nối ± 90°.

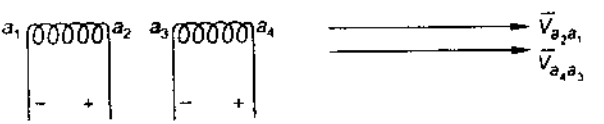
Nếu tỉ số biến áp pha của nối sao/tam giác là x : 1 (Hình 3-45a), tỉ số biến áp dây có độ lớn là $\sqrt{3}$: x/1.

Nối tam giác/sao

Đơn giản là đổi vai trò cuộn sơ và cuộn thứ trong nối sao/tam giác. Phải đổi chữ in hoa (A, B, C) và chữ thường (a, b, c) với nhau trong các ký hiệu và đổi nối -30° thành nối + 30° và ngược lại. Nếu tỉ số biến áp pha là x : 1 (tam giác/sao), tỉ số biến áp các đại lượng dây là (x/ $\sqrt{3}$) : 1

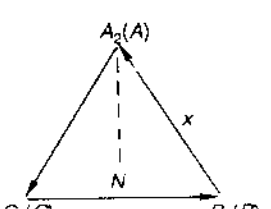
Nối tam giác/zigzag sao

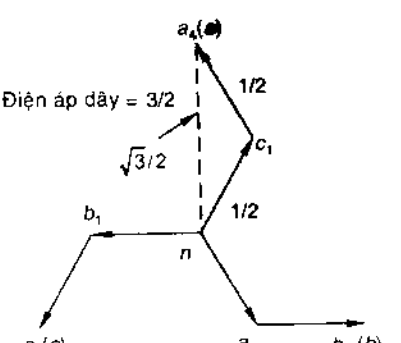
Cuộn dây trong mỗi pha trên phía sao được chia làm hai phần bằng nhau, và ghi ký hiệu như trên Hình 3-47. Mỗi trụ của nối sao được tạo thành bằng cách dùng hai nửa từ hai pha khác nhau. Hình 3-48 là sơ đồ pha của cách nối này. Đó là nối 0°. Đảo ngược nối trên phía hình sao, sẽ là nối 180°



Hình 3-47. *Nối tam giác/zigzag sao*

Hình 3-48 *Nối 0° tam giác/zigzag sao*





Tỉ số biến áp pha $= x : 1$

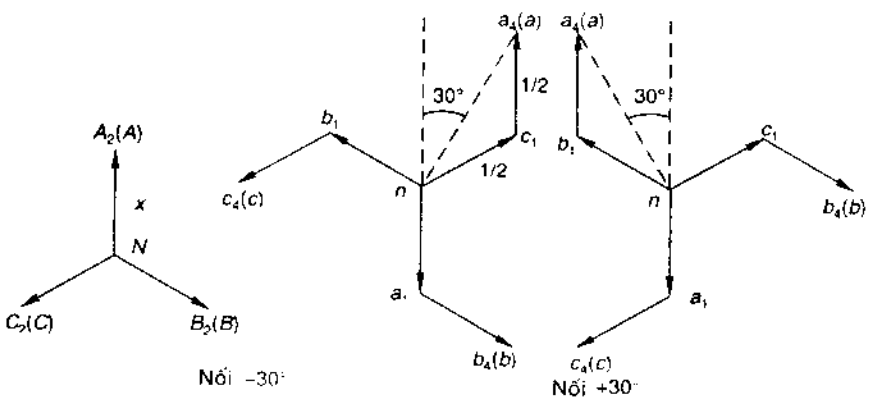
Tỉ số biến áp dây $= x : \frac{3}{2}$ hoặc $\frac{2}{3}x : 1$

Nối sao/zigzag sao

Hình 3-49 là sơ đồ pha của cách nối này

Tỉ số biến áp pha $= x : 1$

Tỉ số biến áp dây $= \sqrt{3}\,x : \frac{3}{2}$ hoặc $\frac{2}{\sqrt{3}}x : 1$



Hình 3-49 *Sao/zigzag sao*

Nhóm pha

Các nối biến áp có độ dời pha giống nhau, được xếp vào một nhóm, gồm các nhóm I (0°), nhóm II (180°), nhóm III (30°), và nhóm IV (-30°)

Chọn lựa giữa nối sao và tam giác

Trong nối sao có điện áp trung tính tiếp đất, điện áp pha, giữa dây pha với đất bằng $1/\sqrt{3}$ hay 58% điện áp dây (giữa hai dây pha), còn trong nối tam giác điện áp này bằng điện áp dây khi nối đất một trong các dây bị sự cố. Đối

với biến áp cao áp, nối sao trên phía HV rẻ tiền hơn khoảng 10% nối tam giác khi tính toán trị giá cách điện. Cuộn sơ nối tam giác là cần thiết đối với cuộn thứ LV (áp thấp) nối sao, để cấp điện đến tải 3-pha và 1-pha (dây với trung tính), vì tải có khi không cân bằng. Trong trường hợp tải một pha không cân bằng (trên cuộn thứ), cuộn sơ nối tam giác cần dẫn dòng thứ tự zero (zero sequence) :

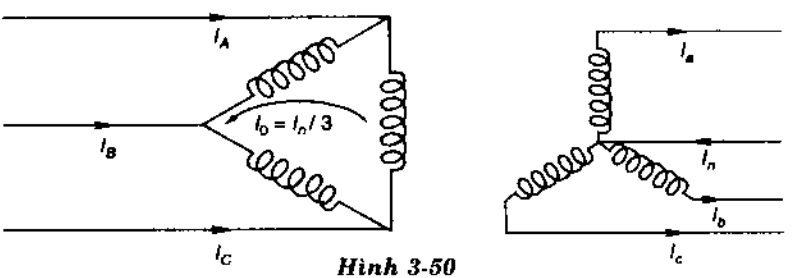
$$\bar{I}_0 \frac{\bar{I}_n}{3} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c)$$

Theo Hình 3-50:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$$

Điều này nghĩa là chỉ có các dòng *thứ tự âm* và *dương* chạy trong các dây dẫn phía tam giác.

Đối với cuộn sơ và cuộn thứ đều nối sao, cũng có kết quả tương tự như trên (dây trung tính tiếp đất). Điều này không nên sử dụng khi xét đến dòng nối đất đối với các tải cuộn thứ không cân bằng.



Hình 3-50

Chọn lựa kiểu nối biến áp

Sao/sao. Kiểu nối kinh tế đối với biến áp HV nhỏ do giảm số vòng/pha và cách điện cuộn dây. Tuy nhiên, nối sao/sao ít được dùng, vì các khó khăn liên quan với dòng kích thích.

Tam giác/tam giác. Kiểu nối thích hợp với các biến áp LV lớn, do cần số vòng lớn / pha trong thể tích nhỏ. Sự không cân bằng tải được phép trong khoảng dung sai đủ lớn. Bất lợi là không có điểm sao. Nối kết này có thể vận hành với 58% định mức như tam giác - hở khi một trong các biến áp của bộ biến áp được tháo ra để bảo trì hoặc sửa chữa.

Sao/tam giác. Kiểu nối thường dùng trong hệ thống công suất (điện lực). Ở các mức truyền tải thường nối sao trên phía HV, nghĩa là tam giác/sao là tăng áp, sao/tam giác là hạ áp. Dây trung tính được dùng để nối đất phía HV. Ở mức phân phối, nối tam giác/sao được dùng với sao ở phía LV, cho phép có tải là hỗn hợp ba pha và một pha. Trong nối Δ không có dây trung tính (vì dòng trung tính là dòng chạy vòng tròn) (Hình 3.50).

Nối sao/tam giác có liên kết dời pha ± 30°, phải được tính toán trong hệ thống công suất.

Họa tần (sóng hài)

Phần trên đã đề cập dòng họa tần thứ ba bằng 40% dòng cơ bản, chạy song song với dòng từ hóa hàm sine, do các điều kiện của mạch biến áp. Khi dòng từ hóa hàm sine, từ thông có định phẳng. Có điện áp họa tần thứ ba hiện diện trong lực điện động cảm ứng.

Quan sát cho thấy, sự khác pha giữa điện áp và dòng điện họa tần thứ ba trong biến áp 3-pha là 3 x 120° = 360° hoặc 0° (đồng pha). Vì vậy dòng điện và điện áp họa tần thứ ba không thể hiện diện trong các dây của hệ thống ba pha.

Ba pha của tổ hợp biến áp một pha

Nối Δ/Δ. Điện áp nguồn chỉ cấp dòng điện từ hóa hàm sine tạo ra từ thông lõi có định phẳng; nhưng lực điện động họa tần thứ ba được cảm ứng gây ra dòng điện chạy vòng tròn trong tam giác, phục hồi từ thông theo hàm sine. Điện áp họa tần thứ ba rất nhỏ vì biến áp có trở kháng thấp đối với dòng họa tần thứ ba.

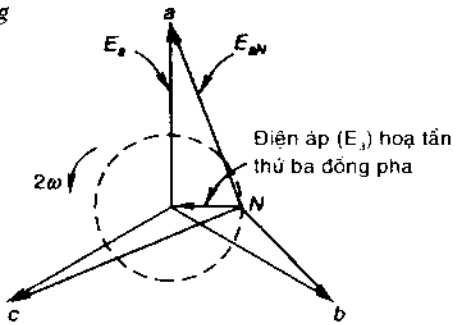
Nối sao/tam giác và tam giác/sao. Do một nối kết tam giác có các điều kiện tương tự như nối kết Δ/Δ, chỉ khác là trở kháng đối với dòng họa tần thứ ba lớn hơn, nên điện áp họa tần thứ ba lớn hơn.

Nối sao/sao. Nếu trung tính cách ly, điện áp họa tần thứ ba hiện diện trong mỗi pha như đã đề cập ở trên. Khi các điện áp này đồng pha, không có điện áp họa tần thứ ba hiện diện giữa các dây. Điện áp pha a (đối với trung tính) là:

$$e_{aN} = e_a \sin \omega t + e_{a3} \sin 3\omega t$$

Khi điện áp tần số cơ bản trong ba pha có hiệu số pha 120°, các điện áp họa tần thứ ba đồng pha, nhưng pha của chúng được xét theo tần số cơ bản

Hình 3-51 Trung tính dao động



(điện áp thay đổi gấp đôi tần số cơ bản, 2 ω). Điều này được minh họa trên sơ đồ pha Hình 3-51, hiện tượng điện áp điểm trung tính dao động ở tần số 2 ω, được gọi là *trung tính dao động*. Điều này là không mong muốn vì nối sao/sao có trung tính cách ly không được dùng trong thực tế.

Nếu nối trung tính, cần tách biệt ba biến áp. Dòng họa tần thứ ba sẽ chạy qua trung tính.

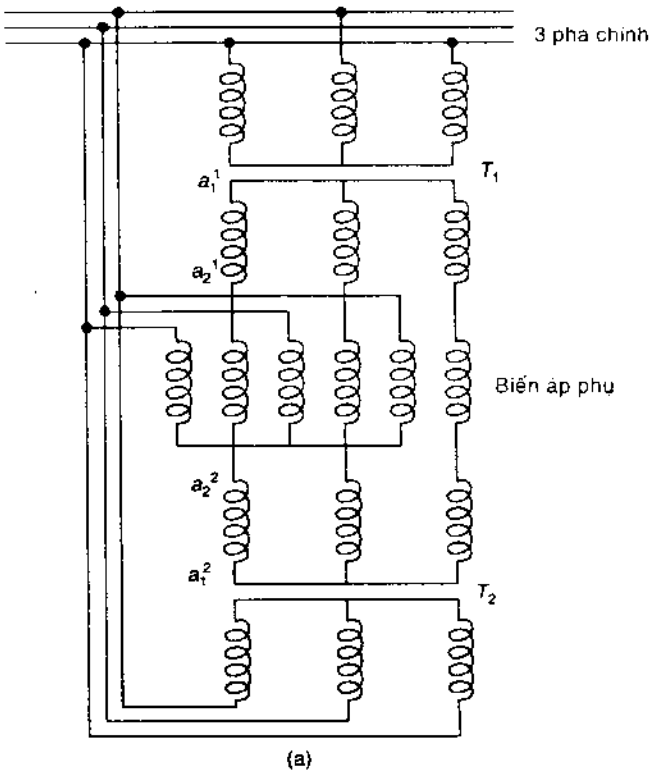
Biến áp 3 - pha

Trong biến áp kiểu trụ (Hình 3-39a), từ thông họa tần thứ ba trong cả ba nhánh đồng thời hướng lên hoặc xuống, để từ thông này trở về qua không khí (có từ trở cao). Đường dẫn từ trở cao có xu hướng triệt từ thông họa tần thứ ba. Hiện tượng trở nên phức tạp khi mật độ lõi vượt quá 1.5T, tổng lượng họa tần rất rõ trong dòng từ hóa (dòng họa tần thứ năm chạy trên đường dẫn khi hiệu số pha là 5 x 120 = 600°, hoặc 120°).

Để giảm họa tần thứ năm trong dòng từ hóa với nối sao/sao cùng với trung tính cách ly, một đường dẫn từ thông họa tần thứ ba phải được cấp qua sắt. Vì thế, cần sử dụng lõi năm nhánh (Hình 3-39b).

Thí nghiệm đấu ngược các biến áp 3-pha

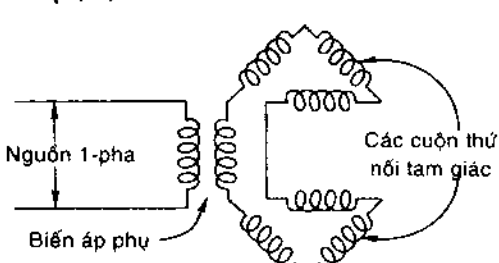
Hình 3-52a minh họa cách sắp xếp nối dây thí nghiệm đấu ngược trên hai biến áp ba pha đồng nhất. Hai phần thứ cấp nối đồng pha ngược và theo thứ tự pha thích hợp. Biến áp phụ cho dòng đủ tải chạy vòng tròn trong mạch của hai phần thứ cấp, và có thể gộp trong mạch của hai phần sơ cấp. Do đó chỉ có các tổn thất (tổn thất lõi và tổn thất đồng) từ nguồn điện chính, thí nghiệm "chạy nóng" được thực hiện trên hai biến áp.



Hình 3-52a *Thí nghiệm đấu ngược trên biến áp 3 - pha*

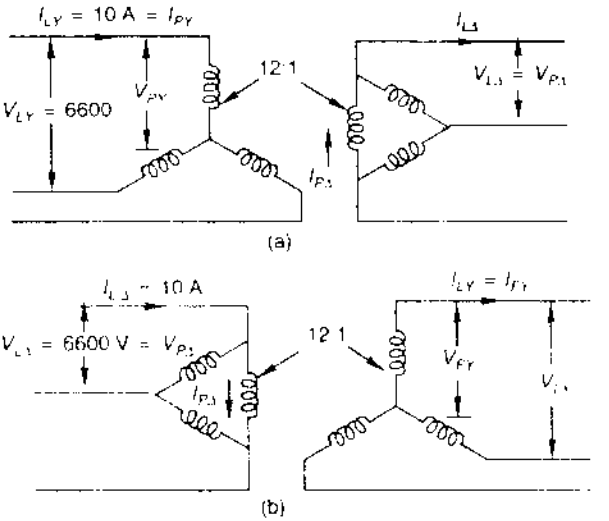
Biến áp nối tam giác/tam giác (Δ/Δ)

Cuộn sơ thường được kích thích từ mạch nguồn chính. Mỗi cuộn thứ hở ở một mối nối, biến áp một pha được dùng để chạy vòng dòng đủ tải trong cả hai tam giác (Hình 3-52b).



Hình 3-52b *Thí nghiệm đấu ngược trên biến áp Δ/Δ.*

Ví dụ 3-17. Tổ hợp ba biến áp một pha dùng để



Hình 3-53

giảm áp điện ba pha, với điện áp dây là 6600 V. Nếu dòng điện dây sơ cấp là 10 A, hãy tính điện áp dây và dòng điện dây thứ cấp, công suất ra kVA đối với (a). Nối sao/tam giác. (b). Nối tam giác/sao. Tỉ số biến áp (tỉ số vòng) là 12. Bỏ qua các tổn thất.

Giải

a. Hình 3-53a minh họa nối sao/tam giác

$$V_{PY} = \frac{6600}{\sqrt{3}}$$

$$V_{P\Delta} = V_{L\Delta} = \frac{6600}{\sqrt{3} \times 12} = 317.55 \text{ V}$$

$$I_{P\Delta} = 10 \times 12 = 120 \text{ A}$$

$$I_{LD} = 120\sqrt{3} = 207.84\text{A}$$

Công suất điện ra kVA = $\sqrt{3} \times \frac{6600}{\sqrt{3} \times 12} \times 120\sqrt{3} \times \frac{1}{1000} = 66\sqrt{3} = 114.3$

b. Hình 3-53b minh họa nối tam giác / sao

$$I_{PY} = \frac{10}{\sqrt{3}} A$$

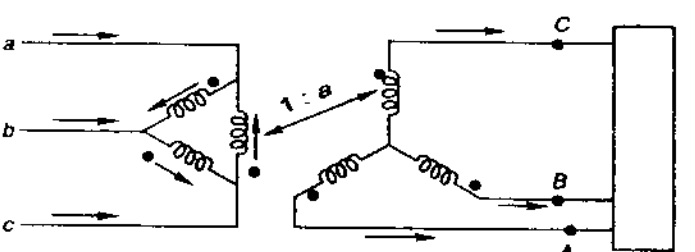
$$I_{LY} = \frac{12 \times 10}{\sqrt{3}} = 62.28 \text{ A}$$

$$V_{PY} = \frac{6600}{12} V$$

$$V_{LY} = \frac{6600\sqrt{3}}{12} = 925.6 \text{ V}$$

Công suất ra kVA $= \sqrt{3} \times \frac{6600\sqrt{3}}{12} \times \frac{120}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} = 114.3$

Ví dụ 3-18. Một biến áp ba pha nối tam giác/sao như trên Hình 3-54, có tỉ số biến áp 22 kV(tam giác)/34.5 kV(sao) (điện áp dây). Biến áp cung cấp 500 MW và 100 MVAR đến lưới điện (345 kV). Hãy xác định giá trị định mức VA và điện áp trên mỗi pha (1 pha). Tính dòng và áp cả độ lớn và góc pha trong tất cả các cuộn dây (sơ và thứ), giả sử mỗi biến áp một pha đều là biến áp lý tưởng.



Hình 3-54

Giải

Tải MVA, $\bar{s} = 500 + j100$

$s = 500 + j\,1001 = 510$

Mức MVA của mỗi biến áp (một pha) = 510/3 = 170

Mức điều áp của mỗi biến áp = $\frac{345/\sqrt{3}}{22} = 9.054$

Chọn điện áp pha A hình sao để tính toán

Phía hình sao : $\dot{V}_A = \dot{V}_{AN} = \frac{345}{\sqrt{3}} \angle 0^0 = 199.2 \angle 0^0$ pv

$\dot{V}_B = 199.2 \angle -120^0$ kV, $\dot{V}_C = 199.2 \angle 0^0$ kV

Chú ý, thứ tự pha là ABC

$$\dot{V}_{AB} = \dot{V}_A - \dot{V}_B = 345\angle 30^0 \text{kV}$$

$$\dot{V}_{BC} = 345 \angle -90^0 \text{ kV}$$

$$\dot{V}_{CA} = 345 \angle -210^0 \text{ kV}$$

$$\dot{I}_A^S = \frac{500 + j100}{3 \times 199.2} = 0.837 + j0.167 \text{ kA}$$

Hay $\dot{I}_A = 0.837 - j0.107 = 0.853 \angle -11.3^0$ kA

$$\dot{I}_B = 0.853 \angle -131.3^0 \text{ kA}$$

$$\dot{I}_C = 0.853 \angle -251.3^0 \text{ kA}$$

Phía tam giác.

$$\dot{V}_{ab} = \frac{\dot{V}_A}{a} = \frac{199.2}{9.054} \angle 0^0 = 22\angle 0^0 \text{ kV}$$

$$\dot{V}_{bc} = 22 \angle -120^0 \text{ kV}$$

$$\dot{V}_{ca} = 22 \angle -240^0 \text{ kV}$$

$$\dot{I}_{ab} = 9.054 \times 0.853 \angle -11.3^0 = 7.723\angle -11.3^0 \text{ kA}$$

$$\dot{I}_{bc} = 7.723 \angle -131.3^0 \text{ kA}$$

$$\dot{I}_{ca} = 7.723 \angle -251.3^0 \text{ kA}$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = \sqrt{3} \times 7.723 \angle(-11.3^0 - 30^0) = 13.376\angle -41.3^0$$

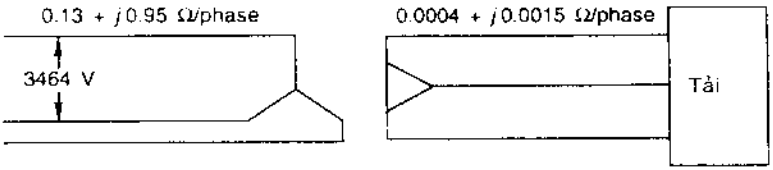
$$\dot{I}_b = 13.376 \angle(-120^0 - 11.3^0) = 13.376\angle -131.3^0 \text{ kA}$$

$$\dot{I}_c = 13.376 \angle(-240^0 - 11.3^0) = 13.376 \angle -251.3^0 \text{ kA}$$

Chú ý, điện áp và dòng điện dây phía sao sớm pha hơn phía tam giác theo góc 30°.

Ví dụ 3-19. Ba biến áp một pha 20 kVA, 2000/200 V đồng nhất như trong Ví dụ 3-3 được nối sao/tam giác thành một tổ ba pha 60 kVA để hạ áp ở cuối tải có trở kháng 0.13+j 0.95 Ω/pha. Điện áp dây ở đầu cung cấp là 3464 V. Biến áp

cung cấp tải 3-pha cân bằng qua dây nguồn có tổng trở 0.0004+j0.0015Ω/pha. Tìm điện áp tải (điện áp dây) tạo dòng định mức ở hệ số công suất (trễ pha) 0.8.



Hình 3-55

Giải

Trên Hình 3-55 là sơ đồ mạch của hệ thống. Việc tính toán dựa vào các đại lượng trên mỗi pha hình sao theo phía HV của tổ hợp biến áp.

Trở kháng dây dẫn LV từ phía HV là:

$$\left(\frac{2000\sqrt{3}}{200}\right)(0.0004 + j\,0.0015) = 0.12 + j\,0.45\ \Omega/\text{pha}$$

Tổng trở kháng nối tiếp của dây dẫn HV và LV từ phía HV là:

$$Z_F = (0.13 + j\,0.95) + (0.12 + j\,0.45)$$

$$= 0.25 + j\,1.4\ \Omega/\text{pha}$$

Từ Ví dụ 3-3, trở kháng tương đương của tổ biến áp từ phía HV là:

$$Z_F = 0.82 + j\,1.02\ \Omega/\text{ pha Y}$$

Điện áp dây dẫn nguồn $= \dfrac{3464}{\sqrt{3}} = 2000$ V / phaY

Dòng điện tải trên phía HV = dòng định mức biến áp

= 10 A / pha Y.

Mạch tương đương đối với một pha ở phía HV nối sao tương tự với Ví dụ 3-6 (Hình 3-18). Do đó điện áp tải từ phía HV là 197.692 V (so với trung tính). Điện áp tải thực sự là 197.688 V (điện áp dây) với pha thứ cấp nối Δ.

Phương pháp giá trị đơn vị: Chọn các giá trị cơ bản sau:

$$(\text{MVA})_B = \frac{3 \times 20}{1000} = 0.06$$

Điện áp cơ bản phía HV = $2\sqrt{3}$ kV (điện áp dây)

Điện áp cơ bản phía LV = 0.2 kV (điện áp dây)

Chú ý: Giá trị điện áp cơ bản trong tỉ số điện áp dây (tương tự điện áp pha trên mạch tương đương sao cơ bản).

$$\bar{Z}_1(\text{LV})(\text{đơn vị}) = (0.0004 + j\,0.0015) \times \frac{0.06}{(0.2)^2}$$
$$= (0.06 + j\,0.225) \times 10^{-2}$$
$$\bar{Z}_2(\text{HV})(\text{đơn vị}) = (0.13 + j\,0.95) \times \frac{0.06}{(2\sqrt{3})^2}$$
$$= (0.065 + j\,0.475) \times 10^{-2}$$
$$\bar{Z}_r(\text{phíasao})(\text{đơn vị}) = (0.82 + j\,1.02) \times \frac{0.06}{(2\sqrt{3})^2}$$
$$= (0.41 + j\,0.51) \times 10^{-2}$$

Chú ý : Giả sử trở kháng biến áp được cho trên phía Δ.

$$\dot{Z}_r(\text{phía }\Delta)(\text{đơn vị}) = \frac{0.06}{(0.2)^2} \times \frac{1}{3}(0.82 + j\,1.02)$$
$$= (0.82 + j\,1.02) \times 10^{\ 2}\ \Omega\ (\text{pha }\Delta)$$

Trở kháng sao tương đương $= \frac{1}{3}(0.82 + j\,1.02) \times 10^{-2}\Omega$

$$\bar{Z}_r(\text{đơn vị}) = \frac{0.06}{(0.2)^2} \times \frac{1}{3}(0.82 + j\,1.02) \times 10^{-2}$$
$$= (0.41 + j\,0.51) \times 10^{\ 3}\ (\text{như đã tính ở trên})$$

$$\bar{Z}\ (\text{tổng})(\text{đơn vị}) = 0.06 + j\,0.225$$
$$0.065 + j\,0.475$$
$$0.41 + j\,0.51$$
$$\overline{(0.535 + j\,1.21 \times 10^{-2}}$$

V_1 (điện áp truyền đến đầu cuối) = $2\sqrt{3}$ kV (đường dây) hoặc 1 đơn vị

I_1 (dòng điện định mức) = 1 pu; pf = 0.8 trễ pha.

V_2 (điện áp tải) = 1 - 1 x (0.535 x 0.8 + 1.2 x 0.6) x10^{-2}

= 0.98846 đơn vị

= 0.98846 x 200 = 197.692 (đường dây)

Ví dụ 3-20. Ba biến áp, mỗi biến áp có định mức 20 kVA, 2 kV/200 V, nối Δ/Δ và được cấp điện qua dây dẫn ba pha 2000 V (điện áp dây) có điện kháng 0.7 Ω / pha. Điện kháng của mỗi biến áp là 0.0051 đơn vị. Toàn bộ điện trở có thể bỏ qua. Ở đầu đường truyền, dây dẫn nhận công suất qua cuộn thứ của biến áp 3-pha nối sao/tam giác có định mức ba pha là 200 kVA, 20/2 kV (điện áp dây). Điện kháng của biến áp đầu đường truyền là 0.06 đơn vị theo định mức biến áp, điện áp cấp cuộn sơ là 20 kV (điện áp dây)

Một sự cố ba pha xảy ra ở đầu 200 V của biến áp cuối. Hãy tính dòng sự cố trên đường dây dẫn 2 kV, trên cuộn sơ và cuộn thứ của biến áp cuối, và trên hai đầu tải (200 V).

Giải

Chọn cơ sở chung ba pha là 60 kVA. Các điện áp dây cơ bản trong tỉ số truyền áp 20 kV/2 kV/200 V. Có thể thấy:

$$X_T(\text{đầu đường truyền}) = 0.06 \times \frac{60}{200} = 0.018 \text{ đơn vị}$$

Đối với dây nguồn 2 kV

$$V_B = \frac{2000}{\sqrt{3}} = 1154.7 \text{ V (dây - trung tính)}$$

$$I_B = \frac{60 \times 1000}{\sqrt{3} \times 2000} = 17.32 \text{ A, pha Y}$$

$$Z_B = \frac{1154.7}{17.32} = 66.6\ \Omega \text{ / pha Y}$$

$$X_{\text{nguồn}} = \frac{0.7}{66.6} = 0.0105 \text{ đơn vị}$$

$$X_{T\,(\text{đầu nhận})} = 0.0105 \text{ đơn vị}$$

Tổng điện kháng từ đầu truyền đến điểm có sự cố (phía thứ cấp của biến áp cuối)

$$0.018 + 0.0105 + 0.0051 = 0.0336 \text{ đơn vị}$$

$$\text{Điện áp đầu đường truyền} = \frac{20}{20} = 1.0 \text{ đơn vị}$$

$$\text{Dòng điện sự cố} = \frac{1.0}{0.0336} = 29.76 \text{ đơn vị}$$

Dòng điện trên phần bất kỳ của hệ thống có thể tính toán như sau:

Dòng điện trên dây nguồn 2 kV = 29.76 x 17.32 = 515.4 A

Dòng điện trong cuộn dây 2 kV của biến áp Δ / Δ = $515.3/\sqrt{3}$ = 297.56 A

Dòng điện trong cuộn dây 200V của biến áp Δ / Δ = 297.56 x 10 = 2975.6 A

Dòng điện trên hai đầu tải = $2975.6\sqrt{3}$ = 5154 A

Vận hành song song các biến áp

Khi tải tiêu thụ công suất lớn hơn công suất biến áp (cấp cho tải), việc ghép song song thêm một biến áp (để cấp điện cho tải) sẽ kinh tế hơn là thay thế bằng biến áp khác lớn hơn. Đôi khi trong trạm mới, hai máy song song, tuy đắt tiền hơn, nhưng sẽ thích hợp hơn một máy do có độ tin cậy cao hơn - mỗi nửa công suất tải được cấp từ một máy. Hơn nữa, với hai máy song song, chi phí bảo trì dự phòng thấp hơn một máy lớn. Tuy nhiên, khi các máy dự phòng được duy trì ở vị trí trung tâm để phục vụ cho việc lắp đặt biến áp trong một vùng xác định, lắp đặt một máy là phù hợp. Vì thế, vận hành song song các biến áp rất quan trọng và cần thiết trong nhiều trường hợp.

Để vận hành song song các biến áp phải đạt các điều kiện sau :

(i) Các biến áp phải được nối đúng các cực tính. Nối cực tính sai, lưới điện áp bị ngắn mạch hoàn toàn.

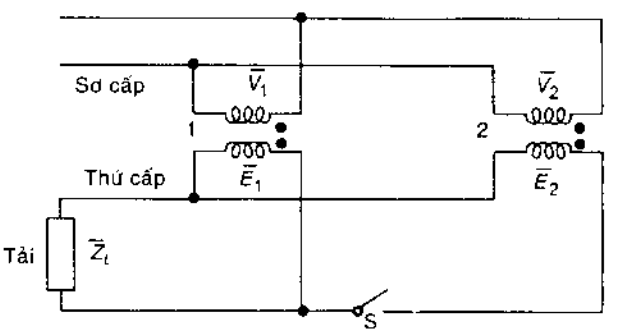
(ii) Biến áp ba pha phải có độ dịch pha bằng 0 trên phía thứ cấp và có thứ tự pha đúng. Chỉ với các biến áp có cùng nhóm pha mới được ghép song song. Ví dụ, biến áp sao/sao và sao/ tam giác không thể ghép song song vì các điện áp thứ cấp của chúng khác pha 30^0. Tuy nhiên với độ dịch pha + 30^0 và - 30^0, chúng có thể ghép song song bằng cách đảo thứ tự pha của một biến áp.

(iii) Biến áp phải có cùng tỉ số điện áp để tránh dòng chạy vòng không tải khi chúng được ghép song song trên cả hai phía sơ cấp và thứ cấp. Vì trở kháng rò thấp, sự khác biệt nhỏ của điện áp có thể tạo ra dòng điện chạy vòng không tải lớn và tăng tổn thất I^2R.

(iv) Dòng điện tải trên hai máy biến áp phải phân chia tỉ lệ theo năng lực mỗi máy. Nghĩa là trở kháng trên đơn vị Z của hai biến áp phải bằng nhau và tỉ số điện kháng rò tương đương với điện trở tương đương của hai máy phải như nhau. Nếu tỉ số này khác nhau, góc pha của hai dòng điện sẽ khác nhau và hai hệ số công suất cũng khác nhau. Kết quả là tải không được phân chia tỉ lệ theo công suất mỗi máy.

Các biến áp song song không tải

Sự vận hành song song các biến áp có thể dễ dàng giải thích dựa trên cơ sở pha. Trên Hình 3-56 là hai biến áp được ghép song song cả hai phía đúng cực tính, nhưng không có tải. Điện áp sơ cấp V_1, V_2 bằng nhau. Nếu tỉ số biến áp của chúng không đồng nhất, lực điện động cảm ứng trên cuộn sơ E_1 và cuộn thứ E_2, tuy cùng pha, nhưng không bằng nhau. Khi đóng mạch (đóng công tắc S), một biến áp có tải, các cuộn thứ được nối song song, một dòng điện chạy vòng xuất hiện, dù các cuộn thứ có tải hay không tải. Dòng điện chạy vòng phụ thuộc vào tổng trở kháng rò của hai biến áp và sự khác nhau giữa hai tỉ số điện áp (hay hiệu E_1 - E_2). Nếu hai tỉ số điện áp khác nhau nhỏ, dòng điện chạy vòng qua hai biến áp có thể bỏ qua.



Hình 3-56 *Sự vận hành song song hai biến áp.*

Phân chia tải giữa hai biến áp nối song song

Tỉ số điện áp bằng nhau. Khi các biến áp có tỉ số điện áp bằng nhau, $E_1 = E_2$ (Hình 3-56), mạch tương đương được nêu trên Hình 3-57, với giả định dòng kích thích quá nhỏ so với dòng tải, có thể phân tích mạch ổn định theo hàm sine.

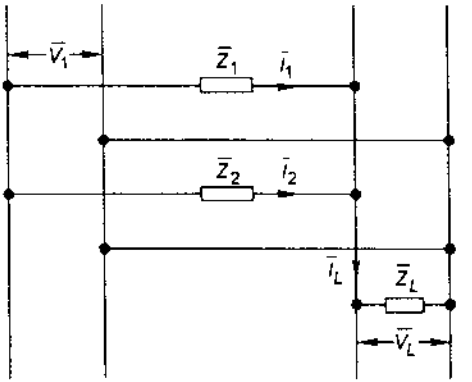
$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{Z}_2}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2}\overline{I}_L \qquad (3.83)$$

và

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{Z}_1}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2}\overline{I}_L \qquad (3.84)$$

do đó :

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2 = \overline{I}_L \qquad (3.85)$$



Hình 3-57 *Mạch tương đương gần đúng của hai biến áp song song (tỷ số điện áp như nhau)*

Lấy $\overline{V}_L$ làm đối chiếu pha. Công suất dạng phức sẽ là $\overline{V} * \overline{I}$,

nhân $\overline{V}_L{}^*$ với hai vế của các Pt (3.83) và (3.84), sẽ có :

$$\overline{S}_1 = \frac{\overline{Z}_2}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2}\overline{S}_L \qquad (3.86)$$

$$\overline{S}_2 = \frac{\overline{Z}_1}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2}\overline{S}_2 \qquad (3.87)$$

với

$$\overline{S}_1 = \overline{V}_L^* I_1$$
$$\overline{S}_2 = V_L^* I_2$$
$$\overline{S}_L = V_L^* I_L$$

Đây là quan hệ pha theo tải đã cho theo độ lớn và góc pha. Các Pt (3.86), (3.87) cũng đúng với tải đơn vị và trở kháng rò khi chúng được biểu diễn với quy chiếu theo cơ sở chung. Từ các Pt (3.83), (3.84), dòng điện của mỗi biến áp tỉ lệ nghịch với trở kháng rò tương ứng (của mỗi biến áp). Vì vậy, để phân chia tải tỉ lệ theo công suất định mức kVA của biến áp, mỗi biến áp phải có trở kháng rò tỉ lệ nghịch với công suất định mức kVA của biến áp đó, nghĩa là:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{S_2(\text{định mức})}{S_1(\text{định mức})} \qquad (3.88)$$

Điều kiện này độc lập với hệ số công suất của tổng tải.

Điều kiện của Pt (3.88) có thể viết :

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_L I_2(\text{định mức})}{V_L I_1(\text{định mức})}$$

Hoặc $$\frac{Z_1 I_1(\text{định mức})}{V_L} = \frac{Z_2 I_2(\text{định mức})}{V_L}$$

$$Z_1(\text{đơn vị}) = Z_2\ (\text{đơn vị});\ \text{theo định mức riêng} \qquad (3.89)$$

Điều đó có nghĩa là nếu các tải của các biến áp riêng rẽ tỉ lệ với công suất định mức kVA, trở kháng đơn vị của hai biến áp phải bằng nhau.

Nếu $$Z_1 < Z_2 \frac{S_2(\text{định mức})}{S_1(\text{định mức})} \qquad (3.90a)$$

biến áp 1 sẽ đạt tải định mức trước, khi tải kVA của hai biến áp tăng. Tải kVA của hai biến áp đạt giá trị cực đại (mà không quá tải) theo công thức:

$$S_1(\text{định mức}) = \frac{Z_2}{\left|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2\right|} S_L(\max)$$

$$S_L(\max) = S_1(\text{định mức}) \frac{\left|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2\right|}{Z_2} \qquad (3.90b)$$

Tương tự, nếu $$Z_2 < Z_1 \frac{S_1(\text{định mức})}{S_2(\text{định mức})} \qquad (3.91a)$$

thì $$S_L(\max) = S_2(\text{định mức}) \frac{\left|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2\right|}{Z_1} \qquad (3.91b)$$

Trong cả hai trường hợp Pt (3.90a) và (3.91a) đều có:

$$S_L(\max) < S_1\ (\text{định mức}) + S_2\ (\text{định mức}) \qquad (3.92)$$

Các tỉ số điện áp khác nhau

Như đã đề cập, sự khác biệt nhỏ giữa hai tỉ số điện áp có thể bỏ qua trong vận hành biến áp song song. E_1 và E_2 là lực điện động thứ cấp không tải của hai biến áp. Theo Hình 3-56, dòng tải I_L với điện áp tải V_L, có hai phương trình cân bằng điện áp:

$$\overline{E}_1 = \overline{I}_1\overline{Z}_1 + \overline{I}_L\overline{Z}_L = \overline{I}_1\overline{Z}_1 + (\overline{I}_1 + \overline{I}_2)\overline{Z}_L \quad (3.93)$$

và
$$\overline{E}_2 = \overline{I}_2\overline{Z}_2 + \overline{I}_L\overline{Z}_L = \overline{I}_2\overline{Z}_2 + (\overline{I}_1 + \overline{I}_2)\overline{Z}_L \quad (3.94)$$

$$\overline{E}_1 - \overline{E}_2 = \overline{I}_1\overline{Z}_1 - \overline{I}_2\overline{Z}_2 \quad (3.95)$$

Nếu không tải, $\overline{I}_L = 0$, dòng điện chạy vòng giữa hai biến áp là:

$$\overline{I}_1 = -\overline{I}_2 = \frac{\overline{E}_1 - \overline{E}_2}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2} \quad (3.96)$$

Trên phần ngắn mạch

$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{E}_1}{\overline{Z}_1}; \quad \overline{I}_2 = \frac{\overline{E}_2}{\overline{Z}_2} \quad (3.97)$$

Trên tải
$$\overline{I}_1 = \frac{(\overline{E}_1 - \overline{E}_2) + \overline{I}_2\overline{Z}_2}{\overline{Z}_1}$$

Thay I_1 trong Pt (3.94)

$$\overline{E}_2 = \overline{I}_2\overline{Z}_2 + \left[\frac{(\overline{E}_1 - \overline{E}_2) + \overline{I}_2\overline{Z}_2}{\overline{Z}_1} + \overline{I}_2\right]\overline{Z}_L$$

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{E}_2\overline{Z}_1 - (\overline{E}_1 - \overline{E}_2)\overline{Z}_L}{\overline{Z}_1\overline{Z}_2 + \overline{Z}_L(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \quad (3.98)$$

tương tự
$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{E}_1\overline{Z}_2 + (\overline{E}_1 - \overline{E}_2)\overline{Z}_L}{\overline{Z}_1\overline{Z}_2 + \overline{Z}_L(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \quad (3.99)$$

Bình thường $\overline{E}_1$ và $\overline{E}_2$ đồng pha hoặc khác pha không đáng kể. Trong biến áp ghép song song, dòng chạy vòng không qua tải (Pt (3.96)) cần chú ý.

Khi nhiều biến áp được ghép song song, sự chia tải cho chúng được xác định bằng cách sử dụng định lý Millman.[2]

Ví dụ 3-21: Biến áp một pha 600 kVA, có điện trở 0.012 đơn vị và điện kháng 0.06 đơn vị, được nối song song với biến áp 300 kVA có điện trở 0.014 đơn vị và điện kháng 0.045 đơn vị, để chia tải 800 kVA với hệ số công suất 0.8 chậm pha chúng chia tải như thế nào:

a. Khi cả hai cuộn thứ có điện áp 440 V

b. Khi các điện áp cuộn thứ hở mạch có giá trị 445 V và 455 V.

Giải

a. Trở kháng đơn vị được tính trên cơ sở chung 600 kVA là :

$$\overline{Z}_1 = 0.012 + j\,0.06 = 0.061\,\angle 79^0$$

$$\overline{Z}_2 = 2(0.014 + j\,0.045) = 0.094\,\angle 73^0$$

$$\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 = 0.04 + j\,0.15) = 0.155\,\angle 75^0$$

Tải là $\overline{S}_L = 800\,(0.8 - j\,0.6) = 800\,\angle -37^0$ kVA

Từ Pt (3.86) và (3.87)

$$\overline{S}_1 = 800\,\angle -37^0 \times \frac{0.094\,\angle 73^0}{0.155\,\angle 75^0} = 485\,\angle -39^0 = 377 - j\,305.2$$

$$\overline{S}_2 = 800\,\angle -37^0 \times \frac{0.061\,\angle 79^0}{0.155\,\angle 75^0} = 315\,\angle -33^0 = 264 - j\,171.6$$

Có thể nhận thấy hai biến áp không được tải theo tỷ lệ định mức của chúng. Ở tổng tải (trên hai biến áp) 800 kVA, biến áp 300 kVA hoạt động quá tải 5% vì trở kháng đơn vị (trên cơ sở chung kVA) nhỏ hơn hai lần so với biến áp 600 kVA.

Hai biến áp có thể dẫn song song tải kVA cực đại mà không có biến áp nào bị quá tải. Biến áp 300 kVA sẽ dần tiến đến đủ tải trước biến áp 600 kVA, (tải cực đại) khi tổng tải tăng; tải này được tính như sau:

$$\frac{0.061}{0.155} S_L(\text{max}) = S_2(\text{định mức}) = 300 \text{ kVA}$$

$$S_L(\text{max}) = \frac{300 \times 0.155}{0.061} = 762.3 \text{ kVA}$$

Trong khi tổng định mức hai biến áp là 900 kVA. Kết quả này là tương ứng với trở kháng biến áp (trên cơ sở chung) không tỉ lệ nghịch với công suất định mức kVA.

b. Trong trường hợp này, sẽ thuận tiện nếu xét các trở kháng thực.

Tính trở kháng từ phía cuộn sơ:

$$\overline{Z}_1(\text{thực}) = (0.012 + j\,0.06) \times \frac{440}{\dfrac{600 \times 1000}{440}} = 0.0039 + j\,0.0194 = 0.0198\,\angle 79^0$$

$$\overline{Z}_2(\text{thực}) = (0.028 + j\,0.09) \times \frac{440}{\frac{600 \times 1000}{440}} = 0.009 + j\,0.029 = 0.0304\ \angle 73^0$$

$$\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 = 0.0129 + j\,0.0484 = 0.05\ \angle 75^0$$

Giả định một điện áp ra trên tải là 440 V

$$\overline{V}_L * \overline{I}_L \times 10^{-3} = (\overline{V}_L^2/\overline{Z}_L) \times 10^{-3} = 800\ \angle -37^0$$

$$\overline{Z}_L = \frac{(440)^2}{800 \times 10^3 \angle -37^0} = 0.242\ \angle 37^0$$

Từ Pt (3.98) và (3.99)

$$\overline{I}_1 = \frac{445 \times 0.0304\ \angle 73^0 - 10 \times 0.242\ \angle 37^0}{0.0198\ \angle 79^0 \times 0.0304\ \angle 73^0 + 0.242\ \angle 37^0 \times 0.05\ \angle 75^0} = 940\ \angle -34^0 A$$

$$\overline{I}_2 = \frac{445 - 0.0198\ \angle 79^0 + 10 \times 0.242\ \angle 37^0}{0.0198\ \angle 79^0 \times 0.0304\ \angle 73^0 + 0.242\ \angle 37^0 \times 0.05\ \angle 75^0} = 883\ \angle -44^0 A$$

KVA tương ứng là

$$\overline{S}_1 = 440 \times 940 \times 10^{-3} \angle -34^0 = 413.6\ \angle -34^0$$

$$\overline{S}_2 = 440 \times 883 \times 10^{-3} \angle -44^0 = 388\ \angle -44^0$$

Tổng công suất ra

$$413.6 \cos 34^0 + 388 \cos 44^0 = 621.5 \text{ kW}$$

Công suất này thấp hơn khoảng 3% so với 800 x 0.8 = 640 kW cần cấp cho tải do giả thiết giá trị điện áp ra được tính với tải trở kháng

Dòng chạy vòng trên đường dẫn không tải là.

$$\frac{(E_1 - E_2)}{\left|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2\right|} = \frac{-10}{0.05} = -200 \text{ A}$$

tương ứng với công suất khoảng 88 kVA và lãng phí theo tổn thất đồng.

Biến áp ba cuộn dây

Biến áp có cuộn dây thứ ba, được gọi là cấp thứ ba, bổ sung cho cuộn sơ cấp và thứ cấp. Các mục đích sử dụng cuộn dây thứ ba này là:

(i) Cung cấp một điện áp khác hỗ trợ các điện áp cuộn sơ và cuộn thứ.

(ii) Tụ điện tĩnh hoặc tụ điện đồng bộ nối vào cuộn dây thứ ba tạo công suất phản kháng chạy trong hệ thống để kiểm soát điện áp.

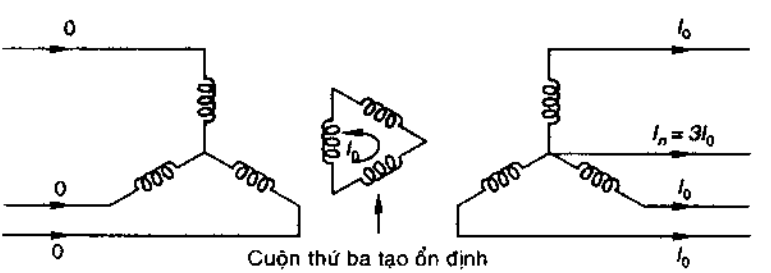
(iii) Cuộn dây thứ ba nối tam giác làm giảm trở kháng được đưa đến các dòng thứ tự zero, do đó cho phép dòng sự cố nối đất lớn để vận hành thiết bị bảo vệ. Hơn nữa, cuộn này giới hạn sự mất cân bằng điện áp khi tải không cân bằng. Ngoài ra, cuộn này còn làm giảm điện áp hoạ tần thứ ba.

(iv) Ba cuộn dây có thể được dùng để nối với ba đường dẫn ở các điện áp khác nhau.

(v) Có thể dùng để đo điện áp của biến áp thí nghiệm HV. Khi dùng với mục đích (iii), cuộn dây thứ ba được gọi là cuộn dây ổn định.

Tạo ổn định bằng cuộn dây thứ ba

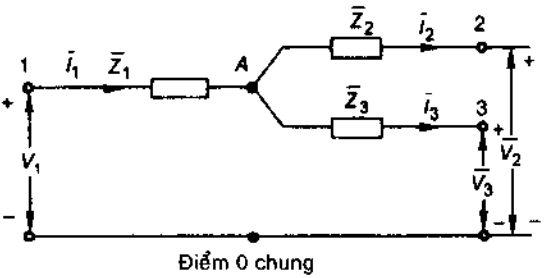
Biến áp sao/sao gồm các máy một pha hoặc một máy đơn với lõi năm nhánh có điện kháng cao để dẫn tải không cân bằng giữa dây dẫn và trung tính. Tải không cân bằng được phân chia thành ba thành phần ba pha (thành phần dương, âm và thứ tự 0). Thành phần thứ tự 0 (dòng điện trên ba dây cùng pha $I_0 = 1/3\ I_n$) được tạo bởi tải (dây đến trung tính) trên phía cuộn thứ không thể cân bằng do dòng cuộn sơ, khi dòng thứ tự 0 không chạy trung tính trong cuộn sơ nối sao. Dòng thứ tự 0 phía cuộn thứ tạo từ thông trong lõi sắt. Lõi dẫn từ thông thứ tự 0 trong tổ máy một pha và trong lõi năm nhánh. Kết quả là trở kháng do dòng thứ tự 0 tạo ra rất lớn (0.5 đến 5 đơn vị) và cản trở dòng điện này. Các cuộn thứ ba nối tam giác làm dòng thứ tự 0 chạy vòng, do đó giảm trở kháng thứ tự 0 (Hình 3-58)



Hình 3-58

Mạch tương đương

Hình 3-59 minh họa mạch tương đương một pha của biến áp ba cuộn dây. Mỗi cuộn dây có điện trở và điện kháng tương đương. Tất cả các giá trị được giảm đến cơ sở định mức chung và các cơ sở điện áp tương ứng. Các ký hiệu 1, 2, 3 biểu thị cuộn sơ, cuộn thứ, và cuộn thứ ba. Để đơn giản, hiệu ứng dòng kích thích có thể bỏ qua trong mạch tương đương. Có thể thấy sự phân chia tải giữa cuộn thứ và cuộn thứ ba là tùy ý. Ba mạch ngoài được nối vào ba đầu 1,2,3 tương ứng và ghi ký hiệu đầu chung là 0. Do bỏ qua dòng kích thích nên $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0$



***Hình 3-59** Mạch tương đương một pha của biến áp 3-pha*

Trở kháng (Hình 3-59) được xác định từ thí nghiệm ngắn mạch. Nếu $\bar{Z}_{12}$ là trở kháng ngắn mạch cuộn 1, cuộn 2 và cuộn 3 hở, sẽ có:

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \qquad (3.100)$$

$$\bar{Z}_{23} = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 \qquad (3.101)$$

$$\bar{Z}_{13} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3 \qquad (3.102)$$

Với $\bar{Z}_{23}$ trở kháng ngắn mạch cuộn 2 và 3, cuộn 1 hở

$\bar{Z}_{13}$ trở kháng ngắn mạch cuộn 1 và 3, cuộn 2 hở

Mọi trở kháng được đối chiếu với cơ sở chung.

Giải hệ phương trình (3.100), (3.101), (3.102) :

$$\bar{Z}_1 = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{13} - \bar{Z}_{23}) \qquad (3.103)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{13}) \qquad (3.104)$$

$$\overline{Z}_3 = \frac{1}{2}(\overline{Z}_{13} + \overline{Z}_{23} - \overline{Z}_{12}) \qquad (3.105)$$

Thí nghiệm hở mạch có thể thực hiện trên cuộn dây bất kỳ để xác định tổn thất lõi, trở kháng từ hóa và tỉ số vòng.

Ví dụ 3-22 Cuộn sơ, cuộn thứ và cuộn ba của biến áp ba dây quấn, 1 pha, 50 Hz, có định mức 6.35 kV, 5 MVA; 1.91 kV, 2.5 MVA; 400 V, 2.5 MVA. Ba thí nghiệm ngắn mạch cho các kết quả sau :

(i) Cuộn thứ ngắn mạch, cuộn sơ kích thích : 500 V, 393.7 A.

(ii) Cuộn ba ngắn mạch, cuộn sơ kích thích 900 V, 397.7 A

(iii) Cuộn ba ngắn mạch, cuộn thứ kích thích 231 V, 21 312.1 A

Bỏ qua các điện trở.

a. Tìm giá trị đơn vị của trở kháng mạch tương đương của biến áp 5 MVA, cơ sở điện áp định mức.

b. Ba biến áp này được dùng trong tổ ba pha 15 MVA, Y/Y/Δ để cung cấp mạch công suất hỗ trợ 3.3 kV và 400 V trong nhà máy điện. Hãy tính giá trị đơn vị của dòng điện ngắn mạch trạng thái ổn định và điện áp ở hai đầu cuộn ba. Sử dụng cơ sở điện áp định mức ba pha, 15 MVA.

Giải

a. Đầu tiên cần biến đổi dữ liệu ngắn mạch theo đơn vị trên cơ sở / pha 5 MVA.

Đối với cuộn sơ $\quad V_B = 6.35$ kV

$$I_B = \frac{5000}{6.35} = 787.4 \text{ A}$$

Đối với cuộn thứ $\quad V_B = 1.91$ kV

$$I_B = \frac{5000}{1.91} = 2617.8 \text{ A}$$

Biến đổi dữ liệu thí nghiệm theo đơn vị.

Số thí nghiệm	Cuộn dây	V	I
1	P và S	0.0787	0.5
2	P và T	0.1417	0.5
3	S và T	0.1212	0.5

Từ các thí nghiệm 1, 2, 3, tương ứng

$$X_{12} = \frac{0.0787}{0.5} = 0.1574 \text{ đơn vị}$$

$$X_{13} = \frac{0.1417}{0.5} = 0.2834 \text{ đơn vị}$$

$$X_{23} = \frac{0.1212}{0.5} = 0.2424 \text{ đơn vị}$$

Từ Pt (3.103) đến (3.105)

$$X_1 = 0.5\ (0.1574 + 0.2834 - 0.2424) = 0.0992 \text{ đơn vị.}$$

$$X_2 = 0.5\ (0.2424 + 0.1574 - 0.2834) = 0.05825 \text{ đơn vị.}$$

$$X_3 = 0.5\ (0.2834 + 0.2424 - 0.1574) = 0.1842 \text{ đơn vị.}$$

b. Điện áp dây cơ sở đối với sơ cấp nối sao là $\sqrt{3}$ x 6.35 = 11 kV, nghĩa là điện áp là 1 đơn vị. Từ Hình 3-60, ngắn mạch hai đầu cuộn 3, $V_3 = 0$, do đó:

$$I_{SC} = \frac{V_1}{X_1 + X_3} = \frac{V_1}{X_{13}} = \frac{1.00}{0.2834} = 3.53 \text{ đơn vị}$$

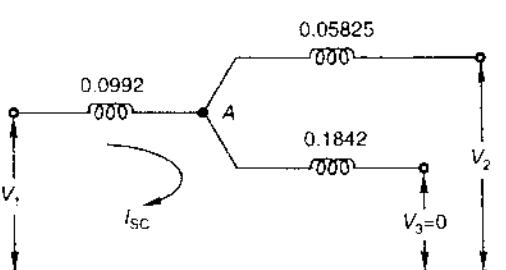
dòng ngắn mạch phía cuộn sơ = 3.53 x 787.4 = 2779.5 A

dòng ngắn mạch phía cuộn ba = $3.53 \times \frac{5000 \times 1000}{400/\sqrt{3}} = 76424$ A

Bỏ qua sụt áp do dòng tải cuộn thứ, điện áp cuộn thứ là điện áp tại điểm A (Hình 3-60), nghĩa là:

$$V_2 = I_{SC}X_3 = 3.53 \times 0.1842 = 0.6502 \text{ đơn vị.}$$

$$V_2 \text{ (thực)} = 0.6502 \times 1.91\ \sqrt{3} = 2.15 \text{ kV.}$$



Hình 3-60

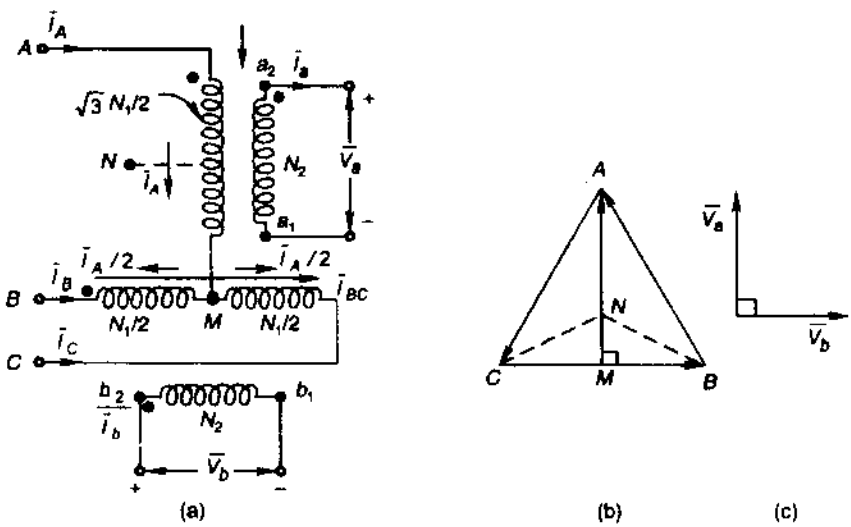
Biến đổi pha

Biến đổi 3/2 - pha (nối kiểu Scott)

Biến đổi ba pha thành hai pha được dùng trong các trường hợp đặc biệt, chẳng hạn, cấp điện 2 - pha cho lò hồ quang.

Trên Hình 3-61 là sơ đồ pha của biến đổi ba pha thành hai pha với nguồn điện ba pha cân bằng. Nếu điểm M ở giữa V_{BC}, V_{AM} sớm pha hơn V_{BC} theo góc 90^0. Hai pha điện áp này cung cấp công suất ra qua hai biến áp. Một biến áp nối với cuộn sơ là AM, là *biến áp kích*. Biến áp còn lại được nối cảm ứng từ qua dây B và C. Số vòng dây cuộn sơ cấp của hai biến áp đó là (3 N1/2 (kích) và N1 vòng (vì $V_{AM} = (\sqrt{3}/2)\, V_{BC}$), nghĩa là điện áp trên mỗi vòng dây sơ cấp của hai biến áp là bằng nhau. Trên hai cuộn thứ (có vòng bằng nhau là N_2) xuất hiện hai pha điện áp cân bằng. Kiểu nối này là nối Scott (Hình 3-61a) và sơ đồ pha của cuộn cấp điện hai pha phía thứ cấp trên Hình 3-61c.

Điểm trung tính trên phía ba pha là điểm N, phân chia cuộn sơ biến áp kích theo tỉ số 1/2 (Hình 3-61b).



Hình 3-61 Nối Scott

Phân tích tải

Nếu dòng tải thứ cấp là $\bar{I}_a$ và $\bar{I}_b$, từ Hình 3-61a có thể tính các dòng này ở phía 3 - pha.

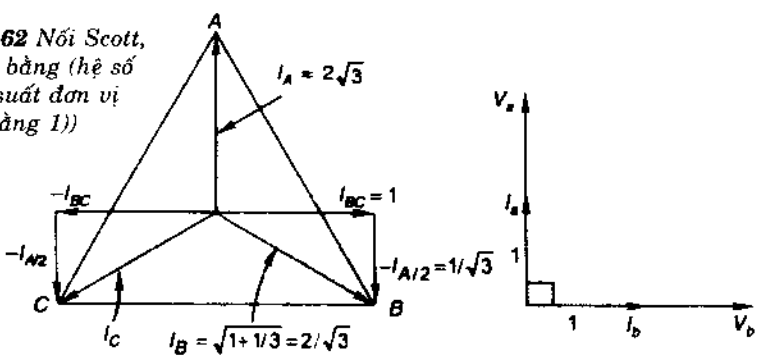
$$\bar{I}_A = \frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1}\bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{I}_a \ (N_1/N_2 = 1)$$

$$\bar{I}_{BC} = \frac{N_2}{N_1}\bar{I}_b = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{I}_b \ (N_1/N_2 = 1)$$

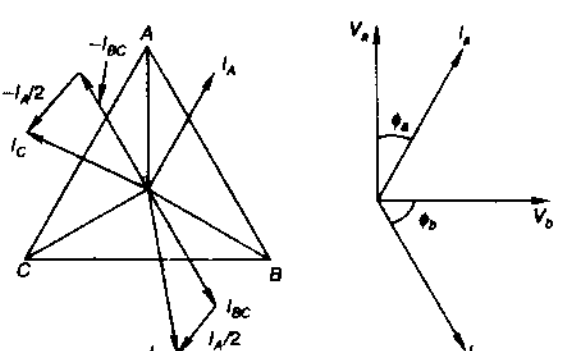
$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_A / 2$$

$$\bar{I}_C = -\bar{I}_{BC} - \bar{I}_A / 2$$

Hình 3-62 là sơ đồ pha tải cân bằng phía thứ cấp có hệ số công suất đơn vị (bằng 1), các dòng điện được vẽ từ hệ thống điện áp ba pha nối sao cân bằng. Sơ đồ pha tải hai pha không cân bằng được nêu trên Hình 3-63.



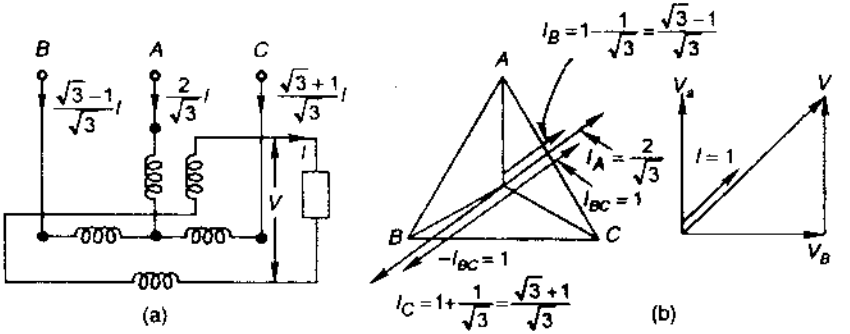
Hình 3-62 *Nối Scott, tải cân bằng (hệ số công suất đơn vị (bằng 1))*



Hình 3-63 *Nối Scott, tải không cân bằng*

Biến đổi ba pha/một pha

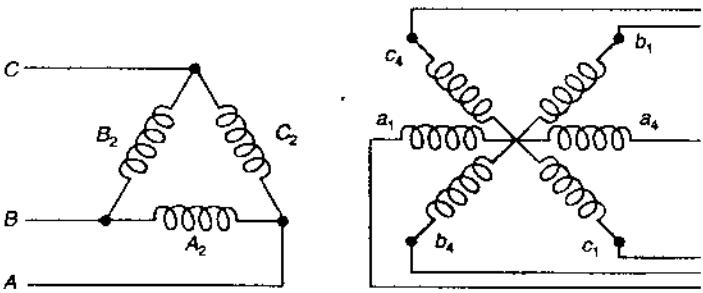
Công suất 1- pha xung động với tần số gấp đôi, còn công suất toàn phần từ tải 3-pha cân bằng là hằng. Do đó tải 1-pha không thể truyền cho hệ thống 3-pha ở dạng tải cân bằng nếu không sử dụng thiết bị lưu năng lượng (tụ, cuộn cảm, hoặc máy quay). Các nối kết biến áp thích hợp có thể được dùng trong phân phối tải 1-pha trên cả ba pha dù có thể không cân bằng. Đối với các tải 1-pha lớn, nên để tải nối với các pha của hệ thống 3-pha. Hiện có nhiều kiểu nối kết biến áp. Hình 3.64 minh họa các biến áp nối kết kiểu Scott cho mục đích này và sơ đồ pha tương ứng.



Hình 3-64 *Biến áp 3- pha nối Scott để cấp tải 1- pha*

Biến đổi 3-pha/6-pha

Mỗi pha cuộn thứ nối sao chia thành hai phần bằng nhau, ghi ký hiệu cực tính như trên Hình 3-47. Các điện áp 6-pha (có góc pha $360^0/6 = 60^0$ gồm hai thành phần sao ngược pha nhau, mỗi pha ghép từ ba nửa cuộn dây (Hình 3-65).



Hình 3-65 *Nối 3-pha tam giác với 6-pha hình sao*

Kiểu nối này dùng cho các mạch chỉnh lưu, mạch thyristor đòi hỏi dòng điện một chiều.

Ví dụ 3-23 Hai lò 1-pha A và B được cấp 100 V bằng biến áp nối Scott từ hệ thống 3-pha 6600 V. Điện áp lò A sớm pha. Hãy tính dòng điện dây trên phía 3-pha khi lò A là 400 kW với hệ số công suất 0.707 chậm pha và lò B 800 kW có hệ số công suất bằng 1.

Giải

Từ Hình 3-61

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{6600}{100} = 66$$

$$\frac{\frac{\sqrt{3}}{2} N_1}{N_2} = 57.16$$

Dòng điện trong lò

$$I_a = \frac{400 \times 1000}{100 \times 0.707} = 5658 \text{ A}; \quad \phi_a = 45^0 \text{ trễ pha}$$

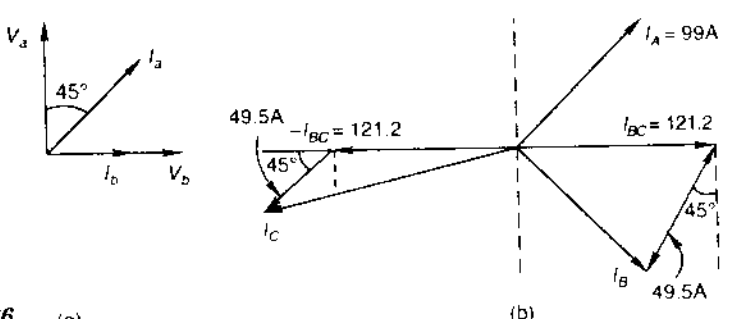
$$I_b = \frac{800 \times 1000}{100 \times 1} = 8000 \text{ A}; \quad \phi_b = 0^0$$

Điện áp và dòng điện được vẽ trong sơ đồ pha trên Hình 3-66a

Trên phía 3-pha

$$I_A = \frac{5658}{57.16} = 99 \text{ A}$$

$$I_{BC} = \frac{8000}{66} = 121.2 \text{ A}$$



Hình 3-66

Từ sơ đồ pha trên Hình 3-66b.

$$\bar{I}_B = 121.2 - 49.5(0.707 + j\,0.707) = 86.2 - j\,35 = 93\ A$$

$$\bar{I}_C = 121.2 + 49.5(0707 - 90.707) = 156.2 - j\,35$$

Hoặc $I_C = 160\ A$

Biến áp thay đổi đầu ra

Sự biến đổi điện áp trong hệ thống công suất (hệ thống điện lực) là hiện tượng bình thường do sự phát triển của công nghiệp và lưới điện phân phối. Sự kiểm soát điện áp hệ thống do đó rất quan trọng, nhằm:

(i) Điều chỉnh điện áp nơi tiêu thụ trong giới hạn cho trước.

(ii) Điều khiển công suất thực (công suất tác dụng) và công suất phản kháng trong lưới điện

(iii) Điều chỉnh từng cấp 1-10% để điều khiển các thay đổi ngắt tải.

Sự điều chỉnh thường được thực hiện bằng sự thay đổi đầu ra, khoảng chung là 5% theo bước 2.5%. Điều chỉnh ngắn hạn và hàng ngày được thực hiện bằng thiết bị biến đổi đầu ra có tải.

Ngoài ra, sự thay đổi đầu ra còn được thực hiện với các mục đích sau:

(i) Thay đổi điện áp thứ cấp

(ii) Duy trì điện áp thứ cấp không đổi với điện áp sơ cấp biến thiên.

(iii) Cung cấp thêm điện áp thứ cấp đối với các mục đích đặc biệt, chẳng hạn chiếu sáng.

(iv) Cung cấp điện áp thấp để khởi động máy điện quay.

(v) Cung cấp điểm trung tính, ví dụ, nối đất.

Biến đổi đầu ra có thể đạt được theo một trong ba điều kiện sau:

(i) Điện áp biến đổi nhưng từ thông và điện áp vòng không đổi

(ii) Với biến đổi từ thông

(iii) Phối hợp (i) và (ii). Trong (i) dãy đầu ra theo phần trăm tương ứng biến đổi điện áp.

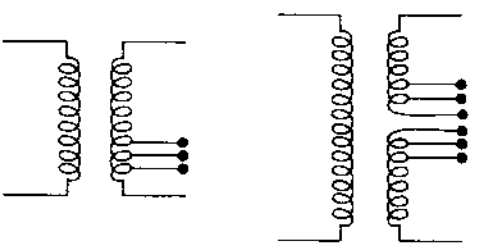
Vị trí các đầu ra

Tùy theo cấu trúc biến áp, các đầu dây có thể ở phía sơ cấp hay thứ cấp. Nếu các đầu dây gần đầu có điện áp, phải có các ống cách điện tốt. Nếu các đầu dây ra đặt gần đầu trung tính, điều kiện cách điện giữa các pha dễ dàng hơn.

Để đạt được sự thay đổi lớn điện áp, các đầu dây nên đặt gần tâm các cuộn dây pha để giảm sự suy giảm từ. Tuy nhiên, không thể đặt trên các cuộn LV ở gần lõi (như trong biến áp kiểu trụ) vì khó tiếp cận và cách điện phức tạp. Cuộn dây HV đặt bên ngoài cuộn LV dễ tiếp cận và dễ đưa các đầu dây ra (để thay đổi số vòng dây)

Không thể tạo đầu ra trên số vòng là số nguyên của cuộn dây HV. Ví dụ cuộn dây pha 250 V với 15 volt / vòng, không thể tạo đầu ra sát với 5 % .

Khi phạm vi đầu ra quá lớn, phải dùng một cuộn dây đặc biệt để tạo các đầu ra. Thay đổi các đầu ra gây ra thay đổi trở kháng rò, tổn thất lõi, tổn thất I^2R và một vài trở ngại khác khi vận hành song song các biến áp khác nhau.



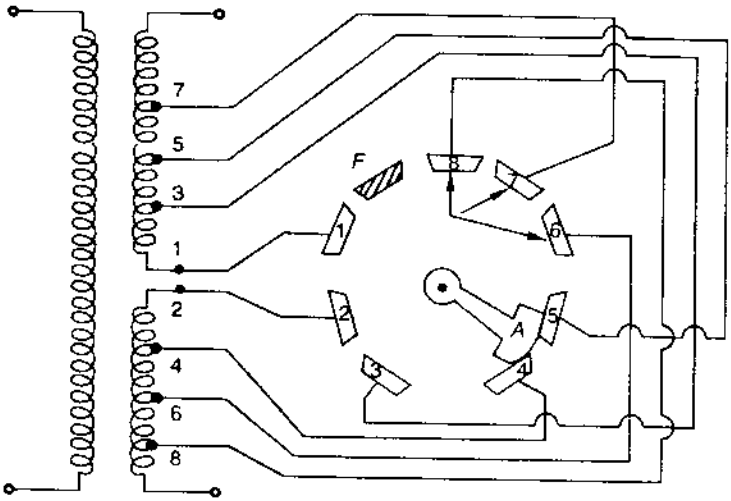
(a) Các đầu ra đặt ở cuối đối với biến áp nhỏ

(b) Các đầu ra biến áp lớn đặt ở giữa các biến áp Δ và Y

Hình 3.67 *Vị trí các đầu ra biến áp*

Biến đổi đầu ra không tải (cắt tải hoặc cắt mạch)

Phương pháp thay đổi tỉ số vòng rẻ nhất là dùng bộ biến đổi đầu ra sau khi cắt mạch. Một thiết bị sẽ cắt kích thích biến áp trước khi thay đổi đầu dây. Trên Hình 3.68 là bộ biến đổi đầu ra đơn giản, có 8 nút được đánh dấu từ 1 đến 8, được nối vào 8 đầu ra của cuộn dây. Thanh công tắc A được xoay tiếp xúc với các nút tương ứng bằng một bánh xe chỉnh tay gắn bên ngoài thùng biến áp. Khi thanh công tắc a nối 1 - 2 thì cuộn dây có số vòng lớn nhất, nối 2 - 3 nhỏ hơn,..., và nối 7 - 8 có số vòng ít nhất.



Hình 3-68. *Bộ biến đổi đầu ra không tải.*

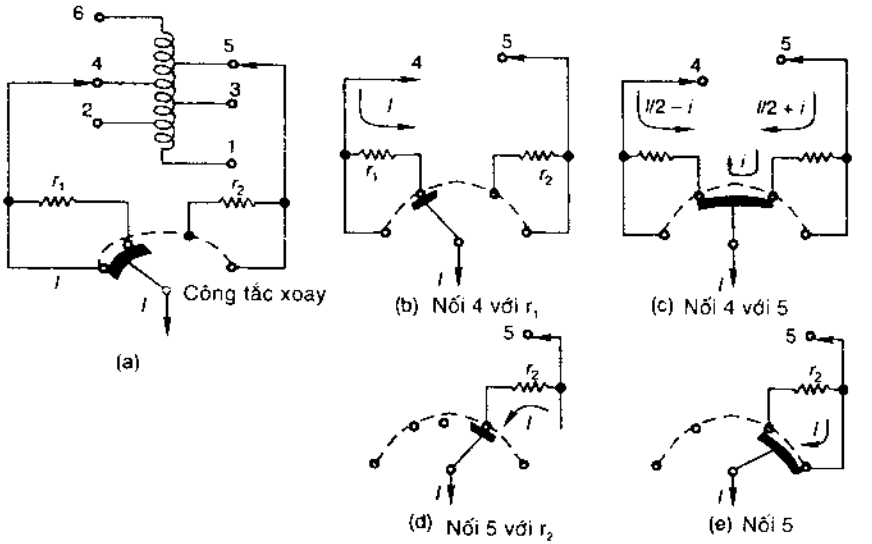
Cắt mạch biến áp trước khi đổi đầu dây và nối mạch sau khi đổi đầu dây xong bằng thiết bị khóa điện từ hoặc bằng CB bộ ngắt mạch.

Biến đổi đầu ra có tải

Bộ biến đổi đầu ra có tải được dùng để thay đổi tỉ số vòng biến áp (để ổn định hệ thống điện áp) trong khi biến áp đang cấp tải. Đối với biến áp công suất (biến áp điện lực) lớn, nếu thay đổi đầu ra khi có tải sẽ sinh ra đánh lửa nguy hiểm và gây ngắn mạch các cuộn dây ra. Cho nên tất cả dạng mạch biến đổi đầu ra (có tải) phải có trở kháng để giới hạn dòng ngắn mạch. Trở kháng đó có thể là điện trở hay điện kháng. Bộ biến đổi đầu ra có tải được phân loại theo điện trở hoặc điện kháng và hiện nay hầu hết là dùng loại một cặp điện trở.

Trên Hình 3.69 là chuyển mạch theo thứ tự để thay đổi đầu ra có tải (ở đây là đầu ra 4 nối với 5). Dòng ngắn mạch được giới hạn qua điện trở.

Bộ điều khiển biến đổi đầu ra có tải được điều khiển bằng một nút nhấn đơn giản (thời kỳ đầu) hoặc mạch phức tạp tự động ổn áp nhiều biến áp vận hành song song. Mạch tự ổn áp này tự động duy trì mức điện áp ổn định với dung sai cho phép, nâng điện áp tải lên khi có sụt áp trên tải, và cắt mạch khi xảy ra tải ngắn mạch.



***Hình 3.69**. Thứ tự chuyển mạch đơn giản khi thay đổi đầu ra. (a) đầu ra 4 (b) đầu ra 4 với r_1 (c) đầu ra 4 và 5 (d) đầu ra 5 với r_2 (e) đầu ra 4.*

Hiện nay bộ biến đổi đầu ra khả dụng với mức cách điện cao nhất đối với các xung đỉnh 1475 kV, và 630 kV đối với điện áp có tần số điện lực (50 - 60 Hz). Ngoài ra, bộ biến đổi đầu ra sử dụng Thyristor (SCR, TRIAC) cũng được sử dụng nhiều.

Chương 4

Nguyên lý chuyển đổi năng lượng điện – cơ

Giới thiệu

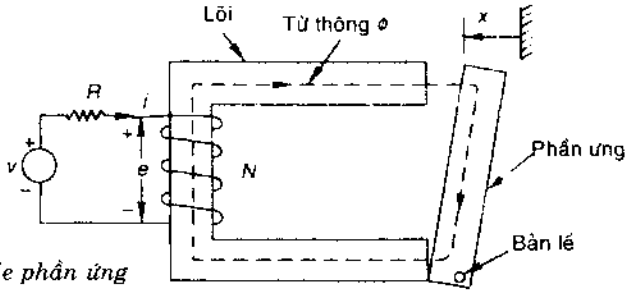
Ưu điểm chính của năng lượng điện so với các dạng năng lượng khác là có thể truyền tải qua những khoảng cách lớn tương đối dễ dàng và hiệu quả. Công dụng chính của điện năng là có thể chuyển tải các loại năng lượng khác, chẳng hạn, cơ năng, âm thanh, ánh sáng,... từ vị trí này đến vị trí khác. Điện năng ít khi khả dụng ở dạng tự nhiên và hầu như không được sử dụng trực tiếp. Cần dùng hai loại thiết bị chuyển đổi năng lượng - chuyển đổi một dạng năng lượng thành điện năng, và chuyển đổi điện năng thành dạng năng lượng mong muốn. Các thiết bị cơ bản được dùng để chuyển đổi năng lượng cơ - điện, có thể là các thiết bị biến năng để xử lý và chuyển tải các tín hiệu năng lượng thấp, các phương tiện tạo ra lực hoặc moment với chuyển động cơ học có giới hạn (các nam châm điện, bộ kích hoạt, rơle, ...), các thiết bị chuyển đổi năng lượng liên tục, chẳng hạn cơ điện, máy phát điện ...

Sự chuyển đổi năng lượng điện từ, có vị trí trung gian giữa điện trường và từ trường - điện trường rất thích hợp cho các thiết bị chuyển đổi thực tiễn. Do quán tính liên quan đến các chuyển động cơ học, các trường này phải biến thiên chậm. Quá trình chuyển đổi về cơ bản là thuận nghịch mặc dầu các thiết bị thực tế có thể được thiết kế và chế tạo để chỉ đáp ứng một trong các chế độ chuyển động. Nội dung chính của Chương này là nguyên lý chuyển đổi năng lượng điện từ.

Năng lượng trong hệ thống từ tính

Năng lượng có thể được lưu hoặc lấy ra từ hệ thống từ tính bằng cuộn dây kích từ được nối với nguồn điện. Ví dụ, có thể khảo sát hệ thống từ tính dạng rơle có phần ứng (Hình 4-1). Điện trở của cuộn dây được biểu thị bằng mạch nối tiếp bên ngoài cuộn dây, do đó cuộn dây có thể được coi là có mức tổn thất không đáng kể. Dòng điện cuộn dây làm cho từ thông xuất hiện trong mạch từ. Giả sử toàn bộ từ thông tập trung trong lõi sắt, và nối ghép toàn bộ N vòng dây tạo ra các nối từ thông trên cuộn dây:

$$\lambda = N\phi \tag{4.1}$$



Hình 4-1 *Rơle phần ứng*

Nối ghép từ thông này tạo ra lực điện động:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \tag{4.2}$$

xuất hiện ở các đầu cuộn dây với sự phân cực (theo định luật Lenz). Phương trình mạch liên quan là:

$$\begin{aligned} v &= iR + e \\ &= iR + \frac{d\lambda}{dt} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Năng lượng điện đưa vào cuộn dây lý tưởng tạo ra dòng điện i trong thời gian dt là:

$$dW_e = ei\,dt \tag{4.4}$$

Giả sử vào thời điểm phần ứng được giữ cố định ở vị trí x, toàn bộ năng lượng đưa vào từ trường. Do đó:

$$dW_e = ei\,dt = dW_f \tag{4.5}$$

với dW_f là sự thay đổi năng lượng trường trong thời gian dt. Khi biểu thức đối với e trong Pt (4.2) được thay vào Pt (4.5), sẽ có:

$$dW_e = i\,d\lambda = \mathcal{F}\,d\phi = dW_f \tag{4.6}$$

với $\mathcal{F} = Ni$, lực từ động (nmf).

Quan hệ i - λ hoặc $\mathcal{F}$-λ là hàm tương ứng mạch từ, về cơ bản là phi tuyến (và có tính trễ). Năng lượng được từ trường hấp thụ do thay đổi hữu hạn các nối kết từ thông đối với từ thông nhận được từ Pt (4.6) là:

$$\Delta W_f = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(\lambda)d\lambda = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \mathcal{F}(\phi)d\phi \qquad (4.7)$$

Khi từ thông trong mạch từ qua một chu kỳ $\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_1$, tổn thất năng lượng xảy ra do sự trễ và dòng điện Eddy (xoáy) trong lõi sắt, giả sử các tổn thất này là riêng biệt và được cung cấp trực tiếp bằng nguồn điện. Giả thiết này bảo đảm cuộn dây là lý tưởng và mạch từ là *hệ thống bảo toàn* với sự trao đổi năng lượng sao cho năng lượng chung luôn luôn được bảo toàn.

Năng lượng hấp thụ ở hệ thống từ tính để thiết lập từ thông ϕ từ giá trị từ thông zero ban đầu là:

$$W_f = \int_0^{\lambda} i(\lambda)d\lambda = \int_0^{\phi} \mathcal{F}(\phi)d\phi \qquad (4.8)$$

Đây là năng lượng của từ trường với cấu hình cơ học cho trước khi trạng thái tương ứng từ thông ϕ (hoặc nối kết từ thông λ).

Quan hệ i - λ là đường cong từ hóa biến thiên với biến cấu hình x (Hình 4-1, khe hở không khí giữa phần ứng và lõi thay đổi theo vị trí x của phần ứng, mật độ từ thông giảm khi tăng x). Quan hệ i - λ với các giá trị x khác nhau được nêu trên Hình 4-2. Quan hệ này có thể được biểu thị theo:

$i = i(\lambda,x)$, nếu λ là biến độc lập; và

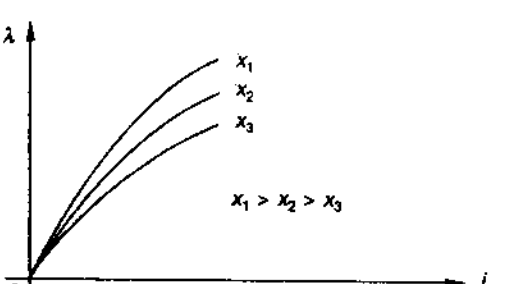
$\lambda = \lambda(i,x)$, nếu i là biến độc lập.

Do đó, năng lượng trường (Pt 4.8) là hàm của hai biến

$$W_f = W_f(\lambda,x) \qquad (4.9a)$$

hoặc

$$W_f = W_f(i,x) \qquad (4.9b)$$



***Hình 4-2** Quan hệ i-λ với biến số x*

Theo các Pt (4.9) năng lượng trường được xác định bằng các giá trị tức thời của các trạng thái hệ thống ((λ,x) hoặc (i,x)) và là độc lập đối với các quá trình tiếp sau các trạng thái này để đạt tới các giá trị hiện hữu. Điều này có nghĩa là năng lượng trường ở thời điểm bất kỳ luôn luôn độc lập với giá trị trước đó.

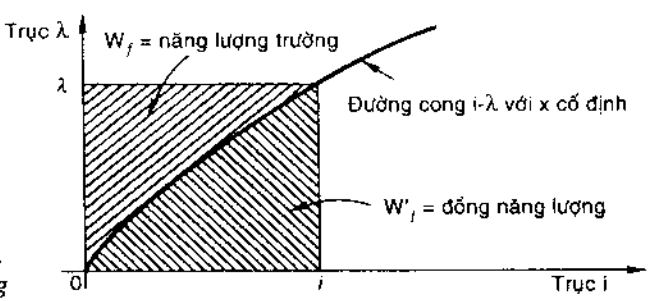
Sự thay đổi λ với x không đổi có thể làm cho năng lượng điện - từ thay đổi theo Pt (4.3) và (4.6). Tương tự, nếu x thay đổi với λ không đổi, năng lượng sẽ trao đổi giữa mạch từ và hệ thống cơ học. Trường hợp tổng quát về các thay đổi năng lượng này (điện - từ - cơ) sẽ được trình bày trong phần sau.

Trong Pt (4.8) năng lượng trường là diện tích giữa trục λ và đường cong i - λ (Hình 4-3). Đại lượng mới, *đồng năng lượng*, được định nghĩa là:

$$W'_f(i,x) = i\lambda - W_f(\lambda,x) \qquad (4.10)$$

trong đó, bằng cách biểu thị λ theo λ(i,x), các biến độc lập của W'_f trở thành i và x. Đồng năng lượng trên Hình 4-3 được coi là diện tích bù của hình chữ nhật i - λ. Từ Pt (4.3) có thể suy ra

$$W'_f = \int_0^i \lambda di \qquad (4.11)$$



Hình 4-3 *Năng lượng trường và đồng năng lượng*

Trường hợp tuyến tính

Sự chuyển đổi năng lượng cơ-điện trong các thiết bị được thiết lập với các khe hở không khí trong mạch từ để ngăn cách giữa phần chuyển động và phần cố định, do đó quan hệ i - λ của mạch từ hầu như tuyến tính; các tổn thất từ có thể được tính bằng phương pháp kinh nghiệm. Với giả thiết tuyến tính, sự phân tích sẽ được đơn giản hóa. Các tổn thất và các tác dụng phi tuyến có thể được phối hợp ở giai đoạn sau.

Với giả thiết tuyến tính, từ Pt (4.8) và Hình 4-3 có thể suy ra

$$W_f = \frac{1}{2} i\lambda = \frac{1}{2} \mathcal{F} \phi = \frac{1}{2} \mathcal{R} \phi^2 \tag{4.12}$$

Trong đó, $\mathcal{R} = \mathcal{F}/\phi$ là từ trở của mạch từ.

Do độ cảm ứng cuộn dây, $L = \lambda/i$, năng lượng trường có thể được biểu thị bằng biểu thức:

$$W_f = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L} \tag{4.13}$$

Trong trường hợp tuyến tính, độ cảm ứng L là độc lập với i và là hàm của cấu hình x. Do đó, năng lượng trường là hàm đặc biệt của hai biến độc lập λ và x.

$$W_f(\lambda, x) = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)} \tag{4.14}$$

Năng lượng trường này được phân phối trên toàn bộ không gian do trường đó chiếm chỗ. Giả sử không có các tổn thất và *độ thẩm từ là hằng số*, mật độ năng lượngcủa trường này là:

$$w_f = \int_0^B H dB = \frac{1}{2} HB = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad J/m^3 \tag{4.15}$$

trong đó H: cường độ từ trường (AT/m)

B: mật độ từ thông (T)

Biểu thức mật độ năng lượng, Pt (4.15), là rất quan trọng khi thiết kế để bảo đảm kích thước tối ưu của thiết bị.

Đối với trường hợp tuyến tính, từ Pt (4.11) có thể thấy đồng năng lượng về trị số là bằng năng lượng, do đó

$$W_f = W_f = \frac{1}{2} \lambda i = \frac{1}{2} \mathcal{F}\phi = \frac{1}{2} \mathcal{P}\mathcal{F}^2 \tag{4.16}$$

Theo độ cảm ứng của cuộn dây

$$W_f' = \int_0^i (\lambda = Li) di = \frac{1}{2} Li^2$$

hoặc tổng quát hơn

$$W_f(i, x) = \frac{1}{2} L(x) i^2 \tag{4.17}$$

Biểu thức của mật độ đồng năng lượng là:

$$w_f' = \int_0^H B\,dH \tag{4.18a}$$

đối với trường hợp tuyến tính

$$w_f' = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu} \tag{4.18b}$$

Năng lượng trường và lực cơ học

Hãy khảo sát rơle phần ứng được kích thích bằng nguồn điện (Hình 4-4). Trường này tạo ra lực cơ học F_f theo chiều truyền động hệ thống cơ học (có thể gồm các thành phần cơ học thụ động và hoạt động). Công cơ học được thực hiện do trường này khi phần ứng dịch chuyển với khoảng cách dx theo chiều dương là

$$dW_m = F_f\,dx \tag{4.19}$$

Năng lượng này được lấy ra từ trường nêu trên do sự thay đổi dx trong cấu hình trường. Theo nguyên lý bảo toàn năng lượng

Năng lượng cơ học = năng lượng điện - độ tăng năng lượng trường (4.20)

ở dạng kí hiệu

$$F_f\,dx = i\,d\lambda - dW_f' \tag{4.21}$$

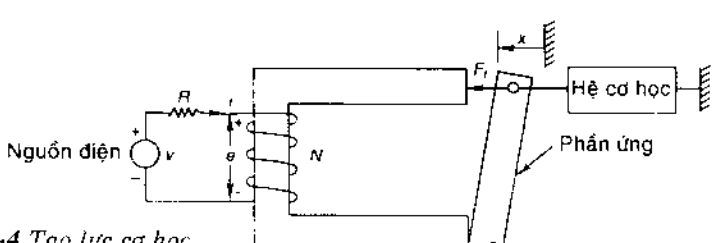
Có thể thấy $F_f\,dx$ là năng lượng cơ học tổng, một phần bị tổn thất do ma sát.

Từ Pt (4.10)

$$W_f' = i\lambda - W_f'(i, x)$$

$$dW_f' = d(i\lambda) - dW_f'(i, x)$$

$$= i\,d\lambda + \lambda\,di - \left(\frac{\partial W_f'}{\partial i}di + \frac{\partial W_f'}{\partial x}dx\right) \tag{4.22}$$



Hình 4-4 *Tạo lực cơ học*

thay dW_f từ Pt (4.22) vào Pt (4.21)

$$F_f dx = i d\lambda - \left[i d\lambda + \lambda . di - \left(\frac{\partial W_f}{\partial i} di + \frac{\partial W_f}{\partial x} dx \right) \right]$$

$$F_f dx = \left(\frac{\partial W_f}{\partial i} - \lambda \right) di + \frac{\partial W_f}{\partial x} dx \right) \tag{4.23}$$

Do các thay đổi di và dx là độc lập và di không có trong vế trái của Pt (4.23), hệ số ở vế phải sẽ bằng zero

$$\frac{\partial W_f}{\partial i} - \lambda = 0$$

$$\text{hoặc} \quad \lambda = \frac{\partial W_f(i, x)}{\partial i} \tag{4.24}$$

Từ Pt (4.23)

$$F_f = \frac{\partial W_f\ (i, x)}{\partial x} \tag{4.25}$$

Biểu thức biểu thị lực cơ học, được áp dụng khi i là biến độc lập, nghĩa là hệ thống *kích dòng*

Nếu (λ, x) là các biến độc lập

$$W_f = W_f(\lambda, x)$$

$$dW_f = \frac{\partial W_f}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial W_f}{\partial x} dx \tag{4.26}$$

Thay Pt (4.26) vào Pt (4.21)

$$F_f dx = i d\lambda - \frac{\partial W_f}{\partial \lambda} d\lambda - \frac{\partial W_f}{\partial x} dx$$

$$F_f dx = -\frac{\partial W_f}{\partial x} dx + \left(i - \frac{\partial W_f}{\partial \lambda} \right) d\lambda \tag{4.27}$$

Do $d\lambda$ là vi phân độc lập, không có trong vế trái của Pt này

$$i - \frac{\partial W_f}{\partial \lambda} = 0$$

$$i = \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial \lambda} \tag{4.28}$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} \tag{4.29}$$

Trong dạng biểu thức lực cơ học này, λ là biến độc lập, nghĩa là hệ thống được điều khiển bằng điện áp khi điện áp là đạo hàm của λ.

Trong các hệ thống tuyến tính, các độ cảm ứng được chuyên biệt, việc sử dụng đồng năng lượng để tìm lực cơ học (Pt 4.25) sẽ thuận tiện hơn. Nếu hệ thống được điều khiển bằng điện áp, dòng điện có thể được xác định bằng cách viết các Pt mạch tương ứng.

Các biểu thức của Pt (4.25) và (4.29) về lực trong hệ thống tuyến tính, có thể được áp dụng cho moment ngẫu lực trong các hệ thống quay, với x được thay bằng độ quay góc θ.

Chiều tăng lực cơ học

Từ Pt (4.29) có thể thấy F_f là dương (tác dụng theo chiều dương của x) nếu $\partial W_f(\lambda,x) / \partial x$ là âm với ý nghĩa năng lượng lưu giữ trong từ trường bị giảm khi tăng x và λ không đổi. Trường hợp đặc biệt (Hình 4-4) khi x tăng (phần ứng chuyển động sang bên trái), năng lượng trường đối với λ không đổi bị giảm do giảm khe hở không khí. Điều đó có nghĩa là F_f tác dụng theo chiều dương. Do đó, có thể nhận thấy lực cơ học do trường này tạo ra, sẽ tác dụng theo chiều giảm năng lượng trường, nói cách khác, hệ thống luôn luôn chiếm vị trí năng lượng trường tối thiểu. Tương tự, từ Pt (4.26), có thể thấy hệ thống chiếm vị trí có đồng năng lượng cực đại.

Cũng từ Hình 4-4, có thể nhận thấy lực tác dụng theo chiều x tăng, do đó giảm lực của mạch từ và tăng độ cảm ứng của cuộn dây.

Xác định lực cơ học

Trường hợp phi tuyến: Phần trên đã đề cập lực cơ học được tính bằng đạo hàm riêng của đồng năng lượng hoặc năng lượng theo các Pt (4.26) và (4.29). Trong trường hợp phi tuyến tổng quát, đạo hàm này phải được xác định bằng số hoặc bằng đồ thị với giả thiết số gia Δt nhỏ. Do đó:

$$F_f \approx \left.\frac{\Delta W_f'}{\Delta x}\right|_{i=\text{hằng số}} \tag{4.30a}$$

$$F_f \approx \left.\frac{\Delta W_f}{\Delta x}\right|_{\lambda=\text{hằng số}} \tag{4.30b}$$

Hai biểu thức này cho các giá trị F_f hơi khác nhau do Δx hữu hạn. Khi $\Delta x \to 0$, F_f là như nhau trong cả hai phương trình.

Trường hợp tuyến tính: Từ Pt (4.17).

$$W_f'(i, x) = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} \tag{4.31}$$

Từ Pt (4.31), lực này tác dụng theo chiều tăng độ cảm ứng của cuộn kích. Từ Pt (4.14).

$$W_f(\lambda, x) = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)}$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f}{\partial x} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{L(x)}\right)^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} \tag{4.32}$$

Có thể thấy các Pt (4.31) và (4.32) là tương đương khi $i = \lambda/L$

Từ Pt (4.12)

$$W_f(\phi, x) = \frac{1}{2} \mathcal{R}(x) \phi^2$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f}{\partial x} = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{\partial \mathcal{R}(x)}{\partial x} \tag{4.33}$$

Cần nhớ, ở đây không có sự khác biệt giữa λ là biến độc lập hay ϕ là biến độc lập khi chúng quan hệ với nhau theo hằng số ($\lambda = N\phi$). Biểu thức thứ hai của F_f có thể suy ra từ Pt (4.12)

$$W_f(\lambda, x) = \frac{1}{2} \lambda i(x)$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{\lambda \partial i(x)}{\partial x} \tag{4.34}$$

Năng lượng cơ học

Khi phần ứng (Hình 4-4) chuyển động từ vị trí x_a đến x_b với dòng điện cuộn dây không đổi i_0, năng lượng cơ học sẽ là

$$\Delta W_m = \int_{x_a}^{x_b} F_f \, dx \tag{4.35}$$

Lấy tích phân Pt (4.26)

$$\Delta W_m = \int_{x_a}^{x_b} F_f \, dx = \Delta W_f' \quad (\text{i không đổi})$$
$$= \text{tăng đồng năng lượng} \tag{4.36}$$

Đồ thị của Pt (4.36) được nêu trên Hình 4-5 với trường hợp phi tuyến (a) và tuyến tính (b). Điện năng cung cấp là

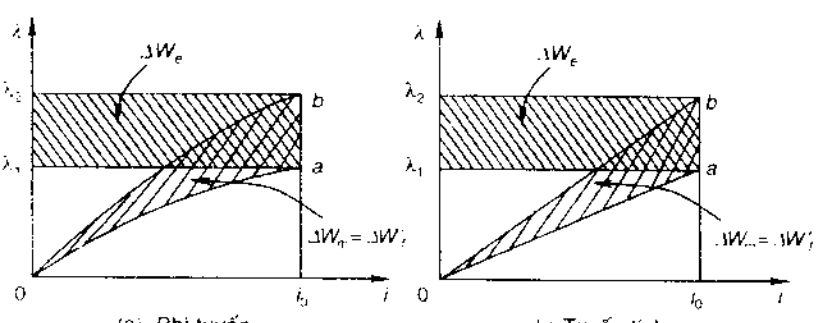
$$\Delta W_e = i_0(\lambda_2 - \lambda_1) \tag{4.37}$$

Đối với trường hợp tuyến tính

$$\Delta W_f = \Delta W_f' = \Delta W_m = \frac{1}{2} i_0(\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{1}{2} \Delta W_e \tag{4.38}$$

có nghĩa là một nửa điện năng cung cấp được lưu trong trường và nửa còn lại được xuất ở dạng cơ năng. Trong kiểu vận hành này, phần ứng phải dịch chuyển từ vị trí x_a đến x_b với tốc độ rất chậm để dòng điện cuộn kích giữ không đổi.

Giả sử, phần ứng (Hình 4-4) chuyển động từ x_a đến x_b với λ không đổi, lấy tích phân Pt (4.29).



Hình 4-5 *Các giá trị cơ năng khi i không đổi*

$$\Delta W_m = \int_{x_a}^{x_b} F_f dx = -\Delta W_f (\lambda \text{ không đổi})$$

$$= \text{giảm năng lượng trường} \qquad (4.39)$$

Điều này được minh họa trên Hình 4-6, đối với trường hợp phi tuyến tổng quát (a) và trường hợp tuyến tính (b). Trong đó

$$\Delta W_e = 0 \qquad (4.40)$$

Đối với trường hợp tuyến tính

$$\Delta W_m = \frac{1}{2}\lambda_0(i_1 - i_2) \qquad (4.41)$$

Khi λ không đổi, phần ứng phải dịch chuyển từ x_a đến x_b trong khoảng thời gian zero. Do không có năng lượng điện cung cấp , cơ năng được lấy từ năng lượng trường, do đó để bảo toàn, giá trị cơ năng bằng giá trị tuyệt đối của năng lượng trường.

Sự chuyển động thực tế của phần ứng giữa hai trường hợp lý tưởng được minh họa trên Hình 4-5 và 4-6. Quan hệ i - λ tương ứng là quỹ đạo từ a đến b được nêu trên Hình 4-7. Trong trường hợp tổng quát

ΔW_e = diện tích cabd

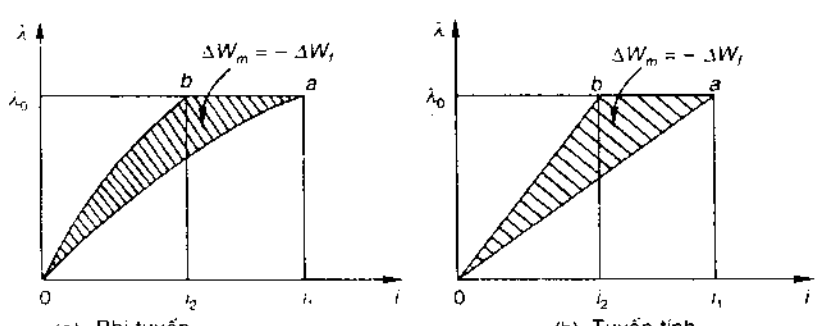
ΔW_f = diện tích obd - diện tích oac

ΔW_m = ΔW_e - ΔW_f

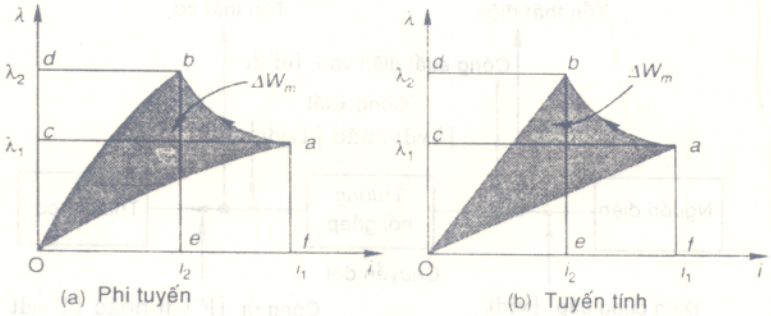
= diện tích cabd - diện tích obd + diện tích oac

= diện tích oab

Cơ năng = diện tích tô đậm trên Hình 4-7.



Hình 4-6 *Các giá trị cơ năng khi λ không đổi*



Hình 4-7 *Các giá trị cơ năng*

Do ab là chuyển động tổng quát, diện tích này biểu thị cơ năng được tính toán bằng đồ thị hoặc bằng số.

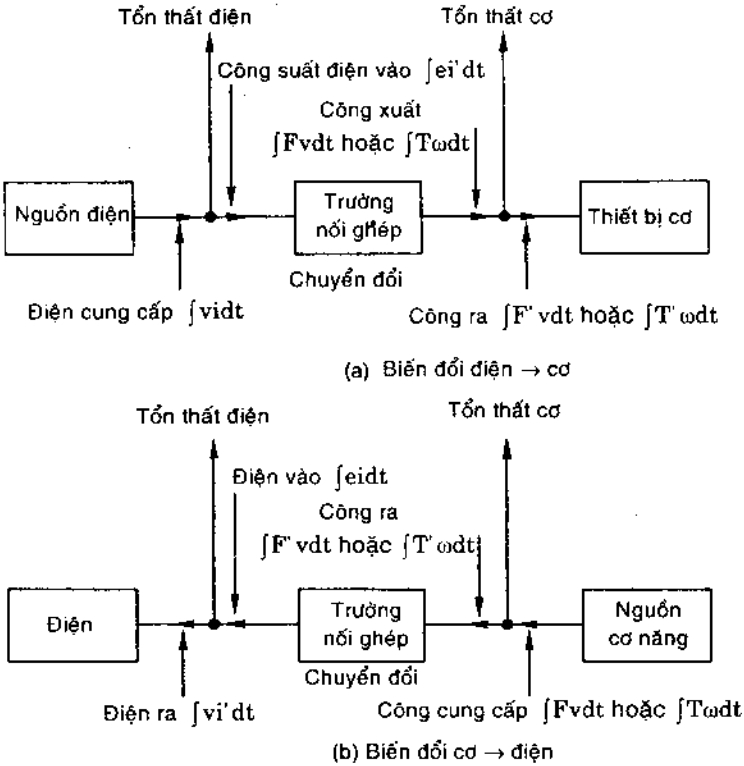
Lưu đồ năng lượng trong các thiết bị cơ - điện

Sự chuyển đổi năng lượng cơ - điện là quá trình thuận nghịch, các Pt từ 4.26 đến 4.29 biểu thị quá trình chuyển đổi lực cơ học. Trên Hình 4-4, nếu phần ứng dịch chuyển theo chiều x dương dưới tác dụng của F_f, điện năng chuyển thành cơ năng thông qua nối ghép trường. Nếu phần ứng dịch chuyển theo chiều x âm do tác dụng của ngoại lực, cơ năng được chuyển thành điện năng thông qua nối ghép trường. Quá trình chuyển đổi này không chỉ trong các thiết bị tuyến tính, mà còn có thể thực hiện được trong các thiết bị quay. Các tổn thất điện và cơ làm cho quá trình này là không thuận nghịch. Lưu đồ chuyển đổi năng lượng cơ - điện theo chiều bất kỳ cùng với năng lượng tổn thất được nêu trên Hình 4-8.

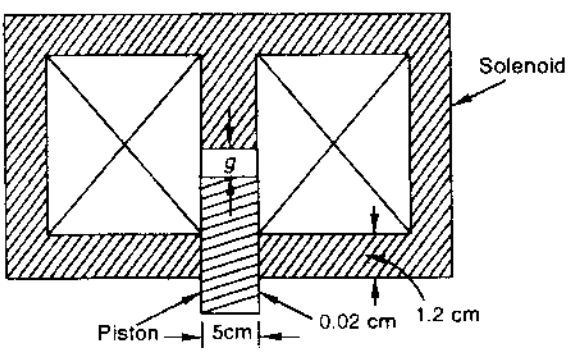
Ví dụ 4-1. Trên Hình 4-9 là tiết diện nam châm solenoid lõi sắt. Piston bằng sắt bị giới hạn bằng các cữ chặn do đó chỉ chuyển động trong khoảng giới hạn. Cuộn kích có 1200 vòng, dẫn dòng điện 2.25 A không đổi. Đường cong từ hóa của phần sắt trong mạch từ được cho theo bảng dưới đây:

Từ thông Wb	0.0010	0.00175	0.0023	0.0025	0.0026	0.00265
Lực từ động,AT	60	120	210	300	390	510

Hãy tính năng lượng từ trường và đồng năng lượng với khe hở không khí g = 0.2 cm và g = 1 cm, dòng kích 2.25 A.



Hình 4-8 *Lưu đồ năng lượng trong quá trình chuyển đổi cơ -điện thông qua trường nối ghép*



Hình 4-9 *Minh họa Ví dụ 4-1*

Giải

Mạch từ có hai khe hở không khí, từ trở trong từng trường hợp được tính như sau:

Trường hợp 1: g = 0.2 cm

Từ trở của khe hở không khí hình tròn

$$\frac{0.2 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{\pi}{4} \times (0.05)^2} = 810.5 \times 10^3$$

Từ trở của khe hở không khí hình xuyến

$$\frac{0.2 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times 0.05 \times 0.012} = 84.4 \times 10^3$$

Tổng từ trở khe hở không khí

$$\mathcal{R}_{ag} = 895 \times 10^3$$

$$\mathcal{F}_{ag} = \mathcal{R}_{ag}\,\phi = 895 \times 10^3\,\phi \ \text{AT}$$

Đường cong từ hóa của sắt và khe hở không khí với g = 0.2 cm được tính theo bảng:

λ(WbT)	1.2	2.1	2.76	3.0	3.12	3.18
AT	955	1686	2269	2538	2217	2882
i (A)	0.796	1.045	1.891	2.115	2.264	2.40

Đường cong i - λ được vẽ trên Hình 4-10, từ đó đồng năng lượng trường được xác định theo đồ thị

Diện tích oea = 3.73 J

Diện tích năng lượng oaf = 3.11 x 2.25 - 3.73 = 3.27 J

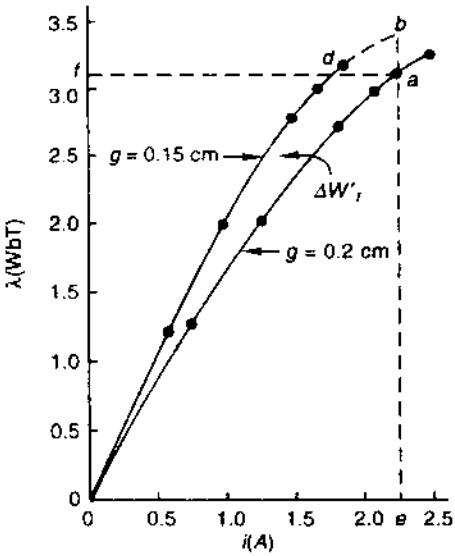
Trường hợp 2: g = 1 cm

Từ trở của khe hở không khí hình tròn = 4052.5×10^3

Từ trở của khe không khí hình xuyến = 84.4×10^3

$\mathcal{R}_{ag}$ = 4136.7×10^3

Do từ trở cao của khe hở không khí, số ampere - vòng do phần sắt của mạch từ hấp thụ có thể bỏ qua, do đó:



Hình 4-10 *Quan hệ i-λ của Ví dụ 4-1*

ϕ = 0.0025 Wb

AT (khe hở không khí) = 10342

AT (sắt) = 390

Có thể thấy kể cả trong vùng gần bão hòa, AT (sắt) dưới 5% tổng AT cần thiết để thiết lập từ thông.

Đối với i = 2.25 A

$\mathcal{F}$ = 1200 x 2.25 = 2700 AT

$$\phi = \frac{2700}{4136.7 \times 10^3} = 0.653 \times 10^3 \text{ Wb}$$

$$\lambda = N\phi = 1200 \times 0.653 \times 10^3 = 0.784 \text{ Wb} - \text{T}$$

Năng lượng trường = đồng năng lượng = 1/2 iλ

= 1/2 x 2.25 x 0.784 = 0.882 J

Ví dụ 4-2. Từ Ví dụ 4-1 hãy tính lực tác dụng lên piston khi g = 0.2 cm với dòng kích 2.25 A

Giải

$$F_f = \frac{\partial W_f'(i, g)}{\partial g}$$

Trong đó g là khe hở không khí, giá trị 0.2×10^{-2} m

Trường hợp a: Từ trở của đường dẫn ở lõi sắt

Đây là trường hợp phi tuyến có thể xác định đạo hàm theo số.

Giả sử

$$\Delta g = -0.05 \times 10^{-2} \text{ m (giảm)}$$

$$g + \Delta g = 0.15 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Từ trở khe hở không khí

$$810.5 \times 10^3 \times \frac{0.15}{0.2} + 84.4 \times 10^3 = 692 \times 10^3$$

Đối với khe hở này

λ	1.2	2.1	2.76	3.0	3.12	3.18
AT	752	1331	1802	2030	2189	2344
i	0.626	1.110	1.501	1.692	1.824	1.953

Kết quả được vẽ đồ thị trên Hình 4-10, từ đó độ tăng của đồng năng lượng khi i = 2.25 A là diện tích oab

$$\Delta W_f' = 0.718 \text{ J}$$

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial g} = \frac{0.718}{-0.05 \times 10^{-2}} = -1436 \text{ N}$$

Do giảm g sẽ làm tăng W'_f, lực tác dụng lên piston theo chiều âm (chiều dương là chiều tăng g), do đó đây là lực hút (có xu hướng giảm g).

Có thể thấy, các kết quả chính xác hơn có thể nhận được bằng cách chọn giá trị Δg nhỏ hơn.

Trường hợp b: Đường cong từ hóa của sắt được coi là tuyến tính (tương ứng độ dốc ban đầu)

Đây là trường hợp tuyến tính, do đó:

Tổng từ trở

$$\mathcal{R} = \frac{60}{0.001} + 84.4 \times 10^3 + \frac{g}{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{\pi}{4}(0.05)^2}$$

$$= 144.4 \times 10^3 + 4053g \times 10^5$$

$$= 144.4(1 + 28.1 \times 10^2 g) \times 10^3$$

$$\phi = \frac{1200i}{144.4(1 + 28.1 \times 10^2 g) \times 10^3} \text{ Wb}$$

$$\lambda = N\phi = \frac{(1200)^2 i^2}{144.4(1 + 28.1 \times 10^2 g) \times 10^3}$$

$$W_f'(i, g) = \frac{1}{2} i\lambda = \frac{(1200)^2 i^2}{2 \times 144.4(1 + 28.1 \times 10^2 g) \times 10^3}$$

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial g} = -\frac{(1200)^2 i^2 \times 28.1 \times 10^2}{2 \times 144.4(1 + 28.1 \times 10^2 g)^2 \times 10^3}$$

Đối với $g = 0.2 \times 10^{-2}$ m

$$F_f = -\frac{(1200)^2 i^2 \times 28.1 \times 10^2}{2 \times 144.4\,(1 + 28.1 \times 0.2)^2 \times 10^3} = -1617 \text{ N}$$

Giả thiết tuyến tính làm cho các giá trị của lực này khác biệt khoảng 13% so với trường hợp phi tuyến. Sự khác biệt thực tế sẽ nhỏ hơn khi đạo hàm trong trường hợp phi tuyến được xác định bằng phương pháp gần đúng. Có thể nhận thấy giả thiết tuyến tính cho phép giảm đáng kể các tính toán.

Ví dụ 4-3. Trong Ví dụ 4-1, giả sử từ trở của đường dẫn sắt là không đáng kể, dòng kích là 2.25 A, piston dịch chuyển rất chậm từ g = 1 cm đến g = 0.2 cm. Hãy tính năng lượng điện cung cấp cho cuộn kích và cơ năng.

Giải

Từ trở đã được tính từ Ví dụ 4-2, là hàm của chiều dài khe hở không khí

$$\mathcal{R} = (84.4 + 4053 \times 10^2 g) \times 10^{-3}$$

Các nối ghép từ thông ϕ đối với dòng kích 2.25 A là

$$= \frac{(1200)^2 \times 2.25}{(84.4 + 4053 \times 10^2 g) \times 10^3} = \frac{38.4}{(1 + 48 \times 10^2 g)} \text{ WbT}$$

Do piston chuyển động rất chậm, dòng kích hầu như không đổi. Do đó

$$\Delta W_e = i_0(\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$= 2.25 \times 38.4\left(\frac{1}{1 + 48 \times 0.9} - \frac{1}{1 + 48 \times 1}\right)$$

$$= 2.25 \times 38.4(0.095 - 0.020) = 6.39 \text{ J}$$

$$\Delta W_e = \frac{1}{2}\Delta W_e = 3.195 \text{ J}$$

Ví dụ 4-4. Mật độ từ thông trên bề mặt của mặt sắt là 1.6 T, đây là giá trị mức bão hòa đối với vật liệu sắt từ, hãy tính mật độ lực trên mặt sắt

Giải

Giả sử, diện tích của mặt sắt là A m^2, năng lượng trường trong thể tích giữa hai mặt này với khoảng cách vuông góc là x. Từ Pt (4.15)

$$W_f(B, x) = \frac{1}{2}\frac{B^2Ax}{\mu}$$

Từ Pt (4.29), lực cơ học do trường này gây ra là:

$$F_f = -\frac{\partial W_f(B, x)}{\partial x} = -\frac{1}{2}\frac{B^2Ax}{\mu}$$

Dấu âm có nghĩa là lực tác dụng theo chiều giảm x (là lực hút giữa hai mặt). Lực này trên một đơn vị diện tích là

$$|F_f| = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{(1.6)^2}{4\pi \times 10^{-7}} = 1.02 \times 10^6 \quad \text{N/m}^2$$

Ví dụ 4-5. Trong rơle điện từ (Hình 4-11) được kích từ nguồn điện áp, dòng điện và nối ghép từ thông có quan hệ

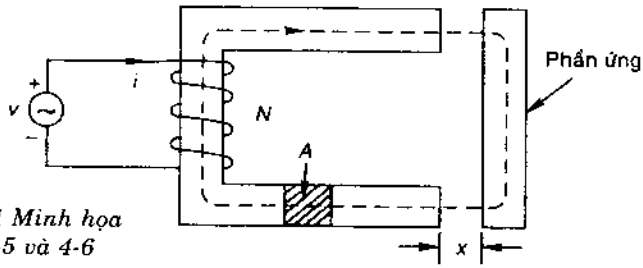
$$i = \lambda^2 + 2\lambda(1 - 1)^2; \quad x < 1$$

Hãy tìm lực tác dụng lên phần ứng dưới dạng hàm số của λ.

Giải

$$W_f(\lambda, x) = \int_0^\lambda i d\lambda = \frac{1}{3}\lambda^3 + \lambda^2(1 - x)^2$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f}{\partial x} = 2\lambda^2(1 - x)^2$$



Hình 4-11 *Minh họa Ví dụ 4-5 và 4-6*

Ví dụ 4-6. Trong rơle điện từ (Hình 4-11) được kích từ nguồn điện áp

$$v = \sqrt{2}\ V \sin \omega t$$

Giả sử từ trở của đường dẫn sắt trong mạch từ là hằng, hãy tìm biểu thức xác định lực trung bình tác dụng lên phần ứng, khi phần ứng được giữ cố định ở khoảng cách x.

Giải

Từ trở của đường dẫn sắt là a (ví dụ)

Từ trở của đường dẫn không khí là

$$\frac{2x}{\mu_0 A} = bx$$

Từ trở toàn phần của đường dẫn từ, $\mathcal{R} = a + bx$

$$W_f(\phi, x) = \frac{1}{2}\mathcal{R}(x)\phi^2 \qquad \text{(chú ý, } \lambda = N\phi)$$

$$F_f = -\frac{\partial W_f(\phi, x)}{\partial x} = -\frac{1}{2}\phi^2 \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x} = -\frac{1}{2} b\phi^2 \tag{4.42}$$

Chú ý $\partial\mathcal{R} / \partial x = b$ là dương, do đó F_f là âm, tác dụng theo chiều giảm x.

Lúc này i và v quan hệ với nhau theo phương trình mạch

$$v = \mathcal{R} + L\frac{di}{dt}$$

nghiệm trạng thái ổn định là

$$\bar{I} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \angle -\tan^{-1}\frac{\omega L}{R} \tag{4.43}$$

Khi đó $$i = \frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left(\omega t - \tan^{-1}\frac{\omega L}{r}\right) \quad (4.44)$$

Từ Pt (2.21), $L = N^2/\mathcal{R}$

khi đó $$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}} = \frac{\sqrt{2}NV}{\sqrt{(R\mathcal{R})^2 + (N^2\omega)^2}} \sin\left(\omega t - \tan^{-1}\frac{\omega N^2}{R\mathcal{R}}\right) \quad (4.45)$$

Thay ϕ vào Pt (4.42)

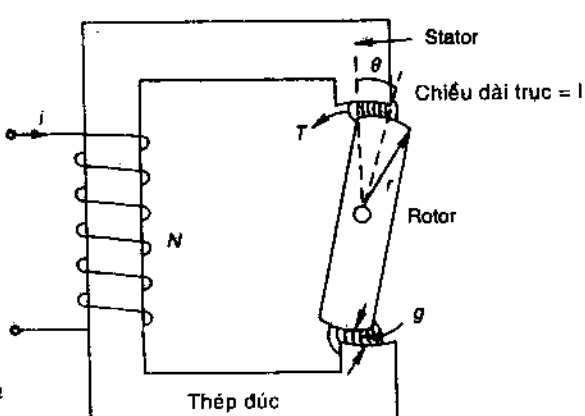
$$F_f = -\frac{bN^2V^2}{(R\mathcal{R})^2 + (N^2\omega)^2} \sin^2\left(\omega t - \tan^{-1}\frac{N^2\omega}{R\mathcal{R}}\right)$$

Lực trung bình theo thời gian là

$$F_f(av) = \frac{1}{T}\int_0^T F_f dt\,; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$= -\frac{1}{2}\frac{bN^2V^2}{(R\mathcal{R})^2 + (N^2\omega)^2} \quad (4.46)$$

Ví dụ 4-7 Hình 4-12 minh họa thiết bị cơ điện kiểu quay, được gọi là động cơ từ trở. Cần xác định moment tác dụng lên rotor theo hàm của dòng điện cung cấp cho cuộn kích và góc chồng chập giữa rotor và stator. Biểu thức moment từ đồng năng lượng, W_f (i, ϕ), cần được khai triển. Giả sử đường từ qua khối thép có từ trở không đáng kể, do đó từ trở trong đường từ là do hai khe hở không khí hình xuyến.



Hình 4-12 *Máy cảm ứng đơn giản*

Diện tích khe hở không khí vuông góc với từ thông

$$A = \left(r + \frac{1}{2}g\right)\theta l$$

Tổng chiều dài khe hở không khí dọc theo từ thông = 2g

$$\text{Từ trở của các khe hở không khí} = \frac{2g}{\mu_0(r + \frac{1}{2}g)\theta l} \qquad (4.47)$$

$$\text{Từ thông được thiết lập, } \phi = \frac{Ni\mu_0 (r + \frac{1}{2}g)\,\theta l}{2g} \qquad (4.48)$$

$$\text{Nối ghép từ thông, } \lambda = \phi N = \frac{N^2 i\mu_0 (r + \frac{1}{2}g)\,\theta l}{2g} \qquad (4.49)$$

$$\text{Đồng năng lượng, } W_f(i, \phi) = \frac{1}{2}\lambda i = \frac{N^2 i^2 \mu_0 \left(r + \frac{1}{2}g\right)\phi l}{4g} \qquad (4.50)$$

$$\text{Moment } T_f = \frac{\partial W_f(i, \theta)}{\partial \theta}$$

$$= \frac{N^2 i^2 \mu_0 \left(r + \frac{1}{2}g\right) l}{4g} \qquad (4.51)$$

Moment này tác dụng theo chiều tăng đồng năng lượng đối với dòng điện i cho trước ở cuộn dây. Điều này xảy ra (Pt (4.50)) khi góc chồng chập tăng, tức là rotor có xu hướng tự chỉnh thẳng hàng với stator, đồng thời moment trong trường hợp này là độc lập với góc chồng chập.

Có thể khảo sát vấn đề này từ quan điểm thiết kế, điều cơ bản là moment cực đại có thể được khai triển, khi vật liệu từ tính đạt đến giá trị bão hòa (1.6T). Biểu thức moment từ Pt (4.51) phải được biểu diễn theo đại lượng mật độ từ thông thay vì dòng điện của cuộn kích.

$$B = \phi/A = \mathcal{F}/\mathcal{R}A = \frac{\mu_0 Ni}{2g} \qquad (4.52)$$

Sử dụng Pt (4.52) trong Pt (4.51).

$$T_f = \frac{B^2 gl\left(r + \frac{1}{2}g\right)}{\mu_0} \qquad (4.53)$$

Do giá trị cực đại của B là cố định đối với vật liệu từ tính, moment mong muốn có thể đạt được bằng sự kết hợp giữa g, r, và l.

Cho các giá trị

$g = 0.0025$ m

$l = r = 0.025$ m

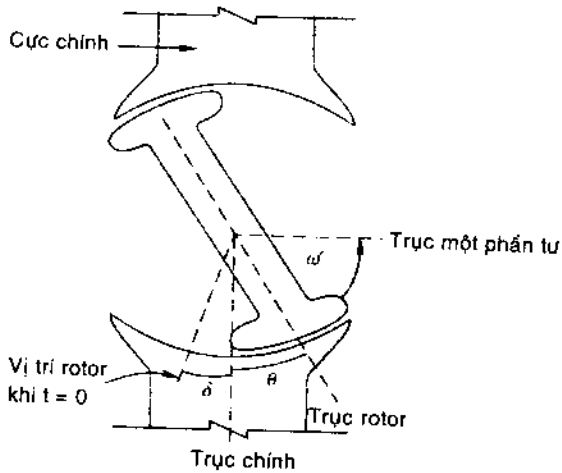
$B = 1.6$ T

Khi đó $$T_f = \frac{(1.6)^2 \times 0.0025 \times 0.025\left(0.025 + \frac{1}{2} \times 0.0025\right)}{4\pi \times 10^{-7}} = 3.34 \text{ Nm}$$

Trong vùng không chồng chập giữa rotor và stator, dạng hình học của trường này rất phức tạp, rất khó biểu thị moment theo phương trình giải tích. Có thể khảo sát vấn đề này khi xét cảm kháng cuộn dây là hàm vị trí góc của rotor. Từ Pt (4.49).

$$L(t\theta) = \lambda/i = \frac{N^2\mu_0 l\left(r + \frac{1}{2}g\right)\theta}{2g} \qquad (4.54)$$

Với chiều dài khe hở không khí không đổi, trong vùng chồng chập, độ tự cảm tăng tuyến tính với góc chồng chập (θ), nhận được giá trị cực đại khi rotor ở vị trí thẳng đứng (Hình 4-12) sau đó giảm tuyến tính. Từ Pt (4.54), độ tự cảm là zero tại (θ = 0, tức là không có sự chồng chập giữa các bề mặt cực của rotor và stator. Tuy nhiên, trong thực tế độ cảm ứng của cuộn dây không có giá trị zero khi θ = 0, nghĩa là mô hình cảm ứng của Pt (4.54) không có giá trị trong vùng θ thấp. Độ cảm ứng có giá trị thấp nhất trong vị trí ngang của rotor và tăng đến giá trị cực đại khi rotor đến vị trí thẳng đứng. Trong thiết bị thực tiễn, vùng giữa hai mặt cực của stator rất hẹp (Hình 4-13), các mặt cực stator và rotor được định hình để độ cảm ứng của mạch từ và do đó của cuộn dây biến thiên theo hàm sine. Độ cảm ứng cuộn dây có giá trị cực đại khi rotor thẳng hàng dọc theo trục cực chính (được gọi là trục thẳng) và giá trị cực tiểu khi rotor ở 90^0 so với trục cực chính (được gọi là trục một phần tư) (Hình 4-13). Để xét góc θ, việc chọn trục thẳng sẽ thuận tiện hơn.



Hình 4-13 *Vị trí rotor và stator*

Từ Hình 4-13 có thể thấy độ cảm ứng cuộn dây là hàm tần số kép của góc θ (biến thiên L hai chu kỳ trong một vòng quay rotor). Do đó, L (θ) được viết dưới dạng:

$$L(\theta) = L_1 + L_2 \cos 2\theta \tag{4.55}$$

Sự biến thiên này được nêu trên Hình 4-14.

Giả sử dòng điện kích là hàm sine

$$i = I_m \cos \omega t \tag{4.56}$$

Đồng năng lượng trường (từ Pt (4.17)) là

$$W_f'(i,\theta) = \frac{1}{2} L(\theta) i^2$$

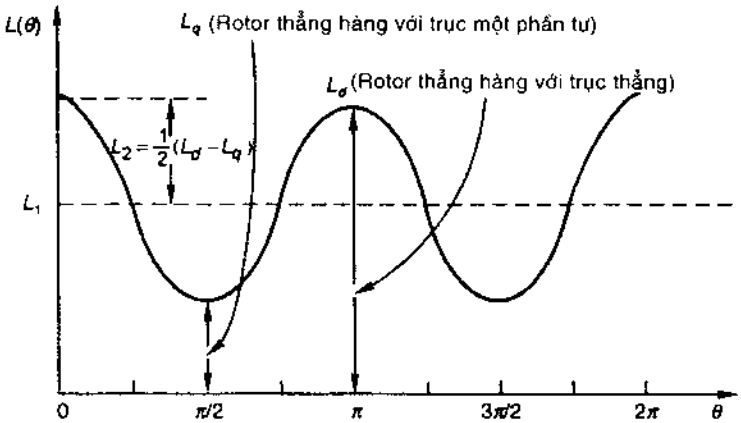
Moment cơ học do trường này gây ra sẽ là

$$T_f = \frac{\partial W_f'}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = -I_m^2 L_2 \sin 2\theta \cos^2 \omega t \tag{4.57}$$

Theo tốc độ góc của rotor (ω')

$$\theta = \omega' t - \delta \tag{4.58}$$

trong đó δ là vị trí của rotor ở t = 0 khi dòng điện i là cực đại. Do đó:



Hình 4-14 *Biến thiên độ cảm ứng cuộn dây với vị trí rotor*

$$T_f = -I_m^2 L_2 \sin 2(\omega' t - \delta)\sin^2\omega t$$

$$= -\frac{1}{2} I_m^2 L_2 \sin 2(\omega' t - \delta)(1 + \cos 2\omega t)$$

$$= -\frac{1}{2} I_m^2 L_2 \{\sin 2(\omega' t - \delta) + \sin 2(\omega' t - \delta)\cos 2\omega t\}$$

$$= -\frac{1}{2} I_m^2 L_2 \left\{\sin 2(\omega' t - \delta) + \frac{1}{2}\left[\sin 2(\omega' t + \omega t - \delta) + \sin 2(\omega' t - \omega t - \delta)\right]\right\} \quad (4.59)$$

Từ Pt (4.59) có thể thấy moment biến thiên theo thời gian với giá trị trung bình zero nếu $\omega' \neq \omega$. Tuy nhiên, khi rotor quay với tốc độ $\omega' = \omega$, được gọi là *tốc độ đồng bộ*, moment trung bình là:

$$T_f(av) = \frac{1}{4} I_m^2 L_2 \sin 2\delta \quad (4.60)$$

Từ Hình 4-14

$$L_2 = \frac{1}{2}(L_d - L_q)$$

$$T_f(av) = \frac{1}{8} I_m^2 (L_d - L_q)\sin 2\delta \quad (4.61)$$

Do đó, ví dụ, với $I_m = 5A$, $L_d = 0.25$ H, $L_q = 0.15$ H giá trị cực đại của moment trung bình là :

$$T_f(av)\Big|_{max} = \frac{1}{8} \times 25 \times (0.25 - 0.15) = 0.3152 \text{ Nm}$$

khi $\delta = 45^0$

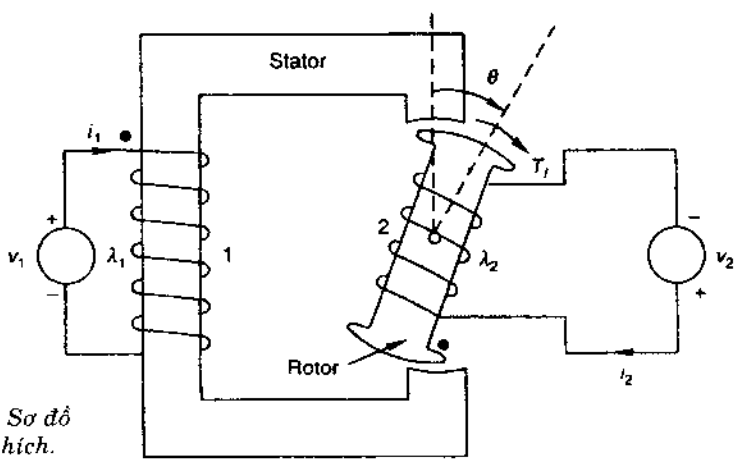
Sự biến thiên moment - δ theo hàm sine là đặc trưng của các máy đồng bộ.

Các hệ thống từ trường đa kích thích

Các thiết bị kích thích đơn, đã đề cập ở phần trên, thường được dùng cho chuyển động qua khoảng cách giới hạn hoặc chuyển động quay qua góc cho trước. Các thiết bị biến đổi điện - cơ có yêu cầu đặc biệt tạo ra tín hiệu điện tỉ lệ với các lực hoặc các tốc độ, hoặc tạo ra lực tỉ lệ với tín hiệu điện (dòng hoặc điện áp). Các thiết bị này đòi hỏi hai kích thích - một kích thích thiết lập từ trường với cường độ cho trước, kích thích thứ hai tạo ra tín hiệu mong muốn (điện hoặc cơ). Các thiết bị chuyển đổi năng lượng liên tục - động cơ và máy phát điện - cũng đòi hỏi đa kích thích.

Hình 4-15 minh họa hệ thống từ trường với hai kích thích điện - một ở stator và một ở rotor. Hệ thống này có thể được biểu thị theo một trong hai tập hợp ba biến độc lập, (λ_1, λ_2 , θ) hoặc (i_1, i_2, θ). Với tập hợp thứ nhất

$$T_f = -\frac{\partial W_f(\lambda_1, \lambda_2, \theta)}{\partial \theta} \tag{4.62}$$



Hình 4-15 *Sơ đồ hai kích thích.*

năng lượng trường được tính theo phương trình

$$W_f(\lambda_1, \lambda_2, \theta) = \int_0^{\lambda_1} i_1 d\lambda_1 + \int_0^{\lambda_2} i_2 d\lambda_2 \tag{4.63}$$

Tương tự Pt (4.28)

$$i_1 = \frac{\partial W_f(\lambda_1, \lambda_2, \theta)}{\partial \lambda_1}$$

$$i_2 = \frac{\partial W_f(\lambda_1, \lambda_2, \theta)}{\partial \lambda_2}$$

Giả sử hàm là tuyến tính

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \tag{4.64a}$$

$$\lambda_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \,;\, (L_{12} = L_{21}) \tag{4.64b}$$

Tính i_1 và i_2 theo λ_1, λ_2, và thay vào Pt (4.63), lấy tích phân

$$W_f(\lambda_1, \lambda_2, \theta) = \frac{1}{2}\beta_{11}\lambda_1^2 + \beta_{12}\lambda_1\lambda_2 + \tfrac{1}{2}\beta_{22}\lambda_2^2 \tag{4.65}$$

trong đó $\beta_{11} = L_{22}/(L_{11}L_{22} - L_{12}^2)$

$\beta_{22} = L_{11}/(L_{11}L_{22} - L_{12}^2)$

$\beta_{12} = \beta_{21} = -L_{12}/(L_{11}L_{22} - L_{12}^2)$

Độ tự cảm và hỗ cảm của hai cuộn kích là các hàm của góc θ.

Nếu dòng điện được dùng để xác định trạng thái hệ thống

$$T_f = \frac{\partial W_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \tag{4.66}$$

trong đó, đồng năng lượng được tính theo

$$W_f(i_1, i_2, \theta) = \int_0^{i_1} \lambda_1 di_1 + \int_0^{i_2} \lambda_2 di_2 \tag{4.67}$$

Trường hợp tuyến tính

$$W_f(i_1, i_2, \theta) = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2$$

với các độ cảm ứng là hàm của góc θ.

Ví dụ 4-8. Đối với hệ thống trên Hình 4-15, các độ cảm ứng là:

$$L_{11} = (4 + \cos 2\theta) \times 10^{-3}\ H$$

$$L_{12} = 0.15 \cos\theta \quad H$$

$$L_{22} = (20 + 5 \cos 2\theta) \quad H$$

Hãy tìm moment, khi biết $i_1 = 1$ A, $i_2 = 0.02$ A

Giải

$$W_f'(i_1, i_2, \theta) = \frac{1}{2}(4 + \cos 2\theta) \times 10^{-3} \times i_1^2 + (0.15 \cos\theta)\, i_1 i_2$$

$$+ \frac{1}{2}(20 + 5 \cos 2\theta)\, i_2^2$$

$$T_f = \frac{\partial W_f'}{\partial \theta} = (\sin 2\theta) \times 10^{-3}\, i_1^2 - 0.15 (\sin\theta)\, i_1 i_2 - 5 (\sin 2\theta)\, i_2^2$$

$$= -10^{-3} \sin 2\theta - 3 \times 10^{-3} \sin\theta$$

Đại lượng thứ nhất, $10^{-3} \sin 2\theta$ là moment từ trở phát sinh nếu các độ tự cảm là hàm của góc khối θ. Nếu L_1 và L_2 là độc lập đối với θ (rotor và stator có khe hở không khí đồng nhất) moment sẽ là zero. Đại lượng thứ hai là moment được tạo ra do thành phần hỗ cảm. Moment từ trở là tần số kép của góc khối khi so với đại lượng thứ hai. Dấu âm có nghĩa là moment này tự hồi phục, ngược với sự dịch chuyển của góc θ.

Ví dụ 4-9. Trong rơle điện từ trên Hình 4-16

$$L_{11} = k_1/x,\ L_{22} = k_2/x,\ L_{12} = k_3/x.$$

Hãy tìm biểu thức về lực tác dụng lên phần ứng, nếu

$$i_1 = I_1 \sin \omega_1 t,\ i_2 = I_2 \sin \omega_2 t$$

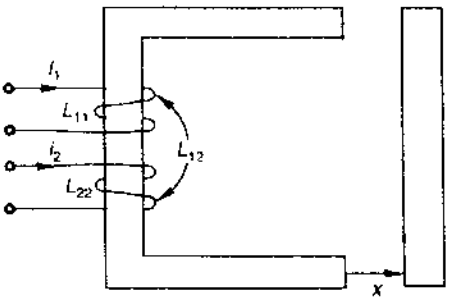
hãy viết biểu thức về lực trung bình, quan hệ giữa ω_1 và ω_2, lực trung bình, cực đại và cực tiểu

Giải

$$W_f'(i_1, i_2, x) = \frac{1}{2}\frac{k_1}{x} i_1^2 + \frac{k_2}{x} i_1 i_2 + \frac{1}{2}\frac{k_3}{x} i_2^2$$

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial x} = -\frac{1}{2}\frac{k_1}{x^2} i_1^2 - \frac{k_2}{x^2} i_1 i_2 - \frac{1}{2}\frac{k_3}{x^2} i_2^2$$

Thay i_1 và i_2



Hình 4-16 *Minh họa Ví dụ 4-9*

$$F_f = -\frac{1}{2}\frac{k_1}{x^2} I_1^2 \sin^2\omega_1 t - \frac{k_2}{x^2} I_1 I_2 \sin\omega_1 t \sin\omega_2 t - \frac{1}{2}\frac{k_3}{x^2} I_2^2 \sin^2\omega_2 t$$

$$F_f = \frac{1}{4}\frac{k_1^2}{x^2} I_1^2 + \frac{1}{4}\frac{k_1^2}{x^2}\cos 2\omega_1 t - \frac{1}{2}\frac{k_2}{x^2} I_1 I_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

$$+ \frac{1}{2}\frac{k_1}{x^2} I_1 I_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t - \frac{1}{4}\frac{k_2}{x^2} I_2^2 - \frac{1}{4}\frac{k_3}{x^2} I_2^2 \cos 2\omega_2 t$$

Do có các đại lượng tần số

$$F_f(av) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T}\int_0^T F_f(t)dt$$

Nếu $\omega_1 \neq \omega_2$

$$F_f(av) = -\frac{1}{4}\frac{k_1^2}{x^2} I_1^2 - \frac{1}{2}\frac{k_2}{x^2} I_2^2 \text{ (lực cực tiểu)}$$

Nếu $\omega_1 = \omega_2$

$$F_f(av) = -\frac{1}{4}\frac{k_1^2}{x^2} I_1^2 - \frac{1}{2}\frac{k_2}{x^2} I_1 I_2 - \frac{1}{4}\frac{k_2}{x^2} I_2^2 \text{ (lực cực đại)}$$

Ví dụ 4-10. Hai cuộn dây nối ghép có độ tự cảm và hỗ cảm

$$L_{11} = 2 + \frac{1}{2x}; \quad L_{22} = 1 + \frac{1}{2x}; \quad L_{12} = L_{21} = \frac{1}{2x}$$

trên khoảng dịch chuyển tuyến tính x xác định. Cuộn thứ nhất được tính bằng dòng điện 20 A không đổi, và cuộn thứ hai được tính bằng dòng - 10 A không đổi. Hãy tìm:

a. Công cơ học được thực hiện nếu x thay đổi từ 0.5 đến 1 m.

b. Năng lượng được cung cấp bằng từng nguồn điện trong phần a.

c. Sự thay đổi năng lượng trường trong phần a.

Từ đó hãy kiểm chứng năng lượng cung cấp từ các nguồn là bằng độ tăng năng lượng trường và công cơ học.

Giải

Do đây là sự kích thích bằng dòng điện, cần sử dụng biểu thức về đồng năng lượng

$$W_f'(i_1, i_2, x) = \frac{1}{2}L_{11}i_1^2 + L_{12}i_1i_2 + \frac{1}{2}L_{22}i_2^2$$

$$= \left(2 + \frac{1}{2x}\right) \times 200 + \frac{1}{2x} \times (-200) + \left(1 + \frac{1}{2x}\right) \times 50 = 450 + \frac{25}{x}$$

a.

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial x} = -\frac{25}{x^2}$$

$$\Delta W_m = \int_{0.5}^{1} F_f dx = \int_{0.5}^{1} -\frac{25}{x^2} dx = -25J$$

b.

$$\Delta W_{e1} = \int_{\lambda_1(x=0.5)}^{\lambda_1(x=1)} i_1 d\lambda_1 = i_1[\lambda_1(x = 1) - \lambda_1(x = 0.5)]$$

$$\lambda_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2$$

$$= \left(2 + \frac{1}{2x}\right) \times 20 + \frac{1}{2x} \times (-10) = 40 + \frac{5}{x}$$

$$\lambda_1(x = 0.5) = 50; \ \lambda_1(x = 1) = 45$$

$$\Delta W_{e1} = 20(45 - 50) = -100J$$

Tương tự $\Delta W_{e2} = i_2[\lambda_2(x = 1) - \lambda_2(x = 0.5)]$

$$\lambda_2 = L_{12}i_1 + L_{22}i_2$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2x} \times 20 + \left(1 + \frac{1}{2x}\right) \times (-10) = -10 + \frac{5}{x}$$

$$\lambda_2(x = 0.5) = 0, \quad \lambda_2(x = 1) = -5$$

$$\Delta W_{e2} = -10(-5) = 50J$$

Năng lượng điện cung cấp toàn phần

$$\Delta W_e = \Delta W_{e1} + \Delta W_{e2}$$

$$= -100 + 50 = -50J$$

c. Để tính toán sự thay đổi năng lượng trường, cần tính β

$$\beta_{11} = \frac{L_{22}}{D};\ D = L_{11}L_{22} - L_{12}^2$$

$$= \frac{2x+1}{4x+3}$$

Tương tự $\beta_{22} = \dfrac{4x+1}{4x+3}$

$$\beta_{12} = -\frac{1}{4x+3}$$

Khi x = 0.5; $\beta_{11} = 2/5$, $\beta_{22} = 3/5$, $\beta_{12} = -1/5$

Khi x =1; $\beta_{11} = 3/7$, $\beta_{22} = 5/7$, $\beta_{12} = -1/7$

Các giá trị của λ được tính với x = 0.5 và 1 m

Theo Pt (4.65), năng lượng trường được tính theo

$$W_f = \frac{1}{2}\beta_{11}\lambda_1^2 + \beta_{12}\lambda_1\lambda_2 + \beta_{22}\lambda_2^2$$

Năng lượng trường tại x = 0.5 và 1 m được tính

$$W_f(x = 0.5) = \frac{1}{2} \times \frac{2}{5} \times (50)^2 = 500J$$

$$W_f(x = 1) = \frac{1}{2} \times \frac{3}{7} \times (45)^2 - \frac{1}{7} \times 45 \times (-5) + \frac{1}{2} \times \frac{5}{7} \times (-5)^2 = 475J$$

Từ đó $\Delta W_f = W_f(x = 1) - W_f(x = 0.5) = 475 - 500 = -25J$

$$\Delta W_f + \Delta W_m = -25 - 25 = -50 = \Delta W_e$$

Ghi chú: trong trường hợp tuyến tính với sự kích bằng dòng điện không đổi

$$\Delta W_f = \Delta W_f'$$

$\Delta W_f'$ có thể được tính dễ dàng từ phần (a) mà không cần tính β', do đó:

$$\Delta W_f' = 450 + \frac{25}{x}$$

$$\Delta W_f' = W_f'(x = 1) - W_f'(x = 0.5) = 475 - 500 = -25J = \Delta W_f'$$

Ví dụ 4-11. Hai cuộn dây nối ghép có độ tự cảm và hỗ cảm như trong Ví dụ 4-10. Hãy tìm biểu thức về lực trung bình thời gian của trường gốc tại x = 0.5 m, nếu:

a. Cả hai cuộn dây được mắc song song với nguồn điện áp 100 cos 314tV.

b. Cả hai cuộn dây được mắc nối tiếp với nguồn điện áp 100 cos 314t V.

c. Cuộn thứ hai bị ngắn mạch và cuộn thứ nhất được mắc với nguồn điện áp 100 cos 314t V

d. Cả hai cuộn dây được mắc nối tiếp và có dòng điện là 0.5 cos 314t A.

Giải

Các trường hợp (a), (b), (c) là kích thích bằng điện áp, có thể sử dụng phương pháp đồng năng lượng

$$\Delta W_f(i_1, i_2, x) = \frac{1}{2}L_{11}i_1^2 + L_{12}i_1i_2 + \frac{1}{2}L_{22}i_2^2$$

$$= \frac{1}{2}\left(2 + \frac{1}{2x}\right)i_1^2 + \left(1 + \frac{1}{2x}\right)i_1i_2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2x}\right)i_2^2$$

$$F_f = \frac{\partial W_f(i_1, i_2, x)}{\partial x}$$

$$= -\frac{1}{4x^2}i_1^2 - \frac{1}{2x^2}i_1i_2 - \frac{1}{4x^2}i_2^2$$

Đối với x = 0.5 m

$$F_f = -i_1^2 - 2i_1i_2 - i_2^2$$

Lực tác dụng theo chiều giảm x

a. Cả hai cuộn dây mắc song song với nguồn điện áp

$$L_{11} = 2 + \left.\frac{1}{2x}\right|_{x=0.5} = 3$$

$$L_{22} = 1 + \left.\frac{1}{2x}\right|_{x=0.5} = 2$$

$$L_{12} = L_{21} = \left.\frac{1}{2x}\right|_{x=0.5} = 1$$

Từ Pt (4.64a) và (4.64b)

$$v = e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = 3\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} = 100\cos 314t$$

$$v = e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt} = 100\cos 314t$$

Nghiệm sẽ là $\frac{di_1}{dt} = 20 \cos 314t$

$$\frac{di_2}{dt} = 40 \cos 314t$$

Lấy tích phân $i_1 = \frac{20}{314} \sin 314t$

$$i_2 = \frac{40}{314} \sin 314t$$

Thay i_1 và i_2 vào biểu thức tính F_f

$$F_f = -\frac{1}{(314)^2}\left[(20)^2 + 2 \times 20 \times 40 + (40)^2\right]\sin^2 314t$$

$$= -\left(\frac{60}{314}\right)^2 \sin^2 314t$$

$$\frac{1}{T}\int_0^T \sin^2\omega t dt = \frac{1}{2}$$

$$F_f(av) = -\frac{1}{2}\left(\frac{60}{314}\right)^2 = 0.0183 \text{ N}$$

b. Cả hai cuộn dây mắc song song với nguồn điện áp

$$v = \frac{d\lambda_1}{dt} + \frac{d\lambda_2}{dt}$$

$$= \left(3\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}\right) + \left(\frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt}\right)$$

Do $i_1 = i_2 = i$ (mắc nối tiếp)

$$v = 7\frac{di}{dt} = 100 \cos 314t$$

Lấy tích phân $i = \frac{100}{7 \times 314} \sin 314t$

Thay vào biểu thức tính F_f

$$F_f = -4 \times \left(\frac{100}{7 \times 314}\right)^2 \sin^2 \omega t$$

hoặc $F_f(av) = -2\left(\frac{100}{7 \times 314}\right)^2 = -0.00144 \text{ N}$

c. Cuộn hai bị ngắn mạch, cuộn một mắc với nguồn điện áp

$$100 \cos 314t = 3\frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt}$$

$$0 = \frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt}$$

Nghiệm sẽ là

$$\frac{di_1}{dt} = 40 \cos 314t$$

$$\frac{di_2}{dt} = 20 \cos 314t$$

Lấy tích phân

$$i_1 = \frac{40}{314} \sin 314t$$

$$i_2 = -\frac{20}{314} \sin 314t$$

Thay i_1 và i_2 vào biểu thức F_f

$$F_f = -\frac{1}{314^2}\left[(40)^2 - 2 \times 40 \times 20 + (20)^2\right]\sin^2 314t$$

$$F_f(av) = -\frac{1}{2}\left(\frac{20}{314}\right)^2 = -0.0203 \text{ N}$$

d. Cả hai cuộn dây mắc nối tiếp có dòng điện $i = 0.5 \cos 314\ t$

Thay vào biểu thức tính F_f

$$F_f = -(1 + 2 + 1) \times (0.5)^2 \cos^2 314t$$

Ví dụ 4-12. Hệ thống từ trường kích thích kép có độ tự cảm và hỗ cảm cuộn dây

$L_{11} = L_{22} = 2$

$L_{12} = L_{21} = \cos\theta$; *trong đó θ là góc giữa các trục cuộn dây*

a. Các cuộn dây được mắc song song với nguồn điện áp $v = V_m \sin \omega t$. Hãy xác định biểu thức biểu thị moment tức thời theo hàm của vị trí góc θ, từ đó tìm moment trung bình thời gian, khi biết góc $\theta = 30^0$, $v = 100 \sin 314t$.

b. Nếu cuộn 2 bị ngắn mạch, cuộn 1 có dòng điện $i = I_m \sin \omega t$, xác định các biểu thức về moment tức thời và moment trung bình thời gian, tính giá trị của moment trung bình thời gian khi $\theta = 45^0$ và $i_1 = \sqrt{2} \sin 314t$.

c. Trong phần (b) nếu rotor được phép dịch chuyển, tìm giá trị θ để rotor dừng lại.

Giải

$$F_f = \frac{\partial W_f'(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta}$$
$$= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta}\right) i_1^2 + \left(\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta}\right) i_1 i_2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial L_{22}}{\partial \theta}\right) i_2^2$$

Thay các giá trị cảm ứng

$$T_f = -(\sin\theta)\, i_1 i_2$$

Từ các phương trình mạch

$$V_m \cos \omega t = 2\frac{di_1}{dt} + (\cos\theta)\frac{di_2}{dt}$$
$$V_m \cos \omega t = (\cos\theta)\frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt}$$

Nghiệm sẽ là

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \frac{V_m \cos \omega t}{(2 + \cos\theta)}$$

Lấy tích phân

$$i_1 = i_2 = \frac{V_m \sin \omega t}{\omega(2 + \cos\theta)}$$

Thay vào T_f

$$T_f = -\frac{V_m^2 \sin\theta}{(2 + \cos\theta)^2 \omega^2} \sin^2 \omega t$$
$$T_f(av) = -\frac{V_m^2 \sin\theta}{2(2 + \cos\theta)^2 \omega^2}$$
$$\theta = 30^0, \quad v = 100 \sin 314t$$
$$T_f(av) = -\frac{(100)^2 \sin 30^0}{2(2 + \cos 30^0)^2 \times (314)^2} = -0.069 \text{ Nm}$$

b. Từ các phương trình mạch

$$0 = (\cos\theta)\frac{di_1}{dt} + 2\frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{1}{2}(\cos\theta)\frac{di_1}{dt}$$

$$i_2 = -\frac{1}{2}(\cos\theta)i_1$$

$$i_1 = I_m \sin\omega t$$

$$i_2 = -\frac{1}{2}I_m(\cos\theta)\sin\omega t$$

Thay vào T_f

$$T_f = -(\sin\theta)\times\frac{1}{2}I_m^2(\cos\theta)\sin^2\omega t = -\frac{1}{2}I_m^2(\sin\theta)(\cos\theta)\sin^2\omega t$$

$$T_f(av) = -\frac{1}{8}I_m^2(\sin 2\theta)$$

$$\theta = 45^0,\ I_m = \sqrt{2}$$

Kết quả $T_f(av) = \frac{1}{8}\times 2\sin 90^0 = 0.25$ Nm

c. Moment trung bình là zero và đổi dấu khi q = 0^0, 90^0, 180^0. Rotor có thể dừng lại ở các giá trị góc nêu trên, nhưng vị trí cân bằng ổn định chỉ tại q = 90^0, 270^0, ...

Lực/moment trong các hệ thống có nam châm vĩnh cửu

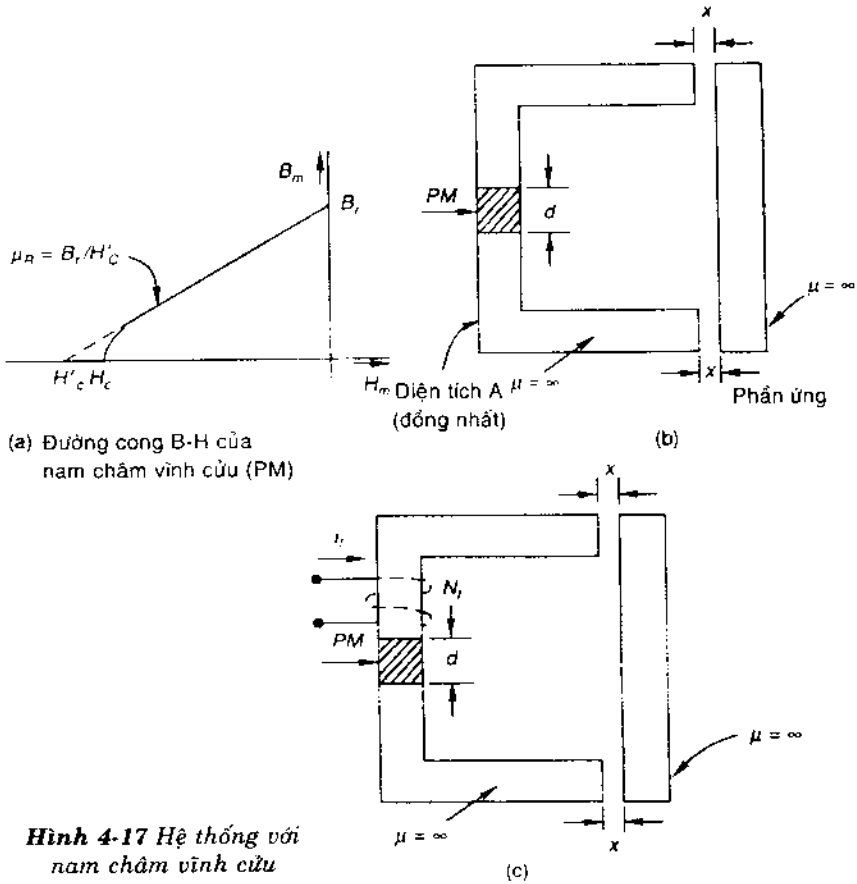
Phương pháp tìm các lực trong hệ thống với nam châm vĩnh cửu có thể được minh họa tốt nhất bằng ví dụ. Hình 4-17b biểu thị rơle phần ứng chuyển động được kích thích bằng nam châm vĩnh cửu (PM)

Đường cong từ hóa dc của nam châm vĩnh cửu được nêu trên Hình 4-17a, phần ngoại suy tuyến tính ở đầu B thấp có thể được biểu thị theo

$$B_m = \mu_R(H_m - H'_C) = \mu_R H_m + B_r \qquad (4.69)$$

Phần sắt mềm của mạch từ chứa phần ứng được giả thiết là có $\mu = \infty$. Để tìm lực tác dụng lên phần ứng, có thể sử dụng Pt (4.25), cần phải có biểu thức của đồng năng lượng hệ thống $W'_f(i,x)$, độc lập với i khi không có dòng kích trong hệ thống. Đồng năng lượng này sẽ là hàm của biến không gian, nghĩa là

$$W'_f(i,x) \Rightarrow W'_f(x)$$



Hình 4-17 *Hệ thống với nam châm vĩnh cửu*

Đồng năng lượng được cho theo Pt (4.11)

$$W'_f = \int_0^i \lambda di$$

Biểu thức này cần được diễn dịch cẩn thận cho các hệ thống kích thích bằng nam châm vĩnh cửu. Các giới hạn tích phân trong biểu thức này được lấy từ trạng thái từ thông zero đến trạng thái từ thông xác định (không có dòng điện kích). Trạng thái từ thông zero được hình dung bằng cuộn kích ảo (N_f vòng) dẫn dòng điện i_f (Hình 4-17c). Dòng điện này được giả thiết là có thể điều

chỉnh đến giá trị I_f làm cho từ thông của lõi giảm đến zero và trạng thái gốc đạt được bằng cách coi dòng điện i_f giảm đến zero. Khi đó

$$W_f = \int_{i_f}^{0} \lambda_f \, di_f \tag{4.70}$$

Tại giá trị i_f bất kỳ có thể viết

$$N_f \, i_f = H_m d + 2H_g x \tag{4.71}$$

Tính liên tục của từ thông cho phép viết

$$B_m A = B_g A$$

$$B_m = \mu_R H_m = B_g = \mu_0 H_g \tag{4.72}$$

Thay H_g vào Pt (4.71)

$$N_f \, i_f = H_m d + 2\,(x/\,\mu_0) B_m$$

Thay H_m từ Pt (4.69), nhận được

$$B_m = \frac{\mu_R (N_f i_f - H_c' d)}{d + 2\,(\mu_R/\mu_0) x} \tag{4.73}$$

Các nối ghép từ thông của cuộn dây ảo

$$\lambda_f = A B_m N_f = \frac{\mu_R N_f A\,(N_f i_f - H_c' d)}{d + 2\,(\mu_R/\mu_0) x} \tag{4.74}$$

Từ thông và nối ghép từ thông sẽ là zero tại

$$i_f = (H_c' d \,/\, N_f) \tag{4.75}$$

Thay vào Pt (4.70)

$$W_f'(x) = \int_{i_f}^{0} \frac{\mu_R \, N_f A (N_f i_f - H_c' d)}{d + 2(\mu_R/\mu_0) x} \, di_f$$

$$= \frac{\mu_R \, A H_c' d^2}{2\left[d + 2(\mu_R/\mu_0) x\right]} \tag{4.76}$$

Lực tác dụng lên phần ứng được tính bằng

$$F_f = \frac{dW_f'(x)}{dx} = \frac{(\mu_R H_c')^2 d^2 A}{\mu_0 \left[d + 2(\mu_R/\mu_0) x\right]^2}$$

mà $\quad {}_R H_c' = B_r$

Do đó $$F_f = \frac{AB_r^2}{\mu_0\left[1 + 2(\mu_R/\mu_0)(x/d)^2\right]} \quad (4.77)$$

Chúng ta hãy tính độ lớn của lực này theo các giá trị số như sau

$$B_r = 0.96\ T,\ H'_c = 720\ kA/M,\ d = 2\ cm,\ A = 6\ cm^2$$

(i) x = 0 cm và (ii) x = 0.5 cm

Khi đó

$$\mu_R = B_R/H'_c = \frac{0.96}{270 \times 10^3} \times \frac{10^7}{4\pi} = 1.06\,\mu_0$$

Thay các giá trị vào phương trình lực (Pt (4.77))

(i) x = 0

$$F_f = -\frac{6 \times 10^{-4} \times (0.96)^2}{4\pi \times 10^{-7}} = -440\ N$$

(ii) x = 0.5 cm

$$F_f = -\frac{6 \times 10^{-4} \times (0.96)^2}{4\pi \times 10^{-7}\left[1 + 2 \times 1.06 \times (0.5/2)\right]^2} = -188\ N$$

Ghi chú: Dấu âm cho thấy lực này tác dụng theo chiều giảm x (khe hở không khí)

Phương pháp này cũng có thể được dùng cho hệ thống có cả nam châm vĩnh cửu và các cuộn kích. Ngoài phương pháp nêu trên, có thể dùng phương pháp phần tử hữu hạn để tính đồng năng lượng từ dạng vector của Pt (4.18a) được lấy tích phân trên toàn bộ thể tích

$$W'_f = \int_V \int_0^{B_0} \bar{B}.d\bar{H}\, dV \quad (4.78)$$

Chuyển đổi năng lượng thông qua điện trường

Chuyển đổi năng lượng cơ - điện thông qua điện trường tương tự từ trường. Điện tích trong điện trường tương tự các nối ghép từ thông và điện áp với dòng điện trong trường hợp từ trường.

Năng lượng điện trường

Hình 4-18 minh họa tụ bản cực song song với một bản cố định và một bản di động. Tụ này được cấp điện từ nguồn dòng. Dòng điện rò của tụ được biểu thị phía ngoài bằng điện dung, do đó điện trường của tụ được bảo toàn. Giả sử bản cực di động của tụ được giữ cố định ở vị trí x. Điện năng cung cấp cho tụ lý tưởng được lưu ở dạng điện trường.

$$dW_e = vdq = dW_f \tag{4.79}$$

Năng lượng trường toàn phần là

$$W_f = \int_0^q vdq \tag{4.80}$$

Trong tụ, v và q có quan hệ tuyến tính

$$C = q/v = \text{điện dung của tụ}$$

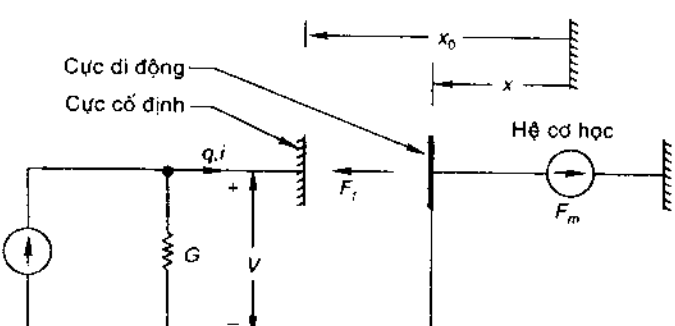
$$W_f = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} \tag{4.81}$$

Điện dung C là hàm cấu hình (vị trí x của cực di động), có thể biểu thị ở dạng:

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{(x_0 - x)}$$

trong đó A là diện tích bản cực, ε_0 độ thẩm điện của không gian. Do đó, W_f, năng lượng trường là hàm của hai biến độc lập, q và x.

$$W_f(q, x) = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C(x)} \tag{4.82}$$



Hình 4-18
Thiết bị cơ điện với điện trường

Phương trình (4.82) về năng lượng trường cho thấy năng lượng điện trường có thể thay đổi điện tính bằng cách thay đổi q hoặc thay đổi cơ học bằng cách thay đổi x, nghĩa là dịch chuyển bản cực di động. Năng lượng trường có thể được viết dưới dạng:

$$W_f(v, x) = \frac{1}{2}vq = \frac{1}{2}C(x)v^2 \qquad (4.83).$$

Mật độ năng lượng trong từ trường

$$w_f = \int_0^D EdD = \frac{1}{2}\frac{D^2}{\varepsilon_0} \qquad (4.84)$$

trong đó E là cường độ điện trường, bằng D/ε_0

D là mật độ điện thông

Chuyển đổi năng lượng

Giả sử bản cực di động của tụ được phép dịch chuyển do tác dụng của lực điện trường F_f, theo nguyên lý bảo toàn năng lượng, cơ năng (công được thực hiện do lực điện trường) bằng hiệu của năng lượng điện cung cấp và sự tăng năng lượng trường

$$F_f\,dx = vdq - dW_f \qquad (4.85)$$

Có thể chọn (v, x) là các biến độc lập, khi đó

$$q = q(v, x)$$
$$dq = \frac{\partial q}{\partial v}dv + \frac{\partial q}{\partial x}dx \qquad (4.86)$$

và

$$W_f = W_f(v, x)$$
$$dW_f = \frac{\partial W_f}{\partial v}dv + \frac{\partial W_f}{\partial x}dx \qquad (4.87)$$

Thay các Pt (4.86) và (4.87) vào Pt (4.85)

$$F_f dx = \left(v\frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial W_f}{\partial x}\right)dx + \left(v\frac{\partial q}{\partial v} - \frac{\partial W_f}{\partial v}\right)dv \qquad (4.88)$$

Do v và x là các biến độc lập, hệ số dv trong Pt (4.88) phải bằng zero. Do đó.

$$= v\frac{\partial q}{\partial x}(v,x) - \frac{\partial W_f}{\partial x}(v,x) = \frac{\partial}{\partial x}(v_q(v,x) - W_f(v,x)) \tag{4.89}$$

Đồng năng lượng được định nghĩa là

$$W_f'(v,x) = vq(v,x) - W_f(v,x) \tag{4.90}$$

lực điện trường F_f có thể được viết dưới dạng

$$F_f = \frac{\partial W_f'(v,x)}{\partial x} \tag{4.91}$$

Nếu dùng (q,x) làm các biến độc lập

$$W_f' = W_f'(q,x)$$

$$dW_f' = \frac{\partial W_f'}{\partial q}dq + \frac{\partial W_f'}{\partial x}dx \tag{4.92}$$

Thay vào Pt (4.85)

$$F_f dx = \left(v - \frac{\partial W_f'}{\partial q}\right)dq - \frac{\partial W_f'}{\partial x}dx \tag{4.93}$$

Do v và q là các biến độc lập, hệ số dq trong Pt (4.93) phải bằng zero. Do đó, Pt (4.93) trở thành

$$F_f = -\frac{\partial W_f'(q,x)}{\partial x} \tag{4.94}$$

Từ Pt (4.90) và (4.80), đồng năng lượng có thể được viết dưới dạng

$$W_f'(v,x) = \int_0^v q\,dv \tag{4.95}$$

Đối với hệ thống tuyến tính, q = Cv

$$W_f'(v,x) = \frac{1}{2}C(x)v^2 \tag{4.96}$$

Mật độ đồng năng lượng được tính theo

$$W_f' = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \tag{4.97}$$

Ví dụ 4-13. Hãy tìm biểu thức xác định lực theo đơn vị diện tích giữa các bản cực song song của tụ với đại lượng cường độ điện trường, sử dụng cả hai phương pháp năng lượng và đồng năng lượng. Tìm giá trị của lực này theo đơn vị diện tích khi $E = 3 \times 10^6$ V/m

Giải

Từ Hình 4-18, năng lượng trong điện trường là

$$W_f(q, x) = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}\frac{q^2(x_0 - x)}{A\varepsilon_0}$$

Từ Pt (4.94)

$$F_f = -\frac{\partial W_f(q, x)}{\partial x} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{A\varepsilon_0}$$

mà $\quad q = DA = \varepsilon_0 EA$

$$F_f = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 A \quad \text{hoặc} \quad F_f/A = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$$

$$= \frac{1}{2} \times (3 \times 10^6)^2 \times 8.85 \times 10^{-12} = 39.8 \text{N/m}^2$$

Từ Pt (4.96), đồng năng lượng trường là

$$W_f(v, x) = \frac{1}{2}Cv^2 = \frac{1}{2}v^2\frac{A\varepsilon_0}{(x_0 - x)}$$

Từ Pt (4.94)

$$F_f = \frac{\partial W_f(v, x)}{\partial x} = \frac{1}{2}v^2\frac{A\varepsilon_0}{(x_0 - x)^2}$$

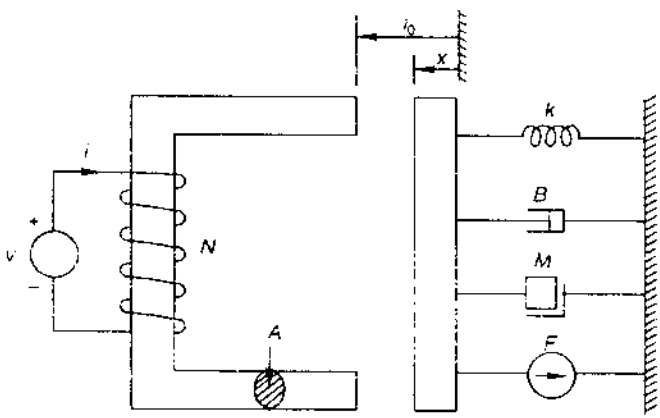
$$v = E(x_0 - x)$$

$$F_f = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 A \quad \text{hoặc} \quad F_f/A = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \quad \text{(như trên)}$$

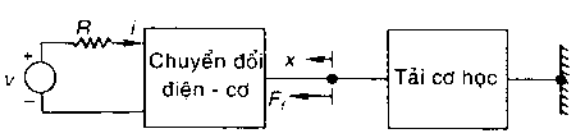
Có thể thấy, tuy mật độ lực ở bề mặt biên trong từ trường là gần bão hòa được tính là 1.02×10^6 N/m^2, nhưng chỉ có giá trị là 39.8 N/m^2 trong điện trường với cường độ điện đạt giá trị tới hạn. Đây là lý do chính để mọi thiết bị chuyển đổi năng lượng thực tiễn đều sử dụng từ trường thay vì điện trường. Các thiết bị điện trường đôi khi được dùng làm các bộ biến năng.

Phương trình động học của các hệ thống cơ - điện

Hình 4-19 minh họa rơle điện từ có phần ứng chịu tải với lò xo K, bộ giảm chấn B, khối lượng M, bộ tạo lực F. Hình 4-20 minh họa sơ đồ hệ thống cơ - điện tổng quát. Có thể dễ dàng nhận thấy thiết bị cơ - điện có một cổng điện và một cổng cơ (một đầu cổng cơ được nối mát) qua đó được nối với nguồn điện ở một phía và tải cơ học ở phía bên kia. Nói chung, có thể có nhiều cổng điện (hệ thống đa kích thích).



Hình 4-19 *Sơ đồ rơle điện từ với lò xo tải.*



Hình 4-20 *Sơ đồ hệ thống cơ - điện tổng quát*

Giả sử thiết bị cơ-điện có độ cảm ứng

$$L = L(x).$$

Phương trình điện là

$$v = iR + \frac{d\lambda}{dt} = iR + \frac{d}{dt}\left[L(x)i\right] = iR + \underbrace{L(x)\frac{di}{dt}}_{\text{điện áp tự cảm}} + \underbrace{i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}}_{\text{điện áp vận tốc}} \qquad (4.98)$$

$$W_f'(i, x) = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

$$F_f = \frac{\partial W_f'}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \tag{4.99}$$

Công suất cơ học được tính theo

$$P_m = F_f \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \times \frac{dL(x)}{dx} \times \frac{dx}{dt}$$

$$= \frac{1}{2} i \left(i \frac{dL(x)}{dx} \times \frac{dx}{dt} \right) \tag{4.100a}$$

$$= \frac{1}{2} \text{cường độ dòng điện} \times \text{điện áp tốc độ} \tag{4.100b}$$

Công suất cơ học được tạo ra (công suất điện được chuyển sang dạng cơ học) khi dòng điện trong thiết bị theo chiều ngược với tốc độ điện áp. Khi dòng điện trong thiết bị cùng chiều với tốc độ điện áp, ngõ ra sẽ là công suất điện, cơ năng được chuyển thành điện năng. Phương trình vi phân của hệ thống cơ học là:

$$F_f = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx + f \tag{4.101a}$$

$$\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx + f \tag{4.101b}$$

Đối với hệ thống trên Hình 4-18, khi phần ứng ở vị trí x, độ tự cảm L được xác định theo:

$$\mathcal{P} = \frac{\mu_0 A}{2(I_0 - x)}$$

$$L(x) = N^2 \mathcal{P} = \frac{\mu_0 A N^2}{2(I_0 - x)}$$

$$\frac{dL(x)}{dx} = \frac{\mu_0 A N^2}{2(l_0 - x)}$$

Thay vào Pt (4.98) và (4.99), hai phương trình vi phân này sẽ xác định các tính chất động học của hệ thống:

$$v = iR + \frac{\mu_0 A N^2}{2(l_0 - x)} \times \frac{di}{dt} + \frac{\mu_0 A N^2 i}{2(l_0 - x)^2} \times \frac{dx}{dt} \tag{4.102}$$

$$\frac{\mu_0 AN^2 i^2}{4(l_0 - x)^2} = M\frac{d^2x}{dt^2} + B\frac{dx}{dt} + Kx + f \qquad (4.103)$$

Đây là các phương trình vi phân phi tuyến, có thể giải được bằng số trên các máy tính. Tuy nhiên, đối với chuyển động nhỏ xung quanh điểm cân bằng, có thể sử dụng quy trình dưới đây.

Giả sử điểm cân bằng là (V_0, I_0, X_0, f_0). Tại vị trí cân bằng, hệ thống là ổn định, tất cả các đạo hàm đều bằng zero. Do đó từ Pt (4.102) và (4.103), quan hệ giữa các giá trị cân bằng sẽ là

$$V_0 = I_0 R \qquad (4.104)$$

$$\frac{\mu_0 AN^2 I_0^2}{4(l_0 - x_0)^2} = KX_0 + f_0 \qquad (4.105)$$

Bắt đầu từ các giá trị cân bằng (v_1, i_1, x_1, f_1)

Khi đó

$$v_0 + v_1 = (I_0 + i_1)R + \frac{\mu_0 AN^2}{2(l_0 - X_0 - x_1)} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{\mu_0 AN^2 (I_0 + i_1)}{2(l_0 - X_0 - x_1)^2}\frac{dx_1}{dt}$$

$$\frac{\mu_0 AN^2 (I_0 + i_1)^2}{4(l_0 - X_0 - r_1)^2} = M\frac{d^2x_1}{dt^2} + B\frac{dx_1}{dt} + K(X_0 + x_1) + f_0 + f_1$$

Bỏ qua các tích số của các giá trị nhỏ, các giá trị nhỏ so với các giá trị cân bằng, và xóa chúng trong các Pt (4.104) và (4.105)

$$v_1 = i_i R + \frac{\mu_0 AN^2}{2(l_0 - X_0)}\frac{di_1}{dt} + \frac{\mu_0 AN^2 I_0}{2(l_0 - X_0)}\frac{dx_i}{dt} \qquad (4.106)$$

$$\frac{2\mu_0 AN^2 I_0 i_1}{4(l_0 - X_0)^2} = M\frac{dx_1}{dt^2} + B\frac{dx_1}{dt} + Kx_1 + f_1 \qquad (4.107)$$

Các phương trình (4.106) và (4.107) là phương trình vi phân tuyến tính đối với hệ thống có các giá trị gia số nhỏ xung quanh các giá trị cân bằng (được gọi là *điểm vận hành*), các phương trình này có thể giải dễ dàng bằng phương pháp giải tích cho các điều kiện trạng thái tĩnh và động.

Chương 5

Các khái niệm cơ bản về máy điện quay

Giới thiệu

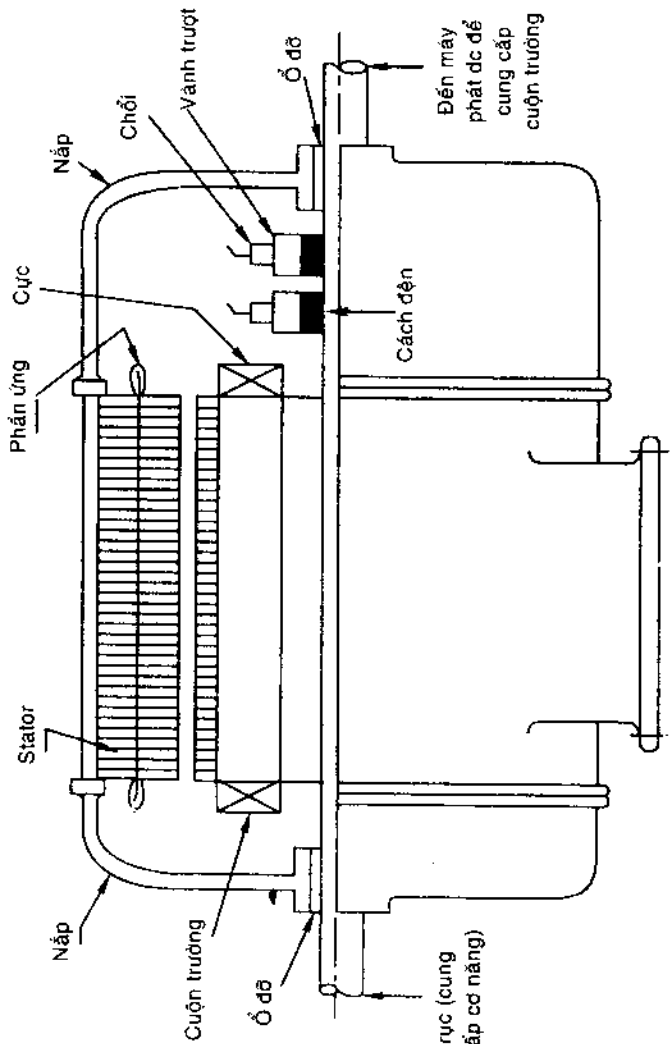
Về nguyên tắc, sự chuyển đổi năng lượng cơ-điện xảy ra mỗi khi có sự thay đổi từ thông liên quan đến chuyển động cơ học. Điện áp tốc độ được tạo ra trong cuộn dây khi có chuyển động tương đối giữa cuộn dây và từ trường. Lực điện động xoay chiều được tạo ra nếu có sự thay đổi từ thông của cuộn dây theo chu kỳ. *Các cuộn dây trường*, là nguồn từ thông chính trong máy, do đó, được sắp xếp để tạo ra sự phân phối các cực Bắc-Nam theo không gian. Cấu trúc hình trụ là lựa chọn ưu tiên cho các loại máy đó. Các cuộn dây là các điểm tựa của lực điện động cảm ứng được dùng nhiều trong các máy thực tiễn và được mắc nối tiếp/song song một cách thích hợp và theo nối kết sao/tam giác 3-pha để có điện áp mong muốn và để cung cấp dòng điện định mức; sự sắp xếp này được gọi là *quấn dây phần ứng*. Khi các cuộn dây phần ứng có dòng điện, chúng tạo ra từ trường riêng, tương tác với từ trường của cuộn dây trường để tạo ra moment điện từ có xu hướng xếp thẳng hàng cả hai từ trường đó.

Cuộn dây trường và cuộn dây phần ứng được bố trí thích hợp trên mạch từ chung gồm hai phần - *stator* và *rotor*. Stator là phần tròn của ống trụ trong đó có rotor quay, luôn luôn có khoảng hở thích hợp (khe hở không khí) giữa hai bộ phận này. Trục rotor được lắp trên hai ổ đỡ bố trí ở hai nắp phía ngoài và được lắp bulong vào hai phía của stator (Hình 5-1). Stator và rotor được chế tạo bằng vật liệu có độ thẩm từ cao - thép silic.

Do sực chuyển đổi năng lượng cơ - điện đòi hỏi sự chuyển động tương đối giữa cuộn dây trường và ứng, chúng phải được đặt trên rotor hoặc stator. Trong thực tế, các cuộn trường thường được bố trí trên rotor của các máy đồng bộ, tiết diện của loại máy này được nêu trên Hình 5-1. Cuộn dây ứng được bố trí trong các rãnh có hình dạng thích hợp trên stator. Cuộn dây trường được cung cấp điện dc từ nguồn bên ngoài, được gọi là bộ kích, thông qua cặp vành trượt (Hình 5-1). Bộ kích thường được nối ghép trực tiếp với trục rotor trên máy đồng bộ

Trong *máy cảm ứng*, stator có cuộn dây 3-pha, lấy dòng điện từ thành phần chính để thiết lập từ thông tuần hoàn trong khe hở không khí, quay với tốc độ tương ứng tần số nguồn cung cấp (*tốc độ đồng bộ*) và rotor được quấn hợp lý được nối ngắn mạch hoặc là tập hợp các thanh Cu (hoặc Al) đặt trong các rãnh rotor ngắn mạch ở mỗi đầu bằng các vòng đầu.

Trong các *máy dc*, sự sắp xếp thuận tiện và hợp lý là, để tạo ra điện áp xoay chiều và chuyển sang dạng dc bằng bộ chỉnh lưu cơ học kiểu quay. Do đó, cuộn phần ứng trong máy dc phải ở trên rotor và cuộn trường ở stator.



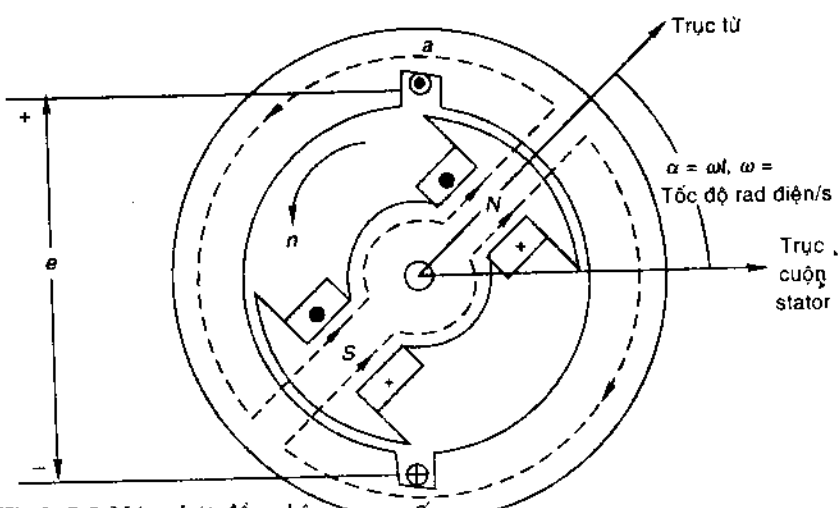
***Hình 5-1** Kiểu máy đồng bộ ac*

Các máy cơ bản

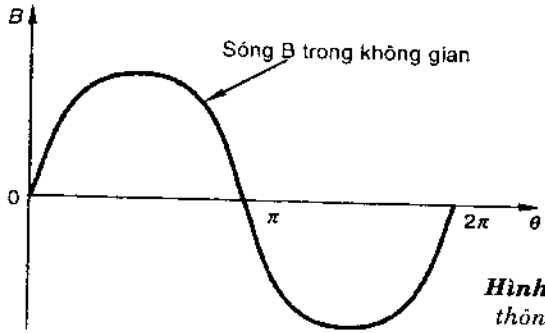
Máy đồng bộ

Hình 5-2 minh họa máy phát ac đồng bộ với cuộn dây trường hai cực trên rotor và một cuộn aa' trên stator. Kiểu các cực rotor này được gọi là cực chiếu, được kích bằng điện dc đưa vào cuộn trường tập trung. Dòng điện được đưa vào rotor qua hai vòng trượt và các chổi than (Hình 5-1). Trên Hình 5-2 còn có hai đường dẫn trung bình của từ thông (đường đứt nét). Các vùng từ tính trung hòa ở các khe liên cực. Việc bỏ qua từ trở của đường dẫn sắt sẽ ảnh hưởng không đáng kể đến độ chính xác khi tính toán.

Giả sử khe hở không khí ở các guốc cực là đồng nhất, mật độ từ thông trong khe này qua các guốc cực là hằng số (lực từ động tác dụng theo đường dẫn từ thông không đổi đối với cuộn trường tập trung); mật độ từ thông trong lớp không khí dọc theo chu vi stator giảm dần đến zero trong vùng liên cực. Kết quả là sóng mật độ từ thông có dạng đỉnh phẳng (Hình 5-3). Do từ thông đi vào stator theo pháp tuyến, chuyển động tương đối giữa các dây dẫn stator và mật độ từ thông khe hở không khí vuông góc với nhau. Điều này làm cho lực điện động cảm ứng dọc theo các dây dẫn stator theo nguyên tắc Blv, với chiều lực điện động được quyết định bằng tích vector v x B hoặc nguyên tắc bàn tay phải Fleming. Từ trường có tính đối xứng dọc theo chiều dài trục.



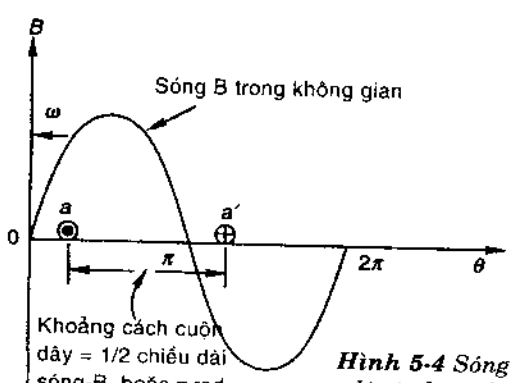
Hình 5-2 *Máy phát đồng bộ - rotor cực chiếu hai cực .*



Hình 5-3 *Sóng mật độ từ thông khe hở không khí*

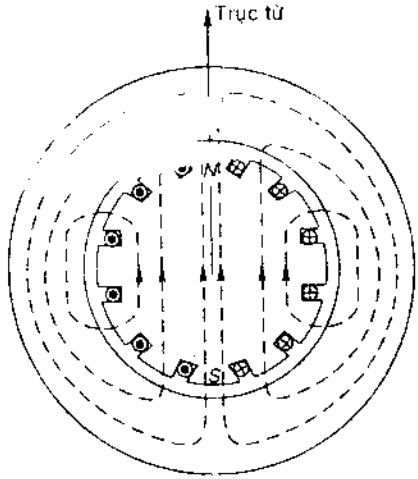
Trong các máy ac, lực điện động cảm ứng phải có dạng sóng sine, do đó sóng mật độ từ thông trong khe hở không khí của máy cũng phải ở dạng sóng sine. Điều này đạt được trong cấu trúc cực chiếu (với các cuộn dây trường tập trung) bằng cách cung cấp khe hở không khí không đồng nhất phía trên các guốc cực; khe hở không khí cực tiểu ở giữa guốc cực tăng dần về phía hai cạnh. Sóng sine hoàn hảo biểu thị mật độ từ thông khe hở không khí lý tưởng được nêu trên Hình 5-4.

Phương pháp thứ hai cho phép đạt được sóng B hình sine trong khe hở không khí là sử dụng cấu trúc cực đồng nhất, nghĩa là rotor hình trụ với khe hở không khí đồng nhất nhưng với cuộn trường được phân bố thích hợp dọc theo chu vi rotor (Hình 5-5). Trong cấu trúc này, khi một cực chuyển động ra xa trục cực, các đường từ thông nối kết sẽ giảm dần số ampere - vòng của trường. Số ampere - vòng có thể được phân phối hợp lý để nhận được sóng B hình sine trong không gian (Hình 5-4).



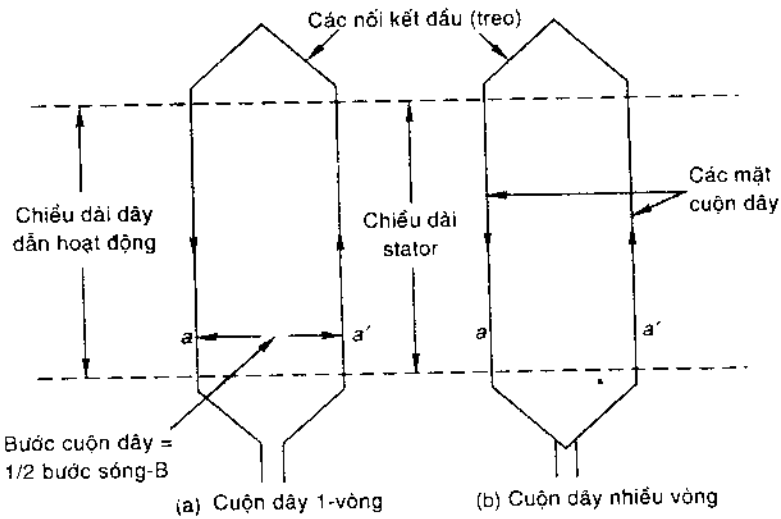
Hình 5-4 *Sóng không gian mật độ từ thông khe hở không khí*

Cuộn dây phần ứng trong máy hai cực cơ bản (Hình 5-2) được đặt vào hai rãnh đối diện theo đường kính ở mặt trong của stator. Cuộn này có thể có nhiều vòng, có thể sử dụng nhiều kiểu hình dạng (Hình 5-6). Mỗi cuộn có hai mặt được gọi là các mặt cuộn dây. Chiều dài hoạt động của các mặt cuộn dây bằng chiều dài của stator, qua đó sóng B tác động để cảm ứng lực điện động.

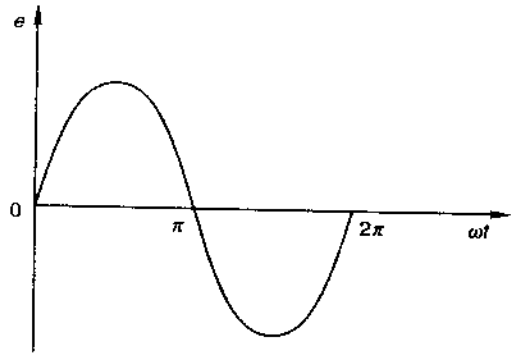


Hình 5-5 *Rotor trụ cực đồng nhất*

Hai mặt cuộn dây của máy cơ bản được nêu theo sơ đồ tiết diện trên Hình 5-4. Do các mặt cuộn dây cách nhau bằng 1/2 bước sóng B (π rad), các điện áp cảm ứng trong hai mặt cuộn dây (Blv, trong đó v là tốc độ chu vi của các mặt cực) là đồng nhất về giá trị nhưng ngược dấu, do đó điện áp cuộn dây toàn phần là gấp đôi điện áp mặt cuộn dây và có cùng dạng sóng như sóng B (Hình 5-7). Một chu kỳ của lực điện động xoay chiều được tạo ra trong một vòng quay rotor.

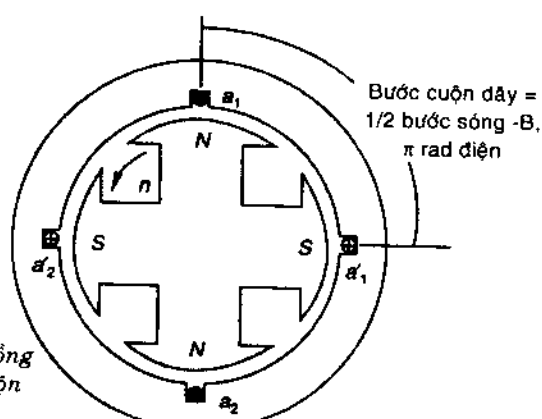


Hình 5-6 *Hình dạng cuộn dây phần ứng*



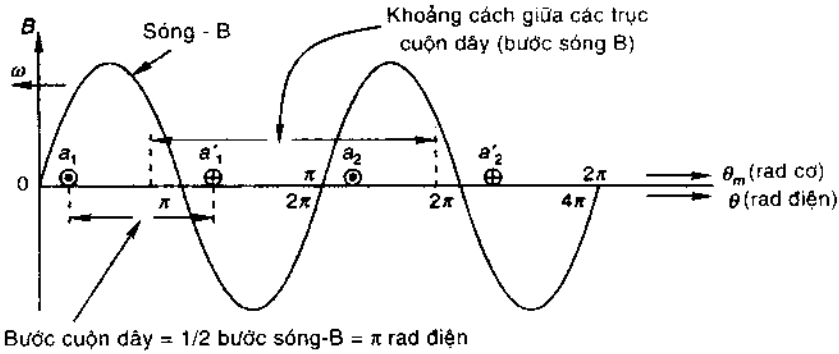
Hình 5-7 *Lực điện động cuộn dây trong máy hai cực cơ bản*

Hãy khảo sát máy với cấu trúc bốn cực (Hình 5-8), các cực lần lượt là Bắc và Nam. Sóng không gian mật độ từ thông của cấu trúc này được nêu trên Hình 5-9. Hai chu kỳ với góc toàn phần 2π rad lúc này được coi là góc cơ. Từ Hình 5-8 và 5-9, hai cuộn dây có thể đặt một cách đối xứng - mỗi cuộn dưới một cặp cực. Mỗi cuộn có bước với 1/2 bước sóng B và các trục của hai cuộn dây cách nhau bằng bước sóng B. Có thể thấy các điều kiện điện và từ trong một cặp cực sẽ lặp lại chính xác trong cặp cực kia. Các lực điện động cảm ứng trong các cuộn dây $a_1a'_1$ và $a_2\,a'_2$ đều là xoay chiều, bằng nhau về độ lớn và đồng pha. Khoảng cách góc toàn phần của một cặp cực là 2 π và được coi là *góc điện* để phân biệt với góc cơ học. Có thể ký hiệu θ là góc điện, và θ_m là góc cơ.



Hình 5-8 *Máy phát đồng bộ bốn cực với các cuộn bước nguyên*

Cả hai góc này đều được nêu trên Hình 5-9. Tỷ số giữa các góc điện và cơ toàn phần của máy P - cực là



Hình 5-9 *Sóng B và các cuộn stator của máy phát đồng bộ bốn cực.*

$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{2\pi \times (P/2)}{2\pi} = \frac{P}{2}$$

$$\theta = \left(\frac{P}{2}\right)\theta_m \qquad (5.1)$$

Bước của cuộn dây, được gọi là bước cuộn, ở đây bằng 1/2 bước sóng B, sẽ là π rad (180^0) góc điện và không đổi khi số cặp cực thay đổi. Cuộn dây này được gọi là có bước nguyên. Phần này giả thiết tất cả các cuộn dây đều là bước nguyên.

Trong máy P-cực, một chu kỳ lực điện động xoay chiều được tạo ra trong mỗi cuộn dây khi một cặp cực của các cực rotor đi qua stator. Do đó, đối với một vòng quay của rotor, sẽ có P/2 chu kỳ lực điện động trong cuộn dây đó, tần số của sóng điện áp (theo thời gian) là

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{nP}{120}\ \text{Hz} \qquad (5.2)$$

trong đó n = *tốc độ rotor v/ph*

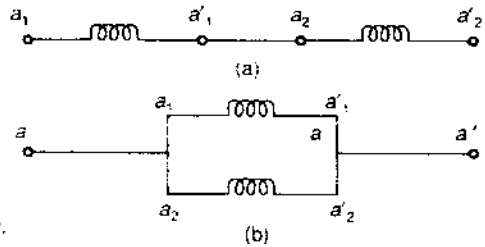
Lấy vi phân hai vế của Pt (5.1) theo thời gian

$$\omega = \left(\frac{P}{2}\right)\omega_m \qquad (5.3)$$

trong đó ω = tốc độ rotor rad/s điện

ω_m = tốc độ rotor rad/s cơ

Do đó $\omega = 2\pi f$ rad (điện)/ s (5.4)

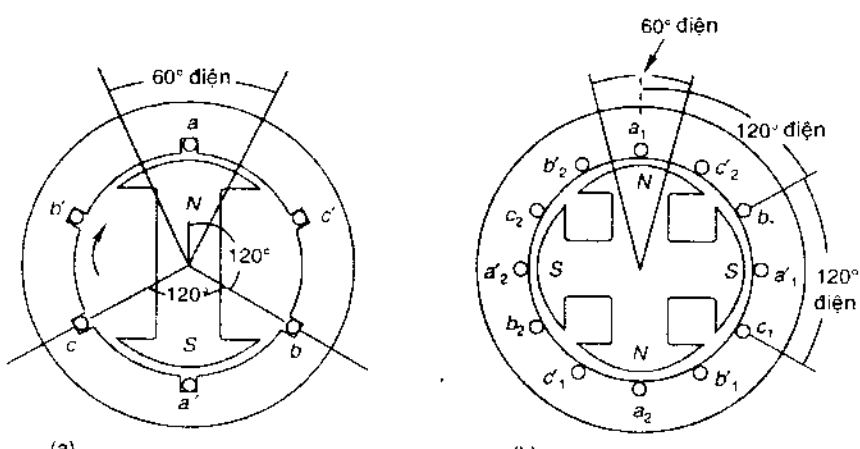


Hình 5-10 *Mắc nối tiếp và mắc song song các cuộn dây.*

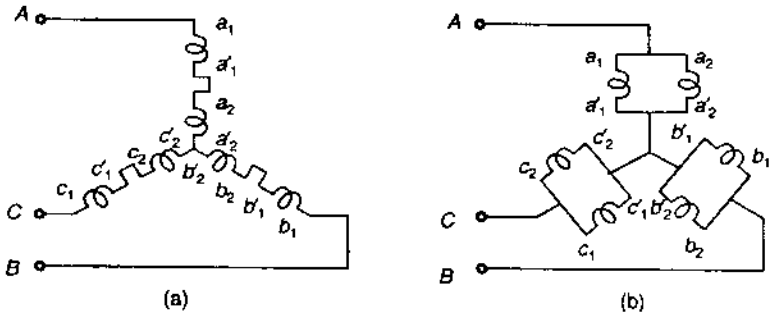
Hai cuộn dây của máy phát bốn cực (Hình 5-8) là mặt tựa của các lực điện động đồng nhất và có thể được mắc nối tiếp hoặc song song (Hình 5-10). Mắc nối tiếp làm tăng gấp đôi điện áp của một cuộn dây và có thể vận hành với cùng dòng điện cực đại cho cả hai cuộn dây. Mắc song song có cùng điện áp trong từng cuộn dây và dòng điện cực đại gấp đôi dòng điện của một cuộn dây. Trong thực tế thường sử dụng các nhóm cuộn dây mắc nối tiếp - song song để có máy với dòng điện và điện áp định mức mong muốn.

Máy phát điện ba pha

Các máy phát điện đồng bộ trong thực tế luôn luôn là loại ba pha do có các ưu điểm của hệ thống ba pha. Nếu hai cuộn dây được bố trí ở hai vị trí không gian khác nhau trong stator (Hình 5-2), các lực điện động của chúng sẽ có sự lệch pha theo thời gian tương ứng sự dịch chuyển điện của chúng. Nếu ba cuộn



Hình 5-11 *Máy phát đồng bộ ba pha, hai cực và bốn cực*



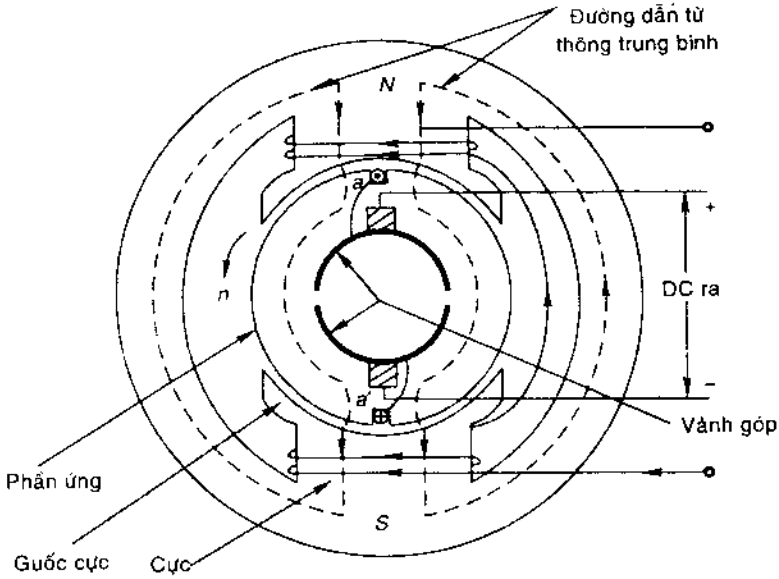
Hình 5-12 *Máy phát ba pha mắc sao*

dây được bố trí trong stator của máy hai cực (Hình 5-2) cách nhau 120^0 điện, máy ba pha cơ bản sẽ có dạng như trên Hình 5-11a. Sự sắp xếp bốn cực tương ứng được nêu trên Hình 5-11b, mỗi pha có hai cuộn dây đối xứng tương ứng từng cặp cực. Các cuộn dây của từng pha được mắc nối tiếp/song song và ba pha của máy phát đồng bộ thường được mắc sao (Hình 5-12)

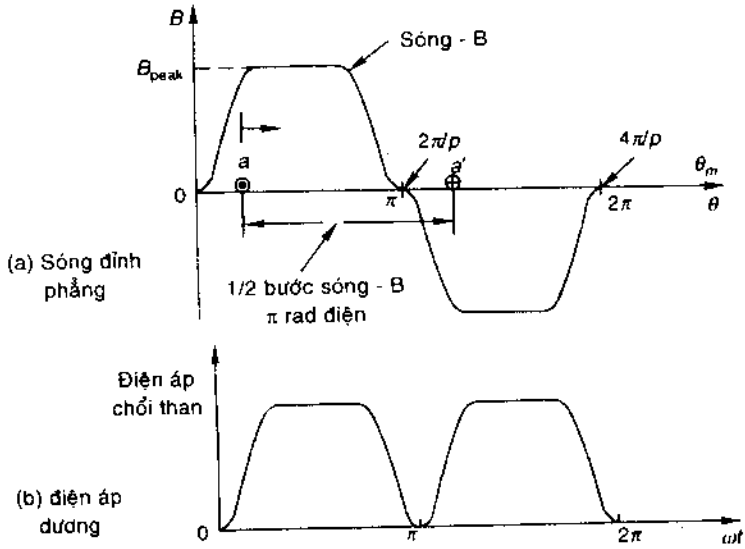
Máy dc

Hình 5-13 minh họa máy dc cơ bản hai cực với phần ứng quay có một cuộn dây. Có thể thấy cuộn trường là cố định với các cực chiếu có các guốc cực chiếm phần lớn bước cực. Lực điện động xoay chiều cảm ứng trong cuộn dây này do sự quay của phần ứng qua các cực (trường) stator. Hai đầu của cuộn ứng được mắc với hai vòng (Cu) dẫn điện có dạng cung gần nửa chu vi. Các vòng này được cách điện với nhau và với trục. Sự sắp xếp này được gọi là *bộ góp*. Dòng điện từ các vòng bộ góp sẽ tập trung bằng các chổi than. Các nối kết của cuộn dây với mạch bên ngoài sẽ đảo chiều từng nửa chu kỳ sao cho cực tính của một chổi than luôn luôn dương và chổi kia luôn luôn âm. Đây là *sự chỉnh lưu* của bộ góp-chổi than. Do yêu cầu chỉnh lưu cơ học, để nhận được điện áp một chiều từ lực điện động cảm ứng xoay chiều, phần ứng trong máy dc luôn luôn là rotor và cuộn trường phải được đặt trên stator.

Khe hở không khí dưới các cực trong máy dc luôn luôn đồng nhất và các guốc cực rộng hơn so với máy đồng bộ (vòng cực khoảng 70% bước cực). Do đó, mật độ từ thông trong không khí bao quanh chu vi phần ứng có dạng sóng đỉnh phẳng (Hình 5-14a). Điện áp cảm ứng trong cuộn dây (bước nguyên) có dạng sóng tương tự nhưng cả hai nửa của chu kỳ đều dương (Hình 5-14b) do tác dụng chỉnh lưu của bộ góp. Dễ dàng nhận thấy dạng sóng này có giá trị trung bình cao hơn đối với giá trị $B_{đỉnh}$ cho trước, điều này giải thích lý do máy dc được thiết kế để có sóng B đỉnh phẳng.



Hình 5-13 *Máy dc cơ bản hai cực*



Hình 5-14 *Mật độ từ thông và dạng sóng điện áp ở chổi than trong máy dc.*

Lực điện động

Các biểu thức định tính sẽ được xác định cho lực điện động phát sinh trong phần ứng máy dc và máy đồng bộ.

Điện áp được tạo ra trong cuộn dây ac

Sóng B của máy đồng bộ (thường đa cực) được giả thiết là có dạng hàm sine (Hình 5-15) và một cuộn dây bước nguyên (mặt cuộn dây cách nhau 180^0 điện) được nêu dưới dạng tiết diện. Sóng B dịch chuyển sang trái với tốc độ ω rad/s điện hoặc ω_m rad/s cơ. Tại điểm gốc thời gian, các mặt cuộn dây ở vùng liên cực, tại đó từ thông cực nguyên sẽ nối kết cuộn dây. Ở thời điểm t bất kỳ, cuộn dây dịch chuyển tương đối một khoảng

$$\alpha = \omega t \quad \text{rad. điện}$$

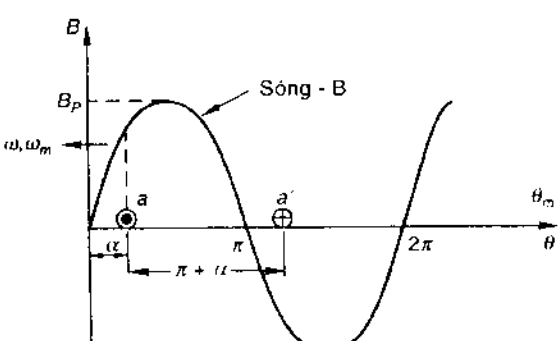
sang bên phải sóng B. Sóng B có thể được biểu diễn theo

$$B = B_p \sin\theta = B_p \sin\left(\frac{P}{2}\theta_m\right)$$

trong đó B_p = *mật độ từ thông đỉnh*

Do từ thông trải rộng qua góc cơ, sự nối ghép từ thông ϕ đến cuộn dây có thể được tính bằng cách lấy tích phân qua toàn bộ góc cơ, do đó:

$$\phi = \int_{2\alpha/P}^{2(\pi+\alpha)/P} B_p \sin\left(\frac{P}{2}\theta_m\right) lr d\theta_m \qquad (5.5)$$



Hình 5-15 *Vị trí tương đối giữa sóng B và cuộn ứng ở thời điểm t bất kỳ.*

trong đó l = chiều dài mặt cuộn dây hoạt động (chiều dài stator hướng trục) và r = bán kính trung bình của stator ở phần khe hở không khí.

Do $$\theta_m = \frac{2}{P}\theta$$

Pt (5.5) chuyển thành

$$\phi = \left(\frac{2}{P}\right)\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} B_p lr \sin\theta d\theta$$

$$= \left(\frac{2}{P}\right) 2B_p\, lr \cos\alpha$$

$$= \left(\frac{2}{P}\right) 2B_p\, lr \cos\omega t = \Phi \cos\omega t \qquad (5.6)$$

Do đó, có thể thấy nối ghép từ thông với cuộn dây sẽ biến thiên theo hàm sine và có giá trị cực đại.

$$\Phi = \frac{4}{P} B_p\, lr \quad \text{(từ thông / cực)} \qquad (5.7)$$

tại $\alpha = \omega t = 0$, là từ thông/ cực. Các khớp nối từ thông của cuộn dây ở thời điểm t bất kỳ.

$$\lambda = N\phi = N\Phi \cos\omega t \qquad (5.8)$$

trong đó N = số vòng dây

Lực điện động cảm ứng trong cuộn dây là

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega N\Phi \sin\omega t \qquad (5.9)$$

Dấu âm trong Pt (5.9) tính đến chiều dương được giả thiết của lực điện động và dòng điện trong cuộn dây aa' (Hình 5-2) tạo ra từ thông dọc theo trục cuộn dây làm xuất hiện các ghép nối từ thông dương. Đối với máy biến áp, chiều dương của lực điện động được giả thiết là gây ra dòng điện để có thể tạo ra các nối ghép từ thông âm, do đó định luật lực điện động cảm ứng sử dụng dấu dương trong Pt (5.9).

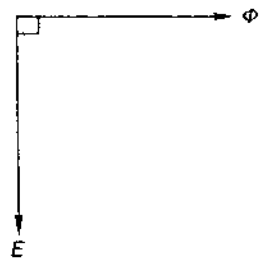
Có thể thấy sóng mật độ từ thông không gian khi quay sẽ tạo ra các nối ghép từ thông biến thiên theo thời gian với cuộn dây này và với sự tạo ra lực điện động, một hiệu ứng được tạo ra bằng từ thông biến thiên theo thời gian với trục cố định trong máy biến áp. Hệ số biến thiên theo thời gian do sự quay sẽ gây nên hiện tượng biến đổi năng lượng cơ - điện, điều này không xảy ra trên máy biến áp với từ thông biến thiên theo thời gian và trục cố định.

Giá trị trung bình của lực điện động cảm ứng trong cuộn dây từ Pt (5.9) là

$$E = \sqrt{2}\pi f N\Phi = 4.44 f N\Phi \qquad (5.10)$$

tương tự như trong máy biến áp, nhưng ở đây Φ là tỉ số từ thông/cực.

Từ Pt (5.6) và (5.9) có thể thấy từ thông biến thiên theo hàm sine là sớm pha 90^0 so với lực điện động biến thiên theo hàm sine. Quan hệ này được minh họa bằng sơ đồ pha trên Hình 5-16. Điều này hoàn toàn ngược với máy biến áp, trong đó pha từ thông trễ 90^0 so với pha lực điện động. Sự khác biệt này là do dấu âm trong Pt (5.9), dấu dương được dùng cho máy biến áp.



Hình 5-16 *Quan hệ pha giữa từ thông và lực điện động*

Cuộn dây phân phối

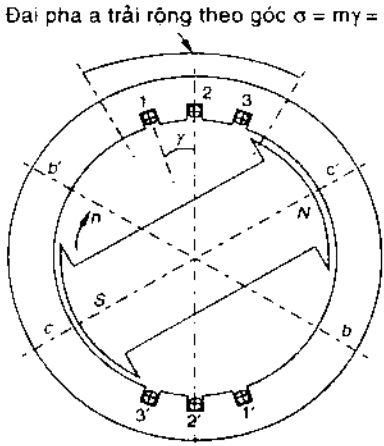
Từ Pt (5.7) có thể thấy từ thông/cực bị giới hạn do các kích thước máy và mật độ từ thông đỉnh, không thể vượt quá giá trị chuyên biệt do đặc tính bão hòa của sắt. Do đó, để cảm ứng lực điện động với giá trị thích hợp trong thiết bị thực tiễn, cần phải dùng nhiều vòng dây, không thể xếp tất cả các vòng dây này vào một cặp rãnh. Hơn nữa, có thể nhận thấy với một cuộn dây/ cặp cực/ pha, tức là một rãnh/cực/pha, chu vi của stator không được tận dụng tối ưu. Do đó, cần phải tạo ra nhiều rãnh/ cực/ pha (SPP) trên chu vi stator. Trong máy thực tế, với S rãnh được phân bố đều trên chu vi stator.

$$SPP = m = \frac{S}{qp} \quad (q = \text{số pha}) \qquad (5.11)$$

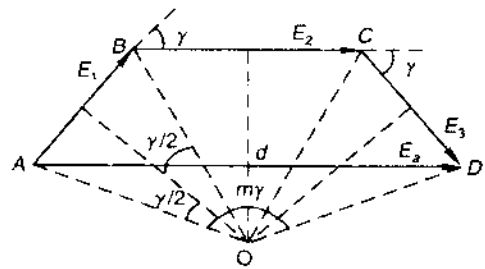
Hình 5-17 minh họa máy 3 - pha, 2-cực, với m = 3. Góc giữa hai rãnh kế nhau là

$$\lambda = \frac{\pi P}{S} \text{ rad điện} \qquad (5.12)$$

Cuộn pha a trong máy này có ba cuộn dây (11', 22', và 33') được đặt trong ba cặp rãnh phân bố trong không gian cách nhau theo góc γ rad điện. Góc toàn phần σ = mγ dành cho cuộn pha dọc theo chu vi phần ứng được gọi là *khoảng trải rộng pha*, cuộn này được gọi là *cuộn phân phối*. Do máy luôn luôn được quấn với các cuộn dây đồng nhất, các lực điện động cảm ứng trong các cuộn 11', 22', và 33' có giá trị trung bình (E) như nhau nhưng có hiệu số pha theo thời gian là γ do các cuộn này phân bố đều trong không gian. Các cuộn được



Hình 5-17 *Máy phát đồng bộ với cuộn phân phối*



Hình 5-18 *Sơ đồ pha của lực điện động cuộn dây*

mắc nối tiếp để có điện áp pha E_a là tổng pha của các lực điện động cuộn dây (Hình 5-18). Từ Hình này có thể thấy, do sự phân phối, các điện áp pha trung bình là nhỏ hơn tổng đại số của các điện áp cuộn dây trung bình. Tỉ số này được gọi là *hệ số phân phối.*

Từ Hình 5-18 có thể xác định hệ số phân phối cho trường hợp chung với SSP = m. Các pha lực điện động cuộn dây tạo thành các cạnh đa giác đều trên sơ đồ pha, tâm đường tròn ngoại tiếp của đa giác này được dựng trên sơ đồ. Điện áp pha E_a được cho bằng vector pha tổng (AD trên Hình 5-18). Hệ số phân phối được xác định là

$$K_b = \frac{3D}{3AB} \quad \text{hoặc} \quad \frac{AD}{mAB} \text{ (tổng quát)} \tag{5.13}$$

Từ dạng hình học trên Hình 5-18

$$AB = 2\ OA \sin \gamma / 2$$

$$AD = 2\ OA \sin \gamma m / 2$$

Do đó

$$K_b = \frac{\sin m\gamma / 2}{m \sin \gamma / 2} < 1 \quad \text{khi } m > 1 \tag{5.14}$$

Lực điện động pha cảm ứng đối với cuộn phân phối có thể nhận được bằng cách nhân Pt (5.10) với K_b, do đó

$$E = 4.44\ K_b f\ N_{ph}\Phi \qquad (5.15)$$

trong đó N_{ph} = *tổng số vòng dây (nối tiếp)/ pha*

Lượng sóng hài trong cuộn phân phối

Sóng mật độ từ thông của máy đồng bộ không bao giờ hoàn toàn là sóng sine. Do sự đối xứng lẻ của các cực (Bắc -Nam luân phiên) sóng hài không gian của sóng B chỉ gồm các sóng lẻ, cảm ứng các lực điện động hài tương ứng trong cuộn này. Hình 5-19 minh họa sóng B cơ sở và sóng hài thứ ba, do bản chất đỉnh phẳng của sóng B, sóng hài thứ ba bị lõm ở đỉnh, tạo ra độ lõm mật độ từ thông ở giữa cực chính. Từ Hình 5-19, n cực của sóng hài thứ n xảy ra trong không gian sẽ chiếm một cực của sóng cơ sở, do đó

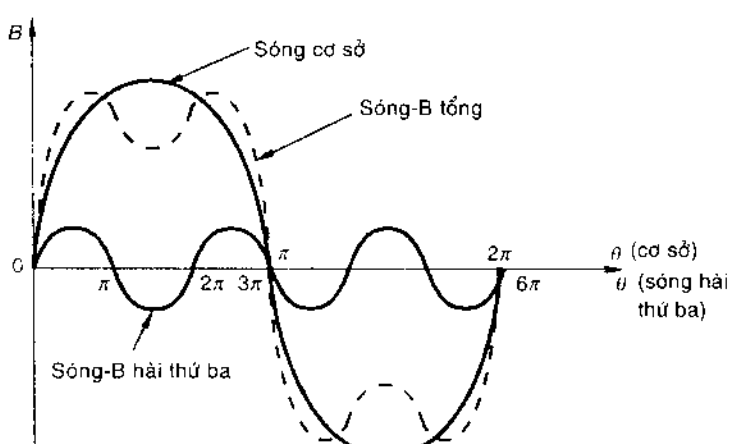
$$\theta \text{ (sóng hài thứ n)} = n\theta \text{ (sóng cơ sở)}$$

Từ Pt (5.14)

$$K_b(\text{sóng hài thứ n}) = \frac{\sin mn\gamma / 2}{m \sin n\gamma /2} \qquad (5.16)$$

Có thể dễ dàng chứng minh K_b (sóng hài thứ n) nhỏ hơn K_h (sóng cơ bản) để làm giảm lượng sóng hài của điện áp trong cuộn phân phối.

Ví dụ 5-1 Hãy tính sóng cơ sở, hệ số phân phối sóng hài thứ ba và thứ năm trên stator có 36 rãnh được quấn với 3-pha, 4-cực



Hình 5-19 *Sóng cơ sở và sóng hài thứ ba của sóng B trong khe hở không khí của máy đồng bộ*

Giải

$$m = \frac{36}{3 \times 4} = 3 \quad \text{và} \quad \gamma = \frac{180^0 \times 4}{36} = 20^0 \text{ điện}$$

(i) K_b (sóng cơ sở)

$$= \frac{\sin \dfrac{3 \times 3 \times 20^0}{2}}{3 \sin \dfrac{20^0}{2}} = 0.96$$

(ii) K_b (sóng hài thứ ba)

$$= \frac{\sin \dfrac{3 \times 3 \times 20^0}{2}}{3 \sin \dfrac{3 \times 20^0}{2}} = 0.667$$

(iii) K_b (sóng hài thứ năm)

$$= \frac{\sin \dfrac{3 \times 3 \times 20^0}{2}}{3 \sin \dfrac{5 \times 20^0}{2}} = 0.218$$

Có thể nhận thấy K_b đối với sóng hài thứ ba là đủ nhỏ so với sóng cơ sở.

Các cuộn bước ngắn (bước dây cung)

Các cuộn dây không chỉ có bước nguyên (π rad điện), mà còn có thể có các bước nhỏ hơn bước nguyên. Sự sắp xếp này có thể có các ưu điểm xác định. Bạn hãy khảo sát bước cuộn dây nhỏ hơn bước nguyên theo góc điện θ_{sp} (góc bước ngắn) được nêu trên Hình 5-20a. Từ Hình 5-15, Pt (5.5) về nối ghép từ thông cuộn dây, lúc này được viết dưới dạng

$$\phi = \int_{2\alpha/P}^{2(\pi-\alpha-\theta_{sp})/P} B_p \sin\left(\frac{P}{2}\theta_m\right) lr \, d\theta_m$$

Do

$$\theta_m = \frac{2}{P}\theta$$

$$\varphi = \left(\frac{4}{P}\right) \int_{\alpha}^{(\pi-\alpha-\theta_{sp})} B_p \sin\theta \, lr \, d\theta = \left(\frac{2}{P}\right) 2 \, B_p \, lr \cos(\alpha - \theta_{sp}/2) \cos\theta_{sp}/2$$

$$= \Phi \cos(\theta_{sp} / 2) \cos(\omega t - \theta_{sp} / 2) \quad (5.17)$$

Nối ghép từ thông cuộn dây và lực điện động cuộn dây sẽ giảm theo hệ số

$$K_p = \cos \theta_{sp} / 2 = \text{hệ số bước} \quad (5.18)$$

Ý nghĩa của hệ số bước có thể đạt được từ góc khác. Trên Hình 5-20a với chiều dương của lực điện động, mặt cuộn dây được đánh dấu theo chiều ngược lại, lực điện động cuộn dây là tổng pha của các lực điện động mặt cuộn dây,

$$\overline{E}_c = \overline{E}_a + \overline{E}_{a'}$$

Trong trường hợp cuộn dây bước nguyên $\overline{E}_{a'}$, và $\overline{E}_a$ đồng pha (chúng cách nhau π rad nhưng các chiều dương của chúng được đánh dấu ngược nhau) do đó

$$E_c = 2E_a$$

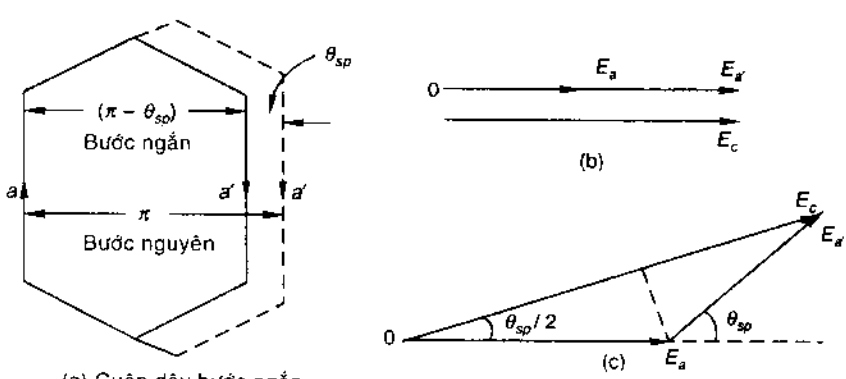
như trên Hình 5-20b

Trong cuộn dây bước ngắn θ_{sp}, $\overline{E}_a$ sẽ sớm (hoặc trễ) pha một góc θ_{sp} so với $\overline{E}_a$ (Hình 5-20c). Từ dạng hình học của sơ đồ pha

$$E_c = 2\, E_a \cos \theta_{sp} / 2$$

Ở đây, sự giảm lực điện động cuộn dây được quyết định theo hệ số

$$K_p = \frac{2E_a \cos \theta_{sp} / 2}{2E_a} = \cos \theta_{sp} / 2 \text{ (tương tự pt.(5.18))}$$



Hình 5-20 *Cuộn dây và góc bước ngắn*

Do bước ngắn, biểu thức của Pt (5.15) về điện áp pha sẽ có dạng.

$$E = 4.44\ K_h K_p\ f\ N_{ph}\ \Phi \qquad (5.19)$$

Với $K_w = K_h K_p$ = *hệ số cuộn dây*, khi đó

$$E = 4.44\ K_w\ f\ N_{ph}\ \Phi \qquad (5.20)$$

Đối với sóng hài thứ n, hệ số bước sẽ là

$$K_p = \cos n\ \theta_{ph} / 2 \qquad (5.21)$$

Sóng hài bất kỳ có thể bị loại bỏ do bước ngắn cuộn dây bằng cách thực hiện

$$n\theta_{ph} / 2 = k\frac{\pi}{2};\ \ k = 1,3,...\ \text{(lẻ)}$$

Ví dụ, để loại bỏ sóng hài thứ 13

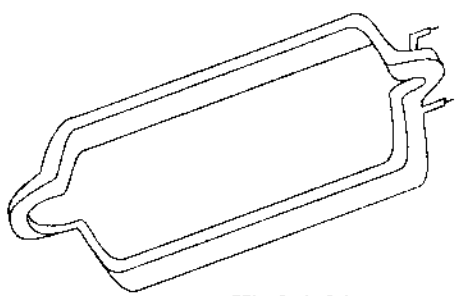
$$13\theta_{sp} / 2 = 90^0 \quad \text{hoặc } \theta_{sp} = 14^0$$

Như vậy bước ngắn sẽ giúp loại bỏ sóng hài hoặc giảm lượng sóng hài của điện áp cảm ứng. Từ Hình 5-20 có thể thấy, các cuộn dây bước ngắn có các kết nối đầu cuối ngắn hơn, cho phép tiết kiệm dây đồng, nhưng phải tăng thêm các cuộn nối tiếp/pha để tạo ra điện áp pha mong muốn.

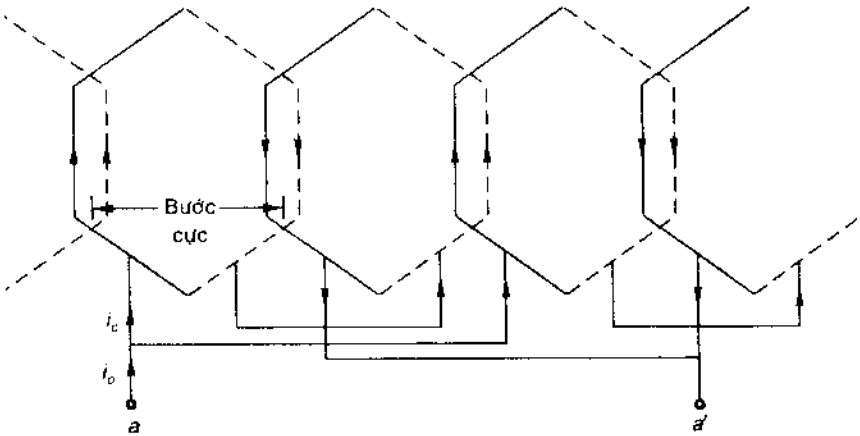
Quấn dây hai lớp

Một trong các phương pháp quan trọng và phổ biến để sắp xếp nối kết đầu cuối của các cuộn dây khi quấn dây là đặt hai mặt dây trong từng rãnh. Mỗi cuộn dây có một mặt ở nửa dưới của một rãnh và mặt kia ở nửa trên của rãnh khác (cách nhau một bước cực đối với các cuộn dây bước nguyên). Sự quấn dây này được gọi là quấn dây hai lớp. Mọi cuộn quấn dây hai lớp đều có hình dạng tương tự nhau do đó có thể được quấn riêng rẽ và đặt vào các rãnh. Các nối kết đầu cuối ở mỗi đầu cuộn dây tạo nên kiểu vòng xoắn sao cho các mạch cuộn dây có thể được đặt một cách thuận tiện vào phần đáy một rãnh và phần trên của rãnh kia (Hình 5-21).

Các nối kết cuộn dây của kiểu quấn hai lớp có thể được minh họa bằng sơ đồ quấn dây với stator được cắt ngang và đặt trên mặt phẳng. Một pha của cuộn dây



Hình 5-21



Hình 5-22 *Một pha của cuộn dây ac 4-cực 2-lớp*

hai lớp 4-cực được minh họa trên Hình 5-22, lớp trên là đường nét đậm và lớp dưới là đường nét đứt, cả hai được để cạnh nhau trên sơ đồ. Hình này minh họa trường hợp đơn giản nhất về 4-cực với 1 rãnh/cực/pha. Bốn cuộn dây có thể mắc nối tiếp hoặc mắc nối tiếp-song song. Trên Hình 5-22, bốn cuộn dây của một pha được mắc song song với hai nhóm nối tiếp. Dòng điện pha i_a và dòng điện dây dẫn i_c có quan hệ $i_c = i_a/2$.

Ví dụ 5-2 Máy phát đồng bộ 3-pha, 16-cực có cuộn dây mắc sao với 14 rãnh và 10 dây dẫn trong 1 rãnh. Từ thông/cực là 0.04 Wb (phân bố theo hàm sine), tốc độ 375 v/ph. Hãy tìm tần số, pha và lực điện động cảm ứng. Tổng số vòng/pha có thể được giả thiết là mắc nối tiếp.

Giải

$$f = \frac{nP}{120} = \frac{375 \times 16}{120} = 50 \text{ Hz}$$

Tổng số dây dẫn $= 144 \times 10 = 1440$

Tổng số vòng $= \dfrac{1440}{2} = 720$

Số vòng dây (nối tiếp)/pha, $N_{ph} = \dfrac{720}{3} = 240$

Góc rãnh $\gamma = \dfrac{180^0 P}{S} = \dfrac{180^0 \times 16}{144} = 20^0$

Rãnh/cực/pha $m = \frac{144}{16 \times 3} = 3$

Hệ số phân phối $K_b = \frac{\sin m\gamma/2}{m \sin \gamma/2} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^0}{2}}{3 \sin \frac{20^0}{2}} = 0.96$

Lực điện động pha $E_p = 4.44\ K_b\ f\ N_{ph}$ (nối tiếp) Φ

$= 4.44 \times 0.96 \times 50 \times 240 \times 0.04 = 2046$ V

Điện áp đường dây $E_L = \sqrt{3}\ E_p = 3543.6$ V

Ví dụ 5-3 Máy phát điện mắc sao, 3-pha, 50 Hz, quấn dây 2-lớp, tốc độ 600 v/ph, có 12 vòng/cuộn, 4 rãnh/cực/pha, bước cuộn dây 10 rãnh. Nếu từ thông/cực là 0.035 Wb phân phối theo hàm sine, hãy tìm lực điện động pha và lực điện động đường dây, giả thiết các vòng/pha được mắc nối tiếp.

Giải

$$P = \frac{120f}{n} = \frac{120 \times 50}{600} = 10$$

Tổng số rãnh, S = 4 x 3 x 10 =120

$$N_{ph} = \frac{120 \times 12}{3} = 480$$

SPP, m = 4

Góc rãnh $\gamma = \frac{180^0 \times 10}{120} = 15^0$

$$K_b = \frac{\sin m\gamma/2}{m \sin \gamma/2} = \frac{\sin \frac{4 \times 15^0}{2}}{4 \sin \frac{15^0}{2}} = 0.958$$

Bước cực = 120 / 10 = 12 rãnh

Bước cuộn dây = 10 rãnh

Góc bước ngắn, θ_{sp} = (12 - 10) x 15^0 = 30^0

$$K_p = \cos \theta_{sp}/2 = \cos \frac{30^0}{2} = 0.966$$

Lực điện động pha, $E_p = 4.44\ K_b K_p\ f\ N_{ph}$ (nối tiếp) Φ

$$= 4.44 \times 0.958 \times 50 \times 480 \times 0.035 = 3451 \text{ V}$$

Lực điện động đường dây, $E_L = \sqrt{3} \times 3451 = 5978$ V

Ví dụ 5-4 Máy đồng bộ 2-cực, 3-pha, 50 Hz, 2300 V, có 42 rãnh, mỗi rãnh có hai dây quấn hai lớp. Bước cuộn dây là 17 rãnh, mỗi cuộn pha có hai đường dẫn song song. Hãy tính từ thông/cực để có điện áp pha 2300/ $\sqrt{3}$ V.

Giải

$$\text{SPP, m} = \frac{42}{3 \times 2} = 7$$

Góc rãnh $\gamma = \dfrac{2 \times 180^0}{42} = 8.57^0$

$$K_b = \frac{\sin m\gamma / 2}{m \sin \gamma / 2} = \frac{\sin(7 \times 8.57^0 / 2)}{7 \times \sin 8.57^0 / 2} = 0.952$$

Bước cuộn dây = 17 rãnh

Bước cực $= \dfrac{42}{2} = 21$ rãnh

Góc bước ngắn, $\theta_{sp} = (21 - 17) \times 8.57^0 = 34.28^0$

$K_p = \cos 34.28^0 / 2 = 0.956$

N_{ph} (nối tiếp) $= \dfrac{42 \times 2}{2 \times 3 \times 2} = 7$

$E_a = 4.44\ K_b K_p\ f\ N_{ph}$ (nối tiếp) Φ

$$\frac{2300}{\sqrt{3}} = 4.44 \times 0.952 \times 0.956 \times 50 \times 7 \times \Phi$$

$\Phi = 0.94$ Wb

Máy dc

Từ máy dc cơ bản một cuộn dây (Hình 5-13 và 5-14a), sóng B của máy này liên hệ với cuộn dây bước nguyên cơ bản, gọi

Φ = từ thông/ cực

Hãy xét cuộn dây trong vùng liên cực sao cho từ thông/cực toàn phần (Φ) nối kết dương tính. Cuộn dây dịch chuyển một bước cực (π rad điện) trong thời

gian Δt sao cho các nối kết từ thông đảo dấu. Sự thay đổi nối kết từ thông trong quá trình chuyển động này là

$$\Delta\lambda = -2N_c\Phi$$

trong đó N_c là số vòng dây. Đối với máy P-cực.

$$\Delta t = \frac{2\pi}{P\omega_m} \quad (s) \tag{5.22}$$

Lực điện động cảm ứng cuộn dây *trung bình* là :

$$E_a = -\frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{\Phi\omega_m N_c P}{\pi} \tag{5.23}$$

Phần ứng máy dc luôn luôn được quấn với hai lớp tạo thành mạch kín. Các cuộn dây được mắc thích hợp với bộ góp, cách điện với nhau và với trục quay. Dòng điện từ cuộn dây phần ứng được lấy qua các chổi than đặt trên chu vi bộ góp, cách nhau 180^0 điện. Các chổi góp có cực tính ngược nhau, tất cả các chổi góp cùng cực tính được mắc song song tạo thành hai đầu dây phần ứng. Sự bố trí này làm cho cuộn dây phần ứng khép kín tạo thành mạch nối tiếp - song song. Điện áp dc giữa các chổi than có cực tính ngược nhau là tổng các điện áp trung bình của các vòng dây nối tiếp giữa các chổi than, mỗi vòng có cùng điện áp trung bình. Số lượng các đường dẫn song song phụ thuộc vào kiểu quấn dây phần ứng - kiểu sóng và kiểu chồng chập.

$$A = 2;\ \text{quấn dây kiểu sóng}$$

$$A = P;\ \text{quấn dây kiểu chồng chập} \tag{5.24}$$

Giả sử máy được quấn với Z dây dẫn (dây dẫn là phần hoạt động của phía vòng dây). Do hai dây dẫn tạo thành một vòng

$$\text{Các vòng dây nối tiếp/đường dẫn song song, } N = \frac{Z}{2A}$$

Sử dụng Pt (5.23), lực điện động phần ứng, bằng lực điện động đường dẫn song song, được tính theo

$$E_a = \frac{\Phi\omega_m Z}{2\pi}\left(\frac{P}{A}\right) \tag{5.25}$$

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60}\ \text{rad cơ / s}$$

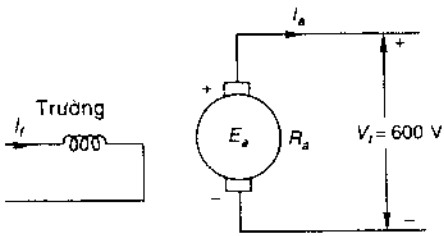
$$E_a = \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right)\ V \tag{5.26}$$

Từ Pt (5.24), suy ra

$$\frac{P}{A} = \frac{P}{2} \text{ đối với kiểu sóng}$$
$$= 1 \text{ đối với kiểu chồng chập} \qquad (5.27)$$

Do P có giá trị cực tiểu là 2, quấn dây kiểu sóng sẽ có lực điện động phần ứng lớn hơn kiểu chồng chập với cùng các giá trị Z, n, và Φ.

Ví dụ 5-5 Máy phát dc 1500 kW, 600 V, 16-cực, tốc độ 200 v/ph. Giá trị từ thông/ cực hữu dụng là bao nhiêu, nếu có 2500 dây dẫn quấn theo lớp, tổn thất tải toàn phần của dây Cu là 25 kW, hãy tính diện tích của guốc cực nếu mật độ từ thông khe hở trung bình là 0.85 T.



Hình 5-23 *Sơ đồ mạch của máy phát dc*

Giải

Dòng điện phần ứng tải toàn phần, $I_a = \dfrac{1500 \times 1000}{600} = 2500$ A

Tổn thất do dây Cu $= I_a^2 R_a = 25 \times 1000$

trong đó R_a là điện trở hiệu dụng của mạch phần ứng

$$R_a = \frac{25 \times 1000}{2500 \times 2500} = 4 \times 10^{-3}\ \Omega$$

Phương trình định luật Kirchhoff đối với mạch phần ứng là

$$E_a = V_t + I_a R_a = 600 + 2500 \times 4 \times 10^{-3} = 610 \text{ V.}$$

và $$E_a = \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right)$$

trong đó Φ là từ thông / cực hữu dụng nối kết các cuộn phần ứng. Một phần từ thông/ cực không đi qua phần ứng - được gọi là từ thông rò.

Thay các giá trị

$$610 = \frac{\Phi \times 200 \times 2500}{60}\left(\frac{16}{16}\right)$$
$$\Phi = 0.0732 \text{ Wb}$$

Diện tích của guốc cực $= 610 = \dfrac{0.0732}{0.85} = 861 \text{ cm}^2$

Ví dụ 5-6. Máy dc 4-cực, quấn theo lớp, có 728 dây dẫn phần ứng, cuộn dây trường được kích từ nguồn dc để tạo ra từ thông khe hở không khí 32 mWb/cực. Máy này được truyền động từ động cơ diesel với 1600 v/ph. Máy cung cấp dòng điện 100 A cho tải điện.

a. Hãy tính công suất điện từ ?

b. Công suất cơ được cung cấp từ động cơ diesel là bao nhiêu ?

c. Moment được cung cấp từ động cơ diesel ?

Giải

a.
$$E_a = \frac{\Phi n Z}{60} \times \left(\frac{P}{A}\right)$$
$$= \frac{32 \times 10^{-3} \times 1600 \times 728}{60} \times 1 = 621.2 \text{ V}$$
$$I_a = 100 \text{ A}$$

Công suất điện từ $= E_a I_a = \dfrac{621 \times 100}{1000} = 62.12$ kW

b. Công suất cơ học do động cơ diesel cung cấp

= Công suất điện từ = 62.12 kW

$$P_{in} = T\omega_{in}$$

Moment từ động cơ diesel $= \dfrac{62.12 \times 100}{\left(\dfrac{2\pi \times 1600}{60}\right)} = 370.75$ Nm

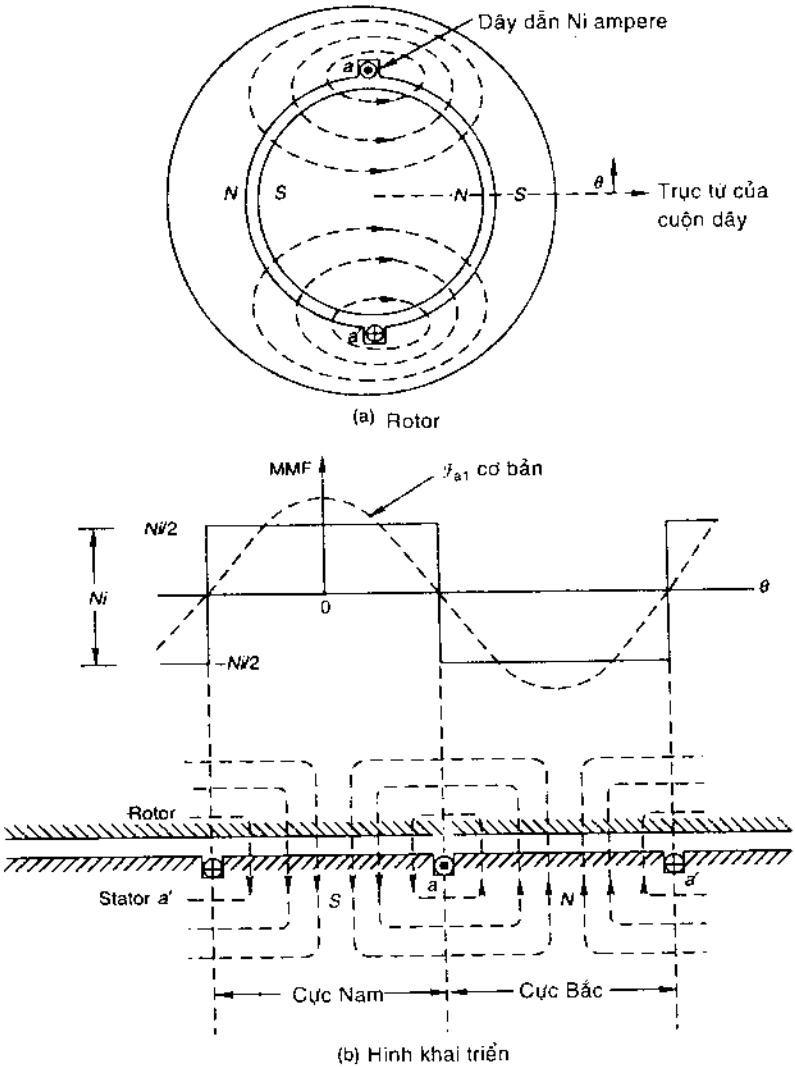
Lực từ động của các cuộn ac phân phối

Máy điện trong thực tế có cuộn phân phối được quấn với cùng số cực như cuộn dây trường. Khi phần ứng có dòng điện, trường tổng hợp của các cuộn dây dẫn điện có cùng số cực như cuộn dây trường. Phần này sẽ xác định sự phân bố không gian của lực từ động (mmf) trong phần ứng dẫn điện bằng cách chồng chập các sóng không gian của lực từ động ở các cuộn dây riêng rẽ

Sóng không gian mmf của cuộn dây đơn

Máy rotor hình trụ với khe không khí nhỏ (Hình 5-24a) được dùng làm ví dụ để khảo sát sóng mmf. Stator được quấn 2-cực với cuộn dây bước nguyên N-

vòng dẫn dòng điện i theo chiều cho trước. Cực Bắc và cực Nam tương ứng được cảm ứng trên chu vi stator. Trục từ của cuộn dây là cực Bắc đến cực Nam trên stator. Mỗi đường từ thông đi qua khe hở không khí hai lần, vuông góc



Hình 5-24 *Sóng không gian mmf của cuộn dây đơn*

với các bề mặt stator và rotor, liên hệ với mmf không đổi Ni. Giả thiết, từ trở của đường dẫn lõi sắt là rất nhỏ, một nửa mmf (Ni/2) được dùng để tạo ra từ thông từ rotor đến stator trong khe hở không khí và nửa kia sẽ thiết lập từ thông từ stator đến rotor trong khe hở không khí. Mmf và từ thông hướng ra ngoài từ rotor đến stator (cực Nam trên stator) được giả thiết là dương tính và từ stator đến rotor là âm tính.

Sẽ dễ hình dung hơn khi sử dụng hình ảnh khai triển (Hình 5-24b), stator với cuộn dây được đặt phẳng với rotor phía trên. Có thể thấy mmf là sóng không gian hình chữ nhật, trong đó mmf dương (+Ni/2) được dùng để thiết lập từ thông từ rotor đến stator, và mmf âm (-Ni/2) sẽ thiết lập từ thông từ stator đến rotor. Các mặt cuộn dây chiếm không gian hẹp trên stator và mmf thay đổi từ - Ni/2 đến +Ni/2 tại một rãnh và đảo chiều ở rãnh kia. Sự thay đổi mmf ở rãnh bất kỳ là

$$\text{Ni} = \text{ampere - dây dẫn/rãnh} \tag{5.28}$$

dấu phụ thuộc vào chiều dòng điện

Sóng không gian mmf của cuộn dây đơn có hình chữ nhật, có thể được chia thành sóng cơ sở và các sóng hài. Từ giải tích chuỗi Fourier có thể thấy sóng mmf cơ sở (Hình 5-24b) là

$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{\text{Ni}}{2}\right)\cos\theta = F_{1p}\cos\theta \tag{5.29}$$

trong đó θ là góc điện được đo từ trục từ của cuộn dây trùng với đỉnh dương của sóng cơ sở.

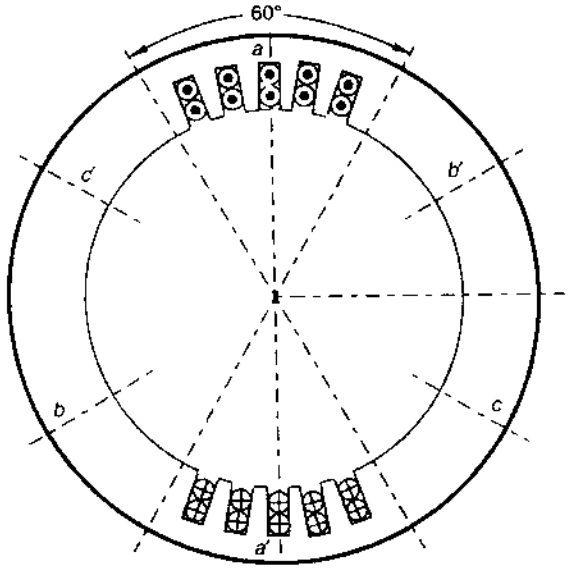
Từ Pt (5.29)

$$F_{a1}(\text{đỉnh}) = F_{1p} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{\text{Ni}}{2}\right) \tag{5.30}$$

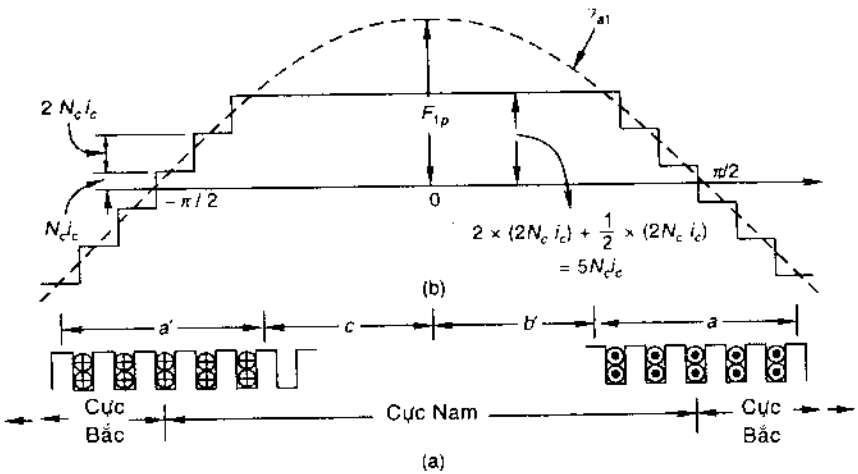
Từ đây sẽ khảo sát sóng mmf cơ sở của cuộn dây mang dòng điện, bỏ qua các sóng hài không gian liên quan, do các biên độ của chúng rất nhỏ. Hơn nữa, trong cuộn phân phối, các sóng mmf chữ nhật của các cuộn nhóm pha riêng rẽ được cộng với nhau để tạo ra sóng mmf gần với sóng sine, tức là các sóng hài có xu hướng tự triệt tiêu.

Sóng không gian mmf của một pha ở cuộn phân phối

Hãy khảo sát cấu trúc 2-cực cơ bản với rotor lồng sóc, với 5 rãnh/cực/pha (SPP) và quấn dây hai lớp (Hình 5-25), các sơ đồ tương ứng được nêu trên Hình 5-26a cùng với sơ đồ mmf là sóng bậc - gần với sóng sine hơn là sóng mmf chữ nhật của cuộn dây đơn (Hình 5-24b). Do SPP là lẻ (5), nửa số dây dẫn



Hình 5-25 *Cấu trúc 3-pha, 2-cực với cuộn dây hai lớp*



Hình 5-26 *Sơ đồ khai triển và sóng mmf của máy trên Hình 5-25*

-ampere của rãnh giữa của nhóm pha a và a' góp phần tạo nên cực Nam và một nửa hướng đến cực Bắc trên stator. Tại mỗi rãnh, sóng mmf có bậc $2N_c\ i_c$ các dây dẫn - ampere, trong đó N_c là số vòng dây (bằng số dây dẫn/lớp) và i_c là dòng điện dây dẫn.

F_{1p}, đỉnh của sóng mmf cơ sở, có thể được xác định. Thay vì xác định sóng bậc cơ sở một cách trực tiếp, có thể thực hiện bằng cách cộng các sóng cơ sở của các mmf trên từng cặp rãnh riêng rẽ (với một bước cực). Các sóng cơ sở này dần dần lệch pha với nhau (pha không gian có thể khác với pha thời gian) theo góc rãnh γ. Phép cộng này có thể thực hiện dễ dàng bằng cách xác định hệ số phân phối K_b, tương tự trường hợp lực điện động của nhóm cuộn dây.

Gọi N_{ph} (nối tiếp) là số vòng nối tiếp trên đường dẫn song song của một pha. A là số đường dẫn song song của một pha. Khi đó

AT/ đường dẫn song song = N_{ph} (nối tiếp) i_c

AT/pha = A (N_{ph} (nối tiếp)i_c) = N_{ph} (nối tiếp) i_a

trong đó i_a = dòng điện pha = A i_c

Do

$$\text{AT/ cực / pha} = \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P}\right) i_a$$

cuộn dây sẽ là cuộn dây tập trung. Đỉnh cơ sở của cuộn dây tập trung là

$$F_{1p}\ (\text{cuộn dây tập trung}) = \frac{4}{\pi}\left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P}\right) i_a$$

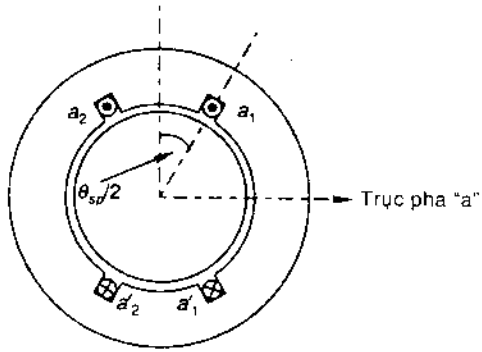
Do cuộn dây thực tế là cuộn phân phối, đỉnh cơ sở sẽ giảm theo hệ số K_b, do đó

$$F_{1p}\ (\text{cuộn dây phân phối}) = \frac{4}{\pi} K_b \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P}\right) i_a \qquad (5.31)$$

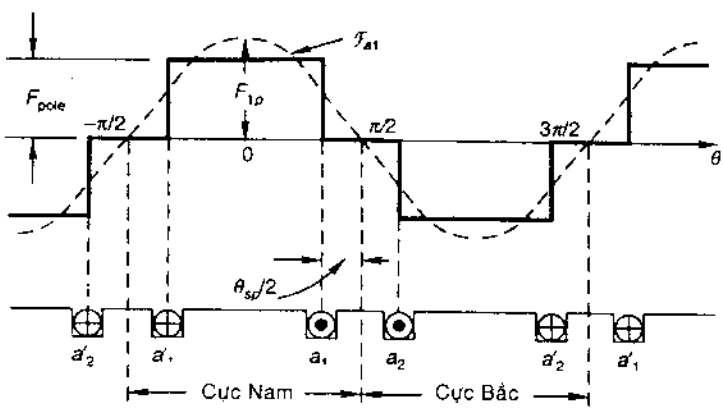
$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} K_b \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P}\right) i_a \cos\theta \qquad (5.32)$$

trong đó trục cực được lấy theo quy chiếu góc (Hình 5-26b).

Tác dụng đối với sóng mmf của các cuộn dây bước ngắn có thể được thấy rõ trên Hình 5-27, trong đó stator có hai cuộn dây bước ngắn (a_1a_1', a_2a_2') đối với pha a của cấu trúc hai cực. Mmf của mỗi cuộn dây thiết lập một cực. Từ sơ đồ khai triển (Hình 5-28) có thể thấy sóng mmf là chữ nhật nhưng có chiều dài

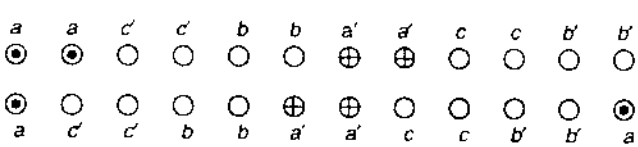


(a) Stator với cuộn dây bước ngắn tại pha "a" (quấn một lớp)



(b) Sơ đồ khai triển

Hình 5-27 *Tác dụng của cuộn dây bước ngắn đối với sóng mmf*



Hình 5-28 *Sơ đồ triển khai sóng mmf*

không gian ngắn hơn bước cực. Biên độ của đỉnh cơ sở giảm theo hệ số K_p, được gọi là *hệ số bước*, so với sóng mmf chữ nhật bước nguyên. Bằng giải tích Fourier có thể chứng minh:

$$F_{1p} = \frac{4}{\pi} F_{cực} \cos\theta_{ps} / 2$$

$$K_p = \cos\theta_{ps} / 2 \qquad (5.33)$$

Nói chung, khi cuộn dây là loại bước ngắn và là loại phân phối, sóng mmf không gian cơ sở của pha a theo Pt (5.32), có thể được tổng quát hóa.

$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} F_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) i_a \cos\theta \qquad (5.34)$$

trong đó $K_w = K_b \times K_p$, *là hệ số quấn dây*

Tương tự trường hợp lực điện động cảm ứng, sự phân phối cuộn dây stator và bước ngắn sẽ cho phép giảm các sóng hài trong sóng mmf không gian. Từ đây sẽ giả thiết, sóng mmf không gian được tạo ra ở từng pha của cuộn stator khi có dòng điện, là sóng sine. Khi pha a có dòng điện sóng sine

$$I_a = I_m \cos\omega t; \quad (I_m = \text{giá trị dòng điện pha cực đại}) \qquad (5.35)$$

sóng mmf được cho theo

$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} K_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I_m \cos\omega t \cos\theta$$

$$= F_m \cos\omega t \cos\theta \qquad (5.36)$$

trong đó

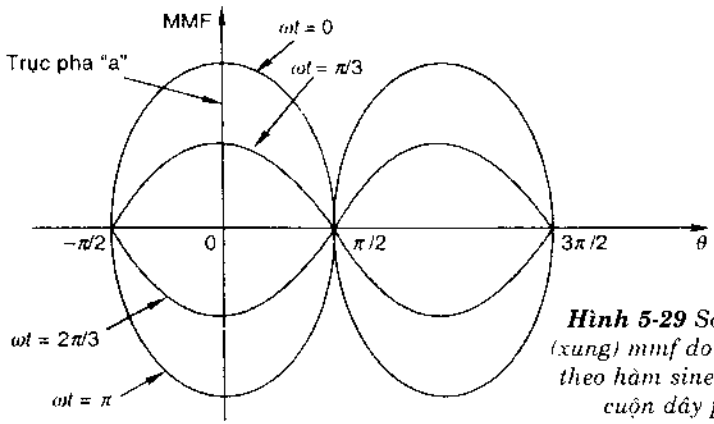
$$F_m = \frac{4}{\pi} K_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I_m = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} K_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I \qquad (5.37)$$

trong đó $I = I_m/\sqrt{2}$ là giá trị trung bình hiệu dụng của dòng điện pha.

Theo Pt (5.36), mmf của một pha là *sóng đứng* (*sóng xung*) trong không gian có đỉnh luôn luôn trùng với trục pha, biên độ đỉnh biến thiên theo hàm sine với thời gian (Hình 5-29).

Khái niệm dòng điện phẳng.

Cuộn phân phối làm phát sinh sóng mmf bậc có thành phần cơ sở rất mạnh, được khảo sát trong mô hình máy điện, còn tất cả các thành phần sóng hài đều bị bỏ qua. Một dạng phân phối dòng điện trên stator (hoặc rotor), được phát hiện, có thể tạo ra sóng mmf phân phối theo hàm sine thuần. Có thể dễ dàng nhận thấy đây là dòng điện phân phối theo hàm sine.



Hình 5-29 *Sóng đứng (xung) mmf do dòng điện theo hàm sine trong các cuộn dây pha a.*

Hình 5-30 nêu ra dòng điện phân phối hàm sine với mật độ tuyến tính đỉnh là A, A/ m chiều dài khe hở không khí. Dòng điện này từ một đầu stator (rotor) đến đầu kia song song với trục stator. Theo quy chiếu góc đã nêu, sự phân phối dòng điện này được tính theo công thức :

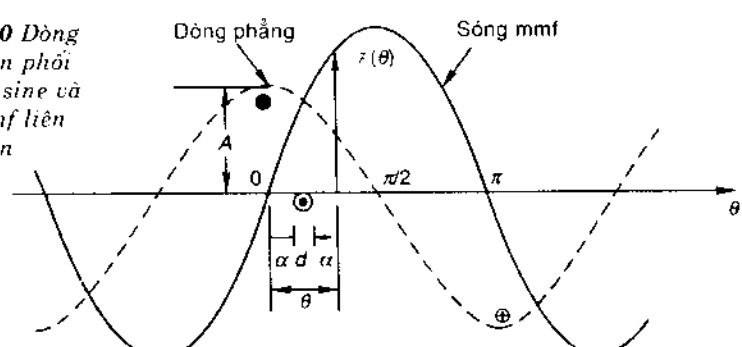
$$i = A \cos \theta$$

Mmf ở góc θ được đóng góp bằng dòng điện theo góc π/ 2. Dòng điện này theo phần tử vi phân dα tại góc α là

$$(A \cos \alpha) \frac{D}{2} d\left(\frac{2}{P}\alpha\right) = \frac{AD}{P} \cos \alpha \, d\alpha$$

trong đó D = *đường kính khe hở không khí trung bình*

Hình 5-30 *Dòng điện phân phối theo hàm sine và sóng mmf liên quan*



Mmf tại góc θ được cho theo phương trình:

$$F(\theta) = \frac{1}{2}\left(\frac{AD}{P}\int_{-\pi/2+\theta}^{\theta}\cos\alpha\, d\alpha - \frac{AD}{2}\int_{\theta}^{\pi/2+\theta}\cos\alpha\, d\alpha\right) = \frac{AD}{2}\sin\theta \qquad (5.38)$$

giá trị đỉnh là

$$F_{đỉnh} = \frac{AD}{P}$$

Theo các Pt (5.38) và (5.39) sóng mmf liên quan với dòng điện phân phối theo hàm sine, cũng là hàm sine nhưng lệch 90° (điện) so với dòng điện này. Giá trị đỉnh của sóng mmf bằng một nửa dòng điện trong một vòng, nghĩa là

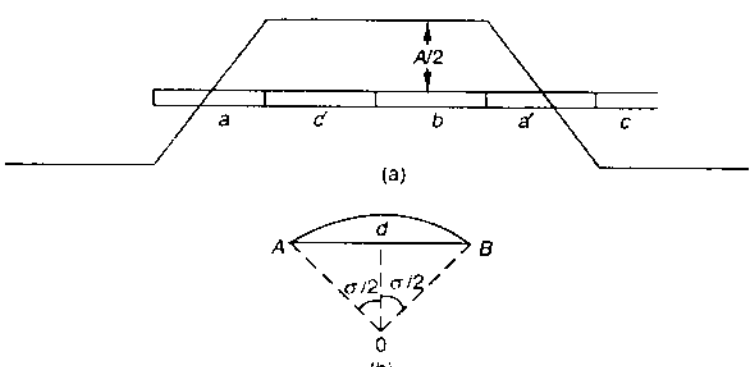
$$\frac{1}{2}\left(\frac{2}{\pi}A \times \frac{\pi D}{P}\right) = \frac{AD}{P} = F_{đỉnh} \qquad (5.39)$$

Ví dụ 5-7 Hãy tìm các biến thiên mmf do một đai dây dẫn mang dòng điện biểu thị một pha của cuộn dây 2-cực, 3-pha. Đai này có thể được giả thiết là mặt dòng điện với mật độ dòng điện đồng nhất. Hãy tính biên độ đỉnh của sóng mmf và biên độ trung bình của sóng cơ sở. Biết dòng điện toàn phần trong đai pha là A ampere, độ rộng pha σ = 60°

Giải

Sóng mmf có hình thang (Hình 5-31a), biên độ đỉnh là A/ 2 ampere-vòng

Khi dòng điện trong đai pha được trải rộng đồng đều, sơ đồ pha của các pha cơ sở là cung 60° (Hình 5-31b). Từ sơ đồ này có thể thấy



Hình 5-31 *Minh họa Ví dụ 5-7*

$$K_b = \frac{\text{dây cung AB}}{\text{cung AB}} = \frac{\sin 6/2}{6/2}$$

trong đó δ = khoảng rộng pha tính theo rad = $\frac{\pi \times 60^0}{180^0} = \pi/3$

$$K_b = \frac{\sin 60^0}{\pi/3} = 0.827$$

Biên độ trung bình hiệu dụng của sóng mmf cơ sở của một pha bằng 0.827 (A/2) = 0.4135 A

Từ trường quay

Dòng điện hàm sine trong pha bất kỳ của cuộn dây ac tạo ra sóng mmf xung trong không gian có biên độ biến thiên theo hàm sine với thời gian. Biểu thức về thành phần cơ sở của sóng mmf này là Pt (5.36). Các sóng hài của sóng mmf được coi là không đáng kể trong cuộn phân phối và giảm biên độ rõ rệt nếu sử dụng các cuộn dây bước ngắn. Do đó, sóng cơ sở của mmf là sóng duy nhất được khảo sát theo mô hình máy điện.

Xét ba pha của cuộn ac dẫn dòng điện xoay chiều cân bằng

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos \omega t \\ i_b &= I_m \cos (\omega t - 120^0) \\ i_c &= I_m \cos (\omega t - 240^0) \end{aligned} \qquad (5.40)$$

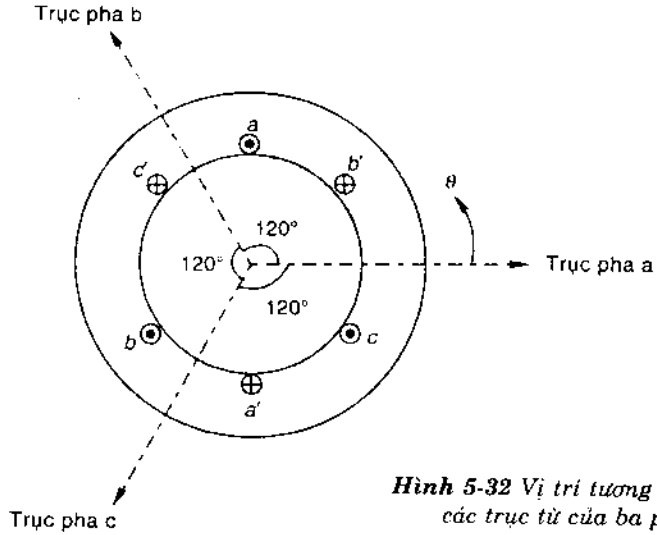
Ba sóng xung mmf được thiết lập trong khe hở không khí, có độ lệch pha là 120^0. Các mmf này định hướng trong không gian theo các trục từ của các pha a, b và c được minh họa bằng các cuộn dây tập trung (Hình 5-32). Do các trục từ cách nhau 120^0 trong không gian, ba mmf có thể được biểu thị bằng toán học

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_a &= F_m \cos \omega t \cos \theta \\ \mathcal{F}_b &= F_m \cos (\omega t - 120^0) \cos (\theta - 120^0) \\ \mathcal{F}_c &= F_m \cos (\omega t - 240^0) \cos (\theta - 240^0) \end{aligned} \qquad (5.41)$$

trong đó, ba sóng mmf lệch nhau theo pha thời gian là 120^0, tương ứng $2\pi/3$ rad (điện), và lệch pha không gian 120^0. Sóng mmf là tổng của ba sóng xung mmf

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c$$

hoặc $$\mathcal{F}(q,t) = F_m [\cos \omega t \cos \theta + \cos (\omega t - 120^0) \cos (\theta - 120^0) + \cos (\omega t - 240^0) \cos (\theta - 240)]$$



Hình 5-32 *Vị trí tương đối của các trục từ của ba pha*

Bằng lượng giác có thể đơn giản hóa phương trình trên

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_m [\cos(\theta + \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 240^0) + \cos(\theta + \omega t - 480^0)] \quad (5.42)$$

Có thể chấp nhận

$$\cos(\theta + \omega t - 480^0) = \cos(\theta + \omega t - 120^0)$$

Các đại lượng trong dấu ngoặc vuông của Pt (5.42) biểu thị ba pha đơn vị với hiệu số pha 120^0 do đó tổng là zero. Từ đó, mmf tổng là

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) \quad (5.43)$$

Từ Pt (5.43), mmf tổng được phân phối theo không gian và thời gian. Đây là sóng chạy với sự phân phối không gian theo hàm sine, góc pha không gian thay đổi tuyến tính với thời gian, ωt. Do đó, sóng này sẽ quay trong khe hở không khí với tốc độ không đổi là ω rad (điện)/ s

Giá trị đỉnh của mmf tổng là:

$$F_{đỉnh} = \frac{3}{2} F_m \quad (5.44a)$$

Sử dụng giá trị F_m từ Pt (5.37)

$$F_{đỉnh} = 3 \times \frac{2\sqrt{2}}{\pi} K_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I \qquad (5.44b)$$

Khi $\omega t = 0$, dòng điện pha a có giá trị dương cực đại

$$F(\theta,0) = \frac{3}{2} F_m \cos\theta$$

sóng mmf có giá trị đỉnh (tại $\theta = 0$) dọc theo trục pha a khi pha này có dòng điện dương cực đại. Tại $\omega t = 2\pi / 3$, pha b (được giả thiết là trễ) có dòng điện dương cực đại, do đó đỉnh của sóng chạy mmf dọc theo trục của pha b. Tương tự, đỉnh của mmf sẽ chạy và trùng với trục của pha c tại $\omega t = 4\pi / 3$. Do đó, có thể thấy sóng mmf tổng chuyển từ trục của pha sớm đến trục của pha trễ, từ pha a hướng đến pha b và pha c khi thứ tự pha của dòng điện là abc (a sớm so với b, b sớm so với c). Chiều quay của mmf tổng có thể đảo ngược bằng cách thay đổi thứ tự pha của dòng điện. Tốc độ quay của mmf là

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)\omega \ \text{rad(cơ)/s} \quad \text{hoặc} \quad \frac{2\pi n}{60} = \frac{2}{P} \times 2\pi f$$

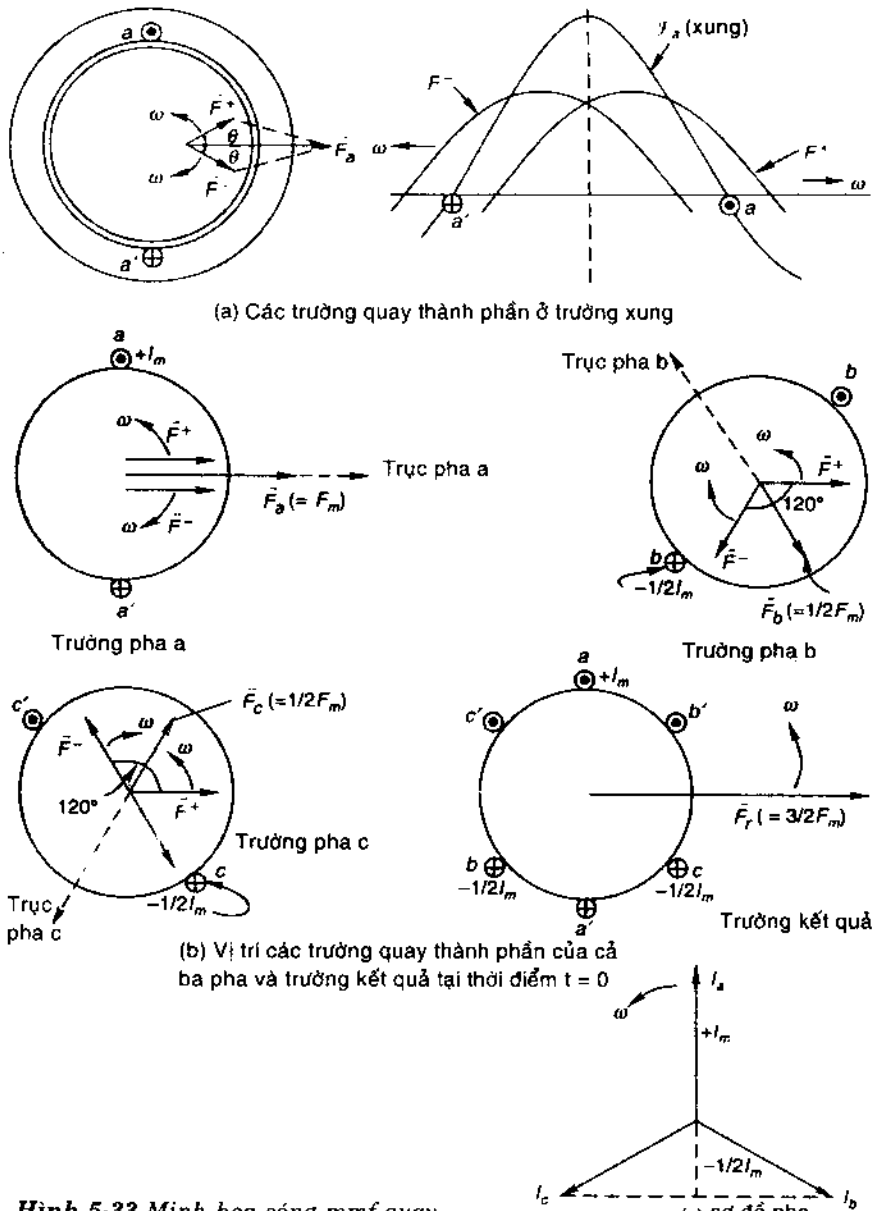
$$n = \frac{120f}{P} \ \text{vòng/phút} \qquad (5.45).$$

Đây là tốc độ rotor cảm ứng lực điện động với tần số f trong cuộn ac. Do đó, tốc độ này được gọi là tốc độ *đồng bộ*, và được ký hiệu là n_s .

Từ đó có thể kết luận : mỗi khi cuộn 3-pha cân bằng với các pha phân phối trong không gian sao cho góc không gian giữa chúng là $2\pi/3$ (điện), được cung cấp với các dòng điện 3-pha cân bằng có hiệu số pha theo thời gian là $2\pi/3$ (điện), mmf tổng quay trong khe hở không khí với tốc độ $\omega_s = 2\pi f$ rad/s, trong đó f là tần số của dòng điện tính theo Hz. Chiều quay của mmf là từ trục pha sớm hướng đến trục pha trễ. Kết luận này có thể được tổng quát hóa cho q pha ($q > 2$), góc pha không gian giữa cuộn pha là $2\pi/q$ rad (điện) và góc pha thời gian giữa các dòng điện cũng là $2\pi/q$ rad (điện). Đối với cuộn dây 2-pha các góc pha thời gian và không gian phải là 90^0 (điện).

Minh họa theo vật lý

Mmf phân phối theo hàm sine dọc theo góc không gian θ có thể được biểu thị bằng vector không gian hai chiều định hướng theo đỉnh dương (hướng về cực Nam trên stator) có biên độ bằng giá trị đỉnh. Ví dụ, mmf của pha a trên Hình 5-33a được biểu thị bằng vector $\vec{F}_a$ theo chiều dương của trục cuộn dây aa'. Các mmf phân phối có thể được cộng với nhau theo phương pháp vector.



***Hình 5-33** Minh họa sóng mmf quay*

Mmf của pha a biến thiên theo thời gian và không gian (Pt (5.41)).

$$\mathcal{F}_a = F_m \cos \omega t \cos \theta \qquad (5.46a)$$

Đây là sóng xung với trục cố định (Hình 5-29), biên độ của vector $\vec{F}a$ dao động theo hàm sine với thời gian (dòng điện kích là : $I_m \cos \omega t$ với trục cố định (trục pha a). Theo lượng giác, có thể viết

$$\mathcal{F}_a = \frac{1}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_m \cos(\theta + \omega t) \qquad (5.46b)$$

$$\vec{F}a = \vec{F}^+ + \vec{F}^- \qquad (5.46c)$$

Từ Pt (5.46b) có thể thấy mmf xung có thể được coi là tổng của hai mmf (phân phối theo hàm sine) có cùng biên độ (1/2) F_m, quay với tốc độ không đổi ω rad (điện)/ s, theo các chiều ngược lại; $\vec{F}^+$ có biên độ 1/2 F_m quay theo chiều dương của θ và $\vec{F}^-$ có biên độ 1/2 F_m quay theo chiều âm của θ. Sự phân chia mmf xung phân phối theo hàm sine thành hai mmf quay được nêu trên Hình 5-33a. Khi hai mmf thành phần quay, tổng của chúng sẽ dao động theo hàm sine với thời gian nhưng trục của chúng là cố định.

Các lực từ động dọc theo các trục của cuộn bb' và cc' có thể phân giải một cách tương tự thành hai lực từ động quay ngược nhau có cùng biên độ. Hãy khảo sát thời điểm khi dòng điện pha a đạt giá trị dương cực đại, + I_m ($i_a = I_m \cos \omega t$), dòng điện pha b vào thời điểm đó là -1/2I_m và trở nên ít âm hơn ($i_b = I_m \cos(\omega t - 120^0)$) và dòng điện pha c là - 1/2 I_m nhưng âm hơn ($i_c = I_m \cos(\omega t - 240^0)$). Điều này là rõ ràng từ sơ đồ pha trên Hình 5. 33c. Các vị trí tức thời của các trường quay thành phần của cả 3 pha được minh họa trên Hình 5.33b. Từ Hình này có thể thấy ba $\vec{F}^+$ đều trùng nhau và quay theo chiều dương với tốc độ ω cộng vào trường quay dương của biên độ 3/2 F_m. Ba $\vec{F}^-$ lệch nhau theo góc 120^0 và quay theo chiều âm với tốc độ ω do đó tự triệt tiêu lẫn nhau (trường tổng là zero). Do đó, có thể thấy tổng ba lực từ động xung của biên độ cực đại F_m với hiệu số pha thời gian 120^0 có các trục với các góc không gian 120^0 là một từ trường quay với cường độ 3/2 F_m quay theo tốc độ ω rad điện/ s có chiều dương.

Nếu bỏ qua từ trở của đường dẫn sắt, sóng mmf quay theo hàm sine tạo ra sóng B quay theo hàm sine trùng lặp trong khe hở không khí với biên độ đỉnh:

$$B_{đỉnh} = \frac{3\mu_0 F_m}{2g}$$

trong đó g là *chiều dài khe hở không khí của máy*

Ví dụ 5.8. Máy phát 3 - pha mắc sao, 400 kVA, 50 Hz (máy phát đồng bộ) chạy với tốc độ 300 v/ph được thiết kế để có 3300 V giữa các đầu dây. Phần ứng

gồm 180 rãnh, mỗi rãnh có một phía cuộn dây với 8 dây dẫn. Hãy xác định giá trị đỉnh của mmf cơ bản theo AT/ cực khi máy có dòng điện tải toàn phần.

Giải:

$$P = \frac{120f}{n} = \frac{120 \times 50}{300} = 20$$

$$I_L = I_P = \frac{400 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} = 70 \text{ A}$$

Giá trị đỉnh dòng điện pha, $I_m = 70\sqrt{2}$ A

$$\text{Góc rãnh, } \gamma = \frac{180^0 \times 20}{180} = 20^0$$

$$\text{SPP, m} = \frac{180}{3 \times 20} = 3$$

$$K_b = \frac{\sin m\gamma/2}{m \sin \gamma/2} = 0.96$$

$$\text{Số vòng/pha (nối tiếp)} = \frac{180 \times 8}{2 \times 3} = 240$$

$$F_m = \frac{4}{\pi} K_b \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I_m = \frac{4}{\pi} \times 0.96 \times \left(\frac{240}{20} \right) \times 70\sqrt{2} = 1452 \text{ AT/cực/pha}$$

$$F_{đỉnh} = \frac{3}{2} F_m = 2178 \text{ AT/ cực}$$

Ví dụ 5.9. Động cơ cảm ứng 3 - pha, 50 kW, 4 - cực, 50 Hz, có cuộn dây (ac) được thiết kế để mắc Δ. Cuộn dây có 24 dây dẫn/rãnh được xếp trong 60 rãnh. Giá trị rms của dòng điện đường dây là 48 A. Hãy tìm sóng mmf cơ sở của pha-A khi dòng điện này đi qua giá trị cực đại. Tốc độ và giá trị đỉnh của mmf tổng/ cực là bao nhiêu?

Giải:

$$\gamma = \frac{180^0 \times 4}{60} = 12^0$$

$$\text{SPP} = \frac{60}{4 \times 3} = 5$$

$$K_b = \frac{\sin \frac{5 \times 12^0}{2}}{5 \sin \frac{12^0}{2}} = 0.957$$

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{48}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

$$I_{p,\,max} = \frac{48\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 39.2 \text{ A}$$

$$\text{Số vòng/pha} = \frac{60 \times 24}{2 \times 3} = 240$$

$$F_m(\text{pha a}) = \frac{4}{\pi} K_h \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P} \right) I_{p,\,max}$$

$$= \frac{4}{\pi} \times 0.957 \times \left(\frac{240}{4} \right) \times 39.2 = 2866 \text{ AT/ cực}$$

$$F_{đỉnh} = \frac{3}{2} F_m = 4299 \text{ AT/ cực}$$

$$\text{Tốc độ quay của mmf tổng} = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ vòng/ phút}$$

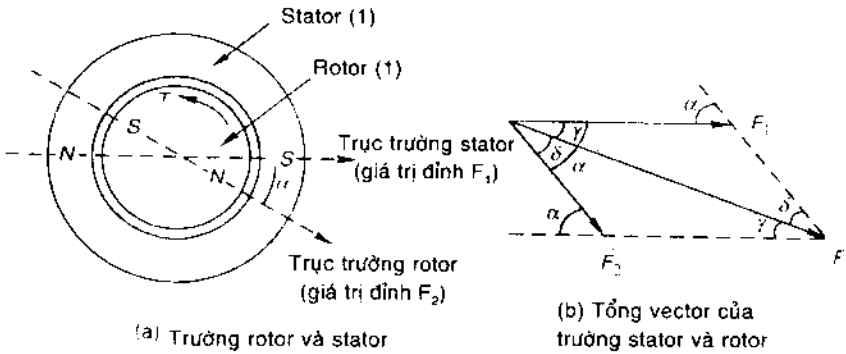
Moment quay trong máy rotor tròn

Khi các cuộn dây rotor và stator của máy đều có dòng điện, chúng tạo ra hai từ trường riêng dọc theo các trục tương ứng, phân phối theo hàm sine dọc theo khe không khí. Moment từ hai trường này sẽ tự chỉnh thẳng hàng. Các thành phần từ thông do dòng điện rotor và stator tạo ra sẽ cắt qua khe hở không khí hai lần và hoàn tất mạch qua lõi sắt rotor và stator. Các từ trường thành phần này làm xuất hiện các cực Bắc và Nam trên bề mặt stator và rotor; các trục trường theo hướng Bắc - Nam và ra ngoài cực Bắc. Điều này được minh họa trên Hình 5.34 a với kết cấu 2 - cực. Moment có xu hướng chỉnh thẳng hàng hai trường chỉ được tạo ra nếu hai trường có cùng số cực và là tĩnh tại với nhau. Hai trường quay tương đối sẽ tạo ra moment biến thiên lần lượt khi cắt nhau, do đó moment trung bình là zero. Tất cả các biến thể máy điện (đồng bộ, cảm ứng, dc) do đó đều phải tạo ra các từ trường tương tác với vận tốc tương đối giữa chúng là zero.

Ở giai đoạn này cần có các giả thiết:

1. Mmf của stator và rotor là các sóng không gian theo hàm sine, điều này là đủ bảo đảm từ các cuộn dây phân phối.

2. Rotor hình trụ, do đó khe không khí là đồng nhất.



Hình 5.34

3. Khe không khí đủ hẹp để từ thông được thiết lập bên trong là hướng kính (thành phần tiếp tuyến không đáng kể) và mật độ từ thông không thay đổi rõ rệt theo hướng kính của khe. Kết quả là cường độ từ trường H theo đường hướng kính bất kỳ là không đổi trong khe. Mmf qua khe không khí ở điểm không gian bất kỳ là

$$F_{\text{khe không khí}} = Hg$$

trong đó g *là chiều dài khe không khí*

4. Trở lực từ thông của lõi sắt được giả thiết là không đáng kể, sóng mmf không gian theo hàm sine tạo ra sóng mật độ từ thông theo hàm sine trong không gian đồng pha với sóng mmf.

5. Hầu hết từ thông tổng là chung cho cả cuộn dây stator và rotor, nghĩa là *từ thông tương hỗ. Sự rò rỉ từ thông* liên kết hoặc cuộn dây tạo ra *cảm kháng rò rỉ* như trong biến áp. Điều này chỉ tác động đến điện áp tổng thể cung cấp cho máy lí tưởng.

Gọi F_1 và F_2 là các giá trị đỉnh của sóng mmf không gian theo hàm sine của stator và rotor (Hình 5.34) trong máy 2 - cực, góc giữa các đỉnh dương của chúng được ký hiệu là α. Như đã đề cập, các mmf này có thể biểu thị bằng vector không gian với độ lớn tương ứng các giá trị đỉnh và các góc tương ứng các đỉnh dương của chúng. Mmf không gian tổng (cũng theo hàm sine do là tổng của các hàm sine) có thể nhận được bằng cách cộng vector (Hình 5.34b). Sử dụng các hàm lượng giác có thể dễ dàng nhận thấy giá trị đỉnh của mmf tổng là

$$F_r = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha \qquad (5.47\ a)$$

Do bỏ qua từ trở của đường dẫn sắt, giá trị đỉnh của cường độ từ trường tổng là

$$H_r = \frac{F_r}{g} \tag{5.47b}$$

Từ Pt (4.18), mật độ đồng năng lượng là

$$\frac{1}{2}\mu_0 H^2$$

Giá trị trung bình mật độ đồng năng lượng qua thể tích khe không khí là

$$\frac{1}{2}\mu_0 \text{ (giá trị trung bình của } H^2)$$

Đối với sự phân phối theo hàm sine

$$\text{Giá trị trung bình của } H^2 = \frac{1}{2}H_r^2$$

$$\text{Mật độ đồng năng lượng trung bình} = \frac{1}{4}\mu_0 H_r^2$$

Thể tích khe không khí bằng = πDlg

trong đó D là *đường kính trung bình ở khe không khí*

Đồng năng lượng toàn phần của từ trường sẽ là

$$W_f = \frac{\pi}{4}\mu_0 H_r^2 D\,lg = \frac{\pi}{4}\mu_0\left(\frac{F_r}{g}\right)^2 D\,lg = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g}F_r^2 \tag{5.48}$$

Thay F_r từ Pt (5.47a)

$$W_f = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g}(F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha) \tag{5.49}$$

Moment được tính theo

$$T = +\frac{\partial W_f}{\partial \alpha} = -\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}F_1F_2\sin\alpha \tag{5.50}$$

Đối với máy P - cực

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}F_1F_2\sin\alpha \tag{5.51}$$

Từ biểu thức moment (Pt 5.51) có thể thấy moment tỉ lệ với các giá trị đỉnh của mmf stator và rotor và tỷ lệ với sine của góc giữa các trục của hai trường đó. Dấu âm trong Pt 5.50 được hiểu là moment tác dụng theo chiều giảm α để chính thẳng hàng hai trường này. Rõ ràng, các moment bằng nhau và ngược dấu sẽ tác động lên stator và rotor.

Từ Hình 5.34 b có thể thấy

$$F_1 \sin \alpha = F_r \sin \delta \tag{5.52}$$

$$F_2 \sin \alpha = F_r \sin \gamma \tag{5.53}$$

Biểu thức moment (Pt 5.51) do đó có thể được biểu thị theo hai dạng

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_1 F_r \sin \gamma \tag{5.54}$$

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_2 F_r \sin \delta \tag{5.55}$$

Moment trong biểu thức của các Pt (5.54) và (5.55) có thể được coi là kết quả tương tác của các mmf tổng và mmf stator hoặc mmf tổng và mmf của rotor và tỷ lệ với sine của góc giữa các mmf tương tác. Biểu thức moment (Pt 5.55) nói chung được dùng cho các mô hình máy điện đơn giản hóa.

Do $\mu_0 F_r / g = Br$; (giá trị đỉnh của mật độ từ thông tổng, Pt (5.55) có thể được viết dưới dạng).

$$T = -\left(\frac{P}{2}\right)\frac{\pi D l}{2} F_2 B_r \sin \delta \tag{5.56}$$

Biểu thức này có thể xác định quan điểm thiết kế; moment của gốc điện từ bị giới hạn do giá trị bão hòa của mật độ từ thông (B_r) trong vật liệu từ tính và mmf cực đại cho phép (F_2). Giá trị cực đại của F_2 được quyết định từ dòng điện cuộn dây cực đại cho phép không vượt quá độ tăng nhiệt độ cho trước.

Dạng biểu thức moment hữu dụng được tính theo từ thông tổng/ cực, Φ_r, thay vì mật độ từ thông đỉnh B_r.

$$\Phi_r = B_{av} (> 1 \text{ cực}) \times (\text{diện tích cực})$$

$$= \left(\frac{2}{\pi} B_r\right)\left(\frac{\pi D l}{P}\right) = \frac{2 B_r D l}{P} \tag{5.57}$$

Thay B_r từ Pt (5.57) vào Pt (5.55)

$$T = -\frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r F_2 \sin \delta \tag{5.58}$$

trong đó Φ_r là từ thông tổng/ cực do sự chồng chập các mmf stator và rotor.

Phương trình (5.57) có thể viết dưới dạng

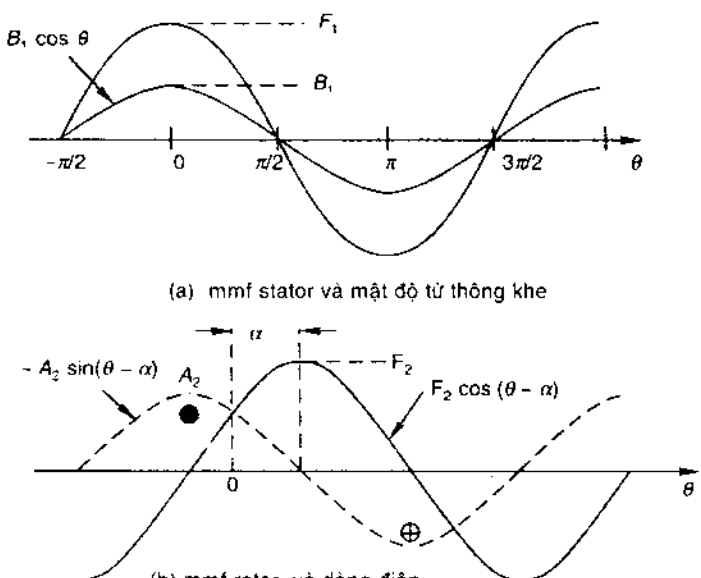
$$\Phi_r = \left(\frac{2Dl}{P} \times \frac{\mu_0}{g}\right) F_r = \mathcal{P} F_r \qquad (5.59)$$

trong đó $\mathcal{P} = \left(\frac{2Dl}{P} \times \frac{\mu_0}{g}\right)$ = độ từ thẩm hiệu dụng / cực

Độ từ thẩm hiệu dụng/ cực là quan hệ giữa giá trị đỉnh của sóng mmf theo hàm sine và từ thông/cực do sóng đó tạo ra. Đây là đại lượng không đổi khi giả thiết độ cảm ứng từ của sắt là vô hạn, nhưng khi đại lượng này là hàm F_r, sẽ giảm khi F_r tăng do độ bão hòa của sắt.

Các đạo hàm

Hình 5.35a minh họa sóng mmf stator và sóng mật độ từ thông khe không khí tương ứng. Sóng mmf rotor tạo thành góc α với sóng mmf stator.



Hình 5.35 *Tương tác của mật độ từ thông khe không khí được thiết lập bởi mmf stator và sóng dòng điện rotor tương ứng với sóng mmf rotor.*

Sóng dòng điện rotor, làm cho mmf rotor sớm pha 90^0 (Hình 5.35b). Lực (và moment) được tạo ra do tương tác của sóng-B_1 và sóng-A_2 theo nguyên tắc *Bli*. Có thể thấy B_1 dương và A_2 dương tạo ra lực âm (ngược với chiều dương của θ). Phần tử góc dθ của máy tại góc θ từ gốc tọa độ tạo ra moment.

$$dT = -\frac{1}{2} D (B_1 \cos\theta) I (-A_2 \sin(\theta - \alpha) \frac{D}{P} d\theta)$$

$$= \frac{1}{2}\frac{D^2 l}{P} B_1 A_2 \cos\theta \sin(0 - \alpha) d\theta$$

Moment đối với một cặp cực có thể nhận được bằng cách lấy tích phân phương trình nêu trên từ θ = 0 và θ = 2π.

$$T = -\frac{1}{2P}\pi D^2 l B_1 A_2 \sin\alpha \qquad (5.60)$$

$$B_1 = \mu_0 F_1 / g$$

$$A_2 = F_2 P / D \qquad \text{(xem Pt (5.39))}$$

Do đó

$$T = -\frac{\mu_0 \pi}{2g} D l F_1 F_2 \sin\alpha \qquad (5.61)$$

là kết quả từ Pt (5.50)

Sự vận hành của các kiểu máy cơ bản

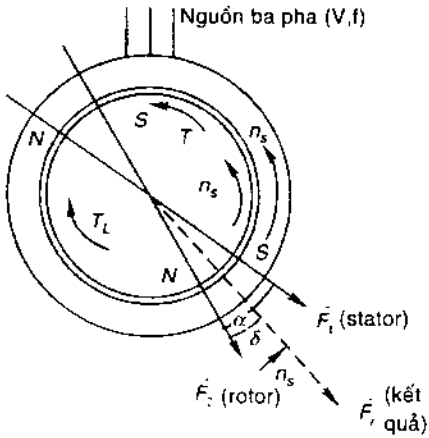
Sự giải thích về quá trình tạo ra moment của các kiểu máy cơ bản thông qua biểu thức moment tổng quát (Pt 5.58) sẽ được áp dụng trong phần này.

Máy đồng bộ

Hình 5.36 minh họa máy đồng bộ với rotor tròn. Rotor này ban đầu là tĩnh tại với các cực Bắc và Nam cố định được tạo ra do sự kích thích dc. Giả sử cuộn 3 - pha của stator được mắc vào nguồn 3 - pha có điện áp V cố định và tần số *f* không đổi. Do đó các dòng điện 3 - pha trong cuộn stator tạo ra từ trường quay với tốc độ đồng bộ n_s (= 120*f*/P) ngược chiều kim đồng hồ. Do rotor là tĩnh tại và không thể đạt tới tốc độ tức thời (do quán tính), hai trường này chuyển động tương đối với nhau tạo ra moment trung bình là zero. Loại động cơ này là *không tự khởi động*.

Hãy khảo sát rotor chuyển động do thiết bị phụ đến tốc độ gần như đồng bộ theo chiều quay của trường stator. Hai trường này sẽ có khả năng khóa lẫn

nhau, hoặc nói cách khác, rotor kéo theo bậc với trường stator sau đó sẽ chạy với tốc độ đồng bộ. Từ Hình 5.36 có thể thấy moment điện từ (T) tác động lên rotor theo chiều quay của rotor và cân bằng với moment tải T_L. Công suất cơ học do đó sẽ theo tải (tác dụng kéo), và theo nguyên lý bảo toàn năng lượng, công suất điện tương ứng (cộng với tổn thất trong thiết bị) sẽ được cung cấp từ nguồn điện. Từ Hình 5.36 cũng có thể thấy với T_L cho trước, trường rotor trễ pha so với trường stator một góc α, hoặc trễ pha so với trường tổng theo góc δ. Moment của động cơ đồng bộ được tính theo Pt (5.58), sẽ có dạng



Hình 5.36 *Moment được tạo ra trong máy đồng bộ (động cơ)*

$$T = \frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r F_2 \sin\delta \qquad (5.62)$$

Có thể thấy dấu âm bị loại khỏi phương trình moment khi giả thiết moment tác động theo chiều chỉnh thẳng hàng các trường (dấu mũi tên trên Hình 5.36).

Nếu điện trở cuộn stator và cảm kháng rò rỉ được coi là không đáng kể, mmf cảm ứng của cuộn stator cân bằng với điện áp đầu dây, nghĩa là

$$V \approx \sqrt{3} \times 4.44 K_w f \Phi_r N_{ph} \text{(nối tiếp)} \qquad (5.63)$$

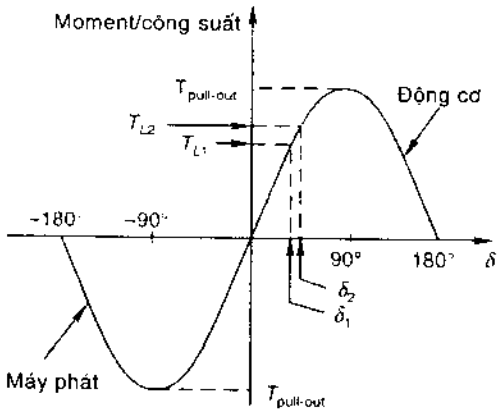
Đối với điện áp không đổi, từ thông tổng/cực hầu như không đổi, độc lập với tải ở trục động cơ. F_2, đỉnh của sóng mmf rotor phụ thuộc vào dòng điện rotor, là hằng số đối với sự kích thích không đổi. Phương trình 5.62 trong điều kiện điện áp đầu dây không đổi và kích thích rotor không đổi, có thể viết dưới dạng

$$T = K \sin\delta \qquad (5.64)$$

trong đó δ là dương khi trường rotor trễ pha so với trường tổng, và là âm khi trường rotor sớm pha. Góc δ được gọi là *góc moment* hoặc *góc công suất.*

Đồ thị moment điện từ trong máy đồng bộ được nêu trên Hình 5.37. Máy vận hành với δ cố định đối với tải cơ học cho trước và chạy với tốc độ đồng bộ (δ_1 và T_{L1}). Khi moment tải tăng đến T_{L2} lớn hơn T_{L1}, rotor giảm tốc độ và δ

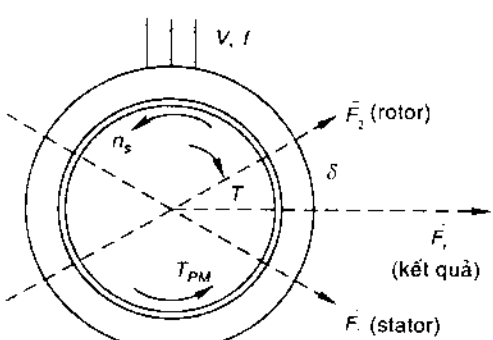
tăng đến giá trị δ_2 (Hình 5.37). Máy sẽ ổn định dần với góc vận hành mới và tốc độ đồng bộ mới. Sự nối kết trường stator - rotor tác động tương tự nối kết lò xo kết hợp với quán tính rotor, tạo thành hệ dao động. Tuy nhiên, các dao động này sẽ tắt dần do tác dụng của các hiệu ứng điện và cơ trong máy.



Hình 5.37 *Đặc tuyến moment - góc của máy đồng bộ*

Từ Hình 5.37 có thể thấy moment cực đại đạt được với góc $\delta = 90^0$, được gọi là moment hoặc công suất kéo toàn phần; công suất tỷ lệ với moment khi tốc độ máy là đồng bộ, độc lập với tải. Nếu động cơ chịu tải với moment (hoặc công suất) cao hơn T kéo toàn phần, moment sẽ giảm (Hình 5.37), góc trễ pha rotor sẽ tăng tuyến tính cho đến khi phá vỡ liên kết trường rotor - stator, nghĩa là rotor phải dừng lại, cần phải ngắt nối kết điện nguồn trước khi xảy ra điều đó. Từ phương trình 5.62 có thể thấy moment kéo toàn phần tăng lên khi tăng điện áp đầu dây stator và/hoặc trường kích rotor.

Với δ âm, nghĩa là trường rotor sớm pha so với trường tổng theo chiều quay của rotor, moment điện từ (Hình 5.38) sẽ ngược chiều với chiều quay của rotor và phải được cân bằng với moment cơ học bên ngoài đối với rotor để chạy với tốc độ đồng bộ duy trì sự khóa giữa các trường rotor và stator. Công suất cơ học tác dụng lên rotor và công suất điện cung cấp cho stator. Rotor sẽ điều chỉnh lại góc sớm pha sao cho công suất điện bằng công suất cơ học trừ các tổn thất. Nếu công suất cơ học cao hơn công suất điện cực đại, rotor sẽ tăng tốc, làm sai lệch sự đồng bộ giữa stator và rotor.



Hình 5. 38 *Sự hình thành moment trong máy đồng bộ.*

Tóm lại, máy đồng bộ có sự khóa đồng bộ giữa trường stator và rotor với trường rotor

trễ pha so với trường khe không khí khi vận hành theo kiểu động cơ và sớm pha so với trường này khi vận hành theo kiểu máy phát. Moment điện từ là hàm sine của góc δ giữa trường rotor và trường tổng, do đó máy sẽ bị mất tính đồng bộ nếu các điều kiện vận hành làm cho δ ra ngoài khoảng ± 90^0. Trong khoảng này, máy vận hành với tốc độ đồng bộ khi các lực truyền tải thay đổi.

Ví dụ 5.10. Trong máy điện có F_2 = 850 AT, F_1 = 400 AT, α = 123.6^0 và $\mathcal{P}$ (độ từ thẩm / cực) = 1.408 x 10^{-4} Wb/AT. Hãy tính giá trị từ thông khe không khí tổng/cực.

Giải

$$F_r = (F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha)^{1/2}$$

$$= \left[(400)^2 + (850)^2 + 2 \times 400 \times 850 \cos 123.6^0\right]^{1/2} = 711.5 \text{ AT}$$

$$\Phi_r = \mathcal{P}F_r = 1.408 \times 10^{-4} \times 711.5 = 0.1 \text{ Wb}$$

Ví dụ 5.11. Máy phát đồng bộ 50Hz, 400V, 4 - cực, có 36 rãnh, quấn dây hai lớp với các cuộn bước nguyên là 8 vòng/cuộn. Đường kính khe không khí trung bình là 0.16 m, chiều dài trục 0.12 m, khe không khí đồng bộ 2mm. Hãy tính giá trị AT tổng/ cực và mật độ từ thông khe không khí đỉnh. Máy có moment điện từ 60 Nm khi hoạt động theo kiểu máy phát góc moment 26^0. Giá trị AT/ cực của rotor là bao nhiêu? Giá trị AT của stator và góc tạo thành AT tổng là bao nhiêu? Dòng điện stator là bao nhiêu?

Giải

$$N_{ph} \text{ (nối tiếp)} = \frac{36 \times 8 \times 2}{2 \times 2} = 96$$

$$\gamma = \frac{4 \times 180^0}{36} = 20^0$$

$$m = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

$$K_b = \frac{\sin(3 \times 20^0/2)}{3 \times \sin(20^0/2)} = 0.96$$

$$V = E = 4.44\, K_b\, f\, \Phi_r N_{ph}$$

$$\frac{400}{\sqrt{3}} = 4.44 \times 0.96 \times 50 \times \Phi_r \times 96$$

$$\Phi_r = 0.0113 \text{ Wb/ cực ; D = 0.16 m; l = 0.12 m}$$

$$\text{Diện tích cực} = \frac{\pi \times 0.16 \times 0.12}{4} = 0.0151 \text{ m}^2$$

$$B_r \text{ (trung bình)} = \frac{0.0113}{0.0151} = 0.749 \text{ T}$$

$$B_r \text{ (đỉnh)} = \frac{\pi}{2} \times 0.749 = 1.18 \text{ T}$$

$$F_r = \frac{gB_r(\text{đỉnh})}{\mu_0} = \frac{2 \times 10^{-3} \times 1.18}{4\pi \times 10^{-7}} = 1878 \text{ AT/ cực (đỉnh)}$$

$$\text{Moment, T} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\Phi_r \mathcal{F}_2 \sin\delta$$

$$60 = \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{4}{2}\right)^2 \times 0.0113 \, F_2 \sin 26^0$$

$$F_2 = 1928 \text{ AT/ cực (đỉnh)}$$

Sơ đồ pha mmf được nêu trên Hình 5.39, với $\vec{\mathcal{F}}_2$ sớm pha so với $\vec{\mathcal{F}}_r$ là $\delta = 26^0$. Đây là trường hợp máy phát. Từ sơ đồ pha có thể tìm được

$$F_1^2 = (1928)^2 + (1878)^2 - 2 \times 1928 \times 1878 \sin 26^0$$

hoặc $F_1 = 858$ AT/ cực (đỉnh)

$$\cos\psi = \frac{(858)^2 + (1878)^2 - (1928)^2}{2 \times 858 \times 1878}$$

$$\psi = 80^0$$

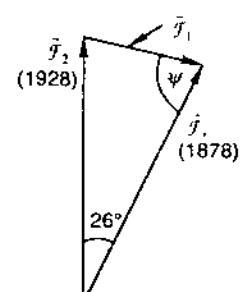
$\vec{\mathcal{F}}_1$ trễ pha 80^0 so với $\vec{\mathcal{F}}_r$

$$F_1 = \frac{3}{2} \times \frac{4\sqrt{2}}{\pi} k_w \left(\frac{N_{ph}(\text{nối tiếp})}{P}\right) I_a$$

$$K_w = K_b = 0.96; \; N_{ph} \text{ (nối tiếp)} = 96$$

$$858 = \frac{3}{2} \times \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \times 0.96 \times \frac{96}{4} \times I_a$$

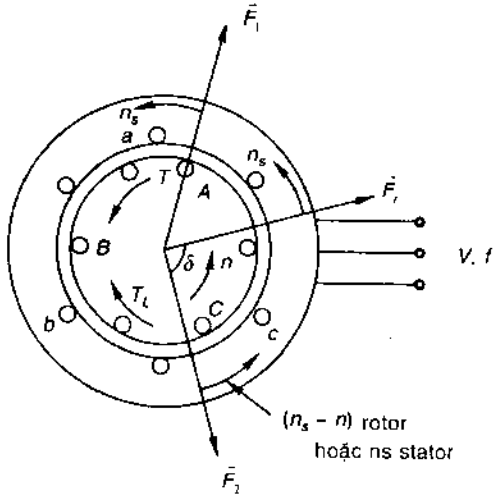
$$I_a = 13.8 \text{ A}$$



Hình 5.59 *Sơ đồ pha mmf*

Máy cảm ứng

Xét máy rotor hình trụ với rotor và stator được quấn cho 3 pha và có cùng số cực (Hình 5. 40). Giả sử cuộn rotor ban đầu là hở mạch và stator được mắc với thanh góp vô hạn (V, *f*). Các dòng điện stator tạo nên từ trường quay trong khe không khí có tốc độ đồng bộ sẽ cảm ứng lực điện động (emf) trong cuộn stator cân bằng với điện áp đầu dây khi giả thiết điện trở stator và cảm kháng rò rỉ là không đáng kể. Từ trường quay cảm ứng emf trong cuộn rotor nhưng không có dòng điện trong cuộn này do rotor là hở mạch. Tần số của emf rotor là *f*. Do mmf rotor $F_2 = 0$, không có moment ở đây và rotor tiếp tục tĩnh tại. Máy tác động tương tự biến áp, trong đó stator (sơ cấp) và rotor (thứ cấp) có các emf cùng tần số được cảm ứng bên trong do từ thông quay thay vì từ thông tĩnh tại biến thiên theo thời gian như máy biến áp thông thường.



Hình 5.40 *Nguyên lý máy cảm ứng*

Giả sử rotor được giữ tĩnh tại (*không quay*) và cuộn rotor là ngắn mạch. Rotor có các dòng điện 3 pha tạo ra mmf F_2 quay cùng chiều và cùng cấp độ với trường stator. F_2 làm cho các dòng điện cảm ứng đi vào stator từ thanh góp (tương tự máy biến áp) do đó từ thông / cực Φ_r của sóng mật độ từ thông tổng (quay trong khe không khí với tốc độ đồng bộ) cảm ứng emf stator đủ để cân bằng điện áp đầu dây. Rõ ràng, Φ_r này phải không đổi so với giá trị khi rotor hở mạch. Thực vậy, Φ_r là không đổi, độc lập với các điều kiện vận hành do tải của động cơ. Sự tương tác giữa Φ_r và F_2, tĩnh tại với nhau, tạo ra moment có xu hướng làm cho rotor chuyển động theo chiều của Fr hoặc trường stator F_1. Động cơ cảm ứng, do đó là thiết bị tự khởi động, khác với động cơ đồng bộ.

Giả sử rotor ngắn mạch được phép quay, sẽ quay theo chiều của trường stator và đạt được tốc độ ổn định n. Rõ ràng n nhỏ hơn n_s, do nếu $n = n_s$, tốc độ tương đối giữa trường stator và cuộn dây rotor sẽ là zero do đó không có moment. Rotor này không thể đạt được tốc độ đồng bộ n_s, do đó cũng không vượt quá tốc độ này. Với tốc độ rotor là n, tốc độ tương đối giữa trường stator

và các dây dẫn rotor là n_s - n theo chiều n_r. Tần số của các emf cảm ứng (và các dòng điện) trong rotor sẽ là

$$f_2 = \frac{(n_s - n)P}{120} = \left(\frac{n_s - n}{n_s}\right)\left(\frac{n_s P}{120}\right) = sf \qquad (5.65)$$

trong đó $$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \text{độ trượt của rotor} \qquad (5.66)$$

Độ trượt s theo đơn vị tốc độ (tốc độ đồng bộ) tại đó rotor trượt phía sau trường stator. Tần số rotor $f_2 = sf$ được gọi là *tần số trượt*. Từ phương trình 5.66, tốc độ rotor là

$$n = (1 - s)\, n_s \qquad (5.67)$$

Các dòng điện tần số trượt trong cuộn dây rotor làm cho trường rotor quay với rotor cùng chiều với trường stator theo tốc độ

$$\frac{120\, sf}{P} = \frac{120\,(n_s - n)\, f}{n_s P} = (n_s - n) \qquad (5.68)$$

Do rotor quay với tốc độ n và tốc độ trường rotor là (n_s - n) so với rotor theo cùng chiều, tốc độ tổng của trường rotor nhìn từ phía stator là

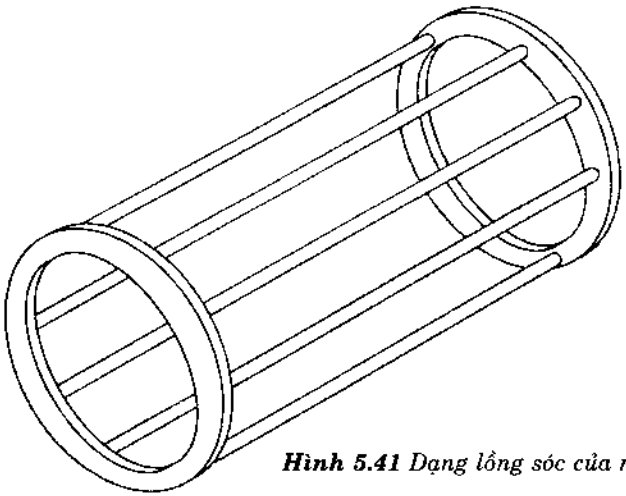
$$n + (n_s - n) = n_s$$

đồng bộ với trường stator. Do đó trường phản ứng F_2 luôn luôn tĩnh tại so với trường stator F_1 hoặc trường tổng F_r (với từ thông Φ_r/ cực). Do mmf rotor F_2 tỉ lệ với dòng điện I_2 và từ thông tổng / cực Φ_r là cố định theo điện áp đầu dây độc lập với các điều kiện vận hành, moment động cơ cảm ứng được tính theo (Pt 5.58).

$$T = KI_2 \sin \delta \qquad (5.69)$$

Từ đây có thể thấy moment được tạo ra từ động cơ cảm ứng tại tốc độ cơ học bất kỳ khác với tốc độ đồng bộ, do đó được gọi là *moment không đồng bộ*.

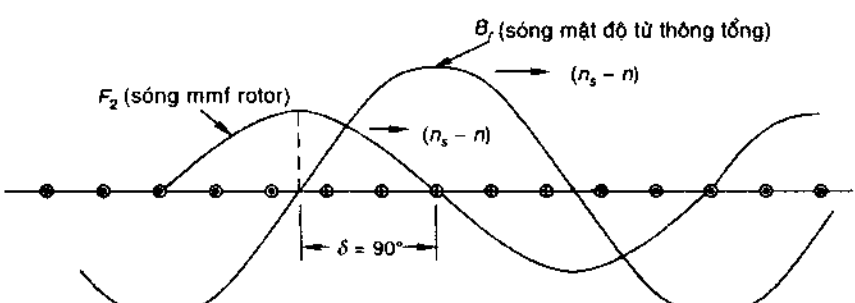
Góc δ là góc trễ của F_2 so với F_1, mmf tổng cần phải biết. Trước khi chuyển sang xác định δ, cần phải chú ý sự ngắn mạch cuộn rotor tương đương với sự ngắn tất cả các dây dẫn ở cuộn này một cách riêng rẽ. Do đó rotor không cần phải được quấn một cách hoàn chỉnh, có thể có cấu tạo gồm các thanh dẫn điện đặt trong các rãnh rotor và được làm ngắn mạch bằng các vành dẫn ở hai đầu rotor. Loại rotor đó được gọi là rotor *lồng sóc* (Hình 5.41). Rotor lồng sóc có chi phí rẻ và kết cấu đơn giản được dùng nhiều trong các thiết kế động cơ cảm ứng. Máy với rotor quấn hoàn chỉnh được gọi là động cơ cảm ứng *rotor dây quấn*, có 3 vành trượt để tăng điện trở ngoài cho cuộn rotor. Các rotor này được dùng với sự khởi động có tải.



Hình 5.41 *Dạng lồng sóc của rotor*

Nói chung, sự trượt tải toàn phần của động cơ cảm ứng lồng sóc tương đối nhỏ, khoảng 3 - 10%. Do đó tổng trở rotor chủ yếu là điện trở, cảm kháng rò rỉ rotor tỉ lệ với $f_2 = sf$ là không đáng kể. Hơn nữa, emf cảm ứng của rotor tỷ lệ với sự trượt rotor khi Φ_r không đổi và quay với tốc độ $n_s - n = sn_s$ so với rotor. Điều này làm cho dòng điện rotor gần như đồng pha với emf rotor và tỷ lệ với sự trượt rotor. Điều này cũng đúng với từng dây dẫn rotor.

Hình 5.42 minh họa sóng mật độ từ thông B_r đi qua các dây dẫn rotor với tốc độ ($n_s - n = sn_s$). Các dòng điện cảm ứng trong các dây dẫn rotor ngắn mạch phân bố theo hàm sine - sự phân bố này dịch chuyển với tốc độ ($n_s - n$) so với



Hình 5.42 *Mật độ từ thông khe không khí tổng và sóng mmf rotor - rotor có tính điện trở.*

rotor khi đồng bộ hóa với sóng B_r. Hơn nữa, do các dây dẫn rotor được coi là có tính điện trở, nghĩa là các dòng điện đồng pha với emf, sự phân phối dòng điện rotor là đồng pha không gian với sóng B_r. Phân phối dòng điện rotor theo hàm sine tạo ra sóng emf rotor cũng theo hàm sine F_2 trễ pha 90^0 so với phân phối dòng điện rotor hoặc 90^0 so với sóng B_r. Do đó, đối với các giá trị độ trượt nhỏ, góc δ trong động cơ cảm ứng được coi là 90^0. Do đó

$$T = kI_2 \text{ (đối với độ trượt nhỏ)} \qquad (5.70)$$

Do emf rotor tỷ lệ thuận với độ trượt, do đó dòng điện rotor đối với rotor có tính điện trở với các giá trị độ trượt nhỏ. Moment trong động cơ cảm ứng tăng tuyến tính với độ trượt khi độ trượt có giá trị nhỏ, là zero đối với s = 0, đây là tốc độ đồng bộ.

Khi độ trượt tăng, cảm kháng rò rỉ của rotor phải được tính đến Giá trị cảm kháng là sx_2, với s là độ trượt, x_2 là cảm kháng rò rỉ rotor/pha với tần số *f*, nghĩa là khi rotor đứng yên. Khi đó dòng điện rotor trễ pha so với emf cảm ứng rotor là

$$\theta = \tan^{-1}\frac{sx_2}{r_2}$$

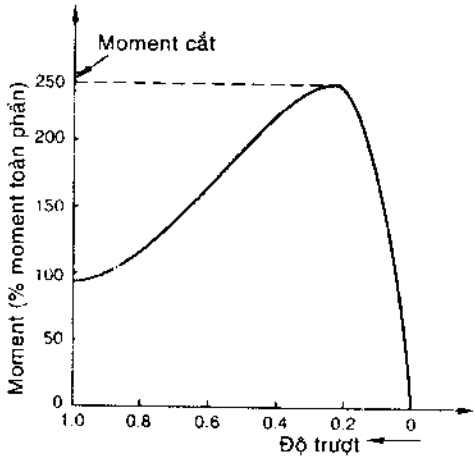
trong đó r_2 là *điện trở rotor/ pha.*

Do các dòng điện trong dây dẫn rotor trễ pha với góc θ so với emf cảm ứng, sự phân phối dòng điện rotor và do đó mmf rotor F_2 dịch chuyển sang trái (Hình 5.40) với góc θ, sao cho

$$\delta = 90^0 + \theta \qquad (5.71)$$

Nghĩa là sin δ < 1. Hơn nữa, do tổng trở rotor tăng theo s, dòng điện rotor nhỏ hơn so với dòng điện tỷ lệ với độ trượt s. Hai yếu tố này làm cho moment động cơ đi qua giá trị đỉnh sau đó giảm dần khi s tiếp tục tăng.

Bản chất của đặc tuyến moment - độ trượt được minh họa trên Hình 5.43. Moment cực đại được gọi là *moment cắt*. Động cơ sẽ dừng lại nếu bị quá tải trong thời gian ngắn với tải moment lớn hơn so với giá trị moment cắt.



Hình 5.43 *Đặc tuyến moment - độ trượt của động cơ đồng bộ*

Như đã đề cập, độ trượt của động cơ cảm ứng là 3 - 10% với tải toàn phần. Do đó, về cơ bản đây là sự truyền động tốc độ không đổi, khác với động cơ đồng bộ có tốc độ đồng bộ độc lập với tải.

Một cách tổng quát có thể thấy động cơ cảm ứng chạy với độ trượt âm hoặc tốc độ $n > n_s$, sẽ là tốc độ cao hơn tốc độ đồng bộ.

Ví dụ 5.12. Máy phát đồng bộ 4 - cực được truyền động với tốc độ 1500 v/ph cấp điện cho động cơ cảm ứng 6 - cực, có tải để chạy với độ trượt 5%. Tốc độ của động cơ là bao nhiêu?

Giải

Tần số của máy phát đồng bộ

$$f = \frac{4 \times 1500}{120} = 50 \text{ Hz}$$

Tốc độ đồng bộ của động cơ cảm ứng

$$n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ vòng / phút}$$

Độ trượt động cơ, s = 0.05

Tốc độ động cơ $= (1 - s)\, n_s = 0.95 \times 1000 = 950$ vòng / phút

Ví dụ 5.13. Động cơ cảm ứng rotor dây quấn, 6 - cực, 50Hz được cấp điện với điện áp định mức và tần số với các vành trượt hở mạch, có điện áp 100 V giữa hai vành bất kỳ. Trong cùng điều kiện đó, rotor được truyền động từ bên ngoài:

a) 1000 v/ph ngược chiều quay của trường stator

b) 1500 v/ph cùng chiều quay của trường stator

Hãy tìm điện áp giữa các vành trượt và tần số trong hai trường hợp nêu trên.

Giải

Tốc độ đồng bộ $\quad n_s = \dfrac{120 \times 50}{6} = 1000$ vòng / phút

(a) $\quad n_1 = -1000$ vòng / phút

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - (-1000)}{1000} = 2$$

Tần số trượt, $\quad sf = 2 \times 50 = 100$ Hz

Điện áp hở mạch cho trước là v_2 = 100 V tương ứng độ trượt s = 1, động cơ là tĩnh tại với rotor hở mạch. Do emf cảm ứng trong cuộn ac tỷ lệ với tần số, emf cảm ứng rotor với độ trượt s (tần số s*f*) là sv_2. Do đó

Điện áp vành trượt = sv_2 = 2 x 100 = 200 V.

(b) n = 1500 vòng / phút

$$s = \frac{1000 - 1500}{1000} = -0.5$$

Tần số trượt = 0.5 x 50 = 25 Hz

Có thể thấy dấu âm bị loại bỏ, nghĩa là sự đảo ngược góc pha của điện áp.

Điện áp vành trượt = 0.5 x 100 = 50V

Có thể thấy máy cảm ứng được coi là *máy biến áp tổng quát hóa* với điện áp rotor và tần số đều tỷ lệ với độ trượt.

Ví dụ 5.14. Stator của động cơ cảm ứng từ Ví dụ 5.13 được cấp điện với tần số và điện áp định mức trong khi các vành trượt được mắc với nguồn 25 Hz.

a) Moment khởi động là bao nhiêu?

b) Tốc độ vận hành ổn định là bao nhiêu?

c) Tốc độ vận hành ổn định là bao nhiêu, nếu rotor được cấp điện với nguồn 50Hz.?

Giải

a) Trong các điều kiện tĩnh tại của rotor, sẽ không có moment khi các trường stator và rotor quay tương đối với nhau, nghĩa là không có moment khởi động.

b) Để vận hành ổn định, trường stator và rotor phải tĩnh tại với nhau.

Tốc độ của trường stator (so với bề mặt stator)

$$= \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ vòng / phút}$$

Tốc độ của trường rotor (so với bề mặt rotor)

$$= \frac{120 \times 25}{6} = 500 \text{ vòng / phút}$$

Sự vận hành đồng bộ ổn định sẽ xảy ra khi rotor quay với tốc độ 500 v/ ph cùng chiều với trường stators.

c) Tốc độ của trường rotor (so với bề mặt rotor)

= 1000 v/ph

(i) Nếu trường rotor quay cùng chiều với stator, sự vận hành (đồng bộ) ổn định chỉ có thể với tốc độ zero. Ở mọi tốc độ khác, hai trường này có sự chuyển động tương đối và sẽ tạo ra moment zero.

(ii) Nếu trường rotor quay ngược chiều với trường stator, sự vận hành (đồng bộ) ổn định sẽ xảy ra khi rotor dịch chuyển với 2000 v/ph cùng chiều với trường stator, đây là tốc độ duy nhất của rotor để hai trường là tĩnh tại tương đối với nhau.

Ghi chú: Động cơ cảm ứng được cấp điện như nêu trên từ cả hai phía stator và rotor sẽ vận hành theo chế độ đồng bộ khác với chế độ cảm ứng.

Ví dụ 5.15. Động cơ cảm ứng 3-pha, 50 Hz, tốc độ 576 v/ph với tải toàn phần

a) Động cơ có bao nhiêu cực?

b) Độ trượt và tần số của dòng điện rotor với tải toàn phần là bao nhiêu? Hãy tính tốc độ rotor so với trường quay.

c) Tốc độ động cơ là bao nhiêu khi tăng gấp đôi độ trượt tải toàn phần ?

d) Điện trở rotor phải tăng bao nhiêu để động cơ chạy với tốc độ 528 v/ph với moment tải toàn phần?

Giải

a) Tốc độ gần đồng bộ nhất, n_s = 600 v/ph

$$P = \frac{120 \times 50}{600} = 10$$

b) $$s = \frac{600 - 576}{600} = 0.04$$

$$f_2 = 0.04 \times 50 = 2 \text{ Hz}$$

Tốc độ rotor so với từ trường quay = 0.04 x 600 = 24 v/ph

c) $$s = 2 \times 0.04 = 0.08$$

$$n = (1 - s)\, ns = (1 - 0.08 \times 600) = 552 \text{ vòng / phút}$$

d) $$s(\text{mới}) = \frac{600 - 528}{600} = 0.12$$

$$\frac{s\,(\text{mới})}{s\,(\text{cũ})} = \frac{0.12}{0.04} = 3$$

Đối với cùng các moment động cơ, dòng điện rotor phải không đổi. Khi độ trượt rotor tăng gấp 3 lần, emf cảm ứng rotor tăng theo cùng hệ số đó. Do đó, để dòng điện rotor không đổi, điện trở rotor phải tăng 3 lần.

Máy dc

Hình 5.13 minh họa các đặc tính cấu trúc cơ bản của máy dc 2 - cực. Stator có cấu trúc cố định với kích thích dc, nghĩa là sóng mật độ từ thông do stator tạo ra tác động lên chu vi rotor là không đổi trong không gian. Để tạo ra moment, phần ứng (rotor) khi có điện phải tạo ra mmf cố định trong không gian khi phần ứng quay. Chương 6 sẽ trình bày chi tiết về các máy dc. Phương trình 5.58 không được dùng để xác định biểu thức moment đối với máy dc.

Sự rò rỉ từ tính trong các máy quay

Từ thông rò rỉ trong các máy quay là từ thông chỉ nối kết với các cuộn stator hoặc chỉ với các cuộn rotor. Do có khe không khí trong mạch từ của các máy, sự rò rỉ từ tính tương đối lớn, không thể bỏ qua trong phân tích mạch, chỉ có thể bỏ qua sự rò rỉ này đối với máy biến áp. Sự rò rỉ từ tính trong các máy điện được chia thành hai nhóm chính:

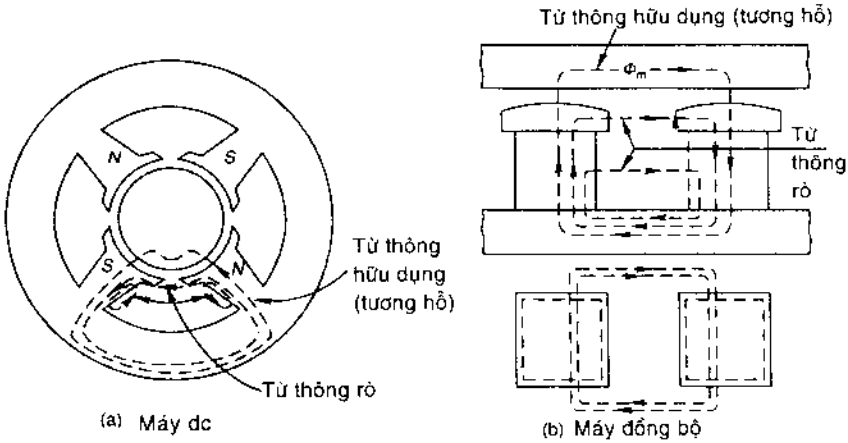
1. Rò rỉ trong các cực chính
2. Rò rỉ trong phần ứng

Rò rỉ trong các cực chính

Các cực chính của máy dc và của máy đồng bộ được kích thích bằng nguồn dc để tạo ra mật độ từ thông phân phối ổn định; sự khác biệt chủ yếu giữa hai loại máy này là các cực của máy dc tạo thành stator và các cực của máy đồng bộ là ở rotor. *Từ thông hữu dụng* là từ thông đi từ các cực chính cắt qua khe không khí và vào phần ứng. Một phần từ thông rò rỉ qua hai đường dẫn (Hình 5.44a) không đi vào phần ứng. Phần này sẽ góp vào từ thông rò rỉ, tác dụng duy nhất là làm tăng mật độ từ thông ở các đáy cực không làm tăng từ thông hữu dụng do đó phải được tính tới khi thiết kế mạch từ trong máy điện. Sự rò rỉ tương tự cũng xảy ra trong các máy đồng bộ (Hình 5.44b)

Rò rỉ trong phần ứng

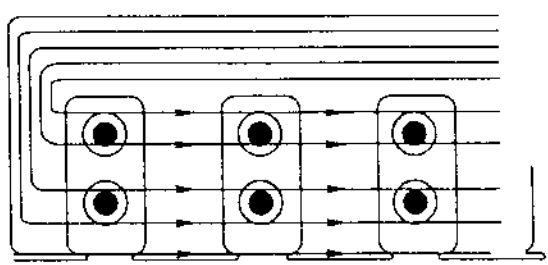
Sự phức tạp khi xác định các đường dẫn rò rỉ trong phần ứng dây quấn nảy sinh do cuộn dây này được phân phối và được lắp trong các rãnh bề mặt



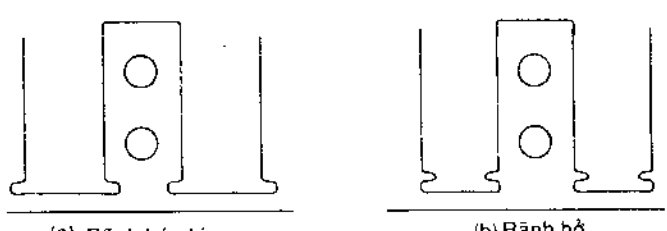
Hình 5.44 *Rò rỉ trong các cực chính*

phần ứng. Từ thông rò rỉ toàn phần của phần ứng có thể chia làm nhiều thành phần như sau:

Rò rỉ trong rãnh. Đây là từ thông theo đường dẫn từ đáy đến đỉnh rãnh (Hình 5.45) và chỉ trong quá trình nối kết các cuộn stator/rotor. Có thể thấy đường dẫn của từ thông rò rỉ rãnh vuông góc với đường dẫn từ thông chính, đi xuống các răng rãnh và một phần rất nhỏ đi thẳng xuống rãnh. Ngoài ra một lượng nhỏ từ thông rò rỉ nối kết các chân dây dẫn đáy trong các rãnh thay vì các dây dẫn ở phía trên. Sự rò rỉ



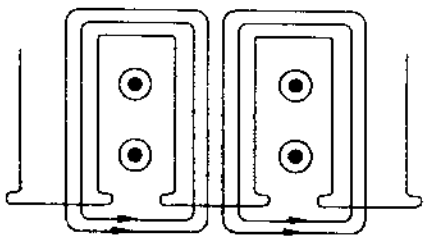
Hình 5.45 *Sự rò rỉ rãnh*



Hình 5.46 *Các dạng rãnh*

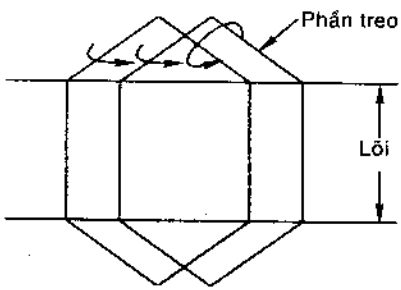
rãnh phụ thuộc chủ yếu vào hình dạng rãnh. Sự rò rỉ này khá lớn trong các rãnh bán kín (Hình 5.46 a) được dùng trong các máy cảm ứng, do khoảng mở của rãnh khá hẹp, khi so với các rãnh mở (Hình 5. 46b) được dùng trong máy dc và máy đồng bộ.

Sự rò rỉ đỉnh răng. Từ thông này đi theo đường dẫn của một răng đến răng kế cận bao kín tất cả các dây dẫn trong rãnh (Hình 5.47). Kiểu rò rỉ từ thông này lớn đối với stator lớn do khe không khí rotor có diện tích lớn. Do đó sự rò rỉ đỉnh răng là nhỏ trong các máy cảm ứng với khe không khi hẹp khi so với các máy đồng bộ có khe không khí lớn.



Hình 5.47 *Sự rò rỉ đỉnh răng*

Sự rò rỉ treo. Đây là từ thông rò rỉ bao quanh các đầu dây dẫn của cuộn dây (stator/rotor) như trên Hình 5.48. Đường dẫn chủ yếu đi qua không khí, nhưng một phần có thể trong lõi sắt. Lượng rò rỉ này phụ thuộc vào phần nhô lên trên lõi của các dây dẫn và vị trí tương đối của chúng so với lõi. Đối với rotor lồng sóc, sự rò rỉ treo hầu như không đáng kể.

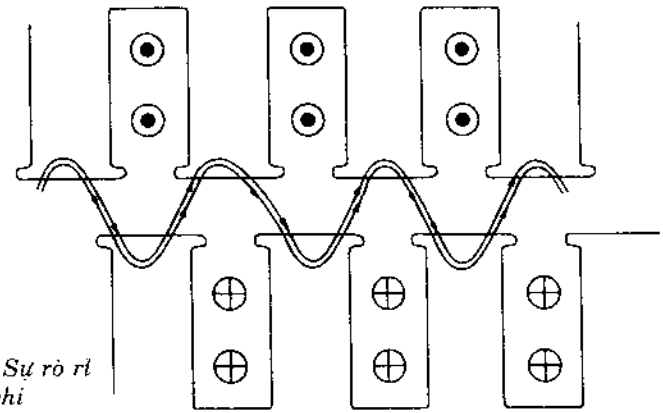


Hình 5.48 *Sự rò rỉ treo*

Sự rò rỉ chữ chi. Trong máy cảm ứng với stator và rotor đều có các rãnh, một phần từ thông lần lượt luân phiên giữa các răng stator và rotor (Hình 5.49). Từ thông này lần lượt nối kết trong các rãnh stator và rotor tạo thành sự rò rỉ chữ chi. Do bản chất loại rò rỉ không hoàn toàn phụ thuộc vào cuộn stator hoặc rotor, một nửa từ thông này nối kết với cuộn stator và nửa kia nối kết với cuộn rotor. Sự rò rỉ này chỉ có trong máy cảm ứng, giá trị là hàm của số phần trăm bước rãnh do răng chiếm chỗ trong rotor và stator và chiều dài khe không khí.

Sự rò rỉ sóng hài. Dạng rò rỉ này xảy ra khi sự phân phối cuộn dây trong stator và rotor là khác nhau. Từ thông chính có thành phần hài không tương ứng với cuộn dây, và có ảnh hưởng đến từ thông rò rỉ.

Cảm kháng rò rỉ. Từ thông rò rỉ của các loại nêu trên luôn luôn liên quan đến sự rò rỉ ở các cuộn dây, do cuộn dây có cảm kháng rò rỉ có thể coi là tham số nối tiếp trong mô hình mạch của máy, có thể làm giảm điện áp trong máy.



Hình 5.49 *Sự rò rỉ chữ chi*

Do các cuộn trường của máy dc và máy đồng bộ có dòng điện một chiều, sự nối kết từ thông rò rỉ nói chung không ảnh hưởng đến hiệu suất hoạt động của loại máy đó.

Tổn thất và hiệu suất

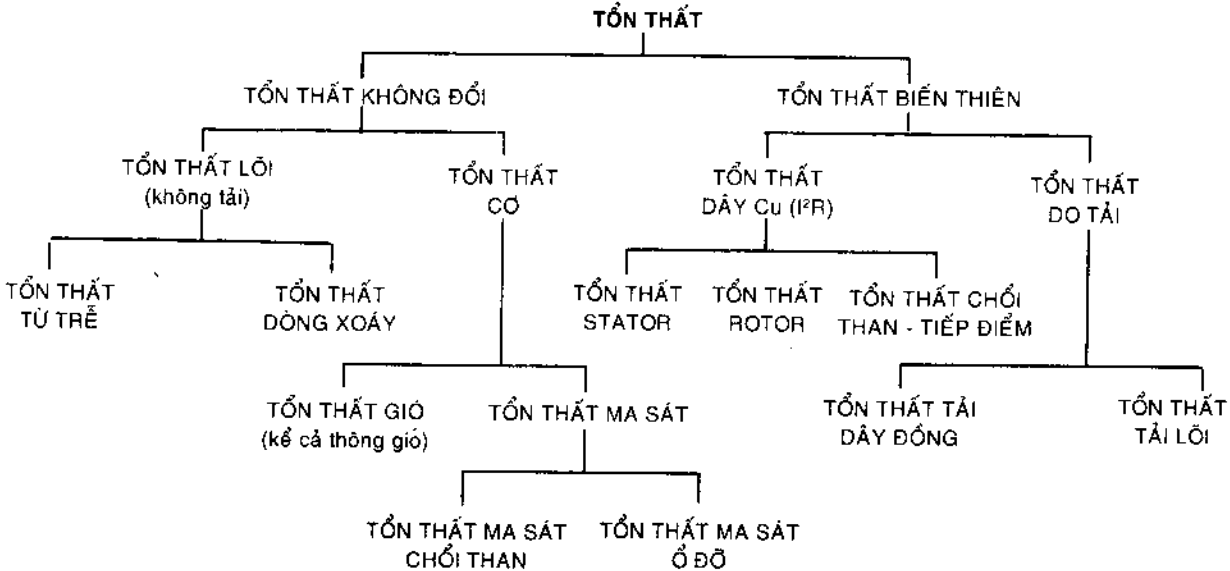
Các tổn thất và hiệu suất của máy biến áp được trình bày trong Chương 3. Cũng như máy biến áp, việc xác định hiệu suất của máy quay sẽ chính xác hơn khi xác định các tổn thất thay vì kiểm tra tải trực tiếp, trong đó phải đo công suất vào và ra. Hơn nữa, trong các máy trung bình và lớn, rất khó đo tải thực tế của máy. Sau khi xác định các tổn thất, hiệu suất của máy (η) có thể được tính từ các quan hệ:

$$\eta = \frac{\text{công suất ra}}{\text{công suất ra + tổn thất}} \text{ ; (đối với máy phát)}$$

$$\eta = \frac{\text{công suất vào - tổn thất}}{\text{công suất vào}} \text{ ; (đối với động cơ)}$$

Hiệu suất khi đó sẽ được xác định chính xác hơn do sai số chỉ có trong phần tổn thất.

Việc nghiên cứu các tổn thất chủ yếu nhằm mục đích thiết kế, do (i) các tổn thất ảnh hưởng trực tiếp đến tính kinh tế của sự vận hành máy, (ii) định mức của máy phụ thuộc vào nhiệt độ cực đại cho phép của lớp cách nhiệt, nhiệt độ này do nhiệt phát sinh trong lõi và các dây dẫn do tổn thất. Định mức của máy đối với kích cỡ khung cho trước và các tổn thất cho trước có thể tăng lên bằng cách thiết kế hợp lý hệ thống thông gió.



Hình 5.50 *Phân loại tổn thất trong các máy quay*

Quá trình chuyển đổi năng lượng trong máy quay bao gồm dòng điện, từ thông, và sự quay, gây ra tổn thất trong các dây dẫn và vật liệu sắt từ, ngoài ra còn có tổn thất cơ học do ma sát khi quay. Các tổn thất có thể được phân loại theo sơ đồ trên Hình 5.50

Tổn thất không đổi

Máy được thiết kế thường để vận hành với nguồn điện áp không đổi và tốc độ hầu như không đổi. Do đó, luôn luôn có các tổn thất hầu như không đổi trong khoảng làm việc của máy, được gọi là tổn thất không đổi, chúng được chia thành tổn thất lõi không tải và tổn thất cơ học.

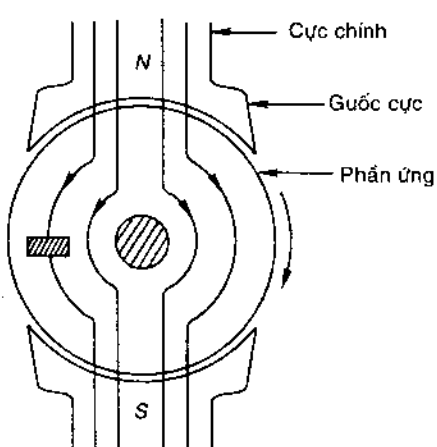
Tổn thất lõi (sắt) không tải

Tổn thất này bao gồm tổn thất do từ trễ và dòng điện bề mặt xảy ra do sự thay đổi mật độ từ thông trong lõi sắt chỉ khi cuộn dây chính được kích thích. Tổn thất lõi chủ yếu tập trung vào phần ứng của máy dc, phần ứng của máy đồng bộ, và stator của máy cảm ứng. Tần số biến thiên mật độ từ thông trong lõi rotor của máy cảm ứng là rất thấp trong các điều kiện vận hành bình thường, do đó thường được bỏ qua.

Đối với máy biến áp, tổn thất lõi nảy sinh do biến thiên thời gian của mật độ từ thông với trục từ thông không đổi; đối với các máy quay, tổn thất này do biến thiên mật độ từ thông và do biến thiên trục từ thông. Do đó tổn thất lõi trong các máy quay lớn hơn trong máy biến áp (Hình 2.17).

Biến thiên thời gian và biến thiên trục của mật độ từ thông trong máy quay được minh họa trên Hình 5.51. Từ Hình này có thể thấy, khi phần ứng quay, mật độ từ thông trong phần tố thể tích của lõi có độ lớn và chiều biến thiên theo chu kỳ.

Tổng tổn thất do từ trễ và do dòng điện bề mặt được gọi là tổn thất xung xảy ra trong máy quay khi tính đến các biến thiên mật độ từ thông tần số cao do các rãnh



Hình 5.51 *Sự quay trục mật độ từ thông và biến thiên độ lớn trong máy quay*

rotor/stator. Đối với máy dc và máy đồng bộ, sự chuyển động tương đối giữa phần ứng có rãnh và các cực gây ra sự biến thiên mật độ từ thông tần số cao trong phần guốc cực do sự khác biệt về trở lực đối với đường từ thông tương ứng các răng và các rãnh (Hình 6.9). Đối với máy cảm ứng, cả stator và rotor đều có các rãnh, tần số xung là khác nhau giữa stator và rotor. Để giảm tổn thất xung, thường sử dụng các guốc cực bằng nhiều lớp thép ghép lại cho máy dc và máy đồng bộ; đối với các máy nhỏ, cực chính cũng có thể ghép bằng nhiều lớp thép.

Tổn thất từ trễ và dòng điện bề mặt trong lõi do sóng làm cho sóng mật độ từ thông hơi trễ pha so với sóng mmf tạo ra moment cản trở sự quay. Đối với điều này, tổn thất lõi tựa như tổn thất cơ học, do moment dòng điện bề mặt và từ trễ sẽ hấp thụ công cơ học từ trục quay. Nói chung, moment này tương đối nhỏ.

Tổn thất cơ học

Tổn thất cơ học bao gồm ma sát chổi than, ma sát ổ đỡ, tổn thất do hệ thống thông gió. Tổn thất cơ học có thể tương đối lớn trong máy có đường kính lớn hoặc tốc độ cao.

Tổn thất lõi không tải và tổn thất cơ học thường được gọi chung là *tổn thất quay không tải*.

Các tổn thất biến thiên

Các tổn thất này thay đổi theo tải, do đó được gọi là tổn thất biến thiên, được chia thành tổn thất dây đồng (I^2R) và tổn thất do tải.

Tổn thất dây đồng (I^2R). Tất cả các dây đều có điện trở (dù nhỏ) do đó tổn thất này liên quan chặt chẽ với cường độ dòng điện. Tổn thất dây đồng có thể được chia thành tổn thất stator, tổn thất rotor, tổn thất tiếp xúc chổi than. Các tổn thất stator và rotor tỷ lệ với bình phương dòng điện và được tính theo điện trở dc của các dây ở 75°C.

Sự dẫn điện giữa các chổi than và cổ góp của máy dc thông qua hồ quang ngắn trong các khe không khí. Do đó, độ sụt áp tại điểm tiếp xúc chổi than hầu như ổn định so với tải; giá trị này khoảng 1 - 2 V. Tổn thất tiếp xúc chổi than trong máy dc tỷ lệ thuận với dòng điện. Tổn thất tiếp xúc giữa chổi than và vành trượt trong máy đồng bộ có thể được bỏ qua.

Tổn thất dây đồng có thể hiện diện trong các cuộn dây trường của máy dc và máy đồng bộ.

Tổn thất tải. Ngoài các tổn thất nêu trên còn có các tổn thất biến thiên theo tải nhưng không liên quan đến dòng điện. Các tổn thất này được gọi là tổn thất tải, xảy ra trong cuộn dây và trong lõi.

(i) *Tổn thất tải do dây.* Tổn thất này xảy ra trong các dây dẫn do sự phân phối dòng điện ac không đổi, làm tăng điện trở hiệu dụng của dây dẫn và được gọi là *hiệu ứng bề mặt.* Hơn nữa, khi dây điện có dòng điện tải, các răng của lõi sẽ bão hòa, làm tăng từ thông đi xuống các rãnh qua dây dẫn đồng do đó tổn thất do dòng điện bề mặt tăng lên.

(ii) *Tổn thất tải do lõi.* Do dòng điện tải trong máy, từ thông trong các răng và lõi bị biến dạng. Mật độ từ thông giảm ở một đầu sóng mật độ từ thông và tăng ở đầu kia. Do tổn thất lõi hầu như tỷ lệ với bình phương mật độ từ thông, sự giảm tổn thất này do giảm mật độ từ thông sẽ thấp hơn so với độ tăng do tăng mật độ từ thông, tổng tổn thất sẽ tăng, đặc biệt là ở các răng.

Trong các điều kiện tải, các răng bị bão hòa do đó sự rò rỉ từ thông qua khung stator tăng lên, đồng thời làm tăng tổn thất do dòng điện bề mặt.

Tổn thất do tải rất khó tính toán một cách chính xác, do đó thường được tính là 1% đối với máy dc, 0.5% đối với máy đồng bộ và máy cảm ứng.

Hiệu suất máy

Do có các tổn thất không đổi và tổn thất biến thiên trong máy, hiệu suất máy tăng với tải cho đến khi đạt được giá trị cực đại ứng với tải chuyên biệt theo thiết kế của máy. Hơn nữa, hiệu suất tải toàn phần biến thiên theo định mức của máy và cao hơn rõ rệt đối với các máy cỡ lớn; ví dụ, hiệu suất khoảng 75% đối với máy 1kW, 90% đối với máy 35kW, 93% đối với máy 350 kW,.... Hiệu suất của máy tốc độ thấp thường thấp hơn các máy tốc độ cao khoảng 3 - 4%.

Đối với sự vận hành máy theo tốc độ và điện áp không đổi, các tổn thất nêu trên có thể được tính theo các công thức:

(1) Tổn thất không đổi

$$P_k = P_{i0} + P_{wf} \tag{5.72}$$

trong đó P_{i0} *tổn thất lõi không tải* (không đổi)

P_{wf} *tổn thất thông gió và ma sát* (không đổi)

(2) Tổn thất biến thiên

$$P_v = P_c + P_{st} + P_b \tag{5.73}$$

trong đó $P_c = 3I^2R$ tổn thất dây đồng (hệ số 3 không có trong máy dc); R là tham số điện trở của máy.

P_{st} tổn thất tải (dây đồng + lõi sắt) = αI^2

(tổn thất tải được giả thiết là tỷ lệ với bình phương dòng điện tải)

$P_b = V_b I$ tổn thất tiếp xúc chổi than (trong máy dc), V_b là độ sụt điện áp tiếp xúc chổi than.

Do đó $P_v = 3I^2R + \alpha I^2 + V_b I = (3R + \alpha)I^2 + V_b I = K_v I^2 + V_b I$ (5.74)

Tổng các tổn thất có thể được tính theo hàm của dòng điện

$$P_L = P_k + K_v I^2 + V_b I \qquad (5.75)$$

Máy phát điện

Công suất ra, $P_{ra} = CVI$

C = hằng số ($\sqrt{3} \times pf$ đối với máy ac 3 - pha)

V = điện áp máy

Hiệu suất

$$\eta = \frac{P_{ra}}{P_{ra} + P_L}$$

$$= \frac{CVI}{CVI + P_k + K_v I^2 + V_b I} \qquad (5.76\ a)$$

$$= \frac{CV}{(CV + V_b) + \left(\frac{P_k}{I} + K_v I\right)} \qquad (5.76b)$$

Hiệu suất cực đại đạt được khi mẫu số của phương trình 5.76 là cực tiểu

$$\frac{P_k}{I} = K_v I \qquad (5.77)$$

$$P_k = K_v I^2$$

Đây là hiệu suất cực đại đạt được với tải khi các tổn thất tỷ lệ với bình phương dòng điện bằng các tổn thất không đổi. Điều này cũng đúng với máy biến áp (Pt 3.55)

Các động cơ

Công suất vào, $P_{vào} = CVI$

Hiệu suất $\eta = \frac{P_{vào} - P_L}{P_{vào}} = \frac{CVI - P_k - K_vI^2 - V_bI}{CVI}$ (5.78 a)

$$= \frac{(CV - V_b) - \left(\frac{P_k}{I} + K_vI\right)}{CV} \quad (5.78b)$$

Hiệu suất cực đại

$$P_k = K_vI^2 \quad (5.79)$$

khi tổn thất không đổi bằng tổn thất tỷ lệ với bình phương dòng điện

Theo các điều kiện của Pt 5.77 và 5.79 đối với hiệu suất cực đại, các tổn thất không đổi và các tổn thất biến thiên (hằng số tỷ lệ K_v) được xác định bằng cách lựa chọn kích thước máy để đạt được hiệu suất cực đại tương ứng tải toàn phần. Các tổn thất không đổi được xác định chủ yếu bằng cách lựa chọn mật độ từ thông và khối lượng sắt, các tổn thất biến thiên được xác định theo lựa chọn mật độ dòng điện và khối lượng đồng được dùng. Hơn nữa, mật độ từ thông bị giới hạn theo các giá trị bão hòa và mật độ dòng điện bị giới hạn theo nhiệt độ (tùy theo loại cách nhiệt). Do đó, việc điều chỉnh hiệu suất máy để đạt được giá trị cực đại với tải cho trước chính là xác định tỷ lệ vật liệu sắt và đồng được dùng trong máy.

Công suất ra cực đại

Xét một ví dụ về động cơ điện, công suất ra là

$$P_{ra} = CVI - P_k - K_vI^2 - V_bI$$

Có thể giả thiết V_b nhỏ và được bỏ qua, do đó

$$P_{ra} = CVI - P_k - K_vI^2$$

Công suất ra cực đại

$$\frac{dP_{ra}}{dI} = CV - 2K_vI = 0$$

hoặc $$I = \frac{CV}{2K_v}$$

Công suất ra cực đại được tính theo

$$P_{ra}(max) = CV\left(\frac{CV}{2K_v}\right) - P_k - K_v\left(\frac{CV}{2K_v}\right)^2 = \frac{(CV)^2}{4K_v} - P_k$$

Công suất vào

$$P_{vào} = CVI = \frac{(CV)^2}{2K_v}$$

Hiệu suất với công suất ra cực đại

$$\eta = \frac{(CV)^2 / 4K_v - P_k}{(CV)^2 / 2K_v}$$

Giá trị này hơi thấp hơn 50%. Đây là giá trị quá thấp để có thể chấp nhận đối với động cơ điện. Hơn nữa, khi vận hành với công suất cực đại, các tổn thất chiếm đến một nửa công suất cung cấp, không thể giới hạn độ tăng nhiệt độ đến giá trị cho phép. Do đó, các động cơ điện không được phép vận hành với công suất ra cực đại. Trong thực tế, chúng chỉ vận hành với tải (gần tải toàn phần) tại đó hiệu suất là cực đại. Điều này ngược với các linh kiện điện tử (tiêu thụ công suất thấp), thường được vận hành với công suất ra cực đại, do tổng công suất rất nhỏ, hiệu suất không đóng vai trò quan trọng.

Định mức và sự tiêu tán tổn thất

Định mức

Định mức của máy phát điện đồng bộ là điện áp vận hành, tần số, tốc độ, kVA hoặc MVA với hệ số công suất cho trước. Đối với các động cơ, công suất được tính theo kW (đôi khi được tính theo mã lực). Máy dc được ghi định mức theo điện áp và công suất kW. Các yêu cầu tần số của máy ac thường được tính theo tần số chuẩn, 50Hz, ở Bắc Mỹ là 60 Hz. Điện áp định mức được xác định theo giá trị tiêu chuẩn, 230V/400V/3.3kV/6.6kV/11kV.

Lớp cách nhiệt được sử dụng với yêu cầu chịu được nhiệt độ cho trước từ đó có thể xác định tuổi thọ của máy. Tuổi thọ của máy sẽ giảm một nửa khi độ tăng nhiệt độ là 8 - 10°C. Tuổi thọ trung bình của các máy điện thường được chấp nhận trong khoảng 10 - 30 năm, nhiệt độ cao nhất của lớp cách nhiệt trong máy được giới hạn theo giá trị chuẩn của vật liệu cách nhiệt. Công suất cực đại máy có thể cung cấp không vượt quá độ tăng nhiệt độ cho trước cao hơn nhiệt độ môi trường (40°C) được gọi là định mức liên tục của máy. Định mức liên tục của máy, được xác định theo độ tăng nhiệt độ, giới hạn các tổn thất máy, thường bảo đảm giá trị hiệu suất của máy trong khoảng cho phép.

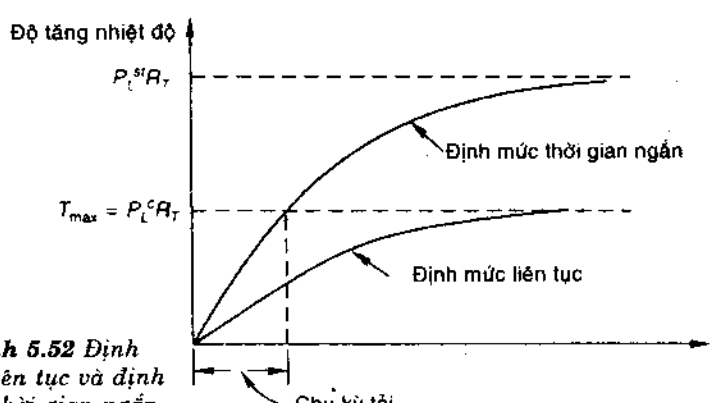
Cả đồng và sắt đều là nguồn gây ra tổn thất trong máy, sự phân bố nhiệt độ trong máy là rất phức tạp. Vấn đề này thường được đơn giản hóa bằng cách gán giá trị nhiệt độ để xác định trạng thái nhiệt của máy. Nhiệt độ này được xác định bằng sự tăng điện trở của các cuộn dây khi đo các đầu dây của máy.

Sự cách nhiệt đối với các máy công nghiệp được phân loại theo Cấp B, Cấp F, và Cấp H. Cách nhiệt Cấp B bao gồm mica, sợi thủy tinh,..., với các chất liên kết thích hợp. Độ tăng nhiệt độ cao nhất (trên nhiệt độ môi trường 40^0C) được phép đối với cấp cách nhiệt này là 130^0C. Cách nhiệt Cấp F gồm các chất tổng hợp, có khả năng chịu được nhiệt độ đến 155^0C, Cấp H phải chịu được đến 180^0C.

Động cơ định mức liên tục phải vận hành ổn định với biến thiên điện áp định mức ± 10% và biến thiên tần số định mức ± 5%. Các động cơ này có biên an toàn sao cho có khả năng chịu được sự quá tải thời gian ngắn là 25% với độ sụt áp 10% nhưng không làm tăng nhiệt độ quá mức.

Trong các ứng dụng công nghiệp, đòi hỏi động cơ chịu tải trong các khoảng thời gian ngắn sau các khoảng làm nguội dài. Các động cơ này được tính *định mức theo thời gian ngắn* với các khoảng tiêu chuẩn 5, 15, 20, 30, 60 phút. Các động cơ được thiết kế đặc biệt trong lõi sắt và nhiệt độ cao trong dây đồng. Chúng có khả năng tạo ra moment quay tốt hơn nhưng khả năng chịu nhiệt thấp hơn so với động cơ định mức liên tục.

Định mức thời gian ngắn của động cơ định mức liên tục phải lớn hơn nhiều so với định mức liên tục do sự tích tụ nhiệt trong máy khi truyền nhiệt trong quá trình tải thời gian ngắn (Hình 5.52). Nhiệt chuyển tiếp biến thiên theo hàm số mũ với độ tăng nhiệt độ ổn định là P_LR_T, trong đó P_L là tổn thất nhiệt với tải cho trước và R_T là nhiệt trở tổng quát của hệ thống làm nguội. Từ Hình 5.22 có thể thấy, tổn thất tải thời gian ngắn được phép đối với khoảng thời gian tải cho trước lớn hơn tổn thất tải liên tục với điều kiện không vượt quá độ tăng nhiệt độ cho phép. Do đó, khi khoảng thời gian chịu tải giảm, định mức thời gian ngắn của động cơ tăng.



***Hình 5.52** Định mức liên tục và định mức thời gian ngắn*

Trong các ứng dụng công nghiệp, vấn đề cơ bản là xác định giá trị định mức liên tục của động cơ trong chu kỳ tải cho trước, ví dụ, chu kỳ tải của máy bào, trong hành trình tiến của máy, động cơ chịu tải toàn phần, hành trình lui của máy động cơ không tải. Phương pháp tin cậy để lựa chọn động cơ, có thể giải quyết các tổn thất động cơ tỷ lệ với bình phương tải (tổn thất I^2R). Tổn thất trung bình trong chu kỳ tải tỷ lệ với

$$\left[\frac{\sum (\text{kW})^2 \times \text{thời gian}}{\sum \text{thời gian}}\right]$$

trong đó, kW là tải động cơ trong một chu kỳ tải. Động cơ định mức liên tục có cùng giá trị tổn thất được tính theo

$$(\text{kW})^2_{\text{định mức liên tục}} = \left[\frac{\sum (\text{kW})^2 \times \text{thời gian}}{\sum \text{thời gian}}\right]$$

hoặc

$$(\text{kW})_{\text{định mức liên tục}} = \sqrt{\frac{\sum (\text{kW})^2 \times \text{thời gian}}{\sum \text{thời gian}}} = (\text{kW})_{\text{rms}} \quad \text{(của chu kỳ tải)}$$

Nếu khoảng không tải là một phần trong chu kỳ tải (chẳng hạn động cơ của máy nâng chuyển) quan hệ nêu trên được viết dưới dạng

$$(\text{kW})_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum (\text{kW})^2 \times \text{thời gian}}{\text{thời gian chạy} + (\text{thời gian dừng} / \text{k})}} \qquad (5.80)$$

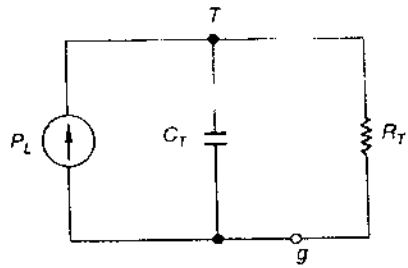
trong đó hằng số ($k > 1$) tính đến sự thông gió không hoàn hảo trong chu kỳ không tải. Đối với các động cơ kiểu mở, k bằng 4. Từ phương trình 5.80 có thể giả thiết chu kỳ tải là đủ nhỏ hơn so với thời gian động cơ đạt tới độ tăng nhiệt độ ổn định khi chịu tải liên tục đến giá trị định mức.

Hình 5.53 minh họa mô hình mạch tương đương đơn giản hóa của máy về sự truyền nhiệt. Nhiệt độ (biểu thị trạng thái nhiệt tổng quát của máy) được đo theo quy chiếu nền (nhiệt độ môi trường), với các đại lượng:

P_L: Tổn thất động cơ tính theo đơn vị nhiệt.

R_T: Nhiệt trở chung của hệ thống làm nguội.

C_T: Nhiệt dung của máy.



***Hình 5.53**. Mô hình mạch về nhiệt*

Phương trình vi phân về chuyển tiếp nhiệt là:

$$C_T \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_T} = P_L$$

Nghiệm đối với độ tăng nhiệt độ ban đầu ở 0^0C (máy khởi động) là

$$T(t) = T_s(1 - e^{-t/\tau})$$

với $\tau = R_T C_T$: hằng thời gian nhiệt.

$T_s = P_L R_L$: độ tăng nhiệt độ trạng thái ổn định.

Sự tiêu tán tổn thất (làm nguội)

Để tăng tuổi thọ của lớp cách nhiệt đến giá trị chấp nhận được, nhiệt phát sinh do tổn thất trong máy phải được tiêu tán đủ nhanh để độ tăng nhiệt độ không vượt quá giới hạn cho phép ứng với nhiệt độ môi trường xung quanh. Đây là quá trình truyền nhiệt, cho phép giảm kích cỡ máy với định mức cho trước.

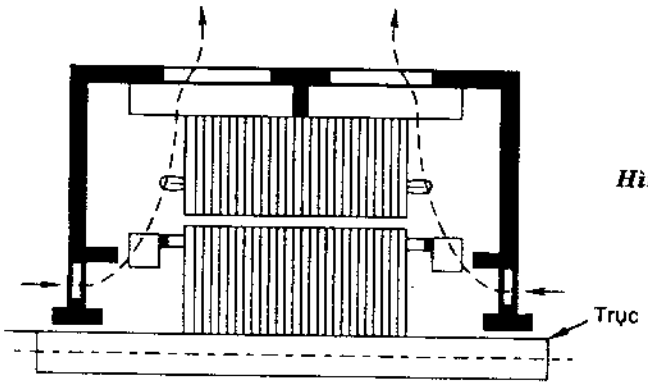
Sự làm nguội phối hợp giữa dẫn nhiệt và đối lưu cưỡng bức thường được áp dụng để giải nhiệt cho các máy điện. Do sự giới hạn độ tăng nhiệt độ, sự truyền nhiệt bằng bức xạ hầu như không có ý nghĩa đối với thiết bị điện.

Sự thông gió hướng tâm thường được sử dụng khi tác động ly tâm của rotor được tăng cường bằng quạt rotor. Hình 5.54 minh họa sơ đồ thông gió hướng tâm thích hợp cho các máy đến 20kW.

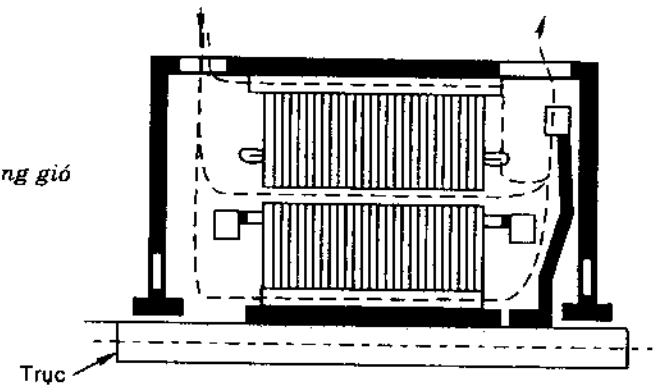
Sự thông gió hướng trục (Hình 5.55) được dùng cho máy có công suất trung bình với tốc độ cao.

Thông gió kết hợp hướng trục và hướng tâm được dùng cho các máy cỡ lớn và động cơ cảm ứng (Hình 5.56).

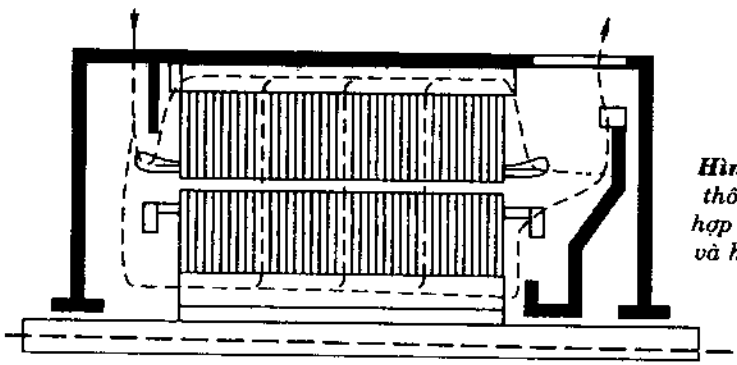
Các máy khép kín hoàn toàn thường có vấn đề thông gió đặc biệt do bên trong máy không có đường dẫn với không khí bên ngoài. Trong các máy này



Hình 5. 54 *Sự thông gió hướng tâm*



Hình 5.55 *Sự thông gió hướng trục*



Hình 5.56 *Sự thông gió kết hợp hướng tâm và hướng trục.*

nhiệt được truyền đến vách bằng quạt bên trong và từ đó được truyền ra xung quanh bằng quạt bên ngoài lắp trên trục máy. Sự làm nguội máy khép kín hoàn toàn không thể đạt hiệu quả như máy kiểu mở.

Các tổn thất tỷ lệ với thể tích của vật liệu tăng theo hàm bậc 3, bề mặt làm nguội tăng theo hàm bậc 2. Do đó, vấn đề giải nhiệt trở nên quan trọng đối với các máy phát điện kiểu turbine.

Đối với các máy lớn có thể đòi hỏi nhiều tấn không khí/ giờ, sự đối lưu cưỡng bức được dùng khi không khí đi qua bộ lọc làm sạch trước khi đi vào máy để làm nguội.

Làm nguội bằng hydro. Đối với các máy phát điện cỡ lớn, hydro thường được dùng làm môi chất làm nguội trong mạch kín. Hydro có các tính chất đặc biệt thích hợp để làm nguội.

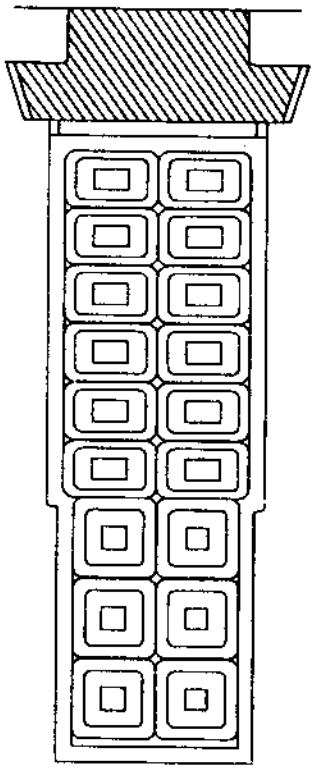
1. Tỷ trọng hydro bằng 1/14 của không khí khi có cùng nhiệt độ và áp suất, do đó làm giảm tổn thất và tiếng ồn
2. Trên cơ sở cùng trọng lượng, nhiệt dung riêng của hydro gấp 14 lần không khí.
3. Khả năng truyền nhiệt của hydro bằng đối lưu cưỡng bức trên bề mặt nóng bằng 1.5 lần so với không khí
4. Hệ số dẫn nhiệt của hydro gấp 7 lần không khí.
5. Sử dụng môi trường hydro, tuổi thọ của lớp cách nhiệt tăng lên, giảm chi phí bảo trì, do không có bụi, hơi ẩm, oxy.
6. Hỗn hợp hydro - không khí không bị nổ khi hàm lượng không khí dưới 30%.

Để tránh không khí rò rỉ vào mạch hydro, áp suất hydro luôn luôn cao hơn 1 atm. Khi tăng áp suất cho hydro để làm nguội máy, hiệu suất vận hành của máy sẽ tăng lên, do giảm tổn thất bên trong máy.

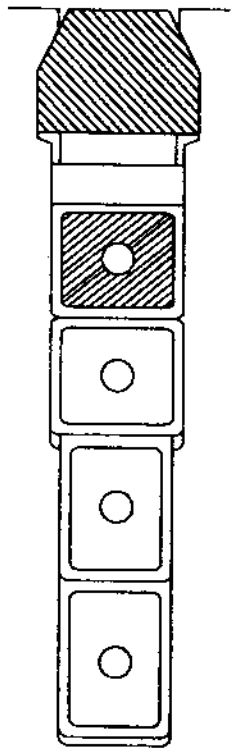
Máy và bộ trao đổi nhiệt làm nguội bằng nước dùng để làm nguội hydro được bố trí trong hộp kín khí. Vấn đề cơ bản là làm kín các ổ đỡ trục.

Làm nguội trực tiếp bằng khí. Đối với máy công suất trên 100 MW, chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt cách nhiệt của dây dẫn là đủ cao, cho phép tiếp xúc trực tiếp giữa môi chất làm nguội và dây dẫn. Để làm nguội, dây dẫn rotor là các ống rỗng (Hình 5.57) qua đó hydro tuần hoàn để làm nguội các dây dẫn.

Làm nguội trực tiếp bằng nước. Các máy phát điện công suất lớn có lõi stator được làm nguội bằng hydro, các cuộn dây rotor và stator được làm



Hình 5.57 *Làm nguội trực tiếp bằng khí*



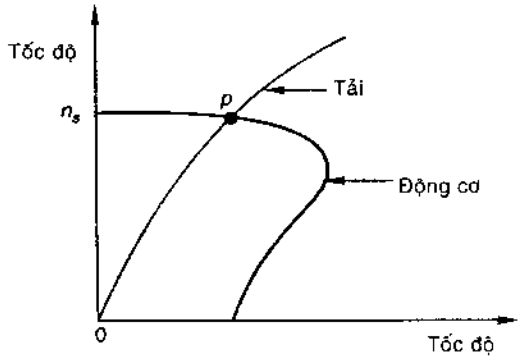
Hình 5. 58 *Làm nguội trực tiếp bằng nước*

nguội trực tiếp bằng nước. Tốc độ tuần hoàn nước không quá 2.5m/s để tránh ăn mòn bề mặt. Hình 5.8 minh họa sự làm nguội trực tiếp bằng nước cho cuộn rotor.

Tương hợp các đặc tính của máy điện và tải

Máy và tải là hai thành phần của hệ thống chuyển đổi năng lượng điện - cơ, nói chung, các đặc tính của máy có tính quyết định đối với sự vận hành của hệ thống.

Khi lựa chọn động cơ điện, cần biết đặc tuyến tốc độ - moment với độ chính xác đủ cao, đồng thời bảo đảm độ tương hợp với đặc tuyến tốc độ - moment của tải cơ học. Hình 5.59 minh họa đặc tuyến tốc độ - moment của



Hình 5.59 *Điểm vận hành ổn định của hệ thống động cơ - tải*

động cơ cảm ứng của tải kiểu quạt (moment tải tỷ lệ với bình phương tốc độ). Điểm vận hành *ổn định* là giao điểm P của hai đặc tuyến này. Từ Hình 5.59 có thể thấy, điểm vận hành ổn định và hệ thống máy - tải trở lại điểm này sau một khoảng thời gian ngắn.

Các đặc tính của tải cơ học có thể phân loại như sau:

1. *Tải tốc độ không đổi.* Có thể có hai loại, một số tải đòi hỏi tốc độ hầu như không đổi khi moment tải thay đổi, ví dụ các máy công cụ, các bơm thủy lực, các quạt. Một số tải đặc biệt, chẳng hạn máy xeo giấy đòi hỏi tốc độ xác định độc lập với moment tải.

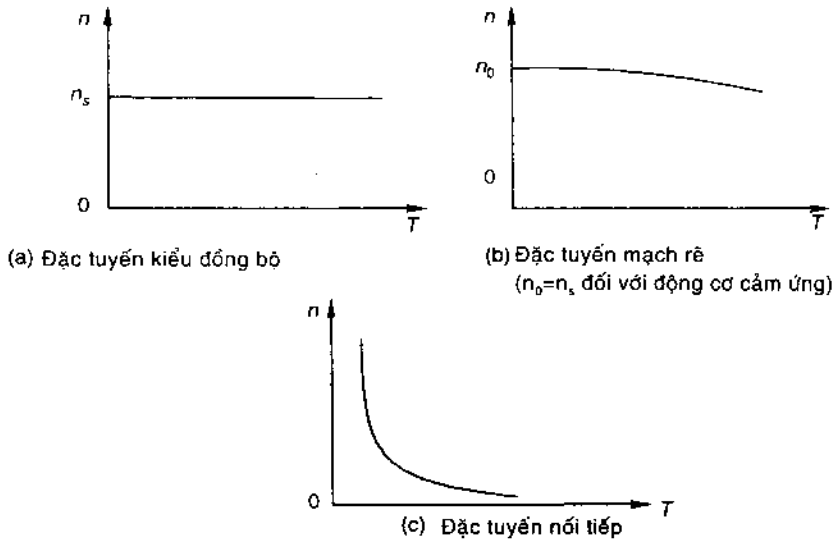
2. *Tải tốc độ biến thiên.* Một số tải, chẳng hạn các thiết bị nâng hạ, đòi moment cao với tốc độ thấp và moment thấp với tốc độ cao sao cho công suất hầu như không đổi. Điều này thường được sử dụng đối với tải có quán tính lớn đòi hỏi tăng tốc.

3. *Tải tốc độ điều chỉnh được.* Đây là loại tốc độ ổn định và điều chỉnh được, thường dùng trong một số máy công cụ, nói chung khoảng tốc độ cần điều chỉnh tương đối lớn.

Các đặc tuyến động cơ có thể phân loại như sau:

1. *Kiểu tốc độ không đổi.* Tốc độ không đổi và độc lập với tải (Hình 5.60a), đây là đặc trưng của động cơ đồng bộ.

2. *Kiểu mạch rẽ.* Tốc độ động cơ giảm vài phần trăm từ không có tải đến tải toàn phần (Hình 5.60b). Động cơ cảm ứng (trong khoảng vận hành) và động cơ dc mạch rẽ có đặc tính này.



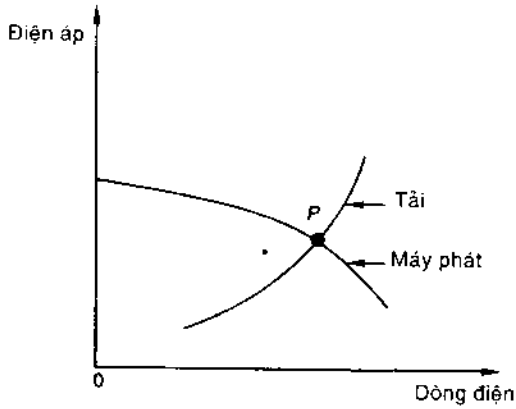
Hình 5.60 *Các kiểu đặc tuyến động cơ*

3. *Kiểu nối tiếp*. Tốc độ tăng nhanh khi moment tải giảm (Hình 5.60c). Động cơ nối tiếp dc có đặc tính này, thường được dùng cho các tải kéo.

Các truyền động tốc độ điều khiển được đòi hỏi điều chỉnh 3 đặc tính động cơ. Từ các Chương 7, 8, 9 có thể thấy, điều này được thực hiện với động cơ dc dễ dàng hơn động cơ ac. Điều khiển công suất bằng mạch điện tử (Chương 11) bắt đầu được sử dụng rộng rãi để điều khiển tốc độ cho các truyền động bằng động cơ.

Các đặc tính gia tốc (khởi động) và giảm tốc (dừng) của hệ thống động cơ tải cũng rất quan trọng trong các ứng dụng công nghiệp. Hệ thống phải có khả năng đạt được tốc độ toàn phần từ trạng thái đứng yên và có khả năng dừng lại trong khoảng thời gian cho trước. Các yêu cầu này đặc biệt quan trọng khi khởi động có tải, khi dừng nhanh, và khi đảo chiều quay. Động cơ có 3 vùng vận hành - tạo moment, truyền động, dừng. Trong vùng tạo moment, động cơ sẽ chuyển năng lượng quán tính đến nguồn điện cung cấp để hệ thống không bị ảnh hưởng bởi tốc độ cao. Trong vùng dừng, động cơ hấp thụ năng lượng cơ học (và một phần năng lượng điện) chuyển thành tổn thất nhiệt. Động cơ dc có đặc tính vận hành và dừng tốt hơn so với động cơ cảm ứng ac.

Tương tự các động cơ, điểm vận hành của hệ thống máy phát - tải được xác định bằng các đặc tuyến được nêu trên Hình 5.61 (máy phát điện dc mạch rẽ). Trong các hệ thống hiện đại, máy phát vận hành song song với việc cung cấp



Hình 5.61 *Điểm vận hành ổn định của hệ thống máy phát - tải*

điện cho các tải trải rộng trên các vùng địa lý thông qua hệ thống truyền tải điện. Hệ thống này phải đáp ứng điện áp không đổi khi tải thay đổi trong khoảng rộng.

Tóm tắt

Trong chương này, các đặc tính chung sau đây của các máy điện quay được đề cập - các cuộn ac, emf, và mmf của cuộn ac, khái niệm về từ trường quay và quá trình tạo ra moment do sự tương tác của hai trường đó. Thông qua các biểu thức về emf và moment, có thể thấy năng lực của máy đối với kích cỡ khung cho trước, bị giới hạn bởi (i) mật độ từ thông bão hòa trong phần sắt của máy, (ii) khả năng dẫn dòng điện của các cuộn dây bị giới hạn bởi độ tăng nhiệt độ. Sự tăng hiệu suất máy và giảm chi phí/đơn vị công suất được thực hiện qua nhiều năm chủ yếu do sự cải tiến về chất lượng và các đặc tính của các loại vật liệu cách nhiệt, dẫn điện, và từ tính. Hướng quan trọng là giải nhiệt cho thiết bị sao cho giới hạn sự tăng nhiệt độ được phép trong vật liệu cách nhiệt bảo đảm sự vận hành tối ưu của thiết bị. Nhiều nghiên cứu được thực hiện và ứng dụng trong lĩnh vực điều khiển hoạt động của máy điện, đặc biệt là các ứng dụng điện tử trong máy điện.

Hiện nay, về mặt lý thuyết đã đạt được các mô hình toán học đơn giản cho các máy điện quay, từ đó cho phép các cải tiến cơ bản trong thiết kế và chế tạo máy điện.

Chương 6

Các cuộn dây phần ứng

Giới thiệu

Các cuộn dây trường và cuộn dây phần ứng là các phần cơ bản của máy điện. Các cuộn dây trường đơn giản là các sắp xếp với các cuộn dây tập trung (tất cả các vòng dây đều có chung trục từ). Các cuộn dây phần ứng gồm nhiều cuộn dây (một hoặc nhiều vòng) được xếp trong các rãnh cách đều theo chu vi phần ứng. Các emf cảm ứng trong các cuộn dây phần ứng gây ra sự chuyển động tương đối giữa chúng và sóng B trong khe không khí được thiết lập từ các cuộn trường. Trong máy ac (3 - pha) các cuộn phần ứng được nối kết đối xứng để tạo thành một bộ ba pha cân bằng (độ lớn emf bằng nhau với độ lệch pha $2/3\pi$ rad). Trong máy dc các cuộn phần ứng được nối qua các vành góp. Từ Chương 5 có thể thấy, khi cuộn phần ứng có dòng điện, sẽ tạo thành cùng số lượng các cực (Bắc - Nam) luân phiên.

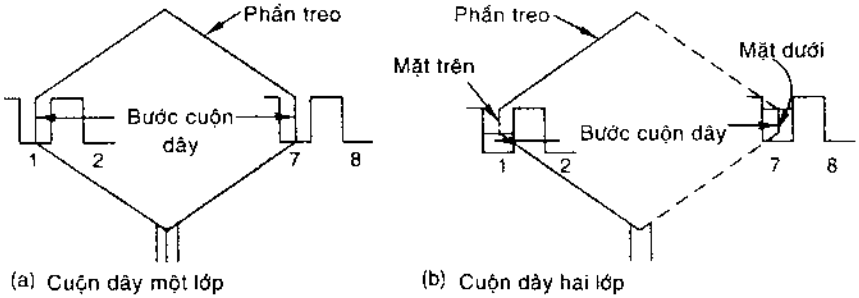
Cuộn dây có thể là một vòng có hai dây dẫn với các nối kết đầu dây hoặc nhiều vòng với hai phía cuộn dây gồm nhiều dây dẫn. Chiều dài phía cuộn dây hoạt động trong đó emf cảm ứng, bằng chiều dài phần ứng (nơi thiết lập mật độ từ thông). *Bước cuộn dây* là góc không gian (góc điện) giữa hai phía cuộn dây và phải bằng số nguyên lần các rãnh. Bước cuộn dây có thể là nguyên (bằng một bước cực hoặc 180^0 điện) hoặc bước ngắn (theo cung nhỏ hơn 180^0). Bước cuộn dây có thể tính theo khoảng cách góc hoặc khoảng cách giữa các rãnh. Số rãnh/cực phải là số nguyên đối với cuộn dây bước nguyên.

Thực tế có hai kiểu quấn dây, một lớp và hai lớp. Trong quấn dây một lớp, mỗi phía cuộn dây chiếm trọn vẹn một rãnh (Hình 6.1 a). Trong quấn dây lớp đôi, một phía cuộn dây chiếm phần trên trong một rãnh và phía thứ hai chiếm phần dưới trong rãnh kế cận theo bước cuộn dây (Hình 6.1 b). Trong quấn dây lớp đôi, mỗi rãnh chứa hai phía cuộn dây chồng lên nhau, được gọi là phía cuộn dây trên và dưới. Từ Hình 6.1 có thể thấy

U = 2 phía cuộn dây/rãnh (6.1 a)

C = S/ 2 (quấn dây một lớp) (6.1 b)

C = S (quấn dây hai lớp) (6.1 c)



***Hình 6.1** Quấn dây một lớp và hai lớp*

trong đó C = số cuộn dây phần ứng

S = số rãnh phần ứng

Sự khác biệt chủ yếu giữa quấn dây một lớp và hai lớp là sự sắp xếp phần treo phía trên. Trong quấn dây một lớp, các cuộn dây được sắp xếp theo nhóm và phần treo của một nhóm cuộn dây cắt qua nhóm kia bằng cách điều chỉnh kích cỡ (tương ứng chiều dài trục phần ứng) và hình dạng của các nhóm cuộn dây riêng rẽ. Điều này có nghĩa là nhiều loại cuộn dây khác nhau về kích cỡ và hình dạng do đó làm tăng chi phí sản xuất. Do đó, quấn dây một lớp ít được sử dụng trong các máy điện hiện đại.

Trong quấn dây hai lớp, tất cả các cuộn dây đều đồng nhất về kích cỡ và hình dạng (thường có dạng hình thoi, Hình 5.21) với hai phía cuộn dây trong hai mặt phẳng khác nhau. Mỗi rãnh có một phía cuộn dây ở dưới và phía cuộn dây thứ hai ở trên. Ở mỗi đầu cuộn dây hình thoi có sự sắp xếp gần như đối xứng.

Các cuộn dây máy DC đều được quấn dây 2 - lớp.

Các chỉ danh kỹ thuật

S = số rãnh (phải chia cho 3 trong máy ac 3 - pha)

C = số cuộn dây

2C = số các phía cuộn dây

N_c = số vòng/ cuộn

S/ P = số rãnh/cực, bước cực tính theo rãnh

γ = 180^0P/ S góc rãnh (điện) hoặc bước - rãnh (độ lệch góc giữa các điểm giữa của các rãnh kế nhau)

q = số pha

β = 2 π/ q, độ lệch pha thời gian giữa emf của các pha liên tiếp

m = số rãnh/ cực/pha (SPP)

A = số các đường dẫn song song

Trong các máy ac có thể chỉ có một hoặc nhiều đường dẫn trong pha song song (mỗi pha là một mạch hở); nhưng các cuộn máy dc luôn luôn là kiểu mạch kín với các đường dẫn song song là số chẵn.

Trong các cuộn dây máy dc lớn có thể có hơn một phía cuộn dây ở nửa trên và nửa dưới của rãnh. Chỉ danh đặc biệt đối với cuộn dây máy dc là:

U = 2C/ S, số phía cuộn dây/rãnh (số chẵn).

$Z_s = UN_c$, số dây dẫn/ rãnh.

$Z = 2CN_c$, tổng các dây dẫn phần ứng.

Ghi chú

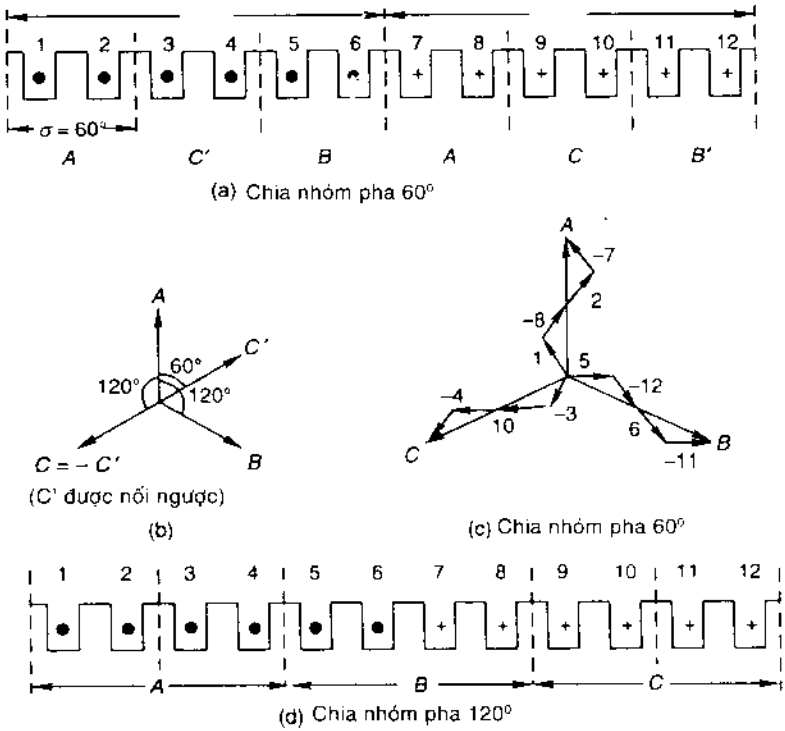
Sự sắp xếp các cuộn dây xung quanh chu vi phần ứng và các nối kết của chúng được minh họa theo sơ đồ quấn dây. Để vẽ sơ đồ quấn dây, thường có thể hình dung phần ứng nằm trên mặt phẳng ở dạng khai triển với các rãnh song song. Các rãnh dưới ảnh hưởng của từng cực có thể được ghi dấu, mọi phía cuộn dây theo một cực sẽ có emf cảm ứng cùng chiều với hiệu số pha thời gian tương ứng góc rãnh. Tiết diện khai triển thường được sử dụng để minh họa sự bố trí quấn dây ac. Dạng khai triển quấn dây ac có nêu rõ các cực trường.

Quấn dây ac

Quấn dây ac thường là dạng 3 - pha, do các ưu điểm của máy 3 - pha. Các cuộn dây phần ứng phải được nối kết để bảo đảm các emf 3 - pha cân bằng (có độ lớn bằng nhau và góc pha liên tiếp bằng 2π/ 3 rad). Để bắt đầu với các rãnh xung quanh chu vi phần ứng cần phải chia thành các nhóm pha.

Chia nhóm pha

Trường hợp đơn giản có thể giả thiết SPP là số nguyên, sự quấn dây này được gọi là quấn dây rãnh nguyên. Để minh họa, giả sử m = 2, nghĩa là 12 rãnh/cặp cực trong phần ứng 3 - pha. Góc rãnh là $360^0/12 = 30^0$, bước cuộn dây gồm 6 rãnh nguyên. Hình 6.2 a minh họa 12 rãnh đánh số từ trái sang phải,



Hình 6.2 *Chia nhóm pha*

6 rãnh bị ảnh hưởng của một cực với chiều emf theo các phía cuộn dây, 6 rãnh còn lại bị ảnh hưởng của cực đối diện và có chiều emf ngược lại.

Trong Hình 6.2 a, 12 rãnh phần ứng được chia thành 6 nhóm pha, nghĩa là hai rãnh có góc pha $\sigma = 60^0$, mỗi cực được chia làm ba nhóm (bằng số pha). Nếu các phía cuộn dây trong các rãnh (1,2) thuộc dải pha A, các phía trong rãnh (5,6) cách đó 120^0 (bốn rãnh) thuộc pha B, và các rãnh (3,4) cách A là 60^0, khi được nối kết ngược, thuộc pha C. (Xem sơ đồ pha trên Hình 6.2 b). Do đó các phía cuộn dây trong các rãnh (3,4) được coi là thuộc dải pha C'. Do đó thứ tự sắp xếp các dải pha là A C', BA', CB', lặp lại cho từng cặp cực. Sự sắp xếp này được gọi là nhóm pha 60^0. Bốn phía cuộn dây của mỗi cặp cuộn dây của từng pha có thể được nối theo thứ tự bất kỳ. Ví dụ, thứ tự nối phía cuộn dây pha A có thể là (1 - 8 - 2 - 7) được dùng trong quấn dây một lớp với các cuộn tập trung, hoặc có thể là (1 - 7 - 2 - 8) quấn dây hai lớp. Các sơ đồ pha của cả ba pha theo kiểu quấn dây nêu trên được minh họa trên Hình 6.2 c.

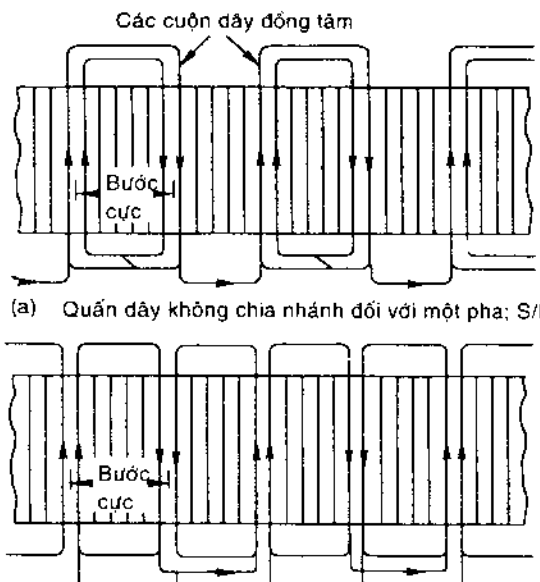
Sự chia nhóm pha 60^0 nêu trên có thể được dùng trong quấn dây một lớp hoặc hai lớp. Ngoài ra có thể sử dụng chia nhóm pha 120^0 khi các rãnh dưới một cặp cực được chia thành ba dải pha (Hình 6.2 d), ở đây có bốn rãnh cho từng dải pha. Việc chia nhóm pha 120^0 ít được sử dụng trong thực tế.

Quấn dây một lớp

Quấn dây một lớp ít được sử dụng trong thực tế trừ các máy có công suất vài kW do các nhược điểm nêu trên. Quấn dây một lớp có thể theo kiểu đồng tâm, sóng,.... Ở đây chỉ minh họa kiểu quấn dây đồng tâm. Quấn dây kiểu sóng thường khó nối kết các đầu dây, không được sử dụng trong các máy ac.

Quấn dây đồng tâm

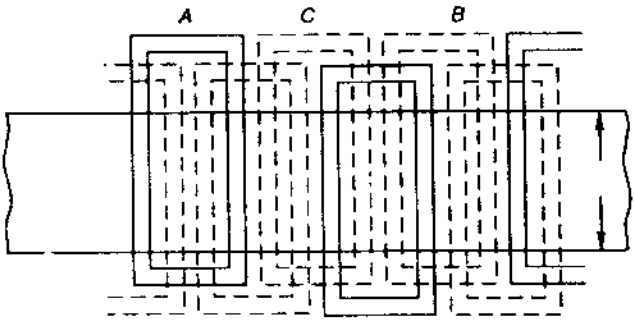
Quấn dây đồng tâm có thể chia làm hai nhóm chính, theo kiểu không chia nhánh (nửa cuộn), và nguyên cuộn (chia nhánh). Theo kiểu nửa cuộn, các cuộn dây có một nhóm pha trong các bước cực kế nhau là đồng tâm (Hình 6.3 a). Các cuộn dây riêng rẽ có thể có bước lớn hơn hoặc nhỏ hơn bước cực, nhưng



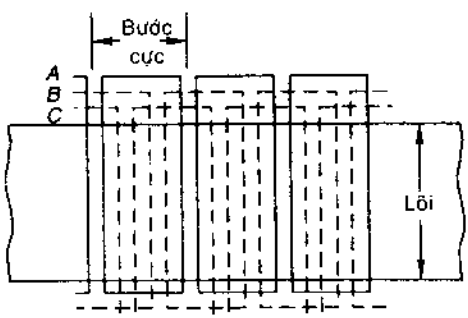
(a) Quấn dây không chia nhánh đối với một pha; S/P = 6, m= 2

(b) Quấn dây chia nhánh đối với một pha; S/P = 6, m = 2.

Hình 6.3 *Quấn dây một lớp với các cuộn dây đồng tâm*



(a) Quấn dây không chia nhánh (nửa cuộn) treo hai mặt phẳng (chuỗi liên tục)



(b) Quấn dây chia nhánh, treo ba mặt phẳng

Hình 6.4 *Sắp xếp phần treo khi quấn dây đồng tâm một lớp*

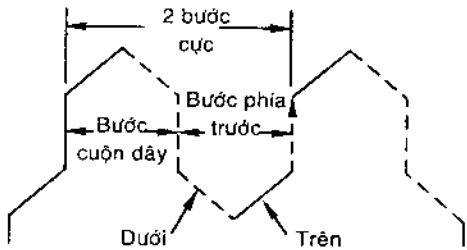
bước cuộn dây trung bình phải bằng một bước cực. Kiểu quấn dây này được sử dụng để tránh sự giao cắt hai cuộn dây dưới một nhóm pha. Trong quấn dây nguyên cuộn, mỗi nhóm cuộn được chia thành hai tập hợp cuộn dây đồng tâm và các phía cuộn dây trở về là chung với nhóm kế cận (Hình 6.3 b). Kiểu quấn dây này chỉ có thể thực hiện được khi SPP là số chẵn.

Từ Hình 6.3, để bảo đảm quấn dây cho cả ba pha, phần treo phía trên phải được xếp trong hai hoặc ba mặt phẳng. Hình 6.4 a, tương ứng quấn dây không chia nhánh (nửa cuộn) (Hình 6.3a), hình treo được bố trí theo chuỗi liên tục với thứ tự (từ điểm qui chiếu cố định) là A↑ B↓ C↑ A↓ B ↑... trong đó các mũi tên lên và xuống biểu thị mặt phẳng trên và dưới. Sự sắp xếp treo 3 mặt phẳng khi quấn dây nguyên cuộn được minh họa trên Hình 6.4 b.

Các cuộn dây một lớp có thể được sắp xếp trong các rãnh bán kín.

Quấn dây một lớp với SPP không phải là số nguyên trong thực tế là không thể áp dụng được.

Quấn dây hai lớp



***Hình 6.5** Quấn dây hai lớp kiểu sóng*

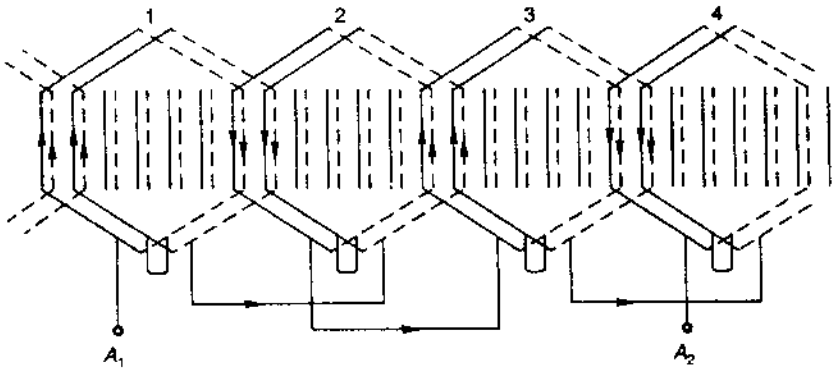
Quấn dây hai lớp được sử dụng rộng rãi trong thực tế, cả hai kiểu quấn theo sóng và quấn chồng mí đều có thể sử dụng được, nhưng do các nhược điểm của quấn dây theo sóng, hiện nay chủ yếu sử dụng quấn dây ac hai lớp theo kiểu chồng mí. Quấn dây hai lớp được chia thành hai nhóm tùy theo giá trị SPP - quấn dây rãnh nguyên khi SPP là số nguyên, quấn dây lẻ khi SPP là phân số hoặc số thập phân. Để đáp ứng yêu cầu đối xứng các pha, số lượng các rãnh pha (S/3) phải là số nguyên.

Hình 6.5 minh họa quấn dây hai lớp kiểu sóng với các cuộn dây chỉ có một vòng. Trong kiểu quấn dây này, sau khi đi qua phần ứng, đầu dây tiếp xúc với phần đầu của cuộn thứ nhất (nghĩa là sau khi mắc nối tiếp P/2 cuộn dây). Để khắc phục khó khăn này, sự nối kết được thực hiện với phía cuộn dây thứ hai của nhóm pha thứ nhất và tiếp tục cho các cuộn còn lại. Tuy nhiên, khi quấn dây với số rãnh lẻ, vấn đề này trở nên phức tạp, sau khi quấn tất cả các cuộn dây phần ứng, một số cuộn dây vẫn không được nối kết.

Quấn dây rãnh nguyên. Ở đây SPP là số nguyên. Kiểu quấn dây này được minh họa trên Hình 5.22. Sự sắp xếp cuộn dây có thể được minh họa theo ví dụ. Giả sử m = 2 rãnh, S/ P = 6 rãnh, bước cuộn dây bằng 6 rãnh (cuộn bước nguyên), góc pha bằng 60^0 điện.

Sơ đồ quấn dây của một pha được minh họa trên Hình 6.6. Tập hợp thứ nhất các cuộn nhóm pha (nhóm cuộn 1) dưới một cặp cực được mắc nối tiếp (cuối cuộn thứ nhất được nối với đầu cuộn kế tiếp bên phải cuộn thứ nhất). Nhóm cuộn pha thứ hai dưới các cặp cực Nam - Bắc do đó phải được nối ngược lại với nhóm cuộn thứ nhất để tăng emf. Có thể nhận thấy, các cuộn luân phiên được nối kết ngược nhau các phía cuộn trong các rãnh cho trước sẽ cùng pha. Tất cả các nhóm cuộn của một pha phải được mắc nối tiếp hoặc nối tiếp - song song.

Tuy nhiên, trong thực tế thường sử dụng các cuộn bước ngắn. Như đã đề cập trong Chương 5, phương pháp sắp xếp này có các ưu điểm, chẳng hạn giảm lượng dây đồng cần thiết cho các nối kết đầu dây. Hơn nữa, các sóng hài trong sóng emf bị triệt tiêu. Tuy nhiên, các cuộn dây bước ngắn có xu hướng làm giảm emf (Pt 5.18 và 5.19). Kiểu quấn dây này được minh họa bằng sơ đồ



Hình 6.6 *Quấn dây hai lớp; 4 - cực, m = 2, bước cuộn = 6 rãnh*

khai triển tiết diện. Các ký tự a, b, c là các phía cuộn dây của pha tương ứng. Giả sử, S/ P = 9 rãnh, m = 3, bước cuộn dây = 8 rãnh, góc $\sigma = 60^0$ điện.

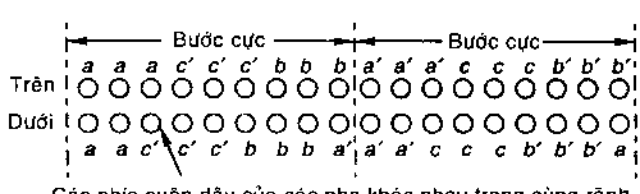
Tiết diện quấn dây của một cặp cực được minh họa trên Hình 6.7. Sự chia nhóm pha phía cuộn dây trên và dưới cách nhau một rãnh. Hơn nữa, trong mỗi nhóm pha ba rãnh, các phía cuộn dây của hai pha khác nhau được đặt trong một rãnh.

Quấn dây rãnh lẻ. Các phương pháp quấn dây với SPP không phải số nguyên thường được gọi là quấn dây rãnh lẻ, và được áp dụng cho quấn dây hai lớp.

Do m = S/ 3P không phải là số nguyên, S là số rãnh phải chia hết cho 3, nghĩa là số rãnh / pha phải là số nguyên để đạt được sự quấn dây 3 pha đối xứng. Bước cực, S/ P không phải là số nguyên, do đó bước cuộn dây không thể là bước nguyên. Ví dụ, nếu S/ P = 10.5, bước cuộn có thể là 11 hoặc 10 rãnh. Bước cuộn dây được chọn phải nhỏ hơn bước nguyên.

Về nguyên tắc sự quấn dây phải bảo đảm đơn vị cơ bản dưới một cặp cực (Bắc và Nam) lặp lại theo số cặp cực khi m là số nguyên. Để có đơn vị cơ bản khi quấn dây rãnh lẻ, S/3P giảm đến phân số tối giản.

Hình 6.7 *Tiết diện quấn dây hai lớp*



$$m = \frac{S}{3P} = \frac{S'}{3P'} \qquad (6.2)$$

Các phía cuộn dây dưới P' cực sẽ là đơn vị cơ bản có các nối kết được lặp lại P/ P' lần trong quấn dây hoàn chỉnh. Có thể dễ dàng nhận thấy P không thể là bội số của 3 trong quấn dây 3 pha.

Trong quấn dây hai lớp, sự phân nhóm pha của các phía cuộn dây ở lớp trên được lặp lại theo lớp dưới với các phía cuộn dây bố trí cách nhau một bước cuộn dây. Do đó, điều cần thiết là xác lập sự chia nhóm pha cho lớp trên của các phía cuộn dây. Quấn dây rãnh lẻ có thể được giải thích bằng ví dụ.

Giả sử, S = 108, P = 10

Khi đó $\quad m = \frac{S}{3P} = \frac{108}{3 \times 10} = 3\frac{3}{5}$ rãnh

Và $\quad \frac{S}{3P} = \frac{108}{3 \times 10} = \frac{54}{3 \times 5} = \frac{S'}{3P'}$

Đơn vị cơ bản trong kiểu quấn dây này có 5 cực với 54 rãnh.

Bảng nhóm cuộn dây (Bảng 6.1) được thiết lập cho ví dụ nêu trên.

1. Tính góc rãnh

$$\gamma = \frac{10 \times 108^0}{108} = \frac{50}{3} = 16\frac{2^0}{3}$$

2. Bắt đầu từ 0^0, tính góc sắp xếp nối tiếp các rãnh trong Bảng. Mỗi khi góc này vượt quá 180^0, hãy trừ bớt 180^0, là góc của một bước cực. Để bảo đảm chiều dương của emf dưới các cực kế cận là theo chiều ngược lại.

3. Nhóm pha A tương ứng với góc:

$$0 \le \text{góc} < 60^0$$

Nhóm pha C: $60^0 \le$ góc $< 120^0$

Nhóm pha B: $120^0 \le$ góc $< 180^0$

Thứ tự nhóm pha là AC' BA' CB' ...

4. Các điểm bắt đầu của các pha là 0^0, 60^0, 120^0. Khi 0^0 là điểm bắt đầu, hai góc còn lại sẽ ở vị trí S'/ 3 = 18 và 2S'/ 3 = 36 rãnh

Các rãnh góc S'/3 cách nhau $= \frac{\gamma S'}{3} = \frac{180P'}{S'} \times \frac{S'}{3} = 60P'$

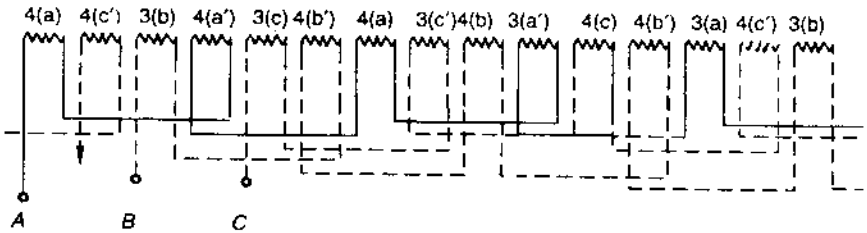
Các rãnh góc 2S'/3 cách nhau = $\frac{2\gamma S'}{3} = \frac{180P'}{S'} \times \frac{2S'}{3} = 120P'$

Các góc này là 60^0, 120^0, hoặc bội số của P' trừ khi P' là bội số của 3 (số pha). Do đó nếu P' (hoặc P) x 3, sẽ không thể [illegible] quấn dây cân bằng.

Từ Bảng 6.1 có thể thấy có ba chu kỳ phân bố rãnh (4,4,3,4,3) bắt đầu từ rãnh 1 (0^0, pha A), rãnh (1 + S'/ 3) = 19 (120^0, pha B) và rãnh (1 + 2S'/3) = 37 (60^0 , pha C), điều này tạo thành sự quấn dây cân bằng.

Bảng 6. 1 *Phân nhóm cuộn dây*

Số rãnh	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Góc	0	$16\frac{2}{3}$	$33\frac{1}{3}$	50	$66\frac{2}{3}$	$83\frac{1}{3}$	100	$116\frac{2}{3}$	$133\frac{1}{3}$	150	$166\frac{2}{3}$
Pha	[a]	a	a	a	c'	c'	c'	c'	b	b	b
	Bước cực 1										
Số rãnh	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Góc	$3\frac{1}{3}$	20	$36\frac{1}{3}$	$53\frac{1}{3}$	70	$86\frac{2}{3}$	$103\frac{1}{3}$	120	$136\frac{2}{3}$	$153\frac{1}{3}$	170
Pha	a'	a'	a'	a'	c	c	c	[b']	b'	b'	b'
	Bước cực 2										
Số rãnh	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Góc	$6\frac{2}{3}$	$23\frac{1}{3}$	40	$56\frac{2}{3}$	$73\frac{1}{3}$	90	$106\frac{2}{3}$	$123\frac{1}{3}$	140	$156\frac{2}{3}$	$173\frac{2}{3}$
Pha	a	a	a	a	c'	c'	c'	b	b	b	b
	Bước cực 3										
Số rãnh	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Góc	10	$26\frac{2}{3}$	$43\frac{1}{3}$	60	$76\frac{2}{3}$	$93\frac{1}{3}$	110	$126\frac{2}{3}$	$143\frac{1}{3}$	160	$176\frac{2}{3}$
Pha	a'	a'	a'	[c]	c	c	c	b'	b'	b'	b'
	Bước cực 4										
Số rãnh	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Góc	$13\frac{1}{3}$	30	$46\frac{2}{3}$	$63\frac{1}{3}$	80	$96\frac{2}{3}$	$113\frac{1}{3}$	130	$146\frac{2}{3}$	$163\frac{1}{3}$	
Pha	a	a	a	c'	c'	c'	c'	b	b	b	
	Bước cực 5										



Hình 6.8 *Sơ đồ đơn vị cơ bản gồm 5 cực khi quấn dây rãnh lẻ.*

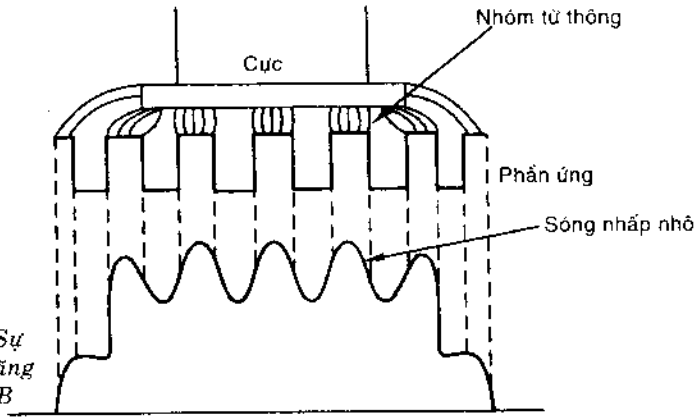
Hình 6.8 minh họa sơ đồ quấn dây của đơn vị cơ bản gồm 5 cực nêu rõ số cuộn dây và các nhóm pha của chúng. Các nhóm pha với đường nét đứt được nối đảo ngược. Phần khởi đầu của cả 3 pha là phần đầu của từng nhóm pha với đường nét liền. Kiểu quấn dây này lặp lại theo từng bộ 5 cực. Đây là sơ đồ quấn dây với phần ứng 10, 20, ..., cực.

Tuy sự quấn dây rãnh lẻ có thể hơi phức tạp, nhưng có nhiều ưu thế về kỹ thuật và chế tạo dễ dàng. Số lượng các rãnh phần ứng được chọn không nhất thiết phải là bội số nguyên của số cực. Do đó có thể chọn số rãnh tùy theo bộ răng khả dụng. Điều này là rất quan trọng đối với các máy công cụ.

Hơn nữa, các sóng hài tần số cao do các rãnh gây ra bị giảm đáng kể khi sử dụng sự quấn dây rãnh lẻ. Khi các cực đi qua phần ứng có rãnh, từ thông / cực dao động khi các mặt rãnh - răng hướng về phía cực lần lượt lặp lại. Điều này gây ra sự cảm ứng các sóng hài emf tần số cao. Nếu S/P là số nguyên, sự dịch chuyển các rãnh phần ứng theo các cực sẽ lặp lại tức thời (đồng pha thời gian) tại mỗi cực do đó các sóng hài trong các nhóm pha của pha cho trước sẽ đồng pha. Nếu S/P không phải là số nguyên, sẽ làm cho sóng hài trong nhóm pha bị lệch pha do đó làm giảm cường độ của chúng đối với điện áp pha.

Sự nhấp nhô các răng

Do từ trở đối với đường dẫn từ tính ở các răng thấp hơn so với các rãnh, sóng mật độ từ thông trong khe không khí sẽ có dạng nhấp nhô (Hình 6.9). Khác với sóng hài không gian của sóng B, dịch chuyển với cùng tốc độ như sóng cơ bản, từ thông ở các răng dịch chuyển tới lui khi các răng đi qua guốc cực. Do không có sự dịch chuyển chung của sóng B, ở đây sẽ không có sóng hài không gian. Tuy nhiên, do sự biến thiên chu kỳ về từ trở của đường dẫn từ thông đối với các cực trường từ các răng phần ứng, tổng từ thông / cực sẽ ổn định trong không gian nhưng thay đổi theo thời gian. Hiệu ứng này là rất rõ khi vòng cực là số nguyên cộng với một nửa bước rãnh (Hình 6.10). Vị trí tương đối của phần ứng và các cực (Hình 6.10 a) tương ứng từ trở thấp và từ



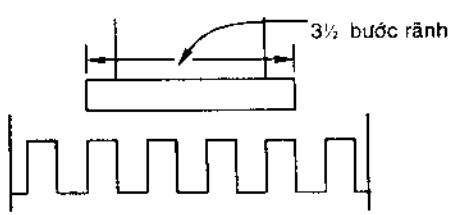
Hình 6.9 *Sự nhấp nhô răng của sóng-B*

thông cực đại/ cực. Hình 6.10b minh họa từ trở và từ thông cực tiểu. Có thể thấy từ thông có thành phần ổn định biến thiên theo thời gian. Chu kỳ biến thiên từ thông xảy ra khi cực đi qua một bước rãnh, trong khi một chu kỳ sóng cơ bản được tạo ra với các cực dịch chuyển qua hai bước cực. Do đó tần số nhấp nhô sẽ là

$$f_s = f \times \text{số rãnh / cặp cực} = \left(\frac{2S}{P}\right) f$$

trong đó f = tần số sóng cơ bản;
f_s = tần số biến thiên từ thông do các rãnh

Hình 6.10 *Quan hệ giữa các răng và cực trường*



(a) Cực trường đối nghịch ở răng thứ tư (từ trở thấp, từ thông cực đại)

(b) Cực trường đối nghịch ở răng thứ ba (từ trở cao, từ thông cực tiểu)

Nối kết từ thông của cuộn phần ứng có thể biểu thị theo công thức

$$f = (\Phi + \phi_s \sin 2\pi f_s t) \cos 2\pi f t$$

và emf do từ thông sẽ là

$$e = -N\frac{d\phi}{dt} = 2\pi f N\Phi \sin 2\pi f t$$

$$-\frac{1}{2}N\phi_s\left[2\pi(f_s - f)\cos 2\pi(f_s - f) + 2\pi(f_s + f)\cos 2\pi(f_s + f)\right] \quad (6.3)$$

Do đó, ngoài sóng cơ bản, còn có hai tần số trong sóng emf đối với các rãnh phần ứng

$$(f_s \pm f) = f\left(\frac{2S}{P} \pm 1\right) \quad (6.4)$$

Nếu S/ P = 9, khi đó

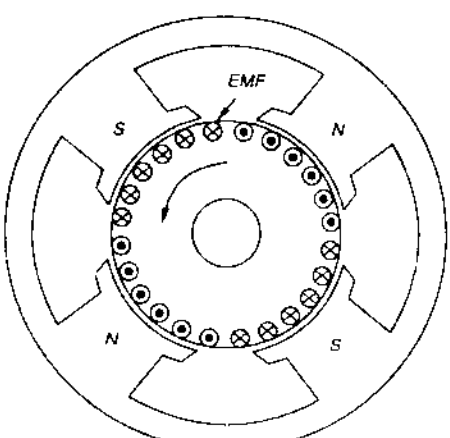
$$(f_s \pm f) = 50\ (18 \pm 1) = 950.850 \text{ Hz}$$

Các tần số này là đủ cao để gây ra nhiễu giao thoa trong hệ thống viễn thông ở gần các đường truyền tải điện.

Nếu S/P không phải là số nguyên, quan hệ không gian giữa phần ứng có rãnh và cực trường cho trước không hoàn toàn như trong các cực liên tiếp, do emf của các tần số ($f_s \pm f$) trong các cuộn phần ứng khác nhau bị lệch pha và có xu hướng tự triệt tiêu trong tập hợp các cuộn pha liên nối kết.

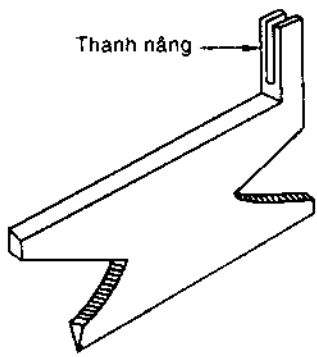
Quấn dây dc

Máy dc là cấu trúc cực không đồng nhất với các cực tĩnh tại và phần ứng quay (Hình 5.8). Emf xoay chiều với cùng dạng sóng như sóng B cảm ứng trong từng cuộn dây. Khi phần ứng quay, các emf cảm ứng theo vành đai các phía cuộn dây dưới cực cho trước là không cùng chiều và lần lượt thay đổi từ cực này đến cực kia (Hình 6.11). Để nhận được điện áp không đổi từ các cuộn phần ứng, cần có sự chỉnh lưu. Điều này có thể đạt được bằng bộ chỉnh lưu cơ học -

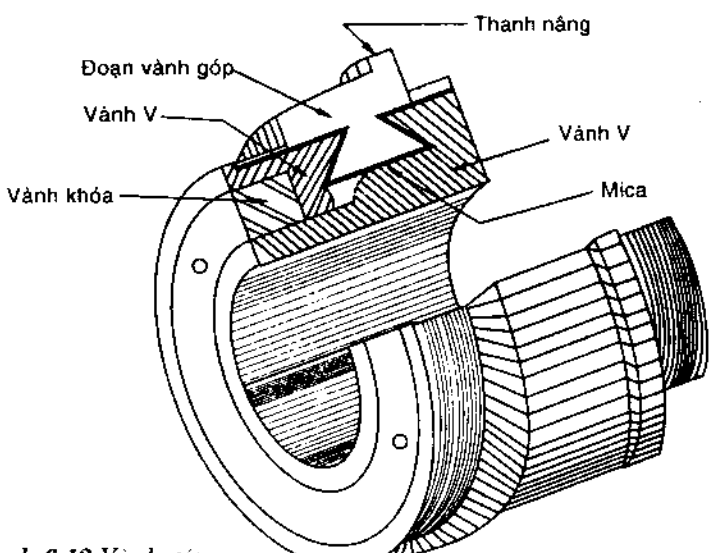


Hình 6.11 *Máy dc 4-cực*

vành góp và chổi than. Vành góp là bộ hình trụ gồm các đoạn hình nêm bằng đồng (Hình 6.12 a) được cách điện với nhau và với trục bằng các tấm mica mỏng. Trong các máy tốc độ cao, các đoạn hình nêm có thể được kẹp với hai vành hình V bằng gang đúc (Hình 6.12b). Mỗi đoạn vành góp tạo thành sự tiếp giáp giữa hai cuộn phần ứng (cuối một cuộn và đầu cuộn kia). Trong các máy lớn, các thanh đồng phẳng được dùng để tạo thành nối kết với các thanh dẫn điện phần ứng (Hình 6.12b).



(a) Đoạn vành góp



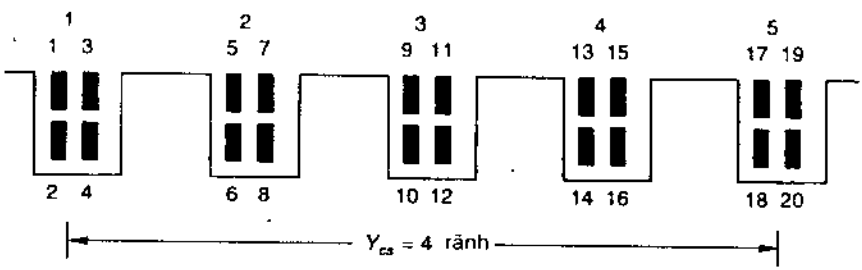
(b) Bộ vành góp

Hình 6.12 *Vành góp máy điện một chiều*

Sự quấn dây hai lớp được chấp nhận rộng rãi trong các máy dc. Các cuộn dây được nối liên tục cuối dây này với đầu dây kia tạo thành lớp quấn dây kín. Tùy theo kiểu nối kết, sẽ có các cặp đường dẫn song song. Các điểm điện áp cực đại (ứng với đường dẫn) được nối kết bằng các chổi than tĩnh phía trên vành góp. Khi phần ứng quay, số các cuộn dây mắc nối tiếp được nối sẽ không đổi và vị trí tương đối của chúng với các cực cũng không đổi. Do đó, điện áp dc không đổi xuất hiện giữa cặp chổi than.

Sơ đồ đánh số phía cuộn dây

Các phía cuộn dây được đánh số liên tục - trên, dưới, trên, ... Phía cuộn dây trên thứ nhất được đánh số 1, do đó mọi phía cuộn dây trên đều có số lẻ và mọi phía cuộn dây dưới đều có số chẵn (Hình 6.13)



Hình 6.13 *Sơ đồ đánh số phía cuộn dây với U = 4 phía cuộn dây/ rãnh*

Bước cuộn dây/bước ngược

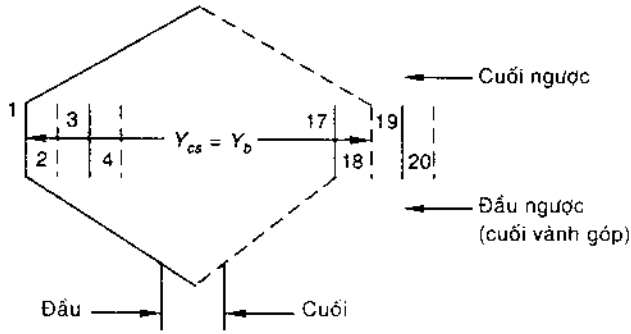
Trên Hình 6.13, bước cuộn dây Y_{cs} là bốn rãnh (tương đương bốn răng). Do đó, phía cuộn dây 1 tạo thành cuộn dây với phía cuộn 18, 3 với 20,... (Hình 6.14). Bước cuộn dây của các phía cuộn dây là y_{cs} = 18 - 1 = 17. Đây là khoảng cách đo theo các phía cuộn dây giữa hai phía cuộn dây được mắc ở cuối phần ứng (phía cuối nhìn từ vành góp) để tạo thành cuộn dây. Bước ngược được ký hiệu là y_b, có thể thấy:

$Y_{cs} = y_b = 17$, là số lẻ. Từ đó

$$y_b = (4 \times 4) + 1 = 17$$

Một cách tổng quát $y_b = UY_{cs} + 1$ (là số lẻ do U là số chẵn)

trong đó Y_{cs} = bước cuộn dây tính theo rãnh



Hình 6.14 *Nối đầu dây phần ứng*

Bước vành góp

Sự tiếp giáp hai cuộn dây (cuối - đầu) được nối với một đoạn vành góp. Do đó

Số đoạn vành góp = C (số cuộn dây phần ứng) (6.6)

Số đoạn vành góp giữa hai đầu của một cuộn dây được gọi là bước vành góp, y_c. Trên Hình 6.15, $y_c = 2 - 1 = +1$

Bước cuộn dây

Bước cuộn dây tính theo các rãnh hầu như là bước nguyên. Điều này bảo đảm điện áp phía đầu dây xung quanh cuộn dây hầu như cộng với nhau (trừ khi các phía cuộn dây ở gần vùng trung hòa từ tính). Do đó

$$Y_{cs} = \frac{S}{P} \text{ (số nguyên thấp kế cận)} \qquad (6.7)$$

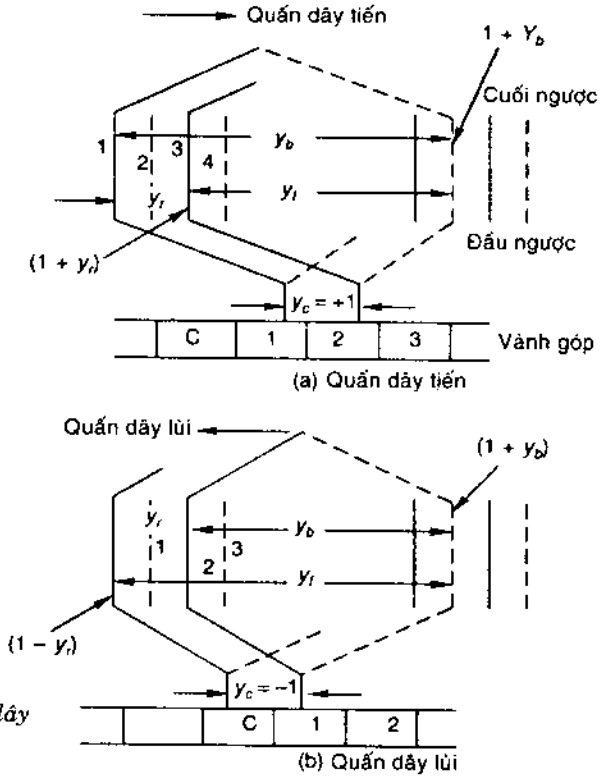
có nghĩa là với S/ P không nguyên, các cuộn dây là bước ngắn

Quấn dây nối đầu

Trong quấn dây nối đầu (tương tự trường hợp máy ac) cuối của một cuộn dây (từ phía cuộn dây dưới) được nối với đầu cuộn dây kế cận như được minh họa theo các cuộn dây một vòng trên Hình 6.15. Sự dịch chuyển phía cuộn dây ở kết nối mặt trước được gọi là *bước mặt trước*, y_f. Trong quấn dây nối đầu, bước tổng là

$$y_r = y_b - y_f = 2 \qquad (6.8)$$

Chiều quấn dây phụ thuộc vào y_b hoặc y_f tùy theo giá trị nào lớn hơn. Do đó



Hình 6.15 *Quấn dây kiểu nối đầu*

$y_b > y_f$ (quấn dây tiến, Hình 6.15a) (6.9a)

$y_b < y_f$ (quấn dây lùi, Hình 6.15b) (6.9b)

Không có nhiều lựa chọn giữa quấn dây tiến hoặc lùi, cả hai đều được chấp nhận trong thực tế

Từ Hình 6.15 có thể thấy, hai đầu cuộn dây được nối qua các đoạn vành góp kế nhau, do đó bước vành góp sẽ là

$y_c = \pm 1$ (+1, quấn dây tiến, -1, quấn lùi) (6.10)

Các cuộn dây khi quấn nối đầu liên tục được nối theo nguyên tắc nêu trên, trong quá trình này mọi cuộn đều được nối.

Ví dụ 6.1. Hãy vẽ sơ đồ quấn dây nối đầu ở dạng khai triển cho phần ứng 12 rãnh, 4 cực, với hai phía cuộn dây/rãnh, giả sử cuộn dây chỉ có một vòng).

Hãy nêu rõ số lượng và vị trí các chổi than trên vành góp. Số lượng các đường dẫn song song là bao nhiêu?

$$C = S = \text{số các đoạn vành góp} = 12$$

$$Y_{cs} = \frac{12}{4} = 3 \text{ rãnh}$$

$$y_b = 2\,Y_{cs} + 1 = 7$$

$$y_f = 7 - 2 = 5 \text{ (quấn theo kiểu tiến)}$$

Thông tin này là đủ để vẽ sơ đồ quấn dây khai triển trên Hình 6.16. Các đầu cuộn dây của các phía cuộn dây (1 - 8) được nối với các đoạn vành góp 1, 2. Bốn cực được vẽ trên sơ đồ khai triển. Tất cả các phía cuộn dây dưới một cực có emf cảm ứng cùng chiều và luân phiên.

Các đường dẫn song song / chổi than

Ba cuộn dây (C/ P = 12 / 4) được nêu theo nét đậm ở phía dưới một cặp cực (N_1S_1) được mắc nối tiếp để các emf cộng với nhau. Điều này tạo thành một đường dẫn song song. Sự quấn dây hoàn tất có thể chia thành 4 đường dẫn song song dưới 4 cặp cực khác nhau (N_1S_1, N_2S_1, N_2S_2, S_2N_1). Do đó, số các đường dẫn song song (A) trong máy quấn dây nối đầu nói chung bằng số các cực (P), nghĩa là

$$A = P \tag{6.11}$$

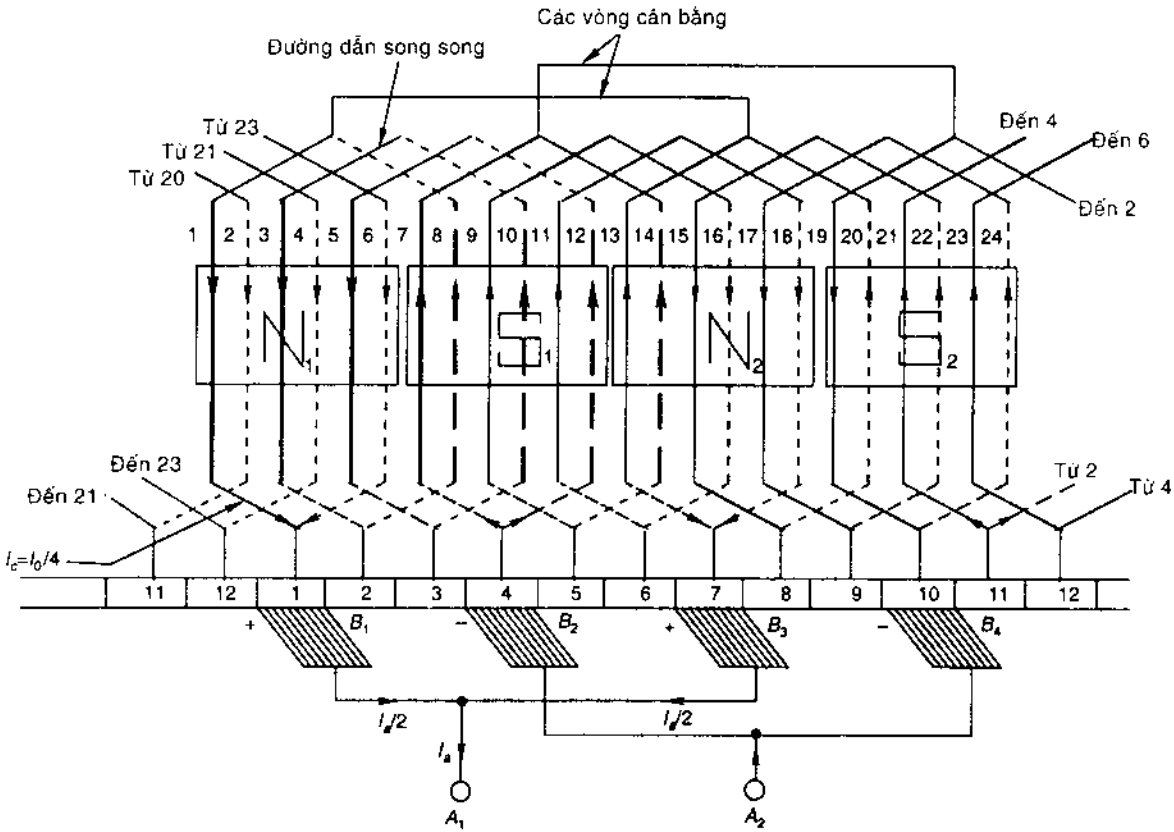
Bốn đường dẫn song song trong sơ đồ quấn dây trên Hình 6.16 tạo thành vòng kín về điện (Hình 6.17) trong đó các emf của đường dẫn song song luân phiên bao quanh vòng này.

Các đầu của đường dẫn song song đến các đoạn vành góp 1,4,7,10 vào thời điểm nêu trên. Đây là các vị trí của chổi than (bằng số cực) thay đổi luân phiên dương và âm. Ngoài ra, các chổi than thường ở các vị trí đối diện các tâm cực và góc điện giữa chúng là 180^0. Khoảng cách giữa các chổi than kế nhau tính theo đoạn vành góp là

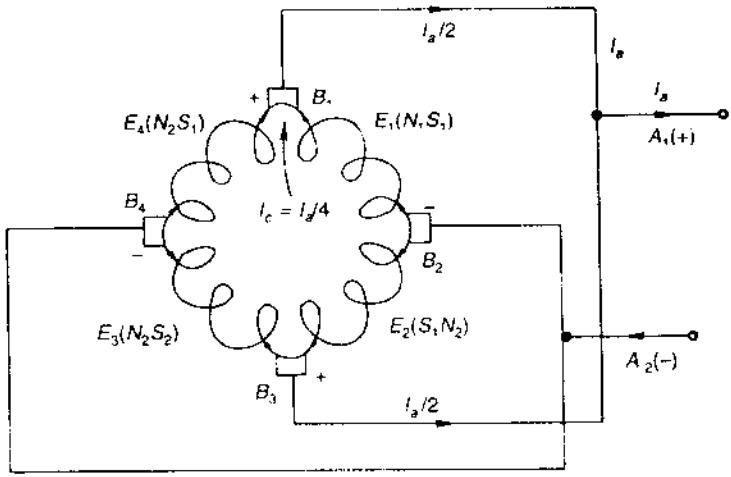
$$\frac{C}{P} = \frac{12}{4} = 3 \tag{6.12}$$

Có thể thấy C/P không nhất thiết là số nguyên. Đồng thời do cuộn dây có hình thoi, các chổi than đối diện các tâm cực sẽ nối với các phía cuộn dây ở gần vùng liên cực, đây là góc điện 90^0 từ các trục của các cực chính.

Hai chổi than dương và hai chổi than âm được mắc song song để cấp điện cho mạch bên ngoài.



Hình 6.16 *Quấn dây nối đầu phần ứng 12 rãnh, 4 cực, hai phía cuộn dây/rãnh, cuộn dây một vòng*



Hình 6.17 *Sơ đồ tương đương của phần ứng quấn nối đầu 4 cực*

Từ sơ đồ trên Hình 6.17, có thể thấy dòng điện trong dây dẫn phần ứng là

$$I_c = \frac{I_a}{A} \tag{6.13}$$

Sự góp điện

Xét đường dẫn song song, chẳng hạn đường được vẽ theo nét đậm trên Hình 6.16, được nối với các đoạn vành góp 1 và 4. Khi phần ứng quay, một cuộn dây đi ra xa đường dẫn này ở một chổi than và cuộn dây kia đi vào đường dẫn song song ở chổi than thứ hai. Cặp chổi than lúc này nối các đoạn vành góp 2 và 5. Quá trình này xảy ra đồng thời ở mọi chổi than, có thể dễ dàng hình dung từ sơ đồ trên Hình 6.17, trong đó các cuộn dây được coi là quay theo đường tròn. Trong đó, cặp chổi than luôn luôn nối các cuộn C/ P (nối tiếp), từ đó, điện áp khả dụng ở mỗi cặp chổi than luôn luôn không đổi (dc). Đây là tác dụng góp điện. Điện áp nối kết có thay đổi chút trong thời gian ngắn khi chuyển đổi các cuộn dây trong đường dẫn song song. Tuy nhiên, sự biến thiên điện áp này là không đáng kể trong thực tế.

Từ sơ đồ trên Hình 6.16 và 6.17, có thể thấy khi cuộn dây ra xa một đường dẫn song song và đi vào đường dẫn thứ hai dòng điện phải đảo chiều. Trên Hình 6.16, khi phần ứng dịch chuyển một đoạn vành góp, các dòng điện trong bốn cuộn dây (1,8), (7,14), (3,20), (19,2), phải đảo chiều. Các cuộn này thực

hiện sự góp dòng điện. Có thể thấy, trong khoảng thời gian ngắn khi cuộn dây góp điện, các phía cuộn dây đi qua vùng liên cực do đó emf không đáng kể được cảm ứng trong cuộn góp. Đồng thời, trong khoảng thời gian này, cuộn dây vẫn ngắn mạch với chổi than, nối các đoạn vành góp kế nhau, trên đó các đầu cuộn dây được nối. Nếu dòng điện trong cuộn dây không đảo ngược hoàn toàn ở cuối kỳ góp điện, sẽ xuất hiện tia lửa ở tiếp điểm chổi than.

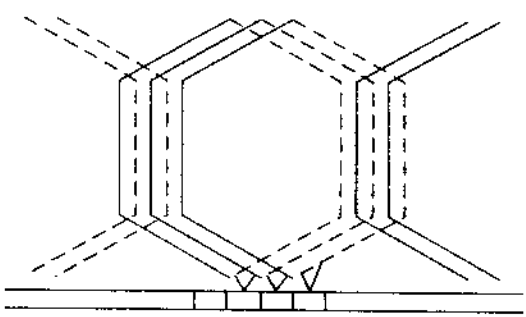
Yêu cầu đối xứng

Để tránh dòng điện tuần hoàn không tải và các vấn đề về góp điện, mọi đường dẫn song song phải đồng nhất, có cùng số lượng các phía cuộn dây. Sự đối xứng đòi hỏi

$$\frac{2C}{P} = \frac{US}{P} = \text{số nguyên} \qquad (6.14)$$

Ghi chú

Để quấn dây phần ứng dc, các nguyên tắc nêu trên là không thực sự cần thiết, trừ khi các cuộn dây quấn dây hai lớp phải được nối kết liên tục theo kiểu cuối cuộn này nối với đầu cuộn kia. Sự tiếp giáp kiểu nối đầu này được nối với đoạn phần ứng đối diện ở điểm giữa cuộn dây; các đầu của mỗi cuộn dây được nối với đoạn vành góp kế cận (Hình 6.18).



Hình 6.18 *Quấn dây hai lớp theo kiểu nối đầu*

Các vành cân bằng

Các cực trong máy dc không thể đồng nhất để có cùng giá trị từ thông/cực. Sự mất đối xứng giữa các cực sẽ đưa đến sự không cân bằng các emf trên đường dẫn song song. Do đó, điện thế của các bộ chổi than dương và âm sẽ không còn bằng nhau, dòng điện chạy trong phần ứng qua các chổi than để cân bằng điện

áp phần ứng ngay cả khi phần ứng không cấp điện cho mạch bên ngoài. Không kể sự mất cân bằng tái xung quanh chu vi phần ứng khi phần ứng cấp điện, các dòng điện tuần hoàn có thể ảnh hưởng đến sự góp điện, gây ra các tia lửa điện ở chổi than.

Các dòng điện tuần hoàn bị mất đối xứng sẽ làm tăng cường độ các cực yếu và làm giảm các cực mạnh. Biện pháp giải quyết là để dòng điện tuần hoàn đi đến cuối phần ứng qua các đường dẫn điện trở thấp, tránh các dòng điện này đi qua chổi than nơi có điện trở cao hơn. Điều này được áp dụng bằng cách mắc nhiều bộ cân bằng thế năng, được gọi là các vành cân bằng. Dòng điện qua các vành này phải là ac khi chỉ có điện áp ac giữa các điểm ở cuối các cuộn dây. Các điểm cân bằng thế năng cách nhau 360^0 (điện) và chỉ hiện hữu nếu

$$\frac{S}{(P/2)} = \text{số nguyên}$$

nghĩa là sự quấn dây lặp lại một cách chính xác cho từng cặp cực. Khoảng cách giữa các điểm cân bằng thế năng theo số lượng vành góp là C/(P/2). Trong thực tế, không cần dùng số lượng vành cân bằng tương đương số cặp điểm cân bằng thế năng. Tuy các vành cân bằng ngăn cản dòng điện tuần hoàn qua các chổi than, nhưng không cản trở dòng điện tuần hoàn gây ra tổn thất dây đồng.

Sơ đồ quấn dây kiểu sóng không cần các vành cân bằng, do đó được ưa chuộng hơn, trừ các máy đòi hỏi dòng điện cao.

Ví dụ 6.2. Khi biết sơ đồ quấn dây kiểu nối đầu cho máy điện dc với 4 cực, 22 rãnh, 6 phía cuộn / cực, khoảng cách giữa các chổi than là bao nhiêu?

Giải

Bước cuộn dây, $Y_{cs} = \frac{22}{4} = 5$ rãnh

Bước ngược $= (6 \times 5) + 1 = 31$

Bước phía trước $= 31 - 2 = 29$ (quấn dây tiến)

Dữ liệu này là đủ để vẽ sơ đồ quấn dây

Số lượng đoạn cổ góp $= \frac{1}{2}US = 3 \times 22 = 66$

$P = A = 4$

Số lượng chổi than $= 4$

Khoảng cách giữa các chổi than kế nhau = 66/ 4 = 16 ½ đoạn

Quấn dây kiểu sóng

Trong quấn dây kiểu sóng, cuối một cuộn dây dưới một cặp cực được nối với đầu cuối dây dưới cặp cực kế tiếp (Hình 6.19). Quá trình này tiếp tục cho đến khi tất cả các cuộn dây phần ứng được nối và sự quấn dây hoàn tất. Để thực hiện điều này cần phải đáp ứng một số điều kiện. Các đầu của từng cuộn trải rộng với khẩu độ gồm y_c đoạn vành góp (bước vành góp). Khi số lượng các phía cuộn dây gấp đôi số đoạn vành góp, phía cuộn dây đỉnh của cuộn thứ hai được đánh số là $(1 + 2y_c)$. Việc đánh số các phía cuộn dây có thể minh họa trên Hình 6.19, với công thức

$$1 + 2y_c - y_t = 1 + y_b$$

$$y_b + y_t = 2y_c = y_t \qquad (6.15)$$

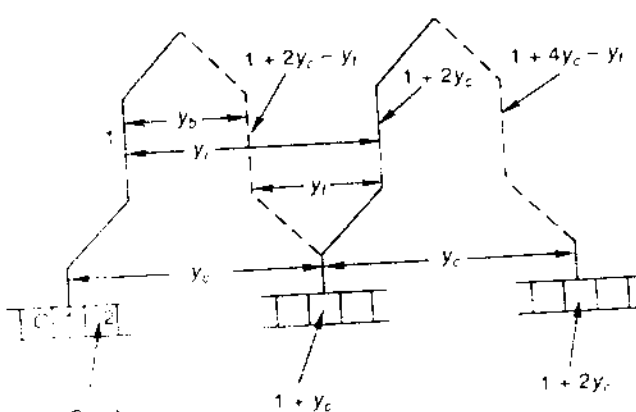
Bắt đầu từ đoạn cổ góp 1, sau khi đi qua P/2 cuộn dây hoặc y_c (P/2) đoạn cổ góp, sự quấn dây sẽ dừng ở đoạn 2 để quấn dây tiến hoặc đoạn (C) để quấn lùi. Điều này có nghĩa là để tiếp tục quấn dây, cần phải có

$$y_c = \frac{P}{2} \pm (C - 1)$$

$$y_c = \frac{2(C \pm 1)}{P} \text{ (phải là số nguyên)} \qquad (6.16)$$

Trong phương trình 6.16, sự quấn dây tiến nếu dùng dấu cộng và quấn dây lùi nếu dùng dấu trừ.

Khi biết y_b từ bước cuộn dây và y_c được xác định từ Pt 6.16, bước ngược y_t được tính từ Pt 6.15, từ đó có thể vẽ sơ đồ quấn dây.



Hình 6.19 *Quấn dây kiểu sóng*

Trong quấn dây kiểu sóng các cuộn dây được chia thành hai nhóm - tất cả các cuộn dây với dòng điện thuận chiều được mắc nối tiếp và tất cả các cuộn dây với dòng điện ngược chiều được mắc nối tiếp - hai nhóm cuộn dây này được mắc song song với nhau. Do đó sự quấn dây này luôn luôn có hai đường dẫn song song bất kể số cực, và chỉ cần hai chổi than, nghĩa là

$$A = 2 \tag{6.17}$$

Ví dụ 6.3. Đối với phần ứng dc 6 - cực với 16 rãnh có hai phía cuộn dây/ rãnh và các cuộn dây một vòng, hãy tính các bước quấn dây kiểu sóng và vẽ sơ đồ quấn dây khai triển

Y_{cs} = 16/ 6 = 2 rãnh (giá trị nguyên thấp gần nhất)

y_b = (2 x 2) + 1 = 5

C = 16

$y_c = \dfrac{2(16 \pm 1)}{6} = 5$ đoạn

$y_f = 2\,y_c - y_b = 5$

Từ các giá trị nêu trên, sơ đồ quấn dây khai triển được vẽ trên Hình 6.20. Quấn dây phần ứng có hai đường dẫn song song (một đường được vẽ bằng nét đậm trên Hình này) - dòng điện đi vào đoạn vành góp 6 và đi ra đoạn 14 (phía cuộn dây 27 có emf không đáng kể và chiều dòng điện trong đó được xác định bằng phía cuộn dây nối tiếp với cuộn 27, là cuộn 32). Chỉ cần hai chổi than, do đó một ở cực Bắc và một ở cực Nam. Khoảng cách giữa các chổi than là

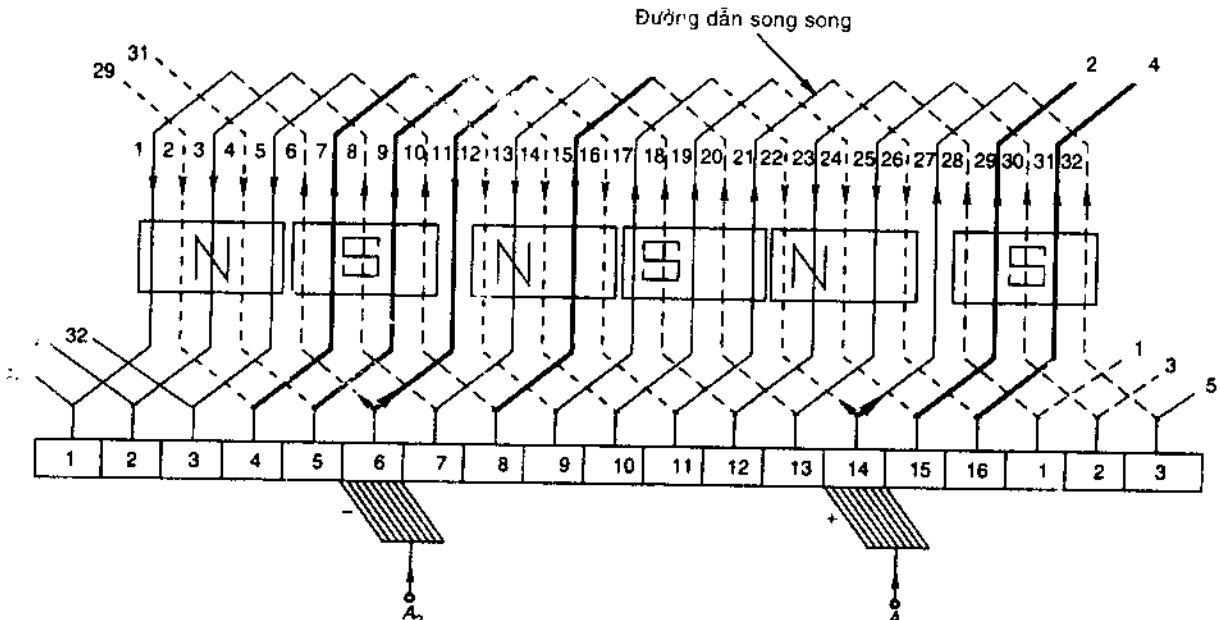
$$\frac{C}{A} = \frac{C}{2} = 8 \text{ đoạn} \tag{6.18}$$

Trong các máy quấn dây kiểu sóng thực tế, số chổi than bằng số cực được sử dụng với khoảng cách giữa các chổi than kế nhau là C/ P đoạn vành góp, các chổi này lần lượt là dương và âm. Mọi chổi than dương và âm được mắc song song để cấp điện cho mạch ngoài, điều này làm giảm dòng điện ở từng chổi than đến giá trị

$$I_{chổi} = \frac{I_a}{(P/2)} \tag{6.19}$$

Đối với chiều rộng đoạn vành góp cho trước, điều này làm giảm chiều dài đoạn cần thiết đối với mật độ dòng điện chổi than cực đại được phép. Tuy nhiên, trong các máy nhỏ, tính kinh tế đòi hỏi chỉ dùng hai chổi than.

Không cần dùng các vành cân bằng. Các cuộn phần ứng tạo thành đường dẫn song song chịu ảnh hưởng của tất cả các cặp cực, do đó hiệu ứng bất đối



Hình 6.20 *Quấn dây kiểu sóng cho phần ứng 16 rãnh, 6 cực (cuộn dây 1-vòng, 2 phía cuộn dây/rãnh)*

xứng mạch từ hiện diện trong cả hai đường dẫn song song tạo ra các điện áp đường dẫn song song như nhau. Điều này cho phép không sử dụng vành cân bằng trong quấn dây kiểu sóng.

Trong quấn dây nối đầu $y_c = \pm 1$ bất kể số lượng cuộn dây phần ứng, do đó các cuộn dây có thể được chọn để lấp đầy tất cả các rãnh (C = US/2)

Trong quấn dây kiểu sóng, từ Pt 6.16, số lượng các cuộn dây phải đáp ứng điều kiện

$$C = \frac{P}{2} y_c \pm 1 \qquad (6.20)$$

đồng thời C phải bảo đảm

$$C = \frac{1}{2} US \qquad (6.21)$$

Đối với giá trị P thiết kế xác định và sự lựa chọn S bị giới hạn bởi các điều kiện chế tạo, các giá trị C từ Pt 6.20 và 6.21 có thể khác nhau, khi đó phải sử dụng số cuộn dây C'

$$C' = \frac{1}{2} US > C$$

và y_c được chọn sao cho (C' - C) có giá trị thấp nhất. Về điện, chỉ có các cuộn C là cần thiết (Pt 6.20), nhưng các cuộn C' bảo đảm sự cân bằng động cho phần ứng. Hiệu số C' - C được gọi là các cuộn câm, và được đặt trong các rãnh thích hợp với các đầu được cách điện.

Ví dụ 6.4. Cho phần ứng dc 4 - cực, 28 rãnh, 8 phía cuộn dây/rãnh, hãy tính các bước quấn dây và bước vành góp khi quấn theo kiểu sóng. Khoảng cách giữa các chổi than tính theo số đoạn vành góp là bao nhiêu?

Giải

Số cuộn dây có thể bố trí trong các rãnh

$$C = \frac{28 \times 8}{2} = 112$$

$$y_c = \frac{2}{P}(C \pm 1) = \frac{2}{4}(112 \pm 1) = 55\frac{1}{2} \text{ hoặc } 56\frac{1}{2}$$

Do không có giá trị nguyên của y_c, với C = 112, cần dùng cuộn dây câm.

Khi đó $\quad C' = 112$

$$C = \frac{P}{2} y_c \pm 1$$

Chọn $y_c = 55$

$C = 111$ (số cuộn dây cần thiết về điện

= số đoạn vành góp)

Do đó (112 - 111) =1 cuộn dây được lắp vào phần ứng

$$y_{cs} = \frac{28}{4} = 7$$

$$y_b = (8 \times 7) + 1 = 57$$

$$y_f = 2y_c - y_b = (2 \times 55) - 57 = 53$$

Khoảng cách giữa các chổi than nếu sử dụng 4 chổi than

= 111/ 4 = 27 3/4 đoạn vành góp

Ghi chú

Theo Hình 6.19, để quấn dây phần ứng theo kiểu sóng, các cuộn dây được chuẩn bị theo $y_b = UY_{cs} + 1$. Khi có các cuộn dây này, chỉ cần nối y_c cho các cuộn dây. Trong thực tế thường đánh số cuộn dây thay vì đánh số phía cuộn dây, bắt đầu cuộn dây với phía cuộn dây trên được đánh số $(1 + 2\ y_c)$ trong Hình 6.19, cuộn dây được đánh số là $1 + y_c$.

So sánh quấn dây nối đầu và kiểu sóng

	Quấn nối đầu	Quấn kiểu sóng
1.	Bước cuộn dây, $y_{cs} = \frac{S}{P}$	$y_{cs} = \frac{S}{P}$
2.	Bước ngược, $y_b = UY_{cs} + 1$	$y_b = UY_{cs} + 1$
3.	Bước vành góp, $y_c = \pm 1$	$y_c = \frac{2(C \pm 1)}{P}$ (phải là số nguyên)
	(+ quấn dây tiến	(+ quấn dây tiến
	- quấn dây lùi)	- quấn dây lùi)
4.	Bước mặt, $y_f = y_b \pm 2$	$y_f = 2y_c - y_b$
	(+ quấn dây tiến	
	- quấn dây lùi)	

5.	Đường dẫn song song, A = P	A = 2
	Dòng điện dây dẫn, $I_c = I_a / A$	$I_c = I_a / 2$
6.	Số lượng chổi than A = P	Số lượng chổi than = 2 (Máy lớn dùng P chổi)
7.	Không cần cuộn dây cân	Cần cuộn dây cân
8.	Cần các vành cân bằng	Không cần các vành cân bằng

Lựa chọn giữa quấn dây kiểu sóng và nối đầu

Ưu điểm của quấn dây kiểu sóng là không cần các vành cân bằng, nghĩa là máy có chi phí thấp hơn so với quấn dây nối đầu. Quấn dây nối đầu có ưu thế số lượng đường dẫn song song lớn hơn và dòng điện dây dẫn thấp hơn ($I_c = I_a/A$), do đó thích hợp với các máy điện áp thấp dòng điện cao. Việc sử dụng quấn dây kiểu sóng không cho phép dòng điện phần ứng vượt quá 300 A do các khó khăn về góp điện.

Chương 7

Máy điện một chiều

Giới thiệu

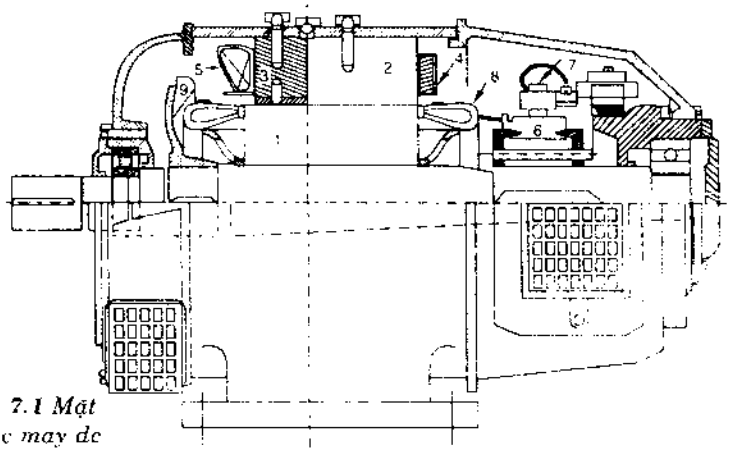
Máy điện một chiều (dc) có kết cấu với nhiều dạng khác nhau và có nhiều công dụng, từ loại điện áp 1.5V với vài μA trong đồng hồ tinh thể thạch anh đến loại không lồ 75.000 kW hoặc lớn hơn trong các máy cán thép. Đây là loại máy đa dụng và linh hoạt, có thể đáp ứng yêu cầu moment khởi động, tăng tốc và hãm với tải trọng nặng. Máy điện một chiều cũng dễ dàng đáp ứng với các truyền động trong khoảng điều khiển tốc độ rộng và đảo chiều nhanh.

Động cơ điện một chiều được dùng ở các nhà máy cán, ở các cần trục, các ứng dụng điều khiển như các bộ truyền động, cảm biến tốc độ và định vị. Hiện nay, điện xoay chiều đang được sử dụng rộng rãi và hầu như không còn sử dụng máy điện một chiều làm máy phát công suất. Các máy phát đồng cơ (động cơ xoay chiều - máy phát một chiều) cung cấp truyền động dc cũng được thay thế bằng các máy nắn dòng (thiết bị chỉnh lưu). Trong một số ứng dụng, động cơ dc tác động như máy phát trong khoảng thời gian ngắn trong chế độ "tái sinh" hoặc chế độ "hãm động lực", đặc biệt trong các hệ thống kéo.

Nguyên lý vận hành và đặc tính kết cấu của máy điện dc được trình bày trong Chương 5 (Hình 5.13), với phương trình emf là Pt 5.26. Máy có *cuộn kích (kiểu tập trung)* được đặt trên các cực lồi ở stator và *cuộn dây phần ứng (kiểu phân phối)* được quấn theo rãnh trên rotor hình trụ. Các đặc điểm kết cấu của máy điện dc thực tế được nêu trên Hình 7.1 và 7.2. Tất cả các loại máy điện công nghiệp thường có kết cấu rotor hình trụ dị cực, tuy nhiên cũng có một số máy điện đồng cực cải tiến.

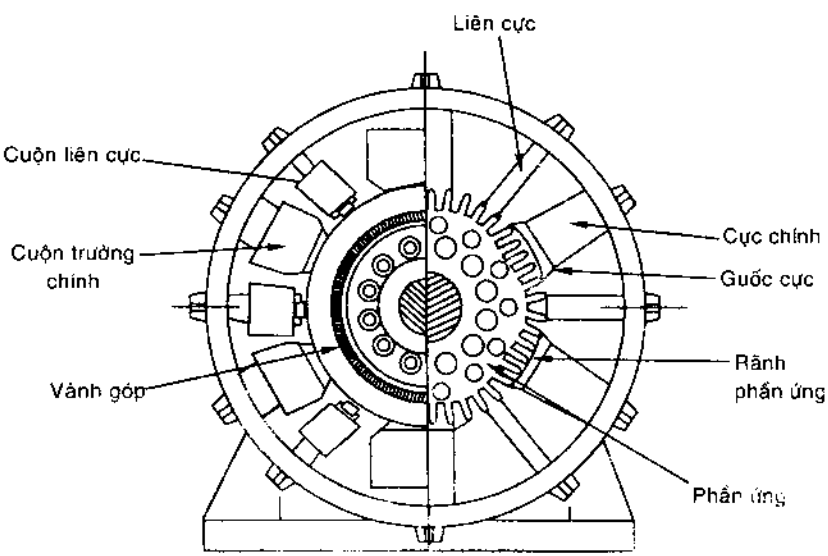
Mạch từ của máy dc gồm lõi làm bằng vật liệu từ tính, khe hở không khí, các cực trường và gông từ (Hình 5.13 và 7.2). Gông từ của máy điện dc là vòng hình xuyến ở giữa có ghép các cực từ và các liên cực. Các liên cực hoặc các cực vành góp là những cực thu hẹp được cố định trên gông từ giữa các cực từ chính.

Sự sử dụng cuộn kích, cung cấp điện năng để thiết lập từ trường trong mạch từ, tạo ra các đặc tính hoạt động rất đa dạng. Cuộn dây phần ứng được nối đến nguồn năng lượng bên ngoài thông qua hệ thống chổi than - vành góp (Hình 7.1), thiết bị nắn dòng cơ khí để chuyển đổi dòng điện xoay chiều và lực điện từ cảm ứng thành một chiều.



Hình 7.1 *Mặt cắt dọc máy dc*

1. Lõi phần ứng
2. Cực trường chính
3. Liên cực
4. Cuộn cực chính
5. Cuộn liên cực
6. Vành góp
7. Giá chổi than và chổi than
8. Phần treo cuộn dây
9. Quạt



Hình 7.2 Mặt cắt ngang máy dc

Rotor hình trụ (phần ứng) của máy dc lắp trên trục, được đỡ bằng các ổ đỡ. Một hoặc cả hai đầu trục là đầu ra/vào của máy và được kết nối cơ đến tải nếu là động cơ hoặc đến động cơ chính nếu là máy phát. Các rãnh trục có mép song song (cách đều) được dùng trên bề mặt rotor. Trong các rãnh này là các cuộn dây phần ứng (theo qui tắc quấn dây). Phần vật liệu từ giữa các lõi là các răng. Tiết diện rãnh có ảnh hưởng rất quan trọng đến các đặc tính làm việc của máy và các thông số khác, chẳng hạn độ tự cảm cuộn dây phần ứng, độ bảo hòa từ trong các răng, tổn thất dòng điện xoáy ở các cực stator, chi phí và độ phức tạp về quấn dây phần ứng.

Thiết kế máy điện là một công việc thích thú và đầy thách thức, và là công việc liên tục thay đổi theo các cải tiến của các loại vật liệu điện, vật liệu cách điện, vật liệu từ tính, sử dụng các kỹ thuật truyền nhiệt, công nghệ chế tạo, ứng dụng máy tính trong thiết kế.

Các vấn đề cơ bản

Hình 6.11 trình bày tiết diện máy điện dc. Các vấn đề cơ bản của máy điện dc bao gồm:

1. Các chổi than thường được đặt trong vùng cực từ trung gian do đó chúng tạo góc 90° điện với trục của các cực trường kế tiếp.

2. Sự quấn dây kiểu nối đầu có các đường dẫn song song A = P, dòng cảm ứng I_a chia ra theo các đường A tạo nên dòng điện dây dẫn $I_c = I_a/A$. Trong trường hợp dây quấn kiểu sóng, A = 2; độc lập với P.

3. Các chổi than luân phiên là dương cực và âm cực (góc điện giữa cặp kề nhau là 180° điện). Chỉ cần hai chổi than trong quấn dây kiểu sóng, nhưng P chổi than thường được dùng khi phần ứng có dòng lớn.

4. Chu vi phần ứng được chia thành các "đai" (theo số P), mỗi đai chịu tác dụng của một cực. Dòng và emf trong các dây dẫn của một đai là các dây dẫn một chiều ra khỏi một đai do sự quay được thay thế đồng thời bằng đúng số lượng đi vào đai. Cường độ emf dây dẫn trong đai biến thiên theo mật độ từ thông trong khe hở không khí, còn dòng ở tất cả các dây dẫn này (I_c) bằng nhau ở tất cả các đai, ngoại trừ dòng ở các đai thay đổi trong không gian nhưng không đổi theo thời gian. Sự tác động của vành góp tạo nên các kết quả này

5. Nếu dòng chạy trong dây dẫn cùng chiều với emf dây dẫn, máy sẽ cung cấp năng lượng điện (và hấp thụ cơ năng), máy vận hành theo

chế độ phát điện. Ngược lại, khi dòng trên dây dẫn và emf ngược chiều nhau, máy hấp thụ công suất điện và sản sinh công cơ học, máy vận hành theo chế độ động cơ.

6. Nếu không tính tổn thất không thể hồi phục (có nguồn gốc điện và từ), luôn luôn có sự cân bằng giữa năng lượng điện và cơ; năng lượng trung bình trong từ trường giữ không đổi, độc lập với sự quay phần ứng.

Lực điện động và moment

Trong máy dc, cấu trúc từ trường với sóng mật độ từ thông trong khe hở không khí, có đỉnh phẳng với đối xứng sóng góc 1/4, khi phần ứng không có dòng điện. Sóng mật độ từ thông sẽ bị méo khi ở phần ứng có dòng điện chạy qua (hiệu ứng phản ứng phần ứng làm mất sự đối xứng sóng 1/4). Tuy nhiên, yếu tố này không ảnh hưởng đến độ ổn định emf (giữa 2 chổi điện) và moment do máy tạo ra với độ lớn được xác định bởi từ thông/cực độc lập với hình dạng sóng B.

Phương trình lực điện động

Theo Pt 5.28, emf trung bình của cuộn dây là:

$$E_a^c = \frac{\Phi\omega_m N_c P}{\pi} \tag{7.1}$$

với ω_m = tốc độ rotor (rad/s).

Gọi: C_p = số cuộn dây/ đường dẫn song song.

Số này là xác định và độc lập với sự quay phần ứng; khi một cuộn dây đi ra khỏi đường dẫn song song, một cuộn khác sẽ đi vào. Do đó, emf đường dẫn song song bằng emf phần ứng và được tính theo:

$$E_a = \frac{\Phi\omega_m (C_p N_c) P}{\pi} = \frac{\Phi\omega_m N_p P}{\pi} \tag{7.2}$$

trong đó NP = số vòng/ đường dẫn song song = Z / 2A.

Z = tổng các dây dẫn phần ứng.

A = số đường dẫn song song.

Do đó:

$$E_a = \frac{\Phi\omega_m Z}{2\pi}\left(\frac{P}{A}\right) = K_a \Phi\omega_m \tag{7.3}$$

$$K_a = \frac{2P}{2\pi A}$$

$$E_a = \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right) \qquad (7.4)$$

trong đó n: tốc độ phần ứng (rotor) (npm)

E_a không đổi (dc) do số cuộn dây/ đường dẫn không đổi và độc lập với phần ứng quay (tác động chuyển mạch). E_a phụ thuộc từ thông/ cực và không phụ thuộc hình dáng sóng mật độ từ thông.

Phương trình moment ngẫu lực

Hình 7.3 minh họa sóng mật độ từ thông trong khe hở không khí và sự phân bố dòng điện dây dẫn trong phần ứng đối với một cặp cực. Có thể thấy lực trên các dây dẫn là một chiều. Mỗi dây dẫn khi chuyển động cùng với phần ứng sẽ chịu lực biến thiên theo thời gian tương tự sóng B.

Do đó, lực dây dẫn trung bình:

$$f_{c,av} = B_{av} l . I_c \qquad (7.5)$$

B_{av} = Mật độ từ thông trung bình trên một cực

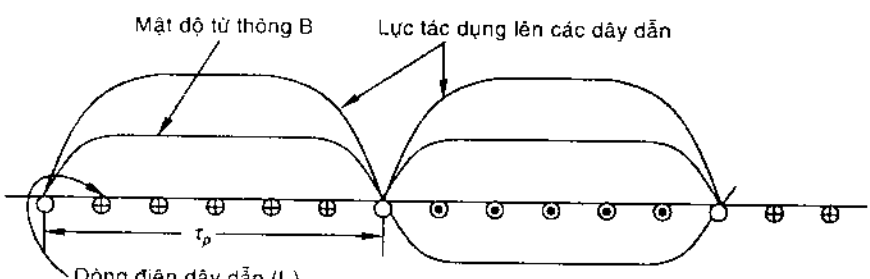
l = chiều dài tác dụng của dây dẫn

Tổng lực: $F = Z_{fc,av} = B_{av} I_c l Z$

Lực này (và moment) không đổi theo thời gian vì cả sóng mật độ từ thông và sự phân bố dòng là cố định trong không gian, moment được tính như sau:

$$T = B_{av} . I_c . l . Zr \qquad (7.6)$$

trong đó r: bán kính trung bình của khe hở không khí.



Hình 7.3 *Sự phát sinh moment trong máy dc*

Từ thông/ cực được biểu thị theo phương trình:

$$\Phi = B_{av}.\tau p.\ l$$

τP là bước cực (Hình 7.3) = $2\pi r/\ P$

$$\Phi = B_{av}\left(\frac{2\pi r}{P}\right)l$$

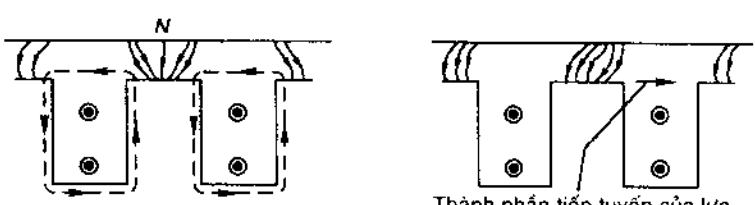
$$B_{av} = \frac{\Phi P}{2\pi} \times \frac{1}{rl} \qquad (7.7)$$

thay vào Pt 7.6 ta được

$$T = \frac{1}{2\pi}\Phi I_c ZP = \frac{1}{2\pi}\Phi I_a Z\left(\frac{P}{A}\right)\ \text{Nm} \qquad (7.8)$$

$$T = k_a .\Phi.\ I_a\ (\text{Nm}) \qquad (7.9)$$

Sử dụng lực trên từng dây dẫn sẽ rất thuận tiện để lập biểu thức tính moment phần ứng. Tuy nhiên, cơ chế sản sinh moment trong máy điện thực tế hơi khác do các dây dẫn được đặt trong các rãnh phần ứng. Lực này phát sinh do tương tác của từ thông chính và từ thông do dòng điện chạy trong dây dẫn (trong các rãnh phần ứng). Vì từ trở lớn của đường dẫn không khí trong các rãnh, từ thông chính đi qua các dây dẫn quá nhỏ và lực tác động lên dây dẫn không đáng kể. Lực sinh ra chủ yếu là do đường từ thông bị méo khi đi qua các răng, và lực này tác động lên răng của phần ứng (Hình 7.4). Nếu toàn bộ lực đều tác dụng lên dây dẫn, sẽ làm hư hại lớp cách điện giữa các dây dẫn và rãnh phần ứng, nhưng thực tế lực tác dụng này rất nhỏ.



(a) Từ thông chính (nét liền) và từ thông sinh ra do dòng chạy trong dây dẫn phần ứng (nét đứt)

(b) Thông lượng tổng

Hình 7.4 *Sóng mật độ từ thông*

Cân bằng công suất

Công suất cơ: $T\omega_m = K_a.\Phi.\ \omega_m\ I_a = E_a.\ I_a$ (W) (7.10)

Do sự bảo toàn năng lượng, phải có sự cân bằng trong máy, do đó:

$$T = \frac{1}{\omega_m} E_a I_a \quad \text{Nm} \tag{7.11}$$

Sự từ hóa tuyến tính

Giả sự mạch từ của máy là tuyến tính

$$\Phi = K_t.\ I_f$$

trong đó I_f : Dòng từ hóa (dòng kích thích)

K_t: Hằng số trường

Do đó: $E_a = K_a\ K_t I_f \omega_m = K_e I_f\ n$ (V) (7.12)

$$T = K_a K_t I_f I_a = K_t I_f I_a \quad \text{Nm} \tag{7.13}$$

trong đó $$K_e = \frac{2\pi}{60}(K_a K_f) \tag{7.14}$$

$$K_t = K_a.\ K_f \tag{7.15}$$

Ví dụ 7.1: Động cơ dc quấn dây kiểu nối đầu, 4 - cực, số dây dẫn là 400. Guốc cực dài 20 cm, mật độ từ thông trung bình trong một bước cực là 0.4T, đường kính rotor là 30cm. Tính moment và cơ năng toàn phần khi động cơ chạy với tốc độ 1500 vòng/phút và dòng điện 25A.

Giải:

Từ thông/ cực $= \dfrac{\pi \times 30 \times 10^{-2}}{4} \times 20 \times 10^{-2} \times 0.4 = 0.0188$ Wb

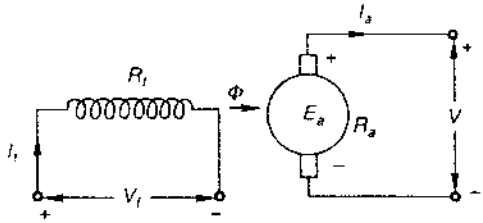
Emf cảm ứng $= \dfrac{\Phi n Z}{60}\left(\dfrac{P}{A}\right) = \dfrac{0.0188 \times 1500 \times 400}{60} \times \left(\dfrac{4}{4}\right) = 188$ V

Cơ năng toàn phần $= E_a.I_a = \dfrac{188 \times 25}{1000} = 4.7$ kW

Moment $= \dfrac{4.7 \times 1000}{\left(\dfrac{2\pi \times 1500}{60}\right)} = 2.99$ Nm

Mô hình mạch điện

Các đường dẫn song song của phần ứng máy điện dc đối xứng nhau, mỗi đường dẫn đều có emf cảm ứng E_a và điện trở R_p. Theo mô hình mạch điện, phần ứng có thể có điện áp E_a và điện trở nối tiếp (Hình 7.5)



Hình 7.5 *Sơ đồ mạng mạch điện dc*

$$R_a = R_p / A \qquad (7.16)$$

Điện trở phần ứng rất nhỏ nên tổn thất dây đồng ở mức chấp nhận được. Hình 7.5 còn có mạch từ của máy điện và trục cuộn dây kích thích có góc 90^0 với trục chổi than. Theo quan điểm mạch, không cần tuân theo mô hình mạch này một cách chặt chẽ. Do hầu như chỉ xét đặc tính dc trạng thái ổn định, điện cảm mạch kích thích và mạch phần ứng không gây ra hệ quả nào và không cần nêu trên mô hình mạch điện. Emf cảm ứng trên phần ứng và moment của máy được xác định theo các quan hệ của Pt (7.4) và (7.8)

Sụt áp tại phần tiếp xúc vành góp - chổi than là xác định (1 - 2 V), độc lập với dòng phần ứng, do quá trình dẫn chủ yếu xảy ra qua nhiều cung ngắn. Tuy nhiên, điện thế này nhỏ và được mô hình hóa theo điện trở tuyến tính được nhập chung với điện trở R_a. Do đó, có thể giả thiết điện trở R_a có tính đến hiệu ứng sụt áp trên chổi than.

Chế độ máy phát

Máy vận hành theo chế độ máy phát điện, khi I_a cùng hướng với emf cảm ứng E_a (Hình 7.6a). Trong mạch phần ứng:

$$V_c \text{ (điện thế cực)} = E_a - I_a.R_a; \qquad E_a > V \qquad (7.17)$$

Cơ năng chuyển thành công suất điện:

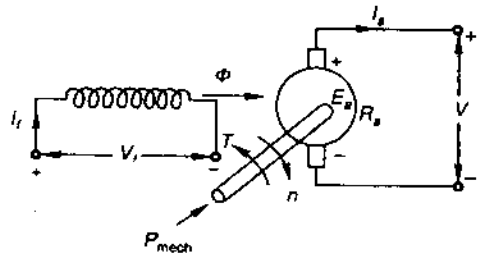
$$P_{cơ}\text{ (vào)}\big|_{\text{thuần}} = E_a.\ I_a = P_{\text{điện}}\text{ (ra)}\big|_{\text{toàn phần}} \qquad (7.18)$$

$$\text{Công suất điện: } P_o = V.I_a \qquad (7.19)$$

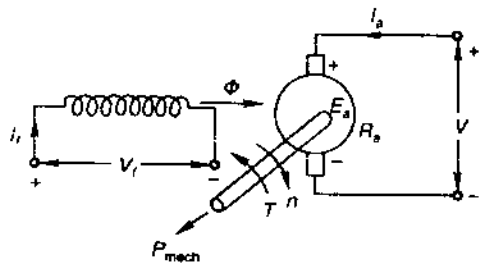
$$E_a.\ I_a - V.\ I_a = I_a^2.\ R_a\text{: tổn thất dây đồng phần ứng} \qquad (7.20)$$

$$P_{cơ}\text{ (vào)}\big|_{\text{toàn phần}} = \text{Công suất trục} = P_{cơ}\text{ (vào)}\big| + \text{tổn thất quay} \qquad (7.21)$$

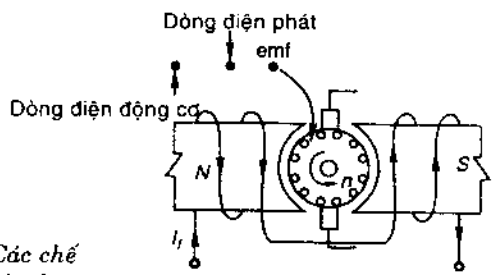
Trong chế độ này, moment điện từ ban đầu ngược chiều quay phần ứng, tức là có sự hấp thụ công suất cơ do đó cần có thiết bị cơ để chạy máy phát điện.



(a) Chế độ máy phát



(b) Chế độ động cơ



(c) Chế độ máy phát/động cơ

Hình 7.6 *Các chế độ của máy dc*

Emf dây dẫn và dòng điện cùng chiều đối với chế độ máy phát (Hình 7.6c).

Chế độ động cơ

Trong chế độ này, dòng I_a ngược chiều với emf cảm ứng E_a (Hình 7.6b). E_a được gọi là *emf ngược* do ngược chiều với emf phần ứng. Đối với mạch điện phần ứng:

$$V \text{ (điện thế cực)} = E_a + I_a . R_a, V > E_a \qquad (7.22)$$

Công suất điện chuyển thành cơ năng:

$$P_{điện}\,(vào)\big|_{lưới} = E_a.\ I_a = P_{cơ}\,(ra)\big|_{toàn\ phần} \qquad (7.23)$$

Công suất điện vào là: $P_{vào} = V.\ I_a$ (7.24)

Ngoài ra, $V.I_a - E_a.\ I_a = I_a^2.\ R_a$ = Tổn thất dây đồng phần ứng (7.25)

Và $P_{cơ}\,(ra)\big|_{lưới}$ = công suất trục cơ

$= P_{cơ}\,(ra)\big|_{toàn\ phần}$ - tổn thất quay (7.26)

Trong chế độ này, moment điện từ T ban đầu cùng chiều quay phần ứng, nghĩa là cơ năng được phát ra cho tải cơ học. Đối với chế độ động cơ (Hình 7.6c), emf dây dẫn và dòng cũng ngược chiều nhau.

Ví dụ 7.2: Máy phát dc điện áp 220V, cung cấp công suất 4kW, điện trở phần ứng 0.4Ω. Nếu máy vận hành theo chế độ động cơ cùng điện áp và cùng dòng điện phần ứng, hãy tính tỷ số giữa tốc độ máy phát và tốc độ động cơ. Giả sử từ thông/cực tăng 10% khi chế độ vận hành đổi từ máy phát sang động cơ.

Giải

Từ Pt 7.4: $n \propto \dfrac{E_a}{\Phi}$ (i)

Khi ở chế độ máy phát $I_a = \dfrac{4 \times 1000}{220} = 18.18$ A

$E_{ag} = 220 + 0.4 \times 18.18 = 227.3$ V (ii)

Khi ở chế độ động cơ: $E_{am} = 220 - 0.4 \times 18.18 = 212.7$ V (iii)

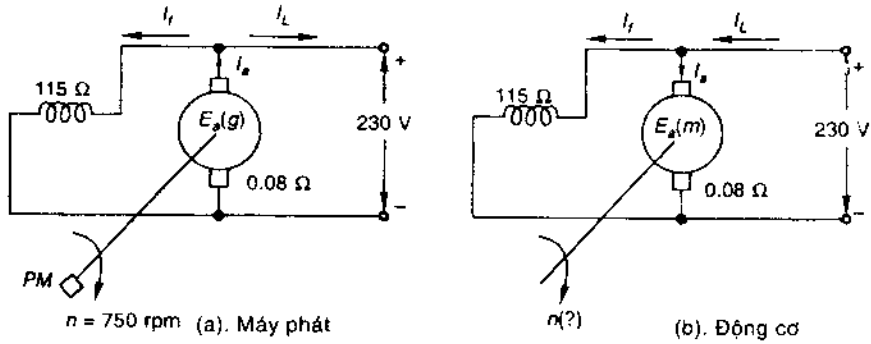
$\Phi_m = 1.1\ \Phi_g$ (iv)

Thay vào (i) : $\dfrac{n_g}{n_m} = \dfrac{227.3}{212.7} \times \dfrac{\Phi_m}{\Phi_g} = \dfrac{227.3}{212.7} \times 1.1 = 1.176$

Ví dụ 7.3: Máy phát dc kích thích song song, được truyền động đai từ động cơ có tốc độ 750 vòng/phút, cung cấp 100kW công suất điện, 230V. Khi đai truyền động đứt, máy điện tiếp tục chạy theo chế độ động cơ điện, tiêu thụ công suất 9kW. Hỏi động cơ chạy với tốc độ nào? Biết điện trở phần ứng là 0.08 Ω và điện trở cuộn kích thích là 115 Ω.

Giải

Chú ý: Trong máy điện kích thích song song, cuộn kích từ được nối qua với phần ứng và kết nối trực tiếp vào mạng điện 230V. Do đó từ trường kích thích không đổi khi máy điện thay đổi chế độ vận hành.



Hình 7.7. *Minh họa ví dụ 7.3*

Sự vận hành của máy phát/động cơ được ninh họa theo mô hình mạch trên Hình 7.7.

Dòng kích thích I_f = 230/115 = 2A không đổi khi thay đổi chế độ vận hành. Chế độ máy phát (cung cấp điện):

$$I_L \text{ (dòng tuyến)} = \frac{100 \times 1000}{230} = 434.8 \text{ A}$$

$$I_f = 2\text{A}$$

$$I_a = I_L + I_f = 434.8 + 2 = 436.8 \text{ A.}$$

$$E_a(g) = 230 + (0.08 \times 436.8) = 237.8 \text{ V.}$$

$$n(g) = 750 \text{ vòng/phút.}$$

Chế độ động cơ (tiêu thụ điện)

$$I_L = (9 \times 1000)/\ 230 = 39.13 \text{ A}$$

$$I_f = 2 \text{ A}$$

$$I_a = I_L - I_f = 39.3 - 2 = 37.13$$

$$E_a(m) = 230 - 0.08 \times 37.13 = 229.3 \text{ V}$$

Vì dòng kích thích (và từ thông/cực) không đổi ở cả hai chế độ vận hành, emf cảm ứng (E_a) tỷ lệ với tốc độ phần ứng:

$$\frac{n \text{ (động cơ)}}{n \text{ (máy phát)}} = \frac{n \text{ (động cơ)}}{750} = \frac{229.3}{237.3}$$

n (động cơ) = 723.2 vòng/phút

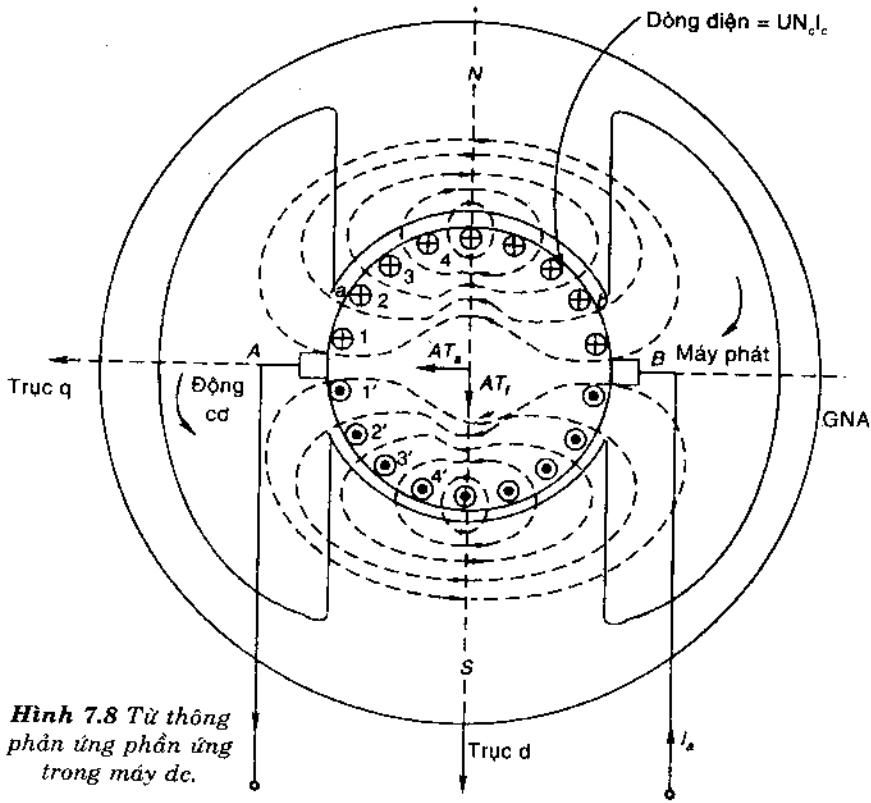
Phản ứng phần ứng

Khi phần ứng của máy điện dc có dòng điện, cuộn dây phần ứng phân phối sẽ sinh ra mmf (phân phối) riêng, được gọi là phản ứng phần ứng. Khe hở không khí của máy bị tác động theo phân phối mmf tổng do tác dụng đồng thời của ampere-vòng kích thích (AT_f) và ampere-vòng phần ứng (AT_a). Mật độ từ thông khe hở không khí bị méo khi so với sóng đỉnh phẳng dạng hình thang có đối xứng góc 1/ 4 khi phần ứng không có dòng điện.

Hình 7.8 minh họa tiết diện máy điện 2 - cực có dây dẫn tương đương trong mỗi rãnh (dòng/dây dẫn = $U.N_c.I_c$, với U = số phía cuộn dây/rãnh, N_c là số dây dẫn/ phía cuộn dây (vòng/ cuộn) và I_c là dòng điện dây dẫn. Hai trục phần ứng gồm trục các cực từ chính được gọi là trục đứng (trục - d) và trục thẳng góc 90^0 được gọi là trục góc phần tư (trục q). Rõ ràng trục q là trục trung hòa hình học (GNA) của máy điện. Các chổi than trong máy điện dc thường được đặt dọc theo trục q.

Do tác động của vành góp, sự phân bố dòng phần ứng được minh họa trên Hình 7.8 đối với máy điện 2 cực (máy 4 cực ở Hình 6.11). Tất cả các dây dẫn trên chu vi phần ứng giữa hai chổi than kế nhau dẫn dòng điện có giá trị không đổi $U.N_cI_c$, cùng hướng và sự phân phối dòng thay đổi dọc theo chu vi. Dòng này cố định trong không gian, độc lập với chuyển động quay phần ứng. Vì các chổi than được đặt dọc theo trục trung hòa (GNA); dòng phần ứng không đổi sẽ tương hợp với các cực từ chính. Ngoài ra, sự di chuyển tất cả các chổi than đồng thời đến về một phía sẽ làm cho dòng điện dịch chuyển theo. Đây không phải là kiểu vận hành bình thường trong máy điện dc.

Từ Hình 7.8, có thể nhận thấy trục của ampere vòng phần ứng AT_a dọc theo trục q thẳng góc 90^0 điện với trục các cực từ chính theo trục đứng d. (Ampere vòng phần ứng AT_a trễ so với ampere vòng kích thích AT_f theo chiều quay phần ứng trong chế độ động cơ và ngược lại, trong chế độ máy phát). Chú ý, AT_a và AT_f được ký hiệu theo các mũi tên thay vì vector vì sự phân bố góc không gian của chúng không phải là hàm sine mặc dù là tuần hoàn. Phản ứng phần ứng với trục tại 90^0 đối với trục từ chính là mmf chéo. Ngoài ra, trên Hình 7.8 còn minh họa mật độ từ thông (đường nét đứt) do sự tác động của phản ứng phần ứng gây ra. Từ thông phản ứng phần ứng mạnh lên ở mỗi cực từ chính tại một đầu và yếu đi tại đầu kia (hiệu ứng từ hóa chéo). Giả sử sắt trong mạch từ không bão hòa (do đó tuyến tính), từ thông/cực không bị ảnh hưởng bởi phản ứng phần ứng, mặc dù sự phân bố mật độ từ thông trong khe hở không khí bị méo. Nếu sự kích thích của cực từ chính, sắt ở trong vùng từ hóa bão hòa (như trong máy thực tế), mật độ từ thông tăng ở một đầu của các cực do phản ứng phần ứng sẽ nhỏ hơn mức độ giảm ở đầu kia, dẫn đến giảm từ



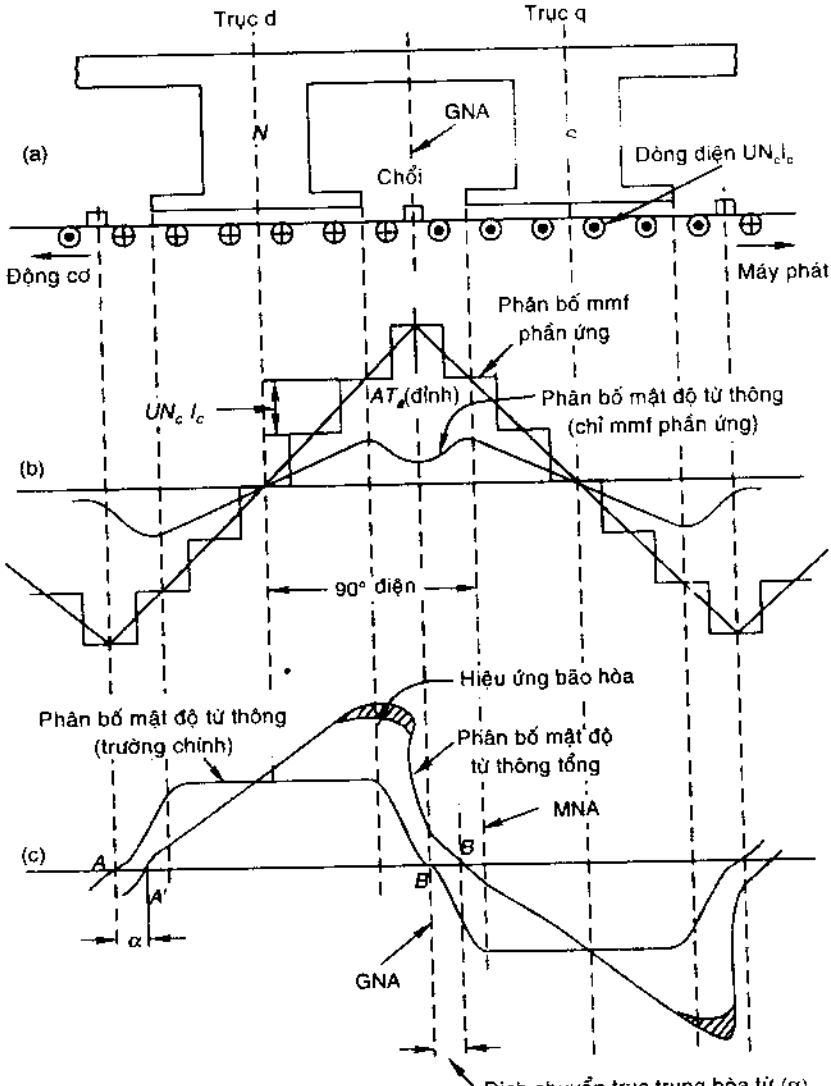
Hình 7.8 *Từ thông phản ứng phần ứng trong máy dc.*

thông/cực, được gọi là hiệu ứng khử từ hóa. Độ suy giảm phụ thuộc vào trạng thái từ hóa của sắt từ và lượng ampere vòng phần ứng AT_a (dòng phần ứng).

Có thể tóm tắt rằng bản chất của phản ứng phần ứng trong máy điện dc là sự từ hóa chéo với trục (cố định) dọc theo trục q (90^0 điện đối với trục cực từ chính), không làm thay đổi từ thông/ cực nếu sắt từ không bão hòa nhưng sẽ gây ra sự giảm từ thông/ cực (hiệu ứng khử từ hóa) khi sắt từ bị bão hòa.

Đồ thị phân bố mật độ từ thông

Để hiểu rõ hơn về tương tác giữa trường kích thích và từ trường phần ứng, có thể xét hình khai triển một cặp cực có chổi than đặt trên trục trung hòa hình học (GNA) (Hình 7.9a), đấy cũng là trục trung hòa từ (MNA) khi phần ứng không có dòng điện.



Hình 7.9 *a) Sơ đồ phần ứng và kích từ của máy dc 2-cực. b) Mmf phần ứng và phân bố mật độ từ thông (chổi than ở vị trí GNA). c) Trường chính và độ dịch chuyển phân bố từ thông (α) theo trục trung hòa từ (GNA).*

Áp dụng các nguyên lý đã đề cập trong chương 5, sự phân bố mmf phần ứng được vẽ trên Hình 7.9b. Đây là sóng bậc với độ dịch chuyển trục 90^0 điện so với trục cực từ chính (trục - d). Mỗi bậc của sóng có chiều cao là UN_cI_c, trong đó U = phía cuộn/rãnh, N_c = dây dẫn/phía cuộn (sốvòng/cuộn) và I_c = dòng điện dây dẫn, sóng bậc của mmf có thể coi là sóng tam giác (Hình 7.9b). Trị số đỉnh của các ampere - vòng phần ứng được tính như sau:

$$\text{Ampere-dây dẫn/ cực} = \frac{ZI_c}{P} = \frac{ZI_a}{AP}$$

$$\text{Ampere-vòng/ cực} = \frac{ZI_a}{2AP} = AT_a \text{ (đỉnh)}$$

$$AT_a \text{ (đỉnh)} = \frac{AT_a(\text{tổng})}{P}$$

Cách chính xác để tìm mật độ từ thông do tác động đồng thời của trường kích thích và ampere-vòng phần ứng là tìm sự phân bố ampere-vòng tổng

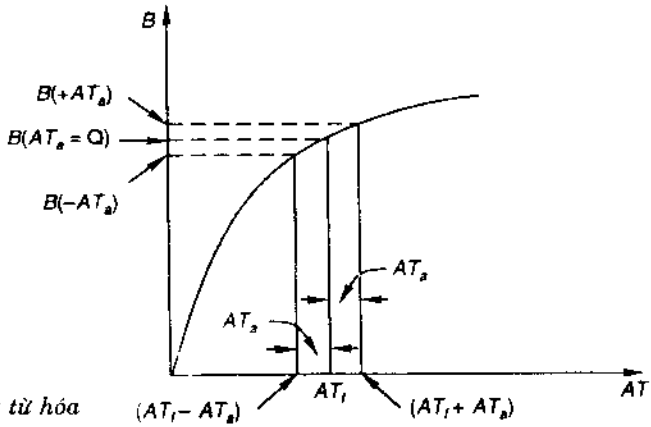
$$AT_{\text{tổng}}(\theta) = AT_f(\theta) + AT_a(\theta)$$

Với θ là góc không gian điện.

Tuy nhiên, từ Hình 7.9 c có thể giả thiết mạch từ là tuyến tính để có thể xếp chồng các sóng mật độ từ thông riêng biệt để nhận được mật độ tổng.

Do khe hở không khí lớn ở vùng cực từ trung gian, mật độ từ thông $AT_a(\theta)$ có độ nghiêng lớn dọc theo trục - q, dù AT_a (đỉnh) hướng theo trục đó (Hình 7.9b). Mật độ từ thông của từ trường chính (dạng hình thang) và mật độ từ thông tổng được vẽ trên Hình 7.9 c. Trong Hình này có thể thấy phản ứng phần ứng mmf làm cho sóng mật độ từ thông bị méo, giảm một nửa ở cực này và mạnh lên một lượng tương ứng (do hiệu ứng tuyến tính) ở nửa kia (hiệu ứng từ hóa chéo) do đối xứng lẻ đối với trục - d của sóng mật độ từ thông của mmf phần ứng. Do đó, tuy sóng mật độ từ thông tổng bị méo nhưng từ thông/cực vẫn không đổi giá trị khi không có dòng điện trong phần ứng. Hình 7.9 c còn cho thấy, độc lập với sự méo của sóng mật độ từ thông, trục trung hòa từ trường (MNA) chuyển dịch khỏi trục trung hòa hình học theo góc α. Do đó các chổi than đặt trên trục GNA không còn ở trên MNA nữa như trường hợp không có dòng điện phần ứng. Hiệu ứng này được giải quyết bằng cách đặt các cực trung gian trong GNA.

Hiệu ứng bão hòa sắt từ có thể được vẽ lại tại góc θ trên hai phía trục d, ampere - vòng lên đường dẫn là ($AT_f \pm AT_a$). Trên đường cong từ hóa (Hình 7.10), mức tăng mật độ từ thông trên một phía trục d gây nên bởi AT_a cộng sẽ ít hơn mức giảm mật độ từ thông trên phía khác do AT_a trừ. Hệ quả là khi bị



Hình 7. 10
Đường cong từ hóa

bão hòa, phản ứng phần ứng vẫn độc lập với sự từ hóa chéo, làm giảm từ thông/ cực, hiệu ứng khử từ hóa. Tuy nhiên, không thể thiết lập quan hệ định lượng đơn giản giữa sự khử từ hóa với AT_f và AT_a. Sự giảm mật độ từ thông tổng do bão hòa sắt gây nên được nêu ở vùng gạch chéo trên Hình 7.9 c.

Có thể tóm tắt, phản ứng phần ứng trong máy điện dc là sự từ hóa chéo làm méo dạng sóng mật độ từ thông và làm lệch trục MNA, và gây ra hiện tượng khử từ hoá, do máy điện thường được thiết kế với sắt từ bão hòa nhẹ.

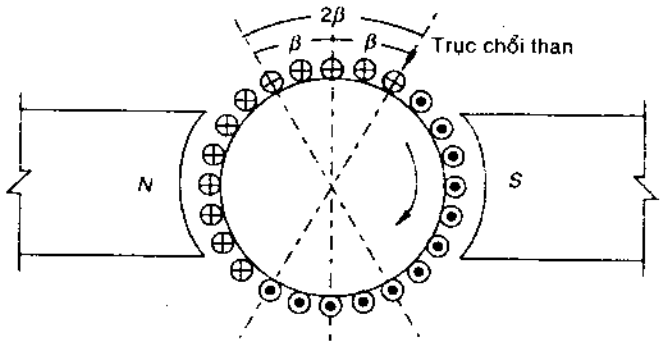
Sự phân bố mật độ từ thông bị méo làm tăng mật độ từ thông trên một phía cực và làm giảm ở phía khác, gây tổn thất sắt từ ở các răng tăng lên, do có quan hệ theo bình phương mật độ từ thông (gần đúng). Sự phân bố mật độ từ thông bị méo cũng gây nên hiệu ứng ngược đối với sự chuyển mạch nhưng khắc phục được nhờ các cực trung gian. Sự méo này là yếu tố quan trọng làm giới hạn khả năng quá tải ngắn hạn của máy điện dc.

Có thể giảm hiệu ứng từ hóa chéo của phản ứng phần ứng bằng cách tạo ra ampere - vòng từ trường chính lớn hơn so với ampere - vòng phần ứng, từ trường chính mmf sẽ mạnh hơn từ thông ở khe hở không khí, điều này đạt được do:

(i). Bão hòa ở răng và guốc cực.

(ii). Vạt góc guốc cực từ để tăng khe hở không khí, từ trở sẽ tăng theo đường dẫn từ thông chính, nhưng ảnh hưởng đến từ thông chéo lớn hơn.

(iii).Bù phản ứng phần ứng mmf bằng cuộn dây bù đặt tại các guốc cực với dòng điện thích hợp.



Hình 7.11 *Hiệu ứng dịch chuyển chổi than*

Ví dụ 7.4: Máy phát dc 6 cực, 400V, 250 kW, có 720 dây dẫn quấn kiểu nối đầu. Chổi than sớm 2.5^0 góc (cơ) so với trục trung hòa hình học. Tính số ampere - vòng từ chéo, ampere - vòng khử từ hóa. Bỏ qua dòng điện trường rẽ mạch.

Giải

Dòng phần ứng I_a $= \dfrac{25 \times 10^3}{400} = 624$ A.

Số đường dẫn song song $= 6$.

Dòng dây dẫn I_c $= \dfrac{625}{6} = 104.2$ A.

Ampere - vòng phần ứng tổng: AT_a $= \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{720 \times 104.2}{6}\right) = 6250$ AT / cực

Từ Hình 7.11, dễ dàng nhận thấy, trong 180^0 điện, các dây dẫn trong khoảng 2β độ điện đang khử từ (β là góc lệch chổi than tính theo độ điện).

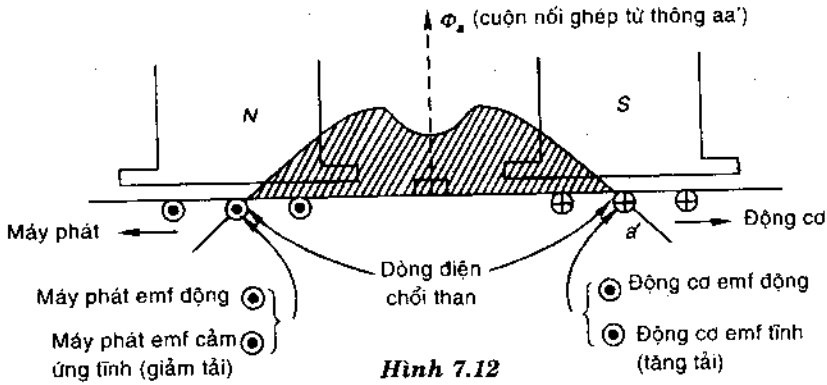
$$\beta = 2.5(6/2) = 7.5^0 \text{ điện}$$

Nên, ampere - vòng từ hóa chéo là: $6250\left(1 - \dfrac{2 \times 7.5}{180}\right) = 5729$ AT / cực

Ampere - vòng khử từ là: $6250 \times \dfrac{2 \times 7.5}{180} = 521$ AT / cực

Cuộn dây bù

Do phản ứng phần ứng làm sóng mật độ từ thông bị méo (Hình 7.9c) khi cuộn dây đi qua vùng có mật độ từ thông đỉnh, emf cảm ứng trong đó sẽ vượt

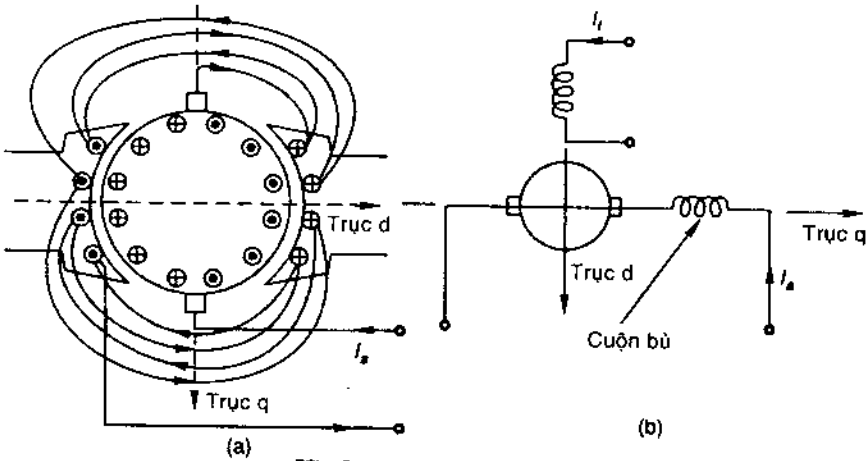


Hình 7.12

quá điện thế trung bình của cuộn dây. Nếu emf này cao hơn điện thế đánh thủng, các vành góp kề nhau sẽ xuất hiện tia lửa điện và lan rộng trên toàn bộ cổ góp vì môi trường quanh cổ góp luôn bị ion hóa và có đủ điều kiện thích hợp cho tia lửa điện. Điều này gây ra ngắn mạch toàn bộ phần ứng. Điện thế cho phép tối đa giữa các vành góp kề nhau khoảng 30 - 40 V, điện thế giới hạn giữa chúng còn thấp hơn nhiều, khi thiết kế thường chọn điện thế cuộn dây và xác định số tối thiểu phiến góp trên vành góp. Dầu đã thiết kế vành góp an toàn, nhưng còn một yếu tố khác cũng gây ra hiện tượng quá điện áp nghiêm trọng giữa các vành góp. Đó là do sự biến đổi phản ứng phần ứng theo thời gian và từ thông kết hợp khi tải thay đổi đột ngột. Trên Hình 7.12, cuộn aa' đặt ở giữa các cực từ chính nên từ thông phần ứng toàn phần/ cực, Φ_a (vùng gạch chéo) liên kết với cuộn dây. Nếu tải thay đổi đột ngột, I_a và Φ_a cũng thay đổi theo tương ứng, emf cảm ứng tĩnh trong cuộn dây tỷ lệ với $d\Phi_a/dt$. Điện thế này vượt quá emf cảm ứng trong cuộn dây. Các điều kiện bất lợi xảy ra khi hai emf này cộng nhau. Khi đó tải sụt đột ngột từ máy phát hoặc tải tăng đột ngột ở động cơ. Có thể dùng qui tắc bàn tay phải và định luật Lenz để kiểm tra lại điều này ở cuộn dây aa' (Hình 7.12). Cách thức duy nhất khắc phục tình trạng này là trung hòa ampere - vòng phản ứng phần ứng bằng cách đặt một *cuộn bù* trong các rãnh trên các mặt cực để trục của cuộn dây trùng với trục chổi than (dọc theo trục AT_a). Để trung hòa AT_a ở mọi dòng điện, có thể đặt cuộn bù nối tiếp với dòng phần ứng và ngược chiều với AT_a (Hình 7.13).

Sự trung hòa hoàn toàn mmf phần ứng là không thể với kiểu bố trí này (Hình 7.13a), vì sự phân bố các lực mmf phần ứng và cuộn bù là không đồng nhất. Có thể đặt cuộn bù phía dưới guốc cực. Số lượng ampere - vòng cần là:

$$AT_{cw}/\text{cực} = AT_a(\text{đỉnh}) \times \left(\frac{\text{cung cực từ}}{\text{bước cực}}\right) = \frac{I_a Z}{2AP} \times \frac{\text{cung cực từ}}{\text{bước cực}} \quad (7.28)$$



Hình 7.13. *Cuộn dây bù*

Cuộn bù trung hòa trực tiếp mmf phần ứng dưới cực từ, nhưng vùng liên cực trung hòa không hoàn toàn. Hơn nữa, hiệu ứng mmf phần ứng tổng trong khoảng giữa các cực là không đáng kể do khe hở lớn. Do đó cuộn bù thực tế đã loại bỏ sự méo từ thông do khe hở không khí. Mật độ từ thông nhỏ còn lại không bị trung hòa trên GNA sẽ được biến đổi thích hợp bởi các cuộn dây liên cực.

Mặc dù, giá cả các cuộn bù tương đối cao, nhưng cần phải có trong các máy bị quá tải cao, hoặc các động cơ trên máy cán thép có các chu kỳ tải thay đổi thất thường.

Ví dụ 7.5. Tính số dây dẫn trên mỗi cực cho cuộn bù của máy dc quấn kiểu nối đầu có 6 cực, 286 dây dẫn. Cuộn bù dẫn dòng điện phần ứng toàn phần. Giả sử tỷ số cung cực/ bước cực = 0.7.

Giải

Theo phương trình 7.28:

$$AT_{cw}/\text{cực} = \frac{I_a Z}{2AP}\left(\frac{\text{cung cực từ}}{\text{bước cực}}\right)$$

$$N_{cw}/\text{cực} = \frac{Z}{2AP}\left(\frac{\text{cung cực từ}}{\text{bước cực}}\right) = \frac{286}{2\times 6\times 6}\times 0.7 = 2.78$$

Số dây dẫn bù/ cực = (2 x 2,78) chọn 6 (là số nguyên gần nhất).

Sự chuyển mạch

Trong phần ứng máy điện dc quấn dây kiểu nối đầu, mỗi cuộn dây của cặp từ kế nhau được nối giữa các vành góp tiếp giáp nhau, đối với phần ứng máy điện dc quấn kiểu sóng, sự khác biệt là P/2 cuộn dây dưới ảnh hưởng của P/2 cặp cực được nối giữa các phiến góp tiếp giáp nhau. Dòng điện cuộn dây không đổi và cùng chiều khi cuộn dây chịu ảnh hưởng của một (hoặc nhiều) cặp cực nào đó. Do phần ứng quay nên cuộn dây chuyển mạch/đảo chiều khi cuộn dây đến vị trí cặp cực kế tiếp. Quá trình đảo dòng được gọi là sự chuyển mạch xảy ra khi cuộn dây đi qua vùng liên cực (trục - q) và trong quá trình này cuộn dây bị ngắn mạch qua các phiến vành góp bởi vì chổi than được đặt trong vùng liên cực. Sự chuyển mạch xảy ra đồng thời cho P cuộn dây trong máy điện quấn kiểu nối đầu (có P chổi than), trong máy điện quấn dây kiểu sóng, mỗi bộ hai cuộn dây của P/2 cuộn sẽ bị ngắn mạch (về mặt điện, có hai chổi than độc lập).

Hình 7.14 minh họa sơ đồ khai triển của các phiến vành góp được nối đến các cuộn dây phần ứng. Chú ý cuộn dây C_c khi chuyển mạch. Các ký hiệu sử dụng trong Hình là:

I_c = dòng điện cuộn dây

I_b = $2I_c$: dòng điện chổi than

w_c = chiều rộng một phiến góp

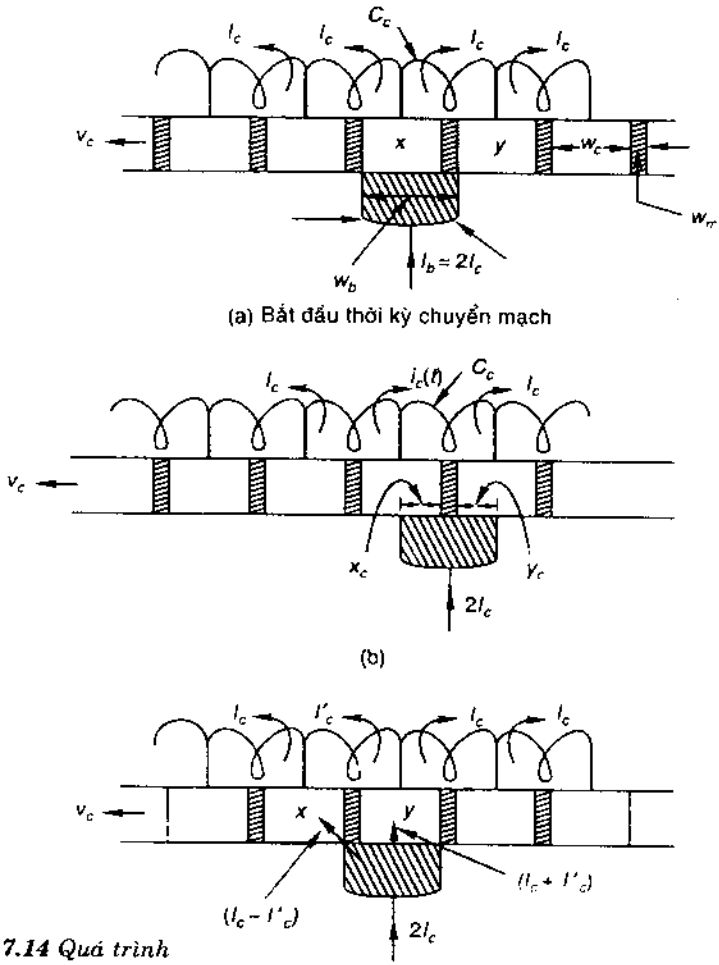
w_m = chiều rộng lớp mica cách điện giữa các phiến góp

w_b = chiều rộng chổi than

= $w_c + w_m$; trong thực tế $w_b = 1.5w_c$

v_c = tốc độ trên chu vi vành góp

Tại thời điểm cuộn dây C_c bắt đầu chuyển mạch, đầu dò của chổi than tiếp xúc hoàn toàn với phiến x và bắt đầu tiếp xúc vớp phiến 4.5 (Hình 7.14 a). Cũng tại thời điểm này tất cả các cuộn dây bên phải phiến x dẫn dòng I_c từ trái qua phải còn các cuộn dây bên trái phiến x, dòng I_c chạy ngược lại. Trong quá trình chuyển mạch, vì các cuộn dây đi từ bên phải qua bên trái chổi than nên dòng trong các cuộn dây phải đổi chiều. Trong quá trình này chổi than là ngắn mạch cuộn dây qua các phiến x và y (Hình 7.14b). Trong quá trình này chiều rộng tiếp xúc, x_c, chổi than và phiến góp x giảm dần, còn chiều rộng y_c giữa chổi than và phiến y tăng dần. Dòng điện $i_c(t)$ cuộn dây thay đổi. Nếu ở cuối chu kỳ chuyển mạch, khi chổi than gần chấm dứt sự tiếp xúc phiến vành góp x (Hình 7.14 c), dòng điện cuộn dây vẫn chưa đảo và đạt giá trị cao nhất I_c. Nhưng khi dòng $I'_c < I_c$, dòng ngắt $I_c - I'_c$ xảy ra ở cuối chổi than gây ra sự



Hình 7.14 *Quá trình chuyển mạch.*

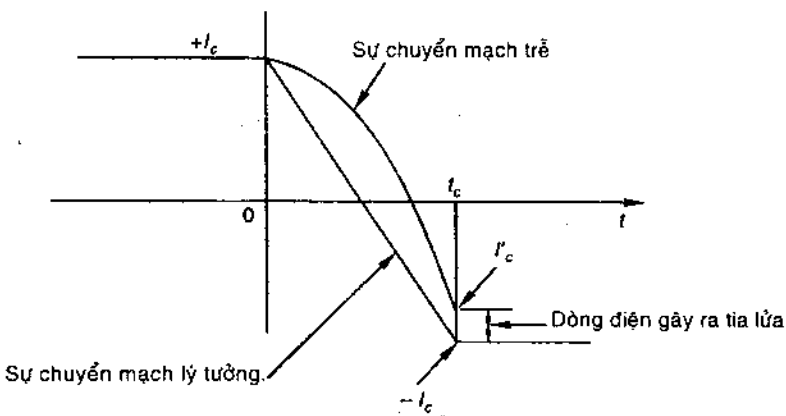
đánh lửa. Hiện tượng này được gọi là sự chuyển mạch thiếu hay còn gọi là chuyển mạch trễ. Từ Hình 7.14 có thể tính chu kỳ chuyển mạch:

$$t_c = \frac{w_b - w_m}{v_c} \tag{7.29}$$

kể cả lúc $w_b > (w_c + w_m)$, nhiều cuộn dây đồng thời chuyển mạch.

Đánh lửa là hiệu ứng bất lợi và không chấp nhận được dù ở mức độ nào do có thể làm rỗ, mòn, thậm chí đốt cháy đồng vành góp và chổi than. Nên phải giới hạn tối đa hiện tượng này để kéo dài tuổi thọ của hệ chổi than - vành góp. Triệt hầu hết hiện tượng này trong quá trình chuyển mạch là điều không thể được, do đó phải định kỳ thay chổi than mới và tu bổ vành góp để giữ sạch bề mặt tiếp xúc.

Chuyển mạch lý tưởng (chuyển mạch tuyến tính) là chuyển mạch mà dòng của các cuộn dây chuyển mạch thay đổi tuyến tính từ + I_c đến - I_c trong chu kỳ chuyển mạch (Hình 7.15). Hình này còn nêu rõ quá trình chuyển mạch trễ và dòng (I_c - I'_c) khi đánh lửa.



***Hình 7.15**. Chuyển mạch lý tưởng*

Trong máy điện không có phương tiện chuyển mạch, sự chuyển mạch bị trễ do các nguyên nhân sau:

1. Điện cảm rò L_c của cuộn dây đang chuyển mạch, cảm ứng điện thế phản kháng L_c (di_c/dt) chống lại sự thay đổi dòng do đó làm trễ quá trình chuyển mạch. Ngoài ra, do thường có nhiều cuộn dây chuyển mạch đồng thời, điện thế cảm ứng làm độ hỗ cảm của chúng có xu hướng ngăn sự đảo chiều dòng điện.

2. Hiệu ứng phản ứng phần ứng là trục MNA lệch chuyển từ AB đến A'B' (Hình 7.9a). Vì các chổi than đặt ở AB (trên trục GNA), điện thế nhỏ cảm ứng trong cuộn dây chuyển mạch ngược với dòng chuyển mạch (cả máy phát/ lẫn động cơ) khi cuộn dây chuyển mạch cắt từ thông cùng dấu với cực phía sau.

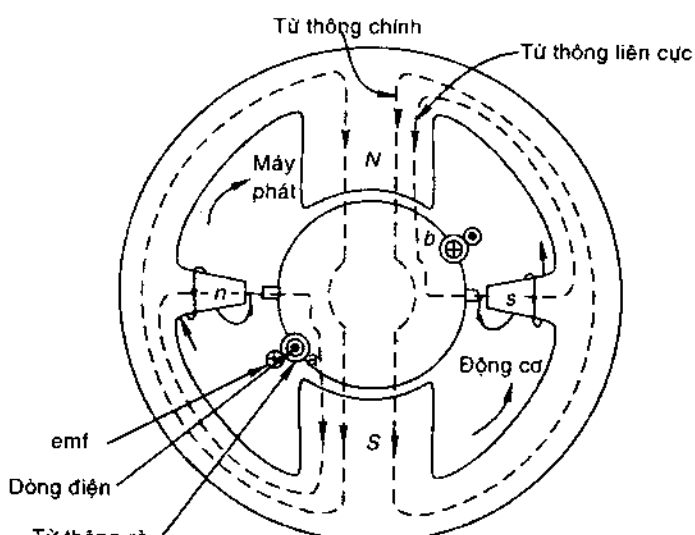
Có hai cách để tạo ra sự chuyển mạch đạt gần với chuyển mạch lý tưởng, chuyển mạch điện trở và chuyển mạch điện thế. Chuyển mạch điện trở thường được dùng để hỗ trợ biên cho chuyển mạch điện thế.

Chuyển mạch điện trở

Điện trở tiếp xúc giữa các khuyên vành góp và chổi góp rất cao, đạt được bằng cách dùng chổi than, việc tăng điện trở mạch cuộn dây chuyển mạch làm giảm hằng số thời gian (L/R) của dòng chuyển tiếp ($i_c(t)$), giúp dòng này thay đổi nhanh hơn theo hướng yêu cầu. Các chổi than ổn định được dùng trong máy điện dc làm giảm sự mòn vành góp và dễ thay mới.

Chuyển mạch điện thế

Để quá trình chuyển mạch diễn ra nhanh, điện thế phản kháng được trung hòa bằng cách cấp điện thế động lực (tốc độ) phân cực thích hợp vào các cuộn dây chuyển mạch. Để giới hạn điện áp này trong các cuộn chuyển mạch, các cuộn trung gian hẹp (còn gọi là các *cực chuyển mạch*, cuộn phụ, cuộn góp điện) được bố trí trong vùng liên cực. Các cực này hiệu chỉnh tại chỗ đối với sóng mật độ từ thông khe hở không khí để đạt được mật độ từ thông thích hợp ở cuộn góp nhằm cảm ứng điện áp cùng dấu với dòng điện cuộn dây sau khi



Hình 7.16 *Bố trí và tác động của các cực trung gian trong máy điện 2 cực*

góp điện. Để trung hòa điện áp phản kháng tại tất cả các tải, các liên cực trung gian phải được kích thích bằng dòng điện phần ứng bằng cách mắc nối tiếp với phần ứng. Sự sắp xếp các cực trung gian, cực tính của chúng so với các cực chính, từ thông của cả hai bộ cực và một cuộn góp được minh họa trên Hình 7.16. Dễ dàng nhận thấy cực tính của một cực trung gian tương ứng cực chính phía trước chiều quay phần ứng đối với chế độ phát điện, và phía sau chiều quay này đối với chế độ động cơ. Khe hở không khí cực trung gian làm tăng mật độ từ thông, do các cực này có phần đế rộng hơn phần đỉnh (Hình 7.16).

Để triệt tiêu điện áp phản kháng trên cơ sở trung bình

$$2\left[B_i(av)\, l_i v_a\right] N_c = L_c\left(\frac{2\, I_c}{t_c}\right) \qquad (7.30)$$

$B_i(av)$: Mật độ từ thông trung bình trong khe hở không khí giữa các cực trung gian.

l_i : Chiều dài sắt từ các cực trung gian.

v_a: Tốc độ trên vành phần ứng.

Với B_i được xác định từ pt 7.30, số ampere-vòng cần có để triệt ampere-vòng phản ứng phần ứng và tạo ra mật độ từ thông cần thiết, được tính như sau:

$$AT_i = AT_a(\text{đỉnh}) + \frac{B_i}{\mu_0} l_{gi} \qquad (7.31)$$

với l_{gi}: khe hở không khí của các cực trung gian.

Các Pt (7.30) và (7.31) dựa trên phép tính gần đúng và sự tính toán điện cảm rò cuộn dây L_C không đủ chính xác, sự chuyển mạch chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, sự phân tích khoa học chỉ có tính thông tin. Hơn nữa, không thể đạt được sự chuyển mạch hoàn hảo, luôn luôn có tia lửa phát sinh ở chổi than khi máy dc vận hành.

Không cần thiết phải có số cực từ trung gian bằng với số cực từ chính, để giảm chi phí, nhất là ở các máy điện dc công suất thấp, các cực từ trung gian có cùng cực tính thường được đặt luân phiên ở các vùng trung gian.

Ví dụ 7.6: Máy phát dc công suất 25kW, 4 cực, điện thế 440V. Có cuộn dây phần ứng quấn kiểu sóng với số dây dẫn là 840. Mật độ từ thông trung bình trong khe hở không khí dưới các cực từ trung gian là 0.5 Wb/m^2 với tải định mức, và chiều dài khe hở hướng tâm là 0.3 cm. Tính số vòng trên mỗi cực từ trung gian.

Giải:

Theo Pt 7.31: $$AT_i = AT_a(\text{đỉnh}) + \frac{B_i}{\mu_0} l_{gi} = \frac{I_a Z}{2AP} + \frac{B_i}{\mu_0} l_{gi}$$

Giả sử $I_a = I_{mạng}$

$$I_a = \frac{25 \times 10^3}{440} = 56.82A$$

$$AT_i = \frac{56.82 \times 846}{2 \times 2 \times 4} + \frac{0.5}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.3 \times 10^{-2} = 4198$$

$$N_i = \frac{AT_i}{I_a} = \frac{4198}{56.82} = 73.88 = 74$$

Các phương pháp kích thích

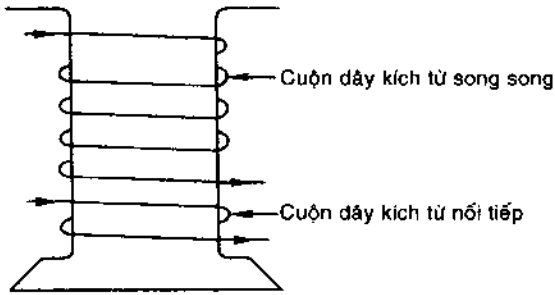
Kích thích cuộn dây từ có ảnh hưởng rất lớn đến đặc tuyến làm việc của máy dc. Có hai cách kích thích cơ bản cho máy điện dc.

1. *Kích thích song song.* Cuộn dây kích từ được quấn với nhiều vòng và được kích thích từ một nguồn điện áp. Do đó, cuộn dây kích từ có điện trở lớn và dòng điện nhỏ. Cuộn được kích thích song song với mạch phần ứng, nên được gọi là cuộn dây kích từ song song (cuộn trường song song). Vì điện thế phần ứng của máy điện dc không đổi, từ trường song song có thể điều chỉnh được bằng cách mắc điện trở nối tiếp vào mạch này.

2. *Kích thích nối tiếp.* Số vòng dây của cuộn kích thích rất ít nhưng dây quấn khá lớn và được kích thích từ dòng phần ứng bằng cách mắc nối tiếp với phần ứng, được gọi là cuộn kích từ nối tiếp. Với dòng điện cho trước, có thể điều chỉnh từ trường này bằng điện trở mắc rẽ, song song với cuộn dây nối tiếp. Cách điều chỉnh cuộn kích từ nối tiếp thích hợp nhất là thay đổi số vòng cuộn dây.

Hình 7.17 minh họa sự bố trí các cuộn dây kích từ nối tiếp và song song trên một cực từ của máy điện.

Hiện nay các linh kiện điện tử và mạch điện tương ứng được dùng để điều khiển kích thích nối tiếp và song song. Ngoài ra, còn có một cách khác để phân loại kích thích máy điện, có ý nghĩa đối với các máy điện dc được dùng làm máy phát, là phân biệt trường kích thích của máy điện được kích thích bởi điện thế/ dòng phần ứng của máy hay được kích thích từ nguồn độc lập. Theo quan điểm này, hai loại kích thích máy điện bao gồm:



Hình 7.17 *Cuộn dây kích từ nối tiếp và song song*

1. Kích thích riêng rẽ
2. Tự kích thích

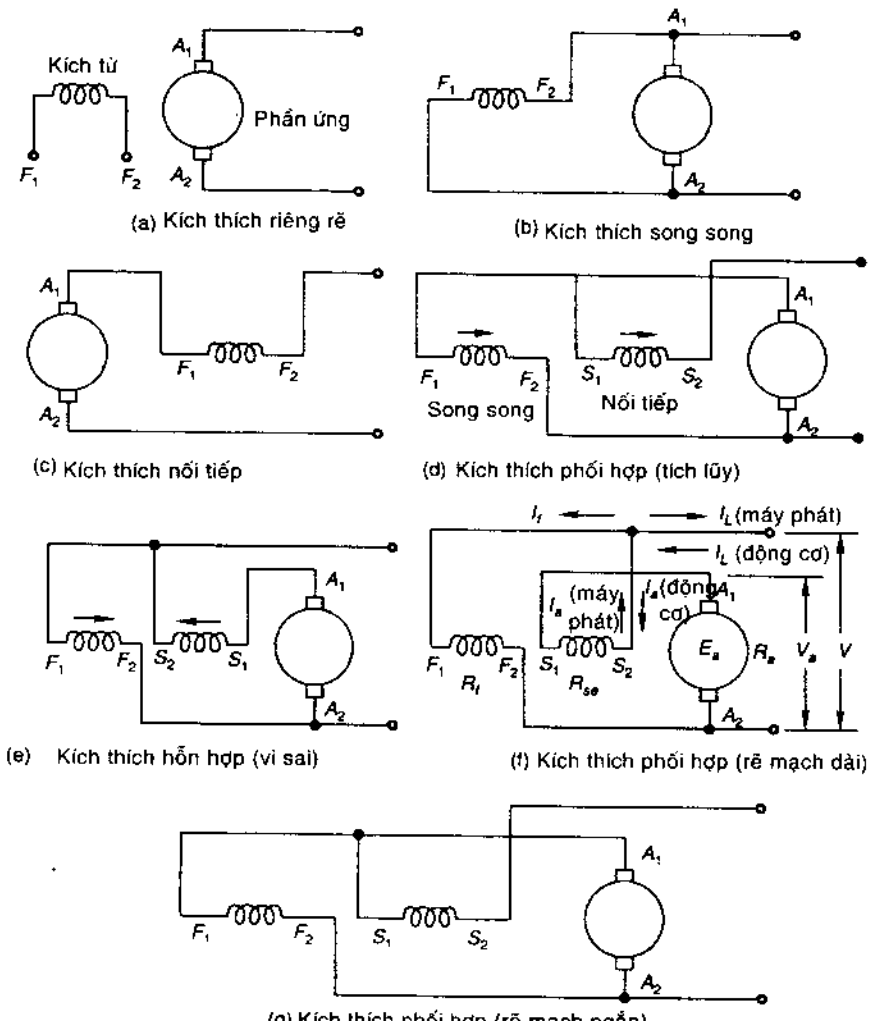
Trong cách kích thích riêng rẽ, cần có nguồn điện dc riêng để kích từ cuộn dây nên rất bất tiện. Trên Hình 7.18a minh họa cách bố trí kích thích riêng rẽ bằng cuộn dây kích từ song song. Máy điện được kích thích riêng rẽ rất linh hoạt, cho phép điều khiển độc lập cả mạch từ và mạch phần ứng. Các máy điện dùng từ trường vĩnh cữu được xếp vào loại này.

Máy phát dc tự kích thích có thể được kích thích bằng điện thế phần ứng của chính nó (kích thích song song) (Hình 7.18b) hoặc được kích thích bởi dòng của chính nó (kích thích nối tiếp) (Hình 7.18 c). Kết hợp kích thích song song và nối tiếp được gọi là kích thích hỗn hợp. Trong các máy điện thực tế thường dùng kiểu kích thích hỗn hợp. Máy điện tự kích thích có thể bị tình trạng mất kích thích trong những điều kiện từ trường nhất định.

Khi máy điện dc là động cơ, thường được kích thích riêng rẽ lấy từ nguồn dc. Hình 7.18 b,c là sơ đồ kích thích song song và nối tiếp dùng trong các động cơ dc.

Trên Hình 7.18d, máy điện được kích thích cả song song lẫn nối tiếp, được gọi là *kích thích hỗn hợp*. Nếu từ thông kích thích nối tiếp kết hợp với từ thông song song, từ thông qua khe hở không khí trên mỗi cực sẽ tăng, được gọi là máy điện dc kích thích hỗn hợp vi sai (Hình 7.18c). Trong Hình 7.18 mạch từ và phần ứng tạo thành góc 90^0 điện. Như đã đề cập, sự định hướng không gian thực sự của từ trường được tạo bởi mạch từ và phần ứng trong máy điện dc. Trên Hình 7.18d, e hướng mũi tên phù hợp với các từ trường liên kết của hai cuộn dây kích từ. Hình 7.18d cho thấy từ trường cuộn kích thích cộng nhau. Sự kích thích hỗn hợp tích lũy của động cơ và máy phát thường được dùng để khai thác ưu thế của sự kích thích nối tiếp và song song. Ngày nay, khi xuất hiện

phương pháp điều khiển điện tử trên mạch từ và mạch kích thích, sự kích thích hỗn hợp tích lũy ít được sử dụng. Động cơ kích thích kiểu hỗn hợp vi sai có thể bị mất ổn định ở mức vận hành nào đó, thậm chí với mức quá tải nhẹ.



Hình 7.18 *Các phương pháp kích thích máy điện dc*

Theo quan điểm kết nối, máy điện dc hỗn hợp có thể có mạch nối kích từ kiểu *rẽ mạch ngắn* (Hình 7.18g) hoặc *rẽ mạch dài* (Hình 7.18 f). Đây là hai cách nối cuộn dây kích từ song song trong máy điện kích thích hỗn hợp. Nhưng giữa chúng không có sự khác biệt rõ rệt về đặc tính làm việc. Chọn lựa giữa hai kiểu nối kết này tùy thuộc vào sự xem xét về mặt cơ học.

Phương trình mạch trạng thái ổn định

Vận hành máy điện ở trạng thái ổn định, điện cảm trường kích thích và phần ứng không đóng vai trò gì trong các phương trình mạch trạng thái ổn định của máy điện. Từ Hình 7.18 f minh họa máy điện kích thích hỗn hợp kiểu rẽ mạch ngắn, và từ định luật Kirchhoff, các phương trình mạch trạng thái ổn định của máy điện được viết như sau:

$$V_a = E_a \pm I_a R_a \tag{7.32}$$

$$V = E_a \pm (R_a + R_{se}) \tag{7.33}$$

với $$I_L = I_a \pm I_f \tag{7.34}$$

dấu cộng (+) khi máy điện là động cơ, dấu trừ (-) khi máy điện là máy phát

Đặc tuyến từ hóa

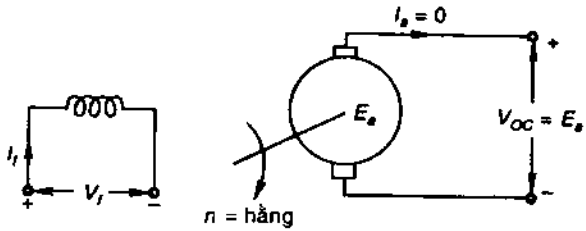
Phương trình moment ngẫu lực, lực điện động (emf), và cân bằng công suất đã được xét đến. Phần này sẽ giải thích đặc tuyến từ hóa, cơ sở để xác định sự vận hành máy điện.

Đường cong từ hóa của vật liệu sắt từ, quan hệ B - H, được giải thích trong Chương 2. Trong máy điện, thay cho quan hệ được xác định theo điểm bất kỳ trong từ trường, có thể xác định quan hệ từ hóa theo giá trị các đại lượng tổng, từ thông khe hở không khí/ cực, Φ, và lực từ động kích thích mmf được đo bằng dòng từ hóa (dòng kích thích), I_f, nhưng không có cách nào thuận tiện để đo Φ trong máy điện cả. Do đó, quan hệ (7.4) được dùng đến, trong đó:

$$E_a \propto \Phi n$$

Từ đây, rõ ràng là lực điện động E_a của máy điện là độ đo từ thông khi phần ứng quay với tốc độ không đổi.

Đặc tuyến từ hóa của máy điện dc được xác định bằng cách đo điện thế mạch hở phần ứng ($I_a = 0$); $V_{0C} = E_a$; ở tốc độ danh định của phần ứng, khi dòng I_f tăng dần từ 0 đến giá trị V_{0C} trên điện thế danh định của máy (thường là 125%). Để xác định đặc tuyến này, máy điện được kích thích riêng biệt theo

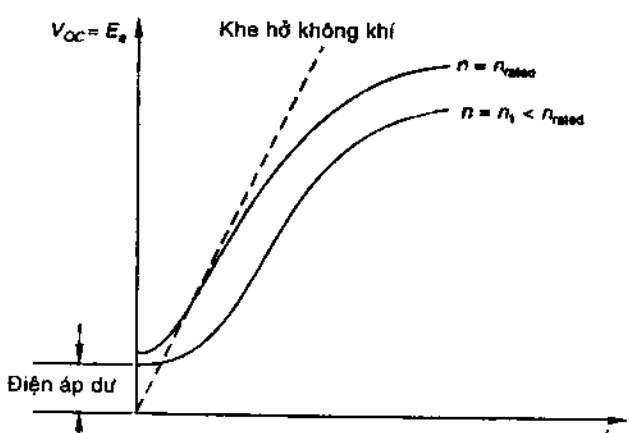


***Hình 7.19** Máy phát kích thích riêng biệt*

kiểu máy phát và chạy ở tốc độ định mức được truyền động bằng động cơ bên ngoài (Hình 7.19).

Đặc tuyến từ hóa trên Hình 7.20, được gọi là đặc tuyến mạch hở (OCC), biểu thị các đặc tuyến quan trọng của đường cong từ hóa của sắt, bị biến đổi do khe hở không khí trong mạch từ. Khi tiến hành nghiên cứu OCC, phải nâng dòng I_f lên từ từ, nếu không, đường cong sẽ thể hiện vòng từ trễ. Hơn nữa, vì máy điện phụ thuộc vào sự từ hóa, nên sẽ có mức điện thế dư nhỏ ở vùng không được kích thích, điều này rất cần thiết đối với các máy phát điện tự kích thích.

Kéo dài phần tuyến tính của đường cong từ hóa (đường nét đứt trên Hình 7.20) được gọi là đường khe hở không khí, thể hiện chủ yếu hoạt động từ tính của khe hở không khí trong máy điện, sắt từ không bị bão hòa trong vùng này ampere - vòng tiêu thụ không đáng kể. Trong mọi trường hợp, hiệu ứng sắt từ cũng tuyến tính ở đây.



***Hình 7.20** Đặc tuyến mạch hở (OCC)*

Đặc tuyến mạch hở ở tốc độ khác với tốc độ thực hiện kiểm tra, là sự diễn dịch tỷ lệ của các đặc tính được nêu trên Hình 7.20, điều này là do tính tỷ lệ thuận giữa E_a và n.

Để thuận tiện, thử nghiệm OCC được tiến hành bằng cách kích thích cuộn dây cực từ chính như giả thiết nêu trên. Tuy nhiên, trong máy điện kích thích hỗn hợp, trị số lực điện động emf cảm ứng có thể đo được từ OCC đối với dòng kích thích chính tương đương

$$I_{f,eq} = I_f \pm \frac{N_{se}}{N_f} I_{se} \qquad (7.35)$$

Với : N_f : số vòng dây kích từ chính

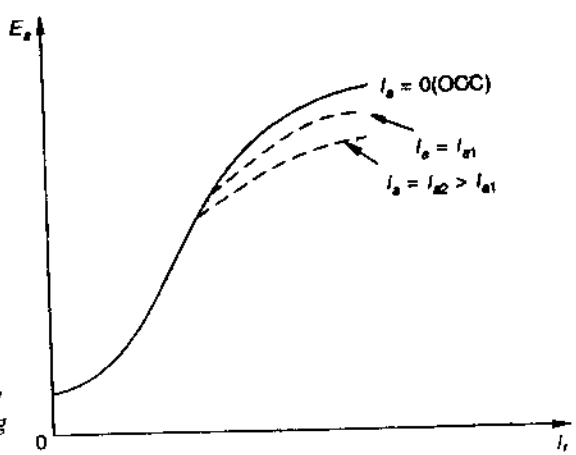
N_{se}: số vòng dây kích từ nối tiếp

I^f : dòng kích thích chính

I_{se}: dòng kích từ nối tiếp

Dấu (+) khi kích thích là tích lũy. Dấu (-) khi kích thích là vi sai

Nói chung, từ thông/cực, và lực điện động cảm ứng emf giảm do hiệu ứng khử từ của phản ứng phần ứng trong vùng bão hòa của đường cong từ hóa. Lực điện động cảm ứng emf được biểu diễn theo hàm số tổng quát E_a (I_f, I_a), với đồ thị $I_a = 0$ (OCC), $I_a = I_{a1}$ và $I_a = I_{a2} > I_{a1}$ như trên Hình 7.21. Khác với thử nghiệm với tải thực (máy phát), rất khó đo độ giảm lực điện động cảm ứng do dòng phần ứng gây nên. Nói chung, các quan hệ thực nghiệm được dùng để



Hình 7.21 *Đặc tuyến từ hóa thay đổi theo phản ứng phần ứng*

hiệu chỉnh. Một phương pháp thực nghiệm để tính hiệu ứng khử từ của phản ứng phần ứng khi có sự bão hòa là gộp giá trị ampere - vòng AT_d khử từ tương đương để tính tác dụng ampere - vòng chung trên mỗi cực:

$$(AT)_{net} = AT_f \pm AT_{se} - AT_d \qquad (7.36)$$

với AT_f = Ampere vòng cuộn từ chính kích từ nối tiếp

AT_{se} = Ampere vòng kích từ nối tiếp (Tích lũy/vi sai)

AT_d và I_a tỷ lệ với nhau theo hằng số tỷ lệ xác định thích hợp.

Ví dụ 7.7: Động cơ dc kích thích hỗn hợp, 240 V có đặc tuyến từ hóa mạch hở tại tốc độ toàn tải bình thường là 850 v/ph.

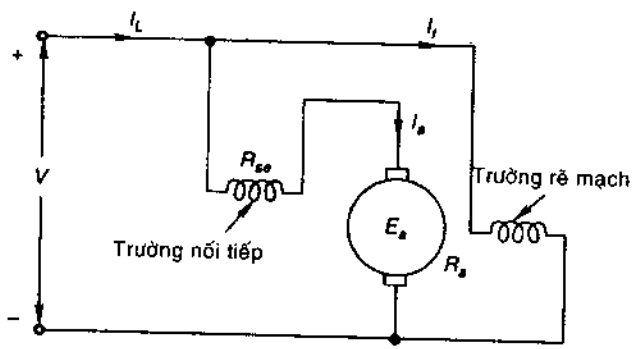
Kích thích, AT/ cực:	1200	2400	3600	4800	6000
Lực điện động emf phát sinh, V:	76	135	180	215	240

Sụt áp do điện trở trên mạch phần ứng khi toàn tải là 25V. Khi toàn tải các cuộn kích thích nối tiếp và song song tạo nên kích thích ampere vòng bằng nhau. Hãy tính lực từ động mmf ở mỗi cực khi không tải. Hãy tính giá trị tốc độ tăng lên khi loại bỏ tải toàn phần, độ sụt áp trong mạch phần ứng ở điều kiện đó là 3V. Bỏ qua phản ứng phần ứng và hiệu ứng tiếp xúc chổi than. Giả sử động cơ kích từ hỗn hợp lũy tiến kiểu rẽ mạch dài.

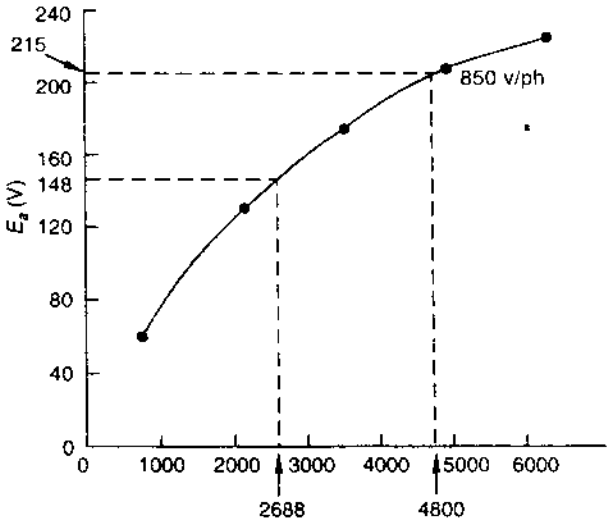
Giải

Khi toàn tải, từ Hình 7.22:

$$E_a \text{ (toàn tải)} = V - I_a (R_a + R_{se}) = 240 - 25 = 215 \text{ V}$$



Hình 7.22 *Động cơ dc kích từ hỗn hợp kiểu rẽ mạch dài*



***Hình 7.23:** Kích thích AT/cực*

AT_{net} tương ứng từ đường cong từ hóa trên Hình 7.23 là

AT_{net} (toàn tải) = 4800

$AT_{sh} = AT_{se}$ (toàn tải) = 2400

I_a (không tải) = 3/25 I_a (toàn tải),

I_a (không tải) = I_f (dòng kích từ song song)

AT_{se} (không tải) = (3/25) x 2400 = 288

AT_{sh} = 2400 (không đổi)

AT_{net} (không tải) = 2400 + 288 = 2688

E_a (từ đường cong từ hóa) = 148 V tại 850 v/ph tại AT_{net} (không tải)

E_a(không tải) = 240 - 3 = 237V

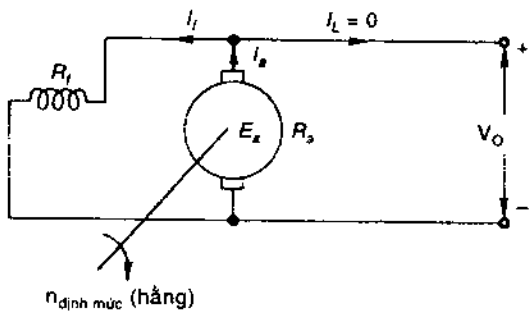
$E_a \propto n$ tại AT_{net} đã cho

n (không tải) = 850 x (237/148) = 1361 v/ph.

Có thể thấy trong động cơ dc kích thích hỗn hợp lũy tiến, tốc độ toàn tải nhỏ hơn tốc độ không tải.

Sự tự kích thích

Thay vì bố trí nguồn dc kích thích riêng biệt, các máy phát thường lấy nguồn kích thích từ các cuộn phần ứng của chúng. Phương pháp này được gọi là tự kích thích. Máy phát tự kích thích có sơ đồ nối được nêu trên Hình 7.24, tương tự máy phát kích thích song song (vì cuộn kích thích và cuộn phần ứng nối song song với nhau).



***Hình 7.24** Máy phát tự kích thích (kích thích song song)*

Giả sử từ trường được đưa vào mạch sau khi phần ứng đạt tốc độ định mức. Vào thời điểm này, điện áp phần ứng bằng điện áp dư nhỏ, gây ra dòng từ trường nhỏ. Nếu từ trường được nối vào dòng này làm tăng mmf và do đó cảm ứng emf, máy sẽ tiếp tục được xác lập. Đây thực ra là kết nối hồi tiếp dương và máy sẽ thiết lập giá trị ổn định do đặc tuyến bão hòa mạch từ của máy.

Vì máy phát được giả thiết là không tải trong quá trình khởi động, có thể dùng quan hệ mạch sau đây (Hình 7.24)

$$I_a = I_f \tag{7.37}$$

$$V = E_a - I_f.R_a \tag{7.38}$$

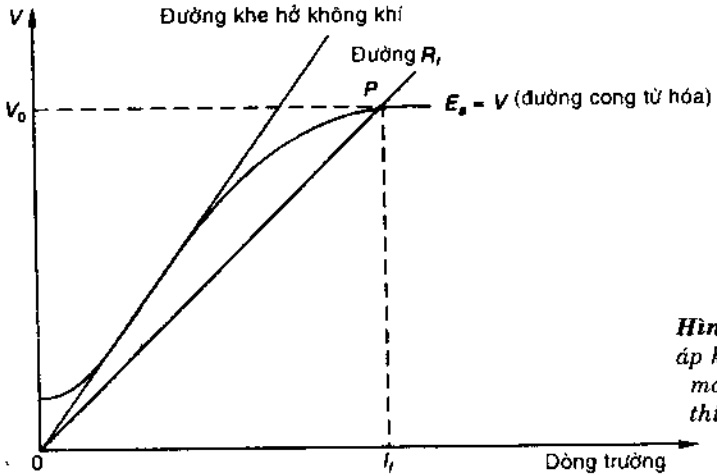
Dòng kích thích trong máy phát kích thích rẽ mạch rất nhỏ, sự sụt áp I_fR_a có thể bỏ qua, nên

$$V = E_a\ (I_f)\ \text{(đặc tính từ hóa)} \tag{7.39}$$

Đối với mạch từ: $$V = I_f\ R_f \tag{7.40}$$

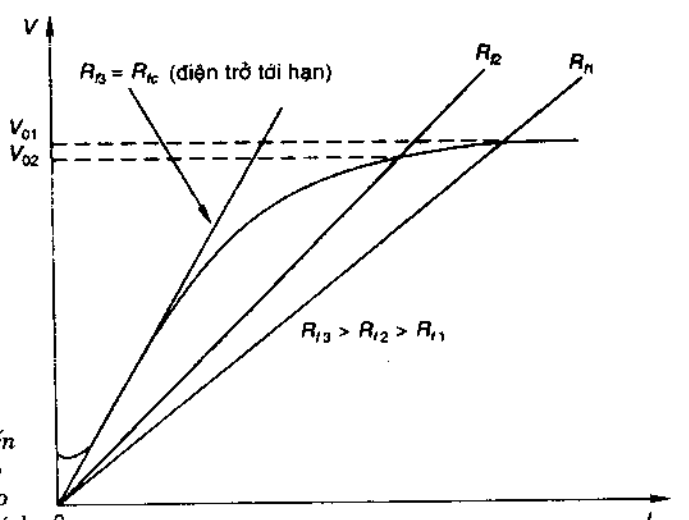
xuất hiện quan hệ đường thẳng, được gọi là đường R_f, trong đồ thị V - I_f (Hình 7.25).

Điện áp cực không tải là nghiệm của hệ phương trình (7.39) và (7.40). Điểm giao nhau P của đường R_f với đặc tuyến từ hóa (Hình 7.25) xác định điện

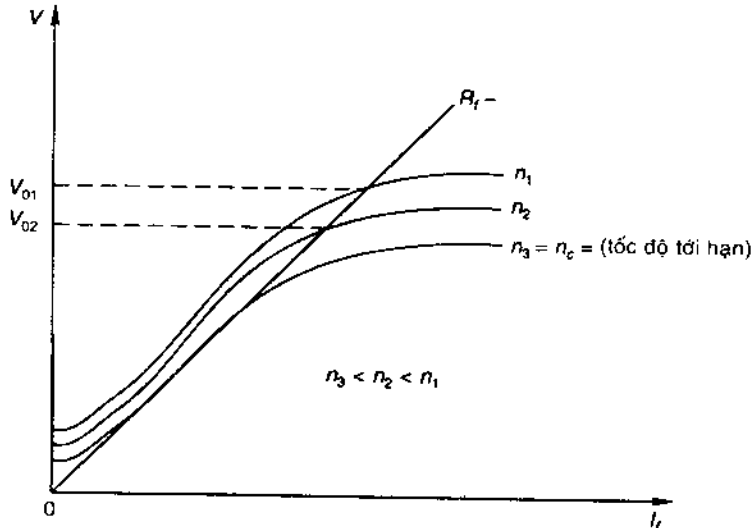


Hình 7.25. *Điện áp không tải của máy phát kích thích mạch rẽ.*

áp cực không tải (V_0) và dòng kích thích tương ứng. Hơn nữa, từ Hình 7.25 dễ dàng nhận thấy điện áp không tải có thể hiệu chỉnh đến giá trị yêu cầu bằng cách thay đổi điện trở kích thích. Từ Hình 7.26 có thể thấy điện trở kích thích tăng thì điện áp không tải giảm. Điện áp không tải không xác định đối với điện trở kích từ ($R_{f3} = R_{fc}$), do trùng với phần tuyến tính của đường cong từ



Hình 7.26 *Biến thiên điện áp không tải theo điện trở kích thích*



***Hình 7.27** Ảnh hưởng của tốc độ với điện áp không tải*

hóa. Với điện trở kích từ hơi lớn hơn giá trị này, máy điện không kích thích được với giá trị bất kỳ và điện áp không tải gần với giá trị điện áp dư. Máy điện với điện trở lớn trong từ trường sẽ không kích thích được, và điện trở tương ứng được gọi là *điện trở tới hạn* (R_{fc}).

Xét sự vận hành của máy với R_f cố định và tốc độ phần ứng thay đổi. Trên Hình 7.27, khi tốc độ giảm, đặc tuyến mạch hở OCC cũng giảm theo tỷ lệ, làm giảm điện áp không tải. Tại tốc độ gọi là tốc độ tới hạn. Đặc tuyến mạch hở OCC tiếp tuyến với đường cong R_f và lúc đó máy phát mất kích thích.

Tóm lại, máy phát dc kích thích mạch rẽ có thể mất sự tự kích thích vì một trong các điều kiện sau:

1. Không có hiện tượng từ dư.
2. Không nối mạch từ vào phần ứng, emf cảm ứng do từ dư có khuynh hướng phá hủy từ dư (hồi tiếp âm).
3. Điện trở mạch từ cao hơn giá trị tới hạn.

Điều kiện (2) có thể khắc phục bằng cách đảo kết nối từ kích thích vào phần ứng hoặc đảo chiều quay phần ứng. Ở các máy điện dc lớn có kết nối thường xuyên và chiều quay cố định, có thể khắc phục bằng cách kích thích tạm thời từ kích từ nguồn điện riêng.

Ví dụ 7.8: Bảng sau đây nêu các đặc tuyến mạch hở của máy phát dc kích thích song song, vận hành với tốc độ 300 v/ph.

I_f(A)	0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
V_{OC} (V)	7.5	93	135	165	186	202	215

Điện trở kích thích của máy điện được điều chỉnh ở 354.5Ω, tốc độ 300 v/ph.

(i). Xác định điện áp không tải theo đồ thị.

(ii). Xác định điện trở kích từ tới hạn.

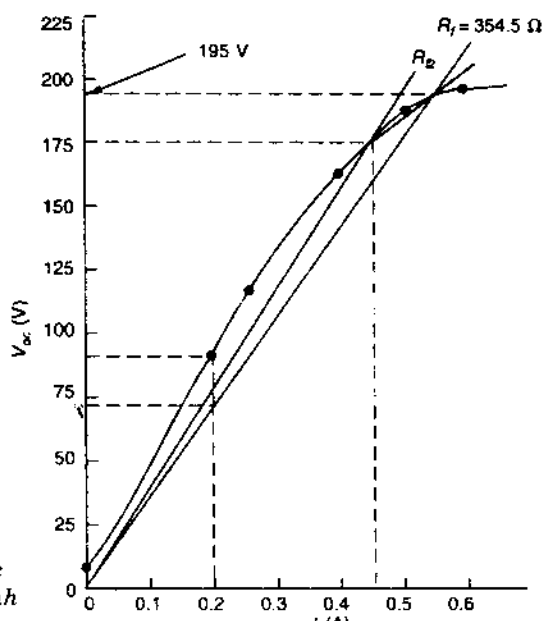
(iii).Xác định tốc độ tới hạn theo điện trở cho trước.

(iv).Phải ghép thêm điện trở bổ sung là bao nhiêu trong mạch kích thích để giảm điện áp không tải xuống 175V?

Giải

Từ đặc tuyến từ hóa trên Hình 7.28

(i) : V (không tải) $|_{R_f = 354.5\Omega}$ = 195V



Hình 7.28. *Đặc tuyến từ hóa minh họa ví dụ 7.8.*

(ii) : R_f(tới hạn) = $\frac{90}{0.2}$ = 450 Ω

(iii) : n (tới hạn) = 300 × $\frac{71}{90}$ = 236.7 vòng / phút

(iv) : V (không tải) = 175V

$$R_{f2} = \frac{175}{0.44} = 397.7\ \Omega$$

Điện trở ghép thêm vào mạch kích từ là:

$$= 397.7 - 354.5 = 43.2\ \Omega$$

Đặc tuyến máy phát dc

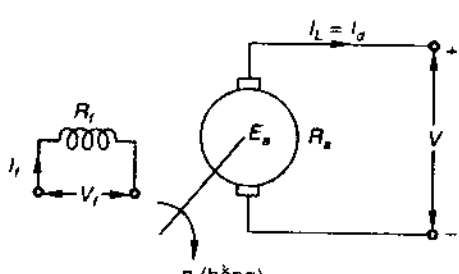
Với các bộ chỉnh lưu điện tử, chẳng hạn SCR tầm quan trọng của các máy điện dc giảm đáng kể.

Đặc tuyến tải của máy phát dc tại một tốc độ nào đó là quan hệ giữa điện áp cực và dòng tải (dòng phát trên dây) được gọi là *đặc tuyến ngoài*. *Đặc tuyến trong* là đường giữa emf phát sinh và dòng tải.

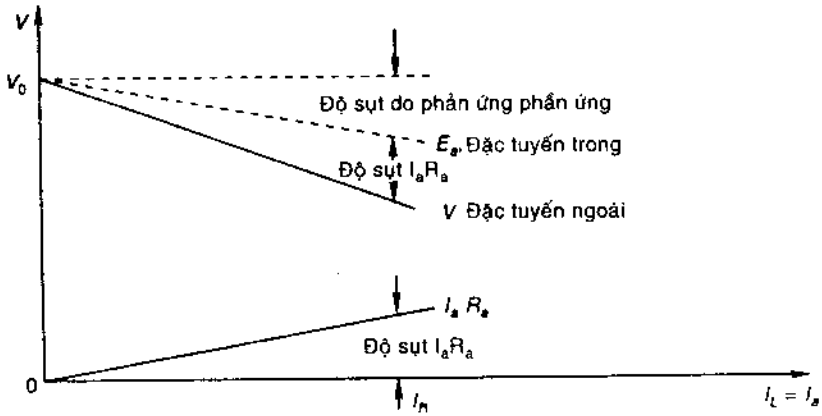
Máy phát dc kích thích riêng rẽ

Hình 7.29 minh họa máy phát dc kích thích riêng rẽ. Giả sử phần ứng được truyền động bằng động cơ có tốc độ không đổi và dòng kích thích I_f được điều chỉnh để tạo ra điện áp không tải định mức và được giữ không đổi trong quá trình khảo sát. Mạch phần ứng được tính theo phương trình:

$$V = E_a - I_aR_a; \qquad I_a = I_L \tag{7.41}$$



Hình 7.29 *Máy phát dc kích thích riêng rẽ*



Hình 7.30 *Các đặc tuyến của một máy phát kích thích riêng rẽ*

Mặc dù kích thích không đổi, E_a sụt theo tải do hiệu ứng khử từ của phản ứng phần ứng. Đặc tuyến trong (E_a - I_L) là đường nét đứt trên Hình 7.30. Đặc tuyến ngoài khác với đặc tuyến trong theo độ sụt áp phần ứng I_aR_a (Hình 7.30).

Điều chỉnh điện áp máy phát (độc lập với dạng kích thích) được xác định như sau:

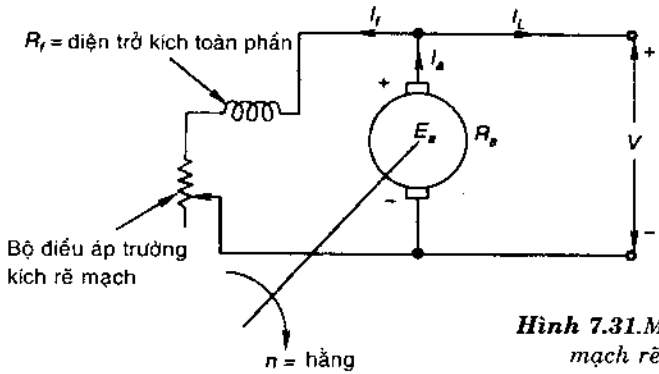
$$\%\ \text{điều chỉnh} = \frac{V_0 - (V_{fl} = V_{\text{định mức}}}{V_{\text{định mức}}} \qquad (7.42)$$

với : V_{fl} = Điện áp toàn tải = $V_{\text{định mức}}$

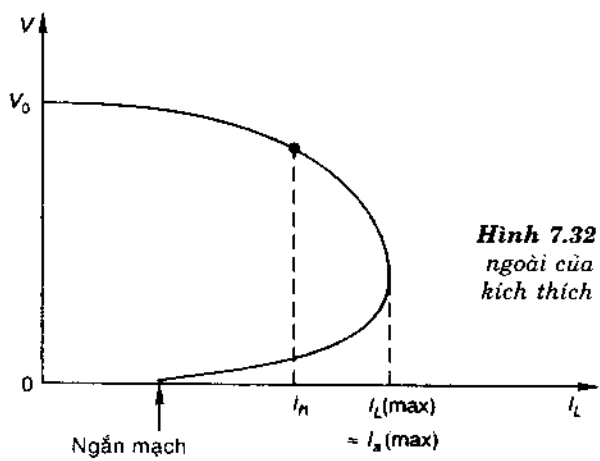
V_0 = Điện áp không tải tương ứng điện áp định mức toàn tải, kích thích không đổi

Máy phát kích thích song song

Máy phát điện dc kích thích song song là loại tự kích thích. Hình 7.31 minh họa máy phát kích thích song song. Điện trở kích từ được điều chỉnh bằng điện trở, để nhận điện áp không tải theo yêu cầu (Hình 7.25). Đặc tuyến ngoài của máy phát nhận được bằng thử nghiệm trên tải, với điện trở kích từ tổng được giữ không đổi trong suốt quá trình thử này. Điện áp cực trong máy phát điện kích thích song song sụt theo tải nhanh hơn trong máy phát tự kích thích vì dòng kích thích cũng sụt nhanh theo điện áp cực. Đặc tuyến ngoài là đường cong có giá trị kép tại một I_L (max) (Hình 7.32). Đặc tuyến trong có thể nhận được bằng cách cộng độ sụt áp I_aR_a tại các điểm tải. Trên Hình 7.32, phần hữu dụng của đặc tuyến ngoài lớn hơn trước điểm xoay.



Hình 7.31. *Máy phát dc mạch rẽ có tải*



Hình 7.32 *Đặc tuyến ngoài của máy phát kích thích song song*

Xác định trước đặc tuyến ngoài

Đặc tuyến ngoài của máy phát kích thích song song có thể được xác định trước từ những hiểu biết về đặc tuyến mạch hở và các điện trở kích thích và phần ứng (xác định được nhờ các thử nghiệm dc đơn giản), mà không cần thực hiện các thử nghiệm có tải thực sự, do tương đối khó đối với máy phát công suất lớn. Giả sự độ sụt áp phản ứng phần ứng là không đáng kể. Theo Hình 7.31.

$$I_a = I_L + I_f$$

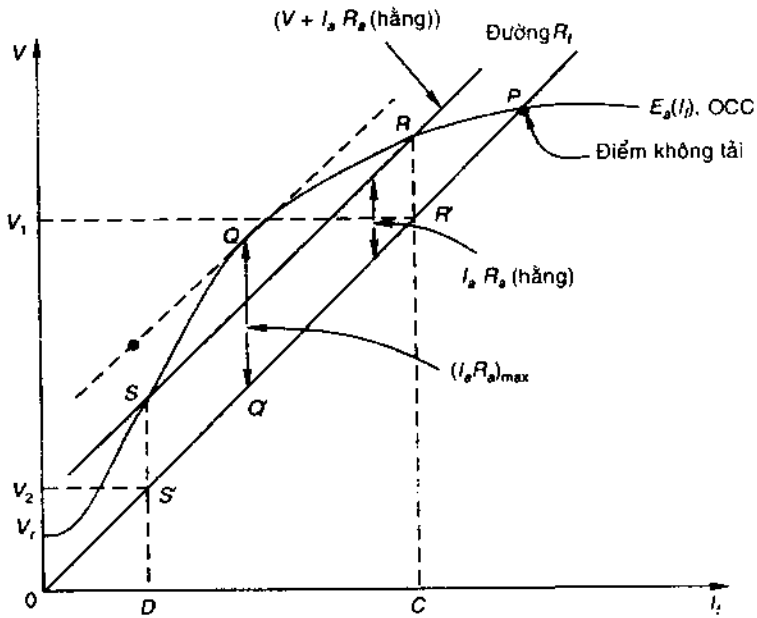
$$= I_L \quad \text{(dòng kích thích song song không đáng kể đối với dòng tải)} \qquad (7.43)$$

$$E_a = V + I_aR_a \quad (7.44)$$

$$V = I_f.R_f, \ (R_f) \quad (7.45)$$

$$E_a = R_a(I_f), \text{ đặc tuyến mạch hở} \quad (7.46)$$

Do độ không tuyến tính (bão hòa trên OCC), nghiệm các phương trình 7.44 và 7.46 xác định điện áp cực với R_f và I_aR_a cho trước, được nêu bằng đồ thị trên Hình 7.33. Với I_aR_a cho trước, Pt (7.44) được biểu diễn theo đường thẳng song song với đường R_f và cách nhau theo đoạn thẳng đứng I_aR_a. Đường thẳng này cắt đường OCC tại hai điểm R, S là hai emf cảm ứng. Từ hai điểm này, có thể tìm được trên đường R_f hai điện áp cực V_1 và V_2 tương ứng hai điểm R', S'.



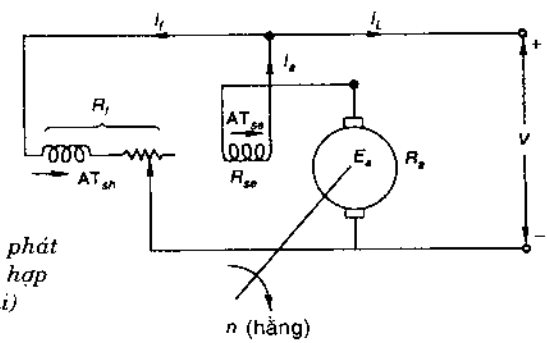
Hình 7.33 *Xác định trước đặc tuyến ngoài của máy phát dc kích thích song song*

Dòng phần ứng tối đa có thể đạt tương ứng với điểm Q, tại đó đường song song với R_f là tiếp tuyến của đường OCC. Tương ứng với từng điểm, các giá trị V và I_f có thể tính được và $I_L = I_a + I_f$ có thể tính dễ dàng, từ đó đặc tuyến ngoài được vẽ như trên Hình 7.33. Điểm ngắn mạch trên đặc tuyến ngoài tương ứng với $I = R_a = V_r$ (điện áp dư).

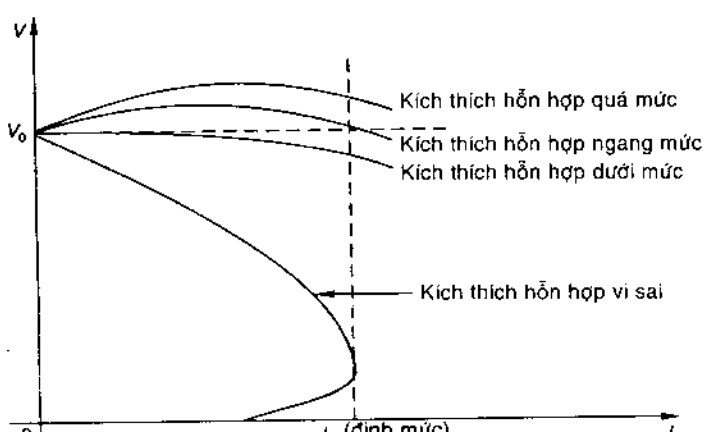
Sụt áp của gốc phản ứng phần ứng có thể tính theo sự biến đổi OCC theo kinh nghiệm (Hình 7.21).

Máy phát kích thích hỗn hợp

Nguyên nhân gây sụt áp của điện áp cực từ không tải tới toàn tải trong máy phát kích thích song song có thể được bù một phần, toàn bộ, hoặc quá mức bằng cách dùng kích từ nối tiếp bổ sung (hỗn hợp lũy tiến) theo kiểu rẽ mạch ngắn hoặc rẽ mạch dài (Hình 7.34). Ampere - vòng bổ sung của cuộn kích từ nối tiếp tăng tự động theo tải bù cho sụt áp phần ứng. Đặc tuyến Volt - ampere (V - I) trạng thái ổn định của máy phát kích thích hỗn hợp được minh họa trên Hình 7.35. Kiểu kích thích hỗn hợp vi sai không được dùng trong thực tế vì điện áp đầu ra sụt nhanh theo tải.



Hình 7.34 *Máy phát kích thích hỗn hợp (rẽ mạch dài)*

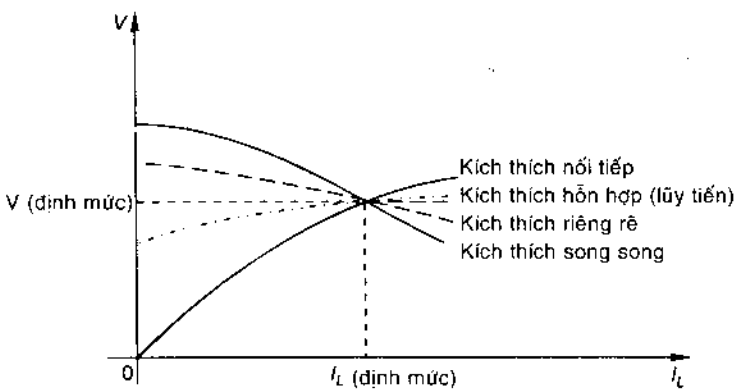


Hình 7.35 *Đặc tuyến ngoài của máy phát kích thích hỗn hợp*

Kết nối cuộn dây kích thích nối tiếp kiểu rẽ mạch ngắn hay rẽ mạch dài chỉ tạo ra sự khác biệt ở biên đặc tuyến V - I của máy phát hỗn hợp.

So sánh đặc tuyến Volt - Ampere của các máy máy dc

Đặc tuyến V - I (trạng thái ổn định) của các loại máy phát dc khác nhau được minh họa trên Hình 7.36, được vẽ theo điện áp đầu ra định mức và toàn tải. Đường cong đặc tuyến của máy phát kích thích nối tiếp cũng được vẽ trên Hình này, đây là đường đặc tuyến dốc lên và sự kích thích tăng theo tải (I_f = I_s = I_L). Ở các mức dòng tải lớn, điện áp ra lúc đầu giảm do sắt từ bão hòa và tăng do sụt áp của phần ứng phần ứng và điện trở phần ứng.



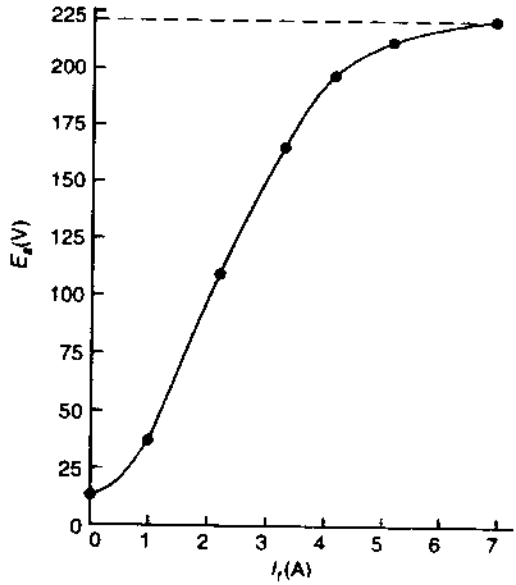
Hình 7.36 *Đặc tuyến V - I của các máy phát dc.*

Ví dụ 7.9: Máy phát lũy tiến kiểu rẽ mạch dài, kích thích hỗn hợp, 100 kW, 200 V, điện trở phần ứng tương đương 0.03 Ω, điện trở kích từ nối tiếp 0.004 Ω. Có 1200 vòng dây kích từ song song trên mỗi cực và 5 vòng kích từ nối tiếp trên mỗi cực. Các thông số của đường cong từ hóa tại tốc độ phần ứng 1000 v/ph như sau:

I_f (A)	0	1	2.2	3.3	4.2	5.3	7.1
E_c (V)	11	33	100	167	200	215	222

Ghi chú : I_f: dòng kích từ song song

Tính điện áp ngõ ra với dòng định mức khi dòng kích từ song song là 5A và tốc độ 950 v/ph. Bỏ qua phản ứng phần ứng.



***Hình 7.37**. Minh họa ví dụ 7.9*

Giải:

$$I_L = \frac{100 \times 10^3}{200} = 500 \text{ A}$$

Từ Hình 7.18(f):

$$I_a = I_L \times I_f = 505 \text{ A} = I_{se}$$

Phương trình (7.35) (kích từ kiểu hỗn hợp lũy tiến)

$$I_{feq} = I_f + \frac{N_{se}}{N_f} I_{se}$$

$$= 5 + \frac{5}{1200} \times 505 = 7.1 \text{ A}$$

Từ đặc tính từ hóa (Hình 7.37)

$$E_a = 222.5\text{V}$$

$$E_a \text{ (950 v/ph)} = (950/1000) \times 222.5 = 211.38 \text{ V}$$

Từ Hình 7.18 (f):

$$V = E_a - I_a (R_a + R_{se}) = 211.38 - 505 (0.03 + 0.004) = 194.21 \text{ V}$$

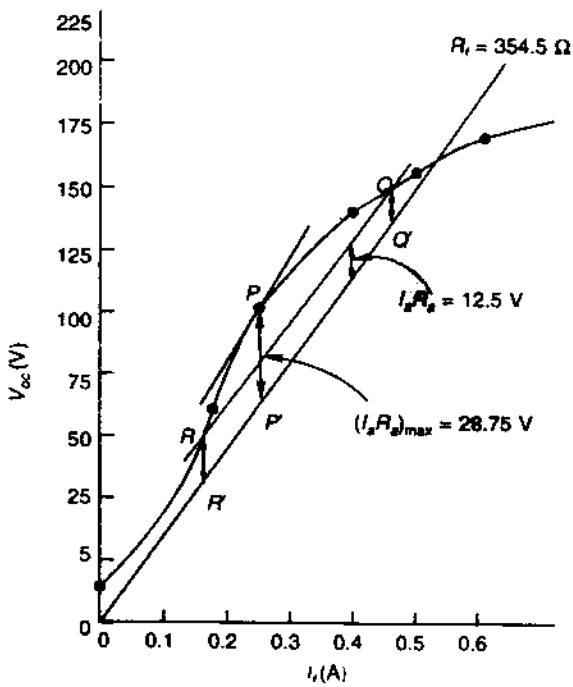
Ví dụ 7.10: Máy phát dc kích thích song song với đặc tuyến từ hóa và điện trở kích thích như trong Ví dụ 7.8, hãy xác định:

a) Điện thế cực tại dòng phần ứng 25A.

b) Dòng phần ứng tối đa và điện áp ra tương ứng là bao nhiêu?

c) Dòng phần ứng ngắn mạch.

Cho: $R_a = 0.5\ \Omega$, bỏ qua ảnh hưởng của phản ứng phần ứng.



Hình 7.38. *Minh họa Ví dụ 7.10*

Giải:

Đặc tuyến từ hóa và đường $R_f = 354.5\ \Omega$ được vẽ trên Hình 7.39

a) $I_aR_a = 0.5 \times 25 = 12.5V$.

b) Vẽ đường RQ song song với đường R_f và 12.5 V phía trên, tìm giá trị điện áp tương ứng theo Q' và R'

V_{ra} = 62V; 162.5 V

c) Vẽ đường song song với đường R_f và tiếp xúc với OCC:

$(I_aR_a)_{max}$ = PP' = 28.75 V

Hoặc $I_a(max)$ = 2875/ 0.5 = 57.5 A

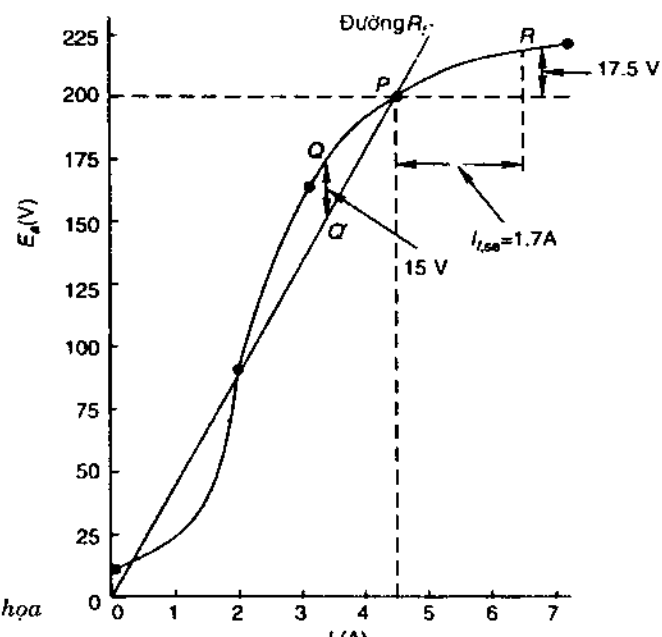
d) $I_{sc}R_a$ = OS (điện áp dư) = 7.5 V

I_{sc} = 7.5/ 0.5 = 15 A

Ví dụ 7.11: Máy phát dc kích thích song song 100 kW, 200V, 1000 v/ph, R_a = 0.03 Ω. Máy phát được truyền động theo tốc độ định mức và được kích thích để tạo ra 200V định mức khi không tải. Thông số đặc tuyến từ hóa của máy phát được cho như sau:

I_f (A)	0	1	2.2	3.3	4.5	7.1
EMF (V)	10	32.5	100	167.5	200	222.15

Hãy xác định điện áp ra của máy phát khi I_a = 500 A.



***Hình 7.39**. Minh họa Ví dụ 7.11*

Cuộn kích thích nối tiếp có 5 vòng dây/cực có điện trở tổng là 0.005Ω, kết hợp cuộn kích thích hỗn hợp kiểu rẽ mạch dài. Có 1200 vòng dây/cực trong cuộn kích từ song song. Máy phát được kích từ hỗn hợp ngang mức và điện áp toàn tải là 200V khi điện trở trong mạch kích thích song song được chỉnh để tạo ra điện áp không tải 200V. Tìm giá trị điện trở cuộn kích thích nối tiếp để máy vận hành theo yêu cầu.

Giả sử phản ứng phần ứng AT được bù.

Giải

Đặc tuyến từ hóa (Hình 7.39), vẽ đường R_f, tương ứng tại 200V,

$$R_f = \frac{200}{4.5} = 44.4\ \Omega$$

$$I_aR_a = 500 \times 0.03 = 15V$$

Vẽ đường song song với đường R_f tại 15V (= QQ')

V (ra) = 165 V (tương ứng Q')

Với cuộn dây kích thích nối tiếp bổ sung cho cuộn kích thích hỗn hợp tích lũy kiểu rẽ mạch dài:

Điện trở mạch phần ứng : 0.03 + 0.005 = 0.035 Ω

Sụt áp mạch phần ứng: 500 x 0.036 = 17.5V

Để bù cho sụt áp này, điểm làm việc trên OOC phải ở R, tức là (200 + 17.5) = 217.5V. Điện áp toàn tải và không tải sẽ phải là 200V. Từ Hình 7.39, mạch kích từ nối tiếp đo được theo dòng kích từ song song là:

$$I_{fsc} = 1.7\ A$$

$$AT_{sc} = I_{fsc} \times 1200 = 1.7 \times 1200 = 2040$$

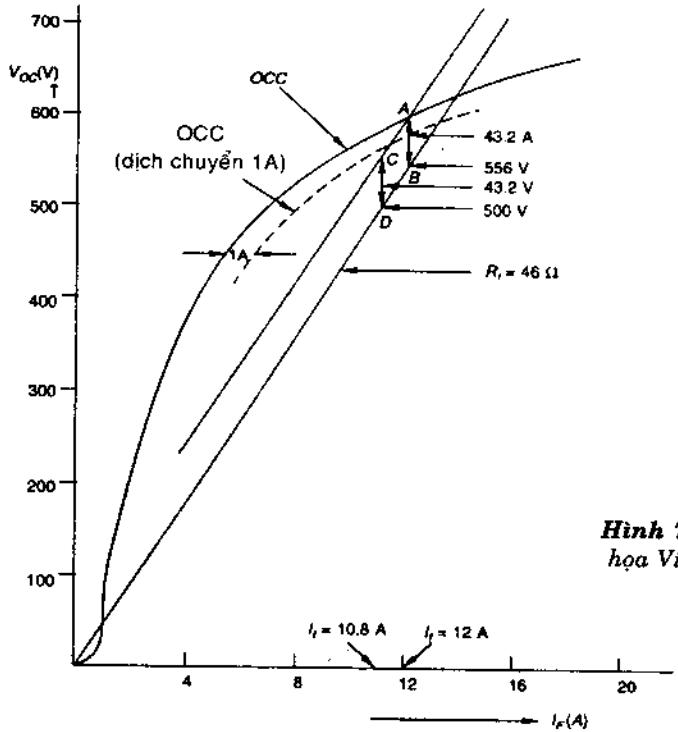
$$I_{sc} = 2040/5 = 408\ A$$

$$I_{dòng\ rẽ} = 500 - 408 = 92\ A$$

$$R_{mắc\ rẽ} = 0.005 \times 408/92 = 0.022\ \Omega$$

Ví dụ 7.12: Đặc tuyến mạch hở của máy phát kích thích song song tại tốc độ định mức là:

I_f (A)	1	2.5	5	7	9	12	15	18
V_{OC} (V)	22	231	400	479	539	605	642	671



***Hình 7.40**. Minh họa Ví dụ 7. 12.*

Điện trở kích thích và phần ứng là 46 Ω và 0.12 Ω. Tính điện áp không tải khi dòng phần ứng là 300 A trong hai trường hợp sau:

1) Bỏ qua phản ứng phần ứng

2) Dòng kích thích là 1A để khử tác dụng hiệu ứng phản ứng phần ứng.

Giải

Đường OOC và đường R_f được vẽ trên Hình 7.40.

1) I_a = 300 A

Sụt áp phần ứng = 360 x 0.12 = 43.2 V.

Vẽ đường song song với đường R_f 43.2 V phía trên và dọc theo trục V, điện áp không tải và dòng kích thích tương ứng được đo tại điểm B trên đường R_f. Các giá trị đo được là:

V_0 = 566V; I_f = 12A

2) Dòng kích thích tương ứng phản ứng phần ứng gây ra sự khử từ = 1A. Để tính điều này, đặc tuyến OCC chuyển qua phải với giá trị 1A. Đặc tuyến dịch chuyển OCC cắt đường R_f tại C. Điểm D tương ứng trên đường R_f là điện áp không tải và dòng kích thích V_0= 500V, I_f= 10.8A.

Đặc tuyến động cơ dc

Ưu điểm của động cơ dc là tính đa năng với nhiều đặc tuyến quan hệ moment - tốc độ, phạm vi điều chỉnh tốc độ rộng, không đòi hỏi các sơ đồ điều khiển phức tạp, hiệu quả vận hành cao. Thông qua động cơ truyền động, máy điện dc có tốc độ không đổi ở phần vận hành của đặc tuyến, các điều kiện kích từ được điều chỉnh theo điện áp ra mong muốn với tải cho trước.

Mặt khác, đối với động cơ cần tương hợp giữa đặc tuyến tốc độ - moment của tải và chạy tải với tốc độ chuyên biệt bằng cách điều chỉnh trường kích và điều chỉnh điện áp phần ứng để điều khiển tốc độ trên khoảng rộng.

Từ các Pt 7.4 và 7.8 quan hệ emf và moment cơ bản được viết như sau:

$$E_a = \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right) = k_a \Phi \omega \text{(Pt (7.3))} \ V \qquad (7.47a)$$

$$T = \frac{1}{2\pi}\Phi I_a Z\left(\frac{P}{A}\right) = k_a \Phi I_a \text{(Pt (7.9))} \ Nm \qquad (7.47b)$$

Với n : tốc độ tính theo v/ph

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \qquad \text{tốc độ tính theo rad/s}$$

Trong vận hành kiểu động cơ, để thuận tiện, các quan hệ này được biểu thị dưới dạng tốc độ và moment phần ứng:

$$n = K_N \frac{E_a}{\Phi} \qquad (7.48)$$

$$T = K_T.\Phi.I_a \qquad (7.49)$$

E_a được xác định theo phương trình mạch phần ứng (Hình 7.18f).

$$E_a = V - I_a (R_a + R_{se}) \qquad (7.50)$$

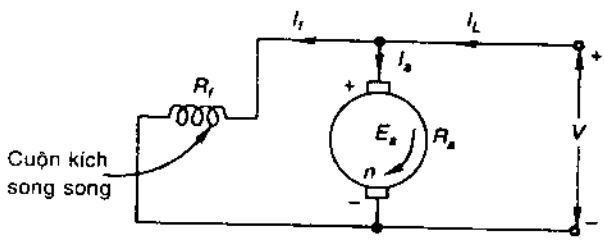
từ thông / cực Φ được xác định bằng dòng kích thích tương đương

$$I_{feq} = I_f \pm \left(\frac{N_{se}}{N_f}\right) I_a \qquad (7.51)$$

Đặc tuyến từ hóa của máy điện trong điều kiện có phản ứng phần ứng sẽ giảm từ thông / cực. Các động cơ dc được chia thành ba loại theo phương pháp kích thích. Trong động cơ, sự kích thích song song không phụ thuộc vào lực điện động cảm ứng phần ứng và được xác định một cách độc lập theo điện áp nguồn. Theo đó, sự kích từ song song của động cơ tương tự kích thích riêng rẽ và khác với sự kích thích như trong máy phát điện kích thích song song.

Động cơ kích thích song song

Hình 7.41 minh họa sơ đồ kết nối của động cơ kích thích song song, vận hành với điện áp cố định, và điện trở kích từ cố định, nghĩa là, dòng kích từ song song không đổi.



***Hình 7.41** Động cơ kích thích song song*

Trên mạch phần ứng, $E_a = V - I_aR_a$ (7.52)

Thay vào pt 7.48:

$$n = K_N\left(\frac{V - I_aR_a}{\Phi}\right) \quad (7.53)$$

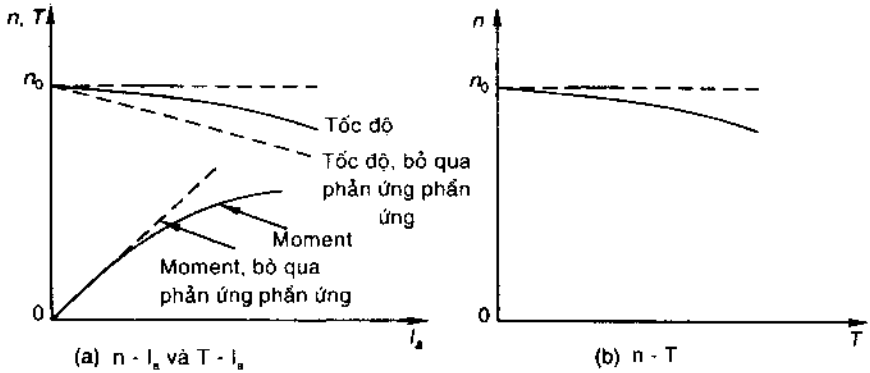
và $T = K_T\Phi I_a$ (7.54)

Từ các pt (7.53) và (7.54), có thể thấy tốc độ moment và động cơ thay đổi theo dòng phần ứng (Hình 7.42)

Từ pt (7.53), tốc độ giảm do sụt áp điện trở phần ứng I_aR_a, nhưng do phản ứng phần ứng nên khi đó từ thông Φ giảm theo. Vì hiệu ứng I_aR_a trội hơn nên tốc độ giảm theo tải không nhiều (Hình 7.42a). Từ pt (7.54), do hiệu ứng khử từ của dòng phần ứng, đặc tuyến T-I_a là đường thẳng dốc xuống. Đặc tuyến moment thực tế cao hơn và uốn vào phía trong do giảm từ thông/ cực (Hình 7.42a).

Loại bỏ dòng I_a giữa hai pt (7.53) và (7.54), đặc tuyến tốc độ - moment la:

$$n = \frac{K_NV}{\Phi} - \left(\frac{K_NR_a}{K_T\Phi^2}\right)T \quad (7.55)$$



Hình 7.42 *Đặc tuyến động cơ kích từ song song (V,I_f không đổi)*

Là đường thẳng nhưng Φ giảm do phản ứng phần ứng, nên đặc tuyến thực sẽ có dạng như trên Hình 7.42b. Từ không tải đến toàn tải, tốc độ giảm khoảng vài phần trăm, nên thực sự tốc độ được coi là không đổi, được gọi là đặc tuyến "rẽ mạch". Loại động cơ ac cảm ứng cũng có đặc tuyến (n-T) tương tự.

Ví dụ 7.13: Động cơ dc kích từ song song, 8kW, 230V, 1200 v/ph, $R_a = 0.7\Omega$. Cho động cơ chạy không tải với điện áp vào 250V, điều chỉnh dòng kích thích cho động cơ đạt tốc độ 1250 v/ph với dòng phần ứng là 1.6A. Moment tải ở trục động cơ, dòng I_a tăng lên 40A và tốc độ trục động cơ giảm xuống còn 1150 v/ph. Xác định độ giảm từ thông/cực, do phản ứng phần ứng.

Giải

Phương trình (7.48):

$$n = K_N\left(\frac{E_a}{\Phi}\right) = K_N\left(\frac{V - I_aR_a}{\Phi}\right)$$

$$\Phi = K_N\left(\frac{V - I_aR_a}{n}\right)$$

$$\Phi\ (\text{không tải}) = K_N\left(\frac{250 - 1.6 \times 0.7}{1150}\right) = 0.2\ K_N$$

$$\Phi\ (\text{có tải}) = K_N\left(\frac{250 - 40 \times 0.7}{1150}\right) = 0.193\ K_N$$

Mức giảm từ thông Φ do phản ứng phần ứng là

$$\Phi = \frac{0.2 - 0.193}{0.2} \times 100 = 3.5\%$$

Ví dụ 7.14: Động cơ dc kích thích song song, 20kW có dòng phần ứng toàn tải là 85A, tốc độ 1100 v/ph, điện trở phần ứng 0.18 Ω. Xác định:

a) Moment trong.

b) Moment dòng kích thích giảm đột ngột còn 80% so với giá trị ban đầu

c) Trong câu b tính tốc độ ổn định của động cơ, giả sử moment tải không đổi

Giải

a) $E_a = 250 - (0.8 \times 85) = 234.7V$

$$E_a I_a = T\omega$$

$$234.7 \times 85 = T \times (2\pi \times 1100) / 60$$

$$T = 173.2 \text{ Nm}$$

b) Giả sử mạch từ tuyến tính, $\Phi \propto I_f$, từ trường đột ngột giảm 80% so với lúc đầu và I_a lúc đó không đổi nên:

$$T_1 = 0.8 \times 173.2 = 103.9 \text{ Nm}$$

c) Trạng thái moment động cơ không đổi ở câu b, tốc độ dòng phần ứng mới được xác định như sau:

$$T = K'_p I_f \times 85 = K'_T \times 0.8\, I_f \times I_{a1}$$

$$I_{a1} = 106{,}25A$$

$$E_{a1} = 250 - 0.18 \times 106.25 = 230.9 \text{ V}$$

$$234.7 = K'_a\, I_f \times 1100$$

$$230.9 = K_a \times 0.8\, I_f\, n_1$$

$$\frac{230.9}{234.7} = \frac{0.8\, n_1}{1100}$$

$$n_1 = 1353 \text{ v/ph}$$

Tốc độ động cơ và dòng phần ứng thay đổi do dòng kích thích giảm khi momen tải không đổi.

Ví dụ 7.15: Động cơ kích thích song song, chạy với tốc độ 1200 v/ph không tải, dòng 5A, điện áp vào 220V. Điện trở phần ứng và kích thích là 0.25Ω và 110 Ω. Khi có tải, động cơ có cường độ 62A tại mạch chính.

Tính tốc độ, giả sử phản ứng phần ứng khử từ kích thích là 5%.

Tính moment (nội) khi không tải và khi có tải. Moment trên trục động cơ khi mang tải (moment truyền động tải cơ khí).

Giải

Trong động cơ kích thích song song: $I_L = I_a + I_j$

Dòng kích thích song song : $I_j = 220/ 110 = 2A$.

Khi không tải: $I_{a0} = 5 - 2 = 3A$

$E_{a0} = 220 - 0.25 \times 3 = 219.25$ V

$n_0 = 1200$ v/ph.

$E_{a0} = K'_a . \Phi . n_0$

$219.25 = K'_a . \Phi \times 1200$ (i)

$T_0\omega_0 = E_{a0}.I_{a0}$

$$\left(\frac{2\pi \times 1200}{60}\right) T_0 = 219.25 \times 3$$

$T_0 = 5.23$ Nm

Moment này bị hấp thụ trong tổn thất sắt từ, và do ma sát

Khi có tải : $I_{a1} = 62 - 2 = 60A$

$E_{a1} = 220 - 0.25 \times 60 = 205V$ (i)

Từ thông/ cực $\Phi_1 = 0.95\ \Phi$

$E_{a1} = K'_a\ \Phi_1\ n_1$

$205 = K'_a \times 0.95 \times n_1$ (ii)

chia (ii) cho (i): $n_1 = 1181$

Tốc độ động cơ giảm 16% khi có tải, do từ thông/cực giảm vì phản ứng phần ứng ngược với sự sụt tốc độ do điện trở phần ứng giảm:

$T_1\omega_1 = E_{a1}\ I_{a1}$

$$\left(\frac{2\pi \times 1181}{60}\right) T_1 = 205 \times 60$$

$T_1 = 91.45$ Nm

T_1(trục) = 91.45 - 5.23 = 86.23 Nm

Động cơ kích thích nối tiếp

Hình 7.43 minh họa sơ đồ kết nối động cơ kích thích nối tiếp. Tốc độ động cơ được tính theo pt (7.48):

$$n = K_N\left(\frac{V - I_a(R_a + R_{se})}{\Phi}\right) \qquad (7.56)$$

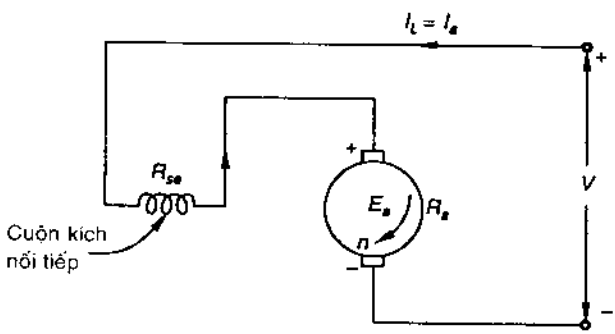
Phương trình moment là: $T = K_T\Phi I_a$ (7.57)

Trong vùng từ hóa tuyến tính:

$$\Phi = K_f\, I_a$$

với : $n = \frac{K_N}{K_f}\left[\frac{V}{I} - (R_a + R_{se})\right]$; hyperbola chữ nhật bị chuyển dịch (7.58)

và: $T = K_T.K_f.I_a^2$; parabola (7.59)



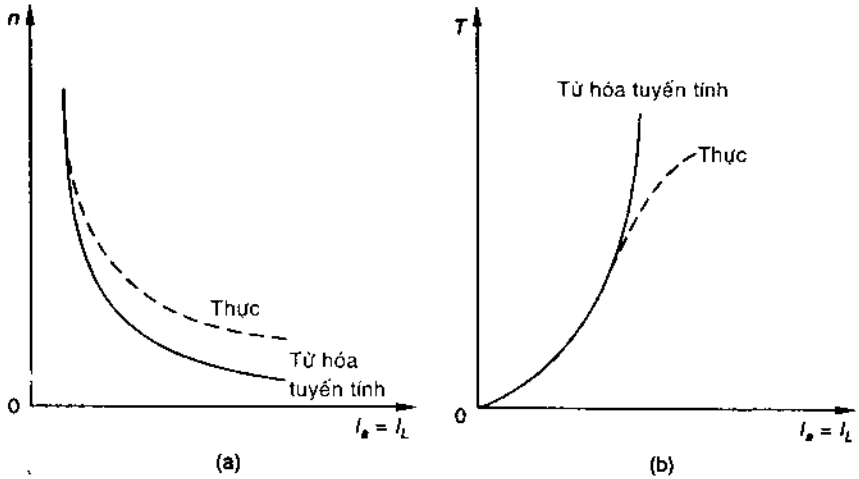
Hình 7.43 *Động cơ kích thích nối tiếp*

Các quan hệ trên được vẽ ở Hình 7.44a và 7.44b. Sự bão hòa và sự khử từ do phản ứng phần ứng đều làm tăng từ thông/cực (theo I_a) theo tỷ suất thấp hơn trong quan hệ tuyến tính giả định. Đặc tuyến thực được vẽ bằng nét đứt trên Hình 7.44a và 7.44b.

Khi không tải, dòng động cơ, và từ thông/cực tiến đến 0, pt (7.58), tốc độ động cơ sẽ tăng đến vô hạn. Đây là tình trạng nguy hiểm, vì lực ly tâm sẽ phá hỏng phần ứng. Do vậy, *động cơ dc kích thích nối tiếp không được phép chạy không tải, dù chỉ vô ý.*

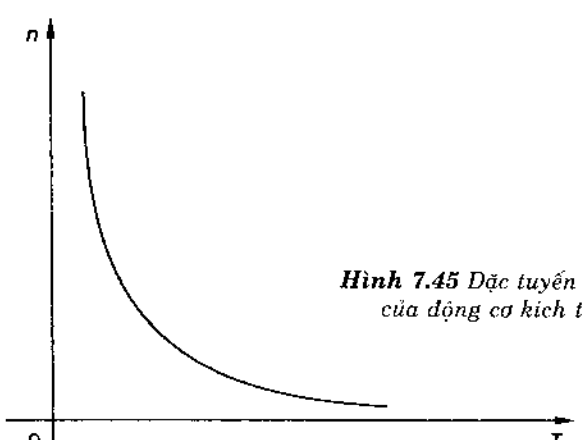
Khử I_a trong pt (7.53) và (7.59), đặc tuyến tốc độ - moment là:

$$n = \frac{K_N}{K_f}\left[\frac{V\sqrt{K_T K_f}}{\sqrt{T}} - (R_a + R_{se})\right] \qquad (7.60)$$



Hình 7.44 *Đặc tuyến động cơ kích thích nối tiếp*

vẽ trên Hình 7.45. Khi moment tải tăng, tốc độ động cơ giảm mạnh, do đó cũng làm giảm công suất kW tải (n x T) trên động cơ. Loại đặc tuyến tốc độ moment động cơ này được gọi là đặc tuyến "nối tiếp", thường dùng cho thiết bị kéo, cần cẩu, ... trong quá trình khởi động, tải yêu cầu moment gia tốc lớn, tải luôn luôn tác động đối với động cơ, do đó không có nguy cơ về tải thấp hoặc không tải.



Hình 7.45 *Đặc tuyến tốc độ - moment của động cơ kích thích nối tiếp*

Ví dụ 7.16: Đặc tuyến từ hóa của động cơ dc kích thích nối tiếp 4 cực có thể lấy theo tỷ lệ với dòng trên một phần của khoảng làm việc. Trên cơ sở này, từ thông/cực là 4.5 mWb/A. Tải yêu cầu moment lớn tỷ lệ bình phương với tốc độ và bằng 30 Nm tại 1000 v/ph. Phần ứng có 492 dây và được quấn theo kiểu sóng. Xác định tốc độ và dòng động cơ khi được nối với nguồn 220V. Tổng điện trở của động cơ là 2Ω.

Giải

Theo pt (7.4), ta có:

$$E_a = \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right) = \frac{(4.5 \times 10^{-3} \times I_a)\, n \times 492}{60}\left(\frac{4}{2}\right) = 0.0738\, nI_a \qquad \text{(i)}$$

Tính moment theo pt (7.8):

$$T = \frac{1}{2\pi}\Phi I_a Z\left(\frac{P}{A}\right) = \frac{1}{2\pi}(4.5 \times 10^{-3} I_a)\, I_a \times 492\left(\frac{4}{2}\right) = 0.705 I_a^2 \qquad \text{(ii)}$$

Ngoài ra: $E_a = V - I_a(R_a + R_{se}) = 200 - 2\, I_a$ (iii)

Thay (i) vào (iii):

$$0.0738\, nI_a = 220 - 2I_a$$

$$I_a = \frac{220}{2 + 0.0738n} \qquad \text{(iv)}$$

thế vào (ii):

$$T = 0.705\left(\frac{220}{2 + 0.0738\, n}\right)^2$$

$$T_L = K_L n^2$$

Với các dữ liệu đã cho có thể tính K_L

$$K_L = \frac{30}{(1000)^2} = 3 \times 10^{-5} \text{ Nm/v/ph}$$

Trong điều kiện vận hành ổn định, $T_L = T$

$$3 \times 10^{-5} n^2 = 0.705\left(\frac{220}{2 + 0.0738\, n}\right)^2$$

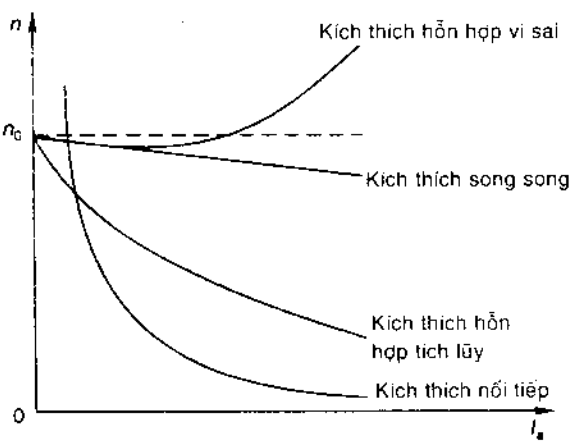
$$n = 662.6 \text{ v/ph}$$

thay n vào (iv):

$$I_a = \frac{220}{2 + 0.0738 \times 663.2} = 4.32\ A$$

Động cơ kích thích hỗn hợp

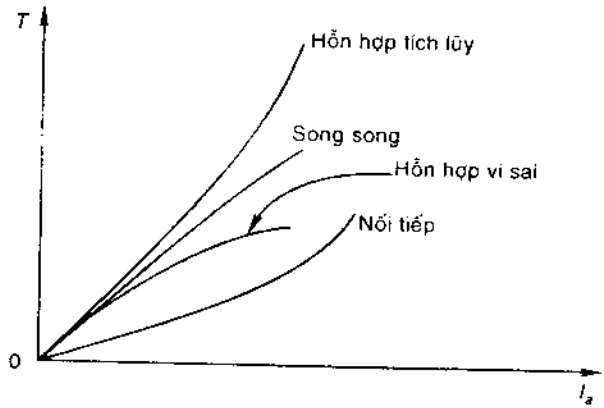
Trong động cơ kích thích hỗn hợp tích lũy, cần mắc thêm cuộn kích thích nối tiếp vào cuộn song song, do đó từ thông/cực sẽ tăng lên theo dòng phần ứng, vì vậy ($n - I_a$) giữa quan hệ ($n - I_a$) của kích thích song song (Φ = không đổi) và quan hệ ($n - I_a$) của kích thích nối tiếp ($\Phi \propto I_a$) (Hình 7.46). Khác với động cơ kích thích nối tiếp, động cơ kích thích hỗn hợp tích lũy có tốc độ không tải hữu hạn (n_0) và đặc tuyến giảm tải của động cơ kích thích song song trong các điều kiện tải nặng.



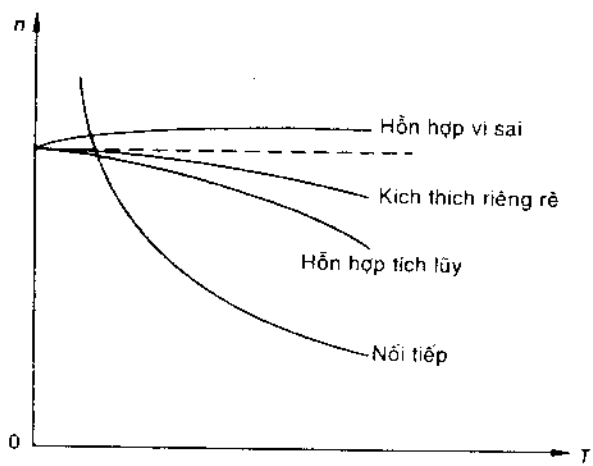
Hình 7.46 *Đặc tuyến dòng - tốc độ của động cơ dc*

Trong động cơ kích thích hỗn hợp vi sai, từ thông/cực giảm, khi dòng phần ứng tăng, làm cho tốc độ động cơ tăng theo tải (Hình 7.46). Động cơ này được thiết kế để có tốc độ toàn tải bằng không tải. Tuy nhiên, trong điều kiện quá tải bất thường, từ thông/cực giảm đến gần 0 và động cơ khi đó có thể tăng tốc độ đến mức nguy hiểm, tương tự động cơ kích thích nối tiếp bị không tải. Vì tính ổn định tốc độ kém nên động cơ kích thích hỗn hợp vi sai ngày nay không còn sử dụng nữa. Các tình huống yêu cầu tốc độ được điều khiển trong phạm vi hẹp được sắp xếp với hệ thống không tải liên hợp với động cơ kích thích song song.

Các đặc tuyến dòng - moment của các loại động cơ dc khác nhau được nêu trên Hình 7.47



Hình 7.47 *Các đặc tính dòng - moment của các loại động cơ dc*



Hình 7.48 *Đặc tuyến moment - tốc độ của các loại động cơ dc khác nhau*

Khử dòng giữa các đặc tuyến dòng - tốc độ (Hình 7.46) và các đặc tuyến dòng - moment (Hình 7.47), sẽ nhận được đặc tuyến moment - tốc độ của các loại động cơ dc (Hình 7.48)

Ví dụ 7.17: Động cơ dc kích thích nối tiếp 250V, với cuộn bù, điện trở mạch phần ứng tổng $(R_a + R_{se}) = 0.08\ \Omega$, chạy ở tốc độ 1200 v/ph bằng thiết bị động lực với động cơ có mạch phần ứng và mạch kích riêng biệt. Các thử nghiệm cho các dữ liệu từ hóa như sau:

I_{se} (A):	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
V_{DC} (V):	62	130	180	222	250	270	280	288	290	292

Vẽ đặc tuyến moment - tốc độ của động cơ kích thích nối tiếp được nối với mạng 250V bằng cách tính các giá trị tốc độ và moment tại các mạch phần ứng 75, 100, 200, 300, 400 A.

Giải

Thay vì vẽ đường cong từ hóa, có thể dùng phép nội suy từ các dữ liệu đã cho ở trên

Tính toán dòng:

$$I_a = I_{se} = 75A$$

$$E_Q = 250 - (0.08 \times 75) = 246 \text{ V}$$

Dùng phép nội suy với I_{se} = 75A

$$E_Q(1200 \text{ v/ph}) = 130 - \frac{130 - 60}{40} \times 5 = 121.5 \text{ V}$$

$$n = \frac{1200}{121.5} \times 246 = 2430 \text{ v/ph}$$

$$T\omega = E_a.I_a$$

$$T = \left(\frac{60}{2\pi \times 2430}\right) \times 246 \times 75 = 72.5 \text{ Nm}$$

Các tính toán được xếp theo bảng dưới đây:

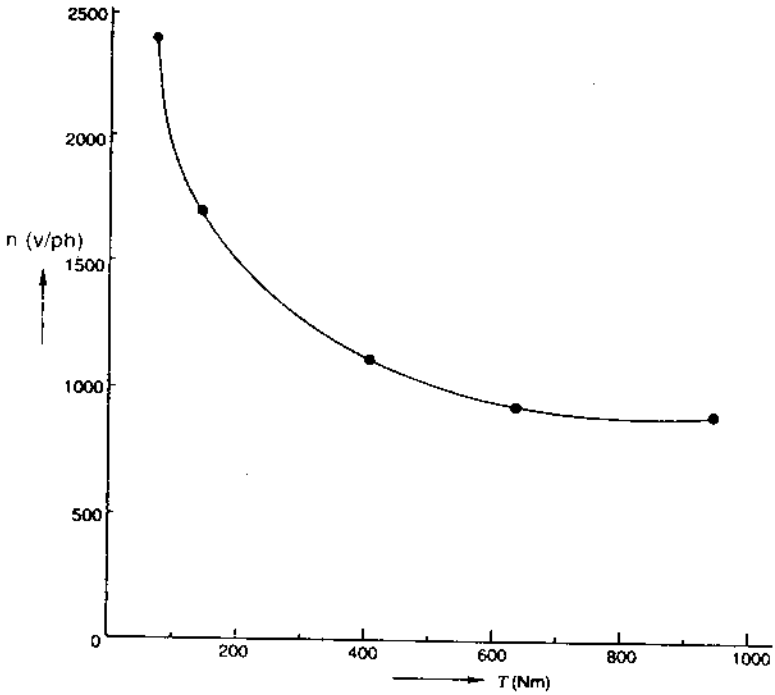
$I_a = I_{se}$(A)	75	100	200	300	400
E_a (V)	246	242	234	226	218
E_a (V) tại 1200 v/ph	121.5	155	250	283	292
n (v/ph)	2430	1874	1123	958	902
T(Nm)	72.5	123	398	676	923

Đặc tuyến moment - tốc độ được vẽ trên Hình 7.49.

Ví dụ 7.18: Động cơ kích thích nối tiếp 7.5 kW, 220V kéo quạt gió. Khi chạy ở tốc độ 400 v/ph, động cơ có dòng 30A. Moment quạt yêu cầu tỷ lệ với bình phương tốc độ. R_a = 0.6 Ω, R_{se} = 0.4 Ω. Bỏ qua phản ứng phần ứng và tổn thất do quay, giả sử đặc tuyến từ hóa của động cơ là tuyến tính.

a) Xác định công suất cấp cho quạt và moment do động cơ sinh ra

b) Tính điện trở ngoài được mắc nối tiếp mạch phần ứng để giảm tốc độ quạt xuống còn 2000 v/ph. Tính công suất cấp cho quạt tại tốc độ này.



***Hình 7.49**. Minh họa ví dụ 7.17.*

Giải

$P_{quat} = P_{cap} = P$; không có tổn thất do quay

$P = E_a . I_a$ (i)

$T_{cap} = K'_a I_{se} . I_a = K'_a I_a^2$; $I_{se} = I_a$

$T_{quat} = K_F . N^2$

Vì $T_{cap} = T_{quat} = T$

và $I_a \propto n$ (ii)

a) Khi vận hành tại 400 v/ph ($R_{ext} = 0$)

$E_a = 220 - (0.6 + 0.4) + 30 = 190$ V

$I_a = 30$ A.

$P = 190 \times 30 = 5.7$ kW

$$T\omega = E_a I_a$$

hay:
$$T = \frac{5700}{\frac{2\pi \times 400}{60}} = 136 \text{ Nm}$$

b) Khi vận hành tại 200 v/ph (R_{ext} = ?)

$$T = 136 \times \left(\frac{200}{400}\right)^2 = 34 \text{ Nm}$$

$$I_a = 30 \times \left(\frac{200}{400}\right) = 15 \text{ A}$$

$$T\omega = E_a.I_a$$

$$34 \times \left(\frac{2\pi \times 200}{60}\right) = \left[220 - (0.6 + 0.4 + R_{ext}) \times 15\right] \times 15$$

$$R_{ext} = 10.5\ \Omega$$

$$P = T\omega = 34 \times \left(\frac{2\pi \times 200}{60}\right) = 0.721 \text{ kW}$$

Khởi động động cơ DC

Tại thời điểm khởi động (n = 0), emf cảm ứng của động cơ là zero nên dòng từ nguồn điện áp định mức cung cấp cho động cơ kích thích song song là:

$$I_a^s = \frac{V}{R_a} \tag{7.61}$$

Điện trở kích từ nối tiếp gộp trong mẫu số của phương trình động cơ kích thích nối tiếp. Đối với các động cơ lớn điện trở phần ứng có thể là 0.01 pu hoặc thấp hơn; thậm chí đối với động cơ công suất thấp có thể trong khoảng 0.0625 - 0.125. Như vậy, khi khởi động toàn tải, dòng phần ứng có thể có giá trị gấp nhiều lần định mức (khoảng 100 lần đối với động cơ lớn). Dòng lớn như thế không được phép chạy trong động cơ, đặc biệt khi khởi động do:

(i) Gây ra tia lửa mạnh tại chổi than.

(ii) Tạo moment lớn đột ngột gây sự va đập trên trục cơ.

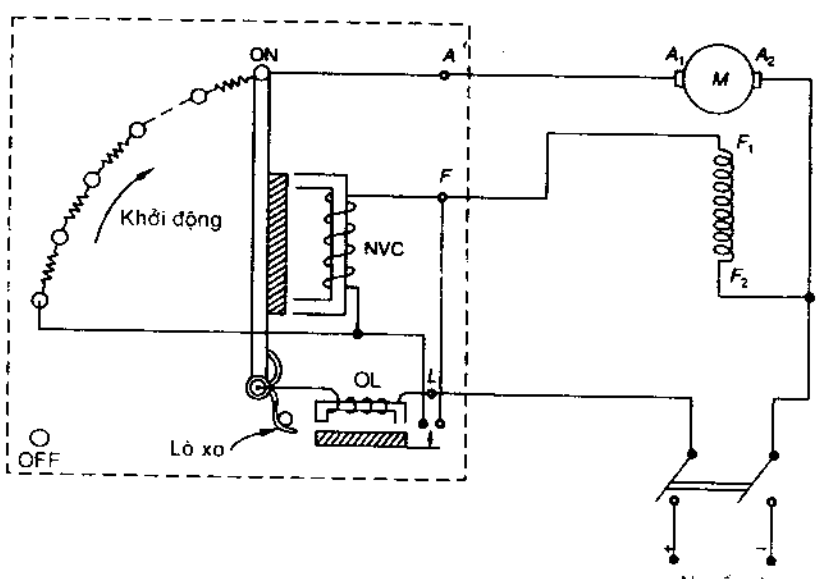
(iii) Dòng lớn như vậy thường không thể lấy được từ nguồn điện.

Vì các nguyên nhân nói trên, tất cả các động cơ, trừ các động cơ công suất không quá 1kW, khi khởi động phải có điện trở ngoài ghép vào mạch phần ứng để giới hạn dòng khởi động. Khi có nguồn dc với điện áp biến thiên, chẳng hạn trong sơ đồ điều khiển tốc độ Ward-Leonard có thể cho phép khởi động mà không cần điện trở khởi động.

Vì moment động cơ khởi động trực tiếp cao hơn nên động cơ khởi động nhanh, tiêu thụ công suất ít hơn nhiều so với khởi động bằng điện trở - yếu tố này rất hữu dụng trong chế độ động cơ khởi động lặp lại do tiết kiệm năng lượng và ít gây ra hiện tượng nóng động cơ.

Dòng khởi động cho phép tối đa không vượt quá 1.5 - 2 lần trị số định mức. Đây là các giá trị an toàn, đồng thời tạo nên moment khởi động cao đủ để tăng tốc độ động cơ nhanh chóng.

Khi khởi động động cơ kích thích song song, từ trường kích thích song song phải được chuyển mạch trước để dòng kích từ được thiết lập ổn định, trước khi phần ứng với điện trở khởi động trong mạch được kết nối vào nguồn. Lý do là từ trường kích thích song song có trở kháng cao và dòng đi qua (cũng là từ thông trong động cơ) được tạo ra chậm, dẫn đến kết quả sẽ có moment khởi động thấp.



Hình 7.50 *Bộ khởi động động cơ dc kích thích song song (bằng tay)*

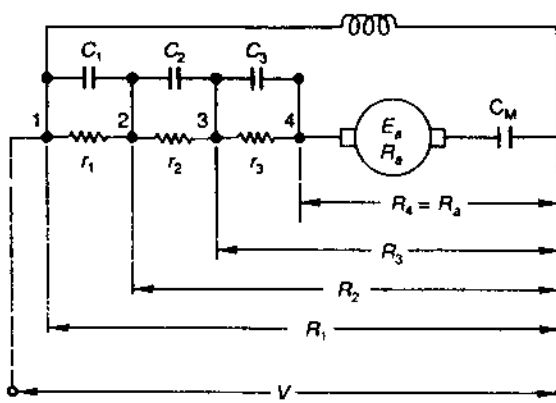
Điện trở khởi động được bố trí theo bậc và được ngắt ra từ từ khi động cơ tăng dần tốc độ, để giữ moment ở mức trung bình cao trong quá trình khởi động.

Sơ đồ nối mạch của bộ khởi động bằng tay của động cơ dc kích thích song song được nêu trên Hình 7.50. Tay quay khởi động được nêu trên Hình ở vị trí ON - điện trở khởi động bị ngắt, được gộp trong mạch kích từ. Bộ khởi động này có hai phần bảo vệ.

1. NVC (không có điện áp): Khi có sự cố dòng kích từ (do hở mạch hoặc mát), cuộn này sẽ ngắt tay quay khởi động (được duy trì bằng lực điện từ), chuyển sang vị trí OFF do tác động của lò xo.

2. Ngắt OL (quá tải): Tiếp điểm của rơ le này, khi dòng phần ứng vượt quá giá trị xác định (quá tải/ngắn mạch) NVC kết thúc, đưa tay quay về vị trí OFF.

Trong công nghiệp hiện đại, thường dùng các bộ khởi động tự động kiểu nút nhấn, tương tự các relay điện từ (Hình 7.51)

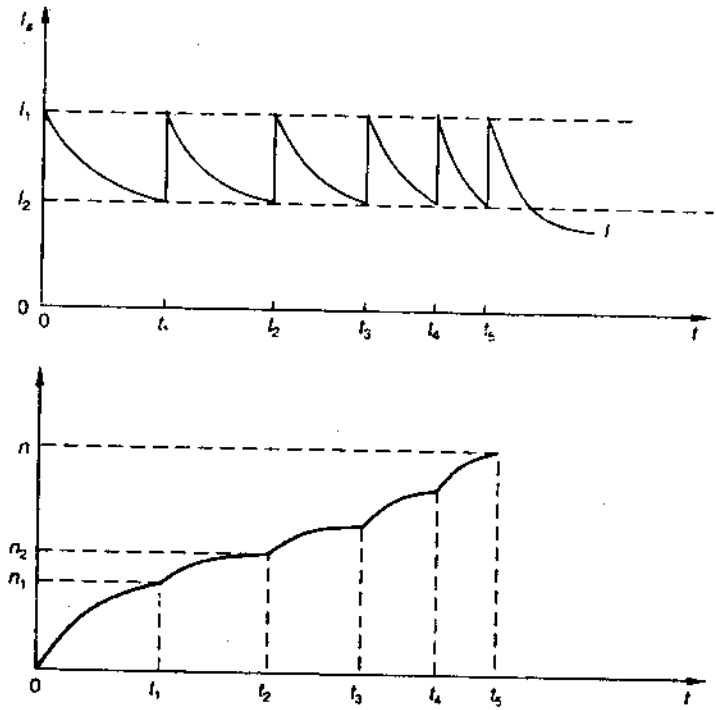


Hình 7.51 *Khởi động động cơ dc kích thích song song*

Tính toán các bước khởi động cho động cơ dc kích thích song song

Từ Hình 7.51, có thể thấy, vào thời điểm bộ khởi động ở vị trí 1, hoặc contactor C_M đóng, dòng điện trong mạch đạt đến giá trị I_1 (dòng giới hạn trên):

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \tag{7.62}$$



Hình 7.52 *Sự thay đổi của dòng phần ứng và tốc độ theo thời gian trong quá trình khởi động động cơ kích thích song song*

Sau đó, dòng giảm dần khi tốc độ động cơ tăng dần và emf tăng (Hình 7.52). Dòng giảm đến I_2, là dòng giới hạn dưới:

$$I_2 = \frac{V - E_a(n_1)}{R_1} \tag{7.63}$$

Với $E_a(n_1)$ là emf tại tốc độ n_1 của động cơ. Lúc này, bộ khởi động chuyển đến vị trí 2 (C_1 đóng). Dòng tăng tức thời đến I_1 (Hình 7.47), và thỏa quan hệ:

$$I_1 = \frac{V - E_a(n_1)}{R_1} \tag{7.64}$$

Từ các pt (7.63) và (7.64), suy ra:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} \tag{7.65}$$

Dùng phép qui nạp cho bộ khởi động có k nút (có (k - 1) bậc điện trở):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \ldots = \frac{R_{k-1}}{R_k} \tag{7.66}$$

$$\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2}{R_3} \cdots \frac{R_{k-1}}{R_k} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^{k-1} = \gamma^{k-1}$$

Với $$\gamma = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\text{Dòng giới hạn trên}}{\text{Dòng giới hạn dưới}} \tag{7.67}$$

Suy ra: $$\frac{R_1}{R_2} = \gamma^{k-1} \tag{7.68}$$

Từ Hình 7.51, rõ ràng là:

$$R_k = r_k = R_a \text{ (điện trở phần ứng)}$$

$$\frac{R_1}{R_a} = \gamma^{k-1} \tag{7.69}$$

Hình 7.52 là đồ thị dòng phần ứng và tốc độ theo thời gian khi điện trở trong bộ khởi động bị ngắt từng bậc. Trong thời gian chờ tại mỗi bậc dòng bị sụt và tốc độ tăng theo hàm số mũ, chỉ tùy thuộc và hằng số thời gian. Đây là lý do thời gian chờ tại mỗi bậc giảm từ từ như trên Hình 7.52

Sau khi chọn giới hạn trên và dưới của dòng phần ứng cho quá trình khởi động, việc tính toán các bậc khởi động có thể tiến hành như sau:

(i) Từ pt (7.62), tính R_1

(ii) Từ pt (7.69), tính số bậc k và chọn giá trị nguyên gần nhất.

(iii) Tính các điện trở R_1, R_2... từ pt (7.66).

Ví dụ 7.19: Bộ khởi động dùng cho động cơ kích thích song song, 220V. Dòng tối đa cho phép là 55A và dòng tối thiểu là 35A. Tìm số bậc, điện trở khởi động và điện trở cho mỗi bậc. Điện trở phần ứng của động cơ là 0.4 Ω.

Giải

$$I_1 = 55A; \quad I_2 = 35A$$

$$\gamma = \frac{I_1}{I_2} = 1.57$$

Từ pt (7.62): $R_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{200}{55} = 4\ \Omega$

Từ pt (7.69): $\gamma^{n-1} = \frac{R_1}{R_a} = \frac{4}{0.4} = 10$

$n = 6$

Suy ra $\gamma = 1.585$

Từ pt (7.66), các trị số điện trở là:

$R_1 = 4\ \Omega$,

$R_2 = 4/\ 1.585 = 2.52\ \Omega$; $r_1 = R_1 - R_2 = 1.48\ \Omega$

$R_3 = 2.52\ /\ 1.585 = 1.589\ \Omega$; $r_2 = R_2 - R_3 = 0.931\ \Omega$

Tương tự, có thể tính $r_3 = 0.578\ \Omega$, $r_4 = 0.370\ \Omega$, $r_5 = 0.235\ \Omega$.

Điều khiển tốc độ động cơ DC

Động cơ dc nói chung có tính đáp ứng truyền động tốc độ tốt hơn động cơ ac, do trường quay có tốc độ ổn định và khoảng tốc độ rộng.

Từ pt (7.48):

$$n = K_N\left(\frac{V - I_a R_a}{\Phi}\right) \tag{7.70}$$

Vì sụt áp phần ứng nhỏ, có thể bỏ qua

$$n \approx K_N \frac{V}{\Phi} \tag{7.71}$$

Từ phương trình này có thể dùng hai phương pháp điều chỉnh tốc độ, thay đổi từ trường kích thích I_f và thay đổi điện áp. Phương pháp thứ nhất làm thay đổi từ thông/cực, Φ, được gọi là điều khiển trường; và phương pháp thứ hai là điều khiển phần ứng.

Điều chỉnh từ trường kích thích

Với điện áp không đổi, từ pt (7.71):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \tag{7.72}$$

Chỉ xét vùng từ hóa tuyến tính:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} \tag{7.73}$$

Các giới hạn của phương pháp điều khiển này là:

1. Không nhận được các tốc độ thấp hơn tốc độ định mức vì từ trường kích thích không thể mạnh hơn, chỉ có thể yếu đi.

2. Vì tốc độ tỷ lệ nghịch với từ thông/cực, moment tỷ lệ thuận với từ thông/cực, với dòng phần ứng cho trước, do đó chỉ áp dụng cho các *truyền động công suất không đổi* khi moment tải giảm theo tốc độ.

3. Đối với các động cơ yêu cầu phạm vi điều khiển tốc độ rộng, ampere vòng kích thích nhỏ hơn nhiều so với ampere vòng phần ứng ở các tốc độ cao, gây nên sự méo quá mức mật độ từ thông trong khe hở không khí. Điều này dẫn đến các trạng thái vận hành không ổn định hoặc chuyển mạch không tốt. Cuộn dây bù có thể được dùng để tăng khoảng tốc độ lên hai lần đối với các động cơ lớn, gấp bốn lần cho các động cơ trung bình và tám lần cho các động cơ công suất nhỏ.

4. Phương pháp điều khiển này không phù hợp với các ứng dụng cần sự đảo chiều tốc độ, do cách duy nhất để đảo chiều tốc độ là ngắt động cơ ra khỏi nguồn và đảo cực tính phần ứng trường. Mạch kích thích có tính cảm ứng mạnh nên thường chỉ đảo phần ứng.

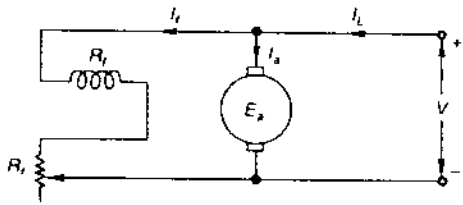
Động cơ kích thích song song

Hình 7.53a trình bày cách điều khiển kích từ động cơ dc kích thích song song, bằng cách dùng biến trở trong mạch kích từ. Từ pt (7.55):

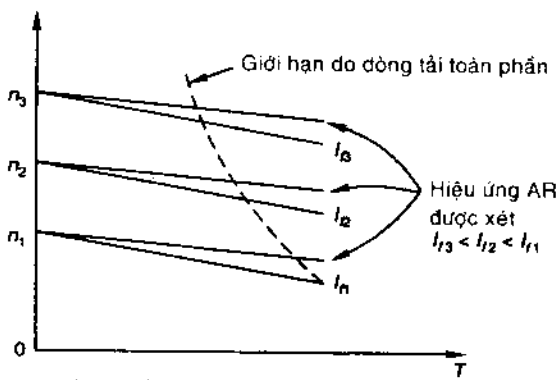
$$n = \frac{K_N V}{\Phi} - \left(\frac{K_N R_a}{K_T \Phi^2}\right) T \tag{7.74}$$

Đặc tuyến moment - tốc độ hơi dốc xuống do số hạng thứ hai (hiệu ứng R_a) và dốc lên khi từ trường bị yếu do phản ứng phần ứng (Hình 7.53b). Hiệu ứng khử từ của phản ứng phần ứng làm đặc tuyến hơi cong lên khi moment tăng (dòng tải tăng). Phạm vi làm việc của đặc tuyến moment - tốc độ giảm khi tốc độ tăng vì dòng phần ứng không thể vượt qua giá trị toàn tải.

Ví dụ 7.20: Động cơ kích thích song song, 400V, dòng không tải 5.56A và dòng toàn tải 68.3A. Phản ứng phần ứng làm giảm từ trường kích thích 3%.



(a) Sơ đồ nối kết



Hình 7.53 *Điều khiển trường đối với động cơ kích từ song song*

Tính tỷ số tốc độ toàn tải với tốc độ không tải. Cho R_a = 0.18 Ω, sụt áp trên chổi than là 2V, R_f = 200 Ω.

Giải

$$I_f = \frac{400}{200} = 2 \text{ A}$$

Khi *không tải:* $I_{a0} = 5.6 - 2 = 3.6$ A

$E_{a0} = 400 - (0.8 \times 3.6) - 2 = 397.4$ V

Khi *toàn tải:* $I_a(fl) = 68.3 - 2 = 66.3$ A

$E_a(fl) = 400 - (0.18 \times 66.3) - 2 = 386.1$ V

$$\frac{n\,(fl)}{n\,(nl)} = \frac{386.1}{387.4} \times \frac{1}{0.97} = 1$$

Nhận xét, từ trường kích thích yếu đi do phản ứng phần ứng, tốc độ toàn tải bằng tốc độ không tải.

Ví dụ 7.21: Động cơ kích thích song song 750kW, 250V, tốc độ 1200 v/ph, có điện trở phần ứng và kích từ là 0.03 Ω và 41.67 Ω. Động cơ có ghép cuộn bù để khử phản ứng phần ứng. Bỏ qua tổn thất sắt từ và do quay. Động cơ có tải moment không đổi với dòng 126A và chạy với tốc độ 1105 v/ph.

a) Giả sử từ trường tuyến tính, nếu dòng kích từ bị giảm chỉ còn 5A, dòng tuyến cung cấp và tốc độ động cơ là bao nhiêu? Tính moment tải.

b) Động cơ có các dữ liệu từ hóa như dưới đây, tính tốc độ động cơ và dòng tuyến cung cấp như ở câu a. So sánh và nhận xét theo các kết quả của câu a và b.

Tốc độ 1200 v/ph,

I_f(A)	4	5	6	7
$V_{(oc)}$ (V)	217	250	267	280

Giải

a) Đặc tuyến từ hóa tuyến tính

$$I_{f1} = \frac{250}{41.67} = 6 \text{ A}$$

$$I_{a1} = 126 - 6 = 120 \text{ A}$$

$$E_{a1} = 250 - 0.03 \times 120 = 246.4 \text{ V}$$

$$n_1 = 1105 \text{ v/ph}; \ \omega_1 = 115.7 \text{ rad/ s}$$

biết: $E_a = K_a\Phi\omega = K'_a\omega = K''_aI_f\omega$ (i)

$T = K_a\Phi I_a = K'_aI_a = K''_aI_fI_a$ (ii)

Từ (i): $E_{a1} = 246.4 = K''_a \times 6 \times 115.7$

$K''_a = 0.355$

$T = 0.355 \times 6 \times 120 = 255.6$ Nm (không đổi)

Dòng kích từ giảm:

$$I_{f2} = 5 \text{ A}$$

$$T(\text{không đổi}) = K''_aI_{ft}I_{a1} > K''aI_{f2}I_{a2}$$

$$I_{a2} = 120 \times \frac{6}{5} = 144 \text{ A}$$

$$I_{f2} = 144 + 2 = 146 \text{ A}$$

$E_{a2} = 250 - 0.03 \times 144 = 245.68$ V

$245.68 = 0.355 \times 5 \times \omega_2$

$\omega_2 = 138.4$ rad/ s, tương đương 1322 v/ph

b) Thay vì vẽ đường cong từ hóa, có thể dùng phương pháp nội suy

$I_{f1} = 6A \Rightarrow V_{OC} = 267$ V ở 1200 v/ph; 125.7 rad/ s

$267 = K_a\Phi_1 \times 125.7$

$K_a\Phi_1 = 2.124$

$I_{f2} = 5A \Rightarrow V_{OC} = 250$ V ở 1200 v/ph; 125.7 rad/ s

$$K_a\Phi_2 = \frac{250}{125.7} = 1.989$$

T(không đổi) = $K_a.\Phi_2.\ I_{a2} = K_a.\Phi_1.I_{a1}$

$$I_{a2} = I_{a1}\left(\frac{K_a\Phi_1}{K_a\Phi_2}\right) = 120 \times \frac{2.124}{1.989} = 128.1 \text{ A}$$

$I_{L2} = 128.1 + 2 = 130.1$ A.

$E_{a2} = 250 - (0.03 \times 128.1) = 246.16$ V

$246.16 = K_a\Phi_2\omega_2$

$$\omega_2 = \frac{246.16}{1.989} = 123.76 \text{ rad/s, tương đương 1182 v/ph}$$

So sánh các kết quả:

Tốc độ được tính theo giả thiết tuyến tính cao hơn (1322 - 1182)/ 1182 = 11.8% so với tốc độ tính theo đặc tuyến từ hóa thực sự.

Ví dụ 7.22: Động cơ dc kích thích song song, 250V, $R_f = 150\Omega$ và $R_a = 0.6\Omega$. Động cơ vận hành không tải với thông lượng từ toàn phần tại tốc độ 1000 v/ph là $I_a = 5A$. Nếu máy truyền động tải có moment 100 Nm, hãy tính dòng phần ứng và tốc độ động cơ. Nếu động cơ được yêu cầu cung cấp 10 kW tại tốc độ 1200 v/ph, cần ghép nối tiếp điện trở ngoài vào mạch từ là bao nhiêu? Bỏ qua sự bão hòa và phản ứng phần ứng.

Giải

Từ pt (7.3) và (7.9)

$$Ea = K_a\phi\omega_m = K\omega_m \qquad \text{(i)}$$

$$T = K_a \Phi I_a = K I_a \qquad \text{(ii)}$$

Không tải:

$$250 - (5 \times 0.6) = K \times \frac{2\pi \times 1000}{60}$$

$$K = 2.36$$

Truyền động tải 100 Nm,

$$I_a = \frac{T}{K} = \frac{100}{2.36} = 42.4 \text{ A}$$

Với $$\omega_m = \frac{E_a}{K} = \frac{250 - (42.4 \times 0.6)}{2.36} = 95.15 \text{ rad/s}$$

$$n = \frac{60}{2\pi}\omega_m = 909 \text{ v/ph}$$

Công suất ra 10 kW và 1200 v/ph.

Giả sử từ hóa tuyến tính, pt (i) và (ii) được viết lại:

$$E_a = K'_a I_f \omega_m \qquad \text{(iii)}$$

$$T = K'_a I_f \omega_m \qquad \text{(iv)}$$

Từ các dữ liệu vận hành không tải:

$$I_f = \frac{250}{150} = 1.67 \text{ A}$$

$$K'_a = \frac{K}{I_f} = \frac{2.36}{1.07} = 1.413$$

$$(250 - 0.6\, I'_a)\, I'_a = 10 \times 1000$$

$$I'_a = 44.8 \text{ A (loại bỏ giá trị cao)}$$

Thay vào pt (iii)

$$250 - (0.6 \times 44.8) = 1.413 \times I'_f \times \frac{2\pi \times 1200}{60}$$

$$I'_f = 1.257\text{A}$$

$$R_f(\text{tổng}) = \frac{250}{1.257} = 199\ \Omega$$

$$R_f\ (\text{ngoài}) = 199 - 150 = 49\ \Omega$$

Động cơ kích từ nối tiếp

Điều khiển tốc độ được thực hiện bằng cách điều chỉnh ampere - vòng cuộn kích từ với một trong ba phương pháp:

1. *Chỉnh dòng kích thích mạch rẽ:* Nối một điện trở song song với cuộn kích thích (Hình 7.54), bằng cách thay đổi R_d, dòng kích thích và do đó ampere - vòng kích thích sẽ giảm. Từ mạch, rõ ràng:

$$I_f = I_a\left(\frac{R_d}{R_{se} + R_d}\right) = K_d I_a \tag{7.75}$$

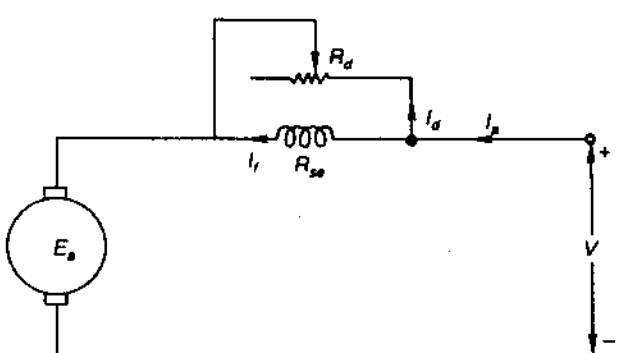
$$K_d = \frac{R_d}{R_{se} + R_d} = \frac{1}{\frac{R_{se}}{R_d} + 1}$$

Từ hóa tuyến tính:

$$\Phi = K_d . K_f I_a \tag{7.76}$$

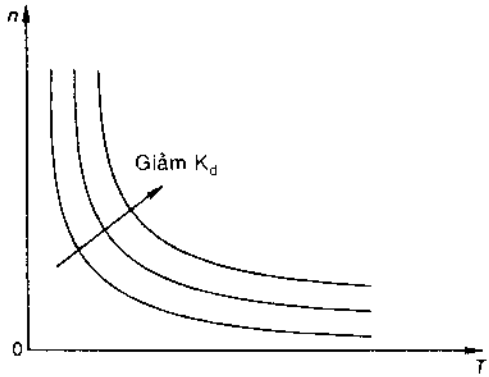
Pt (7.60) được viết lại như sau:

$$n = \frac{K_N}{K_f}\left[\frac{V\sqrt{K_T K_f}}{\sqrt{K_d}\sqrt{T}} - \frac{1}{K_d}\{R_a + (R_{se} \,||\, R_d)\}\right] \tag{7.77}$$



Hình 7.54 *Mạch điều khiển với điện trở mắc rẽ.*

Từ pt (7.77), các đặc tuyến moment - tốc độ khi giảm giá trị K_d (giảm R_d) được vẽ trên Hình 7.55. Các đặc tuyến này có thể được hiệu chỉnh do sự bão hòa và hiệu ứng phản ứng phần ứng.



Hình 7.55 *Hiệu ứng của thông số mắc rẽ trên đặc tuyến moment - tốc độ*

Chú ý, để tránh sự dao động của tốc độ ban đầu do tải thay đổi, cần dùng điện trở mắc rẽ quấn cảm ứng.

2. *Điều khiển kích từ kiểu bậc.* Ampere - vòng được điều chỉnh theo bậc bằng cách thay đổi số vòng trong mạch (Hình 7.56):

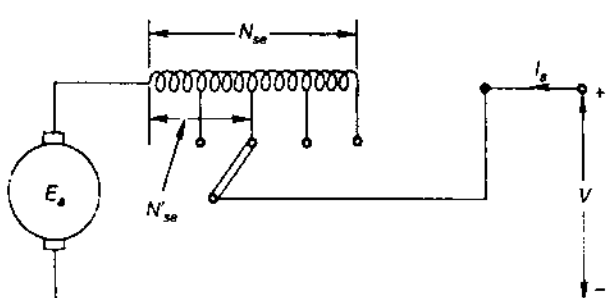
$$I_{se}(\text{hiệu dụng}) = \frac{N_{se}}{N_{se}} I_a - K_{se} I_a$$

N'_{se} = vòng kích từ kiểu bậc với $R'_{se} = K_{se} \cdot R_{se}$.

$\Phi = K_f K_{se} I_a$ (tuyến tính)

Thay vào pt 7.60:

$$n = \frac{K_N}{K_f}\left[\frac{V\sqrt{K_T K_f}}{\sqrt{K_{se}}\sqrt{T}} - \left(\frac{R_a}{R_{se}} + R_{se}\right)\right] \qquad (7.78)$$



Hình 7.56 *Điều khiển kích từ kiểu bậc.*

Các đặc tuyến moment - tốc độ được điều khiển tương tự Hình 7.55, ngoại trừ tác dụng biên của điện trở.

3. *Điều khiển song song - nối tiếp.* Các cuộn kích từ được chia thành hai nửa bằng nhau và mắc nối tiếp hoặc song song với nhau để điều khiển ampere - vòng (Hình 7.57). Với dòng phần ứng bất kỳ, mắc song song của hai nửa cuộn dây này sẽ có:

$$AT_{\text{song song}} = 2\left(\frac{N_{se}}{2} \times \frac{I_a}{2}\right) = \frac{1}{2} N_{se} I_a = \frac{1}{2} AT_{\text{nối tiếp}}$$

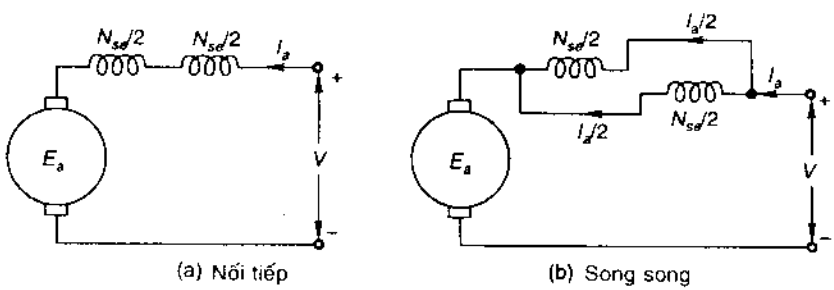
và $$R_{se} = \left(\frac{R_{se}}{2} \,||\, \frac{R_{se}}{2}\right) = \frac{1}{4} R_{se}$$

Đối với trường hợp tuyến tính: $\Phi = 1/2\ K_f.I_a$

Từ pt (7.78)

$$K_{se} = 1 \text{ hoặc } 1/2\ .$$

chỉ có hai tốc độ khả dĩ, nối song song cho tốc độ cao hơn.



Hình 7.57 *Điều khiển song song - nối tiếp*

Ví dụ 7.23: Đặc tuyến mạch hở sau đây là kết quả từ kích thích riêng biệt động cơ kích từ nối tiếp truyền động phần ứng ở tốc độ 900 v/ph.

Lực điện động sinh ra emf (V) :	0	78	150	192	220
Dòng kích thích (A)	0	50	100	150	200

Điện trở phần ứng và mạch kích thích nối tiếp là 0.035 Ω và 0.015 Ω. Xác định tốc độ và moment động cơ khi dòng là 200A, điện áp nguồn 220V, và vận hành với:

a) Cuộn dây kích thích toàn phần.

b) Số vòng dây kích thích giảm còn một nửa.

Giải

Điện trở phần ứng tổng = 0.035 + 0.015 = 0.05 Ω

$$E_a = 220 - (200 \times 0.05) = 210V$$

a) Khi cuộn dây kích thích toàn phần; dòng 200A; 900 v/ph, emf = 220V (từ đặc tuyến từ hóa)

$$\text{Tốc độ động cơ} = 900 \times \frac{210}{220} = 859.1 \text{ v/ph}$$

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega} = \frac{210 \times 200}{\frac{2\pi \times 859.1}{60}} = 466.85 \text{ Nm}$$

b) Khi cuộn dây kích thích chỉ còn một nửa:

$$R_{se} = \frac{0.015}{2} = 0.0075\ \Omega$$

$$R(\text{tổng}) = 0.035 + 0.0075 = 0.0425\ \Omega$$

$$E_a = 220 - (200 \times 0.0425) = 211.5V$$

Dòng trong cuộn dây kích từ toàn phần tương đương = 220/ 2 = 100A

E_a = 150V (tại 900 v/ph); từ đặc tuyến từ hóa

$$\text{Tốc độ động cơ} = 900 \times \frac{211.5}{150} = 1269 \text{ v/ph}$$

$$T = \frac{211.5 \times 200}{\frac{2\pi \times 1269}{60}} = 318.5 \text{ Nm}$$

Ví dụ 7.24: Động cơ quạt quấn nối tiếp 4 cực, dòng phần ứng 50A, chạy với tốc độ 2000 v/ph, nguồn dc 230V với 4 cuộn dây nối tiếp. Bốn cuộn dây kích từ được nối thành hai nhánh song song với mỗi nhánh hai cuộn nối tiếp. Giả sử từ thông/cực tỷ lệ với dòng kích thích và tải tỷ lệ với bình phương tốc độ. Tìm tốc độ và dòng phần ứng. Bỏ qua các tổn thất, điện trở phần ứng là 0.2 Ω, điện trở mỗi cuộn kích là 0.05 Ω

Giải

$$E_a = K_E I_{se} n \qquad \text{(i)}$$

$$T_L = K_L n^2 = T_M = K_M I_{se} I_a \qquad \text{(ii)}$$

Khi các cuộn kích thích mắc nối tiếp: $I_{se} = I_a$

$R_{se} = 4 \times 0.05 = 0.2\ \Omega$; $R_a = 0.2\ \Omega$

$R_A = 0.2 + 0.2 = 0.4\ \Omega$

$I_{a1} = 50$ A

$E_{a1} = 230 - (0.4 \times 50) = 210$ V

$$210 = K_E \times 50 \times 2000 \qquad \text{(iii)}$$

$$K_L \times (2000)^2 = K_M \times (50)^2 \qquad \text{(iv)}$$

Các cuộn trường trong hai nhánh nối tiếp song song với nhau:

I_{se} (hiệu dụng) $= I_a$

$$R_{se} = \frac{2 \times 0.05}{2} = 0.05\ \Omega$$

$R_a = 0.2 + 0.05 = 0.25\ \Omega$

$$E_{a2} = 230 - 0.25\ I_{a2} = K_E \times (I_{a2}/2)\ n_2 \qquad \text{(v)}$$

$$K_L n_2^2 = K_M \times \frac{I_{a2}}{2} \times I_{a2} \qquad \text{(vi)}$$

Từ các pt (iv) và (v):

$$\frac{n_2^2}{(2000)^2} = \frac{I_{a2}^2}{2 \times (50)^2}$$

$$n_2 = 28.3\ I_{a2} \qquad \text{(vii)}$$

Từ các pt (iii) và (v):

$$\frac{230 - 0.25 I_{a2}}{210} = \frac{I_{a2} n_2}{2 \times 50 \times 2000}$$

Thay n_2 từ pt (vii):

$$I_{a2}^2 + 8.4\ I_{a2} - 7740 = 0$$

$I_{a2} = 83.9$ A; loại bỏ trị số âm.

$n_2 = 28.3 \times 83.9 = 2374$ v/ph.

Điều khiển phần ứng

Yêu cầu chính của sơ đồ điều khiển này là nguồn điện biến thiên cung cấp cho phần ứng và định mức dòng phải lớn hơn dòng điện của động cơ.

(i) Cung cấp sự *truyền động moment không đổi*. Trong trường hợp động cơ kích từ song song, khi dòng kích thích đạt giá trị cực đại, moment động cơ có thể nhận được tại dòng phần ứng toàn tải ở mọi tốc độ.

(ii) Vì ampere - vòng kích từ chính được duy trì ở mức lớn, nên độ méo mật độ từ thông do phản ứng phần ứng gây nên là có hạn.

(iii) Khác với mạch điều khiển tốc độ theo từ trường kích thích, điều khiển phần ứng có thể đảo chiều động cơ dễ dàng.

Ba kiểu mạch điều khiển phần ứng cơ bản:

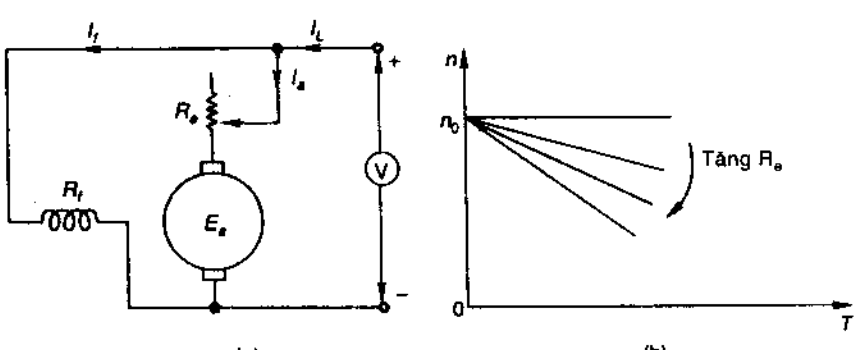
Điều khiển bằng biến trở.

Điều khiển điện trở nối tiếp trên phần ứng: Sự thay đổi điện áp cấp vào phần ứng được thực hiện bằng cách mắc biến trở R_e nối tiếp với phần ứng (Hình 7.58).

Phương pháp điều khiển này có các hạn chế như sau:

(i) Chỉ đạt được tốc độ dưới định mức, từ pt (7.71) (điện trở phần ứng không đáng kể):

$$n_1 = K_N \frac{V}{\Phi}; \qquad n_2 = K_N \frac{V - I_a R_e}{\Phi}$$



Hình 7.58 *Điều khiển điện trở nối tiếp trên phần ứng và đặc tuyến moment - tốc độ*

$$\frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{I_a R_e}{V} \tag{7.80}$$

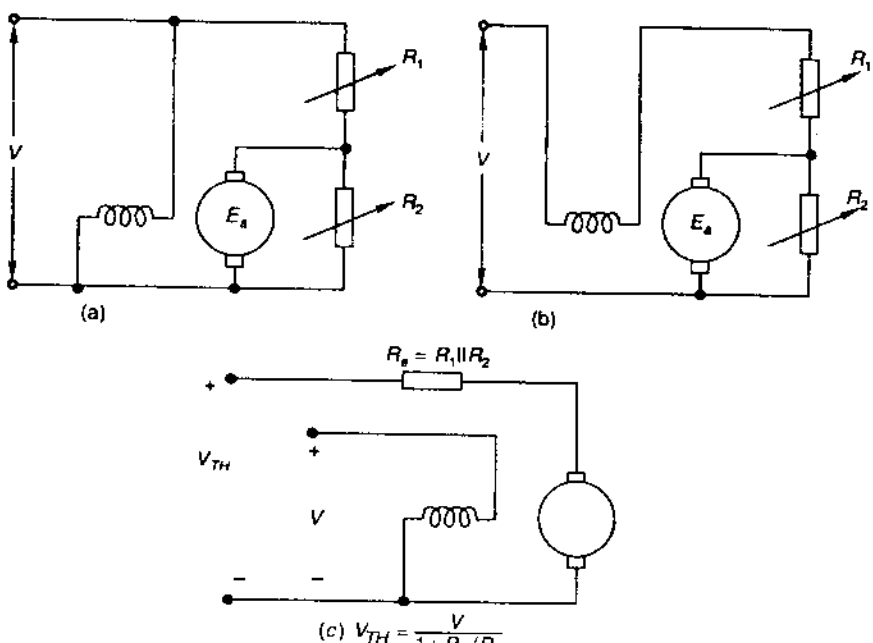
(ii) Phạm vi thay đổi tốc độ giới hạn do hiệu suất giảm mạnh khi mức độ giảm tốc lớn. Hiệu suất phần ứng:

$$\eta = \frac{(V - I_a R_e)\, I_a}{V I_a} = 1 - \frac{I_a R_e}{V} \approx \frac{n_2}{n_1} \tag{7.81}$$

(iii) Sự điều chỉnh tốc độ tương đối thấp, do giá trị điện trở nối tiếp phần ứng là cố định, tốc độ biến thiên trực tiếp với tải, phụ thuộc độ sụt điện áp ở điện trở này.

Nhìn chung, điều khiển bằng biến trở chỉ thuận tiện và có lợi đối với các động cơ nhỏ hơn 1kW, hoặc chỉ trong thời gian ngắn.

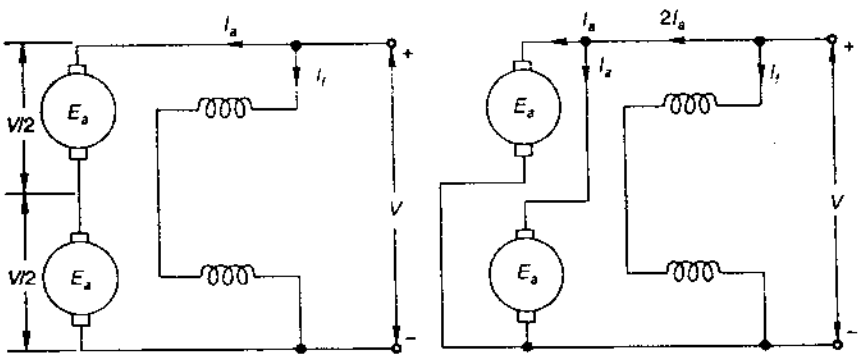
Điều khiển phần ứng mắc rẽ. Đây là biến thể của điều khiển biến trở. Nguyên lý (Hình 7.59) là phân chia điện áp..



Hình 7.59 *Điều khiển tốc độ phần ứng mắc rẽ.*

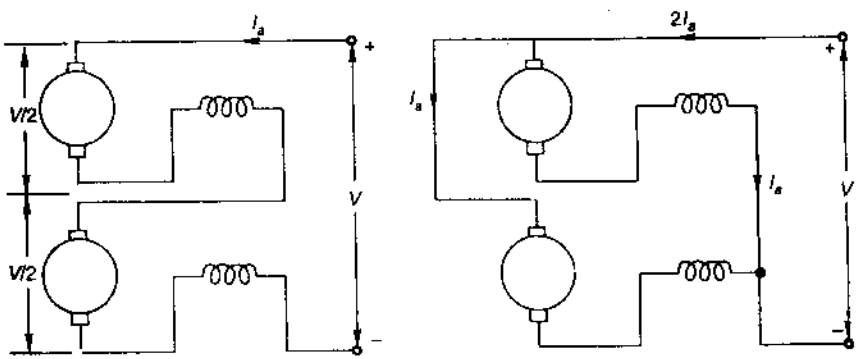
Trong mạch điều khiển phần ứng động cơ kích thích song song (Hình 7.59a), đương lượng Thevenin được vẽ từ phía phần ứng động cơ. Tốc độ không tải phần ứng được điều khiển bằng V_{TH}, có thể được điều chỉnh một cách độc lập bằng tỷ số R_2/R_1. Điện trở nối tiếp (điện trở Thevenin), $R_e = R_1 // R_2$ rất nhỏ để mạch điều khiển có sự điều tốc tốt hơn so với mạch trên Hình 7.58a.

Điều khiển song song - nối tiếp. Hai động cơ đồng nhất nối cơ học với tải chung. Trong phương pháp này, có thể đạt được hai tốc độ trên cùng moment không đổi; bằng cách mắc nối tiếp các phần ứng hoặc mắc song song (Hình 7.60).



(a) Các phần ứng mắc nối tiếp (b) Các phần ứng nối song song

Hình 7.60 *Điều khiển tốc độ động cơ (kích thích song song) theo phương pháp song song - nối tiếp*



(a) Mắc nối tiếp (b) Mắc song song

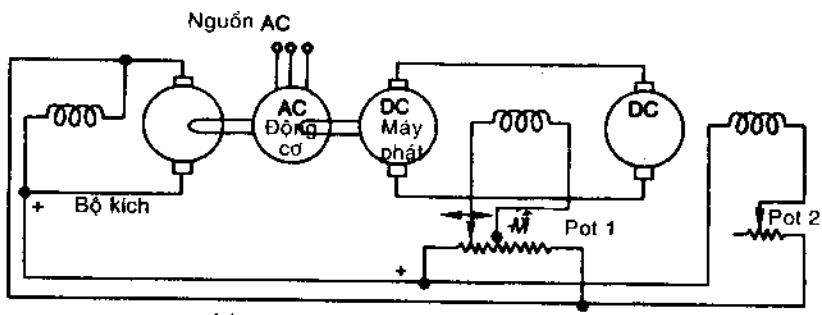
Hình 7.61 *Điều khiển tốc động cơ kích thích nối tiếp theo kiểu nối tiếp - song song với moment tải không đổi*

Khi mắc nối tiếp phần ứng với nhau, điện áp trên mỗi động cơ là V/ 2, và khi nối song song điện áp trên mỗi động cơ là V.

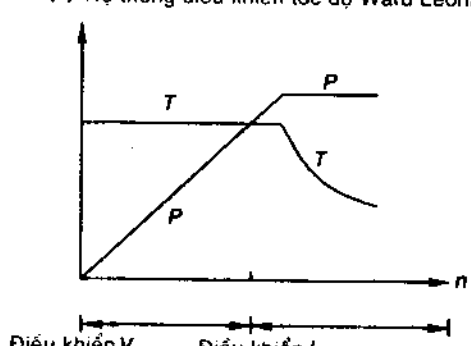
Trên Hình 7.61 là các kết nối để điều khiển tốc độ song song - nối tiếp của hai động cơ kích thích nối tiếp tương đồng.

Điều chỉnh tốc độ Ward Leonard

Đây là sự kết hợp điều khiển kích từ và điều khiển phần ứng, do đó có thể điều khiển tốc độ một cách hiệu quả trong khoảng rộng. Phần ứng động cơ dc được cung cấp điện áp biến thiên và cực tính có thể điều chỉnh với dòng định mức cao hơn dòng điện động cơ. Mạch trường (song song) của động cơ được kích thích riêng từ nguồn dc độc lập (định mức dòng thấp). Nguồn dc điện áp biến thiên trong các thiết bị cũ là từ máy phát dc được truyền động từ động cơ lồng sóc 3-pha. Mạch trường của máy phát được kích riêng rẽ từ bộ chỉnh lưu nhỏ hoặc bộ kích thích mắc vào trục động cơ. Sơ đồ mạch được nêu trên Hình 7.62a.



(a) Hệ thống điều khiển tốc độ Ward Leonard



Hình 7.62 (b) Đặc tuyến tốc độ - moment và tốc độ - công suất

Nối kết chiết áp (Pot 1) cho phép đảo chiều kích thích động cơ do đó đảo cực tính điện áp để đảo chiều quay động cơ. Thiết bị hiện đại dùng mạch SCR cho nguồn dc điện áp biến thiên, lấy điện năng từ nguồn ac thông qua máy biến áp. Tuy đắt tiền, nhưng mạch này hoạt động ổn định, chi phí bảo trì thấp, dễ lắp mạch hồi tiếp để điều khiển tốc độ tự động.

Tại tốc độ cơ bản n_b, phần ứng động cơ được cấp điện áp định mức và dòng kích được điều chỉnh đến giá trị cực đại, tức là từ trường được kích thích ở điện áp định mức. Việc giảm điện áp phần ứng cho phép điều khiển tốc độ với moment không đổi, tốc độ có thể giảm xuống dưới tốc độ cơ bản trong khi động cơ vẫn cung cấp moment toàn phần (vì I_f = max và I_a có thể đạt giá trị định mức). Để đạt được tốc độ trên n_b, từ trường kích thích phải giảm dần, do đó, moment động cơ giảm khi tốc độ tăng, tương ứng với truyền động công suất không đổi (Hình 7.62b).

Các đặc điểm của hệ thống Ward-Leonard:

(i) Không có điện trở ngoài, hiệu suất mọi tốc độ được cải thiện rõ rệt. Ngoài ra, khi emf máy phát thấp hơn emf của động cơ, công suất điện từ động cơ về máy phát được chuyển thành cơ năng và chuyển cho nguồn thông qua động cơ ac truyền động. Yếu tố này rất có lợi trong các trường hợp yêu cầu khởi động, ngừng máy và đảo chiều thường xuyên.

(ii) Không cần bộ khởi động đặc biệt, điện áp cảm ứng trong máy phát từ zero tăng dần, động cơ khởi động nhẹ nhàng.

(iii) Đảo chiều tốc độ diễn ra ổn định.

Ví dụ 7.25: Động cơ kích thích song song, 200V, với từ trường kích thích chính không đổi, mang tải có moment thay đổi theo bình phương tốc độ, dòng 30A khi chạy tại tốc độ 600 v/ph. Tìm tốc độ và dòng, nếu mắc nối tiếp điện trở 20 Ω vào mạch phần ứng. Bỏ qua mọi tổn thất.

Giải

Điện trở phần ứng giả sử không đáng kể. Bỏ qua dòng kích từ khi so với dòng phần ứng.

$$I_f = I_a$$

Theo điều kiện đã cho:

$$200 = K'_e \times 600 \qquad \text{(i)}$$

$$T = K'_t \times 30 = K_L \times (600)^2 \qquad \text{(ii)}$$

Với điện trở 20 Ω mắc nối tiếp mạch phần ứng

$$(200 - 20\,I_a) = K_e^a \times n \qquad \text{(iii)}$$

$$K_e I_a = K_E n^2 \qquad \text{(iv)}$$

chia (iii) cho (i) và (iv) cho (ii)

$$\frac{200 - 20\,I_a}{200} = \frac{n}{600} \qquad \text{(v)}$$

$$\frac{I_a}{30} = \frac{n^2}{(600)^2} \qquad \text{(vi)}$$

$n = 260.5$ v/ph.

$I_a = 5.66$ A.

Ví dụ 7.26: Động cơ kích thích nối tiếp 400V có tổng điện trở phần ứng 0.25 Ω, dòng 25A khi chạy ở tốc độ 1200 v/ph. Khi mắc điện trở điều chỉnh 2.75 Ω vào mạch phần ứng, động cơ có dòng 15A. Tìm tốc độ và tỷ số của hai công suất ra. Giả sử từ thông dòng 15A bằng 70% dòng 25A.

Giải

$$E_a = K_e F n$$

$$400 - (0.25 \times 25) = K_e\,\Phi_1 \times 1200 \qquad \text{(i)}$$

$$400 - (2.75 + 0.25) \times 15 = K_e \Phi_2 \times n_2 \qquad \text{(ii)}$$

chia (ii) cho (i) = 355/393,75 =

$$\frac{355}{393.75} = \frac{n_2}{1200} \times \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \times \frac{n_2}{1200} \times 0.7$$

$n_2 = 1545.6$ v/ph.

Tỷ số công suất ngõ ra là

$$\frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{355 \times 15}{393.75 \times 25} = 0.541$$

Ví dụ 7.27: Động cơ kích thích song song kéo bơm ly tâm có tải thay đổi theo bình phương tốc độ. Điều chỉnh tốc độ bơm bằng cách thay đổi điện áp phần ứng của động cơ với dòng kích thích không đổi. Khi toàn tải, điện áp phần ứng là 500V, dòng phần ứng là 128A. Tính điện áp phần ứng để giảm tốc độ đến $1/\sqrt{2}$ tốc độ ban đầu, $R_a = 0.28\ \Omega$. Bỏ qua hiệu ứng phản ứng phần ứng và tổn thất moment.

Giải

$$I_{a1} = 128 \text{ A}$$

$$E_{a1} = 500 - (0.28 \times 128) = 464.2 \text{ V}$$

Vì dòng kích thích không đổi:

$$T = K_T n_1^2 \propto 128 \qquad \text{(i)}$$

Tốc độ giảm xuống $n_2 = n_1 / \sqrt{2}$, nên:

$$K_T \left(n_1 / \sqrt{2}\right)^2 \propto I_{a2} \qquad \text{(ii)}$$

Từ (i) và (ii)

$$\frac{I_{a2}}{128} = \frac{1}{2} \qquad \text{hoặc} \qquad I_{a2} = 64 \text{ A}$$

Điện áp phần ứng mới là: V_2.

$$(V_2 - 0.28\, I_{a2}) \propto \frac{n_1}{\sqrt{2}} \qquad \text{(iii)}$$

$$464.2 \propto n_1 \qquad \text{(iv)}$$

từ (iii) và (iv):

$$\frac{V_3 - 0.28 \times 128}{464.12} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$V_2 = 346.2 \text{ V}$$

Ví dụ 7.28: Hệ thống điều khiển tốc độ Ward-Leonard trên Hình 7.62 dùng hai máy điện tương đồng 230V, 4.5kW, 1500 v/ph. Máy phát chạy với tốc độ không đổi 1500 v/ph, $R_a = 0.5\ \Omega$ cho mỗi máy.

Dữ liệu từ hóa ghi nhận ở 1500 v/ph như sau:

I_f(A)	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2
V_{oc} (V)	45	110	148	175	195	212	223	230	241	251

Bỏ qua tác dụng của phản ứng phần ứng

a) Dòng kích từ động cơ là 0.8A. Để tốc độ động cơ trong khoảng 300 - 1500 v/ph với công suất (cơ) ngõ ra là 4.5kW, hãy xác định dòng kích từ của máy phát.

b) Dòng kích từ máy phát 1A không đổi khi dòng kích từ động cơ giảm đến 0.2A. Hãy xác định dòng và tốc độ động cơ với công suất ngõ ra 4.5kW.

Giải

Có thể dùng phép nội suy để tính toán.

a) $I_{fm} = 0.8 \Rightarrow E_{am} = 230$ V; tại 1500 v/ph

$n_m = 300 - 1500$ v/ph

(i) $n_m = 300$ rpm

$$E_{am} = \frac{230 \times 300}{1500} = 46 \text{ V}$$

$P_{mot} = 4500 = 46\ I_a$

hay $I_a = 97.8$ A

$E_{ag} = 46 + (2 \times 0.5 \times 97.8) = 143.8$ V

Từ đặc tuyến từ hóa:

$$I_f = 0.3 - \frac{0.1}{(148 - 110)} \times (148 - 143.8) = 0.29 \text{ A}$$

(ii) $n_m = 1500$ rpm và $E_{am} = 230$ V

$P_{mot} = 230 \times I_a = 4500$

Hay $I_a = \dfrac{4500}{230} = 19.6$ A

$E_{ag} = 230 + (2 \times 0.5 \times 19.6) = 249.6$ V

Từ đặc tuyến từ hóa:

$$I_f = 1.2 - \frac{0.2}{(241 - 230)} \times (251 - 249.6) = 1.18 \text{ A}$$

Nên, phạm vi $I_f = 0.29 - 1.18$ A

b) $I_{fg} = 1$ A $\Rightarrow E_{ag} = 241$ A; 1500 v/ph (không đổi)

$$\left(\frac{241 - E_{am}}{2 \times 0.5}\right) \times E_{am} = 4500$$

Hay $E_{am}^2 - 241\ E_{am} + 4500 = 0$

$E_{am} = 220.5$ V;

$I_{fr} = 0.2$ A $\Rightarrow$ $E_{am} = 110$V ; tại 1500 v/ph

$$n_m = 1500 \times \left(\frac{220.5}{110}\right) = 3007 \text{ v/ph}$$

Dừng động cơ DC

Làm chậm hoặc ngừng động cơ cùng với tải cũng quan trọng như khởi động động cơ. Các phương pháp hãm dựa trên ma sát, tác động điện cơ, dòng điện xoáy v.v.. đều độc lập với động cơ nhưng đôi khi phương pháp hãm bằng điện kinh tế hơn.

Có 3 phương pháp hãm bằng điện

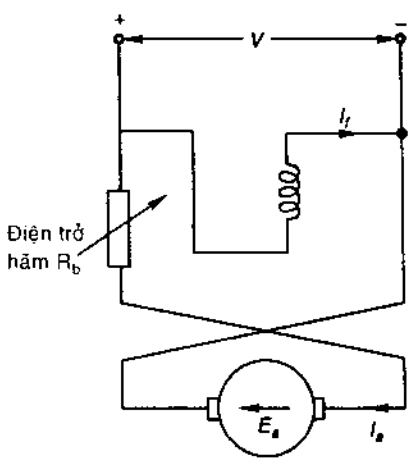
(i) Đảo nối kết.

(ii) Động lực học.

(iii) Tái sinh.

Phương pháp đảo nối kết

Phương pháp này sử dụng sự đảo chiều đột ngột các kết nối cuộn dây kích hoặc phần ứng trong quá trình vận hành động cơ. Do vấn đề ngắt dòng kích cảm ứng cao và thời gian cần thiết để có dòng theo chiều ngược lại, trong thực tế thường dùng sự đảo chiều nối kết phần ứng (Hình 7.63). Điện áp phần ứng hiệu dụng (E_a + V), ban đầu là 2V, do đó phải có điện trở hãm giới hạn (có thể là điện trở khởi động) trong mạch. Động năng của hệ chuyển động được tiêu tán trong mạch phần ứng và các điện trở hãm.



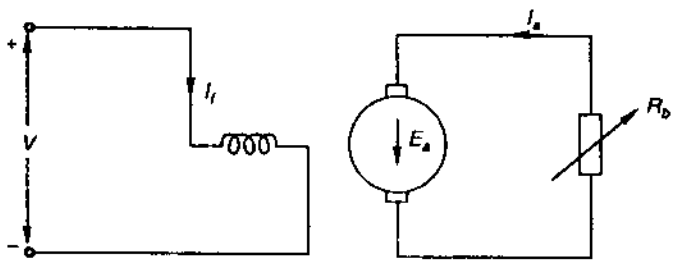
Hình 7.63 *Kết nối đảo chiều trong động cơ kích thích song song*

Hãm bằng điện trong nhiều trường hợp sẽ kém hiệu quả khi tốc độ giảm làm giảm moment hãm. Phải ngắt nguồn cung cấp để giảm dần tới tốc độ zero (trừ khi muốn đảo chiều động cơ), sử dụng relay dòng hoặc chiều tốc độ và dùng hãm thủy lực hoặc cơ để động cơ ngừng hẳn. Dòng ban đầu lớn và ứng

suất cơ học cao làm cho việc áp dụng phương pháp này bị hạn chế, thường chỉ dùng cho các động cơ nhỏ.

Hãm động lực học

Phần ứng bị ngắt khỏi nguồn, kế đó điện trở hãm R_b được ghép song song qua phần ứng (Hình 7.64). Động cơ hoạt động như một máy phát nhờ năng lượng động năng tồn trữ tiêu tán trên R_b. Phương pháp này rất đơn giản, và động cơ hầu như ngừng hẳn. Thời gian hãm là hàm của quán tính hệ thống, moment tải, và định mức động cơ. Mạch từ vẫn được nối với nguồn.



Hình 7.64 *Động cơ kích thích song song, hãm động lực*

Điều nguy hiểm duy nhất là nếu mất nguồn cung cấp, thì cũng làm mất hãm. Nếu cuộn kích từ vẫn nối với phần ứng, ban đầu moment hãm đạt giá trị cao nhưng sẽ bị sụt nhanh theo tốc độ - và sự cố xảy ra khi tốc độ giảm xuống dưới giá trị tới hạn tự kích thích. Đối với động cơ kích thích nối tiếp, cần hãm đảo chiều theo kết nối cuộn dây phần ứng hoặc kích từ để tích tụ lực điện động phần ứng, giá trị của R_h, $(R_b + R_a + R_{se})$, thấp hơn điện trở tới hạn ứng với tốc độ bắt đầu hãm.

Hãm tái sinh

Trong phương pháp này, hầu hết năng lượng hãm trở về nguồn cung cấp, được dùng khi chu kỳ tải cao đòi hỏi hãm hoặc làm chậm động cơ một cách thường xuyên, và rất hữu dụng để duy trì tải giảm dần với thế năng cao ở tốc độ không đổi. Điều kiện để tái sinh là emf quay phải lớn hơn điện áp cung cấp để dòng điện đảo ngược và chế độ vận hành thay đổi từ kiểu động cơ sang kiểu máy phát.

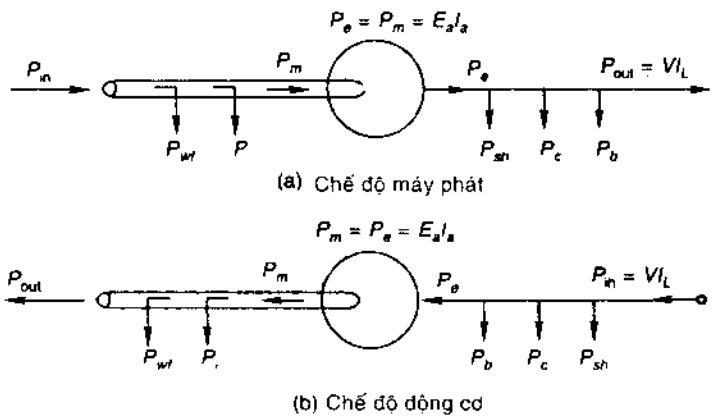
Sự tái sinh là có thể với các động cơ kích thích song song hoặc riêng rẽ, và với các động cơ hỗn hợp có mạch nối tiếp yếu. Các động cơ nối tiếp cần đảo nối

kết phần ứng hoặc mạch từ. Điều này đạt được bằng cách tăng dòng kích, tốc độ phần ứng, hoặc giảm điện áp nguồn. Phương pháp này đòi hỏi nguồn có khả năng tiếp nhận công suất phát sinh mà không làm tăng điện áp.

Hiệu suất và thử nghiệm

Hiệu suất của máy điện dc

Nói chung, hiệu suất của máy đã được đề cập ở Chương 5. Ở đây sẽ áp dụng các nguyên lý cơ bản cho từng trường hợp máy dc.



Hình 7.65 *Lưu đồ công suất máy điện dc*
(P_i là tổn thất sắt từ và P_c là tổn thất dây đồng).

Hình 7.65 minh họa sơ đồ năng lượng của các chế độ động cơ và máy phát của máy điện dc với:

P_i = Tổn thất trong lõi = P_{i0} + tổn thất sắt và tải.

P_{sh} = Tổn thất kích thích song song xảy ra trong máy kích thích song song và hỗn hợp

P_c = Tổn thất dây đồng phần ứng bao gồm tổn thất trong cuộn dây nối tiếp và tổn thất dây đồng.

Các ký hiệu khác được hiểu như bình thường.

Xét pt (5.76a) và (5.78a), hiệu suất máy điện động cơ và máy phát được tính như sau:

$$\eta_G = \frac{VI_L}{VI_L + P_k + K_v I_a^2 + V_b I_a} \text{ (máy phát)} \quad (7.82a)$$

$$\eta_M = \frac{VI_L - P_k - K_v I_a^2 - V_b I_a}{VI_L} \text{ (động cơ)} \quad (7.82b)$$

với: $P_k = P_{i0} + P_{wf} + P_{sh}$ = tổn thất không đổi

$P_v = K_v I_a^2 = (R_a + R_{se}) I_a^2 + P_{st}^t$

P_{st}^t = tổn thất tải (sắt từ và dây đồng) tỷ lệ với I_a^2

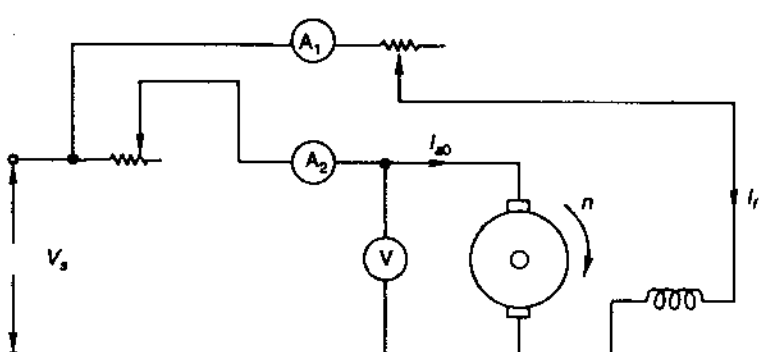
Từ pt (5.77), hiệu suất tối đa khi:

$$P_k = K_v I_a^2 \quad (7.83)$$

Thử nghiệm các loại máy điện dc

Hiện có nhiều loại thử nghiệm không tải trên các máy điện dc. Các thử nghiệm Swinburn và thử nghiệm Hopkinson là quan trọng nhất và được tiến hành trên các động cơ kích thích song song.

Thử nghiệm Swinburn: Đây là thử nghiệm không tải, không dùng được cho động cơ nối tiếp, các kết nối được vẽ trên Hình 7.66. Động cơ đang chạy không tải ở tốc độ định mức. Dòng kích thích được điều chỉnh theo giá trị định mức để xác định chính xác tổn thất không tải ($P_{i0} + P_{wf}$). Máy sẽ chạy ở tốc độ cao hơn tốc độ định mức với điện áp phần ứng định mức . Do đó phải



Hình 7.66 *Mạch thử nghiệm Swinburn.*

mắc điện trở nối tiếp trên mạch phần ứng để giảm điện thế lên mạch phần ứng để động cơ chạy với tốc độ định mức.

Tổn thất không đổi (Hình 7.66).

$$VI_{a0} = P_{i0} + P_{wf} + I_{a0}^2R_a$$

$$P_{i0} + P_{wf} = VI_{a0} - I_{a0}^2R_a \qquad (7.84)$$

P_{sh} = tổn thất trên cuộn kích song song

$$= I_f^2R_f = V_fI_f \qquad (7.85)$$

P_k = tổn thất không đổi

$$= (VI_{a0} - I_{a0}^2R_a) + VI_f \qquad (7.86)$$

Tổn thất biến thiên.

Điện trở phần ứng (kể cả sụt áp tiếp xúc trên chổi than được giả thiết là tuyến tính) được đo bằng thử nghiệm dc bằng dòng phần ứng định mức lấy từ nguồn ắc quy.

$$P_v = I_a^2R_a$$

Tổn thất tải có thể bỏ qua hoặc ước lượng khoảng 1% công suất ra định mức khi toàn tải.

Tổn thất tổng:

$$P_L = P_k + P_v$$

$$= (VI_{a0} - I_{a0}^2R_a) + I_f^2R_f + I_a^2R_a \qquad (7.87)$$

Hiệu suất được tính với dòng tải bất kỳ:

Máy phát.

$$I_a = I_L + I_f,$$

$$\eta_G = \frac{VI_L}{VI_L + P_L} \qquad (7.88)$$

Động cơ.

$$I_a = I_L - I_f,$$

$$\eta_M = \frac{VI_L - P_L}{VI_L} \qquad (7.89)$$

Chú ý: Vì điện trở R_a và R_f được đo ở chế độ nguội, nên phải hiệu chỉnh nhiệt độ trước khi dùng phép tính này.

Nhược điểm.

(i) Tổn thất tải không xác định được bằng phương pháp này, nên hiệu suất bị ước lượng quá mức. Hiệu chỉnh bằng cách giả thiết tổn thất tải là một nửa so với tổn thất không tải.

(ii) Nhiệt độ tăng dần trong máy không xác định được.

(iii) Thử nghiệm không chỉ ra được sự chuyển mạch có được thỏa mãn không khi máy có tải.

Ví dụ 7.29: Động cơ kích thích song song 10kW, 250V có điện trở phần ứng 0.8 Ω và điện trở kích từ 275 Ω, dòng điện 3.91 A, khi chạy ở điện thế định mức và tốc độ định mức.

a) Có thể rút ra kết luận gì từ các dữ liệu về tổn thất trong máy?

b) Tính hiệu suất máy (máy phát) khi phát công suất 10kW với điện áp định mức và tốc độ định mức, và khi máy là động cơ kéo công suất 10kW. Phải giả định điều gì nếu bạn phải thực hiện tính toán này?

Giải:

a) Tổn thất kích thích song song:

$$P_{sh} = \frac{(250)^2}{275} = 227.3 \text{ W}$$

Tổn thất không đổi:

$$P_k = 250 \times 3.91 - (3.91)^2 \times 0.8 = 965 \text{ W}$$

b) *Máy phát*:

$$I_L = \frac{10 \times 10^3}{250} = 40 \text{ A}; \quad I_f = \frac{250}{275} = 0.91 \text{ A}$$

$$I_a = 40 + 0.91 = 40.91 \text{ A}$$

$$P_L = 965 + 227.3 + (40.91)^2 \times 0.8 = 2.53 \text{ kW}.$$

$$\eta_G = \frac{10}{10 + 2.53} = 79.8\%$$

Động cơ:

$$I_a = I_L - I_f = 40 - 0.91 = 39.1 \text{ A}.$$

$$P_L = 965 + 227.3 + (39.1)^2 \times 0.8 = 2.415 \text{ kW}$$

$$\eta_M = \frac{10 - 2.415}{10} = 75.85\%$$

Giả thiết: Bỏ qua tổn thất tải.

Ví dụ 7.30: Động cơ dc 50kW, 250V, 1200 v/ph, khi thử nghiệm không tải 250V có dòng phần ứng 13.24A với tốc độ 1215 v/ph. Dựa trên các thí nghiệm khác, xác định được $R_a = 0.06\ \Omega$ và $R_f = 50\ \Omega$, khi V_b (sụt áp trên chổi than) là 2V. Tính hiệu suất động cơ với tải trục 50 kW và tốc độ 1195 v/ph. Giả thiết tổn thất tải là 1% công suất ra. Tải động cơ là bao nhiêu để đạt hiệu suất cực đại, và giá trị đó là bao nhiêu?

Giải

Thử nghiệm không tải.

Công suất vào phần ứng = 250 x 13.2 = 3300 W.

$$P_{rot} = P_{i0} + P_{fw} = 3300 - 0.06 \times (13.2)^2 - 2 \times 13.2 = 3263 \text{ W}$$

Vì tốc độ ít thay đổi khi tải chuyển từ không tải đến toàn tải, P_{rot} hầu như không đổi.

Có tải. $P_{rot} = 50$ kW (ở trục)

Gọi dòng phần ứng là I_a, phương trình cân bằng công suất:

$$250I_a - 0.06I_a^2 - 2I_a - 3263 - \underbrace{0.01 \times 50 \times 10^3}_{P_{st}} = 50 \times 10^3$$

$$0.06\, I_a^2 - 248\, I_a + 53763 = 0$$

Giải phương trình:

$$I_a = 229.6 \text{ A}$$

$$P_{in} = 250 \times 229.6 + \frac{(250)^2}{50} = 58650 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{50000}{58650} \times 100 = 85.25\%$$

Giả sử P_{st} không đổi trong phạm vi tải đang khảo sát:

$$\eta = \frac{250\, I_a - 0.06\, I_a^2 - 3763\,(P_{rot} + P_{st})}{250\, I_a + 250 \times 5}$$

Hiệu suất cực đại khi:

$$\frac{d\eta}{dI_a} = 0$$

$$I_a = 284 \text{ A}$$

Thay giá trị I_a này vào biểu thức η, tính được: $\eta_{max} = 86.36$ %.

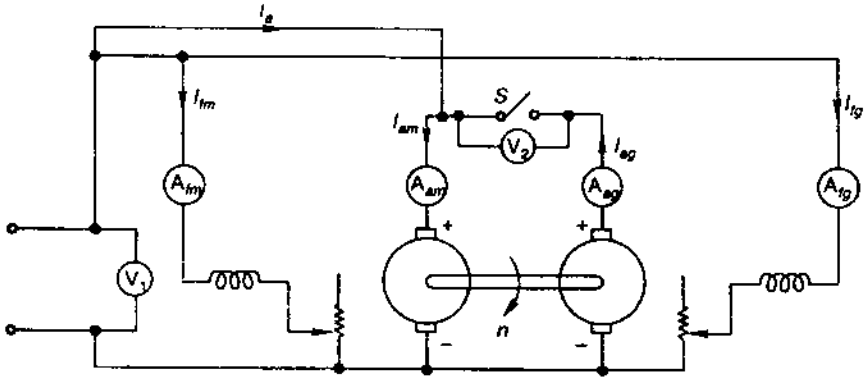
Thử nghiệm Hopkinson: Thử nghiệm tái sinh được tiến hành trên hai động cơ dc kích thích song song đồng nhất được ghép cơ khí với nhau, và tiến hành thử đồng thời. Một máy được dùng làm động cơ kéo, máy kia là máy phát cấp điện cho động cơ. Cụm máy chỉ tiêu thụ công suất tổn thất từ nguồn điện, còn các máy riêng rẽ có thể đạt được tải toàn phần. (Bạn hãy so sánh thử nghiệm này với thử nghiệm Sumpner thực hiện trên hai biến áp đồng nhất).

Hình 7.67 là sơ đồ nối kết của thử nghiệm Hopkinson. Một máy khởi động teo chế độ động cơ. Hai máy mắc song song qua công tắc S, sau khi kiểm tra các cực tính của máy được nối qua công tắc đó. Điện áp qua công tắc S có thể giảm đến gần zero bằng cách điều chỉnh các dòng kích của cả hai máy. Công tắc S đóng sau khi kiểm tra điện áp qua công tắc này là không đáng kể để không có dòng điện tuần hoàn lớn với vòng lặp cục bộ trên các phần ứng khi đóng công tắc.

Tốc độ của cụm và tải điện của các máy được điều chỉnh qua các biến trở đặt trên hai mạch kích thích. Quan hệ nguyên nhân-hệ quả khi thay đổi tải như sau:

$$I_{fg}\uparrow \rightarrow E_{ag}\uparrow \rightarrow E_{ag} > E_{am} \rightarrow I_{ag}\uparrow;\ I_{am}\uparrow$$

$$I_{fm}\downarrow \rightarrow n\uparrow \rightarrow E_{ag} > E_{am} \rightarrow I_{ag}\uparrow;\ I_{am}\uparrow$$



Hình 7.67 *Thí nghiệm HopKinson*

Tính toán tổn thất và hiệu suất:

$$I_a = I_{am} - I_{ag} \tag{7.90}$$

Tổng công suất vào mạch phần ứng:

VI_a = tổng tổn thất trên trục do ngõ ra của cụm là zero (7.91)

$$\text{Tổng tổn thất} = VI_a - I_{am}^2 R_{am} - I_{ag}^2 R_{ag} \tag{7.92}$$

= [(tổn thất ma sát và dây quấn) + (tổn thất sắt không tải) + (tổn thất tải)] của cả hai máy.

Vì máy phát kích thích nhiều hơn động cơ, tổn thất sắt không tải (P_{i0}) và tổn thất tải (P_{st}^{l}) của chúng không bằng nhau. Do không thể tách biệt các tổn thất này và hiệu của chúng quá nhỏ nên có thể coi hai tổn thất này bằng nhau:

$$P_{rò} \text{ (mỗi máy)} = \frac{1}{2}\left[VI_a - I_{am}^2 R_{am} - I_{ag}^2 R_{ag}\right] \tag{7.93}$$

Tổn thất dây đồng kích thích động cơ = VI_{fm};

Tổn thất dây động kích thích máy phát = VI_{fg}

$$P_{Lm} = (P_{rò} + VI_{fm}) + I_{am}^2 R_{am} \tag{7.94}$$

$$P_{Lg} = (P_{rò} + VI_{fg}) + I_{ag}^2 R_{ag} \tag{7.95}$$

$$\eta_M = \frac{P_{in,m} - P_{Lm}}{P_{in,m}} \tag{7.96}$$

$$\eta_G = \frac{P_{out,g}}{P_{out,g} + P_{Lg}} \tag{7.97}$$

Ưu điểm của thử nghiệm Hopkinson:

(i) Thử nghiệm hai máy điện với các điều kiện có tải nên có tính đến tổn thất do tải.

(ii) Vì là thử nghiệm tái sinh nên công suất lấy từ mạch chỉ để cung cấp cho tổn thất. Do đó thí nghiệm có tính kinh tế.

(iii) Không cần khoảng tải thực (các điện trở tải), nên giảm tiêu hao năng lượng

(iv) Chỉ chỉnh dòng kích của hai máy, tải có thể dễ dàng thay đổi và thử nghiệm tải được tiến hành trên khoảng tải toàn phần trong thời gian ngắn.

Khuyết điểm:

(i) Cả hai máy không mang tải như nhau.

(ii) Vì cần biến thiên lớn dòng kích thích cho các máy nhỏ, nên tốc độ cụm máy toàn tải thường cao hơn tốc độ định mức và tốc độ thay đổi theo tải. Không đạt được toàn tải ở trong các máy nhỏ bằng cách loại bỏ các điện trở ngoài của mạch kích máy phát. Dòng kích từ động cơ phải giảm đến mức cần thiết để đạt các điều kiện toàn tải, do đó tốc độ cao hơn giá trị định mức.

(iii) Không có phương pháp tách biệt tổn thất sắt từ của hai máy, vì kích thích khác nhau. Thử nghiệm chỉ phù hợp với các máy lớn.

Ví dụ 7.31: Từ thử nghiệm Hopkinson nhận được các kết quả sau đây ở hai máy điện kích thích song song

Nguồn = 250 V

Dòng kích thích động cơ = 2 A

Dòng kích thích máy phát = 2.5 A

Dòng phần ứng máy phát = 60 A

Dòng hai phần ứng lấy từ nguồn = 15 A

Điện trở của mỗi mạch phần ứng = 0.2 Ω

Tính hiệu suất của động cơ và máy phát theo các điều kiện nêu trên.

Giải:

$$I_{am} = I_{ag} + I_a = 60 + 15 = 75 \text{ A}$$

Dùng pt (7.93):

$$P_{rò} = \frac{1}{2}\left[VI_a - I_{am}^2 R_{am} - I_{ag}^2 R_{ag}\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left[(250 \times 15) - (75^2 \times 0.2) - (60^2 \times 0.2)\right] = 952.5 \text{ W}$$

$$P_{in,m} = VI_{am} = 250 \times 75 = 18750 \text{ W}$$

Từ pt (7.94):

$$P_{Lm} = (P_{rò} + VI_{fm}) + I_{am}^2 R_{am}$$

$$= \left[952.5 + (250 \times 2)\right] + \left[(75)^2 \times 0.2\right] = 2577.5 \text{ W}$$

Hiệu suất động cơ:

$$\eta_M = \frac{P_{in,m} - P_{Lm}}{P_{in,m}} = \frac{18750 - 2577.5}{18750} = 86.25\%$$

Dùng pt (7.95):

$$P_{Lg} = (P_{rò} + VI_{fg}) + I_{ag}^2 R_{ag}$$
$$= (952.5 + (250 \times 2.5)) + 60^2 \times 0.2 = 2297.5 \text{ W}$$

$$P_{out,g} = VI_{ag} = 250 \times 60 = 15000 \text{ W}$$

$$\eta_G = \frac{P_{out,g}}{P_{out,g} + P_{Lg}} = \frac{15000}{15000 + 2297.5} = 86.7\%$$

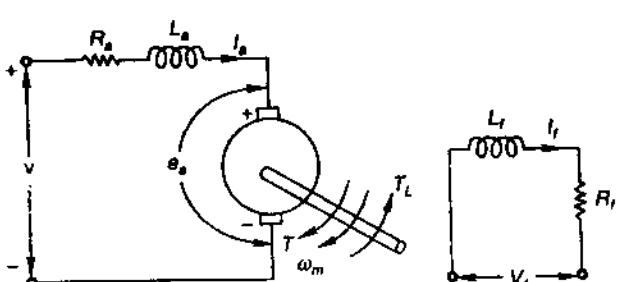
Động lực học máy điện một chiều

Các máy điện dc rất đa dạng và có khả năng cung cấp nhiều loại đặc tuyến V-A và moment - tốc độ bằng các phối hợp thích hợp các cuộn dây kích từ khác nhau. Với các mạch điều khiển điện tử, tốc độ và công suất ra của chúng được điều khiển dễ dàng trên phạm vi rộng, vận hành ở trạng thái ổn định hoặc động. Bằng cách thêm mạch hồi tiếp, các đặc tuyến máy có thể được đều khiển tốt hơn và chính xác hơn. Phần này nghiên cứu các máy điện theo các đặc tuyến động lực học của chúng.

Khảo sát động cơ dc kích thích riêng rẽ được nêu trên Hình 7.68. Để dễ dàng phân tích, có thể giả định như sau:

(i) Trục lực điện động phần ứng cố định trong không gian, dọc theo *trục - q*.

(ii) Bỏ qua hiệu ứng khử từ của phản ứng phần ứng.



Hình 7.68 *Sơ đồ động cơ dc kích thích riêng rẽ và phân tích động lực học.*

(iii) Giả sử mạch từ tuyến tính (không có từ trễ và bão hòa), điện cảm được coi là không đổi.

Hai thông số điện cảm trên Hình 7.68 được xác định như sau:

L_a : Độ tự cảm phần ứng do từ thông trên phần ứng tạo nên có thể bỏ qua mà không gây ra sai số lớn khi phân tích động lực học.

L_f : Độ tự cảm của cuộn kích từ.

Độ hỗ cảm (giữa trường kích thích và phần ứng) = 0 vì chúng thẳng góc với nhau trong không gian. Để dễ dàng phân tích động lực học, có thể dùng đơn vị tốc độ là rad/s thay vì v/ph.

$$v(t) = e_a(t) + L_a \frac{d}{dt} i_a(t) \tag{7.98}$$

Với $$e_a(t) = K_e i_f(t)\omega_m; \quad k = \text{const } (\phi(t) \propto i_f(t)) \tag{7.99}$$

Tương tự, đối với mạch kích thích:

$$v_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{d}{dt} i_f(t) \tag{7.100}$$

Đối với sự vận hành theo chế độ động cơ, phương trình động lực học cho hệ cơ học là:

$$T(t) = K_t i_f(t) i_a(t) = J \frac{d}{dt} \omega_m(t) + T_L(t) + D\omega_m(t) \tag{7.101}$$

J = moment quán tính của động cơ và tải (Nms^2)

D = Hệ số tắt dần, tổn thất moment quay, Nm rad/ s

Sự tích tụ năng lượng liên quan với từ trường do i_f và i_a sinh ra, và với động năng của phần quay. Các phương trình trên là phi tuyến, là tích của các *phương trình trạng thái* $i_f(t)\omega_m$ và $i_f(t)i_a(t)$ với các *biến trạng thái* i_f, i_a, và ω_m, có thể tính nghiệm theo phương pháp số.

Các hàm truyền và sơ đồ khối

Trên khoảng tuyến tính, động cơ đáp ứng theo các thay đổi điện áp phần ứng, giả thiết điện áp trường không đổi và trạng thái ổn định trên mạch từ, tức là I_f = constant, các phương trình (7.98), (7.100) và (7.101) trở thành tuyến tính như sau:

$$v(t) = K_e \omega_m(t) + R_a i_a(t) + L_a \frac{d}{dt} i_a(t) \tag{7.102}$$

$$T(t) = K_t i_a(t) = J\frac{d}{dt}\omega_m(t) + T_L(t) + D\omega_m(t) \qquad (7.103)$$

Các phép biến đổi Laplace (7.102) và (7.103)

$$V(s) = K_e\omega_m(s) + (R_a + sL_a)I_a(s) \qquad (7.104)$$

$$T(s) = K_t I_a(s) = (sJ + D)\omega_m(s) + T_L(s) \qquad (7.105)$$

Các phương trình này được viết lại như sau:

$$I_a(s) = \frac{V(s) - K_e\omega_m(s)}{(R_a + sL_a)} = \left[V(s) - K_e\omega_m(s)\right] \times \frac{\frac{1}{R_a}}{(1 + s\tau_a)} \qquad (7.106)$$

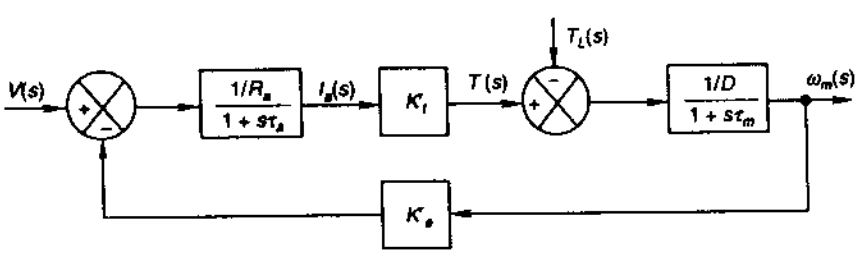
Với $\tau_a = L_a/R_a$. Hằng số thời gian mạch phần ứng

$$\omega_m(s) = \left[T(s) - T_L(s)\right] \times \frac{\frac{1}{D}}{(1 + s\tau_m)} \qquad (7.107)$$

Với $\tau_m = J/D$ là hằng số thời gian cơ học

$$T(s) = K_t I_a(s) \qquad (7.108)$$

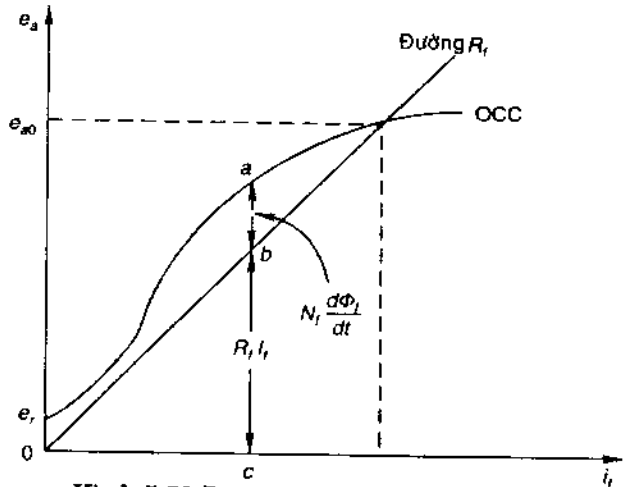
Từ các pt (7.106), (7.108), sơ đồ khối của động cơ có thể vẽ như trên Hình (7.69). Nói chung, đây là hệ thống hồi tiếp bậc hai với đáp ứng dao động, có thể rút gọn thành hệ bậc một, nếu L_a và τ_a là không đáng kể,



Hình 7.69 *Sơ đồ khối của động cơ dc kích thích riêng rẽ, ngõ vào V(s) và $T_L(s)$*

Sự tích tụ điện áp máy phát kích thích song song

Phân tích định tính về quá trình tích tụ điện áp trong máy phát kích thích song song đã được nói đến ở phần giữa chương này. Ở đây sẽ xét về mặt toán học của vấn đề để giải phương trình vi phân phi tuyến.



***Hình 7.70** Đường cong từ hóa và đường R_f*

Từ Hình (7.70), có thể thấy với dòng kích thích bất kỳ, đoạn ab giữa OCC và đường R_f là sụt áp do sự thay đổi của Φ_f và đoạn bc tạo cùng một độ sụt trên điện trở kích từ. Hai sụt áp này làm cân bằng emf e_a (bỏ qua $i_f R_a$, sụt áp phần ứng):

$$N_f \frac{d\Phi_f}{dt} = e_a - R_f i_f \tag{7.109}$$

Trong đó: Φ_f: từ thông/ cực;

N_f : số vòng dây của cuộn kích từ.

Từ thông Φ_f lớn hơn Φ_d của khe hở không khí trên trục đứng do rò rỉ, do đó:

$$\Phi_f = \sigma \Phi_d \tag{7.110}$$

σ: hệ số tiêu tán

Từ pt (7.3):

$$\Phi_d = \frac{e_a}{K_a \omega_m} \tag{7.111}$$

Thay các pt (7.110) và (7.111) vào pt (7.109):

$$\frac{N_f \sigma}{K_a \omega_m} \cdot \frac{de_a}{dt} = e_a - i_f R_f \tag{7.112}$$

Nhân tử và mẫu số cho $N_f\mathcal{P}_{ag}$, với $\mathcal{P}_{ag}$ là độ dẫn từ khe không khí/cực

$$\frac{N_f\sigma}{K_a\omega_m} = \frac{N_f^2\sigma\mathcal{P}_{ag}}{K_a\omega_m\mathcal{P}_{ag}N_f}$$

Dễ dàng nhận thấy tử số là giá trị cảm kháng từ trường chưa bảo hòa, L_f, và mẫu số là độ dốc của đường khe hở không khí. Cả hai đều không đổi:

$$\frac{L_f}{K_g}\frac{de_a}{dt} = e_a - R_f i_f \qquad (7.113)$$

$$dt = \frac{L_f}{K_g}\left(\frac{de_a}{e_a - R_f i_f}\right)$$

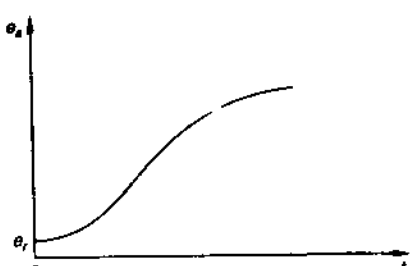
$$t = \frac{L_f}{K_g}\int_{e_r}^{e_a}\frac{de_a}{e_a - R_f i_f} \qquad (7.114)$$

các giới hạn của tích phân là:

e_r = điện áp dư.

e_a = điện áp phát sinh tức thời.

Tích phân này có thể được ước lượng trên đồ thị bằng cách cộng các vùng diện tích trên đường $1/(e_a - R_f i_f)$ theo e_a. Cách này được dùng để vẽ e_a theo thời gian. Thời gian lý thuyết để emf phát sinh đạt tới giá trị không tải, e_{a0} là vô hạn, nên trong thực tế cần thời gian để đạt đến 0.95 e_{a0} được lấy làm thời gian cần để đạt đến e_{a0}. Sự thay đổi của e_a theo thời gian được vẽ theo đồ thị trên Hình 7.71. Đáp ứng chậm vì chỉ các hiệu số điện áp rất nhỏ ($= e_a - R_f i_f$) góp phần tích tụ từ thông (Φ_f).



Hình 7.71 *Tích tụ điện áp trong máy phát kích thích song song*

Động cơ DC kích từ bằng nam châm vĩnh cửu (PMDC)

Nhều vật liệu từ tính vĩnh cửu mới, sứ gốm và vật liệu thuộc họ Lantanides, đã được nghiên cứu trong những năm gần đây. Các vật liệu này có từ thông dư và độ từ giảo cao. Các động cơ dc công suất thấp (dưới 1 mã lực) hiện nay được

chế tạo với các cực nam châm vĩnh cửu. Không cần các cuộn trường, do đó không có sự tổn thất trường liên tục và không có dòng điện kích. Các động cơ PMDC có kích thước gọn hơn động cơ dây quấn với cùng công suất định mức, điều này có thể bù cho chi phí về nam châm vĩnh cửu. Các động cơ này có đặc tính kiểu động cơ kích thích song song và chỉ có thể điều khiển từ phần ứng. Nguy cơ từ tính bị hủy hoại do phản ứng phần ứng (khi khởi động)/đảo chiều hoặc quá tải) giảm rõ rệt khi sử dụng các vật liệu từ tính vĩnh cửu mới.

Các ứng dụng máy điện DC

Mỗi khi xét đến việc sử dụng máy điện bất kỳ, cần tính đến các đặc tính vận hành, tính kinh tế và bảo dưỡng kỹ thuật,... Máy dc có ưu điểm về tính linh hoạt, đa năng, và dễ điều khiển. Ngày nay, trong công nghiệp sử dụng khoảng 25% động cơ dc.

Với sự phát triển của các linh kiện điện tử công suất, tầm quan trọng của máy phát dc ngày càng giảm. Các bộ chỉnh lưu SCR và nhiều loại linh kiện điện tử công suất khác, có nhiều ưu điểm so với máy phát dc về chi phí, gọn nhẹ, vận hành hầu như không có tiếng ồn,... Tuy nhiên, một số ứng dụng quan trọng của máy phát dc bao gồm vận tốc kế, máy hàn dc, hệ thống điều khiển vòng kín, ... Các máy phát dc kích thích riêng rẽ vẫn được dùng để điều khiển điện áp với khoảng rộng, chẳng hạn trong hệ thống điều khiển tốc độ Ward-leonard.

Trong động cơ dc nối tiếp, moment khởi động rất cao, gấp năm lần moment tải toàn phần. Moment của động cơ dc bị giới hạn do góp điện thay vì do nhiệt như các động cơ khác. Sự điều chỉnh tốc độ của động cơ dc nối tiếp có thể biến thiên trong khoảng rộng. Đối với các truyền động đòi hỏi moment khởi động cao, chẳng hạn các tái kéo, cần trục, tời nâng, ... thường sử dụng động cơ dc nối tiếp, với sự điều khiển tốc độ được thực hiện bằng cách điều chỉnh điện trở phần ứng.

Đặc tính của động cơ hỗn hợp phụ thuộc mức độ hỗn hợp. Trường song song giới hạn tốc độ không tải theo gía trị an toàn. Loại động cơ này có moment tải cao hơn động cơ kích thích song song. Động cơ dc kích tích song song được dùng với các tải xung, chẳng hạn bơm piston, băng tải, máy đột dập, tời nâng, dàn cán kim loại, máy phay v.v...

Động cơ kích thích mạch rẽ có moment khởi động trung bình. Sự điều khiển tốc độ khoảng 5-15%, thường được dùng cho các ứng dụng đòi hỏi moment khởi động trung bình, chẳng hạn bơm ly tâm, quạt, máy công cụ, máy in,... Đặc tính nổi bật của động cơ dc kích thích mạch rẽ là điều khiển tốc độ linh hoạt trên khoảng rộng, cao hơn và thấp hơn tốc độ cơ sở bằng cách dùng các bộ chỉnh lưu điện tử

Chương 8

Máy điện đồng bộ

Giới thiệu

Máy điện đồng bộ là loại máy điện quan trọng; hầu như mọi máy phát điện ở các nhà máy điện đều là *máy phát điện đồng bộ* (máy phát điện xoay chiều).

Trong Chương 5 đã trình bày cấu trúc và các tính năng vận hành của máy điện đồng bộ, Chương 6 trình bày chi tiết các cuộn dây quấn điện xoay chiều 3 pha. Trong Chương này, mô hình cơ bản được dùng để phân tích hiệu suất và các tính năng vận hành của máy điện đồng bộ, đồng thời trình bày các phương pháp xác định các thông số mô hình, các đặc tính hoạt động và các đặc tính truyền dẫn công suất của loại máy này.

Máy điện đồng bộ được chia thành hai nhóm cấu trúc::

- *Máy điện rotor ẩn (cực ẩn):* Rotor hình trụ với các cuộn dây trường dc được quấn chìm trong các rãnh rotor, độ bền cơ học lớn hơn và cân bằng động chính xác hơn, dùng trong máy phát điện tuốc - bin có rotor dài và đường kính nhỏ (giới hạn lực ly tâm). Cấu trúc loại máy này thường gồm hai hoặc bốn cực.
- *Máy điện rotor lồi (cực lồi):* Các cực rotor lồi ra khỏi lõi rotor, được dùng làm máy phát thủy điện có tốc độ thấp, với số cực từ lớn. Rotor loại này có đường kính lớn, chiều dài nhỏ. Cấu trúc này thường dùng trong động cơ đồng bộ.

Do các cấu trúc nêu trên, máy điện rotor ẩn có khe hở không khí đồng nhất, nên lực từ đồng tác động lên mạch từ độc lập với góc giữa trục lực từ động và các cực rotor; máy điện rotor lồi có lực từ động biến thiên phụ thuộc vào góc giữa trục lực từ động và các cực rotor, do đó việc lập mô hình và phân tích máy điện rotor ẩn dễ hơn so với máy điện rotor lồi.

Máy điện đồng bộ có liên kết đồng bộ từ trường quay giữa stator và rotor, đây là đặc điểm chính để phân biệt với các loại máy điện khác.

Vận tốc quay rotor n_s, tần số lực điện động f và dòng điện trên stator có quan hệ ổn định theo công thức:

$$f = \frac{Pn_s}{120} \quad (8.1)$$

với P = số cực từ

ns = tốc độ rotor (tốc độ đồng bộ) v/ph

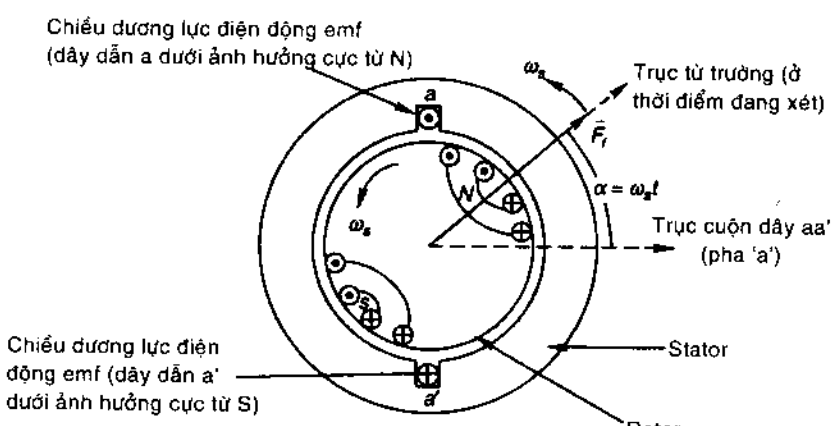
Máy phát điện đồng bộ khi cung cấp cho tải độc lập, sẽ vận hành như nguồn điện áp có tần số xác định theo vận tốc quay ban đầu như pt (8.1). Các máy phát điện đồng bộ thường ghép song song trên đường truyền rất dài, chúng được thiết kế để duy trì sự đồng bộ khi bị nhiễu điện hoặc rối loạn cơ khí, bảo đảm cung cấp điện liên tục và có giá trị kinh tế.

Động cơ điện đồng bộ dùng trong công nghiệp khi cần sự vận hành với vận tốc không đổi. Ưu điểm của động cơ đồng bộ là hệ số công suất được điều khiển một cách đơn giản bằng cách thay đổi dòng điện trường. Đây là lý do trong các cơ sở công nghiệp lớn, một phần tải thường được điều khiển bằng các động cơ đồng bộ, vận hành với hệ số công suất sớm pha để có hệ số công suất cao trong toàn bộ cơ sở công nghiệp đó.

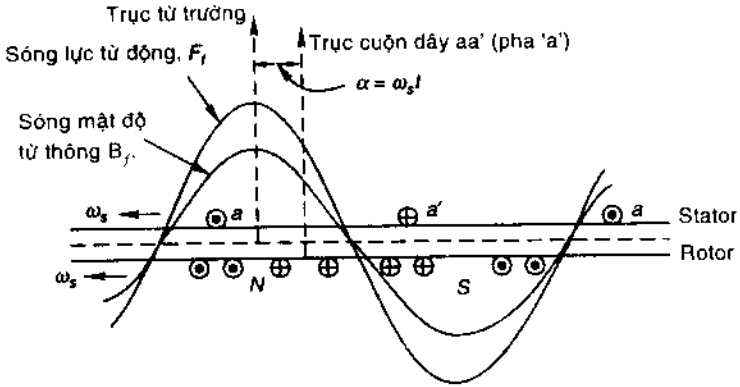
Mô hình máy điện đồng bộ cơ bản

* Tổng quát:

Hình 8.1 minh họa tiết diện máy điện đồng bộ rotor ẩn 2-cực. Khi rotor quay với vận tốc ω_s, các cuộn dây trong rotor tạo ra sóng lực từ động F_f quay trong



Hình 8.1 Máy điện rotor ẩn



Hình 8.2 *Sơ đồ phát triển lực từ động, mật độ từ thông trong khe hở không khí và cuộn dây aa' trong stator*

không gian, có dạng sóng gần như hình sine, với vận tốc đồng bộ $\omega_s$rad/ s (n_s vòng/phút). Trên Hình 8.1, F_f ở vị trí góc $\alpha = \omega_s t$ so với trục cuộn dây aa' (aa' là pha a trên stator). Do khe hở không khí đồng đều, nên F_f tạo ra sóng mật độ từ thông B_f dạng sine đồng pha với F_f. Hình 8.2 là quan hệ không gian pha của F_f và B_f ở vận tốc đồng bộ ω_s. Giá trị đỉnh của $\vec{F}_f$ là F_f. Sóng B_f tạo ra từ thông ϕ (trên mỗi cực từ), liên kết với cuộn dây aa'. ϕ cũng biến thiên hình sine có giá trị cực đại là Φ_f, biểu hiện bằng pha thời gian $\vec{F}_f$ (là pha từ thông) và có biểu thức:

$$\phi = \Phi_f \cos\omega_s t \; ; \quad \text{với } \omega_s = 2\pi f \tag{8.2}$$

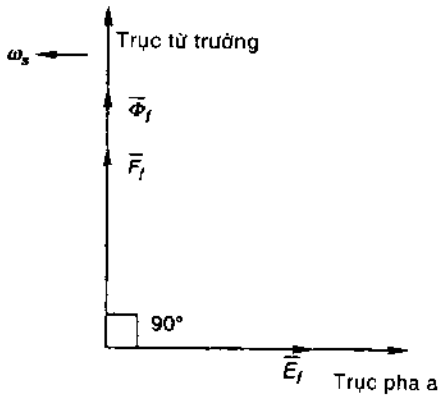
Xét $\vec{F}_f$ và $\vec{\Phi}_f$ đi xuyên qua cuộn dây aa' trên stator. Khi $\vec{F}_f$ ở vị trí trùng với trục cuộn dây aa' (trên stator), $\vec{F}_f$ có giá trị dương cực đại F_f, và $\vec{\Phi}_f$ cũng có giá trị dương cực đại Φ_f. Khi $\vec{F}_f$ quay, pha thời gian $\vec{\Phi}_f$ đồng pha với $\vec{F}_f$ (Hình 8.3). Quan hệ giữa $\vec{\Phi}_f$ và $\vec{F}_f$ bị chi phối bởi đường cong từ hóa. Quan hệ này tuyến tính nếu lõi sắt giả thiết có độ dẫn từ vô tận. Trong trường hợp này:

$$\Phi_f = \mathcal{P} F_f$$

với $\quad \mathcal{P}$ = độ dẫn từ trên cực (xem pt (5.59))

Theo định luật Faraday, lực điện động cảm ứng trong cuộn dây aa' có N vòng là:

$$e_{af} = -N\frac{d\lambda}{dt} = -N\frac{d}{dt}(\Phi_f \cos\omega_s t) = N\omega_s\Phi_f \sin\omega_s t \tag{8.3}$$



***Hình 8.3**. Sơ đồ pha*

Chiều dương của lực điện động được vẽ trên cuộn dây aa' (Hình 8.1 và 8.2). Lực điện động e_{af} có pha thời gian $\overline{E}_f$ chậm pha hơn $\overline{F}_f$ và $\overline{\Phi}_f$ một góc 90^0 (suy từ pt (8.2) và (8.3)).

Hình 8.3 (lấy trục cuộn dây aa' làm chuẩn) được vẽ tại thời điểm lực điện động emf trên cuộn dây aa' đạt giá trị cực đại và pha $\overline{E}_f$ ở trên trục pha, lúc đó trục từ trường rotor sớm pha 90^0 và là trục thẳng đứng.

Từ pt (8.3) giá trị hiệu dụng lực điện động cảm ứng trong cuộn dây aa' là:

$$E_f = \sqrt{2}\pi f N \Phi_f \qquad (8.4)$$

Với $\Phi_f = \Phi_f(F_f)$ hay $\Phi_f(I_f)$ từ thông/ cực (8.5)

I_f dòng điện dc trong trường rotor

Phương trình (8.5) giữa từ thông/cực và dòng điện trường I_f thực chất là đặc tính từ hóa.

Phương trình (8.4) có thể viết dưới dạng:

$$E_f = \sqrt{2}\pi K_w f N_{ph} \Phi_f \qquad (8.6)$$

Đây là lực điện động cảm ứng trên pha a ở stator, còn lực điện động cảm ứng trên các pha khác ở stator có độ lệch thời gian pha là 120^0.

* Phân tích chi tiết:

Trong máy điện đồng bộ rotor ẩn, từ phía stator có thể xem vector lực từ động quay là pha lực từ động cùng pha với pha từ thông và sớm pha 90^0 so với pha lực điện động cảm ứng (Hình 8.3)

Khi các vòng dây 3 pha stator cung cấp tải cân bằng, sẽ tự cảm vector lực từ động $\dot{F}_{ar}$ (dạng hàm sine phân bố trong không gian), được gọi là phản ứng phần ứng, quay với vận tốc đồng bộ và có chiều như rotor. Mạch từ bây giờ gồm hai vector lực từ động quay $\dot{F}_f$ và $\dot{F}_{ar}$; cả hai quay theo vận tốc đồng bộ và lệch nhau một góc xác định.

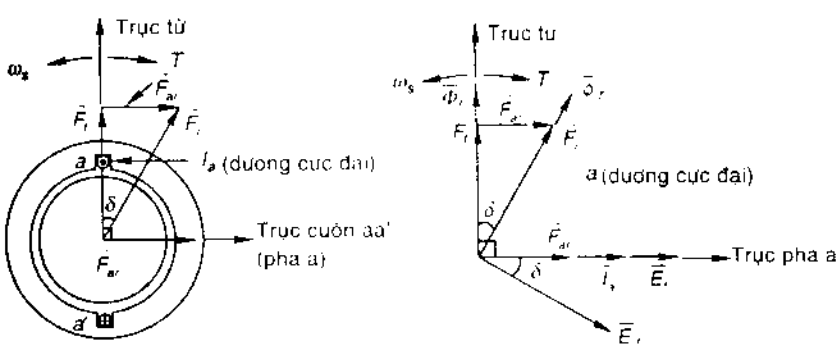
(i) Lực điện động và dòng điện có cùng chiều dương: dòng điện I_a trong cuộn dây aa' cùng pha với lực điện động cuộn dây E_a, nghĩa là chúng có giá trị cực đại vào cùng thời điểm. Lực điện động trong cuộn dây aa' đạt cực đại khi vector trường lực từ động $\dot{F}_f$ sớm pha 90^0 so với trục cuộn dây (theo chiều quay) (Hình 8.4 (a)). Đồng thời F_{ar} có chiều là trục cuộn dây aa' và dòng điện dương cực đại cũng ở thời điểm này. $\dot{F}_f$ sớm pha hơn $\dot{F}_{ar}$ 90^0 trong khi E_a và I_a cùng pha. Vector tổng hợp lực từ động là:

$$\dot{F}_r = \dot{F}_f + \dot{F}_{ar} \qquad (8.7)$$

$\dot{F}_r$ chậm pha hơn $\dot{F}_f$ theo góc δ. Hình 8.4 b là sơ đồ pha tương ứng. Phương trình pha tương ứng với phương trình vector (8.7) là:

$$\overline{F}_r = \overline{F}_f + \overline{F}_{ar} (\overline{F}_r \text{ trễ pha hơn } \overline{F}_f \text{ theo góc } \delta) \qquad (8.8)$$

Từ sơ đồ pha: $\overline{I}_a$ và $\overline{F}_{ar}$ cùng pha (vì $\overline{I}_a$ tạo ra $\overline{F}_{ra}$), và tỷ lệ với nhau. $\overline{F}_r$ (vector lực từ động tổng hợp) tạo ra pha từ thông $\overline{\Phi}_r$ trong khi $\overline{E}_r$ trễ pha 90^0 so với $\overline{F}_r$. Pha $\overline{E}_L$ (cảm ứng trong máy điện) gọi là *lực điện động khe hở không khí*, trễ pha hơn $\overline{E}_f$ theo góc δ (bằng góc trễ pha của $\overline{F}_r$ so với $\overline{E}_f$, hay của $\overline{F}_r$ so với $\overline{F}_f$) như sơ đồ pha trên Hình 8.4b. $\overline{E}_f$ là lực điện động kích thích.



(a) Sơ đồ vector lực từ động (b) Sơ đồ pha

Hình 8.4 *Máy điện đồng bộ có tải* $\overline{I}_a$ *cùng pha với* $\overline{E}_f$

(ii) Trong trường hợp $\overline{I}_a$ trễ pha hơn $\overline{E}_f$ theo góc ψ, $\overline{F}_f$ sớm pha hơn $\overline{F}_{ar}$ theo góc $(90^0 + \psi)$. Góc pha θ giữa $\overline{E}_r$ và $\overline{I}_a$ là *hệ số công suất*. Giả sử phần ứng có điện trở và điện kháng rò bằng zero, điện áp đầu ra máy điện là:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r$$

Từ Hình 8.5, vị trí các cực từ sớm hơn sóng lực từ động tổng hợp $\overline{F}_r$ (hay từ thông tổng hợp (r)) theo góc δ, do đó, hình thành moment điện từ.

(iii) Moment điện từ trong máy điện đồng bộ: Moment điện từ xuất hiện trong máy điện nhằm đưa các cực từ và trường tổng hợp thẳng hàng với nhau (Hình 8.5). Moment này ngược với chiều quay rotor. Các cực từ trường trên rotor bị từ thông tổng hợp kéo chạy chậm lại, kết quả là cơ năng chuyển thành điện năng.

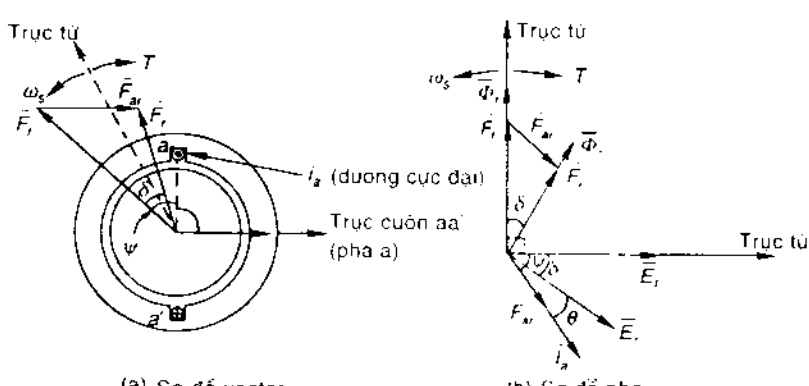
Nếu giả sử mạch từ tuyến tính, moment được tính theo công thức:

$$T = \frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r F_f \sin\delta \qquad (8.9)$$

Với Φ_r = từ thông tổng hợp/cực

F_f = giá trị đỉnh của trường ampere vòng

δ = góc giữa $\overline{F}_f$ và $\overline{F}_r$ ($\overline{F}_f$ sớm pha hơn $\overline{F}_r$ theo góc δ)



Hình 8.5. *Máy đồng bộ với tải (phát điện) $\overline{I}_a$ trễ pha $\overline{E}_f$ theo góc ψ*

Khi F_f và Φ_r không đổi, có thể điều chỉnh góc δ để có moment tải (công suất tải) phù hợp. Góc σ là góc moment (hay góc công suất) (Moment và công suất tỷ lệ với nhau khi máy điện đồng bộ vận hành ổn định).

Biểu thức (8.9) có thể viết theo các đại lượng điện áp:

$$T = KE_rE_f \sin\delta \qquad (8.10)$$

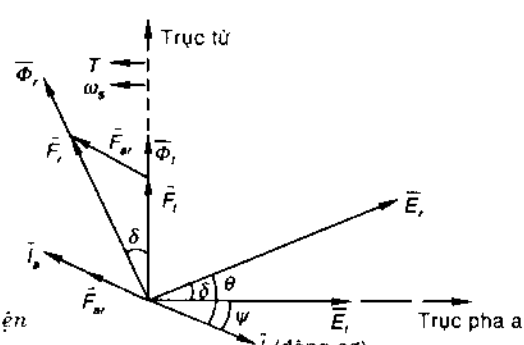
Với K = hằng số.

E_r = lực điện động cảm ứng trong máy điện có tải, là lực điện động khe hở không khí.

E_f = lực điện động cảm ứng được tạo từ lực từ động F_f khi máy điện không tải, là lực điện động kích thích.

Trong *động cơ điện đồng bộ*, dòng điện dương chạy ngược chiều với lực điện động cảm ứng (trong máy phát điện, dòng điện cùng chiều với lực điện động cảm ứng), nên pha phản ứng phần ứng $\overline{F}_{ar}$ có chiều ngược lại. Hình 8.6 là sơ đồ pha của động cơ với $\overline{F}_f$ và $\overline{E}_f$ chậm pha hơn $\overline{F}_r$ và $\overline{E}_r$ theo góc δ. Moment điện từ tác động lên các cực từ làm quay rotor (theo chiều moment) tạo công suất cơ đầu ra

Nếu điện áp $\overline{V}_t = \overline{E}_r$ và tần số không đổi từ nguồn 3 pha bên ngoài, được gọi là thanh cái vô hạn, thì máy điện hoạt động theo kiểu phát điện hay động cơ phụ thuộc vào điều kiện cơ khí trên trục rotor. Khi máy điện không tải, dòng stator bằng zero, được gọi là thanh cái không gánh tải (thả nổi thanh cái), lúc đó rotor chạy ở vận tốc đồng bộ do tác động bên ngoài (tác nhân ban đầu). Nếu công suất cơ (tác nhân ban đầu) gia tăng, các cực từ rotor chuyển động đi trước, gây ra dòng điện dẫn trong thanh cái. Ở điều kiện ổn định, các cực từ trường chuyển động đi trước sóng từ thông hỗn hợp theo góc δ (Hình 8.4, 8.5).



Hình 8.6 *Động cơ điện đồng bộ có tải*

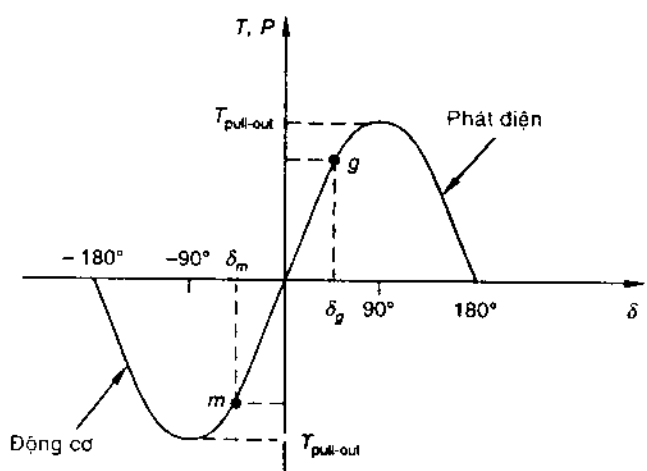
tạo ra moment điện từ ngược chiều với chiều quay rotor. Giá trị δ phụ thuộc sự cân bằng moment (hoặc công suất, $P = T\omega_s$). Công suất điện ngõ ra là:

$$3V_t\ (= E_r).I_a \cos\theta \qquad \text{(đối với 3 pha)}$$

Công suất điện ra cân bằng với công cơ học ở đầu vào (do tác nhân ban đầu) vì không có tổn thất trong stator (giả định điện trở là 0). Ở đây dòng điện phát I_a là dương cùng chiều với lực điện động cảm ứng E_r của máy điện.

Nếu là động cơ với trục cơ khí (rotor) không có tải (Hình 8.3), các cực từ chậm pha hơn từ thông tổng hợp (Hình 8.6), moment điện từ tạo ra cùng chiều quay với công cơ ở đầu ra. Công suất điện đầu vào là $3V_t\ (= E_r).I_a \cos\theta$, và I_a là dòng điện động cơ có chiều dương ngược chiều với chiều dương E_r.

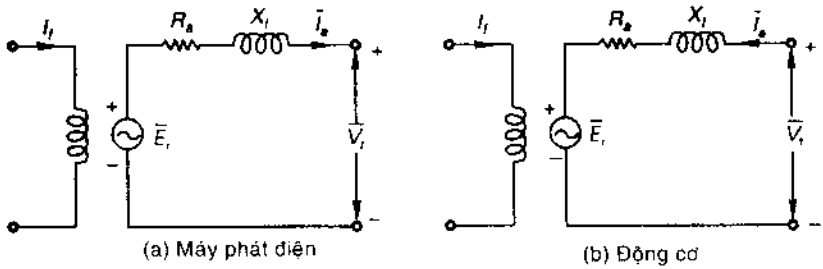
Quan hệ góc - moment (công suất) ở pt (8.10) (với E_f, $E_r(= V_t)$ cố định) (Hình 8.7), δ dương đối với vận hành máy phát và δ âm đối với vận hành động cơ. Các điểm *g* (vận hành máy phát) và *m* (vận hành động cơ) tương ứng với điều kiện tải. Trên đặc tuyến này, máy phát và động cơ đều có moment cực đại ở $\delta = 90^0$. Ở điểm này liên kết đồng bộ giữa các cực từ và từ thông tổng hợp bị lệch và máy điện mất đồng bộ, moment trung bình bằng zero và công suất điện trung bình dẫn đến thanh cái (đối với máy phát) và từ thanh cái đến động cơ giảm xuống zero. Máy phát bị tăng tốc và vượt quá tốc độ, còn động cơ giảm tốc và dừng lại.



Hình 8.7 *Đặc tuyến T - δ của máy điện đồng bộ*

Máy điện thực tế

Máy điện thực tế có điện trở r_a và điện kháng rò x_1 trên mỗi pha phần ứng, có thể giả thiết mắc nối tiếp giữa điện áp V_t và lực điện động khe hở không khí E_r trên mỗi pha máy điện. Sơ đồ mạch điện trên mỗi pha cơ bản được nêu trên Hình 8.8(a) (máy phát điện), có dòng điện phần ứng cùng chiều với E_r.



***Hình 8.8**. Chế độ hoạt động của máy điện đồng bộ.*

Từ Hình 8.8a với chế độ máy phát điện:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r - \overline{I}_a(R_a + jX_l) \tag{8.11}$$

Từ Hình 8.8b, với chế độ động cơ:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r + \overline{I}_a(R_a + jX_l) \tag{8.12}$$

Điện trở của phần ứng máy điện đồng bộ thường rất nhỏ, có thể bỏ qua khi phân tích.

Ổn định điện áp

Ổn định điện áp xác định tương tự như máy biến áp. Xét máy điện cấp dòng đủ tải ở hệ số công suất xác định và điện áp định mức V_t. Không gắn tải để giữa dòng điện trường không đổi, điện áp định mức là:

$$V_t(\text{không tải})\Big|_{\substack{I_f \text{ hằng số} \\ \text{hệ số công suất} \\ \text{xác định khi đủ tải}}} = E_f, \text{ lực điện động kích thích}$$

Ổn định điện áp (%) xác định theo công thức:

$$\frac{E_f - V_t(\text{định mức})}{V_t(\text{định mức})} \times 100\%\Big|_{\text{hệ số công suất xác định}} \tag{8.13}$$

Mô hình mạch máy điện đồng bộ

Giả sử mạch từ tuyến tính, máy điện đồng bộ có thể được biểu thị bằng mô hình mạch đơn giản, điều này do khe hở không khí là thành phần chính của mạch từ.

Từ pt (8.7), pha lực từ động tổng hợp F_r:

$$\overline{F}_r = \overline{F}_f + \overline{F}_{ar} \tag{8.14}$$

Từ thông tổng hợp Φ_r và lực điện động khe hở không khí $\overline{E}_r$ nói chung là do F_r tạo ra. Giả sử mạch từ tuyến tính ($\Phi = \mathcal{P}F$, với $\mathcal{P}$ = từ dẫn không đổi), từ thông tổng hợp là:

$$\overline{\Phi}_r = \overline{\Phi}_f + \overline{\Phi}_{ar} \tag{8.15}$$

với $\overline{\Phi}_f$ = từ thông được tạo ra do tác động độc lập của $\overline{F}_f$

$\overline{\Phi}_{ar}$ = từ thông được tạo ra do tác động độc lập của $\overline{F}_{ar}$

Lực điện động cảm ứng tỷ lệ với từ thông/cực (pt 8.6) và trễ pha theo góc 90^0

Từ pt 8.15 suy ra phương trình pha lực điện động:

$$\overline{E}_r = \overline{E}_f + \overline{E}_{ar} \tag{8.16}$$

Với $\overline{E}_f$ = lực điện động cảm ứng (lực điện động kích thích) do tác động của $\overline{\Phi}_f$

$\overline{E}_{ar}$ = lực điện động cảm ứng hình thành do tác động của $\overline{\Phi}_{ar}$

Phương trình 18.5, 18.6 được biểu diễn bằng sơ đồ pha trên Hình 8.9. Tam giác pha từ thông và tam giác pha lực điện động tương tự nhau. Các đại lượng Φ nhanh pha hơn các đại lượng E tương ứng là 90^0:

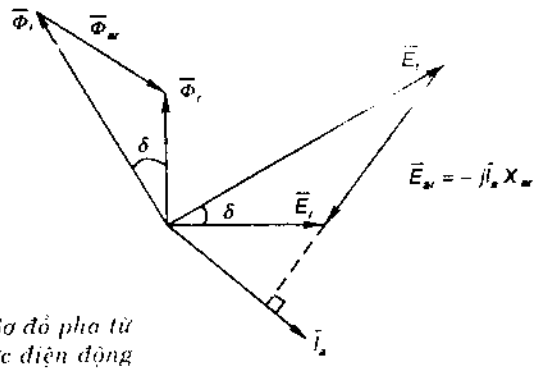
$$\overline{E}_{ar} = -j\overline{I}_a X_{ar} \tag{8.17}$$

Với X_{ar} = hằng số tỷ lệ (điện kháng cảm ứng)

Phương trình 8.16 có thể viết :

$$\overline{E}_r = \overline{E}_f - j\overline{I}_a X_{ar} \tag{8.18}$$

Trong các pt (8.15), (8.16), và (8.18), điện kháng X_{ar} thay thế tương đương hiệu ứng của từ thông phản kháng của phần ứng. Với điện áp và dòng điện có thể không cần biểu diễn từ thông trên sơ đồ pha.



Hình 8.9 *Sơ đồ pha từ thông và lực điện động*

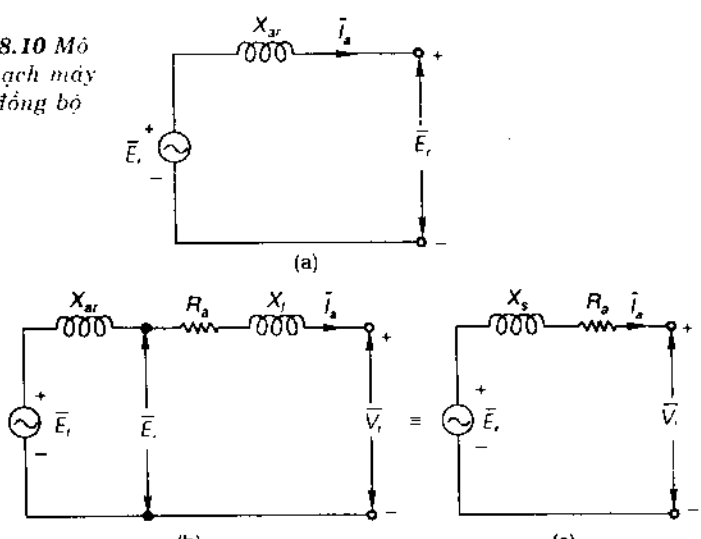
Hiệu ứng của R_a (điện trở phần ứng) và X_l (điện kháng rò) trong phương trình pha (8.11)

$$\overline{V}_t = \overline{E}_f - \overline{I}_a(R_a + jX_l) \tag{8.19}$$

Phương trình (8.19) và Hình 8.10 minh họa mô hình mạch hoàn chỉnh. Hình 8.10(c) có dạng đơn giản hơn với điện kháng nối tiếp được cộng lại:

$$X_s = X_{ar} + X_l \text{ (trên một pha)} \tag{8.20}$$

Hình 8.10 *Mô hình mạch máy điện đồng bộ*



X_s: *điện kháng đồng bộ* của máy điện, *trở kháng đồng bộ* của máy điện là:

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \tag{8.21}$$

X_s cho phép tính toán từ thông rò được sinh ra do dòng điện 3-pha cân bằng ở stator. Lực điện động kích thích E_f được dùng để tính từ thông do từ trường rotor tạo ra (do dòng dc kích thích I_f tạo nên). Nếu ngắt tải khỏi máy điện, E_f là điện áp *hở mạch* của máy điện. Với Hình 8.10c), E_f còn được gọi là điện áp phía sau trở kháng (hay điện kháng) đồng bộ (vì R_a có thể bỏ qua).

Chú ý: mỗi trở kháng đồng bộ ở đây dựa vào giả thiết tuyến tính và hoạt động máy điện không trong vùng bão hòa và chỉ phù hợp với máy điện rotor ẩn.

Khoảng trở kháng đồng bộ

Điện kháng đồng bộ được biểu thị theo hệ thống đơn vị pu, thường có khoảng giá trị hẹp. Dữ liệu từ thực nghiệm cho biết R_a(điện trở phần ứng) là 0.01pu, nghĩa là với dòng điện phần ứng định mức sụt áp trên R_a khoảng 1% điện áp định mức. Dải giá trị trở kháng 0.1 - 0.2 pu và điện kháng đồng bộ ($X_s = X_{ar} + X_l$) khoảng 1.0 - 2 pu. Có thể bỏ qua điện trở phần ứng, chỉ sử dụng khi tính toán tổn thất, hiệu suất và nhiệt độ phát sinh. R_a phải nhỏ để giảm tổn thất I^2R, hạn chế nhiệt phát sinh và X_s lớn để hạn chế dòng điện trong các điều kiện sự cố (ngắn mạch).

Tuy nhiên, máy điện đồng bộ hiện đại được thiết kế với khoảng giá trị điện kháng đồng bộ trung bình, do có bộ ngắt mạch tác động nhanh dùng để ngắt mạch máy điện khỏi đường dây có sự cố.

Xác định điện kháng đồng bộ

Với giả thiết mạch từ tuyến tính, từ Hình 8.10c, nếu bỏ qua R_a:

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + j\overline{I}_a X_s \tag{8.22}$$

Từ pt (8.22) và dòng điện trường cho trước trong điều kiện ngắn mạch ($I_a = I_{SC}$, $V_t = 0$)

$$X_s = \frac{\overline{E}_f}{I_{SC}} \tag{8.23}$$

Nhưng $E_f = V_{OC}$ (điện áp hở mạch; $I_a = 0$ với cùng dòng điện trường):

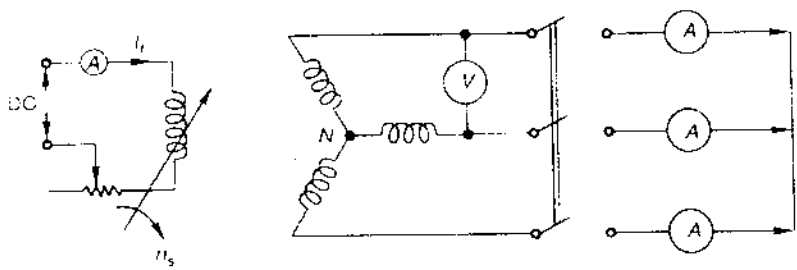
$$X_s = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}\bigg|_{I_f\text{ hằng số}} \tag{8.24}$$

Với V_{OC} (điện áp hở mạch) và I_{SC} (dòng ngắn mạch) trên mỗi pha cơ bản có cùng dòng điện trường.

Vì đặc tuyến từ hóa không tuyến tính, nên cần xác định đặc tuyến hở mạch hoàn chỉnh của máy điện (quan hệ V_{OC} - I_f). Tuy nhiên, trong thực tế chỉ cần xác định một điểm trên đặc tuyến ngắn mạch (quan hệ I_{SC} - I_f) trong dải tuyến tính (I_{SC} đến 150% dòng định mức).

Đặc tuyến hở mạch (OCC)

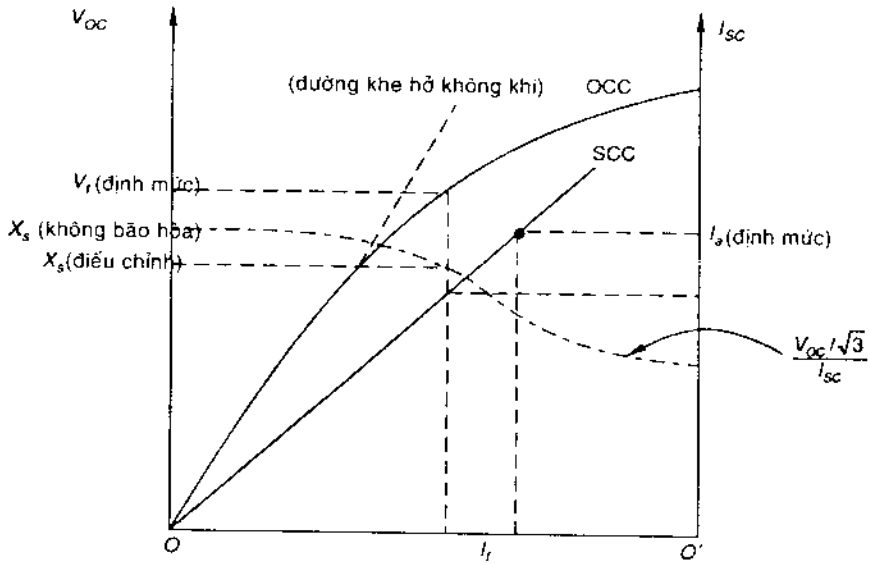
Máy điện chạy ở vận tốc đồng bộ n_s phát ra điện áp có tần số định mức, trong khi hai đầu phần ứng hở mạch (Hình 8.11 với cầu dao S để hở). Số đo điện áp dây hở mạch (phần ứng) $V_{OC} = \sqrt{3}\,E_f$ khi I_f thay đổi (I_f = dòng điện tạo từ trường rotor). Các dữ liệu này được biểu thị bằng đường nét đứt trên Hình 8.12, là đặc tuyến từ hóa, gồm thành phần cơ bản của từ thông trong khe hở không khí và lực từ động/ cực tác động lên mạch từ (giả sử bỏ qua sóng hài trong không khí).



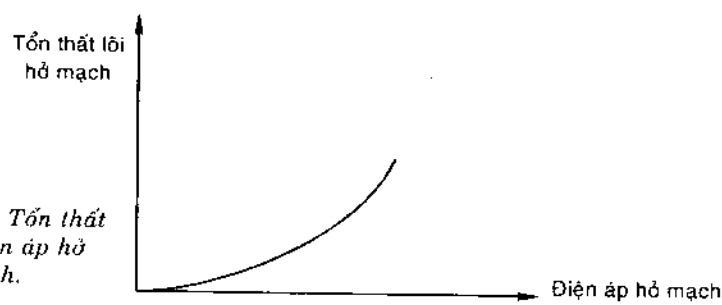
Hình 8.11 *Sơ đồ thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch*

Đặc tuyến hở mạch biểu thị hiện tượng bão hòa của sắt trong máy điện. Ở giá trị I_f thấp với sắt trong trạng thái bão hòa, đặc tuyến hở mạch hầu như tuyến tính và hình thành lực từ động để thiết lập từ thông trong khe hở không khí bỏ qua từ trở của sắt (quá nhỏ). Phần đường thẳng của đặc tuyến hở mạch, được kéo dài bằng đường nét đứt (Hình 8.12), là *đường khe hở không khí*; đó là đường đặc tuyến hở mạch thật sự nếu sắt không bão hòa.

Thí nghiệm hở mạch với điện áp định mức cho kết quả tổn thất máy điện không đổi, gồm tổn thất lõi không tải và tổn thất cơ khí (quạt gió, ma sát). Công suất tổn thất này được vẽ với tác nhân ban đầu làm máy điện chạy và được đo bằng động lực kế hay moment kế. Hai thành phần này dễ thực hiện khi chạy máy điện ở vận tốc đồng bộ dưới trạng thái không kích thích. Tổn



Hình 8.12 *Đặc tuyến hở mạch và ngắn mạch*



Hình 8.13. *Tổn thất lõi và điện áp hở mạch.*

thất lõi (gồm tổn thất từ trễ và dòng điện xoáy) thay đổi theo bình phương và bằng 1.6% công suất điện áp hở mạch. Hình 8.13 là đường tổn thất lõi theo điện áp hở mạch.

Đặc tuyến ngắn mạch (SCC)

Thí nghiệm ngắn mạch theo sơ đồ trên Hình 8.11 (cầu dao S đóng) sẽ cho kết quả đặc tuyến ngắn mạch. Khi rotor chạy đến vận tốc đồng bộ, n_s, từ trường rotor mới bắt đầu được kích thích, tăng dần cho đến khi dòng điện

phần ứng đạt 150% giá trị dòng định mức. Dòng điện ngắn mạch I_{SC} trên mỗi pha phải lấy giá trị trung bình ba số đo trên ampere kế ở ba pha.

Chú ý, máy điện không thể ngắn mạch trong các điều kiện kích thích với điện áp gần giá trị định mức, vì dòng điện dịch chuyển quá lớn làm hỏng máy điện

Hình 8.14a trình bày mô hình mạch máy điện ở điều kiện ngắn mạch và sơ đồ pha tương ứng trên Hình 8.14b với $R_a = 0$. Giả sử mạch phần ứng thuần điện kháng, dòng ngắn mạch chậm pha 90° so với điện áp khe hở không khí $\overline{E}_r$, và pha $\overline{F}_{ar}$ (lực từ động phản kháng phần ứng), nghịch pha với $\overline{F}_f$ (lực từ động kích thích), nghĩa là phản ứng phần ứng là hiệu ứng khử từ.

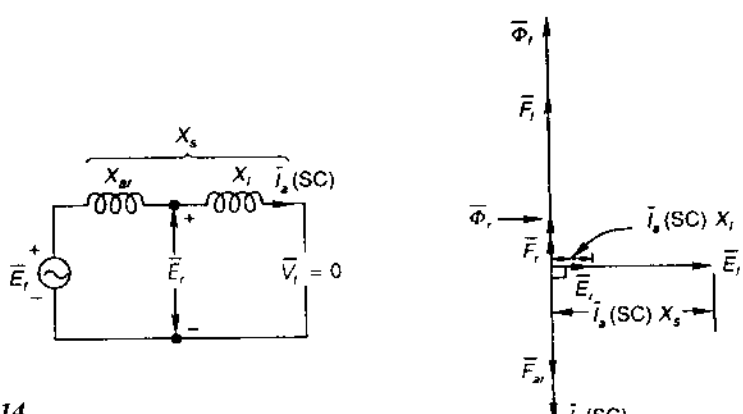
Điện áp khe hở không khí $\overline{E}_r$ liên hệ với I_{sc} theo công thức:

$$E_r = I_a\,(SC)\,X_l \qquad (8.24)$$

Điện kháng rò X_l khoảng 0.1 - 0.2 pu (trong khi điện kháng nối tiếp X_s đến 1.0 pu) nên E_r rất nhỏ kể cả khi E_f gần sát giá trị định mức của máy điện.

Trong điều kiện ngắn mạch với dòng phần ứng bằng 150% giá trị định mức, từ thông tổng hợp trong khe hở không khí nhỏ và máy điện hoạt động trong điều kiện từ hóa không bão hòa có đặc tuyến ngắn mạch (I_{SC} theo I_f) tuyến tính, chỉ cần một số đo SCC là vẽ được đặc tuyến ngắn mạch (Hình 8.12).

Trong điều kiện ngắn mạch, máy điện kích thích không cao, chỉ có các tổn thất cơ khí và tổn thất đồng trong điện trở phần ứng, còn tổn thất sắt không đáng kể.



Hình 8.14
Thí nghiệm ngắn mạch

(a) Mô hình mạch

(b) Sơ đồ pha

Điện kháng đồng bộ không bão hòa được tính từ đặc tuyến hở mạch và đặc tuyến ngắn mạch (Hình 8.12):

$$X_s(\text{không bão hòa}) = \frac{V_{OC}/\sqrt{3}}{I_{SC}}\Bigg|_{I_f = \text{hằng số}} \qquad (8.25)$$

Với I_f tương ứng vùng không bão hòa từ.

V_{OC} tương ứng với đường khe hở không khí.

Khi máy điện đồng bộ vận hành trong vùng đặc tuyến từ hóa bão hòa, chế độ làm việc của máy điện được tính từ X_s, sẽ khác với hiệu ứng giá trị thật khi vận hành bình thường. Để tính toán máy điện hoạt động thực trong vùng bão hòa, phải chú ý phân tích phần phi tuyến hoặc phải điều chỉnh X_s theo giá trị phù hợp.

Nếu X_s được xác định theo phương trình 8.25 là đường cong nét đứt (các giá trị biến đổi theo dòng điện trường) trên Hình 8.12, trong vùng không bão hòa, giá trị điện kháng đồng bộ có giá trị không đổi X_s, kế tiếp sẽ giảm xuống (vì sự bão hòa của đặc tuyến hở mạch) phụ thuộc dòng điện trường tương ứng điện áp định mức mạch hở, và được tính như sau:

$$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{V_t(\text{định mức})/\sqrt{3}}{I_{SC}}\Bigg|_{\substack{I_f \text{ tương ứng với} \\ V_t \text{ (định mức) trên OCC}}} \qquad (8.26)$$

Giá trị X_s (điều chỉnh) thấp hơn X_s (không bão hòa) (Hình 8.12), X_s (điều chỉnh) được tính toán cho kết quả gần sát với hoạt động thực khi máy điện vận hành bình thường.

Tỷ số ngắn mạch

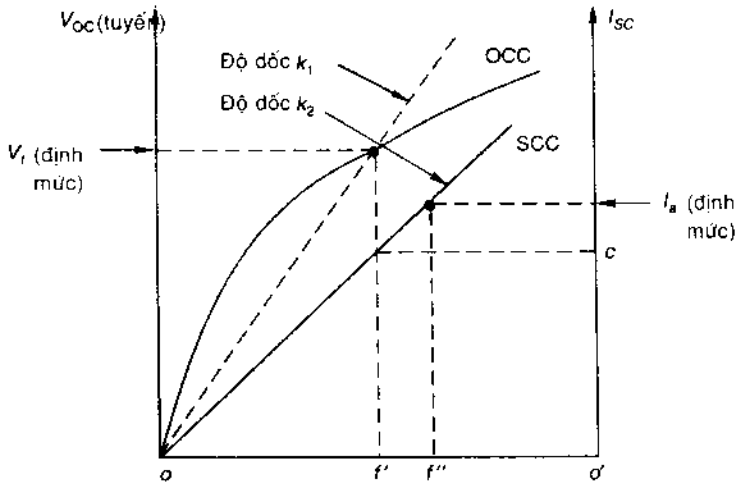
Tỷ số ngắn mạch (SCR) là tỷ số giữa dòng điện tạo ra điện áp định mức trên mạch hở và dòng điện trường cần thiết để tạo ra dòng điện phần ứng ngắn mạch với máy điện chạy ở vận tốc đồng bộ khi ngắn mạch và hở mạch

Từ Hình 8.15; theo định nghĩa:

$$SCR = \frac{of'}{of''} \qquad (8.27)$$

Từ pt 8.26: $$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{V_t(\text{định mức})/\sqrt{3}}{o'c} \qquad (8.28)$$

Các độ dốc: $$k_t = \frac{\text{Điện áp hở mạch}}{\text{Dòng điện trường}} = \frac{V_t(\text{định mức})}{of'} \qquad (8.29)$$



Hình 8.15 *Tỷ số ngắn mạch (SCR)*

$$k_2 = \frac{\text{Dòng điện ngắn mạch}}{\text{Dòng điện trường}} = \frac{I_a(\text{định mức})}{of''} = \frac{o'c}{of'} \quad (8.30)$$

Thay các pt (8.29) và (8.30) vào pt (8.27):

$$\begin{aligned} SCR &= \frac{of'}{of''} = \frac{V_t(\text{định mức})}{k_1} \cdot \frac{k_2}{I_a(\text{định mức})} \\ &= \frac{o'c}{V_t(\text{định mức})} \cdot \frac{V_t(\text{định mức})}{I_a(\text{định mức})} \\ &= \frac{o'c}{V_t(\text{định mức})/\sqrt{3}} \cdot \frac{V_t(\text{định mức})/\sqrt{3}}{I_a(\text{định mức})} = \frac{1}{X_s(\text{điều chỉnh})(\text{pu})} \cdot X_{Base} \end{aligned}$$

$$SCR = \frac{1}{X_s(\text{điều chỉnh})(\text{pu})} \quad (8.31)$$

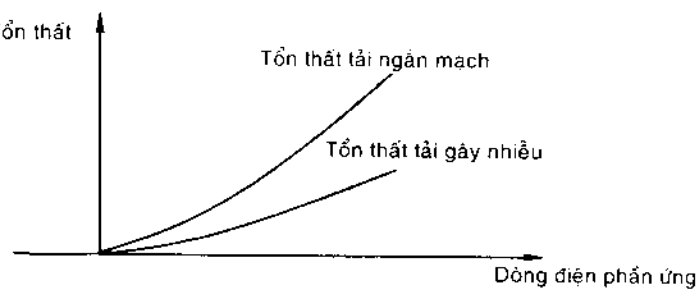
Phương trình (8.31) cho thấy tỷ số ngắn mạch (SCR) tỉ lệ nghịch với X_s (điều chỉnh) và ngược lại.

Tổn thất ngắn mạch

Trong thí nghiệm ngắn mạch, nếu đo công suất cơ cấp vào máy điện sẽ tính được tổn thất ngắn mạch. Tổn thất bao gồm:

1. Tổn thất RI^2 trong dây quấn phần ứng do dòng điện ngắn mạch (ac).
2. Tổn thất lõi cục bộ do từ thông rò phần ứng gây ra.
3. Tổn thất lõi do từ thông tổng hợp trong khe hở không khí, rất nhỏ (có thể bỏ qua) (Hình 8.14b).
4. Tổn thất quạt gió và ma sát.

Tổn thất quạt gió và ma sát được tách ra bằng cách đo công suất cơ cần để chạy máy điện (ở tốc độ đồng bộ) với hở mạch phần ứng, và không kích thích trường. Tổn thất còn lại (1 và 2) là tổn thất tải ngắn mạch (Hình 8.16). Bằng cách đo điện trở phần ứng dc và chỉnh theo nhiệt độ phần ứng trong thí nghiệm ngắn mạch, tổn thất do I^2R có thể bỏ qua, chỉ còn tổn thất tải gây nhiễu = tổn thất tải trên lõi + tổn thất điện trở của dây dẫn (đối với ac) (Hình 8.16).



Hình 8.16 *Tổn thất và dòng điện phần ứng*

Điện trở phần ứng được tính từ dòng điện phần ứng và tổn thất tải ngắn mạch là *điện trở phần ứng hiệu dụng*, có thể tính từ dòng định mức và giả sử được giữ không đổi:

$$R_a(\text{hiệudụng}) = \frac{\text{Tổn thất tải ngắn mạch (mỗi pha)}}{(\text{Dòng điện phần ứng ngắn mạch})^2} \qquad (8.32)$$

Ví dụ 8.1: Vẽ các đặc tuyến hở mạch và ngắn mạch, sử dụng dữ liệu được cho ở dưới đối với máy phát điện đồng bộ 150MW, 13 kV, hệ số công suất 0.85, tần số 50 Hz

Đặc tuyến hở mạch:

I_f (A)	200	450	600	650	1200
V_{OC} (dây) (kV)	4	8.7	10.8	13.3	15.4

Đặc tuyến ngắn mạch:

$$I_f = 750 \text{ A}; \quad I_{SC} = 8000 \text{ A}.$$

a) Xác định điện kháng đồng bộ không bão hòa của máy điện.

b) Xác định điện kháng đồng bộ bão hòa của máy điện.

c) Đổi giá trị điện kháng hai phần trên thành giá trị pu.

d) Tính tỷ số ngắn mạch.

e) Máy điện cấp đủ tải ở hệ số công suất 0.8 chậm pha và điện áp phần ứng 13 kV.

Trường hợp I: Tìm lực điện động kích thích và ổn định điện áp, sử dụng điện kháng đồng bộ (mạch tuyến tính).

Trường hợp II: Tìm lực điện động kích thích, sử dụng điện kháng đồng bộ bão hòa. Tìm dòng điện trường cần cấp cho tải xác định. Với dòng điện trường không đổi, tìm điện áp hở mạch và từ đó tính ổn định điện áp máy điện.

f) So sánh kết quả câu (e) giữa trường hợp I và II

g) Đối với tải trong câu (e), hãy vẽ sơ đồ pha biểu thị điện áp và dòng điện. Tính góc giữa điện áp phần ứng và lực điện động kích thích.

Giải

Đặc tuyến ngắn mạch và hở mạch theo các dữ liệu được vẽ trên Hình 8.17

a) Với V_{OC} = 13kV (đường khe hở không khí), I_{SC} = 7000A (có cùng dòng điện trường):

$$X_s(\text{không bão hòa}) = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3} \times 7000} = 1.072\ \Omega$$

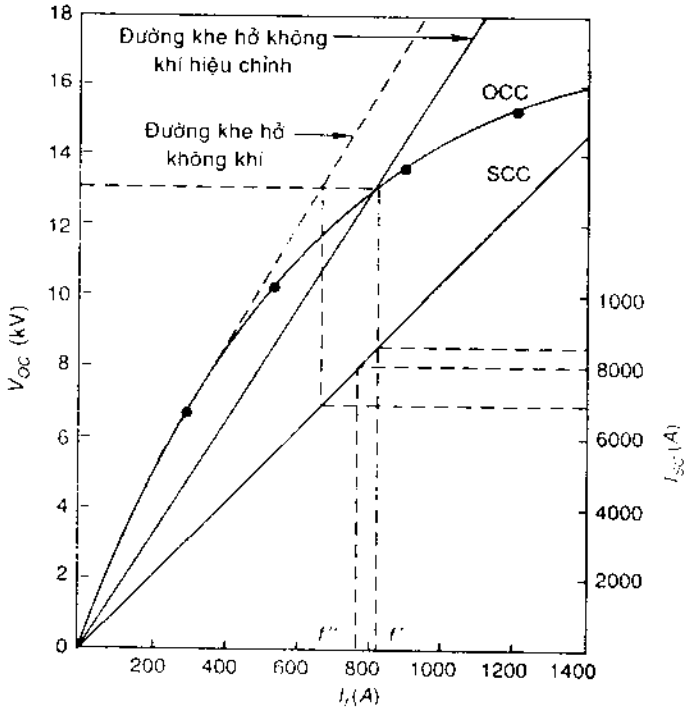
b) Với V_{OC} = 13 kV (đặc tuyến hở mạch), ISC = 8600 A

$$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3} \times 8600} = 0.873\ \Omega$$

$$I_a(\text{định mức}) = \frac{150 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.85 \times 13 \times 10^3} = 7837\ \text{A}$$

$$\text{Ohm cơ bản} = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3} \times 7837} = 0.958\ \Omega$$

c) $$X_s(\text{không bão hòa})(\text{pu}) = \frac{1.072}{0.958} = 1.12$$



Hình 8.17 *Dòng điện hở mạch và ngắn mạch*

$$X_s(\text{điều chỉnh})(\text{pu}) = \frac{0.873}{0.958} = 0.911 \text{ pu}$$

d) I_f tương ứng với $V_{OC} = V_t$ (định mức) là: $of' = 810$ A

I_f tương ứng với $I_{SC} = I_a$ (định mức) là: $of'' = 750$ A

Tỉ số ngắn mạch $SCR = \dfrac{810}{750} = 1.08 = \dfrac{1}{X_s(\text{hiệu chỉnh})(\text{pu})}$

e) $$V_t = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3}} = 7505 \text{ V (giá trị pha)}$$

$$\overline{V}_t = 7505 \angle 0^0 \text{ V}$$

$$\cos\phi = 0.8; \ \phi = 36.9^0$$

I_a(từ thông) = 7837 A

$\overline{I}_a = 7837 \angle -36.9^0 = 7837(0.8 - j0.6)$

Đối với hoạt động theo chế độ máy phát:

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + j\overline{I}_a X_s$$

Trường hợp I: X_s (không bão hòa) = 1.072 Ω

$E_f = 7505 + j7837(0.8 - j0.6) \times 1.072 = 12546 + j6721$

$E_f = 14233$ V hoặc 24.65 kV (đường dây) = V_t(OC) (tuyến tính)

$$\text{Điều áp} = \frac{V_t(OC) - V_t}{V_t} \times 100 = \frac{14233 - 7505}{7505} \times 100 = 89.65\%$$

Trường hợp II: X_s (điều chỉnh) = 0.873 Ω

$$\overline{E}_f = 7505 + j\,7837\,(0.8 - j\,0.6) \times 0.873$$
$$= 11610 + j\,5473 = 12835 \angle 25.2^0 \text{ V}$$

$E_f = 12835$ V hoặc 22.23 kV (đường dây)

Dòng điện cần thiết để có E_f này được tìm từ đường khe hở không khí đã hiệu chỉnh. Trên cơ sở tuyến tính:

$$I_f = \frac{810}{13} \times 22.3 = 1390 \text{ A}$$

Đối với giá trị dòng điện trường này khi máy điện hở mạch:

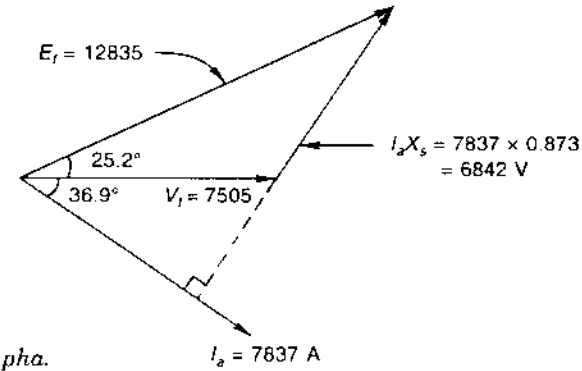
V_t (hở mạch) = 16.3 kV

$$\text{Độ ổn định điện áp} = \frac{16.3 - 13}{13} \times 100 = 25.4\%$$

Chú thích: Ổn định điện áp được tính từ X_s (điều chỉnh) và đường khe hở không khí hiệu chỉnh gần với giá trị thực hơn là tính từ X_s (không bão hòa).

f) Hình 8.18 là sơ đồ pha, E_f sớm pha hơn V_t theo góc δ là 25.2^0

Quan sát: Phương pháp gần đúng được sử dụng để tính sụt áp trong máy biến áp không thể sử dụng trong máy điện đồng bộ, vì có X_s lớn hơn nhiều so với biến áp (với X_{eq} = 0.05 - 0.08 pu). Do đó, cần áp dụng sơ đồ pha để tính toán.



Hình 8.18. *Sơ đồ pha.*

Xác định Ampere - vòng phản kháng phần ứng và điện kháng rò - Phương pháp Potier

Mô hình mạch đơn giản nêu trên được giả định là mạch từ (máy điện) tuyến tính. Tuy nhiên trong điều kiện vận hành bình thường, máy điện hoạt động trong vùng bão hòa nhẹ. Để tính toán bão hòa từ, phải điều chỉnh thêm điện kháng đồng bộ sao cho mô hình mạch đơn giản vẫn dùng được các thông số X_s (điều chỉnh). Tuy có kết quả tốt hơn so với sử dụng X_s (không bão hòa), nhưng vẫn không thể tính toán đầy đủ sự bão hòa từ.

Khi tính toán bão hòa, không thể áp dụng nguyên lý xếp chồng, cần phải sử dụng phương trình pha lực từ động:

$$\overline{F}_r = \overline{F}_f + \overline{F}_{ar}$$

Lực điện động cảm ứng E_f và E_r (tương ứng với F_f và F_r) được tìm từ đặc tuyến hở mạch. Tuy nhiên, phải xác định F_{ar} đối với dòng điện phần ứng I_a đã cho, nghĩa là điện kháng phần ứng không đổi:

$$K_{ar} = \frac{F_{ar}}{I_a} \qquad (8.33)$$

Hằng số tỷ lệ K_{ar} này được tìm bằng thực nghiệm đối với từng máy điện.

Biết đặc tuyến từ hóa và hằng số tỷ lệ K_{ar}, sẽ vẽ được sơ đồ pha (Hình 8.5b) trong đó không cần tính xấp xỉ gần đúng về độ không tuyến tính. Bước cuối là tìm điện áp phần ứng theo phương trình pha:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r - \overline{I}_a (R_a + j X_l) \quad \text{(chế độ máy phát)} \qquad (8.34)$$

Điện trở phần ứng R_a dễ đo đạc trong điều kiện dc, hiệu chỉnh theo giá trị ac và nhiệt độ vận hành, khi phân tích, có thể bỏ qua tổn thất R_a vì giá trị rất nhỏ ở trạng thái ổn định (chừng 0.01 pu) nhưng điện kháng rò X_l phải xác định. Có thể tính từ các thông số thiết kế của máy điện (biết trước), nhưng điều này ít xảy ra, nên phải tìm bằng phương pháp thực nghiệm để có giá trị thực.

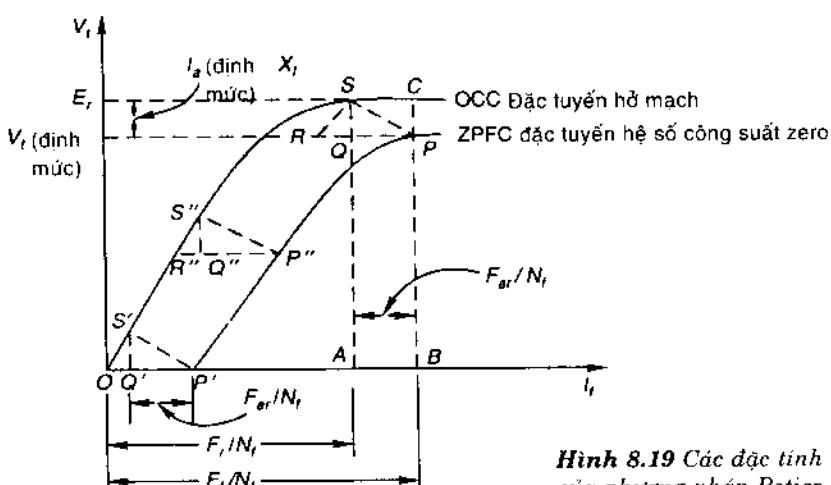
Phân tích chế độ làm việc của máy điện đồng bộ trong các điều kiện vận hành với K_{ar} và X_l cho trước. Có nhiều phương pháp thực nghiệm để xác định các đại lượng này (vì tính phi tuyến của sắt). Một trong những phương pháp đó, là phương pháp Potier.

Phương pháp Potier

Phương pháp Potier là thí nghiệm xác định hai đặc tuyến khi máy điện chạy ở vận tốc đồng bộ:

1. *Đặc tuyến hở mạch*: minh họa trên Hình 8.12, được vẽ lại trên Hình 8.19.

2. *Đặc tuyến hệ số công suất zero* (trễ pha), với máy phát có tải thuần cảm ứng (3-pha cân bằng) được điều chỉnh để có dòng định mức (I_a định mức) trong khi điều chỉnh dòng điện kích thích (dòng điện trường) để có các giá trị điện áp tải V_t khác nhau. Quan hệ này (I_f - V_t) là đặc tuyến hệ số công suất zero (Hình 8.19). Không cần xác định đầy đủ



Hình 8.19 *Các đặc tính của phương pháp Potier*

đặc tuyến, chỉ cần xác định hai điểm trên đặc tuyến này điểm P và điểm P'. Điểm P tương ứng với dòng điện trường cung cấp V_t định mức trong khi tải hệ số công suất zero (thuần cảm) được điều chỉnh để có I_a định mức. Điểm P' tương ứng điều kiện ngắn mạch máy điện (V_t = 0) với dòng điện trường được điều chỉnh để có dòng điện phần ứng I_a định mức. Vì bỏ qua điện trở phần ứng, nên dòng điện ngắn mạch trễ pha sau lực điện động cảm ứng tổng hợp E_r gần đến 90^0 (với V_t = 0). P' là điểm trên đặc tuyến hệ số công suất zero.

Hình 8.20 là sơ đồ pha trong điều kiện tải hệ số công suất zero (trễ pha và bỏ qua điện trở phần ứng). Từ Hình này, có thể thiết lập phương trình pha lực từ động và điện áp:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r - j\overline{I}_a X_l \tag{8.35}$$

$$\overline{F}_r = \overline{F}_f + \overline{F}_{ar} \tag{8.36}$$

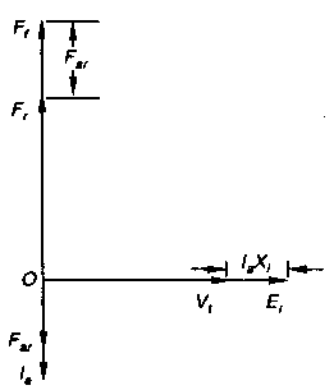
$$V_t = E_r - I_a X_l \tag{8.37}$$

$$F_r = F_f + F_{ar} \tag{8.38}$$

Phương trình (8.37) và (8.38) có thể chuyển lên các đặc tuyến hở mạch và hệ số công suất zero (Hình 8.19). Trong dữ liệu thí nghiệm, trục ngang (Hình 8.19) là trục dòng điện trường I_f, pt (8.38) phải biến đổi theo dòng điện trường tương đương bằng cách phân chia cho N_f (số vòng phần ứng) trên mỗi cực từ trường rotor:

$$F_r / N_f = F_f / N_f - F_{ar} / N_f \tag{8.39a}$$

$$I_f = I_f - I_f^{ar} \tag{8.39b}$$



Hình 8.20 *Sơ đồ pha đối với tải hệ số công suất zero (trễ pha)*

Điểm P trên đặc tuyến hệ số công suất zero tương ứng với điện áp V_t (định mức) và dòng điện trường OB = F_f/N_f. Tương ứng với điểm P là điểm S (trên đặc tuyến hở mạch) liên quan với E_r và sự kích thích tổng hợp OA = F_r / N_f (= $F_f / N_f - F_{ar} / N_f$).

Từ Hình 8.19 và các pt (8.37), (8.39), có thể nhận thấy:

(i) SQ, khoảng cách dọc giữa P và S, là sụt áp rò trên điện kháng I_a (định mức) X_l

(ii) QP, khoảng cách ngang giữa P và S, là F_{ar} / N_f

Điểm P được tìm từ thí nghiệm hệ số công suất zero, tương ứng điểm S chưa biết trên đặc tuyến hở mạch vì giá trị bằng số của I_a (định mức) X_l và F_{ar} / N_f chưa biết.

Dựng các tam giác song song với SQP, các điểm có thể tìm được tương ứng các điểm trên đặc tuyến hở mạch, S'Q'P' (Hình 8.19):

$$S'Q' = I_a \text{ (định mức) } X_l \text{ và } Q'P' = F_{ar} / N_f$$

Phần đầu của đặc tuyến hở mạch là (gần như) tuyến tính, OS' là đường thẳng, RS song song OS', điểm S đã được định vị trên đặc tuyến hở mạch (tương ứng điểm P đã biết trên đặc tuyến hệ số công suất zero).

Điểm S được định vị và được đo theo tỉ lệ:

$$I_a \text{(định mức) } X_l \quad \text{và} \quad F_{ar}/N_f = I_f^{ar}$$

X_l và F_{ar} có thể tính được. Do F_{ar} tương ứng I_a (định mức), nên hằng số tỉ lệ lực từ động phần ứng là:

$$K_{ar} = I_f^{ar} / I_a \text{ (định mức)}$$

Với hiểu biết về X_l và K_{ar} trong cuộn dây stator, sơ đồ pha hoàn chỉnh của máy điện có thể được tạo dựng tương ứng với điều kiện hoạt động bất kỳ, theo chế độ máy phát hoặc động cơ.

Chú ý, phương pháp Potier tuy có ưu điểm nhưng không chính xác do sử dụng các giả định sau:

1. Điện trở phần ứng bị bỏ qua khi thiết lập các phương trình đại số (8.37), (8.38) và (8.39). Giả định này không làm tăng các sai số một cách rõ rệt.

2. Nếu các cuộn cảm (tải cảm) dùng trong thí nghiệm hệ số công suất zero, hệ số công suất hơi khác zero.

3. Trên Hình 8.19, S'Q' = SQ = I_a (định mức) X_l, nghĩa là tương ứng điểm P (trong thí nghiệm hệ số công suất zero) và điểm P' (trong thí nghiệm ngắn mạch), điện kháng rò giả sử không thay đổi. Giả định này không chính xác, vì kích thích máy điện trong điều kiện ngắn mạch là OP' trong khi thực tế là OA đối với điểm P' (điểm này trên đặc tuyến hệ số công suất zero tương ứng với điện áp phần ứng định mức và dòng điện phần ứng định mức). Vì OA >> OQ', điểm P tương ứng điều kiện bão hòa trong máy điện với từ thông rò lớn hơn, nên giá trị điện kháng rò lớn hơn, mâu thuẫn với giả định nêu trên.

Ví dụ 8.2: Các dữ liệu sau từ thí nghiệm ngắn mạch của máy phát điện đồng bộ nối sao 3 pha, 10 MVA, 13 kV, 50Hz.

I_f (A)	50	75	100	125	150	162.5	200	250	300
V_{OC} (dây) (kV)	6.2	8.7	10.5	11.8	12.8	13.2	14.2	15.2	15.9

Dòng kích thích 100A, tạo ra dòng điện đủ tải (dòng điện định mức) chạy suốt qui trình thí nghiệm ngắn mạch. Dòng kích thích là 290A để tạo ra dòng điện định mức ở hệ số công suất zero và điện áp định mức.

a) Hãy tính điện kháng đồng bộ điều chỉnh của máy điện.

b) Hãy tính điện kháng rò của máy điện, giả sử bỏ qua điện trở.

c) Hãy xác định sự kích thích cần thiết khi máy điện cấp đủ tải ở hệ số công suất 0.8 trễ pha bằng cách sử dụng trở kháng rò và vẽ sơ đồ pha lực từ động. Tính ổn định điện áp máy điện.

Tính ổn định điện áp của tải này theo điện kháng đồng bộ điều chỉnh. Hãy so sánh và diễn giải hai kết quả.

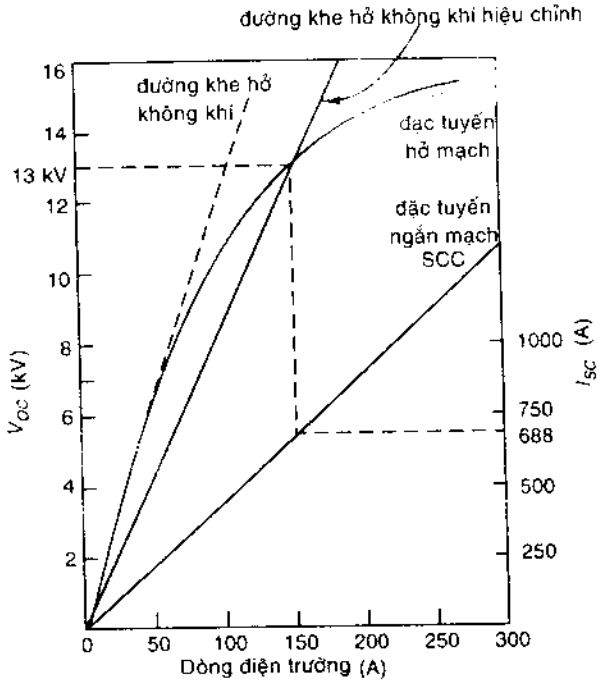
Giải

$$I_a(\text{định mức}) = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13 \times 10^3} = 444 \text{ A}$$

a) Đặc tuyến hở mạch và đặc tuyến ngắn mạch được vẽ trên Hình 8.21. Dòng điện phần ứng ngắn mạch tương ứng với V_t (định mức) = 13 kV (dây) trên đặc tuyến hở mạch là:

$$I_{SC} = 688 \text{ A}$$

$$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{V_t \text{ (định mức)}}{\sqrt{3} \times I_{SC} \text{ (tương ứng với } V_t\text{(định mức))}} = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3} \times 668}$$
$$= 10.9\ \Omega$$



***Hình 8.21**: OCC (đặc tuyến hở mạch)*

b) Để tìm điện kháng rò, phải dựng tam giác Potier. Hình 8.22 là đồ thị đặc tuyến hở mạch, vị trí điểm P tương ứng với hệ số công suất zero ở dòng điện và điện áp định mức, điểm P' tương ứng với ngắn mạch ở dòng điện định mức.

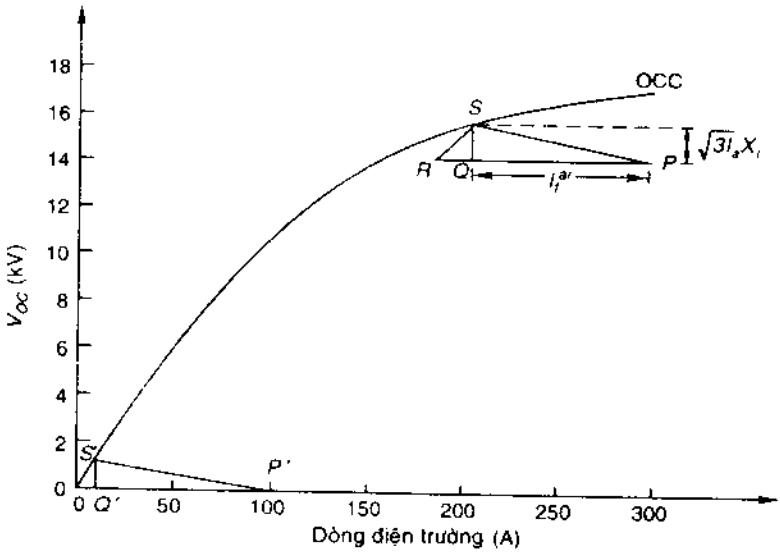
Từ P vẽ song song với trục ngang PR = OP'. Từ R vẽ RS song song với đường dốc ban đầu của đặc tuyến hở mạch, với điểm S ở trên đặc tuyến hở mạch. Vẽ SQ vuông góc với RP. Từ đó:

$$SQ = \sqrt{3} I_a (\text{định mức}) X_l = 1200 \text{ V}$$

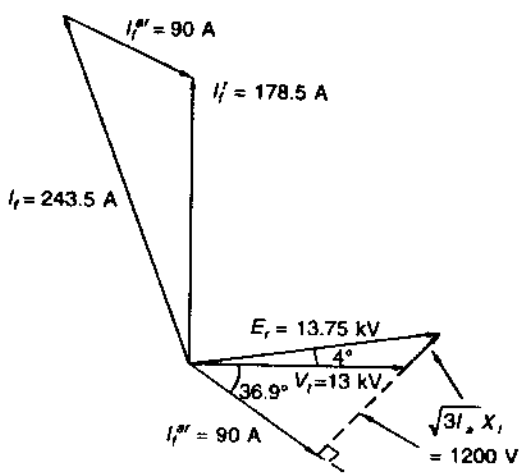
$$X_l = \frac{1200}{\sqrt{3} \times 444} = 1.56\ \Omega$$

c) Từ Hình 8.22, phản ứng phần ứng trong dòng trường tương đương là:

$$I_f^{ar} = QP = 90 \text{ A}$$



***Hình 8.22**. Đặc tuyến hở mạch.*



***Hình 8.23**. Sơ đồ pha.*

Từ sơ đồ pha trên Hình 8.23.

$$E_r = 13.75 \text{ kV (điện áp dây)}$$

Từ đặc tuyến hở mạch tương ứng với giá trị E_r:

$$I_f^r = 178.5 \text{ A}$$

Từ sơ đồ pha lực từ động, dòng kích thích cần thiết được xác định là:

$$I_f = 243.5 \text{ A}$$

Giá trị E_f trên đặc tuyến hở mạch tương ứng là:

$$E_f = 15.2 \text{ kV (dây)}$$

$$\text{Ổn định điện áp} = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 = \frac{15.2 - 13}{13} \times 100 = 16.9\%$$

Ổn định điện áp sử dụng X_s(điều chỉnh):

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + j\sqrt{3}\,\overline{I}_a(\text{định mức})\,X_s(\text{điều chỉnh})$$

$$= 13000 + j\sqrt{3} \times 444\,(0.8 - j\,0.6) \times 10.9 = 18029 + j\,6705$$

$$E_f = 19.24 \text{ kV (dây)}$$

$$I_f(\text{từ đường khe hở không khí hiệu chỉnh}) = \frac{150}{13} \times 19.24 = 222 \text{ A}$$

$$V_t(OC)\Big|_{I_f = 222\text{ A}} = 14.3 \text{ kV}$$

$$\text{Ổn định điện áp} = \frac{14.3 - 13}{13} \times 100 = 10.4\%$$

Diễn giải

Ổn định điện áp được tính bằng phương pháp Potier hoàn toàn chính xác. Thực sự giá trị này thấp hơn một ít vì không tính phần tăng điện kháng rò trong điều kiện tải. Phương pháp sử dụng X_s (điều chỉnh) là phương pháp thực nghiệm, sai số phụ thuộc và mức độ bão hòa của máy điện ở điện áp định mức.

Ví dụ 8.3: Đặc tuyến hở mạch của máy điện đồng bộ 3 pha, 50 Hz được cho theo các dữ liệu sau:

I_f (A)	15	30	50	75	90	120	160
V_{OC} (dây) (V)	600	1200	2000	2900	3300	3700	4000

Trong điều kiện ngắn mạch, dòng điện trường 40A sẽ cung cấp dòng điện stator đủ tải. Điện trở và trở kháng rò trên mỗi pha phần ứng là 0.01 và 0.12 pu. Khi máy điện vận hành như động cơ, có dòng đủ tải ở điện áp định mức 3.3 kV và hệ số công suất (sớm pha) 0.8, hãy tính dòng điện trường cần thiết.

Giải

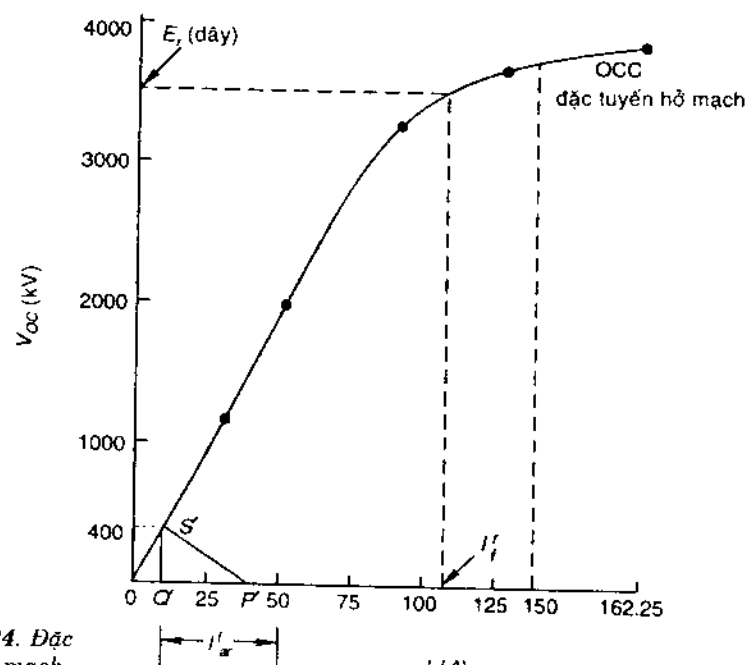
Đặc tuyến hở mạch được vẽ trên Hình 8.24. Dòng điện trường cần để tuần hoàn dòng ngắn mạch đủ tải (dòng định mức tải) là OP' = 40A.

Ở dòng điện định mức : $\sqrt{3}\, I_a X_l = 0.12 \times 3300 = 396$ V

Tương ứng với 390V trên đặc tuyến hở mạch là điểm S', vẽ đường dọc S'Q'. Q'P' tương ứng với:

$$\frac{F_{ar}}{N_f} = I'_{ar} = 30 \text{ A}$$

$R_a = 0.01$ pu, nên sụt áp trên điện trở R_a quá nhỏ, có thể bỏ qua



Hình 8.24. *Đặc tuyến hở mạch.*

$$V_t = \frac{3.3}{\sqrt{3}} \times 1000 = 1905 \text{ (điện áp pha)}$$

$$I_a X_l = \frac{396}{\sqrt{3}} = 229 \text{ V (dòng điện định mức)}$$

Từ sơ đồ pha trên Hình 8.25 tương ứng với phương trình (8.12)

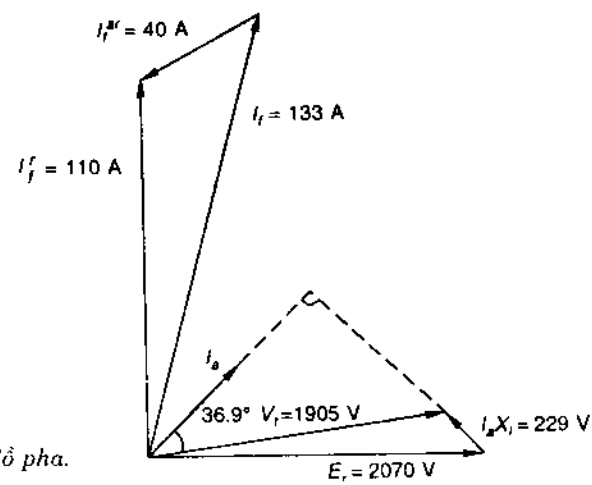
$$E_r = 2070 \text{ hoặc } 3585 \text{ V (điện áp dây)}$$

Với giá trị E_r này (từ đặc tuyến hở mạch) $F_r / N_f = I_r^f = 110A$ được vẽ sớm pha hơn E_r là 90^0; $I_{ar}^f = 40$ A được vẽ song song ngược chiều với I_a (theo chế độ động cơ). Từ sơ đồ pha lực từ động:

$$I_f = 133 \text{ A}$$

Lực điện động kích thích E_f, nếu cần thiết được đo từ đặc tuyến hở mạch tương ứng với $I_f = 135A$ là:

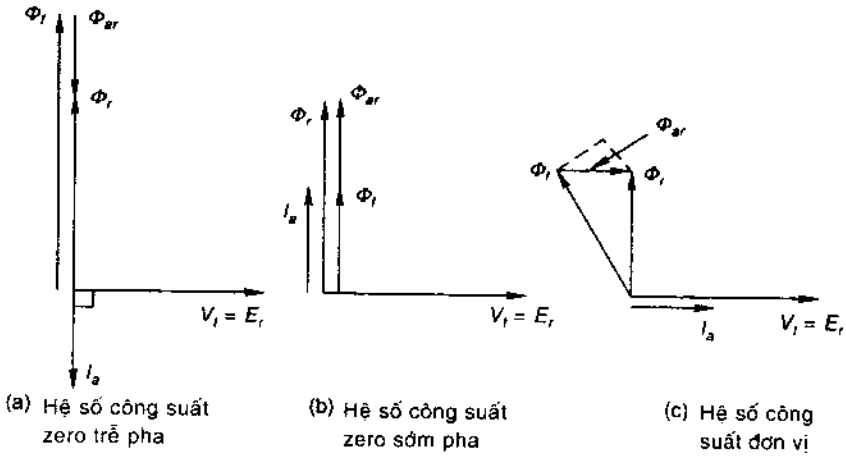
$$E_f = 3840 \text{ V (dây)}.$$



***Hình 8.25**. Sơ đồ pha.*

Bản chất của phản ứng phần ứng

Trong máy phát điện, lực từ động và từ thông phản ứng (hay phản kháng, phản điện) phần ứng cùng pha với dòng điện phần ứng, trong động cơ chúng ngược pha với dòng điện phần ứng, bản chất của từ thông phản ứng phần ứng



(a) Hệ số công suất zero trễ pha

(b) Hệ số công suất zero sớm pha

(c) Hệ số công suất đơn vị

***Hình 8.26**. Bản chất phản ứng phần ứng trong máy phát điện*

phụ thuộc và hệ số công suất ở trạng thái vận hành máy điện. Để đơn giản hóa việc giải thích, có thể giả thiết điện trở và điện kháng rò phần ứng không đáng kể, do đó:

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r$$

Hình 8.26 là sơ đồ pha với các thành phần từ thông (giả sử mạch từ tuyến tính) trong máy phát điện theo ba trường hợp: a) hệ số công suất zero trễ pha, b) hệ số công suất zero sớm pha, và c) hệ số công suất đơn vị. Quan sát các sơ đồ này, có các nhận xét sau:

1. Phản ứng phần ứng là *khử từ hóa* (Φ_{ar} đối nghịch Φ_f) khi máy phát cấp dòng điện hệ số công suất zero trễ pha.

2. Phản ứng phần ứng là *từ hóa* (Φ_{ar} thuận với Φ_f) khi máy phát cung cấp hệ số công suất zero sớm pha.

3. Phản ứng phần ứng hầu hết là *từ hóa chéo* (như 90^0 đối với Φ_f) dù có thành phần từ hóa nhỏ (Hình 8.26 c), cấp dòng điện hệ số công suất đơn vị.

Từ các mô tả trên, có các kết luận chung như sau:

(i) Khi máy điện cấp dòng (điện) hệ số công suất trễ pha, phản ứng phần ứng gồm hai thành phần là khử từ hóa và từ hóa chéo.

(ii) Khi máy điện cấp dòng hệ số công suất sớm pha, phản ứng phần ứng gồm hai thành phần là từ hóa và từ hóa chéo.

Đối với động cơ điện, lực từ động và từ thông phản ứng phần ứng ngược pha với dòng điện phần ứng, phản ứng phần ứng đảo ngược trạng thái so với máy phát điện:

(i) Khi máy điện có dòng điện hệ số công suất trễ pha, phản ứng phần ứng có hai thành phần: từ hóa và từ hóa ngang.

(ii) Khi máy điện có dòng điện hệ số công suất sớm pha, phản ứng phần ứng có hai thành phần: khử từ hóa và từ hóa ngang.

Các vấn đề nêu trên sẽ được trình bày chi tiết ở phần kế tiếp.

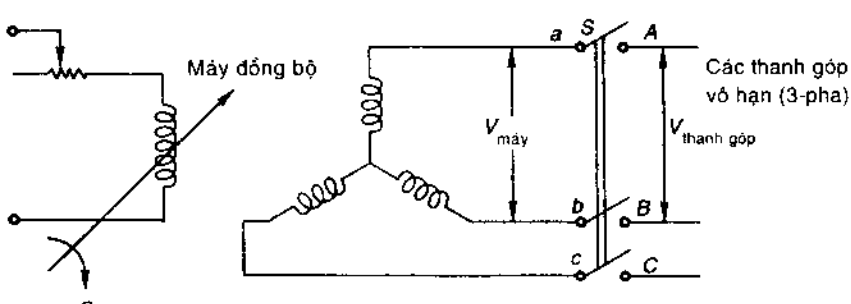
Đồng bộ hóa thanh góp vô hạn (thanh cái)

Thanh góp vô hạn được hiểu là nguồn 3 - pha cung cấp điện áp và tần số không đổi, độc lập với tải trao đổi (dẫn vào thanh góp hoặc lấy từ thanh góp). Hình 8.27 minh họa máy điện đồng bộ có các đầu a, b, c cần được nối với các đầu A, B, C của thanh góp qua cầu dao S.

Máy phát điện có các đầu ra được sắp xếp theo thứ tự pha như các thanh góp (thanh cái). Tốc độ máy điện và dòng điện trường được điều chỉnh để thỏa các điều kiện sau:

(i) Điện áp đầu ra máy điện phải gần bằng điện áp thanh góp.

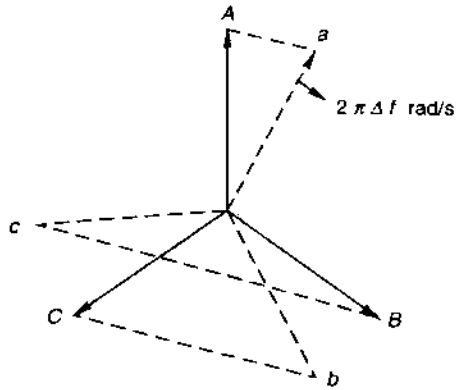
(ii) Tần số máy điện gần bằng tần số thanh góp, nghĩa là vận tốc máy điện gần sát với vận tốc đồng bộ.



Hình 8.27. *Nối máy điện đồng bộ với thanh góp vô hạn*

Sau khi thỏa các điều kiện trên, cần phải xác định thời điểm đóng cầu dao (*đồng bộ hóa*) để hai điện áp hầu như đồng pha (độ lệch pha cho phép không quá 5^0). Thời điểm đóng cầu dao được xác định theo phương pháp dưới đây:

Hình 8.28 là sơ đồ pha của các điện áp pha máy điện và thanh góp. Khi hai tần số không hoàn toàn bằng nhau, pha máy điện quay chậm hơn pha thanh góp theo góc $2\pi\Delta_f$ rad/ s (với Δ_f là hiệu hai tần số). Ở thời điểm hai bộ pha trùng nhau (đồng pha):



***Hình 8.28**. Xác định thời điểm đồng bộ hóa*

$$V_{aA} = 0$$

$$V_{bC} = V_{cB} \qquad (8.40)$$

Điều kiện này có thể được xác định bằng cách mắc ba đèn lần lượt qua aA, bC, cB (cần dùng máy biến áp giảm để bảo vệ đèn). Các giá trị điện áp trung bình V_{aA}, V_{bC}, V_{cB} dao động theo hiệu tần số Δ_f, do đó các đèn lần lượt mờ và sáng. Vào thời điểm đồng bộ hóa, theo điều kiện pt (8.40) nêu trên, đèn mắc qua aA tối và hai đèn còn lại sáng như nhau. Đây là thời điểm đóng cầu dao S. Thay vì dùng đèn, các nhà máy điện thường dụng thiết *đồng bộ hóa*.

Khi cầu dao S đóng, máy điện sẽ chạy với tốc độ đồng bộ. Sự thay đổi công suất thực (công suất tác dụng) bị chi phối theo điều kiện tải, còn công suất phản kháng thay đổi theo sự kích thích trường.

Khi máy phát được nối với công cơ học, việc nối với thanh góp theo phương pháp nêu trên tương đối dễ thực hiện. Đối với động cơ đồng bộ, có thể áp dụng phương pháp tương tự, nhưng phải được chạy khởi động ban đầu bằng thiết bị hỗ trợ (có thể là động cơ cảm ứng hoặc dc nhỏ) sau đó mới đồng bộ hóa. Vì động cơ đồng bộ không thể tự khởi động, nếu đóng cầu dao S (Hình 8.27) mà rotor đứng yên, trường stator và rotor không chuyển động theo vận tốc đồng bộ, tạo ra moment xoay chiều bằng zero, kết quả là động cơ không khởi động. Động cơ đồng bộ được chế tạo để tự khởi động bằng cách dùng thanh góp ngắn mạch trên rotor, tạo ra moment cảm ứng để khởi động.

Đặc tính vận hành

Đặc tính vận hành máy điện đồng bộ ở đây được khảo sát trong điều kiện tải biến thiên và sự kích thích thay đổi. Một trong hai đại lượng này được giả thiết là hằng trong khi đại lượng kia thay đổi theo khoảng rộng. Ở đây cũng giả định bỏ qua điện trở phần ứng. Điều này không làm thay đổi đặc tính vận hành máy điện, chỉ để dễ hiểu sự vận hành máy điện. Trường hợp máy điện với điện trở phần ứng sẽ được khảo sát ở phần sau. Nếu bỏ qua điện trở, công suất điện ở đầu dây máy điện và công suất cơ ở trục rotor có quan hệ đơn giản như sau:

Máy phát điện

$$P_e \text{ (ra)} = P_m \text{ (vào) (tổng)}$$

Với: P_e(ra) = công suất điện ngõ ra.

P_m(vào) = công suất cơ ngõ vào sau khi trừ các tổn thất sắt, quạt gió, và ma sát.

Động cơ điện

$$P_e \text{ (vào)} = P_m \text{ (ra)}$$

Với P_e (vào) = công suất điện cung cấp cho động cơ.

P_m (ra) = công suất cơ ngõ ra (trừ tổn thất sắt, quạt gió, và ma sát).

Đặc tuyến góc công suất

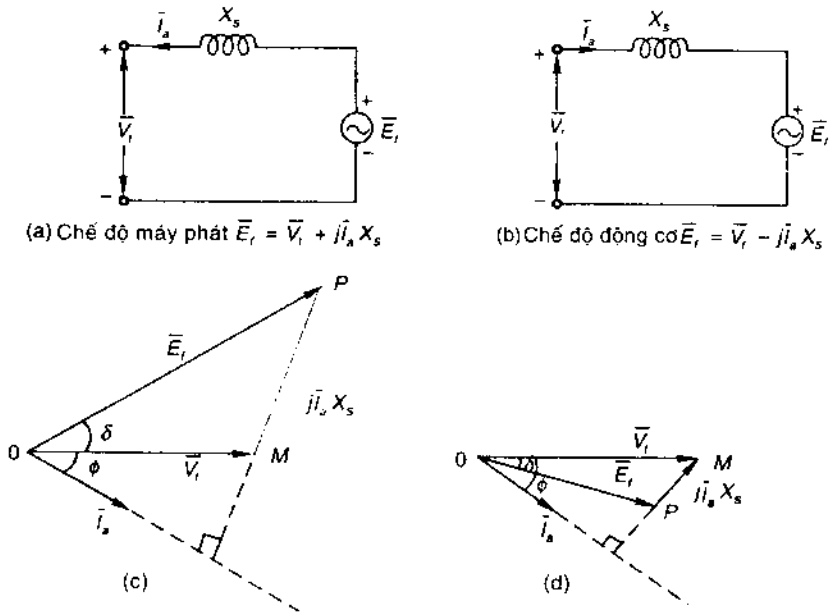
Hình 8.29 (a) và (c) là sơ đồ mạch và sơ đồ pha của máy phát điện đồng bộ, Hình 8.29 (b) và (d) là của động cơ. Giả sử máy điện được nối với thanh góp vô hạn có điện áp V_t. Trong máy phát, lực từ động kích thích E_f sớm pha hơn V_t theo góc δ, trong động cơ sẽ trễ pha so với V_t.

Từ tam giác OMP (Hình 8.29 c và d):

$$\frac{E_f}{\sin(90 \pm \phi)} = \frac{I_a X_s}{\sin\delta}$$

$$I_a \cos\phi = \frac{E_f}{X_s}\sin\delta \qquad (8.41)$$

φ là góc hệ số công suất



Hình 8.29. *Sự vận hành của máy điện đồng bộ (máy phát và động cơ)*

Nhân hai vế của phương trình (8.41) với V_t:

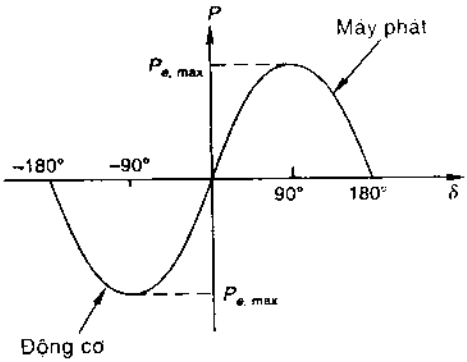
$$V_t I_a \cos\phi = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin\delta$$

$$P_e = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin\delta \qquad (8.42)$$

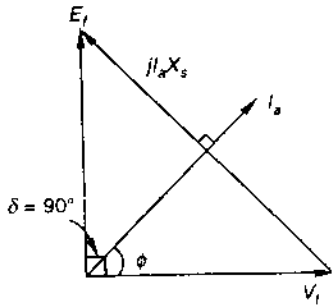
với $P_e = V_t I_a \cos\phi$ = công suất điện (mỗi pha) trao đổi qua thanh góp.

δ = góc giữa E_f và V_t, là *góc công suất* của máy điện, δ đổi dấu đối với các chế độ máy phát / động cơ.

Quan hệ từ pt (8.42) là *đặc tuyến góc công suất* của máy điện và được vẽ trên Hình 8.30 với V_t và E_f đã cho. Công suất cực đại khi $\delta = 90^0$, ở giá trị này máy điện mất đồng bộ. Máy điện chỉ đạt đến $P_{e,\,max}$ khi tăng tải một cách từ từ, được gọi là *giới hạn độ ổn định trạng thái tĩnh* của máy điện. Bình thường máy điện hoạt động với $\delta < 90^0$. Sơ đồ pha của máy phát với điều kiện P_{emax} được nêu trên Hình 8.31. Trong điều kiện này, I_a lớn hơn dòng điện định mức của máy điện.



***Hình 8.30**. Đặc tuyến góc công suất*



***Hình 8.31**. Sơ đồ pha máy phát điện ở giới hạn độ ổn định trạng thái tĩnh*

Vận hành với tải không đổi và sự kích thích biến thiên

Từ phương trình (8.42), với tải không đổi:

$$E_f \sin\delta = \frac{P_e X_s}{V_t} = \text{hằng số} \qquad (8.44)$$

$$V_t I_a \cos\phi = P_e = \text{hằng số}$$

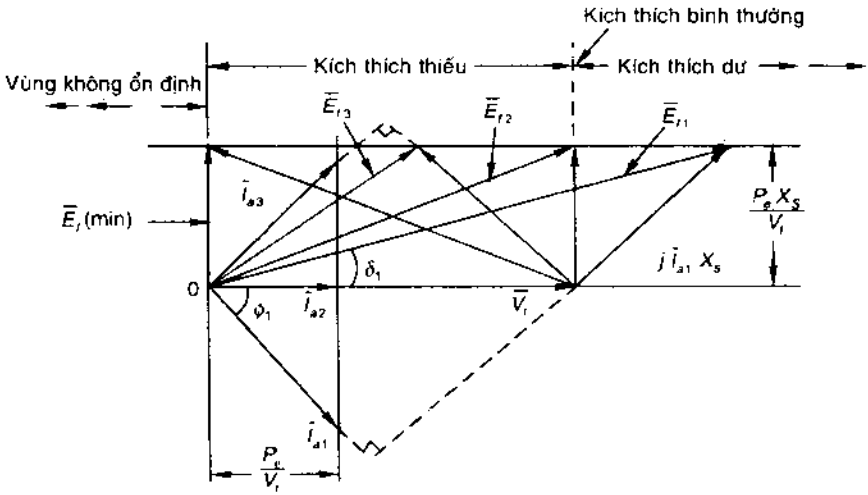
$$I_a \cos\phi = \frac{P_e}{V_t} = \text{hằng số} \qquad (8.45)$$

Với tải không đổi, khi lực điện động kích thích E_f biến thiên (bằng cách thay đổi dòng điện trường I_f), góc công suất δ thay đổi nhưng $E_f \sin\delta$ = hằng số. Hoạt động của máy điện được miêu tả trên sơ đồ pha (Hình 8.32a và b). Khi E_f biến thiên, đỉnh pha $\overline{E}_f$ di chuyển trên đường song song với $\overline{V}_t$ theo khoảng cách $E_f \sin\delta = P_e X_s / V_t$. Do $I_a \cos\phi$ = hằng số, hình chiếu của pha dòng I_a lên V_t là không đổi, nghĩa là đỉnh pha dòng điện chạy trên đường vuông góc với V_t theo khoảng cách $I_a \cos\phi = P_e / V_t$. Pha dòng điện I_a luôn luôn định vị 90^0 so với pha $\overline{I}_a X_s$ (pha nối các đỉnh $\overline{E}_f$ và $\overline{V}_t$, cùng chiều $\overline{E}_f$). Sự kích thích (E_f) tương ứng với *hệ số công suất đơn vị được coi* là *sự kích thích bình thường*. Nếu kích thích lớn hơn, là *kích thích dư*, nếu nhỏ hơn là *kích thích thiếu*.

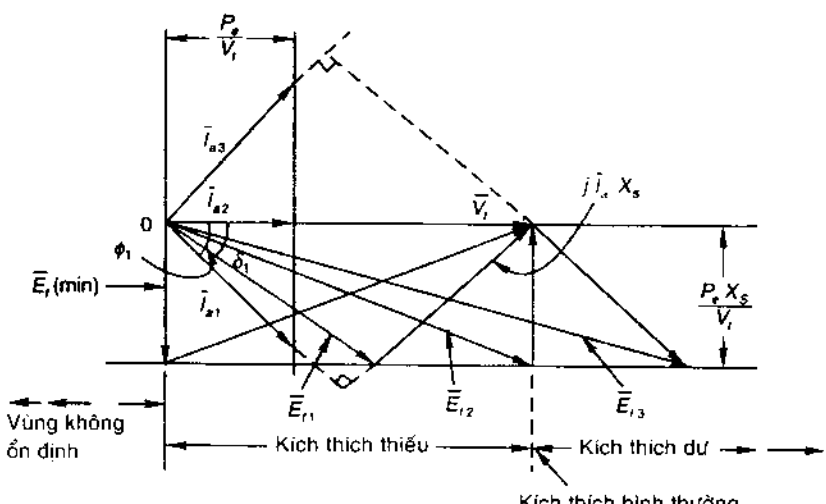
Các nội dung sau được vẽ trên sơ đồ pha Hình 8.32 (a) và (b)

Máy phát điện

1. Máy điện cấp dòng điện hệ số công suất trễ pha khi kích thích dư.
2. Máy điện cấp dòng điện hệ số công suất sớm pha khi kích thích thiếu.



(a) Máy phát điện P_e(ra) = P_m(vào) = hằng



(b) Động cơ điện P_e(vào) = P_m(ra) = hằng

Hình 8.32 *Máy điện đồng bộ vận hành với tải không đổi và kích thích biến thiên*

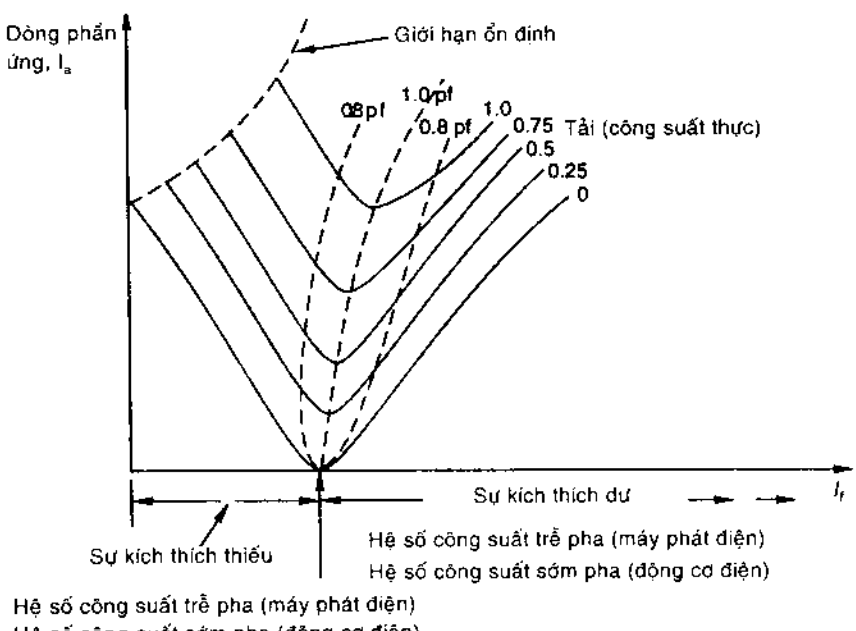
Động cơ điện

1. Máy điện nhận dòng điện hệ số công suất sớm pha khi kích thích dư.
2. Máy điện nhận dòng điện hệ số công suất trễ khi kích thích thiếu.

Trên sơ đồ pha, dòng điện phần ứng có giá trị cực tiểu khi kích thích tăng liên tục từ trạng thái kích thích thiếu. I_a thay đổi theo I_f ứng với mỗi giá trị tải (công suất thực) được vẽ đồ thị trên Hình 8.33. Đặc tuyến này là đường cong chữ V của máy đồng bộ. Tuy chỉ vẽ một hình đối với vận hành máy phát/ động cơ, nhưng dạng thực sự của đường cong chữ V không hoàn toàn đồng nhất, các đồ thị hệ số công suất - I_f là các đường cong -V nghịch đảo.

Sự kích thích cực tiểu

Từ Hình 8.32 a có thể thấy khi sự kích thích giảm, góc δ tăng liên tục. Sự kích thích tối thiểu được phép, E_f (min) tương ứng với giới hạn ổn định $\delta = 90^0$:



***Hình 8.33**. Đường cong chữ V của máy điện đồng bộ (tải không đổi (công suất thực), kích thích biến thiên)*

$$E_f(\min) = \frac{P_e X_s}{V_t} \quad (8.46)$$

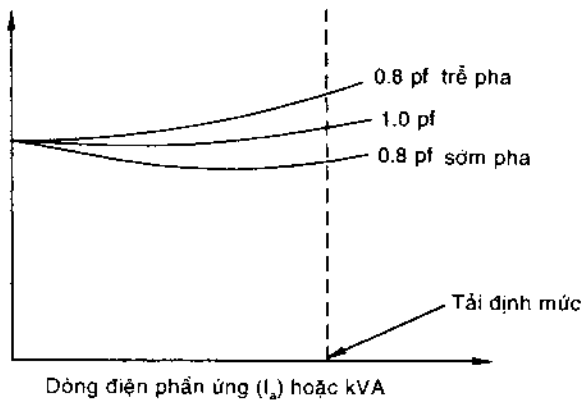
Dòng điện trường cực tiểu tương ứng với dòng điện phần ứng trên tải cho trước ở giới hạn ổn định được trình bày bằng đường nét đứt trên Hình 8.33.

Quan sát

Trong máy điện đồng bộ công suất điện thực trao đổi với thanh góp được điều khiển bởi công suất trục cơ, không phụ thuộc vào sự kích thích. Sự kích thích chỉ chi phối hệ số công suất (pf) của máy điện. Ví dụ, trong máy phát điện, nếu cần nhiều công suất thực vào thanh góp, phải tăng công suất cơ học cung cấp cho trục máy phát điện để cấp công suất cơ trên trục quay rotor lớn hơn. Kết quả là góc công suất δ tăng làm tăng công suất phát điện. Tuy nhiên, nếu cần điều chỉnh hệ số công suất máy điện, dòng kích phải thay đổi, nhưng không quá giới hạn ổn định (pt (8.46))

Đặc tuyến hỗn hợp

Các đường cong với nét đứt trên Hình 8.33 duy trì điện áp phần ứng không đổi, hệ số công suất không đổi. Đối với vận hành máy phát điện, đặc tuyến này là đặc tuyến hỗn hợp. Hình 8.34 là đặc tuyến dòng điện trường cần thiết đối với dòng điện phần ứng hoặc tải kVA cho trước, ở mỗi hệ số công suất xác định đối với điện áp tải (phần ứng) không đổi.



Hình 8.34. *Đặc tuyến hỗn hợp của máy phát điện đồng bộ*

Tụ điện đồng bộ

Động cơ điện đồng bộ trong điều kiện kích thích dư, vận hành với hệ số công suất sớm pha. Động cơ điện đồng bộ được dùng trong các nhà máy đòi công suất lớn để cải thiện hệ số công suất toàn phần.

Khi không tải với tổn thất không đáng kể, động cơ điện vận hành với:

$$\delta = 0 \quad \text{(pt (8.42))}$$

nghĩa là E_f và V_t cùng pha. Từ sơ đồ pha (Hình 8.35) động cơ điện có:

Dòng điện hệ số công suất zero sớm pha:

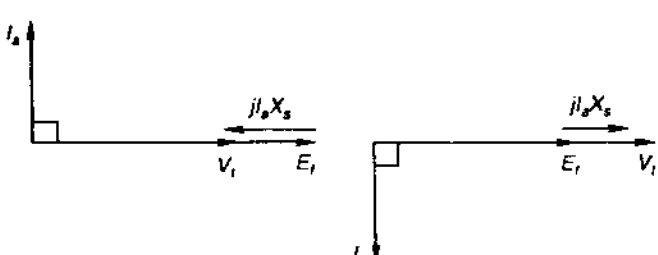
$$I_a = \frac{E_f - V_t}{X_s} \quad (E_f > V_t, \text{ kích thích dư})$$

Dòng điện hệ số công suất zero trễ pha:

$$I_a = \frac{V_t - E_f}{X_s} \quad (E_f < V_t, \text{ kích thích thiếu})$$

Vì thế động cơ đồng bộ không tải được xem như là tương tự tụ điện hoặc cuộn cảm biến thiên do sự kích thích thay đổi. Máy điện hoạt động trong điều kiện đó (động cơ không tải hoặc tải nhẹ) là tụ điện đồng bộ, được ứng dụng trong các hệ thống công suất tích hợp lớn để cải thiện hệ số công suất trong điều kiện tải nặng, và để giảm hệ số công suất khi tải nhẹ, cho phép điều khiển điện áp của hệ thống công suất trong các giới hạn hợp lý.

Ví dụ 8.4: Động cơ nối Δ, 3300V có điện kháng đồng bộ trên mỗi pha (Δ) là 18 Ω, vận hành với hệ số công suất sớm pha là 0.707, tiêu thụ điện 800 kW từ nguồn chính. Hãy tính lực điện động kích thích.



(a) Tụ điện (biến thiên) (kích thích dư)

(b) Cuộn cảm (biến thiên) (kích thích thiếu)

Hình 8.35. *Tụ điện đồng bộ*

Giải. Dựa trên cơ sở nối Y tương đương:

$$V_t = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905 \text{ V}$$

$$X_s = \frac{18}{3} = 6\ \Omega$$

$$I_a = \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300 \times 0.707} = 198 \text{ A}$$

$$I_aX_s = 198 \times 6 = 1188 \text{ V}$$

$\cos\phi = 0.707$ hoặc $\phi = 45^0$ (sớm pha)

Sơ đồ pha được nêu trên Hình 8.36, nếu biết thay tỷ lệ trên sơ đồ, có thể đo hoặc tính E_f.

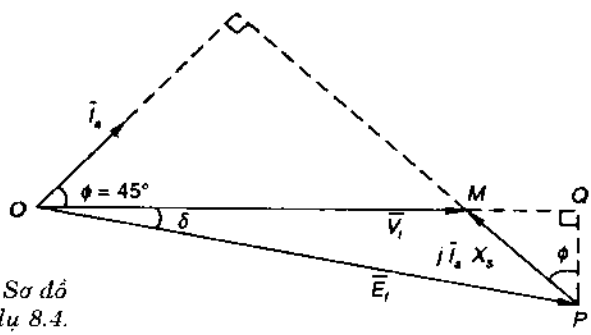
$$\angle PMQ = 90^0 - 45^0 = 45^0$$

$$MQ = PQ = \frac{1188}{\sqrt{2}} = 840$$

$$E_f = OP = \sqrt{(1905 + 840)^2 + (840)^2} = 2871$$

hoặc 4972 V (dây)

$E_f > V_t$, động cơ vận hành với kích thích dư.



Hình 8.36. *Sơ đồ pha của ví dụ 8.4.*

Ví dụ 8.5: Động cơ điện đồng bộ, 50Hz, 24 cực, 3.3 kV, 3 pha nối sao có công suất định mức 1000 kW, và điện kháng đồng bộ trên mỗi pha là 3.24 Ω, bỏ qua điện trở.

a) Động cơ được cấp điện từ thanh góp vô hạn 3.3kV. Điều chỉnh kích thích trường để có hệ số công suất đơn vị ở tải định mức. Hãy tính moment và công suất cực đại động cơ với sự kích thích không đổi ở giá trị này.

b) Động cơ được cấp điện từ máy phát điện đồng bộ 1200 kVA, 3 pha nối sao; 3.3 kV; 2 cực; 50 Hz với điện kháng đồng bộ là 4.55 Ω trên mỗi pha, bỏ qua điện trở. Hãy tính sự kích thích trường của động cơ và máy phát điện khi chúng vận hành ở điện áp định mức và ở hệ số công suất đơn vị, động cơ công suất đủ tải. Sự kích thích của cả hai máy điện đều không đổi, tải động cơ được nâng lên từ từ. Hãy tính công suất và moment cực đại của động cơ, tính điện áp đầu phần ứng khi động cơ cung cấp công suất cực đại đó.

Giải

a. Hình 8.37 là sơ đồ vận hành động cơ ở thanh góp vô hạn:

$$V_t = 3300\sqrt{3} = 1905 \text{ V}$$

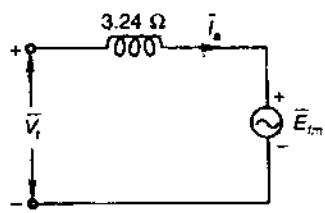
$$I_a = \frac{1000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300 \times 1} = 175 \text{ A}$$

Với $\cos\phi = 1, \quad \phi = 0$

có thể tính:

$$\overline{V}_t = 1905 \angle 0^0 \text{ V}$$

$$\overline{I}_a = 175 \angle 0^0 \text{ A}$$



***Hình 8.37**. Minh họa ví dụ 8.5*

Lực điện động kích thích được tính là:

$$E_{fm} = 1905 \angle 0^0 - j\,175 \angle 0^0 \times 3.24 = 1905 - j\,567$$

$$E_{fm} = 1987 \text{ V}$$

Với kích thích không đổi, động cơ có công suất cực đại là:

$$P_{e,max} = P_{m,max}(\text{tổng})$$
$$= 3 \times \frac{V_t E_f}{x_{sm}} = 3 \times \frac{1905 \times 1987}{3.24 \times 1000} = 3505 \text{kW (3 – pha)}$$

$$\omega_{sm} = \frac{120 \times 50 \times 2\pi}{24 \times 60} = 26.18 \text{ rad/s}$$

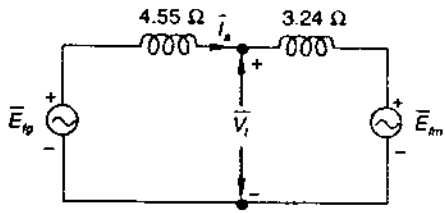
$$T_{max} = \frac{3505 \times 1000}{26.18} = 133.9 \times 10^3 \text{ Nm}$$

b.

Hình 8.38 là sơ đồ máy phát cấp điện cho động cơ. Ở điện áp phần ứng định mức, hệ số công suất đơn vị, đủ tải (tải định mức):

$$\overline{V}_t = 1905 \angle 0^0$$

$$\overline{I}_a = 175 \angle 0^0$$



***Hình 8.38**. Mạch điện máy phát trong ví dụ 8.5*

Như đã tính ở trên: $E_{fm} = 1987$ V

Do đó: $\overline{E}_{fg} = 1905 \angle 0^0 + j\,175 \angle 0^0 \times 4.55 = 1905 + j\,796$

$$E_{fg} = 2065 \text{ V}$$

Tổng điện kháng nối tiếp:

$$X = X_{sm} + X_{sg} = 3.24 + 4.55 = 7.79\ \Omega$$

Công suất cực đại của động cơ :

$$P_{e,max} = P_{m,max}(\text{tổng})$$
$$= 3 \times \frac{E_{fg} \times E_{fm}}{x} = 3 \times \frac{2065 \times 1987}{7.79 \times 1000} = 1580 \text{ kW (3 - pha)}$$

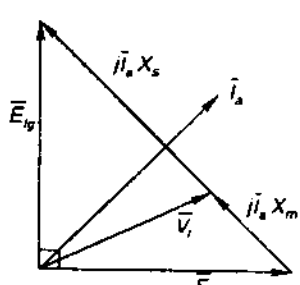
$$T_{max} = \frac{1580 \times 1000}{26.18} = 60.35 \times 10^3 \text{ Nm}$$

Sơ đồ pha ở điều kiện công suất ra cực đại được nêu trên Hình 8.39. Để thuận tiện, có thể xét trường hợp kích thích động cơ:

$$\overline{E}_{fm} = 1987 \angle 0^0 \text{ V}$$

$$\overline{E}_{fg} = 2065 \angle 0^0 \text{ V}$$

$$\overline{I}_a = \frac{\overline{E}_{fg} - \overline{E}_{fm}}{jx_{sq}}$$
$$= \frac{2065\angle 90^0 - 1987\angle 0^0}{j\,7.79}$$



***Hình 8.39**. Sơ đồ pha.*

$$j\bar{I}_a X_{sm} = \frac{-1987 + j\,2065}{j\,7.79} \times j\,3.24 = -826.4 + j\,858.9$$

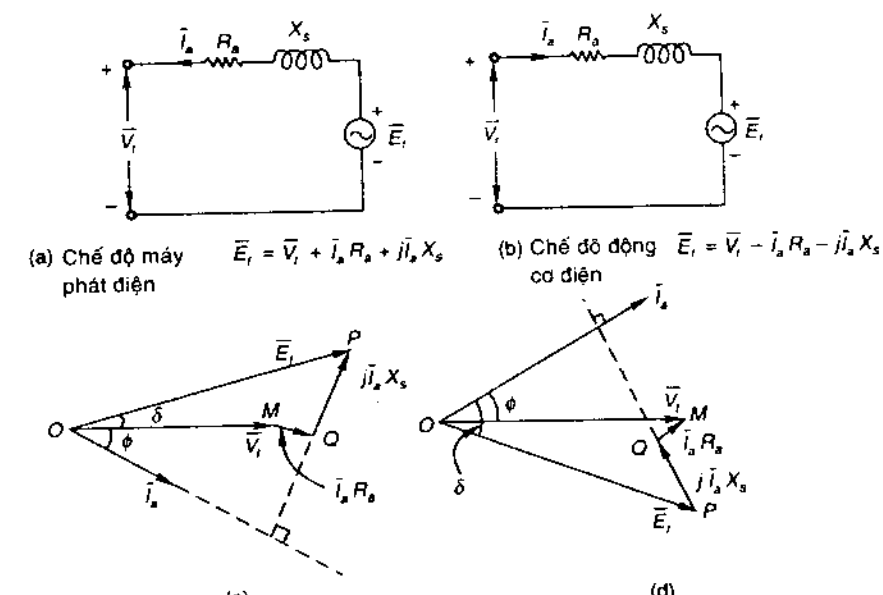
$$\bar{V}_t = \bar{E}_{fm} + j\bar{I}_a X_{sm} = 1987 - 826.4 + j\,858.9 = 1160.6 + j\,858.9$$

$V_t = 1443.85$ hoặc 2500 V (dây)

Lưu ý: $P_{e,\,max}$ trường hợp (b) nhỏ hơp trường hợp (a) vì V_t trong trường hợp (b) là 2500V (điện áp dây) , và 3300V trong trường hợp (a).

Khảo sát điện trở phần ứng

Hình 8.40 (a) và (b) minh họa mô hình mạch máy điện đồng bộ (máy phát và động cơ) có tính đến điện trở phần ứng. Phân tích vận hành có thể được thực hiện bằng cách sử dụng phương trình pha của hai mô hình mạch (Hình 8.40). Để thấy rõ, độ sụt áp I_aR_a được vẽ lớn hơn tỷ lệ thực tế, điện trở phần ứng cần được xét khi tính toán hiệu suất.



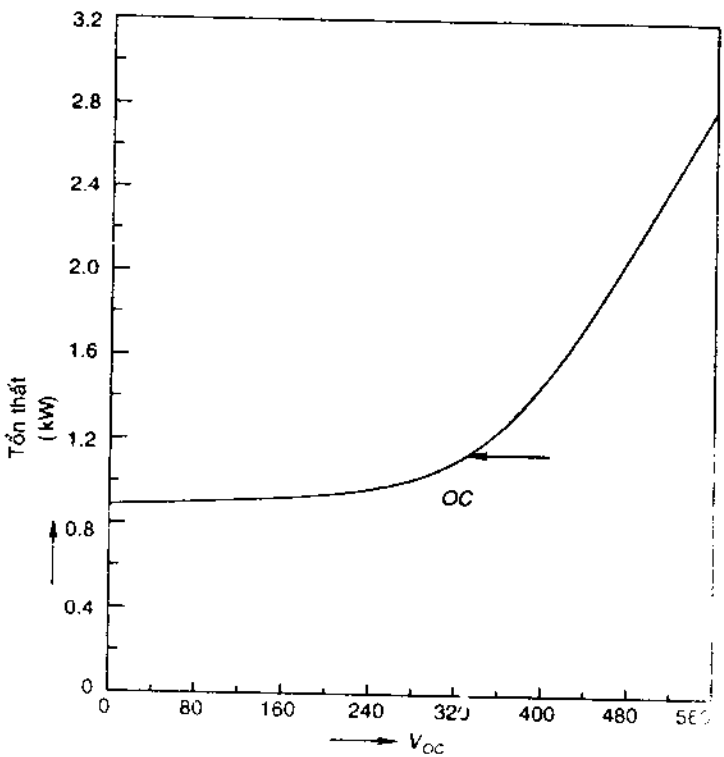
Hình 8.40. *Điện trở phần ứng trong máy điện đồng bộ (chế độ máy phát / động cơ)*

Ví dụ 8.6: Máy phát điện đồng bộ, 50Hz, 60kVA, 400V được khảo sát theo thí nghiệm ngắn mạch và hở mạch, có dữ liệu sau:

	Dòng điện trường	*Điện áp hở mạch (dây)*	*Dòng điện ngắn mạch (dây)*	*Tổn thất ngắn mạch (3-pha)*
Thí nghiệm hở mạch	2.85 A	400 V		
Thí nghiệm ngắn mạch (75^{0}C)	1.21 A	-	108 A	3.95 kW

Tổn thất hở mạch được biểu diễn trên Hình 8.41

Phần ứng (nối Y) có điện trở dc / pha ở 25^{0}C là 0.075 Ω. Máy điện vận hành ở điện áp đầu ra định mức và ở đủ tải (định mức) hệ số công suất 0.8 trễ pha, với dòng điện trường 0.13A. Điện trở trường là 110 Ω ở 75^{0}C. Hãy tính:



Hình 8.41 *Tổn thất hở mạch*

a) Điện trở phần ứng hiệu dụng và trở kháng đồng bộ (bão hòa).

b) Tổn thất đủ tải (tải định mức).

c) Tỷ số giữa điện trở phần ứng hiệu dụng và điện trở dc.

d) Cấp loại tổn thất đủ tải (75^0C)

e) Hiệu sất đủ tải ở 75^0C.

Giải

a) Từ dữ liệu thí nghiệm ngắn mạch:

$$3 \times (108)^2 \times R_a(\text{hiệu dụng}) = 3.95 \times 100$$

$$R_a\ (\text{hiệu dụng}) = 0.113\ \Omega$$

Khi dòng điện ngắn mạch là hàm tuyến tính với dòng điện trường I_f = 2.85A:

$$I_{SC}\ (I_f = 2.85\ A) = 108 \times 2.85 / 1.21 = 254\ A$$

$$Z_s = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{254} = 0.91$$

$$X_s = [(0.91)^2 - (0.113)^2]^{1/2} = 0.903\ \Omega$$

b) $$R_a(dc)\ (75^0C) = 0.075 \times \left(\frac{75 + 273}{25 + 273}\right) = 0.088\ \Omega$$

$$I_a(\text{định mức}) = \frac{60 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = 86.6\ A$$

Tổn thất ngắn mạch ở dòng điện 86.6 A là $3.95 \times (86.6/108)^2 = 2.54$ kW

$$3I_a^2\ R_a(dc) = 3 \times (86.6)^2 \times 0.088 = 1.98\ kW$$

Tổn hao mâm tải = 2.54 - 1.98 = 0.56 kW

c) R_a(hiệu dụng)/ R_a(dc) = 0.113 / 0.088 = 1.284

d) Từ đường cong tổn thất hở mạch (Hình 8.41).

tổn thất quạt gió và ma sát = 0.9 kV.

Tìm lực điện động kích thích ở tải định mức:

$\overline{E}_f = (400/\sqrt{3}) + 86.6 \angle -36.9^0 \times j\,0.903$

E_f = 285 V hoặc 494 V (dây)

Từ đường cong tổn thất hở mạch ở $V_{OC} = E_f$ = 494 V

Tổn thất lõi + tổn thất quạt gió và ma sát = 2.44 kW

Tổn thất lõi = 2.44 - 0.9 = 1.54 kW

Tổn thất trường dây đồng (75^0C) = $(3.1)^2 \times 110$ = 1.06 kW

Tổn thất tải đủ (tải định mức) là tổng các tổn thất sau:

Tổn thất quạt gió và ma sát	= 0.9 kW
Tổn thất lõi	= 1.54 kW
Tổn thất phần ứng (trong điện trở dc)	= 1.98 kW
Tổn thất mâm tải	= 0.56 kW
Tổn thất trường dây đồng	= 1.06 kW
Tổng tổn thất	= 6.04 kW

Lưu ý: tổn thất trong bộ kích thích và biến trở chỉnh trường không được tính đối với máy điện.

e) Công suất ra = 60 x 0.8 = 48 kW

Công suất vào = công suất ra + tổn thất = 48 + 6.04 = 54.04 kW

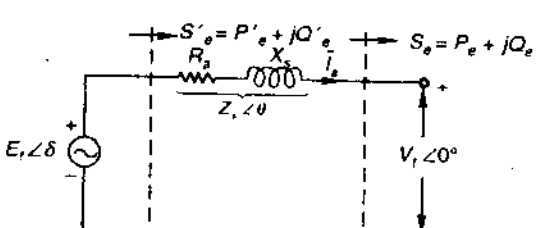
Hiệu suất, η = 48 / 54.04 = 88.8%

Các phương trình truyền công suất

Phần này nghiên cứu sự truyền công suất tác động và công suất phản kháng trong *liên kết máy đồng bộ*. Phương pháp này sẽ phân tích điện trở phần ứng để có kết quả tổng quát.

* *Máy phát điện:*

Hình 8.42 là sơ đồ máy phát điện đồng bộ với $\overline{E}_f$ sớm pha so với $\overline{V}_t$ theo góc δ. Tổng trở đồng bộ là:



Hình 8.42. *Sơ đồ điện máy phát đồng bộ*

$$\overline{Z}_s = R_a + j X_s = Z_s \angle\theta \tag{8.47}$$

Theo tam giác trở kháng trên Hình 8.38:

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X_s}{R_a} \tag{8.48a}$$

$$\alpha = 90^0 - \theta = \tan^{-1}\frac{R_a}{X_s} \tag{8.48b}$$

Dòng điện phần ứng (Hình 8.42) có thể tính theo:

$$\overline{I}_a = \frac{E_f\angle\delta - V_t\angle 0^0}{Z_s\angle\theta} \tag{8.49}$$

Công suất ra dạng phức là:

$$\overline{S}_e = P_e + j Q_e = V_t\angle 0^0\, \overline{I}_a^* \tag{8.50}$$

Thay I_a từ pt (8.49) vào pt (8.50):

$$P_e + j Q_e = V_t \angle 0\left(\frac{E_f\angle\delta - V_t\angle 0}{Z_s\angle\theta}\right) = \frac{V_t E_f}{Z_s}\angle(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{Z_s}\angle\theta \tag{8.51}$$

Cân bằng các phần thực và phần ảo của pt (8.51), biểu thức công suất tác dụng (thực) và phản kháng đầu ra là:

$$P_e(ra) = -\frac{V_t^2}{Z_s}\cos\theta + \frac{V_t E_f}{Z_s}\cos(\theta - \delta) \tag{8.52a}$$

$$Q_e(ra) = -\frac{V_t^2}{Z_s}\sin\theta + \frac{V_t E_f}{Z_s}\sin(\theta - \delta) \tag{8.52b}$$

Công suất cơ đầu vào máy điện là:

$$P_m(\text{vào}) = P_e' = R_e\left[S_e' = E_f\angle\delta\left(\frac{E_f\angle\delta - V_t\angle 0}{Z_s\angle\theta}\right)\right]$$

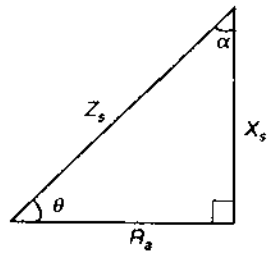
$$= \frac{E_f^2}{Z_s}\cos\theta - \frac{V_t E_f}{Z_s}\cos(\delta + \theta) \tag{8.53}$$

Để thuận tiện, các kết quả trên được xác định theo góc α trong tam giác tổng trở (Hình 8.43) (pt 8.48b), các pt (8.52a), (8.52b), (8.53) có dạng:

$$P_e(ra) = \frac{V_t^2}{Z_s^2}R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s}\sin(\delta + \alpha) \tag{8.54a}$$

$$Q_e(\text{ra}) = \frac{V_t^2}{Z_s^2} X_s + \frac{V_t E_f}{Z_s} \cos(\delta + \alpha) \qquad (8.54b)$$

$$P_m(\text{vào}) = \frac{E_f^2}{Z_s^2} R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s} \sin(\delta - \alpha) \qquad (8.55)$$



Hình 8.43
Tam giác tổng trở

Công suất điện tác dụng (công suất thực) đầu ra P_e (pt 8.54a), được biểu diễn trên đồ thị Hình 8.44, có giá trị cực đại ở $\delta = \theta$ xác định giới hạn ổn định trạng thái tĩnh:

$$P_e(\text{ra})\big|_{max} = \frac{V_t^2 R_a}{Z_s^2} + \frac{V_t E_f}{Z_s} \qquad (8.56)$$

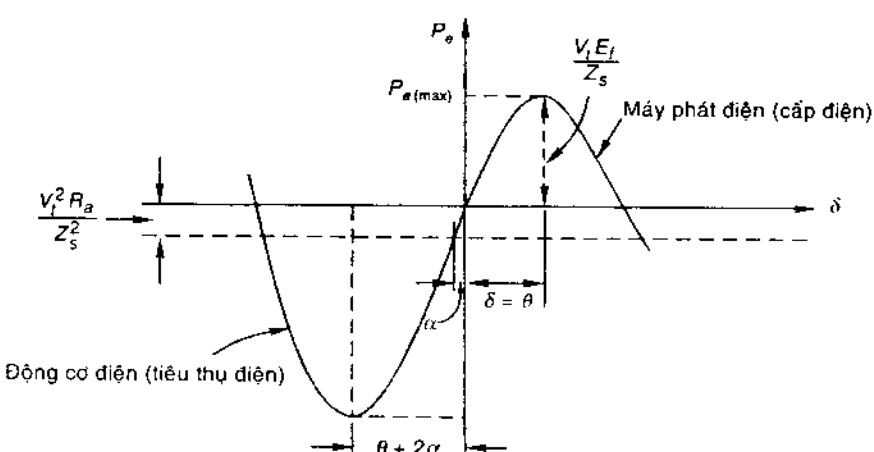
$\theta = 90^0$ nếu bỏ qua điện trở và $\delta = 90^0$ là giới hạn ổn định

Từ pt (8.55)

$$P_m(\text{vào})\big|_{max} = \frac{E_f^2 R_a}{Z_s^2} + \frac{V_t E_f}{Z_s}; \text{ ở } \delta = 90^0 + \alpha = \theta + 2\alpha \qquad (8.57)$$

Từ pt (8.57), góc $\delta > \theta$, công suất cơ đầu vào cực đại đối với máy phát điện sẽ trong vùng không ổn định.

Khi bỏ qua điện trở phần ứng, các pt (8.54a), (8.54b), (8.55) và (8.56) có dạng đơn giản:



Hình 8.44. *Công suất máy điện đồng bộ*

$$P_e(\text{ra}) = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \tag{8.58a}$$

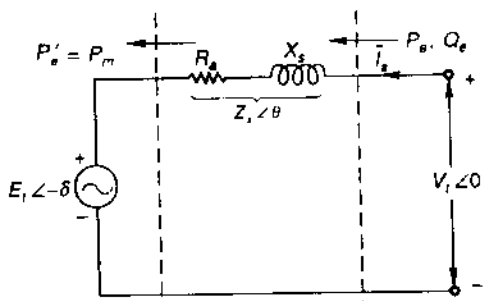
$$Q_e(\text{ra}) = \frac{V_t^2}{X_s} + \frac{V_t E_f}{X_s} \cos \delta \tag{8.58b}$$

$$P_m(\text{vào}) = P_e(\text{ra}) = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \tag{8.58c}$$

$$P_e(\text{ra})\big|_{max} = P_m(\text{vào})\big|_{max} = \frac{V_t E_f}{X_s}; \text{ ở } \delta = 90^0 \tag{8.58d}$$

* *Động cơ điện:*

Hình 8.45 minh họa sự vận hành của động cơ đồng bộ. Góc δ, trễ pha giữa E_f và V_t, được xác định là dương. Chiều biến đổi công suất là cung cấp điện năng cho động cơ điện, cơ năng ra khỏi máy điện.



Hình 8.45. *Vận hành động cơ đồng bộ*

Đối với vận hành động cơ, đổi dấu góc δ tương ứng trong các phương trình (8.54a), (8.54b) và (8.55):

$$P_e(\text{vào}) = -P_e(\text{ra}) = \frac{V_t^2}{Z_s^2} R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s} \sin(\delta - \alpha) \tag{8.59a}$$

$$Q_e(\text{vào}) = -P_e(\text{ra}) = \frac{V_t^2}{Z_s^2} X_s - \frac{V_t E_f}{Z_s} \cos(\delta - \alpha) \tag{8.59b}$$

$$P_m(\text{ra}) = -P_m(\text{vào}) = \frac{E_f^2}{Z_s^2} R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s} \sin(\delta + \alpha) \tag{8.60}$$

Công suất cơ đầu ra cực đại được tính từ phương trình (8.60):

$$P_m(\text{ra})\big|_{max} = -\frac{E_f^2}{Z_s^2} R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s} \tag{8.61}$$

Sự cực đại này xảy ra ở $\delta = \theta$ được gọi là điểm giới hạn ổn định tĩnh. Từ phương trình (8.59a), công suất điện đầu vào cực đại xảy ra ở $\delta = \theta + 2\alpha$, nằm ngoài giới hạn ổn định. Bạn nên so sánh các kết quả này với máy phát điện.

Trong trường hợp điện trở không đáng kể:

$$P_e(\text{vào}) = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \tag{8.62a}$$

$$Q_e(\text{vào}) = \frac{V_t^2}{X_s} - \frac{V_t E_f}{X_s} \cos \delta \tag{8.62b}$$

$$P_m(\text{ra}) = P_e(\text{in}) = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \tag{8.62c}$$

Đối với vận hành hệ số công suất đơn vị, trong phương trình (8.62b) Q_e = 0 xảy ra khi:

$$V_t = E_f \cos \delta$$

Kết quả này dễ thẩm định từ Hình 8.32 b với sơ đồ pha hệ số công suất đơn vị.

Ví dụ 8.7: Động cơ đồng bộ 400V, 3 pha, nối Δ, có lực điện động kích thích 600V và trở kháng đồng bộ trên mỗi pha là 0.3 + j 6 Ω. Hãy tính công suất ra, hiệu suất, dòng điện dây, và hệ số công suất khi máy điện tạo công suất cơ tổng hợp cực đại. Giả sử tổn thất quạt gió, ma sát, và lõi là 2.4 kW.

Giải

$$Z_s(\text{mắc sao cân bằng}) = \frac{1}{3}(0.3 + j\,6) = 0.1 + j\,2 = 2\angle 87.14^0$$

Đối với công suất cơ cực đại đầu ra:

$$\delta = \theta = 87.14^0 \ (E_f \text{ trễ hơn } V_t)$$

$$V_t = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9 \text{ V}$$

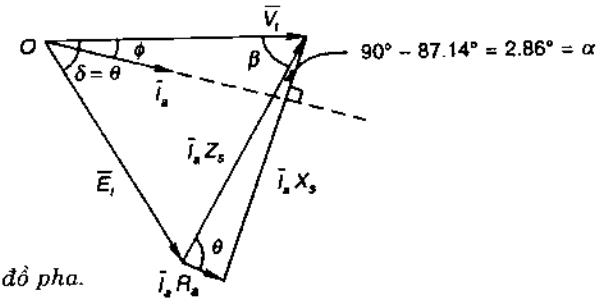
$$E_f = \frac{600}{\sqrt{3}} = 346.4 \text{ V}$$

Từ sơ đồ pha trên Hình (8.46):

$$I_a Z_s = \sqrt{V_t^2 + E_f^2 - 2V_t E_f \cos\theta}$$

$$= \sqrt{(230.9)^2 + (346.4)^2 - 2 \times 230.9 \times 346.4 \times \cos 87.14^0} = 406.6 \text{ V}$$

$$I_a = 203.3 \text{ V}$$



Hình 8.46. *Sơ đồ pha.*

$$\cos\beta = \frac{(230.9)^2 + (406.6)^2 - (346.4)^2}{2 \times 230.9 \times 406.6}$$

$$\beta = 58.31^0$$

Từ sơ đồ pha, tính theo quan hệ hình học:

$\phi = 90^0 - 58.31^0 - 2.86^0 = -28.8^0$

hệ số công suất = cos ϕ = 0.876 trễ pha.

P_e(vào) =230.9 x 203.3 x 0.876 = 41.12 kW

$I_a^2 R_a = (203.3)^2 \times 0.1 = 4.13$ kW (với giá trị hiệu dụng R_a)

$$P_{wf} + P_{core} = \frac{2.4}{3} = 0.8 \text{ kW}$$

$P_m(ra)|_{net} = 41.12 - 4.13 - 0.8 = 36.19$ kW hoặc 108.57 kW (3-pha)

$$\eta = \frac{36.59}{41.12} = 89\%$$

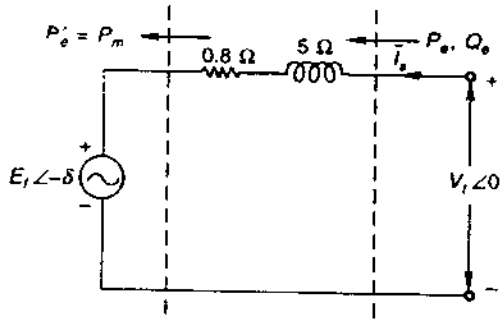
Lưu ý: Ở đây không tính tổn thất trường dây đồng

Ví dụ 8.8: Động cơ đồng bộ 3300V, nối Y, vận hành với điện áp đầu dây phần ứng không đổi và sự kích thích không đổi. Trở kháng đồng bộ là 0.8 + j 5Ω Được vận hành ở hệ số công suất 0.8 sớm pha khi điện nguồn chính cung cấp là 800 kW. Tìm hệ số công suất khi điện vào tăng đến 1200 kW, sự kích thích không đổi.

Giải

Trên Hình 8.47 là sơ đồ mạch của động cơ:

$$Z_s = 0.8 + j\,5 = 5.06 \angle 81^0; \quad \alpha = 9^0$$



Hình 8.47. *Mạch điện vận hành động cơ đồng bộ*

$$V_t = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905 \text{ V}$$

P_e (vào) = 800/3 = 266.7 kW (trên mỗi pha)

Cos ϕ = 0.8 (sớm pha)

Q_e(vào) = - P_e(vào) tan ϕ = - 200 kVAR

Chú ý, Q_e (vào) có giá trị âm vì hệ số công suất sớm pha.

Từ phương trình (8.59a) và (8.59b):

$$P_e(\text{vào}) = \frac{V_t^2}{Z_s^2} R_a + \frac{V_t E_f}{Z_s} \sin(\delta - \alpha) \qquad \text{(i)}$$

$$Q_e(\text{vào}) = \frac{E_f^2}{Z_s^2} X_s - \frac{V_t E_f}{Z_s} \cos(\delta - \alpha) \qquad \text{(ii)}$$

Thay các trị số:

$$266.7 \times 1000 = \frac{(1905)^2 \times 0.8}{(5.06)^2} + \frac{(1905)E_f}{5.06} \sin(\delta - \alpha)$$

$$-200 \times 1000 = \frac{(1905)^2 \times 0.5}{(5.06)^2} + \frac{(1905)E_f}{5.06} \cos(\delta - \alpha)$$

Đơn giản phương trình:

$E_f \sin(\delta - \alpha) = 407.2$

$E_f \cos(\delta - \alpha) = 2413.6$

Từ đó: $E_f = 2447.7$ V

Trong điều kiện vận hành mới:

$$P_e(\text{vào}) = 1200/3 = 400 \text{ kW}$$

Thay trị số vào (i):

$$400 \times 1000 = \frac{(1905)^2 \times 0.8}{(5.06)^2} + \frac{(1905) \times (2447.7)}{5.06} \sin(\delta - \alpha)$$

Hoặc $\sin(\delta - \alpha) = 0.31$ hay $\delta - \alpha = 180^0$

Phương trình (ii) dùng để tìm Q_e với $(\delta - \alpha) = 18^0$.

$$Q_e = \frac{(1905)^2 \times 5}{(5.06)^2} - \frac{1905 \times 2447.7}{5.06} \cos 18^0 = -167.7 \text{ kVAR}$$

Hệ số công suất = $\cos(\tan^{-1} Q_e / P_e) = \cos(\tan^{-1} 167.7/400) = 0.92$ sớm pha

Đường cong vận hành máy phát điện đồng bộ

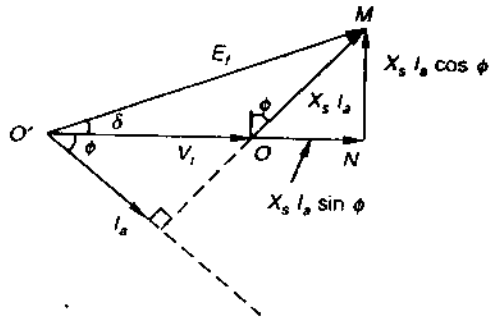
Đường cong vận hành máy phát điện đồng bộ xác định các biên vận hành an toàn. Phạm vi thay đổi công suất được qui định trên máy điện là:

1. Tải MVA không được vượt quá định mức máy phát điện. Giới hạn này phải tính đến sự phát nhiệt của stator.
2. Tải MW không được vượt quá định mức turbine tính theo MVA (định mức) x hệ số công suất (định mức).
3. Máy phát phải vận hành an toàn cách biên ổn định tĩnh ($\delta = 90^0$), có thể đặt giới hạn cực đại cho phép theo giá trị δ.
4. Dòng điện trường cực đại không thể vượt quá giá trị xác định, được qui định bởi nhiệt độ rotor.

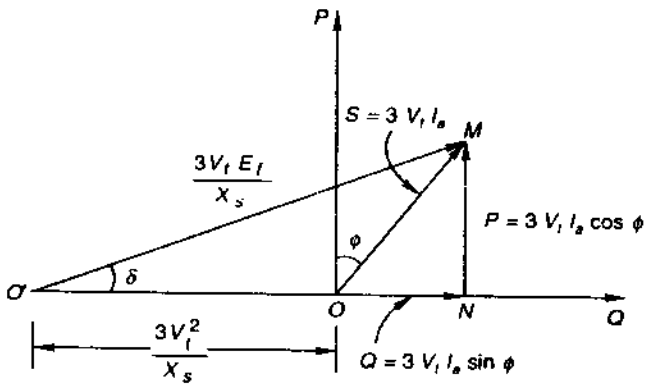
Để vẽ đường cong này của máy phát điện đồng bộ, thường sử dụng sơ đồ pha (Hình 8.48), với điện trở phần ứng không đáng kể. Sau khi nhân giá trị điện áp của mỗi pha với $(3V_t/X_s)$, tam giác công suất dạng phức (với giá trị 3 pha) OMN với các giá trị

$$OM = S(VA);\ NM = P(W);\ ON = Q(VAR).$$

Q là dương do hệ số công suất trễ pha, ϕ là góc giữa OM và trục P, cần đổi các giá trị đó theo đơn vị MVA. MW, MVAR.



***Hình 8.48**. Sơ đồ pha cơ bản.*



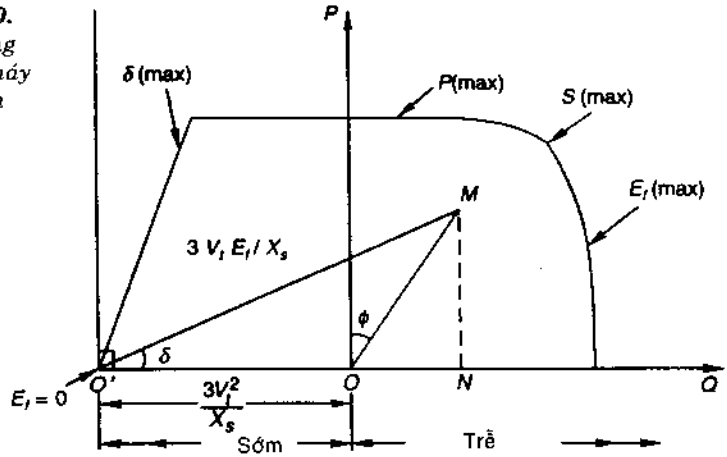
***Hình 8.49**. Sơ đồ pha dạng phức*

Vận hành S không đổi nằm trên vòng tròn tâm O bán kính OM. Vận hành P không đổi nằm trên đường song song với trục P. Vận hành kích thích không đổi (F_f) nằm trên vòng tròn tâm O', bán kính O'M ($3V_tE_f/X_s$). Vận hành hệ số công suất (pf) không đổi nằm trên đường bán kính đi qua O.

Với các giới hạn trên của S, P và E_f (dòng điện trường), các biên đường cong công suất được vẽ trên Hình 8.50. Giới hạn bên trái được xác định theo δ (max), giá trị vận hành an toàn từ điểm ổn định.

Do sự vận hành kích thích cực tiểu tương ứng với $\delta = 90^0$, sự vận hành máy điện theo giới hạn an toàn từ E_f (cực tiểu) do δ (max) xác định.

Đường cong công suất động cơ điện đồng bộ có thể được vẽ tương tự và ở nửa dưới của mặt phẳng PQ với vùng trễ pha và sớm pha được hoán đổi cho nhau.



Hình 8.50. *Đường cong công suất máy phát điện đồng bộ*

Ví dụ 8.9. Từ mô hình mạch (Hình 8.42) và điện trở phần ứng không đáng kể, hãy rút ra biểu thức công suất tác dụng (thực) và công suất phản kháng đầu ra của máy phát điện đồng bộ. Hãy vẽ quĩ tích kVA cực đại không đổi và dòng điện trường cực đại không đổi. Giả sử máy điện vận hành ở điện áp định mức không đổi.

Giải

Mô hình mạch có điện trở phần ứng không đáng kể được vẽ lại trên Hình 8.51 a.

$$\bar{I}_a = \left(\frac{E_f\angle\delta - V_t\angle 0^0}{j X_s}\right)$$

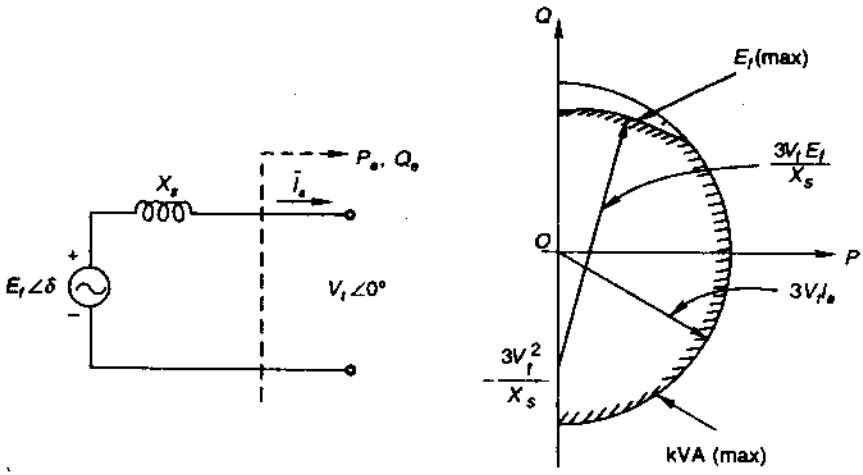
$$\bar{S}_e = P_e + j Q_e = V_t\angle 0^0 \bar{I}_a = V_t\left(\frac{E_f\angle\delta - V_t}{j X_s}\right) = \frac{V_t E_f}{X_s}\angle(90^0 - \delta) - \frac{V_t^2}{X_s}\angle 90^0$$

$$S_e^2 = (V_t I_a)^2 = P_e^2 + Q_e^2 \qquad \text{(i)}$$

$$P_e = R_e(\bar{S}_e) = \frac{V_t E_f}{X_s}\sin\delta \qquad \text{(ii)}$$

$$Q = I_m(\bar{S}_e) = -\frac{V_t^2}{X_s} + \frac{V_t E_f}{X_s}\cos\delta \qquad \text{(iii)}$$

$$\left(Q + \frac{V_t^2}{X_s}\right)^2 = \frac{V_t E_f}{X_s}\cos\delta \qquad \text{(iv)}$$



(a) Sơ đồ mạch

(b) Quỹ tích E_f

***Hình 8.51**. Sơ đồ mạch và quỹ tích E_f theo ví dụ 8.9.*

Bình phương (ii) và (iii) rồi cộng lại:

$$P_e^2 + \left(Q_e + \frac{V_t^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{V_tE_f}{X_s}\right)^2 \qquad \text{(v)}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \qquad \text{(vi)}$$

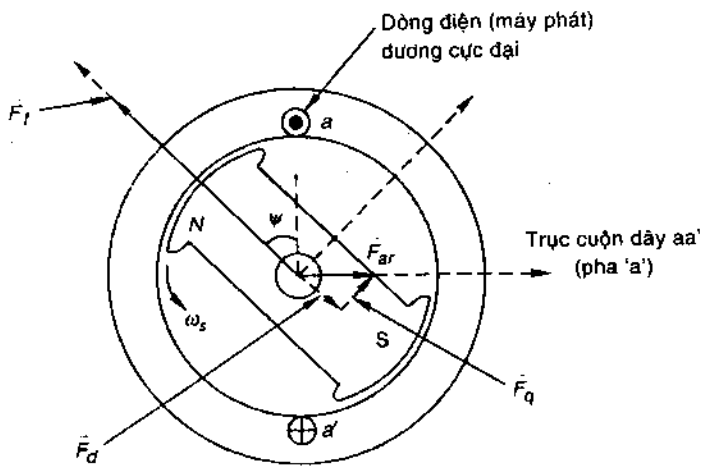
$$P^2 + \left(Q + \frac{3V_t^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3V_tE_f}{X_s}\right)^2 \qquad \text{(vii)}$$

Phương trình (vi) cho thấy quĩ tích của S không đổi là vòng tròn trên mặt phẳng PQ với bán kính $3V_tI_a$ và tâm ở gốc tọa độ.

Phương trình (vii) cho biết quĩ tích E_f không đổi là vòng tròn bán kính $\frac{3V_tE_f}{X_s}$ và tâm là điểm ($P = 0$, $Q = -\frac{V_t^2}{X_s}$), với giả định V_t không đổi. Các vòng tròn này được vẽ trên Hình 8.51 (b) với kVA (cực đại) và E_f (cực đại). Hai vòng tròn này xác định giới hạn nhiệt phần ứng (I max) và giới hạn nhiệt của trường kích thích (E_f (max)) tương ứng.

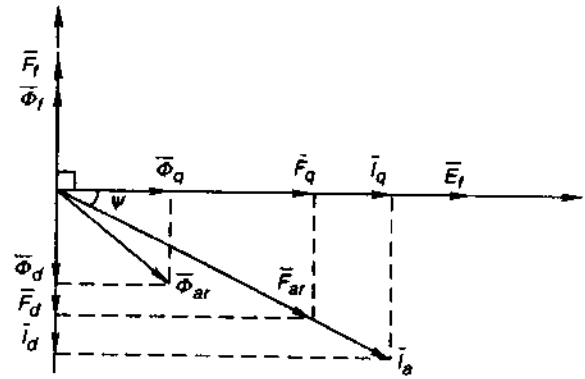
Máy điện đồng bộ cực lồi - mô hình hai phản kháng

Trong máy điện đồng bộ cực ẩn, từ thông (do lực [illegible] tạo nên) độc lập với vị trí giữa trục lực từ động với trục của lu[illegible] Trong máy điện cực lồi (Hình 8.52) sóng lực từ động tạo từ dẫn lớn nhất khi trục lực từ động và trục của cực từ rotor trường khớp nhau (gọi là *trục dọc* hay *trục d*), và nhỏ nhất khi chúng vuông góc nhau (gọi là *trục ngang* hay *trục q*). Cuộn dây quấn trong cực lồi là kiểu quấn tập trung. Sóng từ thông B được tạo ra gần như hình sine do cực từ lồi có hình móng ngựa (khe hở không khí nhỏ nhất ở tâm các cực và tăng dần khi ra xa tâm). Tương tự, sóng F_f có dạng hàm sine và tác động lên khe hở không khí đồng nhất, do đó có thể biểu thị theo vector không gian $\vec{F}_f$. Khi rotor quay, $\vec{F}_f$ luôn luôn hướng theo trục - d.



Hình 8.52. *Máy điện đồng bộ cực lồi*

Hình 8.52 chỉ rõ quan hệ vị trí không gian của $\vec{F}_f$ và $\vec{F}_{ar}$ ở thời điểm dòng điện trong pha a có giá trị dương cực đại và chậm pha hơn $\overline{E}_f$ (lực điện động kích thích được tạo bởi $\vec{F}_f$) theo góc Ψ. Khi Ψ thay đổi, độ dẫn từ của lực từ động phản ứng phần ứng $\vec{F}_{ar}$ thay đổi, do sự thay đổi vị trí không gian so với trục-d. Kết quả là $\vec{F}_{ar}$ tạo ra từ thông phản ứng phần ứng/ cực từ $\overline{\Phi}_{ar}$ thay đổi theo góc Ψ và theo hệ số công suất tải. Giả sử mạch từ tuyến tính, có thể khắc phục trở ngại này bằng cách phân tích $\vec{F}_{ar}$ thành $\vec{F}_d$ (theo trục d) và $\vec{F}_q$ (theo trục q) (Hình 8.52).



Hình 8.53. *Sơ đồ pha.*

Sơ đồ pha tương ứng được nêu trên Hình 8.53, ở đây $\overline{F}_f$ trên trục d và sau 90^0 là $\overline{E}_f$ trên trục q. Các thành phần của $\overline{F}_{ar}$ và $\overline{I}_a$ được biểu thị trên Hình, $\overline{I}_d$ tạo ra $\overline{F}_d$, $\overline{I}_q$ tạo ra $\overline{F}_q$ và $\overline{I}_a$ tạo ra $\overline{F}_{ar}$. $\overline{I}_a$ cùng pha với $\overline{E}_f$.

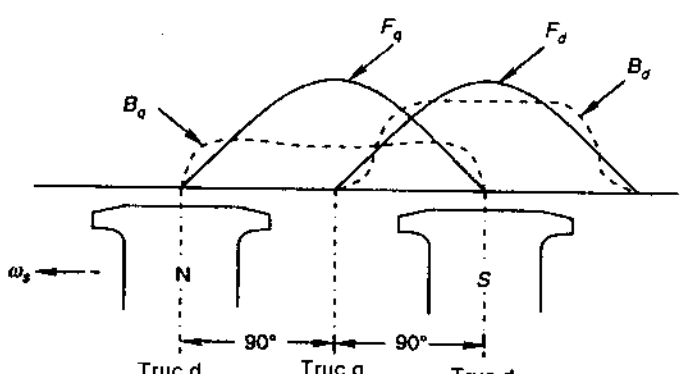
Hình 8.54 chỉ rõ vị trí của F_d, F_q, các cực từ trường, và các sóng từ thông B. Có thể thấy các sóng B có sóng hài không gian thứ ba khá mạnh. Sự phân tích thường dựa trên các sóng cơ sở B_q và B_d, bỏ qua các sóng hài.

Lực từ động phản ứng phần ứng trên trục d và q tạo ra các thành phần từ thông/cực từ tương ứng là Φ_d và Φ_q:

$$\Phi_d = \mathcal{P}_d F_d = \mathcal{P}_d K_{ar} I_d \qquad \text{(cùng pha với } I_d\text{)} \qquad (8.63)$$

và:

$$\Phi_q = \mathcal{P}_q F_q = \mathcal{P}_q K_{ar} I_q \qquad \text{(cùng pha với } I_q\text{)} \qquad (8.64)$$



Hình 8.54. *Sóng từ thông B và các cực từ.*

với: $\mathcal{P}_d$, $\mathcal{P}_q$ = độ từ dẫn của cung cực từ dọc theo trục d/trục q ($\mathcal{P}_d > \mathcal{P}_q$).

K_{ar} = hằng số dây quấn phần ứng

Hình 8.53 còn trình bày các pha từ thông $\overline{\Phi}_d$ và $\overline{\Phi}_q$. Pha phản ứng phần ứng $\overline{\Phi}_{ar}$ không còn cùng pha với $\overline{F}_{ar}$ hay $\overline{I}_a$ vì $\mathcal{P}_d > \mathcal{P}_q$, (pt 6.63 và 8.64), $\overline{\Phi}_{ar}$ chậm pha hay sớm pha hơn $\overline{I}_a$ phụ thuộc vào độ dẫn từ trên các trục d, trục q.

Φ_d và Φ_q cảm ứng ra lực điện động E_d và E_q :

$$\overline{E}_d = -jK_e\overline{\Phi}_d \tag{8.65}$$

$$\overline{E}_q = -jK_e\overline{\Phi}_q \tag{8.66}$$

Với K_e = hằng số lực động động dây quấn phần ứng

Lực điện động tổng hợp cảm ứng trong máy điện là:

$$\overline{E}_r = \overline{E}_f + \overline{E}_d + \overline{E}_q = \overline{E}_f - jK_e\overline{\Phi}_d - jK_e\overline{\Phi}_q$$

Thay $\overline{\Phi}_d$ và $\overline{\Phi}_q$ từ phương trình (8.63) và (8.64):

$$\overline{E}_r = \overline{E}_f - jK_e\mathcal{P}_dK_{ar}\overline{I}_d - jK_e\mathcal{P}_qK_{ar}\overline{I}_q \tag{8.67}$$

Đặt: $X_d^{ar} = K_e\,\mathcal{P}_dK_{ar}$ = điện kháng tương đương của phản ứng phần ứng trên trục d (8.68)

$X_q^{ar} = K_e\,\mathcal{P}_qK_{ar}$ = điện kháng tương đương của phản ứng phần ứng trên trục q (8.69)

Vì $P_d > P_q$ nên: $X_d^{ar} > X_q^{ar}$ (8.70)

Từ pt (8.67) suy ra:

$$\overline{E}_f = \overline{E}_r + jX_d^{ar}\overline{I}_d + jX_q^{ar}\overline{I}_q \tag{8.71}$$

Chú ý: nếu so sánh với máy điện rotor ẩn:

$X_d = X_q = X_{ar}$ *($\mathcal{P}_d = \mathcal{P}_q$ độc lập với chiều không gian* $\overline{E}_{ar}$*)*

$$\overline{E}_f = \overline{E}_r + jX_{ar}(\overline{I}_d + \overline{I}_q) = \overline{E}_r + jX_{ar}\overline{I}_a$$

Đối với máy điện thực:

$$\overline{E}_r = \overline{V}_t + R_a\overline{I}_a + jX_l\overline{I}_q \tag{8.72}$$

Phối hợp hai phương trình (8.71) và (8.72):

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + R_a\overline{I}_a + j(X_d^{ar} + X_l)\overline{I}_d + j(X_q^{ar} + X_l)\overline{I}_q \tag{8.73}$$

Với $X_d^{ar} + X_l = X_d$ = điện kháng đồng bộ trên trục d.

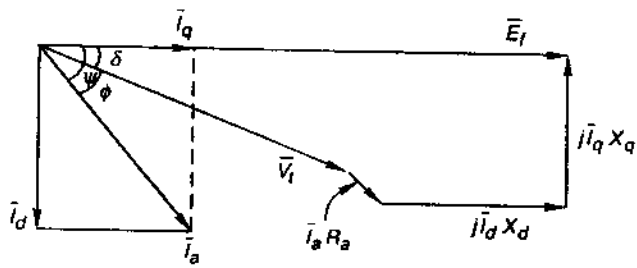
$X_q^{ar} + X_l = X_q$ = điện kháng đồng bộ trên trục q.

Và: $X_d > X_q$ (8.74)

Pt (8.73) có thể viết:

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + R_a\overline{I}_a + j\,X_d\overline{I}_d + j\,X_q\overline{I}_q \qquad (8.75)$$

Sơ đồ pha với dòng điện và điện áp từ pt (8.75) được nêu trên Hình 8.55 với δ là góc giữa E_f (lực điện động kích thích) và điện áp phần ứng V_t.



Hình 8.55. *Sơ đồ pha.*

Phân tích sơ đồ pha

Trên sơ đồ pha (Hình 8.55), với V_t, I_a và Φ đã cho, chưa biết góc Ψ= Φ + δ đối với V_t, I_a và Φ cho trước do đó chưa biết vị trí E_f, các giá trị I_d, I_q cần thiết để vẽ sơ đồ pha này. Hình 8.56 là sơ đồ pha máy phát điện và động cơ điện.

Trên Hình 8.56 a, AC vuông góc với pha dòng điện $\overline{I}_a$ và CB vuông góc với $\overline{E}_f$.

$$I_d = I_a \sin \Psi \qquad (8.76)$$

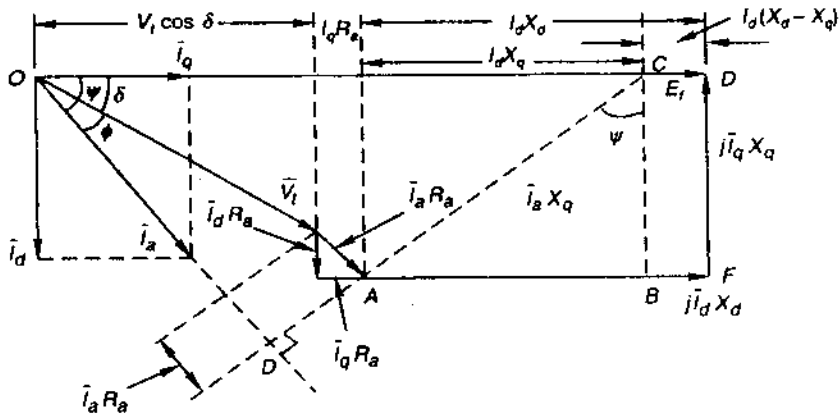
$$I_q = I_a \cos \Psi \qquad (8.77)$$

$$I_a = I_q / \cos \Psi \qquad (8.78)$$

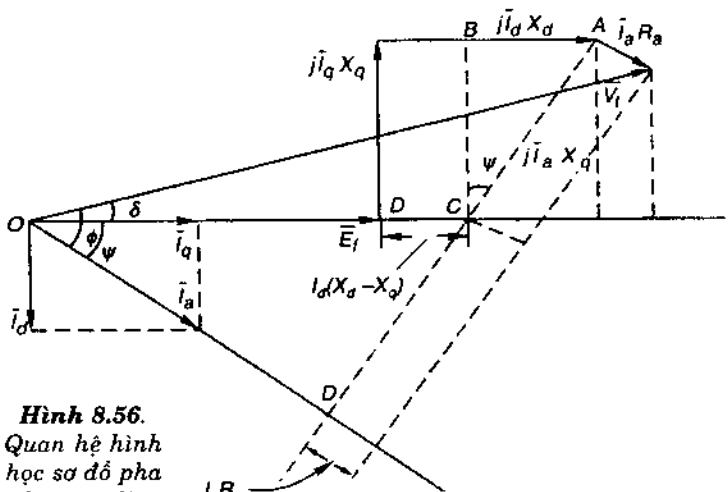
Trong Δ ABC:

$$\cos\psi = \frac{BC}{AC} = \frac{I_q X_q}{AC}$$

$$AC\,\frac{I_q X_q}{\cos\psi} = I_a X_q \qquad (8.79)$$



(a) Máy phát điện hệ số công suất trễ pha



Hình 8.56. *Quan hệ hình học sơ đồ pha của máy điện cực lồi*

(b) Động cơ điện, hệ số công suất sớm pha

Do đó: $AB = I_dX_q$

$$CD = BF = I_d (X_d - X_q) \qquad (8.80)$$

Tìm pha $\overline{E}_f$ bằng cách kéo dài OC đoạn CD đối với máy phát điện và bớt đoạn CD đối với động cơ điện, CD được tính theo phương trình (8.80). Gọi pha OC là $\overline{E}'$:

$$E_f = E' + I_d (X_d - X_q) ; \quad \text{- dương đối với máy phát,}$$
$$\text{- âm đối với động cơ} \qquad (8.81)$$

Ví dụ sau sẽ minh họa các điều trên

Ví dụ 8.10: Máy phát đồng bộ có điện kháng đồng bộ trên trục dọc X_d = 0.8 pu và trên trục ngang X_q = 0.5 pu. Máy điện này cấp đủ tải với điện áp định mức có hệ số công suất 0.8 trễ pha. Hãy vẽ sơ đồ pha và tính lực điện động kích thích.

Hãy tính lực điện động kích thích khi bỏ qua X_q và giả sử điện kháng đồng bộ $X_s = X_d$. Hãy giải thích kết quả này và sự gần đúng từ sơ đồ pha.

Hãy tính góc công suất δ khi có và không có X_q.

Giải

Sơ đồ pha với các ký hiệu được vẽ trên Hình 8.57

$V_t = 1 \angle 0^0$ pu; $I_a = 1$ pu 0.8 trễ pha, $\bar{I}_a = I \angle -36.9^0$ pu

$$\bar{E}' = \bar{V}_t + j\,\bar{I}_a X_q$$
$$= 1 + j\,1 \angle -36.9^0 \times 0.5 = 1 + 0.5 \angle 53.1^0 = 1.30 + j\,0.40 = 1.36 \angle 17.1^0 \text{ pu}$$

Từ sơ đồ pha

$$\delta = 17.1$$
$$\Psi = \phi + \delta = 36.9^0 + 17.1^0 = 54^0$$
$$I_d = I_a \sin \Psi = 1 \times \sin 54^0 = 0.81$$
$$CD = I_d (X_d - X_q) = 0.81\,(0.8-0.5) = 0.243$$
$$E_f = E' + CD = 1.36 + 0.243 = 1.60 \text{ pu}$$

Bỏ qua X_q và giả định $X_s = X_d$, sơ đồ pha là đường nét đứt trên Hình 8.57.

$$\bar{E}'_f = \bar{V}_t + j\,\bar{I}_a X_d = 1 + j1 \angle -36.9^0 \times 0.8 = 1.48 + j\,0.64 = 1.61 \angle 23.4^0$$

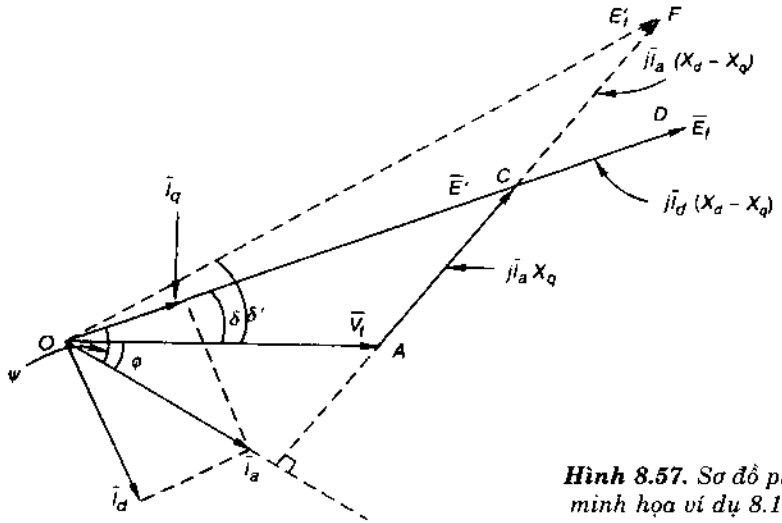
$E_f = 1.61$ pu; $\delta' = 23.4^0$

Lực điện động kích thích được tính gần đúng có sai số là 1/160 hay 0.625%. Từ sơ đồ pha có thể thấy $E_f < E'_f$.

Góc δ cũng sai đáng kể: 23.4^0 thay vì 17.1^0.

Trong tam giác ODC trên Hình 8.56b:

$$\tan \psi = \frac{V_t \sin \phi + I_a X_q}{V_t \cos \phi + I_a R_a} \text{ (máy phát)} \qquad (8.82a)$$



Hình 8.57. *Sơ đồ pha minh họa ví dụ 8.10.*

Để thay cho sự gần đúng trên, từ sơ đồ pha có thể tính góc công suất và lực điện động kích thích như sau:

$$\tan\psi = \frac{V_t \sin\phi - I_a X_q}{V_t \cos\phi - I_a R_a} \text{ (động cơ)} \qquad (8.82b)$$

từ đó tính được góc Ψ, và:

$$\delta = \Psi - \phi \text{ (máy phát)} \qquad (8.83a)$$

$$\delta = \phi - \Psi \text{ (động cơ)} \qquad (8.83b)$$

Lực điện động kích thích từ sơ đồ pha là

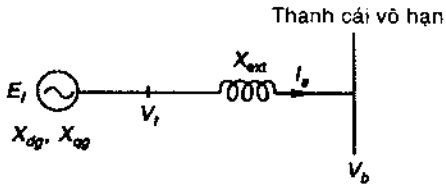
$$E_f = V_t \cos\delta + I_q R_a + I_d X_d \text{ (máy phát)} \qquad (8.84a)$$

$$E_f = V_t \cos\delta - I_q R_a - I_d X_d \text{ (động cơ)} \qquad (8.84b)$$

Chú ý, sin ϕ dương khi hệ số công suất trễ pha và âm khi hệ số công suất sớm pha.

Đặc tuyến góc công suất

Hình 8.58 minh họa *sơ đồ một đường* của máy điện đồng bộ cực lồi được nối với thanh cái vô hạn có điện áp V_b qua đường dây có trở kháng nối tiếp X_{ext} (trên mỗi pha). Tổng điện kháng trên trục d và trục q là:



Hình 8.58. *Sơ đồ nối máy điện với thanh cái vô hạn.*

$$X_d = X_{dg} + X_{ext}$$

$$X_q = X_{qg} + X_{ext}$$

Điện trở phần ứng máy điện và đường dây giả sử bỏ qua.

Hình 8.59 là sơ đồ pha máy phát điện. Công suất thực (tác dụng) cấp lên thanh cái là:

$$P_e = I_d V_b \sin\delta + I_q V_b \cos\delta \tag{8.85}$$

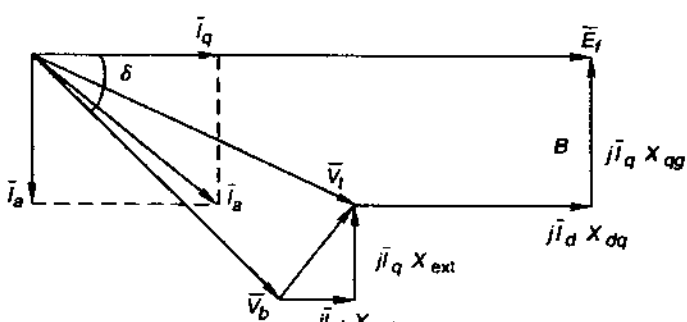
$$I_d = \frac{E_f - V_b \cos\delta}{X_d} \tag{8.86}$$

và

$$I_q = \frac{V_b \sin\delta}{X_q} \tag{8.87}$$

Thay vào pt (8.85):

$$P_e = \frac{E_f V_b}{X_d}\sin\delta + \underbrace{V_b^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q}\sin 2\delta}_{\text{công suất từ trở}} \tag{8.88}$$

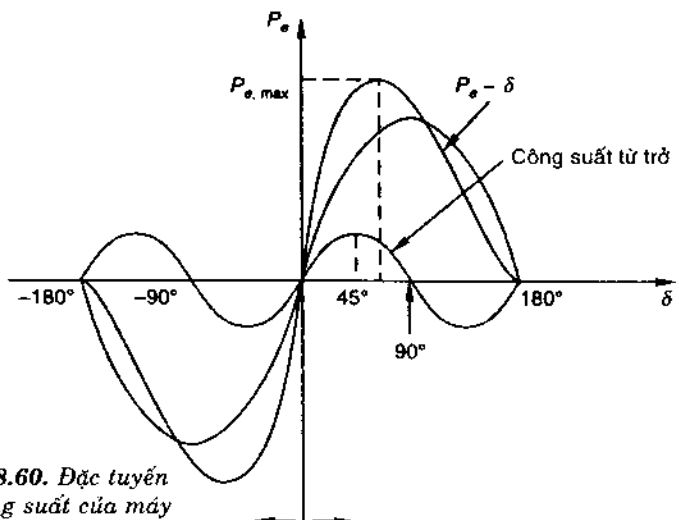


Hình 8.59. *Sơ đồ pha.*

Phương trình (8.88) là biểu thức công suất điện đầu ra của máy phát điện cực lồi. Phương trình này cũng biểu thị công suất cung cấp cho động cơ điện với E_f trễ pha hơn V_b theo góc δ.

Phần thứ hai trong pt (8.88) tương ứng pt (8.42) trong phần máy điện cực ẩn, và là *công suất từ trở* (moment từ trở). Công suất từ trở thay đổi theo sine 2δ và có giá trị cực đại ở $\delta = 45^0$. Công suất từ trở độc lập với sự kích thích trường (kích thích tạo từ trường); khi không có kích thích trường, vẫn có phần công suất này. Động cơ đồng bộ có cực lồi nhưng không có dây quấn kích thích từ trường là *động cơ từ trở*, được dùng trong các ứng dụng vận tốc không đổi, công suất thấp, khi không có đủ không gian để bố trí cuộn kích dc.

Đồ thị góc công suất của phương trình (8.88) dùng cho động cơ cực lồi là đặc tuyến góc công suất (Hình 8.60). Trong đó $P_{e,max} = P_{pull-out}$ khi $\delta < 90^0$ (thường khoảng 70^0) và có giá trị lớn hơn so với máy điện cực ẩn có cùng V_b, E_f và $X_s = X_d$ khi xét công suất từ trở.



Hình 8.60. *Đặc tuyến góc công suất của máy điện đồng bộ cực lồi*

Ví dụ 8.11: Động cơ điện đồng bộ 1500 kW, 3.3 kV, 3 pha nối sao, có điện kháng dọc $X_d = 4.01$ và ngang $X_q = 2.88$ Ω/pha. Các tổn thất không đáng kể.

Hãy tính lực điện động kích thích khi động cơ cấp tải định mức với hệ số công suất đơn vị. Tính công suất cơ cực đại do động cơ cấp ra với kích thích không đổi ở giá trị này.

Giải

$$V_t = 3300\sqrt{3} = 1905 \text{ V}$$

$$\cos\phi = 1; \quad \sin\phi = 0; \quad \phi = 0^0$$

$$I_a = \frac{1500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300 \times 1} = 262.4 \text{ A}$$

Từ pt (8.82b)

$$\tan\psi = \frac{1905 \times 0 - 262.4 \times 2.88}{1905} = -0.397$$

$$\Psi = -21.6^0$$

$$\delta = \phi - \Psi = 0 - (-21.6^0) = 21.6^0$$

$$I_d = I_a \sin\Psi = 262.4 \sin(-21.6^0) = -96.6 \text{ A}$$

$$I_q = I_a \cos\Psi = 262.4 \cos(-21.6^0) = 244 \text{ A}$$

Từ pt (8.84b)

$$E_f = V_t \cos\delta - I_d X_d = 1905 \cos 21.6^0 + 96.6 \times 4.01$$
$$= 2158.6 \text{ V hoặc } 3738.6 \text{ V (dây)}$$

Từ pt (8.88), công suất cơ ra của động cơ là

$$P_m = \frac{E_f V_b}{X_d}\sin\delta + V_b^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q}\sin 2\delta \text{ (mỗi pha)}$$
$$= \frac{2158.6 \times 1905}{4.01 \times 1000}\sin\delta + (1905)^2 \times \frac{4.01 - 2.88}{2 \times 4.01 \times 2.88 \times 1000}\sin 2\delta$$
$$= 1025 \sin\delta + 177.5 \sin 2\delta \quad \text{kW}$$

Đối với công suất cơ ra cực đại

$$\frac{dP_m}{d\delta} = 1025 \cos\delta + 2 \times 177.5 \cos 2\delta = 0$$

Do đó $\delta = 73^0$

$$P_m(\max) = 1025 \sin 73^0 + 177.5 \sin 2 \times 73^0$$
$$= 1079.5 \text{ kW (mỗi pha)} = 3238.5 \text{ kW (3 - pha)}.$$

Nếu bỏ qua cực lồi

$$P_m(\max) = 1025 \text{ kW hoặc } 3075 \text{ kW (3 - pha)}.$$

Sai số khoảng 5%.

Chú ý, từ hai ví dụ 8.10 và 8.11, hiệu ứng cực lồi có thể bỏ qua không gây ra sai số lớn. Tuy nhiên, trong điều kiện kích thích thấp, cực lồi phải được xét trong tính toán (Hình 8.57 và pt (8.88)).

Xác định X_d và X_q - Thí nghiệm trượt

Điện kháng trên trục ngang và trục dọc trong máy điện đồng bộ cực lồi có thể được xác định bằng thí nghiệm trượt. Phần ứng được nối với nguồn điện 3 pha, có điện áp thấp hơn nhiều so với điện áp định mức của máy điện, trong khi rotor chạy ở vận tốc gần đồng bộ, cuộn dây trường (tạo cực từ) để hở mạch (không kích thích) (Hình 8.61a). Do lực điện động kích thích bằng zero, dòng điện mạnh (vượt qua dòng định mức) được tạo trên phần ứng nếu nối với nguồn điện áp định mức.

Dòng điện chạy trong phần ứng tạo nên sóng lực từ động quay với vận tốc đồng bộ (Hình 8.61b). Rotor đang chạy từ gần đồng bộ sang đồng bộ, lực từ động stator chuyển động chậm qua các cực từ ở tốc độ trượt ($n_s \sim n$). Khi lực từ động thẳng hàng với trục dọc d (cực từ), từ thông, Φ_d/cực được tạo thành và có điện kháng hiệu dụng là X_d. Tương tự, khi lực từ động stator thẳng hàng với trục từ hóa q, từ thông là Φ_q/cực được tạo thành và điện kháng máy điện là X_q. Dòng điện phần ứng biến thiên theo chu kỳ gấp đôi tần số trượt, được biểu thị theo dạng sóng dòng điện (Hình 8.61c). Dòng điện hiệu dụng có giá trị cực tiểu khi dòng điện cực đại và giá trị cực đại khi dòng điện cực tiểu, như dạng sóng điện áp (Hình 8.61c). Điện kháng máy điện là:

$$X_d = \frac{V_t(\text{ở } I_a(\min))(\text{dây})}{\sqrt{3}\, I_a(\min)} \tag{8.89}$$

Và:

$$X_q = \frac{V_t(\text{ở } I_a(\max))(\text{dây})}{\sqrt{3}\, I_a(\max)} \tag{8.90}$$

Hiện tượng dòng điện phần ứng đi qua giá trị cực đại và cực tiểu trong suốt thí nghiệm trượt dễ nhận thấy từ các pt (8.86) và (8.87) với $E_f = 0$:

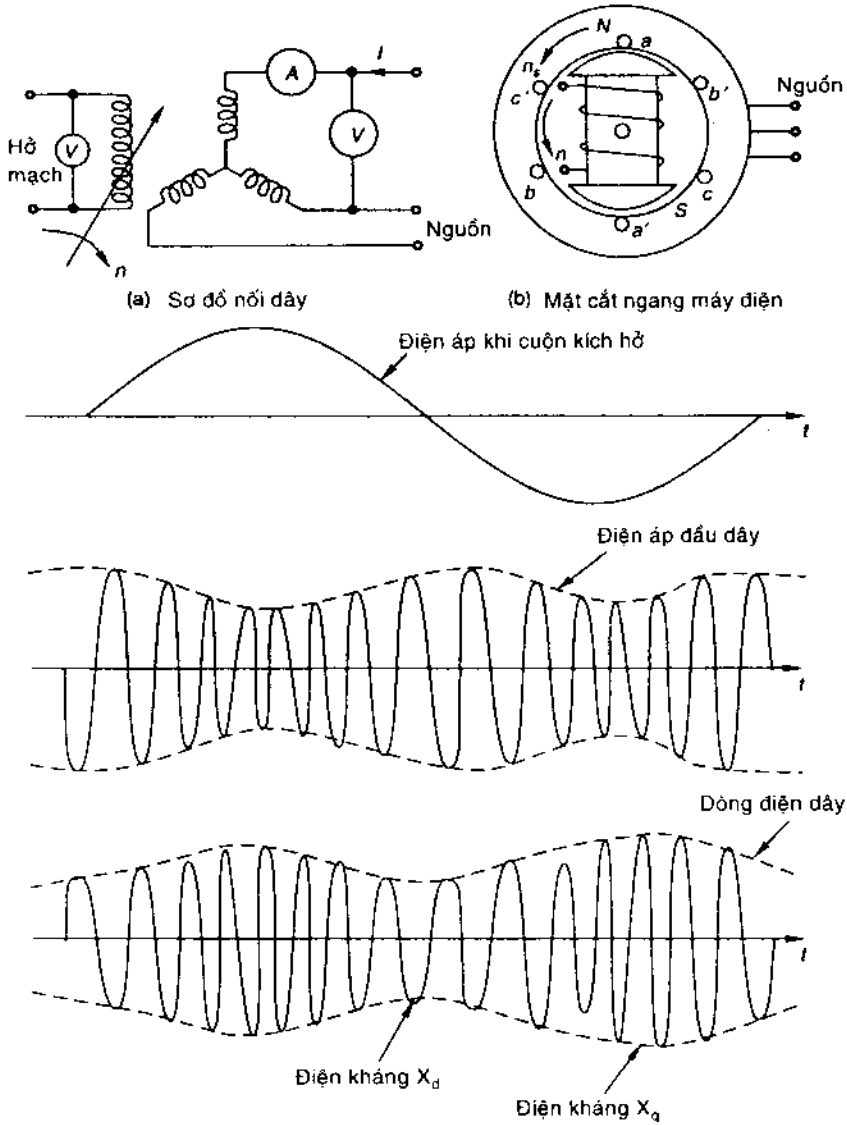
$$I_d = \frac{V_b}{X_d}\cos\delta; \quad I_q = \frac{V_b}{X_q}\sin\delta$$

Khi $\delta = 0^0$ (trục trường khe hở không khí định hướng theo trục d):

$$I_a(\min) = I_d = \frac{V_b}{X_d}; \quad I_q = 0$$

Khi $\delta = 90^0$ (trục trường khe hở không khí định hướng theo trục q):

$$I_a(\max) = I_q = \frac{V_b}{X_q}; \quad I_d = 0$$



(a) Sơ đồ nối dây

(b) Mặt cắt ngang máy điện

(c) Dạng sóng dòng điện và điện áp

Hình 8.61. *Thí nghiệm trượt*

Trong suốt thí nghiệm trượt:

$$V_b = V_t(\text{dây}/\sqrt{3})$$

Quan sát điện áp cảm ứng trong rotor suốt quá trình thí nghiệm trượt, có thể xác định vị trí cực đại/cực tiểu trên dạng sóng dòng điện và điện áp. Khi dòng điện phần ứng tạo nên từ thông chuyển động qua trường rotor sẽ xuất hiện lực điện động cảm ứng gấp đôi tần số trượt. Khi trường rotor thẳng hàng với lực từ động phần ứng, từ hóa liên kết trong rotor cực đại và mức độ thay đổi từ hóa liên kết bằng zero, nghĩa là điện áp trên trường kích thích hở bằng zero, ở thời điểm này là đại lượng X_d của máy điện. Tương tự, X_q được nhận diện tương ứng với điện áp cực đại trong trường hở. Sóng điện áp trên trường hở (nghĩa là trên cuộn dây rotor hở mạch không kích thích) được đối chiếu với sóng điện áp và dòng điện phần ứng (Hình 8.61c).

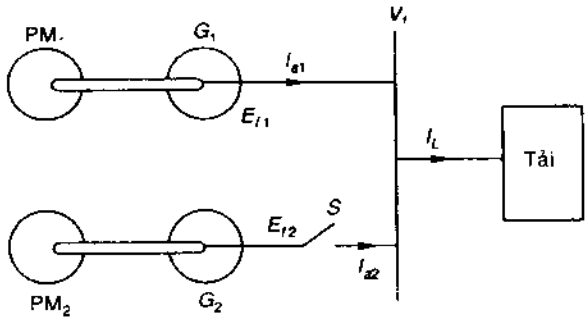
Ampere kế và Volt kế mắc theo sơ đồ trên Hình 8.61(a) sẽ dao động gấp đôi tần số trượt. Độ trượt phải được giữ rất nhỏ, để mức động của đồng hồ không gây ra sai số khi đọc giá trị cực đại và cực tiểu. Có thể có độ chính xác cao hơn khi sử dụng dao động ký.

Vận hành song song các máy điện đồng bộ

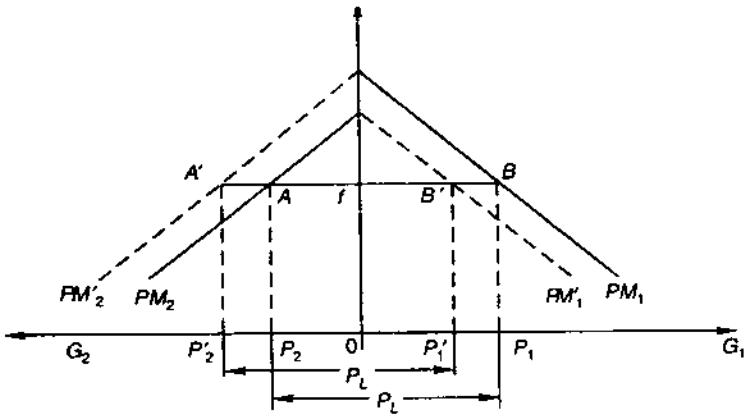
Phần trước đã khảo sát máy điện đồng bộ nối với thanh cái vô hạn. Ở đây sẽ xét sự vận hành song song hai máy phát điện đồng bộ công suất giới hạn. Trong hệ thống điện, các máy phát điện được nối lên các mắt lưới của mạng lưới máy biến áp và đường truyền tải. Lưới điện quốc gia gồm nhiều máy phát điện và đường truyền tải rất dài. Lưới điện phải có độ tin cậy cao, cung cấp liên tục, đầu tư và vận hành phải kinh tế.

Hình 8.62 minh họa hai máy phát điện đồng bộ được nối với động cơ truyền động (quay rotor máy phát điện) để vận hành song song. Sau khi hai máy phát điện đạt đến tốc độ đồng bộ tương ứng, và các dòng điện trường (dòng điện kích thích từ trường) được điều chỉnh để có các điện áp ra gần bằng nhau, sẽ đóng cầu dao S theo các thứ tự đồng bộ hóa. Công suất tác động và phản kháng được cung cấp lên tải chung, được điều khiển tương ứng từ động cơ truyền động và dòng điện trường.

Công suất tác động dùng chung giữa hai máy phát điện song song phụ thuộc vào độ sụt trên đặc tuyến công suất - tần số (vận tốc) của các động cơ truyền động và máy điều tốc. Các đặc tuyến này gần tuyến tính đối với các thay đổi nhỏ về công suất và tần số (định mức) (Hình 8.63). Các đặc tuyến này có thể tăng hoặc giảm bằng cách điều chỉnh điểm đặt của máy điều tốc. Độ lên xuống của đặc tuyến tần số - công suất phải phù hợp với tải giữa máy phát và sự điều chỉnh.



Hình 8.62. *Vận hành song song hai máy điện đồng bộ.*



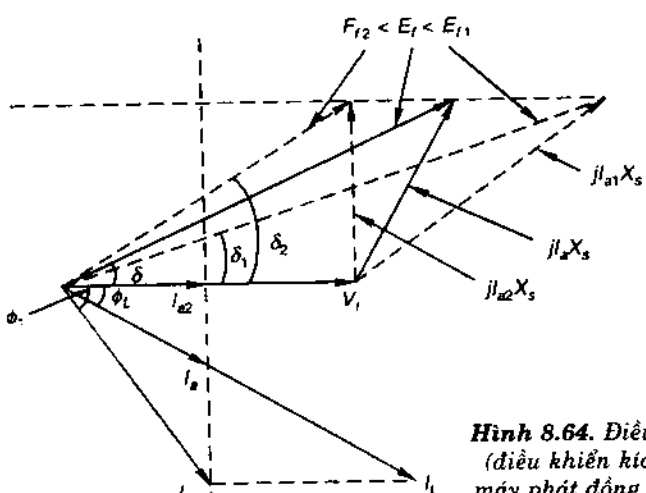
Hình 8.63. *Đặc tuyến tần số - tải của động cơ truyền động và tải chung.*

Đối với đặc tuyến được nêu trên Hình 8.63, tải P_L = AB ở tần số *f* (định mức) được chia thành P_1 và P_2 với $P_1 + P_2 = P_L$. Để tăng tải trên G_2 và giảm tải tương ứng trên G_1, đặc tuyến tần số - công suất của G_2 phải nâng lên bằng cách điều chỉnh bộ điều tốc, và để giữ tần số không đổi đặc tuyến của G_1 phải tức thời hạ thấp. Với sự điều chỉnh này, $P_L = P'_1 + P'_2$ với $P_1 - P'_1 = P'_2 - P_2 = \Delta P$, lượng tải chuyển từ máy phát G_1 sang G_2 bằng cách điều chỉnh bộ điều tốc. Nếu chỉ điều tốc một động cơ truyền động, tần số hệ thống sẽ thay đổi. Trong suốt quá trình điều chỉnh các bộ điều tốc, trong nhất thời tần số tải sẽ tắt dần và điều kiện ổn định tần số tải được thiết lập cho tải phân bố mới.

Các thay đổi kích thích các máy phát điện vận hành song song tác động đến điện áp phần ứng và công suất tải phản kháng, công suất tác động chung

không đổi (các xác lập bộ điều tốc động cơ truyền động không đổi). Đối với hệ thống hai máy phát điện (Hình 8.62), giả sử hai máy phát là đồng nhất, bộ điều tốc được điều chỉnh sao cho tải phân bố bằng nhau và sự kích thích bằng nhau; vận hành với hệ số công suất và dòng điện như nhau (nghĩa là cả hai công suất tác động và phản kháng được chia bằng nhau). Sơ đồ pha theo các điều kiện vận hành này, đồng đều trên mỗi máy (Hình 8.64). Đối với tổng tải đã cho và tải thực sự phân bố bằng nhau, tạo sự kích thích G_1 tăng đồng thời với G_2 giảm, để giữ điện áp đầu ra không đổi. Mỗi máy phát sẽ hoạt động như thế nếu được nối lên thanh cái vô hạn, nghĩa là $E_f \sin \delta$ = hằng số. Với công suất tác dụng trên mỗi máy phát ổn định (mỗi máy một nửa, dòng điện máy phát trên V_t (dòng tác dụng) cũng sẽ không đổi, kết quả là hệ số công suất cuả máy G_1 giảm và của máy G_2 tăng (hệ số công suất đơn vị). G_1 cung cấp kVAR đến tải lớn hơn G_2. Đây là cách phân bố tải phản kháng giữa các máy phát có điều khiển. Nếu sự kích thích chỉ ở một máy phát được nâng lên (hay hạ thấp), điện áp đầu ra sẽ tăng (hoặc giảm) trong khi máy phát này được phân chia phần tải kVAR lớn hơn (nhỏ hơn). Đối với sự nâng điện áp (hoặc hạ thấp) V_t, mà không cần thẩm định sự phân chia kVAR, sự kích thích cả hai máy điện phải được nâng lên (hay giảm xuống). Sự kích được điều khiển tự động bằng bộ ổn định điện áp tác động lên dòng điện trường của máy phát điện.

Bộ điều tốc động cơ truyền động và bộ ổn áp máy phát điện được giả định độc lập với nội dung nêu trên. Tuy nhiên, chúng được ghép yếu vì có tổn thất trong máy phát. Sự độc lập của vòng điều khiển được giả định làm việc tốt.



Hình 8.64. *Điều khiển kVAR (điều khiển kích thích) của máy phát đồng bộ song song.*

Dao động đuổi pha (lắc pha) trong máy điện đồng bộ

Sự vận hành máy điện đồng bộ trong các điều kiện ổn định ở vận tốc không đổi được khảo sát. Trong các điều kiện đó:

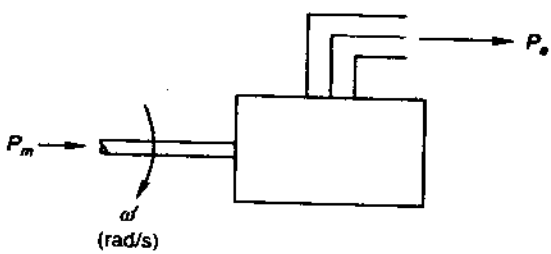
$$P_e = P_m \tag{8.91}$$

Với P_e: công suất điện (ra) của máy điện.

P_m: Công suất cơ (vào) của máy điện.

Giả sử tổn thất máy điện không đáng kể, các công suất này được biểu thị trên Hình 8.65. Nếu sự cân bằng công suất này bị nhiễu (chẳng hạn công suất cơ tăng nhẹ), máy điện trải qua trạng thái cơ - điện động:

$$P_m - P_e = P_a = \text{công suất tăng}$$



***Hình 8.65**. Dòng công suất trong máy điện đồng bộ*

Vì không có tổn thất máy điện, nên công suất tăng này được quán tính rotor hấp thu rotor theo biểu thức:

$$P_m - P_e = \frac{1}{2} I\alpha' \tag{8.92}$$

với I = moment quán tính rotor (kgm^2)

α' = gia tốc rotor (rad/s^2)

Nếu công suất tính bằng MW, pt (8.92) được viết thành:

$$P_m - P_e = M\alpha = M\frac{d^2\theta}{dt^2} \tag{8.93}$$

với $\alpha = \dfrac{d^2\theta}{dt^2}$ = gia tốc rotor, $^0/s$ (độ/ giây)

M = hằng quán tính, MJs/ độ; P_e, P_m tính theo MW.

Để thuận tiện khi đo góc rotor theo hệ tọa độ quay đồng bộ, đặt:

$$\delta = \theta - \omega_s t \tag{8.94}$$

với ω_s = vận tốc đồng bộ (độ/ s)

δ = chuyển vị góc rotor từ hệ tọa độ đồng bộ là góc giữa E_f và V_t (sớm pha)

Lấy đạo hàm cấp hai pt (8.94):

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \tag{8.95}$$

Phương trình (8.92) có dạng:

$$P_m - P_e = M\frac{d^2\delta}{dt^2} \tag{8.96}$$

Có thể thấy P_e bị chi phối bởi đặc tuyến góc - công suất của máy điện, nghĩa là:

$$P_e = \frac{V_t E_f}{X_s}\sin\delta = P_{e,max}\sin\delta \tag{8.97}$$

$$P_m - P_{e,max}\sin\delta = M\frac{d^2\delta}{dt^2} \tag{8.98}$$

Đó là phương trình vi phân cấp hai không tuyến tính, là *phương trình dao động đàn hồi*.

Khi vận hành máy điện trong điều kiện ổn định:

$$P_{mo} = P_{eo} = P_{e,\,max}\sin\delta_0 \tag{8.99}$$

Với công suất cơ vào không đổi ở P_{mo}, góc δ phân bố từ δ_0 đến $\delta_0 + \Delta\delta$:

$$P_e = P_{e,max}\sin(\delta_0 + \Delta\delta) \approx P_{e,max}\sin\delta_0 + \left(\frac{\partial P_e}{\partial\delta}\right)_0 \Delta\delta$$

$$P_{eo} + \Delta P_e = P_{e,max}\sin\delta_0 + \left(\frac{\partial P_e}{\partial\delta}\right)_0 \Delta\delta$$

$$\Delta P_e = \left(\frac{\partial P_e}{\partial\delta}\right)_0 \Delta\delta \tag{8.100}$$

với $\left(\frac{\partial P_e}{\partial\delta}\right)_0$ = độ dốc của đặc tuyến góc - công suất ở điểm vận hành, là *hệ số đồng bộ hóa* hay *độ cứng vững* của máy điện.

Thay vào pt (8.98)

$$-\Delta P_e = -\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 \Delta\delta = M\frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2}$$

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 \Delta\delta = 0$$

$$\left[Mp^2 + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0\right]\Delta\delta = 0 \qquad (8.101)$$

Số gia góc $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ bị chi phối bởi phương trình vi phân cấp hai tuyến tính (8.101), có các nghiệm đặc tính:

$$p = \pm\left[\frac{-(\partial P_e / \partial \delta)_0}{M}\right]^{1/2} \qquad (8.102)$$

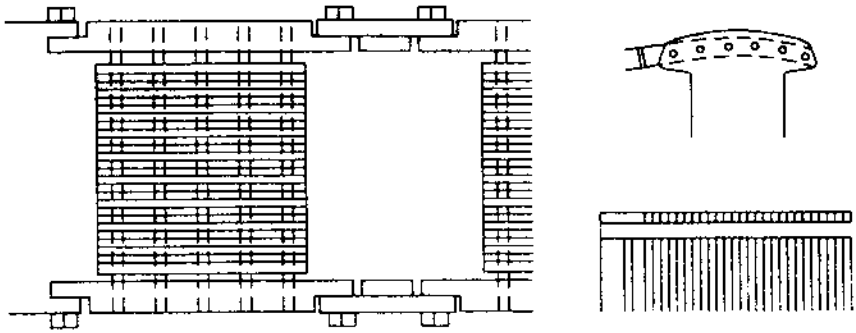
$$\left(\frac{\partial P_e}{\partial \delta}\right)_0 = P_{e,max}\cos\delta_0 \qquad (8.103)$$

Từ pt (8.101) $(\partial P_e/\partial\delta)_0 > 0$ khi $\delta < 90^0$, máy điện vận hành trong vùng ổn định, nghiệm của pt (8.101) là cặp liên hợp phức, biểu thị ứng xử dao động theo hàm sine, ở điểm vận hành (P_{e0}, δ_0).

Ứng xử dao động của máy điện đồng bộ ở điểm vận hành bắt nguồn từ độ cứng của máy điện (liên kết đồng bộ giữa trường stator và rotor có tác dụng kiểu đàn hồi). Tác dụng dao động này được gọi là lắc pha hay đuổi pha, là tác động không mong muốn - Công suất điện cấp cho thanh cái (đến nguồn điện chính) và moment trên trục rotor dao động gây ra tác động mỏi trên trục máy điện. Để giảm sự lắc pha đến mức cho phép, các dao động này phải tắt dần (tỷ lệ với $d\delta/dt$) trong pt (8.98). Lượng nhỏ tắt dần được đóng góp từ các tổn thất hệ thống (cả điện và cơ) luôn luôn có trong máy điện nhưng không đủ để triệt sự lắc pha. Cần phải có cuộn dây triệt hiện tượng này trong máy điện.

Các thanh triệt dao động lắc pha

Trong máy điện đồng bộ cực lồi, để triệt dao động lắc pha, ở hai đầu cực từ chính có các thanh ngắn mạch được nối qua các vành tròn ở cả hai đầu (Hình 8.66). Khi rotor dao động, các thanh chuyển động theo từ thông trong khe hở không khí, từ thông cảm ứng lực điện động và có dòng điện cảm ứng chạy trong các thanh ngắn mạch này. Dòng điện trong các thanh tạo ra moment, và theo định luật Lenz, moment này ngược với chiều chuyển động rotor. Kết



Hình 8.66. *Các thanh ngắn mạch trong máy điện cực lồi*

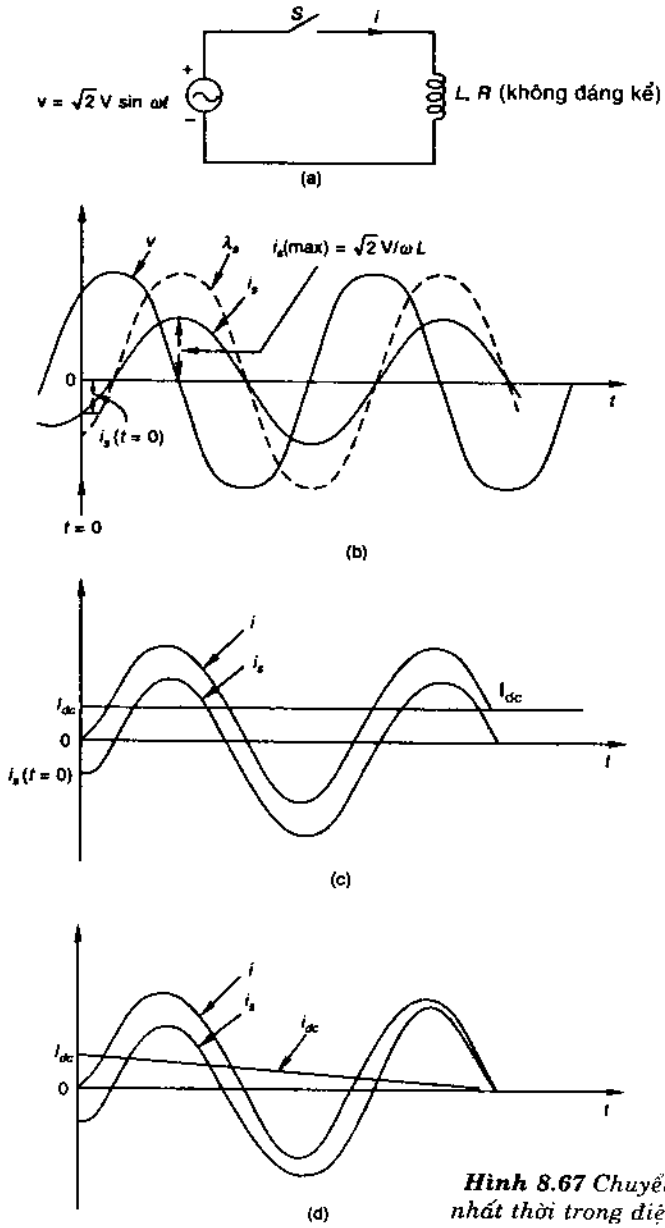
quả là dao động của rotor ở điểm vận hành bị suy giảm và rotor nhanh chóng trở về vị trí quay ổn định. Các thanh ngắn mạch này tương tự lồng sóc trong động cơ cảm ứng, nên cũng cung cấp moment khởi động đối với trạng thái vận hành động cơ, chỉ khác là không tự khởi động đồng bộ. Động cơ khởi động bằng cảm ứng trên các thanh ngắn mạch này được gọi là động cơ ống dẫn đồng bộ. Khi khởi động, rotor đạt được vận tốc gần đồng bộ, trường rotor và stator ghìm giữ lẫn nhau, ngay khi kích thích trường hoạt động.

Ngắn mạch nhất thời trong máy điện đồng bộ

Sự ngắn mạch nhất thời trong máy điện đồng bộ về bản chất do dòng điện chạy nhanh hơn nhiều so với tác động điện - cơ. Sau khi hiện tượng ngắn mạch chấm dứt, vận tốc rotor đạt giá trị đồng bộ không đổi.

Sự ngắn mạch nhất thời trong máy điện đồng bộ là hiện tượng phức tạp gồm nhiều mạch ghép hỗ cảm và tự cảm là các hàm theo góc và thời gian. Ở đây sẽ nghiên cứu định tính dựa vào các lập luận vật lý.

Để hiểu về các lập luận vật lý, sẽ khảo sát Hình 8.67a với điện kháng chuyển lên điện áp nguồn hàm sine. Giả sử điện trở (liên kết với điện kháng) không đáng kể (như trong máy điện đồng bộ) và ở thời điểm đầu tiên cũng rất nhỏ. Hình 8.67b biểu thị điện áp, dòng điện và liên kết từ thông trong mạch trong điều kiện trạng thái ổn định (dòng điện và từ thông liên kết trễ pha 90^0 so với điện áp). Ở thời điểm công tắc đóng mạch, dòng điện xoay chiều tạo từ thông liên kết tức thời, và dòng điện (nạp năng lượng cho cuộn dây) có giá trị xác định i_s (t = 0). Mạch tích chứa năng lượng không thay đổi tức thời, trong khi ở thời điểm chuyển mạch này, dòng điện và từ thông liên kết phải không đổi, cho nên trong mạch xuất hiện dòng điện bù I_{dc}, để cân bằng:



Hình 8.67 *Chuyển mạch nhất thời trong điện kháng*

$$i_s(t = 0) + I_{dc} = 0$$

$$I_{dc} = -i_s(t = 0) \quad (8.104)$$

Từ thông liên kết trong mạch cảm ứng không thể thay đổi tức thời, theo định lý từ thông liên kết không đổi, và dòng I_{dc} chạy tức thời khi đóng mạch. Trong mạch thuần điện cảm, I_{dc} có giá trị cực đại khi i_s đạt cực đại:

$$I_{dc}\,(max) = -\,i_s\,(max) \quad (8.105)$$

Nếu bỏ qua điện trở trong mạch, I_{dc} = hằng số. Dòng điện trong mạch là:

i = dòng điện dc + dòng điện trạng thái ổn định

$= I_{dc} + i_s$

Dạng sóng được minh họa trên Hình 8.67 c. Vì có dòng điện bù nên:

$$i\,(max) = I_{dc} + i_s\,(max) \quad (8.106)$$

Khi công tắc S đóng ở thời điểm điện áp bằng zero:

$$i\,(max) = 2\,i_s\,(max) \quad (8.107)$$

Điều này được gọi là *hiệu ứng dòng điện kép.*

Nếu có điện trở nhỏ, dòng điện bù được tính theo biểu thức:

$$i_{dc} = I_{dc}\,e^{-t/\tau} \quad (8.108)$$

Với $\tau = R/L$ = hằng - thời gian mạch

Dạng sóng dòng điện này được nêu trên Hình 8.67d. Qua giai đoạn chuyển tiếp, i_{dc} sẽ triệt tiêu, dòng điện đạt đến trạng thái ổn định i_s. Thành phần dòng điện trạng thái ổn định i_s là *dòng đối xứng*, còn dòng điện ban đầu không đối xứng vì có dòng bù dc.

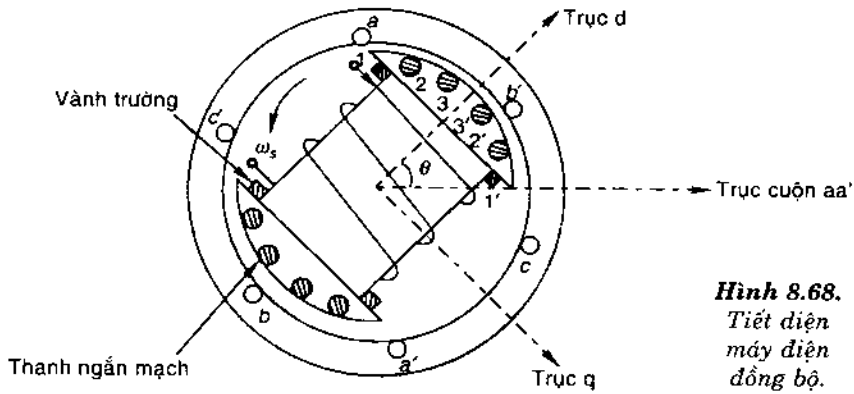
Tiếp theo sẽ xét vấn đề ngắn mạch trong máy điện đồng bộ (Hình 8.68) với các giả thiết:

(i) Điện trở phần ứng không đáng kể.

(ii) Cả ba pha đều ngắn mạch đồng thời (*ngắn mạch ba pha đối xứng*).

(iii) Trước khi ngắn mạch, máy điện vận hành với điều kiện không tải (hở mạch).

Từ thông liên kết trên mỗi pha stator (được tạo ra bởi từ thông trên trục dọc) không thể thay đổi tức thời, dòng điện bù dc xuất hiện trong cả ba pha. Các dòng điện này tỷ lệ với từ thông liên kết của từng pha ở thời điểm ngắn mạch, nghĩa là chúng tỷ lệ với cosin góc giữa trục pha và trục d.Ví dụ, nếu trục



Hình 8.68. *Tiết diện máy điện đồng bộ.*

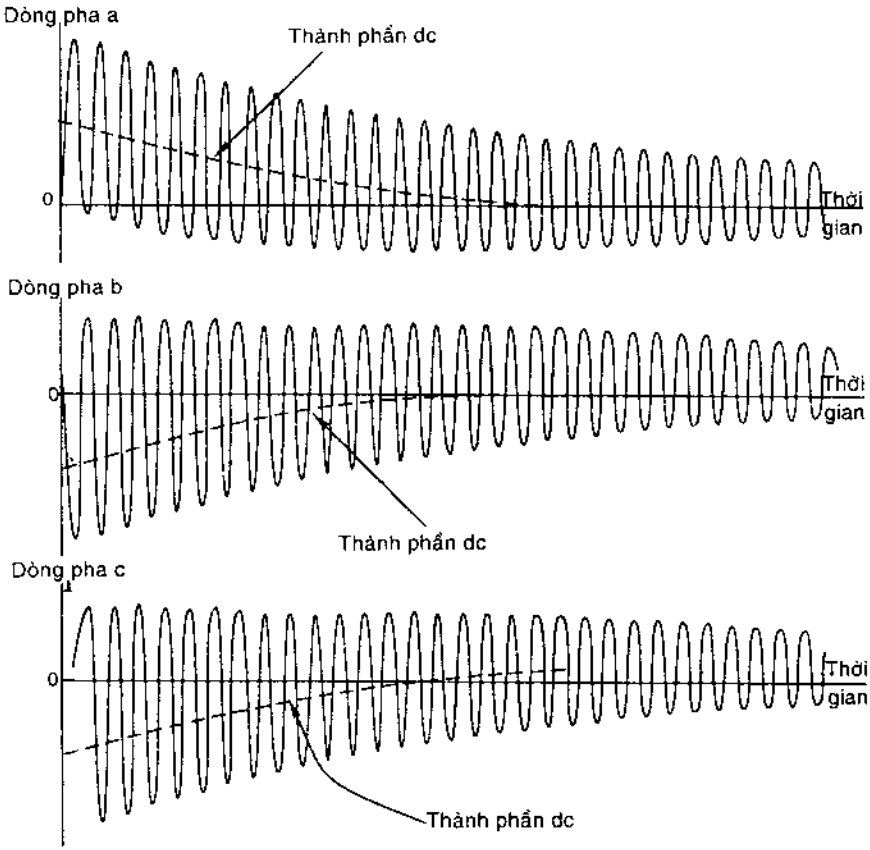
d có hướng theo trục pha a ở thời điểm ngắn mạch, dòng điện bù dc trong pha a có góc dương, dòng điện bù dc âm trong pha b và c bằng nửa giá trị này.

Đối với ngắn mạch ở thời điểm này, dạng sóng các dòng điện ngắn mạch trong ba pha và dòng điện bù dc được biểu thị trên Hình 8.69. Nếu dòng điện bù dc được loại bỏ khỏi dòng ngắn mạch, các dòng điện trong ba pha tương tự nhau chỉ khác pha 120^0.

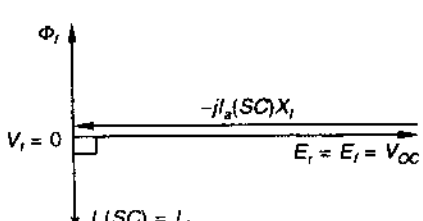
Trong mỗi pha, dòng điện ngắn mạch đối xứng là dòng trễ pha 90^0, dòng điện trục d, dòng điện trục q là zero (Hình 8.70), thiết lập sự khử từ đối với phản kháng phần ứng theo trục d. Theo định lý từ thông liên kết không đổi, từ thông Φ_f liên kết với dây quấn từ trường và các thanh triệt lắc pha (Hình 8.68, các thanh triệt lắc pha là cuộn 11', 22', và 33' có trục theo trục d) phải được duy trì bằng sự xuất hiện các dòng điện cảm ứng trên dây quấn trường và các thanh triệt lắc pha. Kết quả là lực từ động khe hở không khí E_r ban đầu bằng $E_f = V_{OC}$ (điện áp không tải). Dòng điện ngắn mạch là $(E_r - E_f)/X_l$, có giá trị rất lớn. Sơ đồ pha trong các điều kiện này được nêu trên Hình 8.70.

Dòng điện cảm ứng trong dây quấn trường và các thanh triệt dao động pha suy giảm tương ứng theo thời hằng. Thời hằng trong các thanh triệt dao động pha thấp hơn nhiều so với thời hằng dây quấn trường, và dòng điện cảm ứng trên đó sẽ tiêu tán trước. Khi dòng điện cảm ứng trên các thanh triệt dao động pha suy giảm và triệt tiêu, từ thông trục d và lực điện động khe hở không khí E_r giảm nhiều. Dòng điện ngắn mạch đối xứng suy giảm theo (Hình 8.71). Thời kỳ suy giảm dòng điện ngắn mạch này là thời kỳ chuyển tiếp, dòng điện suy giảm chủ yếu là do thời hằng của các thanh triệt dao động pha.

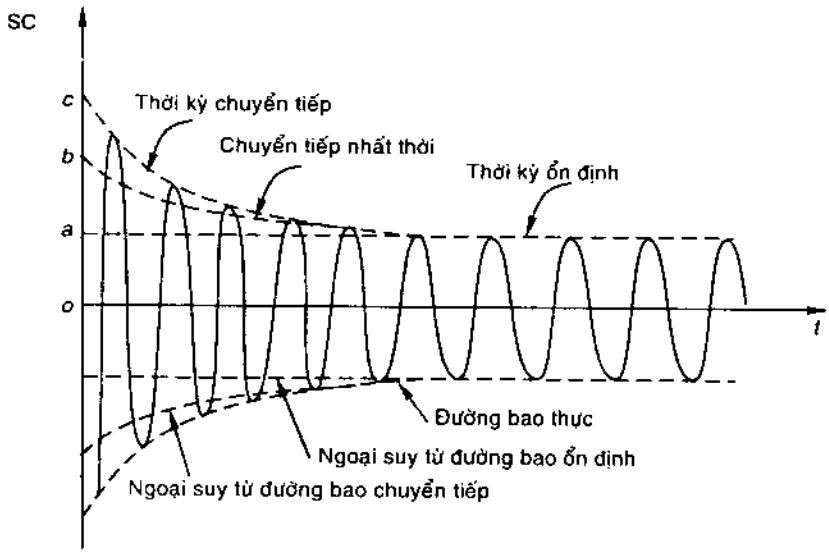
Dòng điện trường cảm ứng tiếp tục suy giảm theo thời hằng riêng tương ứng. Kết quả là từ thông trên trục q tiếp tục suy giảm và làm cho dòng điện



Hình 8.69: *Dạng sóng dòng điện ngắn mạch trong ba pha máy phát đồng bộ*



Hình 8.70. *Sơ đồ pha khi có sự cố 3-pha.*



Hình 8.71 *Dòng điện ngắn mạch đối xứng trong máy phát điện đồng bộ*

ngắn mạch đối xứng tiến đến trạng thái ổn định sau khi dòng điện cảm ứng trong dây quấn trường triệt tiêu. Thời kỳ ngắn mạch nhất thời này là thời kỳ chuyển tiếp (Hình 8.71).

Hình 8.71 minh họa dạng sóng hoàn chỉnh của dòng điện ngắn mạch đối xứng trong máy điện đồng bộ (đối với 1 pha). Ba thời kỳ chuyển tiếp, nhất thời, và ổn định biểu thị hình bao dòng điện (đường gạch nhỏ). Đường bao suy giảm tương ứng với điện kháng trên trục d tăng liên tục theo thời gian và định vị ở giá trị ổn định X_d khi hiệu ứng từ hóa tạo phản kháng phần ứng đạt hiệu ứng đủ lớn. Phép ngoại suy hình bao là các dòng điện chuyển tiếp, nhất thời, và trạng thái ổn định được ký hiệu là Oa, Ob, Oc theo tung độ của tọa độ dòng điện. Máy điện có ba phản kháng, trong khi ngắn mạch bao gồm:

$$X''_d = \frac{E_f}{Oc/\sqrt{2}} = \frac{E_f}{I''} \qquad (8.109)$$

$$X'_d = \frac{E_f}{Ob/\sqrt{2}} = \frac{E_f}{I'} \qquad (8.110)$$

$$X_d = \frac{E_f}{Oa/\sqrt{2}} = \frac{E_f}{I} \qquad (8.111)$$

Với E_f: lực điện động kích thích (điện áp hở mạch) (giá trị hiệu dụng pha)

I": dòng điện ngắn mạch chuyển tiếp (hiệu dụng).

I': dòng điện chuyển tiếp nhất thời (hiệu dụng).

I: dòng điện ngắn mạch ổn định (hiệu dụng).

So sánh ba phương trình trên:

$$X_d'' < X_d' < X_d \qquad (8.112)$$

X_d'' hầu như bằng phản kháng rò của máy điện.

Dòng điện ngắn mạch hiệu dụng biến thiên theo thời gian được tính theo biểu thức:

$$I_{SC} = (I'' - I')\, e^{-t/\tau_{dw}} + (I' - I)\, e^{-t/\tau_f} + I \qquad (8.113)$$

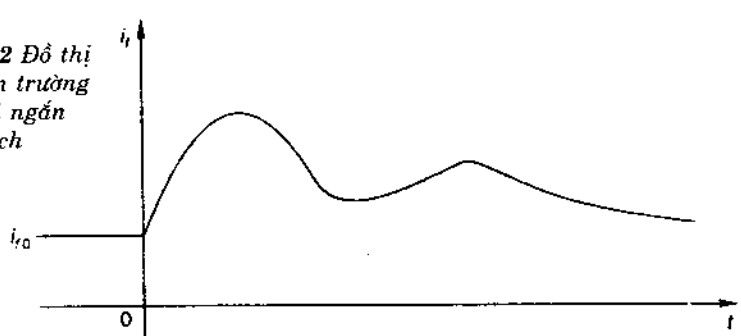
với τ_{dw} = thời hằng các thanh triệt dao động pha.

τ_f = thời hằng dây quấn trường.

Hiệu ứng của dòng điện bù dc đối với dòng điện ngắn mạch đối xứng có thể được tính theo thừa số thích hợp, tùy theo số chu kỳ trải qua sau khi ngắn mạch.

Chi tiết chính xác

Dòng điện bù dc trên stator thiết lập từ thông trục ổn định trong khe hở không khí, bị suy giảm từ từ. Từ thông này cảm ứng các dòng điện có tần số cơ bản trong dây quấn trường rotor và các thanh triệt dao động pha, góp vào trường dao động trên trục d. Trường dao động này có thể phân chia thành hai trường chuyển động quay ở vận tốc đồng bộ ngược chiều với chiều quay rotor. Một thành phần cố định so với stator và phản ứng ngược với các dòng điện bù



Hình 8.72 *Đồ thị dòng điện trường sau khi ngắn mạch*

dc. Thành phần thứ hai chạy theo stator với tốc độ đồng bộ gấp đôi và cảm ứng dòng họa tần thứ hai trong stator.

Đồ thị dòng điện trường sau khi ngắn mạch stator biểu hiện dòng điện nhất thời tần số cơ bản và dc trên hình 8.72.

Ngắn mạch trong các điều kiện tải

Phương pháp tính dòng ngắn mạch trong suốt thời kỳ chuyển tiếp nhất thời và chuyển tiếp được sử dụng mà không chứng minh (Hình 8.73).

$$E''_f = V_0 + j X''_d I_0 \quad (8.114)$$

$$E'_f = V_0 + j X'_d I_0 \quad (8.115)$$

với V_0 = điện áp phần ứng máy điện.

I_0 = dòng điện của máy điện trước khi xảy ra sự cố nhất thời.

Dòng điện chuyển tiếp và chuyển tiếp nhất thời trong suốt quá trình ngắn mạch là:

$$I'' = \frac{E''_f}{X''_d} \quad (8.116)$$

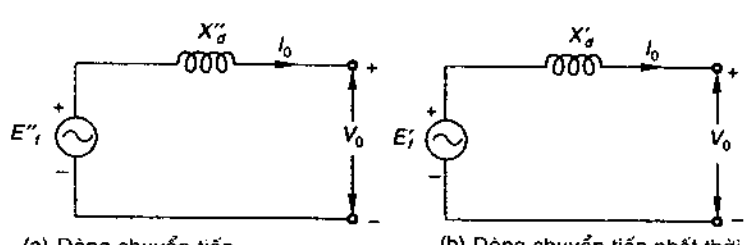
$$I' = \frac{E'_f}{X'_d} \quad (8.117)$$

Dòng điện ngắn mạch ổn định là:

$$I = \frac{E_f}{X_d} \quad (8.118)$$

Với: E_f lực điện động kích thích.

X_d điện kháng ổn định trên trục d.



(a) Dòng chuyển tiếp (b) Dòng chuyển tiếp nhất thời

Hình 8.73. *Mạch dùng để tính dòng điện chuyển tiếp.*

Ví dụ 8.12: Máy phát điện đồng bộ 100 MVA, 50 Hz vận hành hở mạch và kích thích để có điện áp định mức. Ngắn mạch ba pha (đối xứng) xuất hiện ở đầu dây. Bỏ qua thành phần dòng điện dc và tần số kép.

(a) Tìm dòng điện khởi động

(b) Tìm dòng điện ở cuối hai chu kỳ và ở cuối 10s

Cho trước: 100 MVA cơ sở.

$X_d = 1.0$ pu; $X_d' = 0.3$ pu, $X_d'' = 0.2$ pu; $\tau_{dw} = 0.03$ s; $\tau_f = 1$ s.

Giải

(a) Dòng điện khởi động: $I'' = \dfrac{E_f}{X_d''} = \dfrac{1}{0.2} = 5$ pu

$$I_{\text{cơ bản}} = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 22} = 2624 \text{ A}$$

$I'' = 5 \times 2624 = 13120$ A

(b) $I'' = \dfrac{E_f}{X_d''} = \dfrac{1}{1.0} = 1$ pu

$$I_{SC}(t) = (5 - 3.33)\, e^{-t/0.03} + (3.33 - 1)\, e^{-t/1} + 1 .$$
$$= 1.07e^{-t/0.03} + 2.33e^{-t} + 1.$$

t (2 chu kỳ) $= 1.67e^{-0.04/0.03} + 2.33e^{-0.04} + 1 = 3.68$ pu hoặc 9.656A

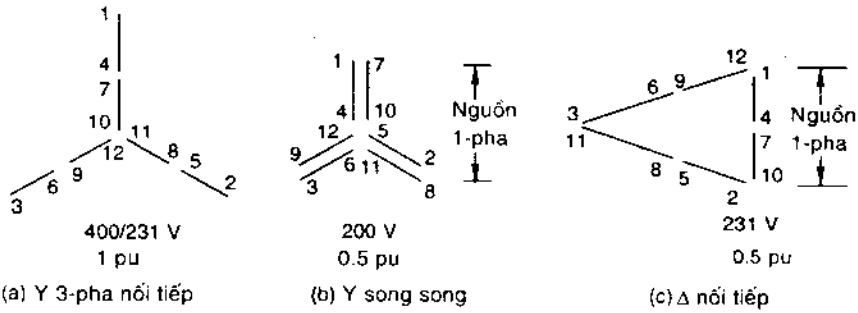
I_{SC} (10 s) $= 1.67e^{-10/0.03} + 2.32e^{-10} + 1 = 1.0001$ pu hoặc 2624 A.

Máy phát điện đồng bộ 1- pha

Một số ứng dụng, thường giới hạn dưới 10kVA, được cấp điện tốt hơn bằng máy phát điện đồng bộ 1-pha. Ví dụ, nguồn điện cho cấp cứu, gia đình, văn phòng, các nguồn điện di động cấp cho các công cụ xây dựng... Do dây dẫn phân bố đơn giản, các tải này được phục vụ tốt bằng nguồn điện 1-pha. Dây quấn máy phát điện 1-pha có thể được sắp xếp theo hai cách:

- Dây quấn 3-pha, 12 đầu dây được đấu nối để vận hành 1-pha.
- Stator quấn dây cho riêng 1-pha.

Trong phương pháp thứ nhất, có nhiều kiểu đấu nối dây, nhưng tất cả đều bị giảm định mức so với đấu dây ba pha bình thường. Hình 8.74 minh họa hai



(a) Y 3-pha nối tiếp (b) Y song song (c) Δ nối tiếp

Hình 8.74 *Máy phát điện đồng bộ 3 pha dùng cho tải 1 pha*

cách đấu dây so với mắc Y 3 pha nối tiếp và Y 3 pha song song theo giá trị điện áp và định mức kVA pu.

Trong máy phát 1-pha, rotor tương tự máy 3 pha, stator được quấn 1-pha với các cuộn dây bước ngắn. Do đó một phần ba số rãnh stator không quấn dây, cuộn dây chỉ có một lớp. Định mức của máy là 2/3 định mức máy phát quấn dây 3-pha.

Rotor có các cực lồi và cảm ứng từ trường phân bố hình sine trong không gian (do hình dạng của mặt cực từ), stator có 1 pha cảm ứng từ trường dao động dọc theo trục cố định. Biểu thức thành phần cơ bản của từ trường stator được tính theo pt (5.36):

$$\mathcal{F}_1 = F_m \cos \omega t \cos \theta; \qquad \omega = \text{tần số (rad/s)} \qquad (8.119)$$

$$\theta = \text{góc điện (rad)}$$

$$F_m = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} K_w \left(\frac{N_{ph}}{P}\right) I \cos \omega t \cos \theta; \; I = \text{dòng điện stator}$$

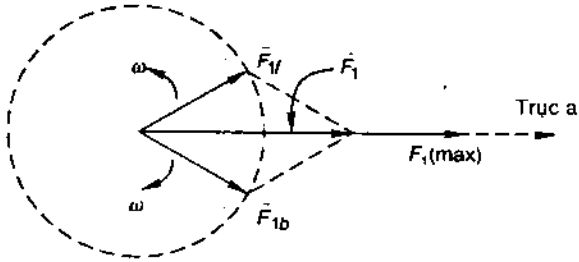
Phương trình (8.119) được phân tích theo lượng giác:

$$\mathcal{F}_1 = (1/2)\, F_m \cos(\omega t - \theta) + (1/2\, F_m) \cos(\omega t + \theta) = \mathcal{F}_{1f} + \mathcal{F}_{1b} \quad (8.120)$$

ω: tốc độ đồng bộ rad/s

$\mathcal{F}_{1f}$ là từ trường quay phân bố hình sine có chiều dương θ (chiều quay thuận) và $\mathcal{F}_{1b}$ là từ trường quay ngược chiều. Cả hai từ trường này quay theo vận tốc đồng bộ (Hình 8.75) với các từ trường là các vector quay $\bar{F}_{1f}$ và $\bar{F}_{1b}$, trong khi từ trường tổng hợp là vector từ trường $\bar{F}_1$ dao động trong không gian.

Từ trường stator quay thuận khóa chặt từ trường rotor và cả hai chuyển động với nhau, tạo ra moment điện từ làm biến đổi năng lượng từ cơ sang

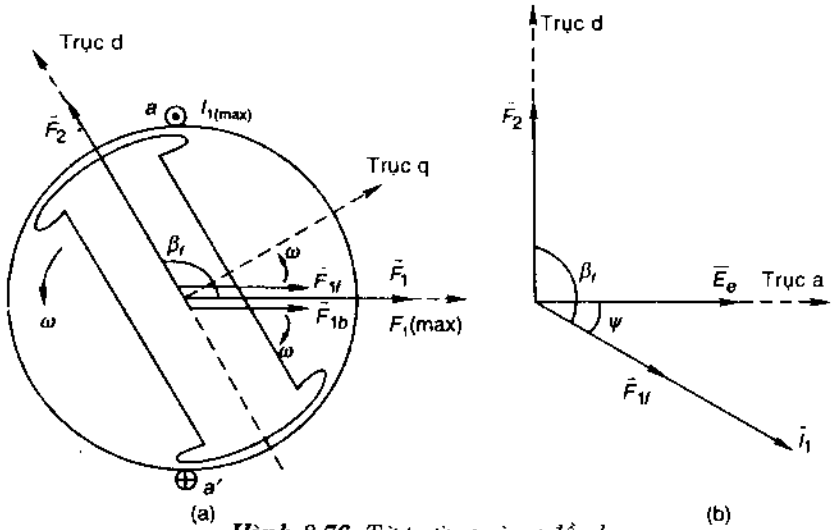


Hình 8.75 *Lực từ động stator trong máy phát đồng bộ 1-pha*

điện. Hình 8.76a biểu thị từ trường rotor và stator ở thời điểm I_1 (max). Sơ đồ pha tương ứng trên Hình 8.76b. Giả sử X_q nhỏ, điện áp đầu ra quan hệ với lực điện động kích thích E_e qua X_d (được xác định trị số theo thí nghiệm hở mạch và ngắn mạch).

Từ trường quay ngược F_{1b} cảm ứng dòng điện họa tần thứ hai (dòng điện sóng hài thứ hai) trong dây quấn kích từ gây ra từ trường dao động dọc theo trục d với cùng tần số.

Dây quấn stator cảm ứng điện áp có tần số cơ bản và họa tần thứ ba. Điện áp có tần số cơ bản được cảm ứng trên stator cho ra $\bar{F}_{1f}$ và $\bar{F}_{1b}$, cả hai đều



Hình 8.76. *Từ trường và sơ đồ pha.*

được tính toán với X_d. Điện áp họa tần thứ ba cảm ứng trên stator gây ra dòng điện họa tần thứ ba trong đường dây. Không như sóng hài (họa tần) trong khe rotor, các sóng hài này không bị khử (hay biến đổi) vì là dây dẫn (không có tính cảm kháng). Nhưng biên độ của chúng bị suy giảm do sự tự cảm của dây quấn kích từ, dòng điện xoáy trong rotor và dòng điện họa tần thứ hai theo các cơ sở bộ triệt dao động pha.

Ví dụ 8.13: Máy phát điện đồng bộ 1-pha có giá trị đỉnh lực từ động rotor và stator là F_2, F_{1f} và F_{1b}. Tần số cơ bản là ω rad/s. Hãy dùng các ký hiệu thích hợp khác để trình bày biểu thức các lực điện động cảm ứng trong dây quấn stator do từ thông trục d. Lấy t = 0 khi F_2 thẳng hàng với trục stator (Hình 8.76a).

Giải

Ở thời điểm bất kỳ, rotor quay theo góc $\theta = \omega t$. Góc giữa F_2 và F_{1f} giữ cố định ở β_f độc lập với thời gian t. Cần tìm góc giữa F_2 và F_{1b}

Ở thời gian t, F_{1f} quay theo góc:

$$\gamma = \omega t - \beta_f$$

Cùng thời gian này, F_{1b} quay ngược với góc γ. Góc giữa F_2 và F_{1b} là:

$$\beta_f + 2\gamma = 2\,\omega t - \beta_f$$

Lực từ động dọc theo trục d (trục của F_2) là:

$$F_d = F_1 + F_{1f}\cos\beta_f + F_{1b}\cos(2\,\omega t - \beta_f)$$

Từ thông/cực hướng trục:

$$\phi = \mathcal{P}_d\,[F_2 + F_{1f}\cos\beta_f + F_{1b}\cos(2\,\omega t - \beta_f)]$$

Góc giữa ϕ và trục dây quấn stator = ωt

Từ thông liên kết trong cuộn dây stator:

$$\lambda = \phi\,N_1K_w\cos\omega t$$

$$= \mathcal{P}_dN_1K_w\,[F_2 + F_{1f}\cos\beta_f + F_{1b}\cos(2\,\omega t - \beta_f)]\cos\omega t$$

Với N_1K_w = số vòng dây stator hiệu dụng.

Sắp xếp lại:

$$l = \mathcal{P}_dN_1K_w\,[(F_2 + F_{1f}\cos\beta_f)\cos\omega t + (1/2)\,F_{1b}\cos(3\,\omega t - \beta_f) + (1/2)\,F_{1b}\cos(\omega t - \beta_f)]$$

Lực điện động cảm ứng

$$e_r = d\lambda / dt = \mathcal{P}_d N_1 K_w \, [(F_2 + F_{1f} \cos \beta_f) \sin \omega t + 3/2) \, F_{1b} \sin (3\,\omega t - \beta_f) + (1/2) \, F_{1b} \sin (\omega t - \beta_f)]$$

Tách lực điện động cảm ứng họa tần thứ ba:

$$e_r = \sqrt{2} E_e \sin \omega t + \sqrt{2} E_{1f} \cos \beta_f \sin \omega t + \sqrt{2} E_{1b} \sin \omega t$$

$$E_r(\text{rms}) = \underbrace{E_e}_{\text{emf kích thích}} + \underbrace{E_{1f} \cos \beta_f + E_{1b}}_{\text{tính cho } X_d \text{, giả sử } X_q = 0}$$

Ví dụ 8.14: Máy phát điện đồng bộ nối sao, 1000 kVA, 66 kV, 50Hz có điện áp không tải là 11.4 kV ở dòng điện (kích từ) trường xác định. Máy phát cho điện áp định mức ở đủ tải hệ số công suất 0.75 trễ pha với cùng một dòng điện trường. Hãy tính:

(a) Điện kháng đồng bộ (bỏ qua điện trở phần ứng).

(b) Độ ổn định điện áp.

(c) Góc moment xoắn.

(d) Công suất điện hình thành.

(e) Điện áp và kVA định mức, nếu máy phát điện được nối Δ.

Giải

$$I_a(fl) = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 1000} = 0.0875 \text{ kA}$$

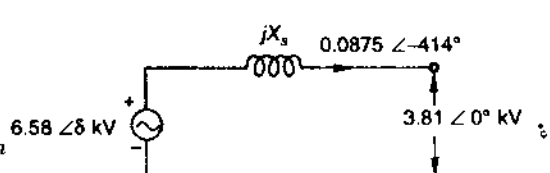
$$\phi = -\cos^{-1} 0.75 = -41.4^0$$

$$\overline{V}_a = 6.6/\sqrt{3} \angle 0^0 = 3.81 \angle 0^0$$

$$E_f = V_{OC} = 11.4 / \sqrt{3} = 6.58 \text{ kV}$$

$$\overline{E}_f = 6.58 \angle \delta \text{ kV}$$

Từ sơ đồ mạch (Hình 8.77), có thể viết



Hình 8.77. *Mạch điện của ví dụ 8.14*

$$6.58 \angle\delta = 3.81 \angle 0^0 + j X_s 0.0875 \angle -41.4^0 \qquad \text{(i)}$$

Cân bằng phần thực và phần ảo trong phương trình này:

$$6.58 \cos\delta = 3.81 + 0.058 X_s \qquad \text{(ii)}$$

$$6.58 \sin\delta = 0.0656 X_s \qquad \text{(iii)}$$

Khử X_s giữa pt (ii) và (iii):

$$6.58 \cos\delta - 5.82 \sin\delta = 3.81 \qquad \text{(iv)}$$

$$\cos(\delta + 41.4) = 0.434 \Rightarrow \delta = 22.8^0$$

(a) Từ pt (iii), thay giá trị δ:

$$X_s = \frac{6.58 \sin 22.8^0}{0.0656} = 38.9\,\Omega$$

(b) Độ ổn định điện áp $\frac{11.4 - 6.6}{6.6} \times 100 = 72.7\%$

(c) Góc moment (công suất) $\delta = 22.4^0$

(d) Công suất điện phát ra $= 3\, E_f I_a \cos(\delta - \phi)$

$$= 3 \times 6.58 \times 0.0875 \cos(22.4^0 + 41.4^0) = 763 \text{ kW}$$

Tính trực tiếp:

Công suất điện phát ra $= 3\, V_a\, I_a \cos\phi$

$$= 3 \times 3.81 \times 0.0875 \times 0.75 = 750 \text{ kW}$$

Hai kết quả trên cho thấy không có tổn thất điện trở phần ứng ($R_a = 0$).

(e) Máy điện được nối Δ:

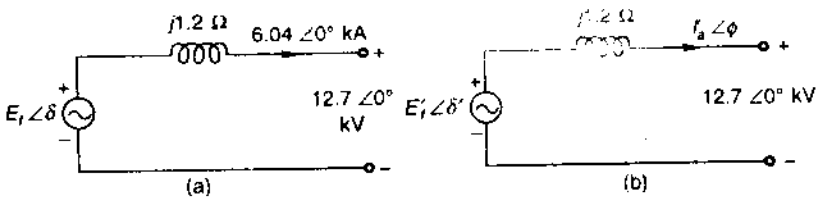
Điện áp định mức $= 6.6/\sqrt{3} = 3.81$ kV

Dòng điện định mức $= 0.0875\sqrt{3}$ kA

kVA định mức $= \sqrt{3} \times 3.81 \times 0.0875\sqrt{3} \times 1000 = 1000$ kVA

Ví dụ 8.15: Máy phát điện turbine 3 pha nối sao, 22 kV, với trở kháng đồng bộ j1.2 Ω/pha, đang phân phối 230 MW với hệ số công suất đơn vị đến lưới điện 22 kV. Với công suất turbine không đổi, kích thích máy điện tăng 30%. Hãy xác định dòng điện máy điện và hệ số công suất dựa trên giả định tuyến tính.

Với sự kích thích mới, công suất turbine tăng cho đến khi máy điện cấp 275 MW. Hãy tính dòng mới và hệ số công suất mới.



Hình 8.78. *Mạch điện minh họa*

Giải

. 230 MW ở hệ số công suất đơn vị

$$I_a = \frac{230}{\sqrt{3} \times 22 \times 1} = 6.04 \text{ kA}; \ \bar{I}_a = 6.04 \angle 0^0 \text{ kA}$$

$$\bar{V}_a = (22/\sqrt{3}) \angle 0^0 = 12.7 \angle 0^0 \text{ kA}$$

Từ Hình 8.78 (a)

$$\bar{E}_f = 12.7 \angle 0^0 + j\,1.2 \times 6.04 \angle 0^0 = 12.7 + j\,7.25$$

$$E_f = 14.62 \text{ kV}.$$

Kích từ tăng 30%, công suất vào turbine không đổi ở 230 MW, từ Hình 8.78 (b).

$$E_f' = 14.62 \times 1.3 = 19 \text{ kV}$$

$$\frac{230}{3} = \frac{19 \times 12.7}{1.2} \sin \delta'$$

$$\delta' = 22.4^0$$

$$\bar{I}_a' = \frac{19 \angle 22.4^0 - 12.7 \angle 0^0}{j\,1.2} = 7.275 \angle -33.9^0 \text{ kA}$$

$$Ia = 7.275 \text{ kA}$$

$$p_f = \cos 33.9^0 = 0.83 \text{ trễ pha}$$

Kích từ không đổi ở giá trị mới, công suất turbine tăng đến 275 MW

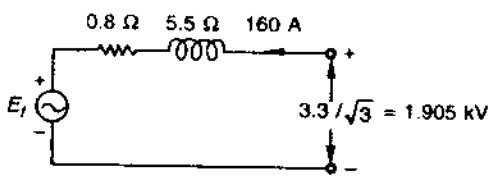
$$\frac{275}{3} = \frac{19 \times 12.7}{1.2} \sin \delta''$$

$$\delta'' = 27.1^0$$

$$\bar{I}_a = \frac{19 \angle 27.1 - 12.7 \angle 0^0}{j\,1.2} = 8.03 \angle -25.9^0 \text{ kA}$$

I_a = 8.03 kA, pf = cos 25.9^0 = 0.9 trễ pha.

Ví dụ 8.16: Động cơ đồng bộ nối sao, 3.3 kV có dòng đủ tải 160 A ở hệ số công suất pf = 0.8 trễ pha. Điện trở và điện kháng đồng bộ của động cơ là 0.8 Ω và 5.5 Ω trên mỗi pha tương ứng. Hãy tính lực điện động kích thích, góc moment, hiệu suất, và công suất ra trên trục động cơ. Giả sử tổn thất tải cơ khí là 30 kW.



Hình 8.79. *Mạch điện minh họa*

Giải

Từ Hình 8.79

$$X_s = 0.8 + j\,5 = 5.56 \angle 81.7^0\ \Omega$$

$$\bar{E}_f = 1.905 - 5.56 \angle 81.7^0 \times 0.16 \angle -36.9^0 = 1.42 \angle -26.2^0$$

E_f = 1.42 kV (pha) hoặc 2.46 kV (dây)

Công suất cơ tổng = 3 x 1.42 x 160 cos (-36.9^0 + 26.2^0) = 670 kW

Công suất ra trên trục = 670 - 30 = 640 kW.

Góc moment = - 26.2^0

Công suất vào = $\sqrt{3} \times 3.3 \times 160 \times 0.8$ = 731.5 kW

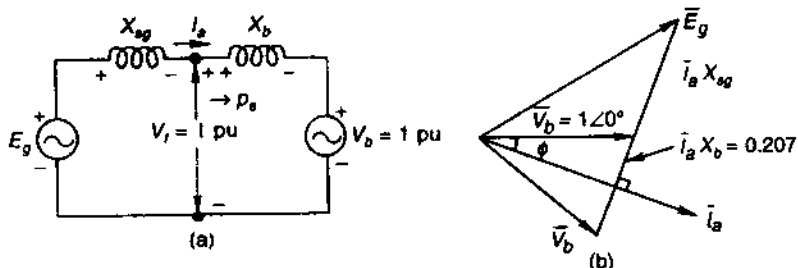
$$\eta = 640 / 731.5 = 87.5\%$$

Ví dụ 8.17: Máy phát điện đồng bộ 500 MVA, 22 kV, 50 Hz, 4 - cực từ, có điện kháng đồng bộ 1.57 pu được dẫn vào hệ thống điện với thanh cái 22 kV nối tiếp với điện kháng 0.4 Ω. Sự kích thích máy phát điện được điều chỉnh

liên tục (bằng bộ ổn áp tự động) để duy trì điện áp ra 22 kV độc lập với tải trên máy phát điện.

(a) Vẽ sơ đồ pha, khi máy phát cấp 250 MVA cho hệ thống điện. Tính dòng điện máy phát, hệ số công suất và công suất thực (tác dụng). Lực điện động kích thích máy phát là bao nhiêu?

(b) Lặp lại câu (a) khi tải máy phát là 500 MVA



Hình 8.80. *Mạch điện minh họa*

Giải

Sơ đồ mạch của hệ thống được vẽ trên Hình 8.80 (a)

$$I_a(\text{định mức}) = \frac{500}{\sqrt{3} \times 22} = 13.12 \text{ kA}$$

$$V_t(\text{định mức}) = \frac{22}{\sqrt{3}} = 12.7 \text{ kV}$$

Z_b = 12.7/ 13.12 = 0.968 Ω

X_{sg} = 1.57 pu (giả thiết)

X_b = 0.4 / 0.968 = 0.413 pu

(a) Tải = 250 MVA hoặc 0.5 pu

V_t = 1 pu; I_a = 0.5 pu; Vb = 1 pu.

$X_b I_a$ = 0.413 x 0.5 = 0.207 pu

Sơ đồ pha được vẽ trên Hình 8.80 (b)

$$\sin\phi = \frac{(0.207 / 2)}{1}; \quad \text{khi } \bar{I}_a \text{ ở } 90^0 \text{ đến } \bar{I}_a \times b$$

$\phi = 5.9^0$

$pf = \cos\phi = 0.995$ trễ pha

$P_e = 1 \times 0.5 \times 0.995 \times 0.5 \Rightarrow 0.5 \times 250 = 125$ MW

$\overline{E}_g = 1\angle 0^0 + j\,1.57 \times 0.5\angle -5.9^0 = 1.333\angle 35.9^0$

$E^g = 1.333 \times 22 = 29.32$ kV (dây)

(b) Tải MVA = 1 pu; $I_a = 1$ pu.

$X_b I_a = 0.413 \times 1 = 0.413$ pu

$$\sin\phi = \frac{(0.413/2)}{1} \Rightarrow \phi = 11.9^0$$

$\cos\phi = 0.98$ trễ pha

$P_e = 1 \times 1 \times 0.98 = 0.98$ pu hoặc 490 MW

$\overline{E}_g = 1\angle 0^0 + j\,1.57 \times 1\angle -11.9^0 = 1.324 + j\,1.536$

$E_g = 2.208$ pu hoặc 44.62 kV (dây).

Ví dụ 8.18: Máy điện đồng bộ 25 MVA, 13 kV, 50 Hz có hệ số ngắn mạch 0.52. Đối với điện áp cảm ứng định mức ở không tải, cần dòng điện (kích) trường là 250 A.

(a) Tính điện kháng đồng bộ được điều chỉnh (bão hòa) của máy điện và giá trị pu

(b) Máy điện nối với nguồn chính 13 kV và chạy như động cơ không tải.

(i) Dòng điện trường được điều chỉnh đến 200A. Tính góc hệ số công suất và góc moment. Bỏ qua tổn thất máy điện. Hãy vẽ sơ đồ pha biểu thị điện áp phần ứng, lực điện động kích thích và dòng điện phần ứng.

(ii) Máy điện tác động như tụ điện hay như cuộn cảm đối với hệ thống 13 kV? Hãy tính giá trị tương đương tụ điện/ cuộn cảm.

(iii) Làm lại câu (i) với dòng điện trường 300A.

Giải.

(a) Xem Hình 8.15

SCR = of' / of''

$of' = 250\ A \Rightarrow of' = 250 / 0.52 = 481\ A$

Đây là dòng điện trường, cần để tạo ra dòng điện ngắn mạch bằng giá trị định mức.

$$I_a(\text{định mức}) = 25/(\sqrt{3} \times 13) = 1110\ A$$

$$I_{SC}(\text{ở } I_f = 250\ A) = 1110 \times 250 / 481 = 577\ A$$

$$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{13 \times 1000 / \sqrt{3}}{577} = 13\ \Omega$$

$$X(\text{cơ sở}) = \frac{(13 \times 1000) / \sqrt{3}}{1110} = 6.76\ \Omega$$

$$X_s(\text{điều chỉnh}) = \frac{13}{6.76} = 1.92\ pu = 1/\ SCR$$

(b) Mô hình mạch máy điện được vẽ trên Hình 8.81a

(i) $I_f = 200\ A$

Từ trường khe không khí

$$E_f = 13 \times (200 / 250) = 10.45\ kV\ (\text{dây}) \text{ hoặc } 6.0\ kV\ (\text{pha})$$

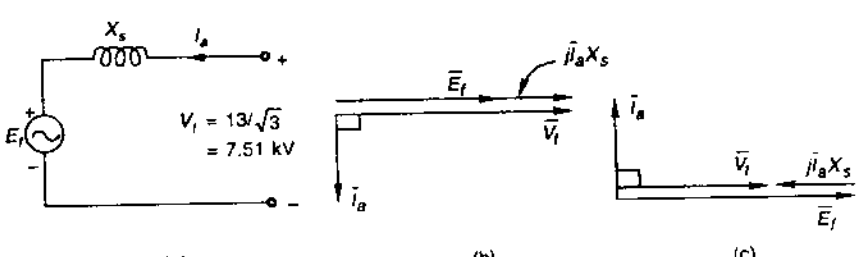
$$I_a = \frac{V_t - E_f}{X_s} = \frac{7.51 - 6.0}{13} \times 1000 = 116\ A$$

$\delta = 0$; không tải; không tổn thất.

$pf = \cos 90^0 = 0$; trễ pha (khi $V_t > E_f$)

Theo sơ đồ pha trên Hình 8.81 (b)

Máy điện vận hành như cuộn cảm



Hình 8.81. *Minh họa ví dụ 18.*

$$\omega L = \frac{13 \times 1000}{\sqrt{3} \times 116} = 2\pi \times 50\ L$$

$$L = 0.206\ H$$

(ii) $I_f = 300\ A$

$$E_f = \frac{13 \times 300}{250} = 15.6\ kV\ (dây)\ \ hoặc\ \ 9.0\ kV\ (pha)$$

$$I_a = \frac{9 - 6}{13} = 231\ A$$

$\delta = 0$; không tải; không tổn thất.

$pf = \cos 90^0 = 0$; sớm pha (khi $V_t < E_f$)

Máy điện vận hành như tụ điện

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{13 \times 1000}{231} = \frac{1}{2\pi \times 50\ C}$$

$$C = 56.6\ \mu F$$

Ví dụ 8.19: Động cơ đồng bộ 3 pha, 6.6 kV, nối sao, vận hành với điện áp và kích thích không đổi. Trở kháng đồng bộ là (2 + j20) Ω/ pha. Động cơ vận hành ở hệ số công suất 0.8 trễ pha với nguồn điện 800 kW. Tìm hệ số công suất động cơ nếu có tải tiêu thụ công suất nguồn 1200 kW.

Giải.

$$\overline{V}_t = 6.6/\sqrt{3}\angle 0^0 = 3.81\ \angle 0^0\ kV$$

$$\overline{I}_a = I_a\ \angle 36.9^0$$

$$I_a = \frac{800}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 0.8} = 87.5\ A$$

$$\overline{Z}_s = 2 + j\,20 = 20.1\ \angle 84.3^0\ \Omega,\ \cos 84.3^0 = 0.1$$

$$\overline{E}_f = 3.81 - 20.1\ \angle 84.3 \times 0.0875\ \angle 36.9^0 = 4.724 - j\,1.504$$

$$E_f = 4.96\ kV\ (pha).$$

Công suất vào tăng đến 1200 kW; không thay đổi kích thích

$$\overline{I}_a = \frac{V_t\angle 0^0 - E_f\angle -\delta}{Z_s\angle\theta} = \frac{V_t}{Z_s}\angle -\theta - \frac{E_f}{Z_s}\angle -(\delta + \theta)$$

$$P_e(in) = 3\,R_e[V_t\angle 0^0\ \bar{I}_a] = 3\left[\frac{V_t^2}{Z_s}\cos\theta - \frac{V_t E_f}{Z_s}\cos(\delta+\theta)\right]$$

Thay các giá trị:

$$\frac{1200}{1000\times 3} = \frac{(3.81)^2\times 0.1}{20.1} - \frac{3.81\times 4.96}{20.1}\cos(\delta + 84.3^0)$$

$$\delta = 26.1^0$$

$$\bar{I}_a = \frac{3.81 - 4.96\angle -26.1}{20.1\angle 84.3} = 113\angle 22.1^0$$

$pf = \cos 22.1^0 = 0.9265$ sớm pha.

Ví dụ 8.20: Máy phát điện đồng bộ nối Δ, 440V, 50 Hz có điện kháng trên trục dọc 0.12 Ω, và điện kháng trục ngang 0.075 Ω/ pha, bỏ qua điện trở phần ứng. Máy phát cấp 1000 A ở hệ số công suất pf = 0.8 trễ pha.

(a) Tìm lực điện động kích thích bỏ qua cực lồi, và giả thiết $X_s = X_d$

(b) Tìm lực điện động kích thích có tính cực lồi.

Hãy so sánh và diễn giải kết quả (a) và (b)

Giải

Trên cơ sở tương đương mắc sao.

$$X_d = 0.12/\,3 = 0.04\ \Omega;\ \ X_q = 0.075/\,3 = 0.025\ \Omega$$

(a) Bỏ qua cực lồi; $X_s = X_d$

$$\bar{E}_f = (400/\sqrt{3})\angle 0^0 + j\,0.04\times 1000\angle -36.9^0 = 279.8\angle 6.6^0$$

$E_f = 279.8$ V hoặc 484.6 V (dây)

(b) $I_a = 1000$ A, $\phi = +36.90^0$ (trễ pha)

$$\tan\psi = \frac{V_t\sin\phi + I_a X_q}{V_t\cos\phi + I_a R_a} = \frac{254\times 0.6 + 1000\times 0.025}{254\times 0.8} = 0.873$$

$(V_t = 440/\sqrt{3} = 254$ V)

$$\Psi = 41.1^0$$

$$\delta = \Psi - \phi = 41.1^0 - 36.9^0 = 4.2^0$$

$E_f = V_t\cos\delta + I_d X_d = 254\cos 4.2^0 + 73.2\times 0.04$

$= 256.3$ V hoặc 444 V (dây); $I_d = I_a\sin\Psi = 1000\sin 4.2^0 = 73.2$A.

Ví dụ 8.21: Động cơ đồng bộ cực lồi 1500 kVA, 6.6V, nối sao có $X_d = 23.2$ Ω và $X_q = 14.5$ Ω/pha tương ứng. Bỏ qua điện trở phần ứng.

Hãy tính lực điện động kích thích khi động cơ cấp tải định mức ở hệ số công suất 0.8 sớm pha.

Tính tải cực đại của động cơ có thể cung cấp mà không bị mất tính đồng bộ, nếu kích thích bị cắt. Tìm giá trị góc moment trong điều kiện đó.

Giải

$$\phi = -\cos^{-1}0.8 = -36.9^0 \quad \text{(sớm pha).}$$

$$I_a = \frac{1500}{\sqrt{3} \times 6.6} = 131 \text{ A}; \quad V_t = \frac{6.6}{\sqrt{3}} = 3.81 \text{ kV}$$

$$\tan\psi = \frac{V_t \sin\phi - I_a X_q}{V_t \cos\phi + I_a R_a} = \frac{-3.81 \times 0.6 - 0.131 \times 14.5}{3.81 \times 0.8 + 0} = -1.373$$

Hoặc $\Psi = -53.9^0$

$$\delta = \phi - \Psi = -36.9^0 - (-53.9^0) = 17^0$$

$$E_f = V_t \cos\delta - I_d X_d = 3.81 \cos 17^0 + 0.106 \times 23.2$$

$$= 6.1 \text{ kV} \quad \text{hoặc } 10.57 \text{ kV (dây)}$$

$$(I_d = I_a \sin\Psi = 0.131 \times \sin -53.9^0 = -0.106)$$

Khi cắt kích thích, công suất ra là công suất từ trở.

$$P_e = V_t^2\left(\frac{X_d - X_q}{2X_d X_q}\right)\sin 2\delta = (6.6)^2 \times \frac{23.2 - 14.5}{2 \times 23.2 \times 14.5} = 563 \text{ kW}$$

Động cơ điều khiển dc không chổi than

Động cơ dc điều khiển không chổi than là các cấu hình động cơ đồng bộ ac với vi mạch bán dẫn điều khiển dòng điện stator để đạt được moment cực đại ở vận tốc cho trước. Trong các động cơ thông thường, các bộ tiếp xúc cơ khí, các vành đổi chiều, duy trì độ dịch chuyển không gian 90^0 giữa từ trường rotor và stator để cung cấp moment cần thiết.

Về lý thuyết, chức năng rotor và stator có thể chuyển đổi lẫn nhau, đặt hệ thống trường trên rotor. Nếu sử dụng sự chuyển mạch thông thường sẽ không có lợi, do các vành đổi chiều là cố định và bộ chổi quét phải quay theo tốc độ trường stator. Tuy nhiên, sự chuyển mạch bán dẫn, chuyển đổi bằng các bộ

cảm biến vị trí thay thế cho bộ chổi quét, là thiết bị điều khiển thích hợp đối với máy điện nhỏ. Trong phương pháp này, mỗi pha của dây quấn stator được cấp năng lượng theo thứ tự bằng transistor (hoặc thyristor) công suất, transistor/thyristor được kích bằng tín hiệu hồi tiếp từ cảm biến vị trí đặt trên rotor. Trường rotor và stator luôn giữ đồng bộ bằng tần số kích tự động điều chỉnh vận tốc động cơ. Thời điểm, thời gian và tần số transistor dẫn, quyết định độ lớn moment của động cơ. Do đó, bằng mạch điện tử, các động cơ không chổi than có thể được điều khiển khi vận hành với moment biến thiên hoặc không đổi.

Động cơ dc không chổi quét tuy đắt tiền hơn động cơ dùng vành đổi chiều và chổi quét (có cùng định mức kW) nhưng có các ưu điểm sau:

(a) Đòi hỏi bảo trì ít hoặc không cần bảo trì.

(b) Tuổi thọ dài.

(c) Không có rủi ro gây nổ hoặc bức xạ RF (cao tần) gây ra phóng điện.

(d) Không gây ra bụi do không dùng chổi quét và vành góp.

(e) Có thể nhúng chìm trong chất lỏng, trong khí dễ cháy.

(f) Hiệu suất cao hơn động cơ trợ động dc chổi quét và động cơ dc thông thường.

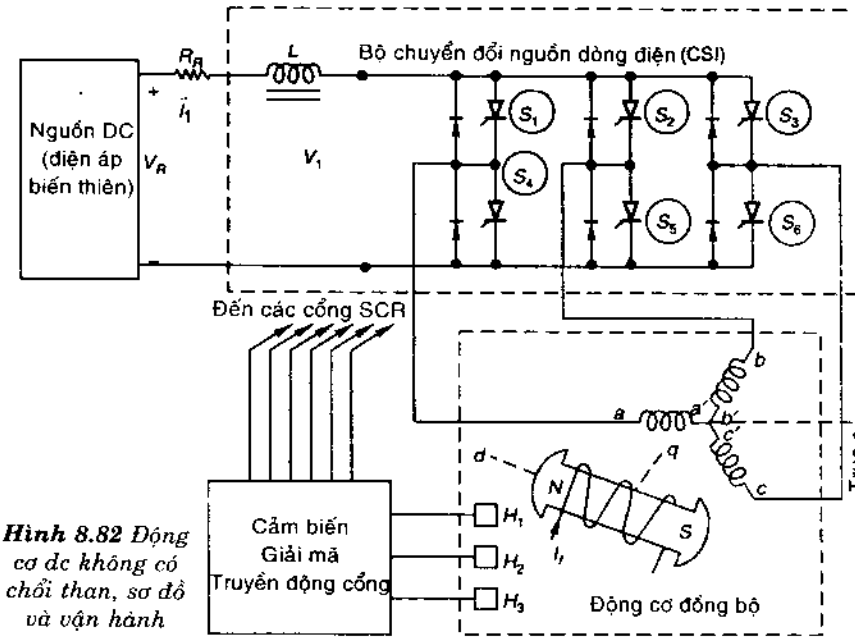
(g) Đáp ứng nhanh và quan hệ dòng điện - moment có độ tuyến tính cao.

Sơ đồ và vận hành

Sơ đồ động cơ dc không chổi than được nêu trên Hình 8.82, gồm 3 pha ở stator (phần ứng) và rotor với trục d và q. Stator được nối với nguồn điện áp - dòng điện biến thiên qua cuộn cảm và một bộ đảo lưu gồm 6 SCR (hoặc transistor công suất, FET) từ S_1 đến S_6. Các diode nối song song ngược chiều với SCR để bảo vệ SCR (tránh điện áp cảm ứng $L(di/dt)$ trong cuộn dây phần ứng khi chuyển mạch đổi chiều). Các cảm biến vị trí được đặt trên rotor, cấp tín hiệu đến bộ giải mã cảm biến và bộ truyền động cổng, làm cho các SCR vận hành theo chuỗi thứ tự đồng bộ với vị trí cơ của rotor. Trường stator và rotor khóa chặt với nhau và giữ đồng bộ ở vận tốc rotor bất kỳ.

Các pha dòng điện lý tưởng là các xung ± I lệch nhau 120^0 (Hình 8.83). Các dạng sóng dòng điện thực, khác với sóng dòng điện lý tưởng chữ nhật do tăng, giảm từ từ. Bộ đảo lưu với dòng điện ac có dạng xung không đổi là bộ đảo lưu dòng điện tùy động CSI.

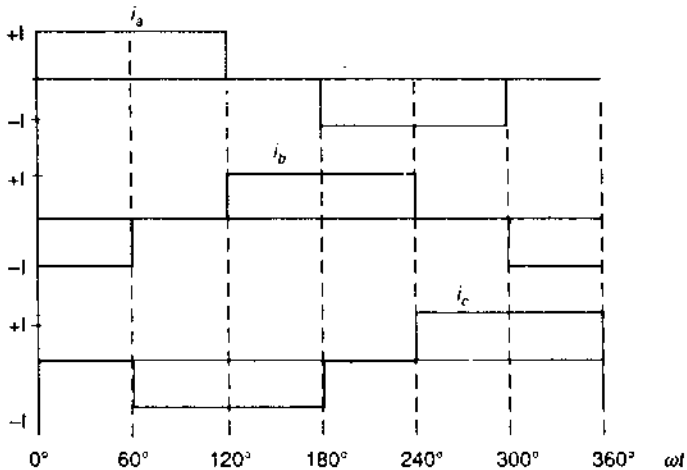
Hình 8.83 minh họa thứ tự hoạt động của bộ đảo lưu tuân theo các dạng sóng dòng điện. Đối với thứ tự SCR dẫn 120^0 hoặc 60^0 các mã cảm biến được



Hình 8.82 *Động cơ dc không có chổi than, sơ đồ và vận hành*

tạo ra từ cảm biến nhạy sáng hoặc cảm biến hiệu ứng Hall. Hình 8.84 minh họa trường hợp 120^0 với bộ cảm biến nhạy sáng đặt cố định cách đều 120^0 nhận ánh sáng từ nguồn sáng cố định. Rotor mang đĩa chuyển mạch quay theo rotor và chặn tia sáng 180^0 đến cảm biến và 180^0 còn lại cho tia sáng đến cảm biến. Cảm biến sẽ cho ra mức logic 1 khi nhận tia sáng và mức logic 0 khi bị tối (đĩa chắn ánh sáng), ba cảm biến (cố định) và đĩa chuyển mạch (quay theo rotor), tạo ra thứ tự mã cảm biến (Hình 8.83) và mạch điện tử phát các xung điều khiển đến cổng SCR, và điều khiển thứ tự dẫn và ngắt các SCR.

Vị trí tương đối của đĩa chuyển mạch có thể được điều chỉnh theo các cực rotor (trục d và trục q). Đối với vị trí rotor tức thời (đĩa cố định), có thể thấy mã cảm biến sẽ thay đổi từ 101 đến 100. Pha "a" ở giữa xung dòng điện khi dòng điện chuyển từ pha "b" sang "c". Tại thời điểm này trường stator kết quả $\vec{F}_1$ định hướng dọc trục a (Hình 8.83) (chiều dương dòng điện động cơ ngược với chiều dương lực điện động cảm ứng); có thể kiểm tra pha "a" bằng cách dùng quy tắc bàn tay phải Fleming. Cực bắc trên stator định hướng theo trục a. Cực bắc này đẩy cực bắc rotor để tạo ra moment động cơ (góc giữa hai cực bắc rotor và stator là β). Vạch chỉ báo đánh dấu trên đĩa chuyển mạch luôn luôn chỉ về cực bắc stator, khi từ trường quay stator đồng bộ với rotor. Vạch

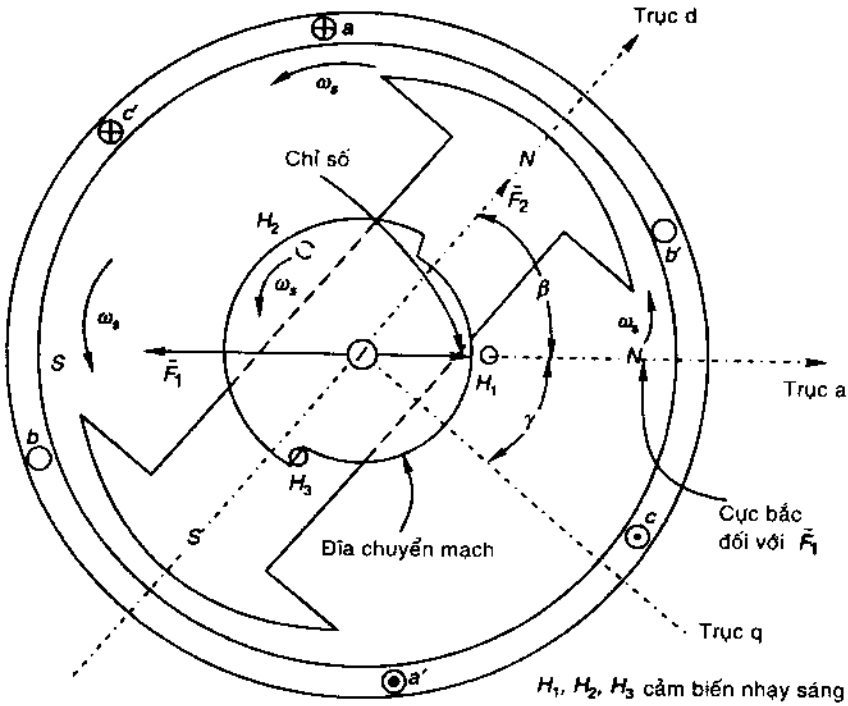


Các mã cảm biến, cách nhau 120°	1	1	1	0	0	0	H_1
	0	0	1	1	1	0	H_2
	1	0	0	0	1	1	H_3
Cách nhau 60°	0	0	0	1	1	1	H_1
	0	0	1	1	1	0	H_2
	0	1	1	1	0	0	H_3
SCR dẫn	1,5	1,6	2,6	2,4	3,4	3,5	

Hình 8.83 *Dạng sóng dòng điện. Thứ tự SCR dẫn và các mã cảm biến.*

chỉ báo tạo góc γ so với trục q của rotor. Trục q trễ pha hơn trục d 90^0 nên (β + γ) = 90^0. Điều chỉnh góc γ bằng cách xoay đĩa chuyển mạch trên trục theo các cực rotor.

Động cơ dc không chổi than có rotor là nam châm vĩnh cửu sử dụng cảm biến hiệu ứng Hall cách nhau 60^0 (Hình 8.85). Cảm biến phát ra mức logic 1 khi đối diện với cực Bắc, và mức logic 0 khi không tiếp xúc với cực Bắc. Thứ tự mã cảm biến theo sự sắp xếp này được nêu trên Hình 8.83. Từ Hình 8.85, có thể thấy H_3 nằm trên trục a, mã cảm biến ở vị trí rotor này chuyển từ 000 đến 001, với dòng điện pha a đang cực đại và chuyển mạch từ pha b đến c. F_1 hướng theo trục a, cực bắc stator dọc theo trục q, nghĩa là γ = 0 (Hình 8.84). Động cơ nam châm vĩnh cửu thường được điều chỉnh theo giá trị γ này (tương ứng với β = 90^0 để tạo ra giá trị moment cảm ứng tốt nhất).



Hình 8.84 *Sự bố trí các cảm biến; cách đều 120°*
và mã cảm biến từ 101 đến 100

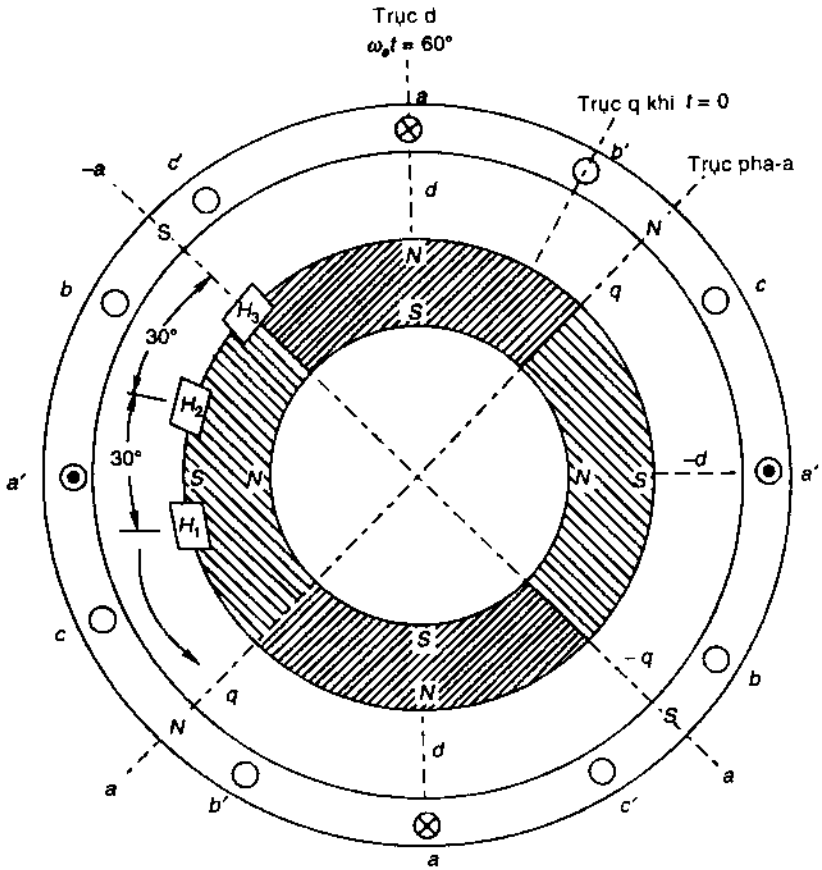
Mô hình mạch điện

Hình 8.86 minh họa mô hình mạch điện Novotny - Abbas của động cơ không có chổi quét dc sử dụng bộ đảo lưu dòng điện nguồn (CSI). Dòng điện cân bằng trong máy điện đồng bộ có mạch CSI (Hình 8.82) là các xung lượn tròn cạnh. Phân tích dựa trên dòng điện ac cơ sở và bỏ qua dòng điện họa tần (sóng hài). Đặt:

I_I = dòng điện nguồn dc cấp cho mạch đảo lưu.

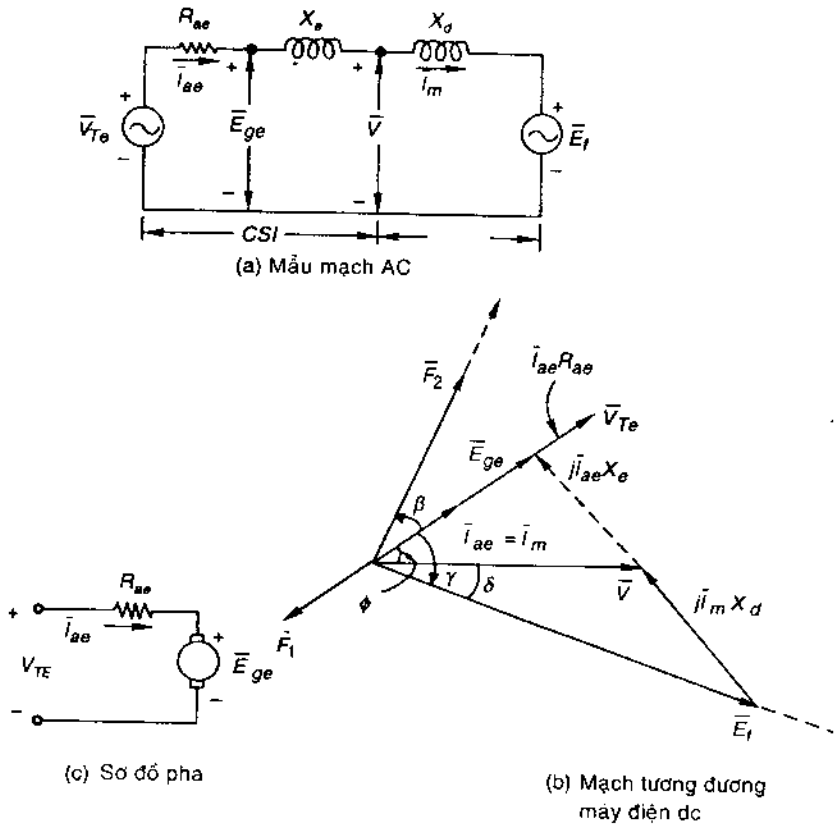
I_m (dòng điện pha hiệu dụng) = dòng điện cơ sở.

$= \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times I_I$ được biểu thị bằng chuỗi khai triển Fourier.



Hình 8.85 *Động cơ nam châm vĩnh cửu được điều khiển dc không dùng chổi, 4 cực, cách nhau 60°, γ = 0, mã cảm biến chuyển từ 000 sang 001*

Trên Hình 8.86 (a), mô hình máy điện đồng bộ thường được vẽ đặc tuyến bằng điện kháng đồng bộ X_d và lực điện động kích thích E_f, cả hai đều biến thiên theo vận tốc chỉ phối tần số vận hành. Độ lớn của E_f liên quan đến dòng điện trường rotor theo đặc tuyến từ hóa. Hình 8.86 (b) là sơ đồ pha tương ứng, với I_m được vẽ sớm pha theo góc ϕ so với V (V là điện áp ac phần ứng trong máy điện đồng bộ). Sự vận hành dòng điện sớm pha được thực hiện để phân biệt với dòng điện khi chuyển mạch bằng SCR.



Hình 8.86 *Mẫu mạch máy điện không chổi quét dc*

Mô hình mạch CSI ac được tạo ra theo các điều kiện sau:

(i) $\bar{I}_{ae} = \bar{I}_m$

(ii) Thông số mạch là điện trở R_{ac}

(iii) $\bar{E}_{ge}$ và $\bar{I}_{ae}$ cùng pha

Các điều kiện này bảo đảm phần mạch đó biểu thị **máy điện dc tương đương**.

Từ Hình 8.84, có thể thấy góc pha giữa $\bar{I}_{ae} = \bar{I}_m$ và E_f là góc γ. Công suất biến đổi trên mỗi pha của máy điện đồng bộ cân bằng với máy dc tương ứng:

$$I_m E_f \cos\gamma = I_{ae} E_{ge}; \quad I_m = I_{ae}$$

$$E_{ge} = E_f \cos\gamma \tag{8.121}$$

Chuyển kết quả này lên sơ đồ pha (Hình 8.86b), sẽ thấy rõ V và E_{ge} liên quan với nhau theo điện kháng X_c ảo (Hình 8.86 (a)).

Bỏ qua tổn thất trên bộ đảo lưu, có thể xác định quan hệ giữa V_{Te} và R_{ae}:

$$V_R I_I = 3\, V_{Te} I_m = 3\, V_{Te}(\sqrt{6}/\pi)\, I_I$$

$$V_{Te} = V_R(\pi / 3\sqrt{6}) \tag{8.122}$$

Giả sử ngắn mạch ở E_{ge}, nghĩa là $E_{ge} = 0$, có thể thấy:

$$I_{ae}(SC) = \frac{V_{Te}}{R_{ae}}$$

$$R_{ae} = \frac{V_{Te}}{I_{ae}(SC)} = \frac{V_R(\pi / 3\sqrt{6})}{(\sqrt{6} / \pi) I_I(SC)} = (\pi^2 / 18)\frac{V_R}{I_I(SC)}$$

$\dfrac{V_R}{I_I(SC)} = R_R$; điện trở trong của mạch chỉnh lưu.

$$R_{ae} = (\pi^2 / 18)\, R_R \tag{8.123}$$

Đặc tính của động cơ dc không chổi quét

Từ Hình 8.86 (c):

$$E_{ge} = V_{Te} - I_{ae} R_{ae} \tag{8.124}$$

Theo pt (8.121):

$$E_{ge} = E_f \cos\gamma \tag{8.125}$$

E_f có thể viết:

$$E_f = K_f \Phi_f \omega_s \cos\gamma \tag{8.126}$$

với Φ_f = từ thông/cực từ, do tác động của riêng I_f

Thay các giá trị vào pt (8.124):

$$K_f \Phi_f \omega_s \cos\gamma = V_{Te} - I_{ae} R_{ae}$$

$$\omega_s = \frac{V_{Te} - I_{ae} R_{ae}}{K_f \Phi_f \cos\gamma} \tag{8.127}$$

Ngoại trừ tác dụng của cosγ, phương trình này tương tự phương trình về máy điện dc điều khiển thông thường.

Moment hình thành được tính từ phương trình:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_s} = \frac{3\,V\,I_{ae}\cos\phi}{\omega_s} = \frac{3\,I_{ae}E_{ge}}{\omega_s};\ V\cos\phi = E_{ge} \qquad (8.128)$$

Sử dụng pt (8.126) để biến đổi:

$$T = 3\,K_f\Phi_f\,I_{ae}\cos\gamma \qquad (8.129)$$

Giả sử đặc tính từ hóa là tuyến tính:

$$E_f = K_f'\,I_f\,\omega_s\cos\gamma \qquad (8.130)$$

Các phương trình tốc độ và moment trở thành

$$\omega_s = \frac{V_{Te} - I_{ae}R_{ae}}{K_f I_f\cos\gamma} \qquad (8.131)$$

$$T = 3\,K'\,I_f\,I_{ae}\cos\gamma \qquad (8.132)$$

Trong động cơ đồng bộ, khi dòng điện trường (rotor) giảm, hệ số công suất sẽ trở nên chậm pha hơn. Nhưng trong động cơ không chổi quét dc (động cơ đồng bộ với hồi tiếp vị trí rotor), dòng điện trường I_f giảm, làm vận tốc tăng (pt 8.131) tương tự động cơ dc thông thường. Điều này có thể giải thích định lượng như sau; từ Hình 8.86, có thể thấy khi I_f giảm, E_f và E_{ge} giảm, và khi R_{ae} rất nhỏ, gây ra $I_{ae} = I_m$ tác động lên E_f cảm ứng và I_m tăng, làm sụt áp I_mX_d tăng (theo sự gia tăng tần số vận hành). Kết quả là có trạng thái ổn định theo vận tốc mới cao hơn ở hệ số công suất sớm pha nhỏ thậm chí trễ pha.

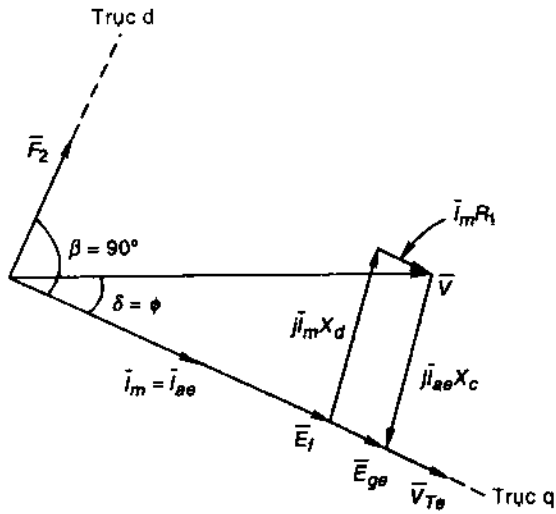
Máy dc nam châm vĩnh cửu không chổi than

Các máy dc không chổi than cỡ nhỏ thường dùng nam châm vĩnh cửu. Trong đó lực từ động rotor của động cơ F_2 cố định và góc γ trong các máy này được xác lập là zero, nghĩa là F_2 và F_1 (lực từ động phần ứng) lệch nhau theo góc 90^0 (tối ưu đối với moment quay). Hơn nữa, điện trở dây pha R_1 không thể bỏ qua, cần cộng vào R_{ae} trong mô hình dc. Sơ đồ pha với γ = 0 được minh họa trên Hình 8.87, từ đó có thể thấy:

1. X_c = dung kháng = X_d (về độ lớn).
2. Góc PF trễ pha.

Quan hệ của các pt (8.127) và (8.129) về vận tốc và moment quay đều được áp dụng, riêng pt (8.124) cần chỉnh sửa như sau:

$$E_{ge} = V_{Te} - I_{ae}\,(R_{ae} + R_1) \qquad (8.133)$$



***Hình 8.87**. Sơ đồ pha của động cơ nam châm vĩnh cửu không chổi than.*

Chương 9

Máy điện cảm ứng

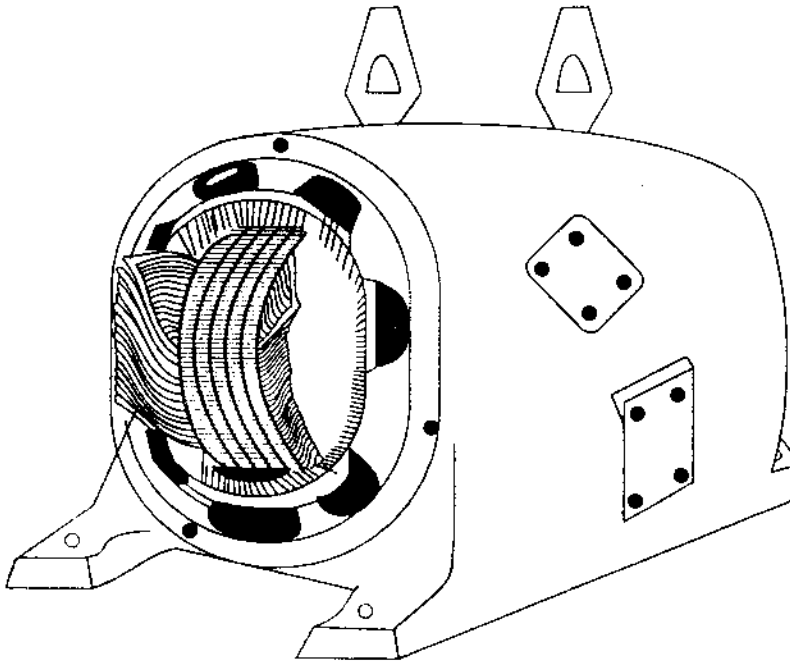
Giới thiệu

Máy điện cảm ứng là loại máy điện quan trọng được ứng dụng rộng rãi làm động cơ trong công nghiệp, động cơ một pha trong nhiều thiết bị dân dụng. Hiện nay, hơn 85% động cơ trong công nghiệp là loại cảm ứng, có vận tốc không đổi với đặc tính mắc song song (shunt), chỉ giảm vận tốc một vài phần trăm từ không tải đến đủ tải (tải định mức). Động cơ cảm ứng chỉ cần cấp điện từ phía stator, khác với động cơ đồng bộ cấp điện ac trên stator và kích thích dc trên rotor. Moment trong động cơ cảm ứng xuất phát từ dòng điện cảm trong rotor nhưng với vận tốc không đồng bộ, nên còn gọi là động cơ *không đồng bộ*. Moment trong máy điện đồng bộ được hình thành từ vận tốc đồng bộ khi "khóa chặt" hai từ trường rotor và stator. Do đó, động cơ cảm ứng không bị hư hỏng do vấn đề ổn định như động cơ đồng bộ. Trong máy điện cảm ứng, nguồn điện chính gây ra dòng điện kích thích, hình thành do từ trường quay trong khe hở không khí. Hệ số công suất trong máy điện cảm ứng nhỏ hơn 1 và thường được điều chỉnh bằng tụ điện ghép song song (ghép shunt) ở các đầu dây động cơ. Hiện chưa có phương pháp đơn giản và rẽ tiền để điều khiển tốc độ động cơ cảm ứng như trong động cơ dc mắc song song. Khoảng rộng điều khiển tốc độ có thể được thực hiện bằng các mạch SCR đắt tiền, do đó động cơ cảm ứng đôi khi có phạm vi sử dụng thấp hơn so với động cơ dc mắc song song..

Cấu trúc

Stator trong động cơ cảm ứng đơn giản hơn máy điện đồng bộ, được quấn dây để dẫn điện 3 pha, thường sử dụng hai lớp dây quấn. Hình 9.1 minh họa stator động cơ điện cảm ứng. Rotor có hai loại là *dây quấn* và *lồng sóc*. Lõi rotor gồm nhiều lá sắt mỏng ghép lại với các rãnh để chứa các cuộn dây quấn hoặc các thanh rotor. Trong máy điện nhỏ, các lá sắt (từ) được xếp chồng và lắp trực tiếp lên trục, trong máy điện lớn, các lá sắt có tiết diện thích hợp được xếp chồng và lắp trên trục.

Cuộn dây của rotor dây quấn là 3 pha, được đặt trong các rãnh lõi rotor. Stator cũng tương tự, nhưng số rãnh ít hơn, số vòng nhiều hơn trên mỗi pha,

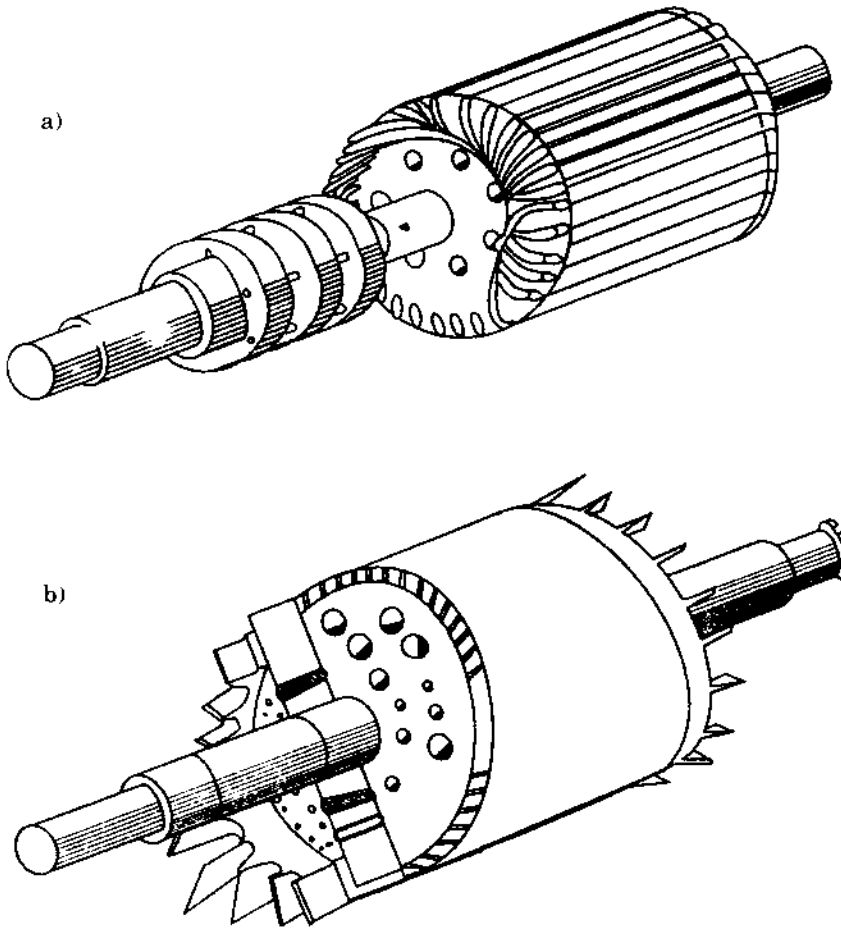


Hình 9.1 *Stator máy điện cảm ứng với dây quấn 2 lớp*

dây dẫn lớn hơn. Rotor được quấn dây và mắc sao, có ba đầu dây ra nối với ba vòng trượt gắn trên trục rotor. Các vòng trượt này bằng đồng, tiếp xúc với ba chổi than. Cấu trúc rotor dây quấn thường được dùng trong máy điện cỡ lớn với các yêu cầu moment khởi động nghiêm ngặt. Hình 9.2 a minh họa rotor có vòng trượt. Điện trở bên ngoài có thể nối vào mạch rotor qua vòng trượt để giảm dòng điện khởi động đồng thời cải thiện moment khởi động.

Rotor lồng sóc có các thanh dẫn điện đặt trong các rãnh rotor và được làm ngắn mạch ở hai đầu (mỗi đầu có một vòng dẫn nối liền các thanh). Rotor lồng sóc còn gọi là rotor ngắn mạch (Hình 9.2b), được dùng trong các động cơ nhỏ. Trong máy điện lớn, các thanh và vòng ngắn mạch được làm bằng đồng. Rotor có đường kính đến 50 cm, các thanh và vành ngắn mạch được làm bằng nhôm.

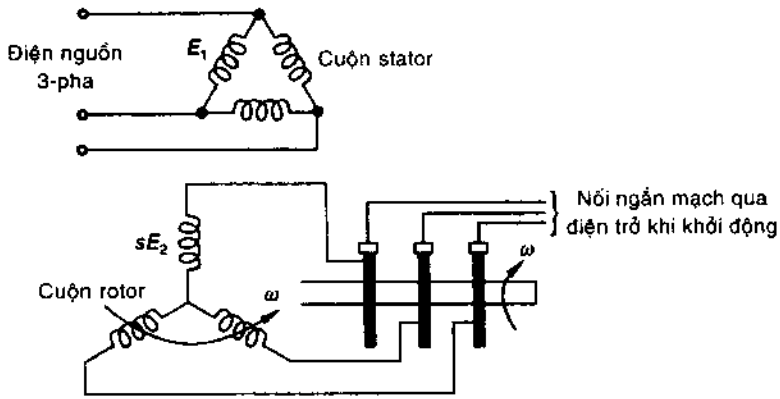
Động cơ rotor lồng sóc có moment khởi động thấp, nhưng khi động cơ đạt đủ tốc độ thường hoạt động rất tốt. Vì vậy khi cần moment khởi động lớn, không nên sử dụng động cơ lồng sóc. Để có moment khởi động trung bình, động cơ lồng sóc phải là loại rotor lồng sóc kép hoặc rotor rãnh sâu.



Hình 9.2 *(a) Rotor dây quấn của động cơ cảm ứng;*
(b) Rotor lồng sóc với các thanh và vòng ngắn mạch bằng nhôm đúc.

Rotor có số rãnh ít hơn stator để tránh khóa chặt từ trường rotor với stator khi khởi động. Các rãnh trong máy điện cảm ứng có dạng nửa kín để tăng tốc độ dẫn từ trên cực từ, để dòng điện từ hóa duy trì trong giới hạn nhỏ hơn hệ số công suất đơn vị.

Hình 9.3 minh họa sơ đồ nối dây động cơ cảm ứng vòng trượt ba pha, với stator nối tam giác và nối sao. Các cuộn dây rotor được nối với ba vòng trượt;



Hình 9.3 *Động cơ cảm ứng vòng trượt ba pha - sơ đồ nối dây*

có ba chổi điện cố định quét trên ba vòng trượt và được nối tắt qua điện trở ngoài khi khởi động. Điện trở được ngắt ra khi động cơ đạt đủ tốc độ.

Rotor lồng sóc có các thanh ngắn mạch thường xuyên, có thể được thay thế, theo quan điểm mạch điện, bằng rotor dây quấn tương ứng.

Sóng từ thông và lực từ động - nguyên lý vận hành

Nguyên lý vận hành chủ yếu của động cơ cảm ứng đã được đề cập trong Chương 5, ở đây sẽ tóm tắt các ý chính và phân tích mô hình mạch điện để có thể dễ dàng tính toán.

Hình 9.4 minh họa mặt cắt ngang của động cơ cảm ứng. Stator được cấp điện từ nguồn ba pha có điện áp V/pha và tần số f Hz. Rotor quấn dây ba pha có số cực như stator và được ngắn mạch. Giả sử điện trở stator và điện kháng rò đều không đáng kể:

$$V = E_1 = \pi\sqrt{2}\, k_{w1} N_{ph1}(\text{nối tiếp})\, f\Phi_r \qquad (9.1)$$

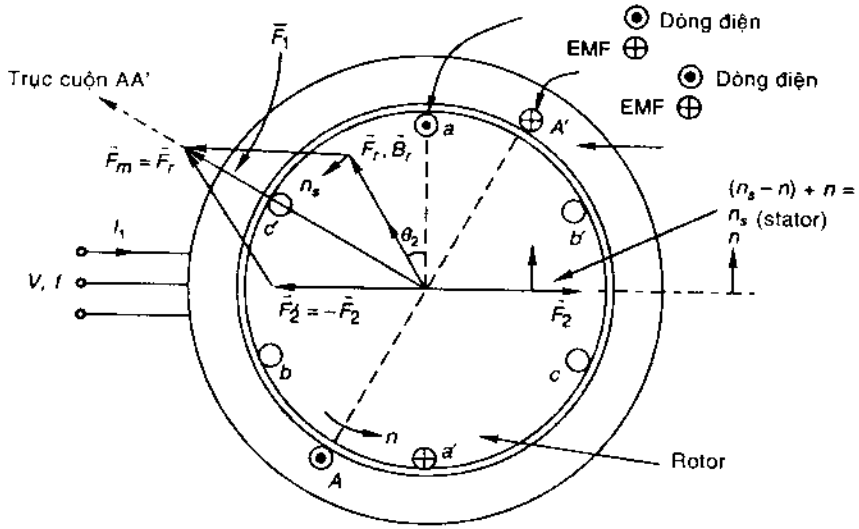
với E_1 = lực điện động cảm ứng trên stator/pha

K_{w1} = hệ số dây quấn stator

N_{ph1} (nối tiếp) = số vòng dây nối tiếp trên stator/pha.

Φ_r = từ thông tổng trong khe hở không khí/cực từ

Từ phương trình 9.1 ta thấy: bất chấp các điều kiện tải trên rotor. Φ_r, từ thông/cực từ được thiết lập trong khe hở không khí là hằng số chỉ liên quan đến điện áp cung cấp (theo giả định trên). Vector lực từ động $\bar{F}_r$ cùng với



Hình 9.4 *Sóng lực điện động và từ thông trong động cơ cảm ứng*

vector mật độ từ thông $\vec{B}_r$ và từ thông Φ_r tương ứng, tất cả đều có vận tốc quay đồng bộ khi được liên kết với các dòng điện 3-pha cân bằng. Tốc độ tương đối giữa $\vec{B}_r$ và rotor tạo ra sự cảm ứng dòng điện trong rotor ngắn mạch. Moment phát sinh do tương tác giữa $\vec{B}_r$ và dòng điện rotor, theo định luật Lenz làm quay rotor theo chiều quay của $\vec{B}_r$, làm giảm vận tốc quay. Đó là động cơ tự khởi động, rotor đạt vận tốc ổn định $n < n_s$ phụ thuộc vào tải trên trục rotor (trục động cơ). Chú ý, moment không được tạo ra ở $n = n_s$ vì vận tốc giữa $\vec{B}_r$ và rotor bằng zero, sẽ không có dòng cảm ứng trong rotor.

Độ trượt và tần số của dòng điện rotor

Từ Hình 9.4, có thể thấy $\vec{B}_r$ chuyển động theo vận tốc $(n_s - n)$ so với các dây dẫn rotor (cùng chiều với $\vec{B}_r$). Đó là vận tốc trượt. Độ trượt được định nghĩa như sau:

$$s = \frac{\text{Tốc độ trượt}}{\text{Tốc độ đồng bộ}} = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} \qquad (9.2)$$

Khi s = 1 thì n = 0; rotor đứng yên (không quay)

s = 0 thì $n = n_s$; rotor quay với vận tốc đồng bộ.

Tần số dòng điện cảm ứng trong rotor là:

$$f_2 = \frac{(n_s - n)P}{120} = \left(\frac{n_s - n}{n_s}\right) \times \left(\frac{n_s P}{120}\right) = sf \qquad (9.3)$$

Độ trượt của động cơ với tải định mức ở khoảng 2 - 8%, nên tần số của dòng điện rotor f_2 thấp khoảng 1 - 4 Hz.

Lực điện động rotor trên mỗi pha ở s = 1 (rotor *đứng yên*) là:

$$E_2 = \pi\sqrt{2}k_{w2}N_{ph2}(\text{nối tiếp})f\Phi_r \qquad (9.4)$$

Ở độ trượt bất kỳ, tần số rotor là sf, lực điện động cảm ứng trên rotor là sE_2.

Trở kháng mạch rotor là:

$$\overline{Z}_2 = R_2 + jX_2 \text{ (khi rotor đứng yên)}$$

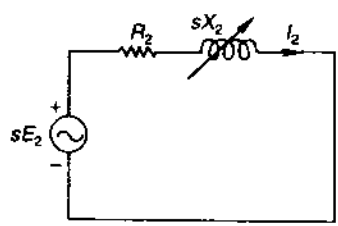
Với X_2 = điện kháng rò của rotor khi đứng yên (tần số rotor = tần số stator, f).

Khi rotor quay với độ trượt s, tần số mạch rotor là sf, trở kháng sẽ là:

$$\overline{Z}_2 = R_2 + jsX_2 \qquad (9.5)$$

Theo đó, tần số dòng điện rotor, lực điện động cảm ứng và điện kháng tỷ lệ thuận với độ trượt s. Hình 9.5 minh họa mạch rotor với độ trượt s. Góc pha của mạch là:

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{sX_2}{R_2} \text{ (trễ pha)} \qquad (9.6)$$



Hình 9.5 *Mạch rotor (tần số sf)*

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1}N_{ph1}}{k_{w1}N_{ph2}} = \frac{N_{e1}}{N_{e2}} = a \qquad (9.7)$$

với N_{e1}, N_{e2} = số vòng/pha hiệu dụng của stator và rotor.

Lực từ động và moment

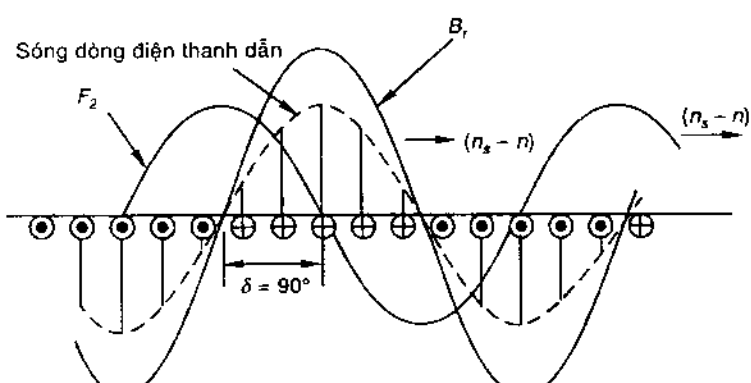
Từ Hình 9.4, có thể thấy vector mật độ từ thông tổng hợp $\dot{B}_r$ quay với tốc độ $(n_s - n)$ so với rotor, lực điện động dương cực đại cảm ứng trong cuộn dây aa' của rotor khi $\vec{B}_r$ sớm pha 90^0 so với trục cuộn dây aa'. Do dòng điện trong cuộn

dây aa' chậm pha theo góc θ_2, so với lực điện động cảm ứng, nên dòng điện rotor này sẽ dương cực đại khi $\vec{B}_r$ quay thêm một góc θ_2. Ở thời điểm này, vector lực từ động rotor $\vec{F}_2$ nằm trên trục cuộn dây aa', $\vec{B}_r$ (hoặc $\vec{F}_r$) sớm pha hơn $\vec{F}_2$ theo góc $\delta = (90^0 + \theta_2)$. F_2 làm cho dòng điện rotor tần số $f_2 = sf$ quay so với dây dẫn rotor theo tốc độ $(n_s - n)$ và tốc độ n_s so với stator khi rotor chuyển động cùng chiều với tốc độ n so với stator. $\vec{F}_2$ và $\vec{F}_r$ quay ở vận tốc n_s đồng bộ với ba pha trên stator, góc lệch pha giữa chúng là $(90^0 + \theta_2)$. Sự tương tác giữa từ trường rotor và từ trường tổng hợp tạo nên moment:

$$T = \frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r F_2 \sin(90^0 + \theta_2) = \frac{\pi}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_r F_2 \cos\theta_2 \qquad (9.8)$$

Moment T có cùng chiều quay với $\vec{F}_r$.

Xét rotor lồng sóc với các thanh dẫn đồng dạng xếp đều xung quanh rotor. Lực từ động phản kháng F_2 được đánh giá rõ trên sơ đồ triển khai (Hình 9.6) với sóng B_r chuyển động tương đối với rotor ở vận tốc trượt $(n_s - n)$. Bỏ qua điện kháng rotor, các dòng điện trên thanh dẫn (ngắn mạch) cùng pha với lực điện động cảm ứng trên thanh dẫn. Dòng điện thanh dẫn phân bố hình sine cùng pha, cùng vận tốc đồng bộ với sóng B_r. Sóng lực từ động rotor là hình sine theo cấp cùng số lượng cực từ khi sóng B_r chuyển động đồng bộ. Sóng cơ sở F_2 (Hình 9.6) chậm pha 90^0 so với sóng B_r. Nếu tính đến điện kháng rotor, sóng dòng điện thanh dẫn (rotor) và sóng lực từ động rotor sẽ trễ pha theo góc θ_2. Do đó, góc giữa các sóng B_r và F_2 sẽ là $90^0 + \theta_2$, tương tự rotor dây quấn. Rotor lồng sóc có cảm ứng phản kháng tương tự rotor dây quấn, có thể thay bằng rotor dây quấn tương đương.



Hình 9.6 *Lực từ động trong rotor lồng sóc với giả thiết điện kháng không đáng kể*

Từ pt (9.8), rotor điện kháng thấp ($\theta_2 = \tan^{-1} jsX_2/R_2$) sẽ tạo ra moment lớn theo các đại lượng đã cho Φ_r, F_2 và s. Về mặt này, động cơ lồng sóc có ưu điểm so với động cơ rotor dây quấn vì rotor lồng sóc có điện kháng thấp hơn.

Dòng điện rotor, có tần số s*f* gây ra lực từ động F_2, và F_2 có vận tốc đồng bộ với từ trường quay stator. Nói cách khác, điện kháng của dòng điện rotor tương ứng dòng điện tần số *f* trên stator, dòng điện rotor khi quan sát từ stator, có tần số *f* nhưng có cùng giá trị hiệu dụng.

Lực từ động stator $\vec{F}_1$ được tính theo phương trình vector (Hình 9.4):

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_r - \vec{F}_2 \tag{9.9}$$

$\vec{F}_1$ được chia thành hai phần:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_m + \vec{F}_2' \tag{9.10}$$

trong đó, $\vec{F}_2'$ bằng về giá trị và ngược chiều với $\vec{F}_2$.

$$\vec{F}_m = \vec{F}_r \tag{9.11}$$

Dòng điện pha stator (của ba pha cân bằng) tạo ra $\vec{F}_1$ (ứng với pt 9.10), $\vec{I}_1$ được chia thành hai phần:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_m + \vec{I}_2' \tag{9.12}$$

$\vec{I}_1$ là *dòng điện từ hóa* tạo ra lực từ động tổng hợp F_r và từ thông tổng hợp Φ_r/ cực, $\vec{I}_2'$ là thành phần dòng điện stator cân bằng với phản kháng F_2 của dòng điện rotor I_2.

Hình 9.4 còn biểu thị vị trí tương đối và chiều dương của dòng điện cuộn dây AA'. Các vector này ở thời điểm I_2 có giá trị dương cực đại. Để F'_2 khử F_2, thành phần dòng điện stator cân bằng lực từ động rotor phải cùng pha với dòng điện rotor khi quan sát từ stator. Xét về độ lớn:

$$F'_2 = F_2$$

$$\frac{4\sqrt{2}}{\pi} K_{w1}\left(\frac{N_{ph1}}{P}\right) I_2' = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} K_{w2}\left(\frac{N_{ph2}}{P}\right) I_2$$

$$I_2' = \frac{N_{e2}}{N_{e1}} I_2 = \frac{1}{a} I_2 \tag{9.13}$$

F'_2 ngược chiều với F_2, để chúng triệt tiêu lẫn nhau, còn I'_2 và I_2 phải tuân theo tỷ lệ từ pt (9.13) và cùng pha.

Trên Hình 9.4, có thể thấy trong stator chiều dương của lực điện động E_1 ngược chiều dương của I_1, trong rotor chiều dương của I_2 cùng chiều với sE_2 (tương tự trường hợp máy biến áp)

Với chiều dòng điện dương trong cuộn dây stator AA' và chiều trục cuộn dây (Hình 9.4), theo định luật cảm ứng, sẽ có lực điện động dương cùng chiều với dòng điện là:

$$e = +\frac{d\lambda}{dt}$$

Tương tự trường hợp máy biến áp, pha từ thông Φ_r và dòng điện từ hóa trễ pha 90^0 so với E_1. Trong mô hình mạch, I_m được vẽ bằng điện kháng từ hóa X_m qua lực điện động E_1.

Mạch tương đương

Máy điện cảm ứng có mô hình mạch tương tự máy biến áp. Có thể tóm tắt như sau:

1. $$\frac{E_1}{E_2} = a; \quad \frac{I'_2}{I_2} = \frac{1}{a}$$

   với E_2 là lực điện động rotor đứng yên.

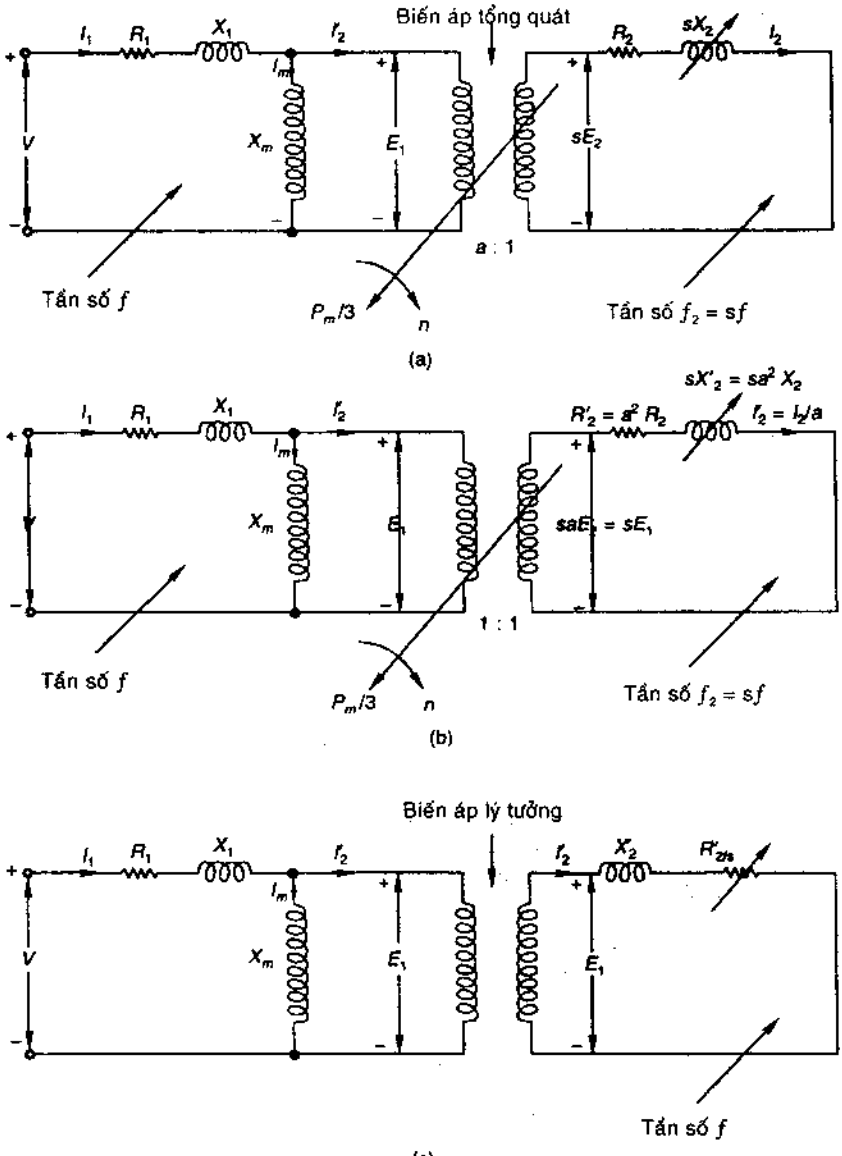
I'_2 chạy vào đầu dương của E_1 và I_2 chạy ra khỏi đầu dương của E_2. Ngoài ra, I_2, khi quan sát từ phía stator, là dòng điện stator có tần số *f* và cùng pha với I'_2, thành phần dòng điện từ stator để cân bằng lực từ động rotor F_2.

2. Tương tự máy biến áp, thành phần dòng điện từ hóa I_m của dòng điện stator trễ pha 90^0 so với lực điện động cảm ứng E_1 trên stator.

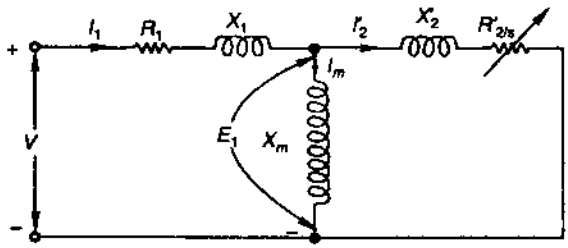
3. Động cơ cảm ứng, không như máy biến áp biến đổi mức điện áp và dòng điện, chỉ biến đổi tần số tỷ lệ với độ trượt, lực điện động cảm ứng trong rotor là sE_2 và điện kháng rotor là sX_2.

Hình 9.7a minh họa mô hình mạch tương đương động cơ cảm ứng trên cơ sở pha, bao gồm các phần tử nối tiếp điện trở stator và điện kháng rò. Theo liên kết máy biến áp, mạch rotor và stator là *máy biến áp lý tưởng tổng quát*, trong đó, điện áp rotor đứng yên E_2 và dòng điện rotor I_2 được liên kết với các đại lượng stator qua tỷ số biến áp a, trong khi thông số tần số xuất hiện trong mạch rotor qua độ trượt s, là thông số cơ.

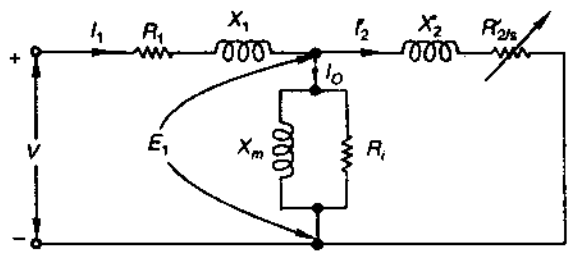
Mạch rotor có thể quy chiếu từ phía stator theo hai bước, xác định lại mạch rotor để tỷ số vòng dây là đơn vị, sau đó tính kết quả biến đổi tần số trong mạch rotor tương đương ở tần số stator.



Hình 9.7 *Xây dựng mô hình mạch tương đương cho động cơ cảm ứng*



(d)



(e)

***Hình 9.7** (tt)*

Bằng cách nhân điện áp rotor với a và dòng điện rotor với 1/a, trở kháng rotor được xác định là:

$$\overline{Z}_2 = a^2R_2 + jsa^2X_2 = R'_2 + jsX'_2;\ R'_2 = a^2R_2,\ X'_2 = a^2X_2 \qquad (9.14)$$

Do đó công suất là bất biến. Mạch rotor sau bước này được minh họa trên Hình 9.7 b, đó là rotor tương đương có tỷ số vòng đơn vị với stator

Từ mạch rotor tương đương (Hình 9.7b)

$$\overline{I}'_2 = \frac{s\overline{E}_1}{R'_2 + jsX'_2} \qquad (9.15a)$$

Chia tử số và mẫu số cho s:

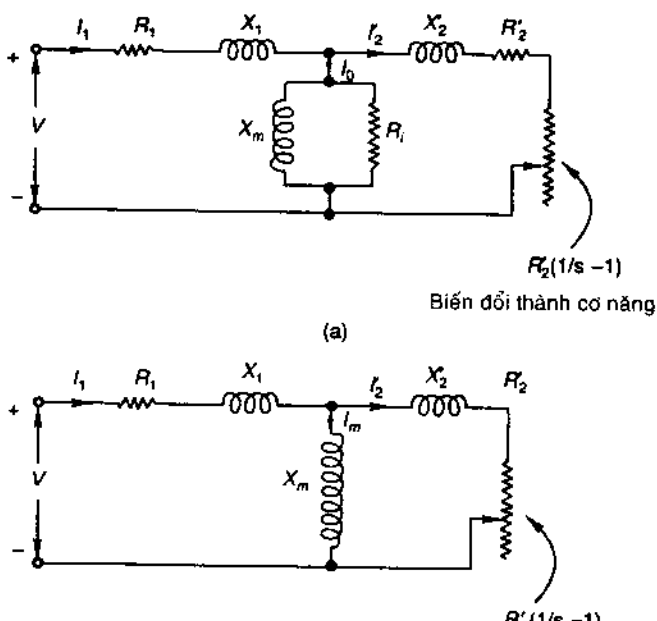
$$\overline{I}'_2 = \frac{\overline{E}_1}{(R'_2/s) + jX'_2} \qquad (91.5b)$$

Hình 9.7c minh họa mạch rotor, trong đó mạch rotor và stator có cùng tần số, biến áp lý tưởng trở thành biến áp dừng có tỷ số vòng đơn vị. Chú ý, mạch rotor quy chiếu theo tần số stator có điện kháng X'_2 không đổi trở thành điện

trở biến đổi R'_2/s. Phương trình 9.15b không phải là công suất bất biến (điện áp thay đổi trong khi dòng điện không đổi). Công suất truyền đến thứ cấp được tính cho tổn thất dây đồng rotor và công suất cơ (dưới dạng điện). Điều này tương phản với Hình 9.7a, với công suất cơ được lấy qua trục động cơ.

Nếu R'_2 được tách ra từ R'_2/s để thể hiện tổn thất dây đồng (rotor), mạch tương đương có thể vẽ như trên Hình 9.8 (a) với điện trở biến thiên $R'_2(1/s - 1)$, thể hiện công suất cơ ra dưới dạng điện. Mô hình mạch trên Hình 9.8 (b) có thể sử dụng (tương ứng mạch trên Hình 9.7d) với điện trở tổn thất sắt R_i không vẽ và được trừ ra trong công suất cơ trên trục (công suất hấp thụ theo $R'_2(1/s - 1)$), và phải tính gần đúng đủ để thỏa hoàn toàn với mức trượt bình thường trong động cơ cảm ứng.

Công suất tiêu tán $R'_2(1/s - 1)$ gồm cả tổn thất lõi, phải trừ đi từ công suất cơ ra. Tổn thất do quạt gió và ma sát cũng phải được trừ ra. Tổn thất lõi với tổn thất quạt gió và ma sát (*tổn thất quay*) xảy ra khi động cơ hoạt động. Tổn thất quay trong động cơ cảm ứng không đổi khi điện áp nguồn không đổi và tốc độ động cơ thay đổi ít từ không tải đến đủ tải (tải định mức).

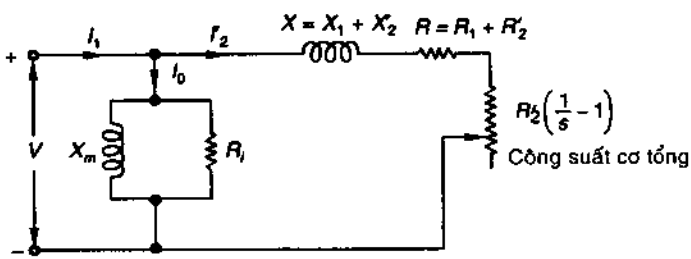


Hình 9.8 *Công suất cơ ngõ ra. (Trừ phần tổn thất lõi sắt)*

Mạch tương đương gần đúng

Mô hình mạch tương đương gần đúng của động cơ cảm ứng, cho phép dễ dàng tính toán và phân tích, có thể thiết lập bằng cách chuyển nhánh song song (Hình 9.8a) đến các đầu dây vào (Hình 9.9). Bước này chưa được xét như trong máy biến áp có cường độ dòng kích thích cao (và dòng từ hóa), do có khe hở không khí, có thể đạt đến 30 - 50% dòng điện tải toàn phần. Hơn nữa, trở kháng rò sơ cấp cũng phải cao hơn trong động cơ cảm ứng so với biến áp và bỏ qua độ sụt điện áp do điện kháng sơ cấp chưa được xét đến. Do đó, các kết quả tính toán từ mô hình mạch tương đương gần đúng có độ chính xác không cao.

Trên Hình 9.9 có thể thấy, do nhánh song song từ hóa lấy dòng điện I_0 trễ pha gần 90^0, hệ số công suất khi động cơ vận hành với tải toàn phần chừng 0.8. Ở tải nhẹ (I'_2 nhỏ) hệ số công suất còn thấp hơn, do có khe hở không khí trong mạch từ và dòng điện kích thích từ nguồn chính (phía stator).



Hình 9.9. *Mô hình mạch tương đương gần đúng của động cơ cảm ứng.*

Công suất khe hở không khí, moment và công suất ra

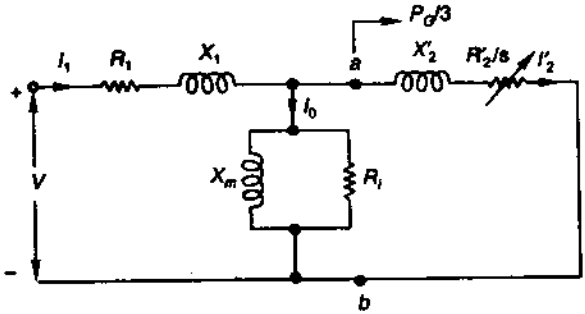
Công suất trên 2 đầu ab trong mô hình mạch này (Hình 9.10) là công suất điện vào trên từng pha đã trừ tổn thất stator (tổn thất đồng và sắt trên stator), là công suất truyền từ stator đến rotor qua từ trường khe hở không khí, ký hiệu giá trị 3-pha là P_G.

Từ Hình 9.10:

$$P_G = 3\,I_2'^{\,2}(R_2'/s) = \frac{3\,I_2'^{\,2}R_2'}{s} \qquad (9.16)$$

Công suất qua khe hở không khí = tổn thất đồng rotor/độ trượt

$$\text{Tổn thất đồng rotor, } P_{cr} = 3\,I_2'^{\,2}R_2' = sP_G \qquad (9.17)$$



Hình 9.10. *Mô hình mạch động cơ cảm ứng.*

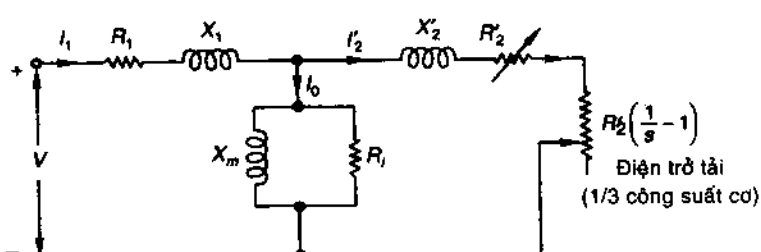
Một phần công suất P_G bị tổn hao trong dây đồng rotor, và trừ đi tổn hao này P_G còn lại là công suất cơ đầu ra (công suất cơ tổng hợp):

$$P_m = P_G - I_2'^2 R_2' = 3\, I_2'^2 R_2' \left(\frac{1}{s} - 1\right) = (1 - s)P_G \qquad (9.18)$$

Công suất tổng hợp cơ ngõ ra (chưa tính các tổn thất cơ) bằng công suất điện ba pha tiêu thụ ở điện trở $R_2'\left(\frac{1}{s} - 1\right)$. Mạch trên Hình 9.10 được chỉnh sửa với công suất cơ (Hình 9.11) trong đó R'_2/s được tính là:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + \underbrace{R_2'\left(\frac{1}{s} - 1\right)}_{\text{Điện trở tải}}$$

Từ pt (9.18) có thể thấy công suất cơ ngõ ra là phần (1 - s) của tổng công suất phân phối cho rotor, còn pt (9.17), phần s là công suất tiêu tán do tổn thất đồng rotor. Vận hành động cơ cảm ứng ở độ trượt cao là không hiệu quả.



Hình 9.11. *Mạch động cơ cảm ứng với công suất cơ.*

Động cơ cảm ứng phải được thiết kế để vận hành có độ trượt thấp (2 - 8%) ở tải định mức.

Tốc độ rotor

$$\omega = (1 - s)\,\omega_s \qquad \text{rad(cơ)/s.}$$

Moment điện từ:

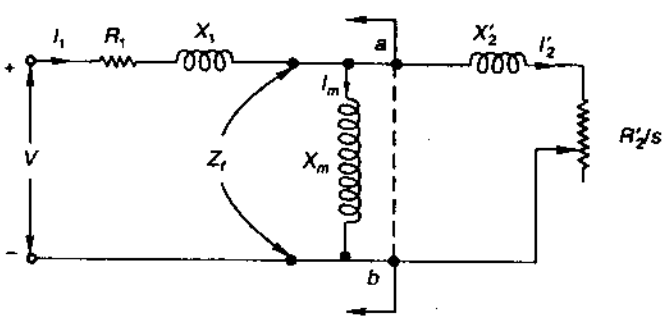
$$(1 - s)\,\omega_s T = P_m = (1 - s)\,P_G$$

$$T = \frac{P_G}{\omega_s} = \frac{3\,I_2'^{\,2}(R_2'/s)}{\omega_s} \qquad (9.19)$$

Đây là kết quả quan trọng, theo đó moment nhận được từ công suất qua khe hở không khí chia cho vận tốc đồng bộ (rad/s) khi công suất này truyền ở vận tốc đồng bộ. Vì thế công suất qua khe hở không khí P_G còn là moment có đơn vị watt - đồng bộ.

Sau khi trừ các tổn thất (quạt gió, ma sát và mâm tải), sẽ nhận được moment và công suất cơ hiệu dụng.

Khi tính toán công suất động cơ cảm ứng, phương pháp tổng quát là sử dụng mô hình mạch trên Hình 9.7d được vẽ lại trên Hình 9.12 với công suất cơ và moment trừ các tổn thất, gồm: tổn thất đồng, tổn thất quạt gió, ma sát và tổn thất mâm tải.



Hình 9.12. *Sơ đồ mạch tính toán.*

Các bước tính toán

Phương pháp tính thuận tiện đối với độ trượt cho trước là tính:

$$Z_f = j\,X_m // (R_2'/s + j\,X_2') = R_f + j\,X_f$$

trong mô hình mạch trên Hình 9.12. Khi đó

$$P_G = 3\,I_1^2 R_f, \qquad T = \frac{3\,I_1^2 R_f}{\omega_s}\ \text{Nm} \tag{9.20}$$

Phương pháp này rất thuận tiện để tính dựa trên một pha và biến đổi thành giá trị ba pha.

Ví dụ 9.1: Động cơ cảm ứng 3 pha, 50 Hz, 6 - cực, chạy ở đủ tải, tạo ra moment có ích là 160 Nm khi lực điện động rotor gồm 120 chu kỳ mỗi phút. Hãy tính công suất ra trên trục. Nếu tổn thất moment do ma sát và tổn thất lõi 10 Nm, hãy tính:

(a) Tổn thất đồng trong dây quấn rotor.

(b) Công suất vào động cơ.

(c) Hiệu suất động cơ.

Tổng tổn thất stator là 800 W.

Giải

$$f_2 = sf = \frac{120}{60} = 2\ \text{Hz}$$

$$s = \frac{2}{50} = 0.04 = 4\%$$

$$n_s = 1000\ \text{rpm}$$

$$n = (1 - 0.04) \times 1000 = 960\ \text{rpm.}$$

$$\omega = \frac{960 \times 2\pi}{60} = 100.53\ \text{rad / s}$$

Công suất ra trên trục động cơ = 160 x 100.53 = 16.085kW.

Công suất cơ hình thành, P_m = (160 + 10) x 100.53 = 17.09 kW.

Tổn thất moment quay được cộng vào công suất trên trục

(a) $$P_m = 3\,I_2^2 R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)$$

Tổn thất đồng trên rotor = $3\,I_2^2 R_2 = P_m\left(\frac{s}{1 - s}\right) = 17.090 \times \frac{0.04}{1 - 0.04} = 712\ \text{W}$

(b) Công suất vào động cơ = 17.09 + 0.712 + 0.8 = 18.602 kW.

(c) Hiệu suất động cơ $\eta = \frac{16.084}{18.602} = 86.47\%$

Đặc tuyến moment - trượt

Biểu thức của đặc tuyến moment trượt T(s) được xác định từ mạch tương đương ở phần bên trái ab trên Hình 9.12.

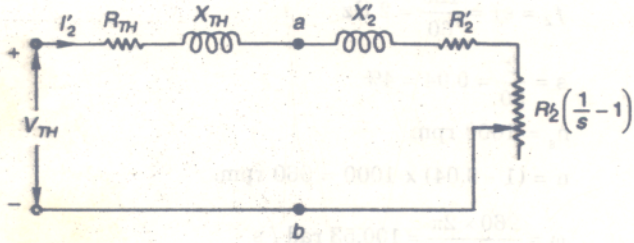
$$\overline{Z}_{TH} = (R_1 + j X_1) // j X_m = R_{TH} + j X_{TH}$$

$$V_{TH} = V\left[\frac{j X_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)}\right]$$

Mạch này được rút gọn thành mạch trên Hình 9.13 cho phép lấy V_{TH} làm điện áp quy chiếu. Từ Hình 9.13:

$$I_2'^{\,2} = \frac{V_{TH}^2}{(R_{TH} + R_2'/s)^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \tag{9.21}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} I_2'^{\,2}(R_2'/s) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2(R_2'/s)}{(R_{TH} + R_2'/s)^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \tag{9.22}$$



Hình 9.13 *Mạch tương đương Thevenin của máy điện đồng bộ.*

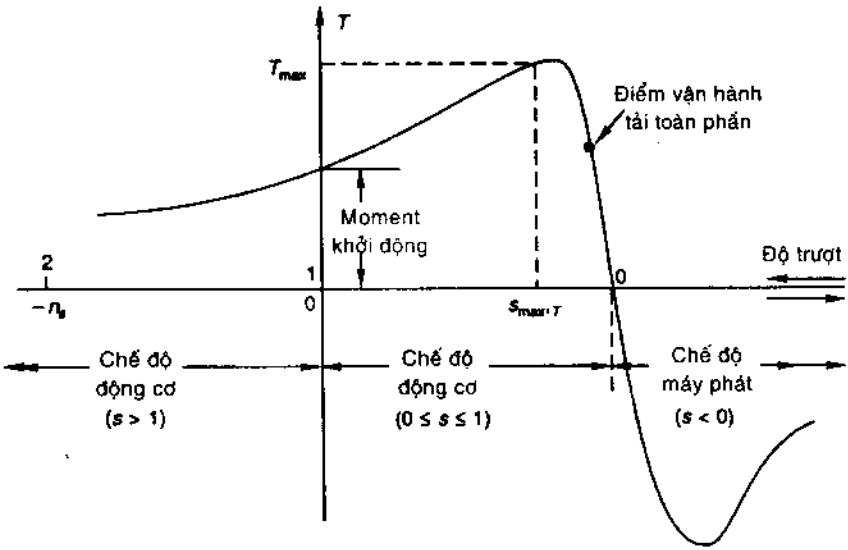
Phương trình (9.22) là biểu thức moment hình thành theo hàm điện áp và độ trượt. Với giá trị độ trượt cho trước, moment tỷ lệ với bình phương điện áp. Đặc tuyến moment - độ trượt ở điện áp (định mức) không đổi được vẽ trên Hình 9.14. Các đặc tính của đặc tuyến này bao gồm:

1. *Chế độ động cơ: $0 \le s \le 1$:*

Với khoảng độ trượt này, điện trở tải trong mạch (Hình 9.13) là dương, nghĩa là công suất cơ đầu ra và moment có cùng chiều quay với rotor.

(a) Moment là zero ở $s = 0$.

(b) Moment có giá trị cực đại, còn gọi là *moment ngắt* (T_{BD}) ở độ trượt $s_{max,T}$. Động cơ sẽ giảm tốc nếu tải lớn hơn moment này.



Hình 9.14 *Đặc tuyến moment - độ trượt*

(c) Ở s = 1, tức là khi rotor dừng, đây là moment khởi động T_s, nhỏ hơn nhiều so với T_{BD}.

(d) Điểm vận hành bình thường ở dưới T_{BD}. Độ trượt đủ tải thường là 2.8%.

(e) Đặc tuyến momet - trượt từ không tải đến gần tải định mức hầu như tuyến tính.

2. *Chế độ máy phát điện: s < 0*

Với độ trượt âm, rotor chạy ở vận tốc siêu đồng bộ ($n > n_s$). Điện trở tải âm (Hình 9.13), nghĩa là công suất cơ phải được cấp vào và công suất điện ra ở các đầu dây máy điện.

3. *Chế độ hãm: s > 1*

Động cơ chạy ngược chiều với từ trường quay (nghĩa là n âm) hấp thụ cơ năng (tác động hãm), tiêu tán ở dạng nhiệt trong dây đồng rotor.

Moment cực đại (moment ngắt)

Moment cực đại và độ trượt tương ứng có thể được xác định bằng cách lấy vi phân pt (9.22), điều kiện moment cực đại dễ xác định từ *định lý truyền công suất cực đại* trong lý thuyết mạch. Từ pt (9.19), moment cực đại khi $I_2'^2(R_2'/s)$ cực đại, nghĩa là công suất cực đại được hấp thu bằng R_2'/s (Hình 9.13). Điều kiện này là:

$$\frac{R_2'}{S_{max,T}} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2}$$

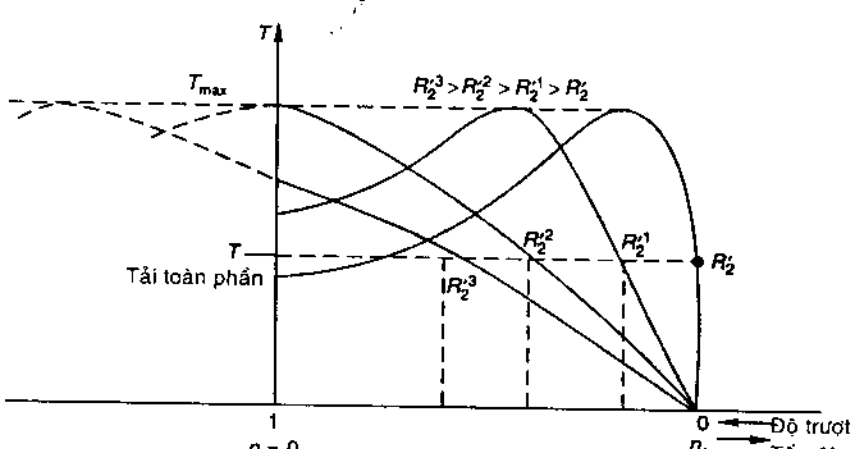
$$S_{max,T} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2}} \qquad (9.23)$$

Thay vào pt (9.22) và rút gọn:

$$S_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{0.5V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH} + (X_{TH} + X_2')^2}} \qquad (9.24)$$

Có thể thấy moment cực đại độc lập với điện trở rotor (R'_2) còn độ trượt tương ứng tỷ lệ thuận với R'_2.

Đặc tuyến moment - độ trượt trong động cơ cảm ứng vòng trượt có thể dễ dàng chỉnh sửa bằng cách mắc thêm điện trở ngoài (Hình 9.15). Từ pt (9.24) hay Hình 9.15 đều cho thấy T_{max} không phụ thuộc giá trị điện trở rotor. Từ pt



Hình 9.15 *Đặc tuyến moment - độ trượt với giá trị điện trở rotor tăng dần.*

(9.24) có thể thấy moment cực đại không đổi, và từ pt (9.23), độ trượt tại moment cực đại tăng tỷ lệ với điện trở được mắc thêm vào mạch rotor.

Moment khởi động

Xét trường hợp, s = 1, pt (9.22) trở thành:

$$T_{start} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2 R_2'}{(R_{TH} + R_2')^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \tag{9.25}$$

Tăng moment khởi động bằng cách mắc thêm điện trở vào mạch rotor

Từ pt (9.23), có thể thấy moment khởi động đạt cực đại ($s_{max,T} = 1$) khi:

$$R_2'(\text{tổng}) = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \tag{9.26}$$

Đồng thời, dòng điện khởi động giảm (pt (9.21)). Đây là ưu thế của động cơ cảm ứng vòng trượt, trong đó moment khởi động cao và dòng khởi động thấp.

Tính toán gần đúng

Đôi khi cần biết sơ bộ về đặc tuyến vận hành, để thuận tiện, có thể bỏ qua tổng trở stator (Hình 9.13) để có:

$$R_{TH} = 0; \quad X_{TH} = 0; \quad \Rightarrow V_{TH} = V$$

trong mạch tương đương Thevenin (Hình 9.13), sao cho $V_{TH} = V$, từ các pt (9.21) đến (9.26) có thể thấy:

$$I_2' = \frac{V}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + X_2'^2}} \tag{9.27}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2 (R_2'/s)}{(R_2'/s)^2 + X_2'^2} \tag{9.28}$$

$$s_{max,T} = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{R_2}{X_2} = \frac{\text{Điện trở rotor}}{\text{Điện kháng rotor đứng yên}} \tag{9.29}$$

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \left(\frac{0.5\, V^2}{X_2'} \right) \tag{9.30}$$

$$T_{start} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2 R_2'}{R_2'^2 + X_2'^2} \tag{9.31}$$

$$R_2'(\text{tổng}) = X_2' \tag{9.32}$$

$$T_{start(max)} = T_{max} = \frac{3}{\omega_s}\left(\frac{0.5\,V^2}{X_2'}\right) \tag{9.33}$$

Các quan hệ gần đúng khi xét độ trượt thấp

Ở gần vận tốc định mức, độ trượt của động cơ cảm ứng khá nhỏ:

$$R'_2 / s >> X'_2$$

Có thể bỏ qua X'_2 để đơn giản hóa sự phân tích. Các pt (9.27), (9.28) được đơn giản:

$$I_2' = \frac{sV}{R_2'} \tag{9.34}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{sV^2}{R_2'} \tag{9.35}$$

Từ pt (9.35), có thể thấy quan hệ moment - độ trượt gần như tuyến tính ở vùng độ trượt thấp, đó là lý do tuyến tính của đặc tuyến này được nêu trên Hình 9.14.

Công suất ra cực đại

Vận tốc động cơ cảm ứng bị giảm khi có tải, công suất cơ ra cực đại không tương ứng với vận tốc (độ trượt) ở vùng moment cực đại. Từ Hình 9.13, điều kiện để công suất cơ ra cực đại là:

$$R_2'\left(\frac{1}{s} - 1\right) = \sqrt{(R_{TH} + R_2') + (X_{TH} + X_2')^2} \tag{9.36}$$

Từ phương trình trên, có thể xác định công suất ra cực đại tương ứng với độ trượt. Tuy nhiên điều kiện này tương ứng với hiệu suất rất thấp và dòng điện rất lớn, và ở ngoài vùng vận hành bình thường của động cơ.

Giới hạn của mô hình mạch tương đương

Giá trị các thông số mô hình mạch phải được xác định theo các điều kiện sát với điều kiện vận hành tương đương. Các thông số mô hình mạch ở điều kiện vận hành bình thường sẽ cho kết quả sai khi giá trị độ trượt bất thường.

Khi khởi động, đòi hỏi dòng điện cao hơn dòng định mức nhiều lần, gây ra bão hòa lõi và tăng điện kháng rò trong rotor và stator. Tần số rotor cao (như stator), các thanh dẫn rotor có điện trở cao. Vì thế các thông số hợp với điều kiện vận hành bình thường sẽ cho kết quả sai đối với dòng điện khởi động (lớn hơn giá trị thực) và moment khởi động.

Ví dụ 9.2: Động cơ cảm ứng 3 pha, 50 Hz, 6 - cực có điện trở rotor là 0.25 Ω/ pha và moment cực đại là 10 Nm ở 875 vòng/phút. Hãy tính:

(a) Moment khi độ trượt là 5%.

(b) Điện trở mắc vào mạch rotor để có 60% moment cực đại lúc khởi động. Hãy giải thích lý do có hai giá trị điện trở này. Giá trị nào được dùng? Tổng trở stator không đáng kể.

Giải

$$n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ v/ph}; \quad \omega_s = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.7 \text{ rad/s}$$

$$s_{max,T} = \frac{1000 - 875}{1000} = 0.125$$

$$s_{max,T} = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{R_2}{X_2}$$

$$X_2 = \frac{R_2}{s_{max,T}} = \frac{0.25}{0.125} = 2\ \Omega$$

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \left(\frac{0.5V^2}{X_2'}\right)$$

$$10 = \frac{3}{104.7} \cdot \left(\frac{0.5V^2}{X_2'}\right) = \frac{3}{104.7} \cdot \left(\frac{0.5V^2/a^2}{X_2}\right)$$

$$V' = V/a = \sqrt{1396}\ V$$

(a) $$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_2'^2(R_2'/s)}{(R_2'/s)^2 + X_2'^2} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2(R_2/s)}{(R_2/s)^2 + X_2^2}$$

$$s = 0.05$$

$$T = \frac{3}{104.7} \cdot \frac{1396 \times 0.25/0.05}{(0.25/0.05)^2 + 2^2} = 6 \text{ Nm}$$

(b) Từ các pt (9.30) và (9.31)

$$\frac{T_{start}}{T_{max}} = \frac{(R_2 + R_{ext})}{(R_2 + R_{ext})^2 + X_2^2} \cdot \frac{X_2}{0.5}$$

$$0.6 = \left(\frac{R_t}{R_t^2 + 4}\right)\frac{2}{0.5}$$

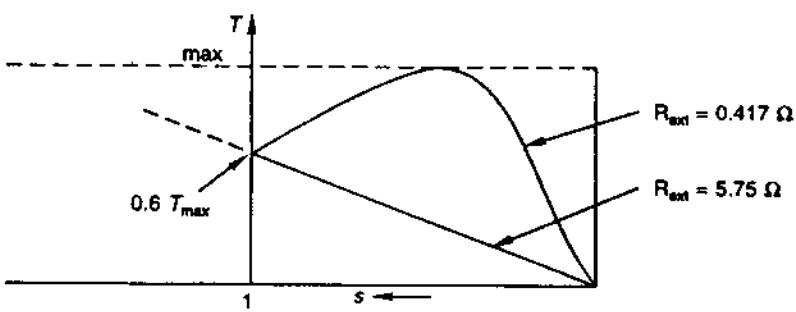
Trong đó $R_t = R_2 + R_{ext}$

$R_t^2 - 6.67\ R_t + 4 = 0$

$R_t = 0.667,\ 6.0\Omega$

$R_{ext} = R_t - r_2 = 0.417,\ 5.75\ \Omega$

Giá trị $R_{ext} = 5.75\Omega$ tương ứng với T_{max} ở vùng s > 1 (Hình 9.16).



Hình 9.16. *Minh họa Ví dụ 9.3*

Ví dụ 9.3: Động cơ cảm ứng 3 pha có moment khởi động 100% và moment cực đại 200% so với moment tải toàn phần. Hãy tính:

(a) Độ trượt ở moment cực đại.

(b) Độ trượt tải toàn phần.

(c) Dòng điện rotor ở khởi động tính bằng pu đối với dòng điện rotor tải toàn phần. Tổng trở stator không đáng kể.

Giải

$$T_{fl} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2(R_2'/s_{fl})}{(R_2'/s_{fl})^2 + (X_2')^2} \qquad \text{(i)}$$

$$T_s = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2 R_2'}{(R_2'^2 + X_2'^2)} \qquad \text{(ii)}$$

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{0.5V^2}{X_2'} \qquad \text{(iii)}$$

(a) Chia pt (iii) cho pt (ii)

$$\frac{T_{max}}{T_s} = \frac{0.5\,(R_2' + X_2')}{X_2' R_2'} \qquad \text{(iv)}$$

$$R_2' = kX_2' \qquad \text{(v)}$$

$$\frac{2}{1} = \frac{0.5\,(1 + k^2)\,X_2'^2}{k\,X_2'^2}$$

$$k^2 - 4k + 1 = 0$$

$$k = 0.268 = s_{max,\,T}$$

(b) Chia pt (iii) cho pt (i)

$$\frac{T_{max}}{T_{fl}} = \frac{0.5\left[(R_2'/s_{fl})^2 + (X_2')^2\right]}{X_2' R_2'} s_{fl}$$

$$2 = \frac{0.5\left[(k/s_{fl})^2 + 1\right]}{k} s_{fl}$$

$$s_{fl}^2 - 1.072\,s_{fl} + 0.072 = 0$$

$$s_{fl} = 0.072,\ \ 1$$

(c) $$I_2'^2\,(\text{start}) = \frac{V^2}{(R_2'^2)^2 + X_2'^2}$$

$$I_2'^2\,(\text{tải toàn phần}) = \frac{V^2}{(R_2'/s_{fl})^2 + X_2'^2}$$

$$\left(\frac{I_2\,(\text{start})}{I_2\,(\text{tải toàn phần})}\right)^2 = \frac{(R_2'/s_{fl})^2 + X_2'^2}{R_2'^2 + X_2'^2} = \frac{(k/s_{fl})^2 + 1}{k^2 + 1} = \frac{(0.268/0.072)^2 + 1}{(0.268)^2 + 1}$$

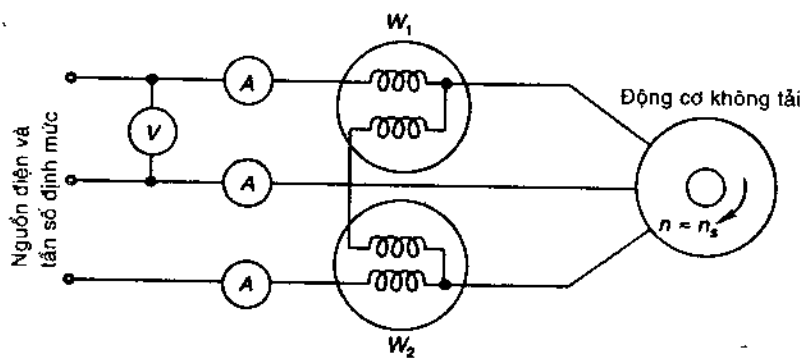
$$\frac{I_2\,(\text{start})}{I_2\,(\text{tải toàn phần})} = \sqrt{13.86} = 3.72$$

Các thí nghiệm xác định thông số mô hình mạch tương đương

Khi mô hình mạch của động cơ cảm ứng tương tự với biến áp, các thông số được xác định bằng thí nghiệm không tải như trong biến áp, gồm thí nghiệm không tải (trong biến áp là thí nghiệm hở mạch) và thí nghiệm khóa rotor (trong máy biến áp là thí nghiệm ngắn mạch).

Thí nghiệm không tải

Trong thí nghiệm này, động cơ chạy không tải ở điện áp và tần số định mức. Điện áp, dòng điện và công suất vào động cơ được đo bằng các đồng hồ với sơ đồ mạch trên Hình 9.17.



Hình 9.17 *Sơ đồ mạch thí nghiệm không tải của động cơ cảm ứng*

Các đại lượng cần đo trên đồng hồ gồm:

Công suất vào = P_0 (3 - pha).

Dòng điện = I_0 (tính trung bình từ 3 đồng hồ đo).

Điện áp = V_0 (điện áp tuyến định mức).

Công suất vào không tải P_0 là các tổn thất chỉ khi công suất trục là zero.

Các tổn thất này gồm:

P_0(tổn thất không tải) = P_{c1}(tổn thất đồng stator) + [P_i(tổn thất lõi/sắt) + P_{wf}(tổn thất quạt gió và ma sát) = tổn thất quay]

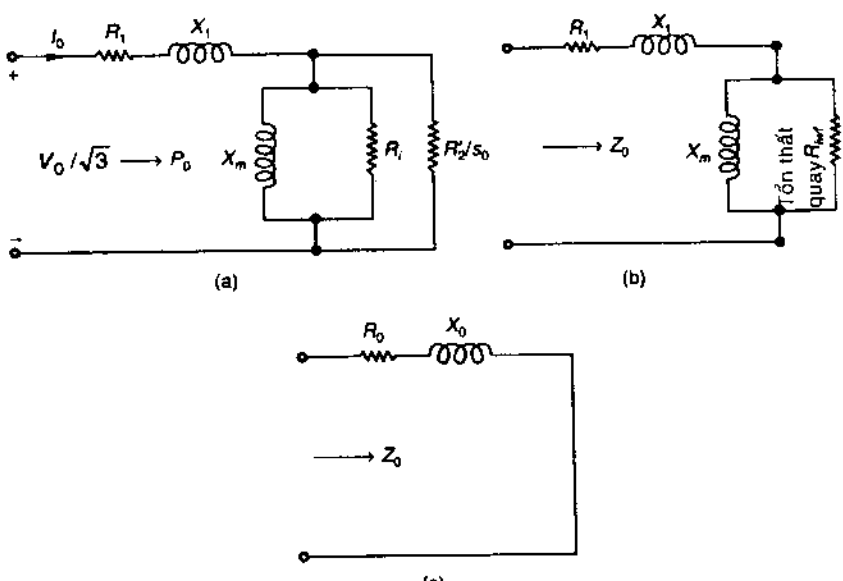
Tổn thất lõi chỉ xảy ra trong stator khi độ trượt rất thấp (khoảng 0.001) và vì thế, tần số của dòng điện rotor thấp khoảng 0.05 Hz.

Giá trị dòng điện không tải trong động cơ cảm ứng khoảng 30 - 40% dòng điện đủ tải vì có khe hở không khí. Tổn thất đồng stator ở không tải cần được tính toán, bằng cách đo điện trở dc stator và hiệu chỉnh theo giá trị ac (50 Hz).

Công suất cơ tương ứng với P_{wf} có độ trượt rất thấp và điện trở ra:

$$R'_2(1/s_0 - 1) \text{ rất lớn.}$$

Do $R'_2/s_0 >> X'_2$ nên X'_2 có thể bỏ qua. Mô hình mạch không tải tương ứng được minh họa trên Hình 9.18a, với R'_2/s_0 song song với R^1. Bằng cách phối hợp điện trở shunt ghép song song, mạch điện không tải được minh họa trên Hình 9.18b. Ở đây R_{iwf} tính tổn thất quay gồm tổn thất lõi, quạt gió và ma sát, nói chung $R_{iwf} >> X_m$.



***Hình 9.18** Mô hình mạch không tải*

Điện trở stator R_1 được tìm từ thí nghiệm dc trên dây quấn stator và hiệu chỉnh giá trị theo ac (50 Hz). Điện kháng rò stator X_1 được tìm từ thí nghiệm khóa rotor. X_m và R_{iwf} được tính từ dữ liệu thí nghiệm không tải. Từ mạch Hình 9.18b, có thể thấy:

$$R_0 = R_1 + \frac{X_m^2 / R_{iwf}}{1 + (X_m / R_{iwf})^2} \quad (9.37)$$

$$X_0 = X_1 + \frac{X_m}{1 + (X_m / R_{iwf})^2} \quad (9.38)$$

Mạch tương đương được nêu trên Hình 9.18 (c)

Giả sử $(X_m/R_{iwf})^2 = 0$, từ các phương trình trên:

$$R_{iwf} = \frac{X_m^2}{R_0 - R_1} \quad (9.39)$$

$$X_m = X_0 - X_1 \quad (9.40)$$

Từ dữ liệu thí nghiệm không tải (V_0, I_0, P_0) và Hình 9.18 (c):

$$Z_0 = \frac{V_0 / \sqrt{3}}{I_0}$$

$$R_0 = \frac{P_0 / 3}{I_0^2} \quad (9.41)$$

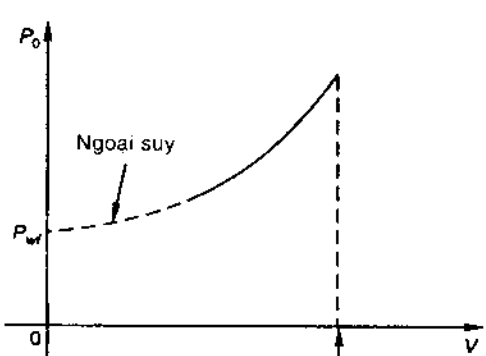
$$X_0 = \left(Z_0^2 - R_0^2\right)^{1/2} \quad (9.42)$$

Thay các giá trị R_0 và X_0 trong pt (9.37) và (9.38), sẽ tính được X_m và R_{iwf}.

Điện trở tổn thất lõi stator, R_1, được tìm từ thí nghiệm tách biệt tổn thất lõi ra khỏi tổn thất quạt gió và ma sát.

Tách biệt tổn thất lõi từ tổn thất ma sát và quạt gió

Sự tách các tổn thất này được thực hiện bằng thí nghiệm không tải với nguồn có tần số định mức và điện áp thay đổi được. Khi điện áp giảm dưới giá trị định mức, tổn thất lõi hầu như giảm theo bình phương điện áp. Vì độ trượt tăng không đáng kể, tổn thất ma sát và quạt gió hầu như không đổi. Điện áp tiếp tục giảm đến khi độ trượt máy điện tăng đột ngột, và động cơ dần dần dừng lại. Ở không



Hình 9.19 *Tách biệt giữa P_{wf} và P_f*

tải, điều này xảy ra với điện áp giảm đáng kể. Đồ thị P_0-V trên Hình 9.19 được ngoại suy đến V = 0 với P_{wf} khi P_1 = 0 ở điện áp zero.

Thí nghiệm tỷ số điện áp

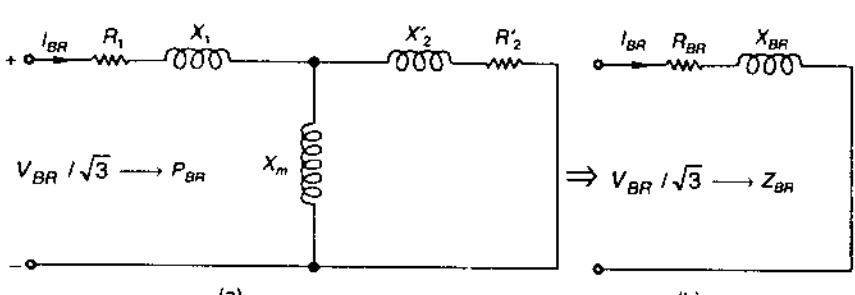
Thí nghiệm này chỉ thực hiện trên động cơ vòng trượt bằng cách kích thích stator ở tần số và điện áp định mức, còn rotor được giữ hở mạch. Rotor sẽ không quay. Tỷ số điện áp rotor và stator được đo bằng volt kế. Có thể thấy lực điện động cảm ứng trong rotor xuất hiện trên vòng trượt có tần số điện nguồn khi rotor đứng yên.

Thí nghiệm khóa rotor

Thí nghiệm này được dùng để xác định các thông số nối tiếp trong mô hình mạch động cơ cảm ứng. Mạch này tương tự với thí nghiệm ngắn mạch biến áp. Ngắn mạch điện trở tải (Hình 9.8) tương ứng với s = 1 và $R'_2(1/s - 1) = 0$. Nghĩa là rotor phải dừng trong suốt thí nghiệm, cần phải kềm giữ chặt rotor (không quay) trong khi stator được kích thích bằng điện áp giảm thích hợp (Hình 9.20).

Dòng điện động cơ trong thí nghiệm khóa rotor phải gần bằng giá trị định mức do các điện kháng động cơ nhạy với hiệu ứng bão hòa trong lõi từ. Giá trị dòng điện định mức được xác định từ điện áp cấp vào stator giảm khi rotor không quay và ngắn mạch (trở kháng Z_{BR} thấp). Tổn thất lõi có thể bỏ qua nhưng điện kháng từ hóa (X_m) thấp hơn nhiều so với máy biến áp và không thể bỏ qua.

Ở khoảng vận hành bình thường, độ trượt thấp (2 - 8%), nghĩa là tần số rotor thấp và có thể bỏ qua tổn thất lõi. Để tìm điện trở rotor, thí nghiệm này cần được thực hiện với tần số giảm (25% tần số định mức). Các giá trị điện



Hình 9.20 *Mô hình mạch thí nghiệm rotor khóa.*

kháng, phải nâng lên tần số định mức (50 Hz). Tuy nhiên, đối với các động cơ định mức nhỏ hơn 25kW, thí nghiệm có tần số giảm thường không bảo đảm.

Sơ đồ nối dây và đo đạc trong thí nghiệm này tương tự với sơ đồ trên Hình 9.17. Động cơ phải được nối vào nguồn điện áp thấp (biến đổi) thích hợp với tần số nêu trên. Các đại lượng cần đo trong thí nghiệm:

V_{BR} = điện áp stator (điện áp dây).

I_{BR} = dòng điện stator (giá trị trung bình từ 3 đồng hồ đo).

P_{BR} = công suất vào stator (để thiết lập tổn thất đồng trong stator và rotor). Khi điện áp giảm, tổn thất lõi (cả trong stator) có thể không đáng kể.

Từ các kết quả thí nghiệm, có thể tính:

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}/\sqrt{3}}{I_{BR}} \tag{9.43}$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}/3}{I_{BR}^2} \tag{9.44}$$

$$X_{BR} = \left(Z_{BR}^2 - R_{BR}^2\right)^{1/2} \tag{9.45}$$

Cần xác định các thông số R_2', X_1, X_2' của mô hình mạch, còn R_1 được đo từ thí nghiệm dc. Từ Hình 9.20 (a) với thí nghiệm giữ chặt rotor:

$$\overline{Z}_{BR} = R_{BR} + jX_{BR} = (R_1 + jX_1) + jX_m // (R_2' + jX_2') \tag{9.46}$$

$$jX_m // (R_2' + jX_2') = A + jB$$

Thực hiện các giả thiết để đơn giản hóa sự tính toán:

$$A + jB = \frac{jX_m(R_2' + jX_2')}{R_2' + j(X_2' + X_m)} = \frac{jX_m(R_2' + jX_2')\left[R_2' + j(X_2' + X_m)\right]}{R_2'^2 + (X_2' + X_m)^2} \tag{9.47}$$

Khi $X_m >> R'_2$, có thể bỏ qua R'_2:

$$A + jB = \frac{jX_m}{(X_2' + X_m)^2}\left[R_2'^2 + X_2'(X_2' + X_m) - jR_2'X_m\right]$$

$$R_2'^2 + X_2'(X_2' + X_m) = R_2'^2 + X_2'^2(X_2'X_m) = X_2'^2\left[1 + \frac{X_m}{X_2'} + \left(\frac{R_2'}{X_2'}\right)^2\right]$$

$$\approx X_2'(X_2' + X_m); \qquad \text{khi} \left(\frac{R_2'}{X_2'}\right)^2 << 1$$

$$A + jB = R_2'\left(\frac{X_m}{X_2' + X_m}\right)^2 + j\left(\frac{X_2'X_m}{X_2' + X_m}\right)$$

Phương trình (9.46) có dạng:

$$\overline{Z}_{BR} = R_{BR} + jX_{BR} = (R_1 + jX_1) + \left[R_2'\left(\frac{X_m}{X_2' + X_m}\right)^2 + j(X_2' // X_m)\right] \quad (9.48)$$

Với $X'_2 // X_m = X'_2$ khi $X_m >> X'_2$

Phương trình (9.48) được viết thành:

$$X_1 + X'_2 = X_{BR} \quad (9.49)$$

$$R_2' = (R_{BR} - R_1)\left(\frac{X_m + X_2}{X_m}\right)^2 \quad (9.50)$$

Nếu $(X_m + X'_2) > 10\ R'_2$, (trường hợp phổ biến), sự tính toán gần đúng pt (9.50) sẽ có R'_2 với sai số dưới 1%.

Giai đoạn này, cần tách biệt giữa X_1 và X'_2, không thể tính từ dữ liệu của thí nghiệm này. Nói chung, có thể giả thiết:

$$X_1 = X'_2 = X_{BR} / 2 \quad (9.51)$$

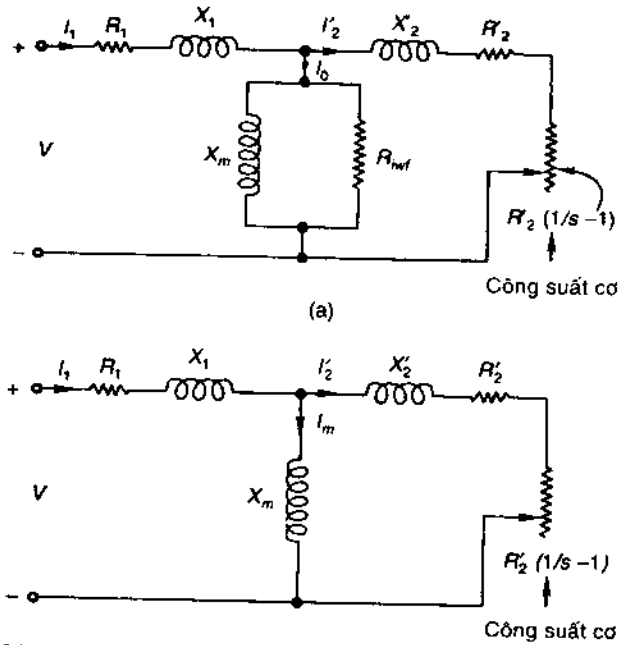
Nếu thí nghiệm rotor khóa (BR) được thực hiện với tần số định mức, có hai yếu tố ảnh hưởng đến giá trị R'_2. Thứ nhất là điện trở rotor (dây quấn) tăng khi tần số của dòng điện rotor bằng tần số định mức, với các điều kiện vận hành bình thường rất thấp (vài Hz). Thứ hai là tần số biến thiên từ thông rotor cũng ở tần số định mức. Lõi rotor thể hiện điện trở hiệu dụng song song với R'_2 do đó giảm R'_2 rõ rệt. Hai yếu tố này có xu thế bù trừ lẫn nhau. Cho nên với động cơ cỡ nhỏ (dưới 25 kW) không cần thí nghiệm ở tần số giảm.

Mô hình mạch từ thí nghiệm không tải (NL) và thí nghiệm khóa rotor (BR)

Với các thông số mạch đã có được ở trên, mô hình mạch với hai dạng được nêu trên Hình 9.21.

1. Mô hình mạch trên Hình 9.21 (a):

R_{iwf} là tổn thất lõi cùng với tổn thất quạt và ma sát. Sự xấp xỉ gần đúng được giả thiết là tổn thất do quạt gió và ma sát thực được tách khỏi trục dưới dạng cơ. Hai tổn thất này được tách khỏi trục động cơ theo các thí nghiệm nêu trên, sẽ có độ chính xác cao hơn.



Hình 9.21. *Mô hình mạch từ thí nghiệm không tải và thí nghiệm khóa rotor.*

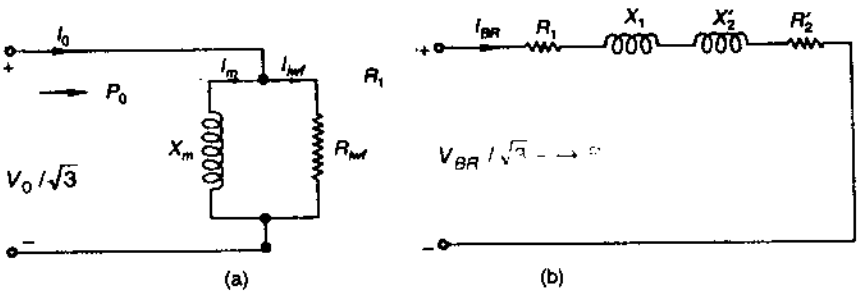
Chú ý, công suất do điện trở đầu ra $R'_2(1/s - 1)$ tiêu thụ là công suất cơ.

2. Mô hình trên Hình 9.21 (b) - Mô hình mạch IEE:

Ở đây R_{iwf} bị loại bỏ, điện kháng song song chỉ còn điện kháng từ hóa X_m. Tổn thất lõi và tổn thất quạt gió với ma sát phải được trừ khỏi công suất cơ ra (công suất $R'_2(1/s - 1)$). Đây là loại xấp xỉ gần đúng thứ hai và có độ chính xác cao hơn. Mạch này phân tích đơn giản hơn và thường được chấp nhận sử dụng chung.

Mô hình mạch gần đúng

Mô hình mạch xấp xỉ gần đúng được minh họa trên Hình 9.9. Đối chiếu với mạch này, mô hình mạch trong thí nghiệm không tải được nêu trên Hình 9.22(a) với rotor được coi là hở mạch. Mô hình mạch trong thí nghiệm rotor khóa được nêu trên Hình 9.22(b) bỏ qua nhánh song song.



Hình 9.22. *Các mô hình mạch gần đúng.*

Thí nghiệm không tải (NL):

$$R_{iwf} = \frac{\left(V_0/\sqrt{3}\right)^2}{(P_r/3)} = \frac{V_0^2}{P_r};\ P_r = P_0 - 3\,I_0^2 R_1$$

= tổn thất lõi stator + tổn thất quạt gió và ma sát (tổn thất quay).

$$I_{iwf} = \frac{V_0/\sqrt{3}}{R_{iwf}};\quad I_m = \left(I_0^2 - I_{iwf}^2\right)^{1/2}$$

$$X_m = \frac{V_0/\sqrt{3}}{I_m}$$

Thí nghiệm khóa rotor (BR):

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}/\sqrt{3}}{I_{BR}} \quad \text{và} \quad R_{BR} = \frac{P_{BR}/3}{I_{BR}^2} = R_1 + R_2'$$

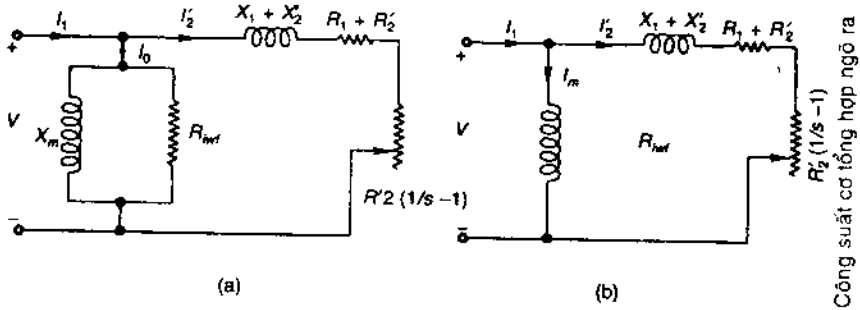
$$X_{BR} = \left(Z_{BR}^2 - R_{BR}^2\right)^{1/2} = X_1 + X_2'$$

Với giả thiết:

$$X_1 = X_2' = X_{BR}/2$$

R_1 tìm được từ thí nghiệm dc và được nối kết với nhiệt độ vận hành (75^0C). Đối với các động cơ điện cảm ứng có thể không cần hiệu chỉnh theo tải ac.

Mô hình mạch tương đương gần đúng từ thí nghiệm NL và BR được nêu trên Hình 9.23. Trong mạch trên Hình 9.23 (b), công suất cơ quay (quạt gió và ma sát) phải được trừ khỏi công suất cơ tổng hợp. Điều này cho kết quả tốt hơn mạch trên Hình 9.23(a) và được chấp nhận khi chỉ yêu cầu sự gần đúng



Hình 9.23. *Mô hình mạch gần đúng theo thí nghiệm NL và BR.*

(chuyển nhánh song song đến đầu vào động cơ). Mạch tương đương gần đúng trên Hình 9.23 (a) chủ yếu được dùng trong phương pháp sơ đồ mạch hình tròn để xác định hiệu suất của động cơ cảm ứng.

Ví dụ 9.4: Động cơ cảm ứng nối sao, 50Hz, 3 pha, 400V, 6 - cực chạy nhẹ ở điện áp định mức, nhận dòng điện 7.5A với công suất vào là 700 W. Với rotor bị khóa và điện áp 150V cấp cho stator, dòng điện vào là 35 A và công suất vào 4000W. Trong các điều kiện đó, điện trở stator trên mỗi pha là 0.55 Ω. Điện kháng đứng yên của stator và rotor được nhìn từ phía stator được ước tính theo tỷ số 1 : 0.5. Động cơ vận hành ở độ trượt 4%. Hãy tính dòng điện stator, hệ số công suất, công suất cơ ra và moment. Hiệu suất động cơ trong các điều kiện vận hành này là bao nhiêu?

Hãy tính hiệu suất động cơ như trên bằng cách sử dụng các thông số của mô hình mạch tương đương gần đúng, và so sánh kết quả giữa hai phương pháp.

Giải

Thí nghiệm BR (khóa rotor)

$$Z_{BR} = \frac{150/\sqrt{3}}{35} = 2.47\ \Omega$$

$$R_{BR} = \frac{4000 \times 3}{(35)^2} = 1.09\ \Omega$$

$$X_{BR} = \sqrt{(2.47)^2 - (1.09)^2} = 2.22\ \Omega$$

$$X_1 + X'_2 = 2.22$$

$$X_1 + 0.5\ X_1 = 2.22$$

$$X_1 = 1.48\ \Omega;\ \ X'_2 = 0.74\ \Omega$$

$$R_2' = (R_{BR} - R_1)\left(\frac{X_m + X_2'}{X_m}\right)^2$$

$X_m = 29.03\ \Omega$ (nhận từ thí nghiệm NL (không tải) ở dưới)

$$R_2' = (1.09 - 0.55)\left(\frac{29.03 + 0.74}{29.03}\right)^2 = 0.568\ \Omega$$

Thí nghiệm NL (không tải)

$$Z_0 = \frac{400/\sqrt{3}}{7.5} = 30.79\ \Omega$$

$$R_0 = \frac{700/3}{(7.5)^2} = 4.15\ \Omega$$

$$X_0 = \sqrt{(30.79)^2 - (4.15)^2} = 30.51\ \Omega$$

$$X_m = X_0 - X_1 = 30.51 - 1.48 = 29.03\ \Omega$$

Mô hình mạch chính xác được nêu trên Hình 9.24. Thực tế không cần dùng phương pháp tương đương Thevenin đối với stator, hệ số công suất, công suất vào, mà trực tiếp tìm $\overline{Z}_{in}$ từ mô hình mạch trên Hình 9.24.

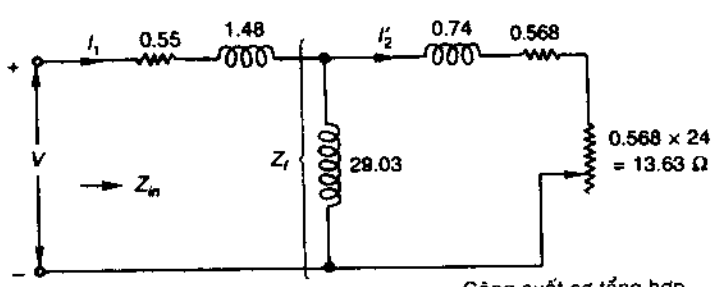
$\overline{Z}_f = jX_m \parallel (R'_2/s + jX'_2)$

= hỗn hợp song song trở kháng rotor và điện kháng từ hóa

$= j\,29.03 \parallel (14.2 + j\,0.74)$

$= 10.98 + j\,5.96 = R_f + j\,X_f$

$R_f = 10.98\ \Omega$



Hình 9.24. *Mô hình mạch chính xác.*

$$\overline{Z}_{in} = (0.55 + j\,1.48) + (10.98 + j\,5.98)$$

$$= 11.53 + j\,7.44 = 13.72 \angle 32.8^0\ \Omega$$

$$I_1 = \frac{231}{13.72} = 16.84\ A$$

$$pf = \cos 32.8^0 = 0.84 \text{ trễ pha}$$

Công suất vào

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 400 \times 16.84 \times 0.84 = 9.80\ kW$$

Khi điện kháng từ hóa không tiêu tán, công suất trên R_f sẽ thiết lập công suất trên khe hở không khí. Vì thế:

$$P_G = 3\,I_1^2\,R_f (= 3\,I_2'^2\,R_2'/s) = 3 \times (16.84)^2 \times 10.98 = 9.34\ kW$$

Công suất cơ ra (tổng hợp) $= (1 - s)\,P_G = (1 - 0.04) \times 9.34 = 8.97$ kW.

Tổn thất quay $= (700 - 3) \times (7.5)^2 \times 0.55 = 607$ W

Công suất cơ ra $P_{out} = 8.97 - 0.607 = 8.36$ kW.

$$\omega_s = \frac{1000 \times 2\pi}{60} = 104.72 \text{ rad/s}$$

Moment $= \dfrac{8360}{104.72(1 - 0.04)} = 83.16$ Nm

Hiệu suất, $\eta = \dfrac{8.36}{9.80} \times 100 = 85.81\%$

Các tổn thất:

Tổn thất quay (lõi + quạt + ma sát) $= 607$ W

Tổn thất đồng stator $= 3 \times (16.8)^2 \times 0.55 = 468$ W.

Tổn thất đồng rotor $= sP_G = 0.04 \times 9340 = 374$ W.

Tổng tổn thất $= 607 + 468 + 374 = 1449$ W.

Kiểm tra: $P_{in} - P_{out} = 9800 - 8360 = 1440$ W

Chú ý: Phương pháp trên có thể được dùng để tìm độ trượt ở moment cực đại, nhưng việc lấy đạo hàm rất phức tạp. Để đơn giản có thể áp dụng phương pháp Thevenin, nhưng cần tính toán nhiều để xác định dòng điện stator và hệ số công suất.

Mô hình mạch tương đương gần đúng.

Thí nghiệm NL (không tải):

Tổn thất quay P_r = 607W (đã tính)

$$R_{iwf} = \frac{3 \times (231)^2}{670} = 264\ \Omega$$

$$I_{iwf} = \frac{231}{264} = 0.875$$

$$I_m = \sqrt{(7.5)^2 - (0.875)^2} = 7.45\ A$$

$$X_m = \frac{231}{7.45} = 31\ \Omega$$

Thí nghiệm BR (rotor khóa):

$$Z_{BR} = \frac{150/\sqrt{3}}{35} = 2.47\ \Omega$$

$$X_{BR} = \frac{4000/3}{(35)^2} = 1.09\ \Omega$$

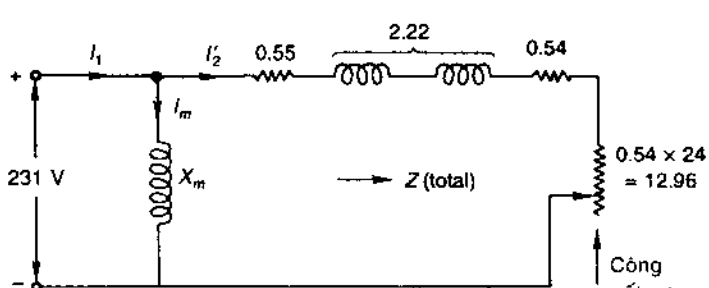
$$X_1 + X'_2 = \sqrt{(7.5)^2 - (1.09)^2} = 2.22\ \Omega$$

$$X_1 = 1.48\ \Omega\ ;\quad X'_2 = 0.74\ \Omega$$

Mô hình mạch tương đương gần đúng được nêu trên Hình 9.25. Từ Hình này:

$$\overline{Z}\ (\text{tổng}) = (0.55 + 0.54 + 12.96) + j\,2.22 = 12.22 \angle -9^0$$

$$I'_2 = \frac{231}{14.22} = 16.24 \angle -9^0 = 16.94 - j\,2.54$$



Hình 9.25. *Mô hình mạch gần đúng.*

Công suất cơ ra (tổng hợp) $= 3 \times (16.24)^2 \times 12.96 = 10.25$ kW

Công suất cơ ra $= 10.25 - 0.607 = 9.64$ kW.

Moment $= \dfrac{9640}{104.72(1-0.04)} = 96$ Nm

Dòng điện stator:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + I_2^{\,2} = -j\,7.45 + (16.04 - j\,2.54) = 16.04 - j\,10 = 18.90 \angle -31.9^0 \text{ A}$$

$$I_1 = 18.90 \text{ A} \; ; \; pf = \cos 31.9^0 = 0.85 \text{ trễ pha.}$$

Công suất vào $= \sqrt{3} \times 400 \times 18.9 \times 0.85 = 11.13$ kW

$$\eta = \frac{9.64}{11.13} \times 100 = 86.61\%$$

So sánh: Các kết quả từ mô hình mạch gần đúng cao hơn khoảng 10 - 12% so với mô hình IEEE (hai hiệu suất gần như bằng nhau). Mạch tương đương gần đúng cho phép tính toán hình dung hiệu suất động cơ tương đối dễ dàng hơn.

Ví dụ 9.5. Các kết quả sau đây nhận được từ động cơ cảm ứng lồng sóc, 3 pha, 75 kW, 3.3 kV, 6 - cực, 50 Hz:

Thí nghiệm NL (không tải): Tần số định mức 50 Hz

$V_0 = 3.3$ kV (dây), $I_0 = 5$A, $P_0 = 2500$ W

Thí nghiệm BR (khóa rotor): Tần số 15 Hz

$V_{BR} = 400$ V(dây), $I_{BR} = 27$A, $P_{BR} = 15000$W

Thí nghiệm dc trên điện trở stator/pha = 3.75 Ω

(a) Xác định các thông số mô hình mạch (chính xác).

(b) Tìm các thông số của mạch Thevenin tương đương khi nhìn từ mạch rotor

(c) Tính moment cực đại và độ trượt tương ứng.

(d) Đối với độ trượt 4%, hãy tính dòng stator, hệ số công suất và hiệu suất động cơ

Tính moment nội của động cơ.

Giải

Thí nghiệm không tải (NL)

$$Z_0 = \frac{3300/\sqrt{3}}{5} = 381\ \Omega$$

$$R_0 = \frac{2500/3}{(5)^2} = 33.33\ \Omega$$

$$X_0 = \sqrt{(3.81)^2 - (33.33)^2} = 379.6\ \Omega$$

$$X_m = X_0 - X_1 = ?$$

Thí nghiệm rotor khóa (BR)

$$Z_{BR} = \frac{400/\sqrt{3}}{27} = 8.55\ \Omega$$

$$R_{BR} = \frac{15000/3}{(27)^2} = 6.86\ \Omega$$

$$X_{BR} = \sqrt{(8.55)^2 - (6.86)^2} = 5.10\ \Omega$$

$$X_1 = X_2' = X_{BR}/2 = 2.55\ \Omega\ (\text{ở } 15\ \text{Hz});\ 8.50\ \Omega\ (\text{ở } 50\ \text{Hz})$$

$$X_m = 379.6 - 8.50 = 371\ \Omega$$

$$R_2' = (R_{RB} - R_1)\left[\frac{X_m + X_2'}{X_m}\right]^2 = (6.86 - 3.75)\times\left[\frac{371 + 8.50}{371}\right]^2 = 3.25\ \Omega$$

(a) Mô hình mạch được minh họa trên Hình 9.26 (a)

(b) $$\overline{V}_{TH} = (3300/\sqrt{3})\angle 0^0 \times \frac{j\,371}{3.75 + j(371 + 8.5)} = 1862\ \angle 0.6^0\ \text{V}$$

$$\overline{Z}_{TH} = \frac{j\,371 \times (3.75 + j\,8.5)}{3.75 + j(371 + 8.5)} = 9.08\ \angle 66.8^0$$

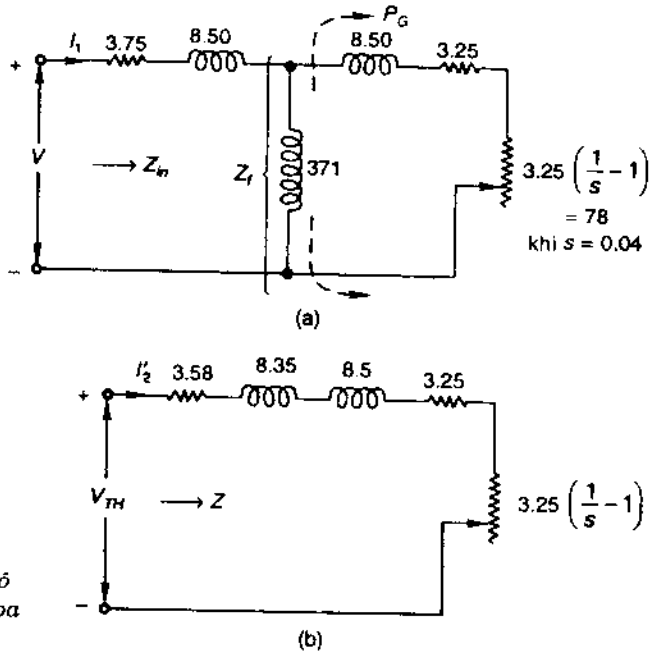
$$= 3.58 + j\,8.35 = R_{TH} + j\,X_{TH}$$

Mạch tương ứng được minh họa trên Hình 9.26 (b)

(c) Moment cực đại

$$\frac{3.25}{s_{max,T}} = \sqrt{(3.58)^2 + (8.35 + 8.50)^2}$$

$$s_{max,T} = \frac{3.25}{17.22} = 0.189$$



Hình 9.26. *Các mô hình mạch minh họa Ví dụ 9.5.*

$$R_2' / s_{max,T} = \frac{3.25}{0.189} = 17.2\ \Omega$$

$n_s = 1000$ v/ph; $\omega_s = 104.72$

$$\overline{Z}_{Tổng} = (3.58 + 17.22) + j\,16.85 = 20.80 + j\,16.85 = 26.77\ \angle 39^0\ \Omega$$

$$I_2' = \frac{1862}{26.77} = 69.56\ A$$

$$T_{max} = \frac{3 \times (69.56)^2 \times 17.22}{104.72} = 2.387\ Nm$$

(d) Để tính dòng điện stator và hệ số công suất, cần sử dụng mạch điện trên Hình 9.26 (b)

$$\overline{Z}_f = \frac{j\,371(81.25 + j\,8.50)}{81.25 + j\,379.50} = 78.11\ \angle 18.1^0 = 74.24 + j\,24.26 = R_f + j\,X_f$$

$$\overline{Z}_{in} = (3.75 + j\,8.5) + (74.26 + j\,24.26) = 84.60\ \angle 22.8^0$$

$$I_1 = \frac{3300\sqrt{3}}{84.60} = 22.52 \text{ A}$$

$pf = \cos 22.8^0 = 0.922$ trễ pha.

Công suất cơ ra (tổng) $= (1 - s) P_G$
$= (1 - 0.04) \times 3 \times (22.52)^2 \times 74.24 = 108.43$ kW

Tổn thất quay $= 2.500 - 5^2 \times 3.75 = 2.22$ kW

Công suất vào động cơ $= \sqrt{3} \times 3.3 \times 22.52 \times 0.922 = 118.22$ kW

Công suất cơ $= 108.42 - 2.22 = 106.21$ kW

$$\eta = \frac{106.21}{118.42} = 89.69\%$$

Moment nội $= (108.43 \times 1000)/ [104.72 (1 - 0.04)]$
$= 1078.6$ Nm

Ví dụ 9.6. Động cơ cảm ứng rotor dây quấn 400V, 1450 v/ph, 50 Hz, có các thông số mạch như sau:

$R_1 = 0.3\ \Omega$ $\quad R'_2 = 0.25\ \Omega$

$X_1 = X'_2 = 0.6\ \Omega$ $\quad X_m = 35\ \Omega$

Tổn thất quay = 1500W

(a) Tính moment và dòng điện khởi động khi động cơ khởi động trực tiếp với điện áp đủ.

(b) Hãy tính dòng điện đủ tải, hệ số công suất và moment ra. Tìm hiệu suất bên trong và hiệu suất toàn phần. Hiệu suất bên trong được xác định theo:

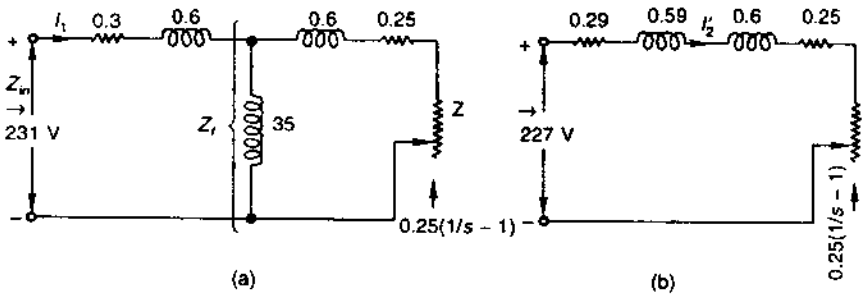
$$P_{out}(\text{tổng})/ P_{in} \ ; \ P_{out}(\text{tổng}) = (1 - s) P_G$$

(c) Tìm độ trượt đối với moment cực đại và giá trị moment cực đại

Giải

Mô hình mạch động cơ được nêu trên Hình 9.27 (a) và mạch Thevenin tương đương trên Hình 9.27(b). Các đại lượng tương đương Thevenin được tính như sau:

$$\overline{Z}_{TH} = \frac{j\,35\,(0.3 + j\,0.6)}{0.3 + j\,35.60} = 0.29 + j\,0.59\ \Omega$$



Hình 9.27. *Các mạch điện minh họa Ví dụ 9.6.*

$$\overline{V}_{TH} = \frac{231\angle 0^0 + j\,35)}{0.3 + j\,35.60} = 227\angle 0.5^0 \text{ V}$$

$$n_s = 1500 \text{ rpm} \qquad \omega_s = 157.1 \text{ rad / s}$$

(a) Khởi động ở điện áp đủ (s = 1)

Từ mạch trên Hình 9.27 (a)

$$\overline{Z}_f = \frac{j\,35\,(0.25 + j\,0.6)}{0.25 + j\,35.60} = 0.24 + j\,0.59\,\Omega$$

$$R_f = 0.24\ \Omega$$

$$\overline{Z}_{in} = (0.3 + j\,0.6) + (0.24 + j\,0.59) = 1.31\angle 65.6^0\ \Omega$$

$$I_1(\text{khởi động}) = \frac{231}{1.31} = 176.3 \text{ A}$$

$$T\,(\text{khởi động}) = \frac{3\,I_1^2\,R_f}{\omega_s} = \frac{3\times(176.3)^2\times 0.24}{157.1} = 142.4 \text{ Nm}$$

(b) $$s_{fl} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 1/30$$

$$R_2'/s_{fl} = 0.25\times 30 = 7.5\,\Omega$$

Từ mạch trên Hình 9.27 (a)

$$\overline{Z}_f = \frac{j\,35\,(7.5 + j\,0.6)}{7.5 + j\,35.6} = 6.94 + j\,2.05\,\Omega$$

$$R_f = 6.94\ \Omega$$

$$\overline{Z}_{in} = (0.3 + j\,0.6) + (6.94 + j\,2.05) = 7.71\,\angle 20.1^0\ \Omega$$

$$I_1 = \frac{231}{7.71} = 30\ A$$

$pf = \cos 20.1^0 = 0.94$ trễ pha

$$P_G = 3 \times (30)^2 \times 6.94 = 18.74\ kW$$

Công suất ra (tổng) $= (1 - s)\,P_G = (1 - 1/30) \times 18.74 = 18.12$ kW

Tổn thất quay $= 1.5$ kW

Công suất ra $= 18.12 - 1.5 = 16.62$ kW

Moment $= \dfrac{16.62 \times 1000}{157.1\,(1 - 1/30)} = 109.4$ Nm

Công suất vào $= \sqrt{3} \times 400 \times 30 \times 0.94 = 19.54$ kW

$$\eta = \frac{16.62}{19.54} \times 100 = 85.06\%$$

Hiệu suất bên trong $= \dfrac{P_G\,(1 - s)}{P_{in}} = \dfrac{18.74\,(1 - 1/30)}{19.54} = 92.71\ \%$

(c) Sử dụng mạch Thevenin tương đương (Hình 9.27b), đối với moment cực đại

$$\frac{0.25}{s_{max,T}} = \sqrt{(0.29)^2 + (0.59 + 0.6)^2}$$

$$s_{max,T} = 0.177$$

$$\frac{R_2}{s_{max,T}} = \frac{0.25}{0.177} = 1.416\ \Omega$$

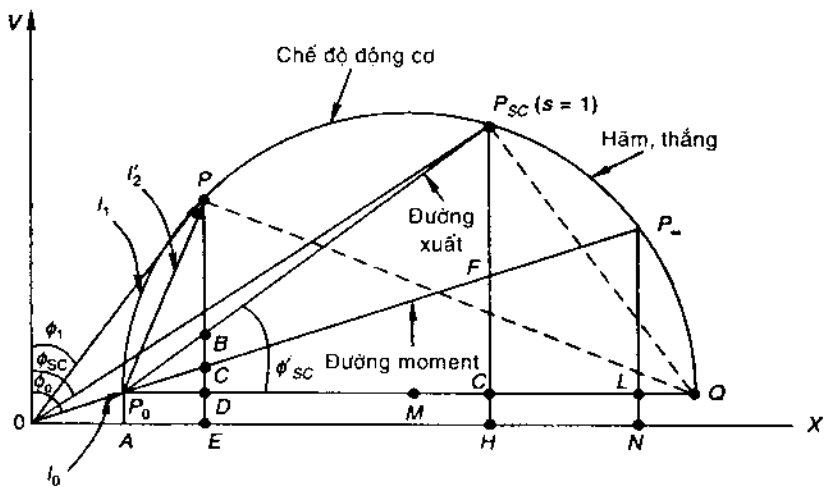
$$\overline{Z}\ (\text{tổng}) = (0.29 + j\,0.59) + (1.416 + j\,0.6) = 2.96\,\angle 23.7^0\ \Omega$$

$$I_2 = \frac{227}{2.96} = 76.7\ A$$

$$T_{max} = 3 \times \frac{(76.7)^2 \times 1.416}{157.1} = 159\ Nm$$

Sơ đồ hình tròn (gần đúng)

Với các thông số mô hình mạch gần đúng nhận được từ các thí nghiệm không tải và khóa rotor, chế độ làm việc hoàn chỉnh của máy điện có thể được tính bằng cách thay đổi độ trượt. Để hình dung bản chất chế độ làm việc của máy điện cảm ứng trên khoảng độ trượt hoàn chỉnh, phương pháp quỹ tích, được gọi là sơ đồ mạch hình tròn, là rất hữu ích. Trong mạch được nêu trên Hình 9.23, dòng I'_2 chạy trong mạch cảm ứng nối tiếp với điện trở thay đổi. Quĩ tích của pha dòng điện này là hình tròn. Nhánh song song (từ hóa và P_{iwf}) có dòng điện không đổi làm dịch chuyển tâm hình tròn so với gốc tọa độ của sơ đồ pha (Hình 9.28). Chú ý, trong thí nghiệm khóa rotor (thí nghiệm BR) các đại lượng đo có ký hiệu BR, biểu thị các điều kiện ngắn mạch mô hình mạch hình tròn (s = 1), ở đây sẽ thay bằng ký hiệu SC (ngắn mạch).



Hình 9.28 *Sơ đồ hình tròn gần đúng*

(i) Vị trí trục dọc OV là điện áp thể hiện pha điện áp $\overline{V}$. Hình chiếu pha dòng điện trên trục V là thành phần dòng điện tác động, còn thành phần pha dòng điện phản kháng là hình chiếu dòng điện trên trục OX (trễ 90^0 so với trục V). Các thành phần dòng điện này thể hiện công suất thực (công suất tác dụng) và công suất phản kháng khi nhân với V (điện áp mỗi pha).

(ii) Vị trí OP_0 ở góc ϕ_0 (góc hệ số công suất không tải) so với trục V (pha điện áp) thể hiện dòng điện không tải I_0

Tổn thất không tải $P_0 = OP_0 \cos \phi_0 = P_0A$ (theo tỷ lệ với điện áp V).

(iii) Vẽ đoạn PoQ vuông góc với trục V:

$$P_0Q = \frac{V}{X_1 + X_2'}$$

P_0Q là dòng điện I'_2 nếu tất cả điện trở trong phần mạch này được rút gọn là zero.

(iv) Điểm ngắn mạch P_{SC} được định vị trên hình tròn tương ứng với s = 1

$$I'_2(SC) = P_0P_{SC} = \frac{V}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$\varphi'_{SC} = \tan^{-1}\left(\frac{X_1 + X_2'}{R_1 + R_2'}\right)$$

Hình tròn cũng có thể vẽ bằng cách định vị P_{SC} không cần xác định P_0Q.

Ở điểm vận hành bất kỳ P trên hình tròn:

$OP = I_1$ (dòng điện vào)

$OP_0 = I_0$ (dòng điện không tải)

$P_0P = I'_2$ (dòng điện rotor được nhìn từ phía stator)

Hai tam giác P_0DB và P_0GP_{SC} đồng dạng:

$$\frac{BD}{P_{SC}G} = \frac{P_0D}{P_0G} \qquad (9.52)$$

Tam giác P_0DP với P_0QP và P_0GP_{SC} với P_0QP_{SC} đồng dạng từng cặp nên:

$$\frac{P_0D}{P_0P} = \frac{P_0P}{P_0Q} \quad \text{hoặc} \quad P_0D = \frac{(P_0P)^2}{P_0Q} \qquad (9.53)$$

$$\frac{P_0G}{P_0P_{SC}} = \frac{P_0P_{SC}}{P_0Q} \quad \text{hoặc} \quad P_0G = \frac{(P_0P_{SC})^2}{P_0Q} \qquad (9.54)$$

Thay các pt (9.53) và (9.54) vào pt (9.52).

$$\frac{BD}{P_{SC}G} = \frac{(P_0P)^2}{(P_0P_{SC})^2} = \frac{I_2'^2}{I_{2SC}'^2} \qquad (9.55)$$

Nhân tử số và mẫu số vế phải pt (9.55) với $(R_1 + R'_2)$:

$$\frac{BD}{P_{SC}G} = \frac{I_2'^2(R_1 + R'_2)}{I_{2SC}'^2(R_1 + R'_2)} = \frac{\text{Tổn thất đồng khi có tải}}{\text{Tổn thất đồng khi SC}} \qquad (9.56)$$

Công suất vào khi ngắn mạch:

$$P_{SC}H = GH + P_{SC}H = P_0 + P_c$$

$P_{SC}G = P_c$ = tổn thất đồng (stator + rotor)

tổn thất đồng stator = P_0(stator) = $I_2'^2 R_1$)

Từ pt (9.56): $BD = I_2'^2(R_1 + R_2')$ = tổn thất đồng có tải

Lập tỷ số: $\frac{P_{SC}F}{FG} = \frac{R_2'}{R_1}$

Từ các tam giác đồng dạng nêu trên, dễ dàng tìm được:

BC = tổn thất đồng rotor (có tải)

CD = tổn thất đồng stator (có tải)

Nếu P_0F được tạo thành gặp đường tròn ở P_∞, thì:

$P_\infty L$ = tổn thất đồng stator (tương ứng với tổn thất đồng rotor = 0)

Điều này chỉ xảy ra khi: $R'_2 / s = 0$, hay $s = \infty$

Nên điểm P_∞ tương ứng với độ trượt vô hạn

Ở điểm tải P: PE = PB + (BC + CD) + DE

Công suất vào: $P_i = P_m + (P_{cr} + P_{cs}) + P_0$

Với P_m = PB = công suất cơ ra (P_{wf} được tính trong P_0)

Công suất cơ ra là đường dọc bị chặn giữa đường tròn và đường P_0P_{SC}, được gọi là *đường công suất ra.*

Công suất khe hở không khí

$$P_G = P_m + P_{cr} = PB + BC$$

= PC = moment tính bằng watt - đồng bộ

Đoạn thẳng đứng giữa đường tròn và đường P_0P_∞ là *đường moment* (đồng bộ - watt).

$$\text{Độ trượt, } s = \frac{P_{cr}}{P_G} = \frac{BC}{PC}$$

Bằng cách quan sát hình tròn này, có thể đưa ra kết luận tổng quát để vẽ đồ thị chế độ vận hành động cơ cảm ứng. Đó là:

(i) Động cơ cảm ứng có hệ số công suất pf rất thấp (trễ pha) ở không tải sẽ cải tiến giá trị cực đại (khi OP là tiếp tuyến với đường tròn) và từ đó sẽ bắt đầu giảm. Động cơ cảm ứng có hệ số công suất trễ pha (khoảng 0.8) và không thể điều khiển như động cơ đồng bộ. Vì thiết bị chỉ cấp điện một phía stator, lấy dòng điện lớn trễ pha với hệ số công suất zero, tạo nên từ thông tổng hợp trong khe hở không khí trên mỗi cực từ.

(ii) Công suất cơ ra có một cực đại, được định vị bằng cách vẽ tiếp tuyến với đường tròn và song song với đường công suất ra.

(iii) Moment cũng có một cực đại, ở điểm khác với công suất cực đại, và được định vị bằng cách vẽ tiếp tuyến với đường tròn và song song với đường moment.

(iv) Đồ thị hiệu suất - tải cũng có một cực đại. Đây là đặc tính của thiết bị bất kỳ có thành phần tổn thất không đổi và thành phần tổn thất biến thiên tỷ lệ với bình phương tải.

(v) Dòng điện vào tăng liên tục.

Các đồ thị dòng điện, moment, pf, độ trượt và hiệu suất theo công suất ra pu của động cơ cảm ứng được nêu trên Hình 9.29, với đường nét liền đến công suất ra 1.0 pu (đủ tải), và vượt quá đoạn này là đường nét đứt.

Ví dụ 9.7. Động cơ cảm ứng 19 kW, 3 pha, 400V, 6 cực có các thông số của mô hình mạch gần đúng như sau:

$R_1 = 1.4\,\Omega$, $R'_2 = 0.6\,\Omega$,

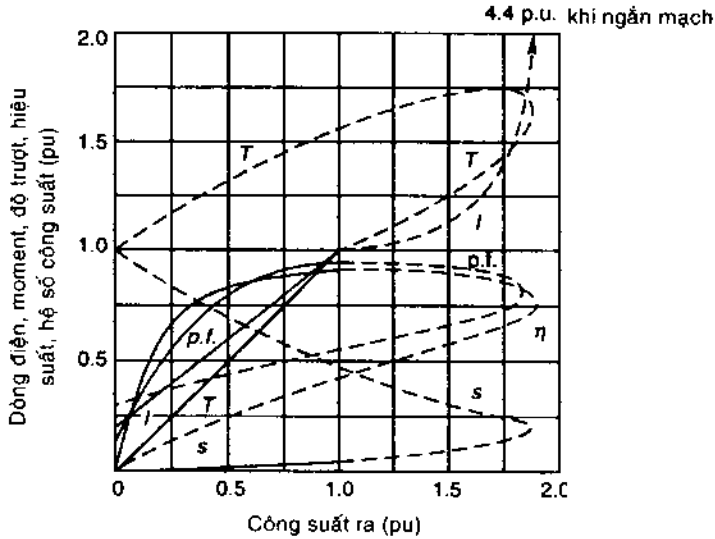
$X_1 = 2\,\Omega$, $X'_2 = 1\,\Omega$, $X_m = 50\,\Omega$

Tổn thất quay là 275W. Đối với độ trượt 0.03, - 0.03 và 1.2, hãy xác định:

(a) Dòng điện dây, pf và công suất vào

(b) Moment trên trục và công suất cơ ra

(c) Hiệu suất



Hình 9.29. *Các đường cong vận hành của động cơ cảm ứng*

Giải

Mạch tương đương gần đúng được vẽ trên Hình 9.30

(i) *Độ trượt = 0.03*

(a) $R'_2 = 0.6 / 0.03 = 20\ \Omega$

$$\bar{I}_2 = \frac{231\angle 0^0}{(1.4+20)+j\,3} = 10.69\angle -8^0\ A = 10.50 - j\,1.49\ A$$

$$\bar{I}_m = \frac{231\angle 0^0}{50\angle 90^0} = -j\,4.62\ A$$

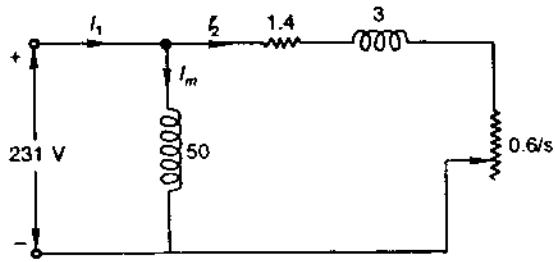
$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_2 = 10.50 - j\,1.49 - j\,4.62$$
$$= 10.50 - j\,6.11 = 12.15\angle -30.2^0 A$$

$I_1 = 12.15$ A pf = cos $30.2^0 = 0.864$ trễ pha

Công suất vào = $\sqrt{3} \times 400 \times 12.15 \times 0.864 = 7.27$ kW

(b) $$P_G = \frac{3 \times (10.69)^2 \times 0.6}{0.03} = 6.86\ kW$$

Hình 9.30. *Mạch điện minh họa Ví dụ 9.7.*



Công suất cơ ra (tổng hợp) = (1 - 0.03) x 6.86 = 6.65 kW

Tổn thất quay = 0.275 kW

Công suất cơ ra = 6.65 - 0.275 = 6.37 kW

n_s = 1000 v/ph; ω_s = 104.72 rad / s

Moment $= \dfrac{6370}{104.72(1-0.03)} = 62.22$ Nm

(c) $\eta = \dfrac{6.37}{7.27} \times 100 = 87.62\%$

(ii) Độ trượt = - 0.03

(a) $R'_2 / s = -20\ \Omega$ (điện trở âm)

$$\bar{I}_2 = \frac{231\angle 0^0}{(1.4-20)+j\,3} = 12.26\angle -171.3^0\ A = -12.12 - j\,1.85\ A$$

$$\bar{I}_m = -j\,4.62$$

$$\bar{I}_1 = (-j\,4.62) + (-12.12 - j\,1.85)$$
$$= -12.12 - j\,6.47 = 13.73\angle -151.9^0\ A$$

$\bar{I}_1(out) = -\bar{I}_1 = 13.73\angle 28.1^0$ A (chế độ máy phát)

I_1 (out) = 13.73 A; pf = cos 28.1^0 = 0.882 sớm pha

Công suất ra $= \sqrt{3} \times 400 \times 13.73 \times 0.882 = 8.39$ kW

Công suất cơ ra $= (1-s)\left(\dfrac{3I_2'^2 R_2'}{s}\right) = 1.03 \times \dfrac{3 \times (12.26)^2 \times 0.6}{-0.03} = -9.20$ kW

Công suất cơ vào = 9.20 kW

Công suất cơ vào (tổng hợp) = 9.20 + 0.275 (tổn thất quay) = 9.4 kW

Moment trên trục (tổng hợp) = $\dfrac{9480}{104.72(1+0.03)} = 87.9$ Nm

$$\eta \text{ (máy phát)} = \frac{8.39}{9.48} \times 100 = 88.5\ \%$$

(iii) Độ trượt = 1.2.

(a) $R'_2 / s = 0.6 / 1.2 = 0.5\ \Omega$

$$\bar{I}_2 = \frac{231\angle 0^0}{(1.4 + 0.5) + j\,3} = 65.1\angle -57.7^0 \text{ A} = 34.79 - j\,55.02 \text{ A}$$

$$\bar{I}_m = -j\,4.62$$

$$\bar{I}_1 = (-j\,4.62) + (34.79 + j\,55.02)$$
$$= 34.79 - j\,59.64 \text{ A} = 69.05\angle -j\,59.7^0 \text{ A}$$

$I_1 = 69.05$ A; pf = cos $59.7^0 = 0.505$ trễ pha.

Công suất vào (điện) = $\sqrt{3} \times 400 \times 69.05 \times 0.505 = 24.16$ kW .

(b) $$P_G = 3 \times \frac{(65.1)^2 \times 0.5}{1.2} = 5.30 \text{ kW}$$

Công suất cơ ra = (1 - s) P_G = (1 - 1.2) x 5.30 = -1.06 kW

hoặc công suất cơ tiêu thụ = 1.06 kW

Bỏ qua tổn thất quay, vận tốc đồng bộ động cơ là

$$\eta = 1500 \times (1 - 1.2) = -200 \text{ v/ph hoặc } -20.94 \text{ rad / s}$$

Chú ý: Động cơ chạy ngược chiều từ trường khe hở không khí . Công suất tiêu thụ (tác động hãm)

$$\text{Moment} = \frac{-1060}{-20.94} = 50.62 \text{ Nm}.$$

Moment này tác động ngược chiều với từ trường quay.

Tổng công suất tiêu tán (trong động cơ).

24.16 (điện) + 1.06 (cơ) = 25.22 kW.

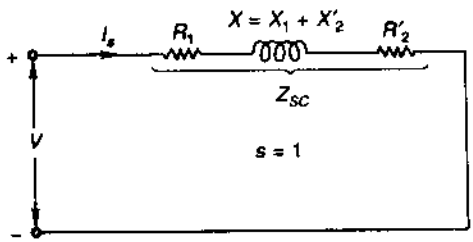
Công suất tiêu tán trong động cơ (đa số trong dây quấn) lớn hơn định mức động cơ, điều này chỉ được phép trong thời gian ngắn. Hơn nữa, công suất hãm phải đủ nhỏ. Từ Hình 9.14 có thể thấy moment hãm sẽ giảm khi vận tốc tiếp tục tăng (ngược chiều).

Khởi động

Ở thời gian khởi động, động cơ có độ trượt = 1, điện trở tải trên mô hình mạch (Hình 9.23) là:

$$R_2'\left(\frac{1}{s}-1\right)\Bigg|_{s=1}=0$$

Nghĩa là lúc này các điều kiện ngắn mạch chiếm ưu thế. Dòng điện động cơ khi khởi động lớn bằng 5 đến 6 lần dòng điện tải định mức. Khi so sánh dòng điện kích thích trong nhánh song song (nhánh shunt) của mô hình mạch có thể bỏ qua, mạch rút gọn được nêu trên Hình 9.31



Hình 9.31 *Mô hình mạch gần đúng trong các điều kiện khởi động*

Moment khởi động, $T_s = \frac{3}{\omega_s} I_s^2 R_2'$ (9.57)

Để đơn giản, có thể giả thiết:

$$I_{fl} \approx I'_{2,fl} \tag{9.58}$$

nghĩa là có thể bỏ qua dòng điện từ hóa kể cả trong điều kiện tải toàn phần.

Moment tải toàn phần, $T_{fl} = \frac{3}{\omega_s} \cdot I_{fl}^2 R_2' / s_{fl}$ (9.59)

Với s_{fl} = Độ trượt tải toàn phần (2.8%).

Momen khởi động được biểu thị theo tỷ số moment tải toàn phần:

$$\frac{T_s}{T_{fl}} = \left(\frac{I_s}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \tag{9.60}$$

Hai giả thiết trong pt (9.60) là:

1. Điện trở rotor không đổi. Điện trở rotor thực sẽ biến thiên theo tần số của dòng điện rotor - vài Hz với tải toàn phần đến 50 Hz khi khởi động.
2. Dòng điện từ hóa không đáng kể. Điều này tương đối thích hợp với I_s, nhưng không đúng với I_{fl} (pt 9.59).

Nếu dùng dòng điện rotor thay cho dòng stator trong pt (9.60), sẽ không cần giả thiết thứ hai.

Động cơ lồng sóc

Khởi động trực tiếp: Khi động cơ lồng sóc khởi động trực tiếp bằng điện áp dây:

$$I_s = I_{SC} = V/Z_{SC}$$

Nghĩa là dòng điện khởi động bằng dòng điện ngắn mạch (rotor khóa), với

$$I_{SC} = 5\,I_{fl} \quad \text{và} \quad s_{fl} = 0.04$$

Từ pt (9.60):

$$\frac{T_s}{T_{fl}} = 5^2 \times 0.04 = 1$$

Điều này cho thấy khi dòng điện khởi động lớn gấp 5 lần dòng điện tải toàn phần (dòng điện định mức), moment khởi động bằng moment tải toàn phần. Với dòng điện khởi động quá lớn, động cơ phải gia tốc và tiến nhanh đến tốc độ bình thường, nếu không sự quá nhiệt sẽ làm hư hại động cơ. Động cơ ở thời gian khởi động, phải có tải rất nhẹ hoặc không tải.

Để bảo vệ hệ thống điện nguồn, các thiết bị điện phải có khả năng chống lại các đỉnh dòng ngắn mạch. Cho nên chỉ có các động cơ cỡ nhỏ mới khởi động trực tiếp bằng điện áp nguồn.

Khởi động với điện áp giảm: Dòng điện khởi động có thể giảm đến mức độ cho phép bằng cách giảm điện áp khởi động. Moment khởi động sẽ giảm nhanh do tỷ lệ với bình phương điện áp. Khởi động như thế chỉ thực hiện được với tải nhẹ hoặc không tải. Các biện pháp bao gồm:

Khởi động với trở kháng stator: Điện trở và điện kháng trong ba dây dẫn stator làm giảm điện áp stator từ giá trị định mức V xuống đến xV. Dòng điện khởi động ban đầu là:

$$I_s = xI_{SC}$$

Thay vào pt (9.60)

$$\frac{T_s}{T_{fl}} = x^2\left(\frac{I_{SC}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \qquad (9.61)$$

Khi dòng điện khởi động giảm (1/x) lần so với dòng điện khởi động trực tiếp (I_{SC}), moment khởi động giảm ($1/x^2$) lần so với moment khởi động trực tiếp. Phương pháp này được dùng với động cơ cỡ nhỏ (như trong bơm ly tâm), nhưng khởi động nối sao - tam giác thường rẻ hơn và moment khởi động tốt hơn.

Khởi động với biến áp tự ngẫu: Khởi động điện áp giảm có thể bằng ba biến áp tự ngẫu nối sao (Y) (Hình 9.32). Nếu điện áp giảm 1/ x lần so với điện áp định mức V, dòng điện khởi động (ban đầu) là:

$$I_s = xI_{SC} \qquad (9.62)$$

với: I_{SC} = dòng điện khởi động (dòng điện dây) với điện áp định mức.

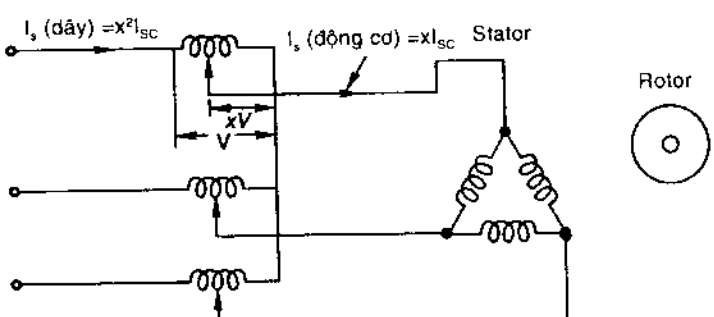
Dòng điện từ nguồn cấp vào động cơ là:

$$I_s\ (\text{dây}) = x(xI_{SC}) = x^2 I_{SC} \qquad (9.63)$$

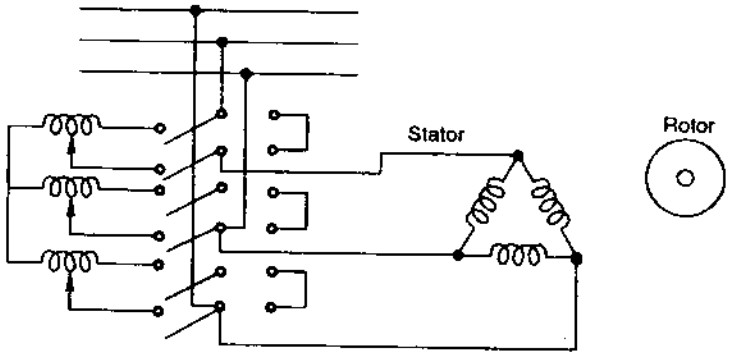
Tỷ số moment khởi động/tải toàn phần là:

$$\frac{T_s}{T_{fl}} = x^2\left(\frac{I_{SC}}{I_{fl}}\right)^2 \Big/ s_{fl} \qquad (9.64)$$

Có thể thấy moment khởi động giảm $1/x^2$ lần so với moment khởi động trực tiếp (với điện áp định mức), dòng điện (dây) khởi động cũng giảm $1/x^2$ lần. Nếu so sánh với khởi động bằng trở kháng stator, khởi động bằng biến áp



Hình 9.32 *Khởi động bằng biến áp tự ngẫu*



Hình 9.33 *Sơ đồ nối dây khởi động bằng biến áp tự ngẫu*

tự ngẫu có nhiều ưu điểm hơn. Để khởi động ổn định và gia tốc cao, có thể nâng từng bậc điện áp lên đến giá trị điện áp (dây) định mức.

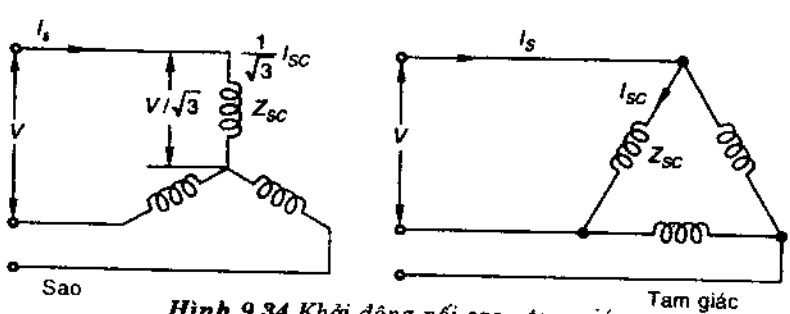
Sau khi khởi động, biến áp phải được ngắt khỏi mạch (Hình 9.33). Biến áp tự ngẫu có thời gian ngắn mạch định mức. Biến áp tự ngẫu dùng để khởi động động cơ cảm ứng là phương pháp đắt tiền, chỉ dùng cho động cơ lớn.

Khởi động nối sao - tam giác: Khởi động nối sao - tam giác là phương pháp khởi động 2 bước, rẻ tiền. Động cơ được thiết kế chạy tam giác được khởi động với điện áp dây định mức bằng cách nối các pha hình sao như sơ đồ mạch trên Hình 9.34.

Trong khởi động tam giác trực tiếp:

Dòng điện pha khởi động, $I_{SC} = V/Z_{SC}$; V = điện áp dây (9.65)

Dòng điện dây khởi động, I_s (tam giác) = $\sqrt{3}\, I_{SC}$ (9.66)



Hình 9.34 *Khởi động nối sao - tam giác*

Trong khởi động sao:

Dòng điện dây (pha) khởi động,

$$I_s(\text{sao}) = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{SC}} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{SC} \tag{9.67}$$

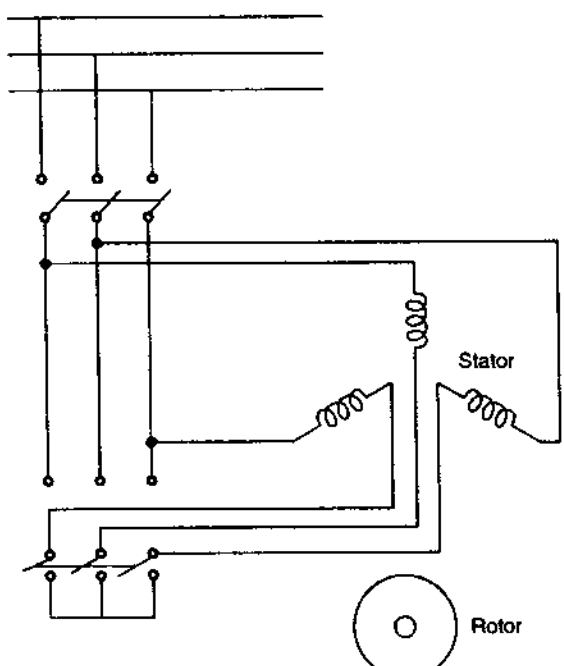
$$\frac{I_s(\text{sao})}{I_s(\text{tam giác})} = \frac{1}{3} \tag{9.68}$$

Áp dụng pt (9.60)

$$\frac{T_s(\text{sao})}{T_{fl}} = \frac{1}{3}\left(\frac{I_{SC}}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} \tag{9.69}$$

Với I_{SC} = dòng điện pha khởi động (nối Δ).

Và I_{fl} = dòng điện pha tải toàn phần (nối Δ).



Hình 9.35. *Sơ đồ nối dây khởi động sao - tam giác.*

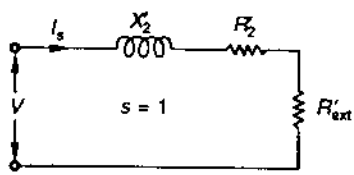
Có thể thấy khởi động nối Y - Δ có moment khởi động giảm 1/ 3 lần so với khởi động tam giác trực tiếp và dòng điện dây khởi động cũng giảm đến 1/3. Tác động tương tự khởi động bằng biến áp tự ngẫu, với :

$$x = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58$$

Mạch khởi động sao - tam giác rẻ hơn nhiều so với mạch khởi động dùng biến áp tự ngẫu, thường áp dụng cho động cơ cỡ trung và nhỏ. Sơ đồ nối dây được nêu trên Hình 9.35.

Khởi động động cơ vòng trượt (khởi động dùng điện trở rotor)

Trong động cơ vòng trượt, dòng điện khởi động giảm đồng thời tăng moment khởi động bằng cách mắc thêm điện trở ngoài vào mạch rotor (qua chổi quét gắn trên vòng trượt). Hình 9.36 minh họa mạch động cơ (bỏ qua nhánh song song) với điện trở ngoài mắc vào mạch rotor. Để đơn giản, có thể coi trở kháng stator là không đáng kể.



Hình 9.36 *Khởi động với điện trở ngoài mắc vào mạch rotor*

Với: R'_{ext} = điện trở ngoài trên mỗi pha của mạch rotor khi nhìn từ phía stator

$$R'_{ext} = \left(\frac{N_{e1}}{N_{e2}}\right)^2 R_{ext}$$

Trong đó R_{ext} là điện trở ngoài thực sự mắc vào mạch rotor.

$$I_s = \frac{V}{\sqrt{\left(R'_2 + R'_{ext}\right)^2 + X'^2_2}} \tag{9.70}$$

$$T_s = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2\left(R'_2 + R'_{ext}\right)}{\left(R'_2 + R'_{ext}\right)^2 + X'^2_2} \tag{9.71}$$

Moment khởi động cực đại đạt được với:

$$R'_2 + R'_{ext} = X'_2 \tag{9.72}$$

và bằng moment đánh thủng:

$$T_s(\max) = \frac{3}{\omega_s}\left(\frac{0.5V^2}{X_2}\right) = T_{\text{đánh thung}} \tag{9.73}$$

Bằng cách chọn R_{ext} phù hợp, dòng điện và moment khởi động được điều chỉnh theo mức độ mong muốn. Do moment khởi động cực đại đạt được lớn hơn nhiều so với moment tải toàn phần, nên việc sử dụng động cơ vòng trượt khởi động bằng điện trở rotor là lý tưởng để khởi động cơ có tải. Điện trở rotor bên ngoài, được nối theo các cấp và động cơ được khởi động theo từng cấp điện trở đó.

Ví dụ 9.8. Động cơ cảm ứng lồng sóc có độ trượt 4% khi tải toàn phần. Dòng điện khởi động gấp 5 lần dòng điện tải toàn phần. Trở kháng stator và dòng điện từ hóa là không đáng kể. Điện trở rotor giả sử không đổi.

(a) Tính moment cực đại và độ trượt tương ứng.

(b) Tính moment khởi động theo pu đối với moment tải toàn phần.

Giải

(a)
$$I_s^2 = \frac{V^2}{R_2'^2 + X_2'^2};(s = 1) \tag{i}$$

$$I_{fl}^2 = \frac{V^2}{(R_2'^2/s_{fl})^2 + X_2'^2} \tag{ii}$$

Chia phương trình (i) cho (ii)

$$\left(\frac{I_s}{I_{fl}}\right)^2 = \frac{\left(R_2'/s_{fl}\right)^2 + X_2'^2}{R_2'^2 + X_2'^2} = \frac{s_{max,T}^2 + s_{fl}^2}{s_{fl}^2\left(s_{max,T}^2 + 1\right)} \tag{iii}$$

Thay các giá trị:

$$25 = \frac{s_{max,T}^2 + (0.04)^2}{(0.04)^2\left(s_{max,T}^2 + 1\right)}$$

$$s_{max,T} = 0.2\ (20\%)$$

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_s}\cdot\frac{0.5\,V^2}{X_2'^2} \tag{iv}$$

$$T_{fl} = \frac{3}{\omega_s}\cdot\frac{V^2\left(R_2'^2/s_{fl}\right)}{\left(R_2'^2/s_{fl}\right)^2 + X_2'^2} \tag{v}$$

Chia phương trình (iv) cho (v)

$$\frac{T_{max}}{T_{fl}} = 0.5 \times \frac{R_2'^2 + s_{fl}^2 X_2'^2}{R_2' X_2' s_{fl}} = 0.5 \times \frac{s_{max,T}^2 + s_{fl}^2}{s_{max,T}\, s_{fl}} = 0.5 \times \frac{(0.2)^2 + (0.04)^2}{0.2 \times 0.04} = 2.6$$

$$T_{max} = 2.6 \text{ pu}$$

(b) Tính theo pt (9.60)

$$\frac{T_s}{T_{fl}} = \left(\frac{I_s}{I_{fl}}\right)^2 s_{fl} = 5^2 \times 0.04 = 1$$

$$T_s = 1 \text{ pu}$$

Ví dụ 9.9. Động cơ cảm ứng nối sao, 6 - cực, 150 kW, 3000V, 50 Hz có rotor vòng trượt nối sao, với tỷ số biến áp (stator/rotor) là 3.6. Điện trở rotor là 0.1Ω/ pha và điện kháng rò trên mỗi pha (rotor) là 3.61 mH. Trở kháng stator không đáng kể. Hãy tìm:

(a) Dòng điện khởi động và moment ở điện áp định mức với vòng trượt ngắn mạch.

(b) Điện trở ngoài cần thiết để dòng điện khởi động theo điện áp định mức giảm đến 30 A và moment khởi động tương ứng.

Giải

$R_2 = 0.1\ \Omega$; $X_2 = 314 \times 3.61 \times 10^{-3} = 1.13\ \Omega$

$R'_2 = (3.6)^2 \times 0.1 = 1.3\ \Omega$; $X'_2 = (3.6)^2 \times 1.13 = 14.7\ \Omega$

(a)
$$I_s = \frac{3000/\sqrt{3}}{\sqrt{(1.3)^2 + (14.7)^2}} = 117.4 \text{ A}$$

$$T_s = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2 R_2'^2}{R_2'^2 + X_2'^2}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.7 \text{ rad / s}$$

$$T_s = \frac{3}{104.7} \cdot \frac{\left(3000/\sqrt{3}\right)^2 \times 1.3}{(1.3)^2 + (14.7)^2} = 513.1 \text{ Nm}$$

(b)
$$I_s = \frac{3000/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(1.3 + R_{ext}\right)^2 + (14.7)^2}} = 30 \text{ A}$$

$R'_{ext} = 54.33$

$R_{ext} = 54.53 / (3.6)^2 = 4.21\ \Omega$

$$T_s = \frac{3}{104.7} \cdot \frac{\left(3000/\sqrt{3}\right)^2 \times (1.3 + 54.53)}{(1.3 + 54.53)^2 + (14.7)^2} = 1440 \text{ Nm}$$

Lưu ý: Bằng cách mắc thêm điện trở vào rotor, dòng điện khởi động giảm theo hệ số 117.4/ 30 = 3.91 lần, và moment khởi động tăng 1440/ 513.1 = 2.8 lần.

Ví dụ 9.10. Động cơ cảm ứng lồng sóc nhỏ có dòng điện khởi động bằng 6 lần dòng điện và độ trượt tải toàn phần là 0.05. Hãy tìm theo pu các giá trị tải toàn phần, dòng điện (dây) và moment khởi động với các phương pháp khởi động từ (a) đến (d):

(a) Khởi động trực tiếp

(b) Khởi động dùng điện trở stator với dòng điện động cơ giới hạn đến 2 pu

(c) Khởi động dùng biến áp tự ngẫu với dòng điện động cơ giới hạn đến 2 pu

(d) Khởi động sao - tam giác

(e) Tỷ số biến áp tự ngẫu là bao nhiêu để có moment khởi động 1 pu?

Giải

(a) Khởi động trực tiếp

$I_s = 6$ pu.

$T_s = (6)^2 \times 0.05 = 1.8.$

(b) Khởi động bằng điện trở stator

$I_s = 2$ pu (giới hạn).

$T_s = (2)^2 \times 0.05 = 0.2$ pu.

(c) Khởi động bằng biến áp tự ngẫu.

$x = 2/ 6 = 1/ 3.$

I_s (động cơ) = 2 pu.

I_s (dây) = (1/ 3) x 2 = 0.67 pu.

$T_s = (2)^2 \times 0.05 = 0.2$ pu.

(d) Khởi động sao - tam giác

$I_s = (1/ 3) \times 6 = 2$ pu

$T_s = (1/ 3) \times 6^2 \times 0.05 = 0.6$ pu

(e) Khởi động biến áp tự ngẫu

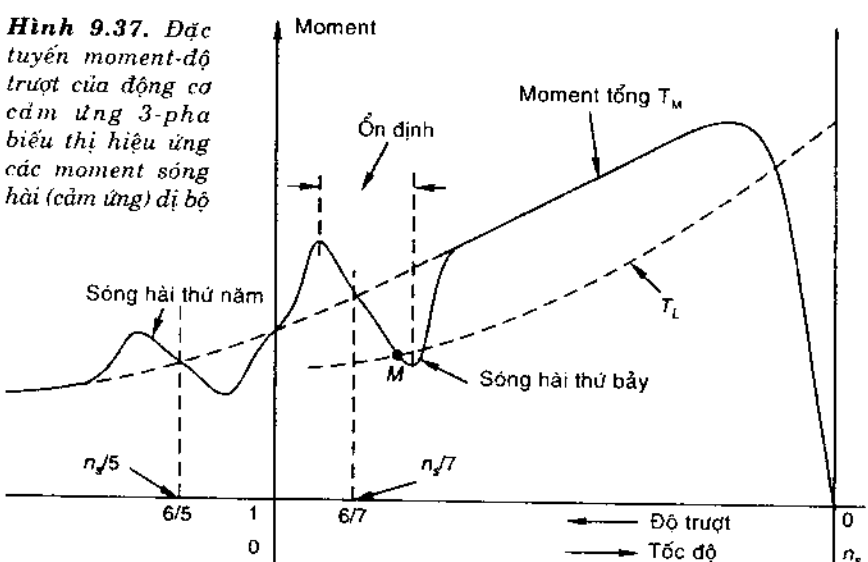
$$T_s = x^2\, 6^2 \times 0.05 = 1.0 \text{ pu}$$

$$x = 0.745\ (\approx 75\%)$$

Hiện tượng kẹt khi khởi động và chạy chậm

Rotor lồng sóc có thể có biểu hiện bất thường khi khởi động do các quan hệ giữa số cực và số rãnh trên stator và rotor. Với số rãnh stator S_2 bằng hoặc là bội số nguyên của số rãnh rotor S_1, bến thiên từ trở theo hàm không gian sẽ gây ra các lực thẳng hàng khá mạnh vào thời điểm khởi động. Các lực này có thể tạo ra moment mạnh hơn moment gia tốc làm cho động cơ không khởi động. Hiện tượng này gọi là *"sự kẹt"* khởi động. Do đó cần có sự phối hợp chuẩn xác số rãnh stator và rotor khi thiết kế.

Một số tổ hợp S_1 và S_2 gây ra sự tăng sóng hài không gian của sóng lực từ động, ví dụ, sóng hài thứ năm và thứ bảy ứng với các cực năm và bảy lần sóng cơ sở. Do hiệu số pha - không gian giữa các cực cơ sở của pha dây quấn là (0^0, 120^0, 240^0), hiệu số (không gian) này là (0^0, 240^0, 120^0) đối với các cực sóng hài thứ năm và (0^0, 120^0, 240^0) đối với cực sóng hài thứ bảy. Do đó các cực hài thứ năm quay ngược với vận tốc đồng bộ $n_s/5$ và các cực hài thứ bảy quay



Hình 9.37. *Đặc tuyến moment-độ trượt của động cơ cảm ứng 3-pha biểu thị hiệu ứng các moment sóng hài (cảm ứng) dị bộ*

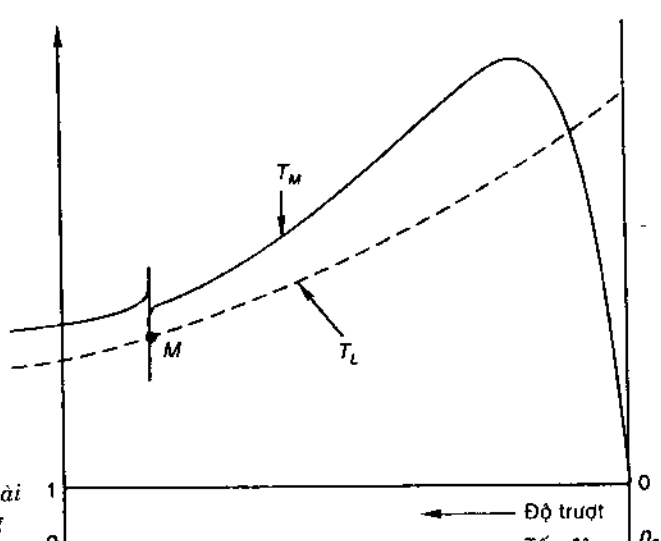
thuận với $n_s/7$. Các lực từ động hài này có moment (cảm ứng) không đồng bộ riêng có cùng hình dạng như sóng cơ sở. Hình 9.37 minh họa sự chồng chập các đường cong moment - trượt sóng cơ sở, sóng hài thứ năm và thứ bảy. Hiệu ứng "yên ngựa" rõ rệt với vùng vận hành ổn định (độ dốc moment - trượt là âm) ở khoảng 1/ 7 vận tốc động cơ bình thường (s = 6/ 7). Trên Hình 9.37, đường cong moment tải cắt đường cong moment động cơ ở điểm M trong vùng vận hành ổn định, gây ra hiện tượng động cơ chạy ổn định ở tốc độ thấp.

Một số tổ hợp rãnh, ví dụ, $S_1 = 24$ và $S_2 = 18$, làm cho lực từ động stator có sóng hài thứ 11 ngược chiều và thứ 13 thuận chiều, còn rotor có sóng hài thứ 15 thuận và thứ 13 ngược chiều. Lực từ động sóng hài stator thứ 13 quay với vận tốc $+ n_s/13$ so với stator và lực từ động sóng hài rotor thứ 13 quay với vận tốc $-(n_s - n)/13$ so với rotor khi rotor có tốc độ n. Hai lực từ động này khóa lẫn nhau, tạo ra moment đồng bộ khi:

$$\frac{n_s}{13} = n - \left(\frac{n_s - n}{13}\right)$$

$$n = \frac{n_s}{7}$$

Sự không liên tục ở $n_s/7$ trên đặc tuyến moment - độ trượt, không phải do sóng hài thứ 7 mà do sóng hài thứ 13 gây ra (Hình 9.38).



Hình 9.38
Moment sóng hài đồng bộ trong động cơ cảm ứng

Hiện tượng kẹt và chạy chậm xảy ra rất bé trong máy điện cảm ứng vòng trượt do có moment khởi động cao. Moment họa tần cảm ứng không thể tránh được, nhưng có thể giảm bằng cách chọn khoảng cách cuộn dây thích hợp và xoắn nhẹ các rãnh rotor, hoặc phối hợp số rãnh rotor và stator một cách hợp lý.

Điều khiển tốc độ

Các phương pháp điều khiển tốc độ động cơ cảm ứng dựa vào phương trình vận tốc:

$$n = (1 - s)\, n_s \tag{9.74}$$

Theo phương trình này, hai phương pháp cơ bản điều khiển tốc độ quay là (i) Điều khiển độ trượt với vận tốc đồng bộ cố định, (ii) Điều khiển vận tốc đồng bộ

Do:
$$n_s = \frac{120f}{P} \tag{9.75}$$

có hai cách điều khiển vận tốc đồng bộ là điều khiển tần số điện nguồn và điều khiển các cực stator - Phương pháp này cho phép điều khiển bước khi các cực có thể thay đổi theo hệ số hai. Sự thay đổi cực chỉ có thể thực hiện với động cơ rotor lồng sóc.

Điều khiển vận tốc bằng điện áp

Đây là phương pháp điều khiển độ trượt với tần số không đổi, điện áp biến thiên được cấp vào mạch stator. Điện áp phải giảm xuống dưới giá trị định mức. Khi vận hành động cơ ở độ trượt tải toàn phần, nếu độ trượt tăng gấp đôi đối với moment tải không đổi, từ các pt (9.34) và (9.35) có thể thấy điện áp phải giảm theo hệ số $1/\sqrt{2}$ và dòng điện tương ứng (I'_2) tăng theo hệ số $\sqrt{2}$ giá trị tải toàn phần. Động cơ do đó bị quá nhiệt. Phương pháp này không thích hợp để điều khiển tốc độ, chỉ được sử dụng giới hạn trong các động cơ có yêu cầu moment tải tỷ lệ với bình phương vận tốc (Hình 11.39) (chẳng hạn động cơ quạt điện). Quạt trần sử dụng động cơ cảm ứng một pha có trở kháng dừng lớn, giới hạn dòng điện dẫn trên stator.

Điều khiển vận tốc bằng điện trở rotor

Dạng điều khiển này chỉ ứng dụng cho động cơ cảm ứng vòng trượt. Từ Hình 9.15, có thể thấy khi điện trở rotor tăng, độ trượt động cơ tăng (vận tốc giảm) với moment tải cố định. Dòng điện stator thay đổi đến một giới hạn khi hiệu ứng thay đổi độ trượt và điện trở rotor có xu hướng triệt tiêu lẫn nhau (pt

(9.34)) đối với độ trượt có giá trị thấp. Lúc đó công suất vào tăng, tổn thất công suất trên điện trở rotor cũng tăng theo, làm hiệu suất động cơ vận hành giảm. Phương pháp điều chỉnh này được dùng ở phạm vi điều chỉnh vận tốc hẹp và thường dùng trong vận hành ngắn mạch.

Hiệu suất kiểu điều khiển vận tốc này được cải tiến bằng cách trả lại công suất cơ ra trên rotor về trục rotor hoặc công suất điện về điện nguồn chính. Kiểu thứ nhất là mắc bộ chỉnh lưu và động cơ dc vào trục rotor. Kiểu thứ hai đòi hỏi bộ biến tần biến đổi công suất tần số biến thiên thành tần số nguồn cố định để cấp công suất điện về điện nguồn chính. Các mạch điều khiển này có thể dùng SCR (Hình 11.41 và 11.42)

Động cơ có thể đạt đến vận tốc siêu đồng bộ bằng cách cấp vào rotor một nguồn công suất có tần số điều chỉnh được. Có thể thấy điều này là ngược lại với sự mắc thêm điện trở vào rotor, trong đó công suất được lấy ra khỏi rotor (bị tiêu phí do điện trở ngoài). Có thể đạt được khoảng điều khiển tốc độ rộng cả trên và dưới tốc độ đồng bộ bằng cách mắc thiết bị biến tần số vào mạch rotor.

Ví dụ 9.11. Động cơ nối tam giác, 440V, 50Hz, 4 cực, 3 pha, có trở kháng rò là (0.3 + j 5.5 + 0.25/ s) Ω/ pha (pha Δ) được đối chiếu lên stator. Tỷ số điện áp stator và rotor là 2.5. Hãy xác định điện trở bên ngoài được mắc vào mỗi pha hình sao của dây quấn rotor, để động cơ có moment tổng là 150 Nm với vận tốc quay 1250 v/ ph.

Giải

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157.1 \text{ rad / s}$$

$$s = \frac{1500 - 1250}{1500} = 0.167$$

Tổng trở kháng rò được đối chiếu lên stator (trên cơ sở tương đương mắc sao).

$$= \frac{1}{3}\left[(0.3 + 0.25/s) - j\,5.5\right] = \left(0.1 + \frac{0.083}{s} + j\,1.83\right) \Omega/\text{pha (sao)}$$

Từ pt (9.22) với

$$R'_2 = R'_2 + R'_{ext}\ ;\ \ R'_2 = 0.083\ \Omega$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V^2\left(R'_2/s\right)}{\left(0.1 + R_2/s\right)^2 + \left(X_1 + X_2\right)^2}$$

Thay các giá trị

$$150 = \frac{3}{157.1} \cdot \frac{\left(440/\sqrt{3}\right)^2 \left(R_2'/0.167\right)}{\left(0.1 + R_2'/0.167\right)^2 + (1.83)^2}$$

$$R_2'^2 - 1.34\,R_2' + 0.093 = 0$$

$$R'_2 = 1.27\ \Omega;\ \ 0.073\ \Omega$$

(giá trị thứ hai nhỏ hơn $R'_2 = 0.083\ \Omega$)

$$R'_{ext} = 1.27 - 0.083 = 1.19\ \Omega$$

$$R_{ext}(\text{rotor}) = \frac{1.19}{(2.5)^2} = 0.19\ \Omega/\text{ pha}$$

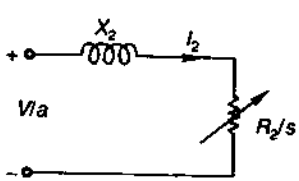
Ví dụ 9.12. Động cơ cảm ứng, 3 pha, 25 kW, 400V, 50 Hz có điện trở rotor 0.08Ω và điện kháng dừng là 0.4Ω. Tỷ số vòng stator/rotor hiệu dụng là 2.5/1. Động cơ có tải moment không đổi là 250Nm. Bỏ qua trở kháng stator.

(a) Tính điện trở tối thiểu mắc vào mạch rotor khi động cơ khởi động có tải.

(b) Động cơ chạy ở vận tốc bao nhiêu, nếu điện trở rotor mắc thêm là: (i) Cắt ra khỏi mạch. (ii) Sau khi ngắn mạch

Giải

Mạch động cơ được nhìn từ phía stator được minh họa trên Hình 9.39, bỏ qua trở kháng stator.



Hình 9.39. *Minh họa Ví dụ 9.12*

$$I_2 = \frac{V_1/a}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot I_2^2 R_2/s = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{(V/a)^2 (R_2/s)}{(R_2/s)^2 + X_2^2} \qquad \text{(i)}$$

$$T\ (\text{khởi động}) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{(V/a)^2\, R_2}{R_2^2 + X_2^2};\quad s = 1 \qquad \text{(ii)}$$

Điện trở ngoài nối vào mạch rotor là R_2(ext):

$$R_2 \text{ (tổng)} = R_{2t} = R_2 + R_2(\text{ext}) \qquad \text{(iii)}$$

$$T \text{ (khởi động)} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{(V/a)^2 R_{2t}}{R_{2t}^2 + X^2} \qquad \text{(iv)}$$

(a) $a = 2.5$; $X_2 = 0.4\ \Omega$; $R_2 = 0.08\ \Omega$

T(khởi động) = T(tải) = 250Nm; đây là moment khởi động cực tiểu, moment khởi động thực lớn hơn nhiều.

$$V = 400/\sqrt{3} = 231\text{ V}$$

$n_s = 750$ v/ph hoặc $\omega_s = 78.54$ rad/ s

Thay các giá trị vào (ii)

$$250 = \left(\frac{3}{78.54}\right) \cdot \frac{(231/2.5)^2 R_{2t}}{R_{2t}^2 + (0.4)^2} \qquad \text{(v)}$$

Hoặc $R_{2t}^2 - 1.304\ R_{2t} + 0.16 = 0$

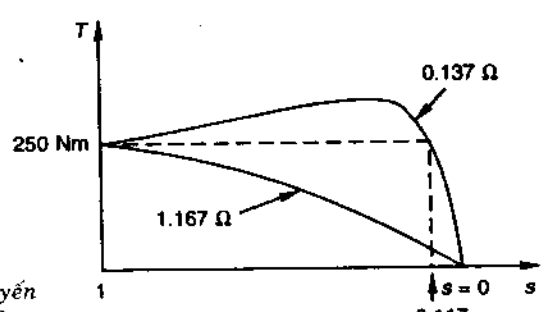
$R_{2t} = 0.137\ \Omega;\ 1.167\ \Omega$

Đặc tuyến T - s với hai giá trị R_{2t} được minh họa trên Hình 9.40. Dễ thấy với $R_{2t} = 1.167\Omega$, động cơ không thể khởi động khi moment giảm ($T_{\text{động cơ}} < T_{\text{tải}}$) đối với $s > 1$.

Do đó cần chọn

$$R_{2t} = 0.137\ \Omega \Rightarrow R_2(\text{ext}) = 0.137 - 0.08 = 0.057\ \Omega$$

(b) (i) $R_{2t} = 0.137\ \Omega$. Điện trở mắc thêm vào mạch.



Hình 9.40. *Các đặc tuyến T - s với hai giá trị R_{2t}*

Thay các giá trị vào (i)

$$250 = \left(\frac{3}{78.54}\right)\frac{(231/2.5)^2(R_{2t}/s)}{(R_{2t}/s)^2 + (0.4)^2}$$

Phương trình này có nghiệm như pt (v):

$R_{2t}/s = 0.137.\ 0.167$

$R_{2t} = 0.137\ \Omega$

$s = 1;\ 0.137/\ 1.167 = 0.117$ (Hình 9.39).

Vận tốc động cơ $n = 750\ (1 - 0.117) = 662$ v/ph.

(ii) Điện trở ngoài bị loại bỏ

$$250 = \left(\frac{3}{78.54}\right)\frac{(231/2.5)^2(R_2/s)}{(R_2/s)^2 + (0.4)^2}$$

Giải tương tự như trên

$R_2/s = 0.137;\ R_2/s = 1.167$

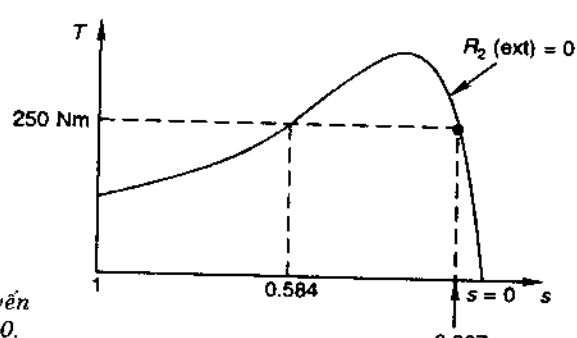
$R2 = 0.08$

$s = 0.584,\ 0.067$

Các điểm giá trị được nêu trên đặc tuyến T - S (Hình 9.41). Động cơ sẽ chạy với

$s = 0.067 \Rightarrow 700$ v/ph

Điểm s = 0.584 trên đặc tuyến T - s không ổn định khi độ dốc của đường cong moment - vận tốc là dương và động cơ sẽ chạy vượt quá vận tốc này.

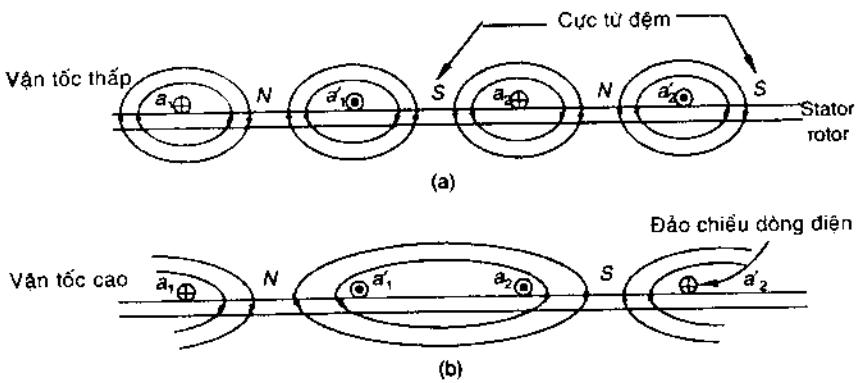


Hình 9.41. *Đặc tuyến T - s với $R_2(ext) = 0$.*

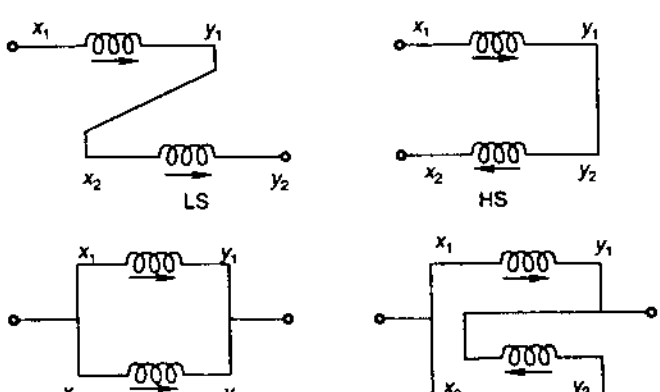
Thay đổi cực từ - phương pháp các cực từ đệm

Số lượng cực từ stator có thể thay đổi theo tỷ số 2:1 bằng cách thay đổi các mối nối cuộn dây, từ đó sẽ có hai vận tốc đồng bộ tương ứng. Trong động cơ thay đổi cực từ, rotor phải là loại lồng sóc để tránh sự phức tạp khi nối lại dây trong rotor dây quấn. Rotor lồng sóc tự phản ứng để tạo ra số lượng cực từ như stator. Với phương pháp này, nếu có hai bộ dây quấn stator độc lập, sẽ có bốn tốc độ đồng bộ.

Hình 9.42 a minh họa hai cuộn dây $a_1a'_1$ và $a_2a'_2$ trên pha a ở stator (trên một pha có thể có nhiều cuộn dây quấn bước ngắn, thay vì hai cuộn như ở đây). Khi các cuộn dây được nối để dẫn dòng điện bằng nhau (cùng chiều hoặc ngược

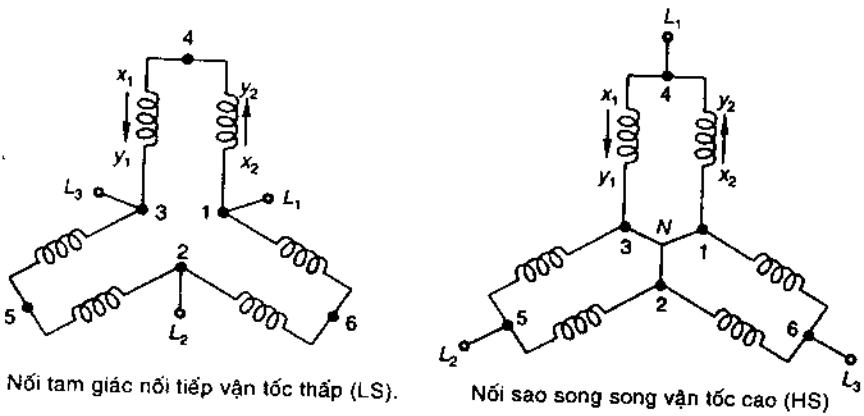


Hình 9.42. *Nguyên lý thay đổi cực từ.*



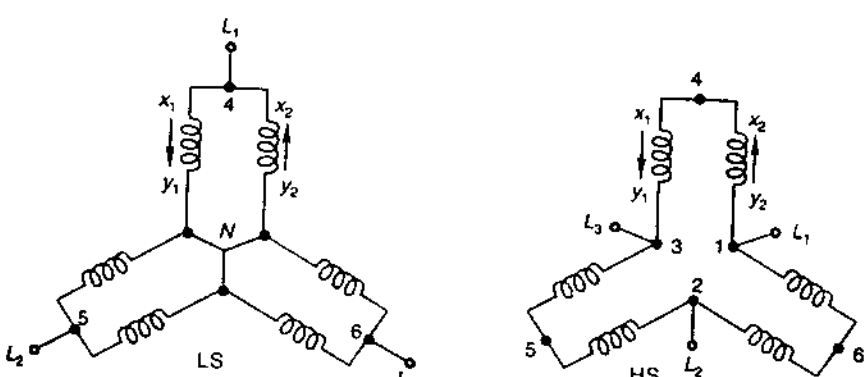
Hình 9.43 *Nhóm pha mắc song song / nối tiếp để thay đổi cực từ*

chiều kim đồng hồ), mỗi cuộn dây tạo ra một cực từ Bắc và các cực đệm Nam nằm xen giữa các cuộn dây. Đây là kiểu nối vận tốc thấp - số cực từ gấp đôi số cuộn dây. Nếu hai cuộn dây được nối lại bằng bộ điều khiển sao cho đảo ngược dòng điện trong một cuộn dây, số cực từ giảm phân nửa (Hình 9.42b). Đây là kiểu nối vận tốc cao. Nhóm các cuộn dây được nối song song/nối tiếp để thay đổi số lượng cực từ theo tỷ số 2:1 được minh họa trên Hình 9.43. Dòng điện từ x_1 đến y_1 trong một nhóm và x_2 đến y_2 trong nhóm thứ hai tạo ra số cực từ xác định (các cực liên tiếp). Nếu đảo chiều dòng điện trong một nhóm (từ y_2 đến x_2) sẽ tạo ra một nửa số cực từ.

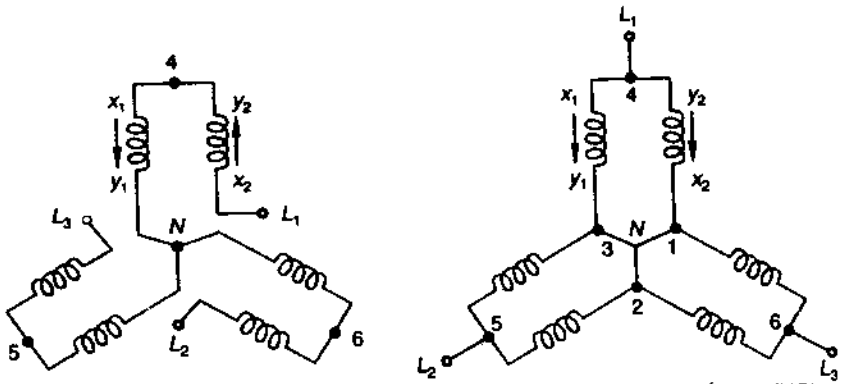


Nối tam giác nối tiếp vận tốc thấp (LS). Nối sao song song vận tốc cao (HS)

Hình 9.44. *Nối sao song song và nối tam giác nối tiếp.*



Hình 9.45 *Nối sao song song vận tốc thấp và nối tam giác nối tiếp vận tốc cao*



Nối sao nối tiếp vận tốc thấp (LS). Nối sao song song vận tốc cao (HS)

Hình 9.46. *Nối sao vận tốc thấp và cao.*

Sử dụng nối kết song song/nối tiếp các nhóm pha riêng rẽ, các pha có thể được nối sao/tam giác theo chế độ vận hành hai tốc độ với ba kiểu đặc tính moment - vận tốc. Các nối kết này có tên là *moment không đổi, mã lực không đổi* và *moment biến đổi*, được minh họa tương ứng trên các Hình 9.44, 9.45, 9.46. Trên mỗi Hình này, gọi:

V = điện áp dây.

I = dòng điện được phép trong dây dẫn.

η_l, η_h = hiệu suất tương ứng với nối dây vận tốc thấp (LS), vận tốc cao (HS).

$\cos\phi_l$; $\cos\phi_h$ = hệ số công suất ứng với nối dây vận tốc thấp, vận tốc cao.

Từ Hình 9.44:

$$\frac{\text{LS output}}{\text{HS output}} = \frac{3\ \text{VI}\,(\cos\phi_l)\eta_l}{\sqrt{3}\ \text{V}\,(2\text{I})(\cos\phi_h)\eta_h} = 0.866\left(\frac{\eta_l\cos\phi_l}{\eta_h\cos\phi_h}\right)$$

Từ đó:

$$\frac{\text{LS moment}}{\text{HS moment}} = 1.732\left(\frac{\eta_l\cos\phi_l}{\eta_h\cos\phi_h}\right)$$

Tổng quát:

$$\cos\phi_l < \cos\phi_h$$

$$\eta_l < \eta_h$$

Các giá trị thường dùng là:

$$\left(\frac{\eta_l \cos \phi_l}{\eta_h \cos \phi_h}\right) = 0.7$$

Từ đó

$$\frac{\text{Moment LS}}{\text{Moment HS}} = 1.732 \times 0.7 = 1.21$$

Đây là vận hành moment không đổi theo đặc tuyến (a) (Hình 9.47).

Từ Hình 9.45

$$\frac{\text{LS output}}{\text{HS output}} = \frac{\sqrt{3}\ V\ (2I)\ (\cos \phi_l)\ \eta_l}{3\ VI\ (\cos \phi_h)\ \eta_h} = 1.15\left(\frac{\eta_l \cos \phi_l}{\eta_h \cos \phi_h}\right)$$

$$= 1.15 \times 0.7 = 0.8 \approx 1$$

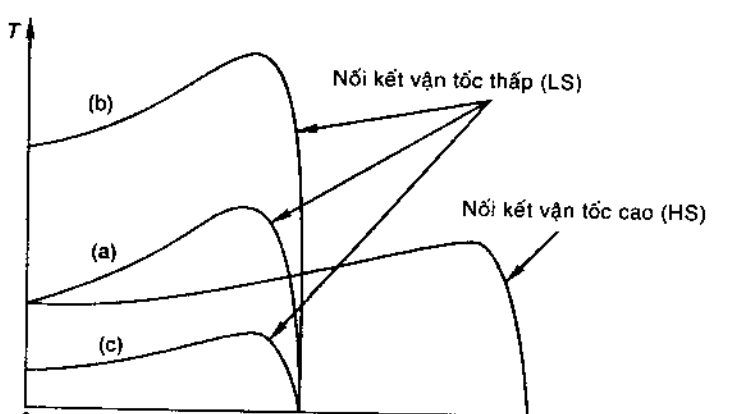
và

$$\frac{\text{Moment LS}}{\text{Moment HS}} = 2 \times 0.8 = 1.6$$

Đây là vận hành mã lực không đổi theo đặc tuyến (b) (Hình 9.47).

Tương tự, từ Hình 9.46:

$$\frac{\text{LS output}}{\text{HS output}} = \frac{\sqrt{3}\ VI\ (\cos \phi_l)\ \eta_l}{\sqrt{3}\ V\ (2I)\ (\cos \phi_h)\ \eta_h} = 0.5 \times 0.7 = 0.35$$



Hình 9.47 *Đặc tuyến moment - tốc độ với các nối kết vận tốc cao và thấp khác nhau.*

và $$\frac{\text{Moment LS}}{\text{Moment HS}} = 2 \times 0.35 = 0.7$$

Đây là nối kết moment biến thiên, minh họa bằng đặc tuyến (c) (Hình 9.47).

Điều biến biên độ cực từ

Phương pháp thay đổi cực từ này có ưu điểm là tỷ số hai vận tốc có thể khác với 2/1 như trong phương pháp cực từ đệm.

Xét sóng lực từ động phân bố hình sine trên một pha stator:

$$\mathcal{F}(\theta) = \mathbf{F} \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \tag{9.76}$$

với P là số cực từ là θ là góc cơ

F biến thiên theo hàm sine thời gian, do pha dòng điện biến thiên hình sine tạo ra. Sóng lực từ động này được biến điệu bằng sóng lực từ động hình sine của P_M cực từ sau:

$$\mathcal{F}_M(\theta) = \mathbf{M} \sin\left(\frac{P_M}{2}\theta\right) \tag{9.77}$$

Sóng lực từ động được biến điệu trở thành:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}'(\theta) &= \mathbf{MF} \sin\left(\frac{P_M}{2}\theta\right) \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \\ &= \frac{1}{2}\mathbf{MF}\left[\cos\left(\frac{P - P_M}{2}\theta\right) - \cos\left(\frac{P + P_M}{2}\theta\right)\right]\end{aligned} \tag{9.78}$$

Từ pt (9.70), sóng lực từ động được biến điệu là tương đương với hai sóng lực từ động, một sóng có $P_1 = (P - P_M)$ cực từ và sóng kia có $P_2 = (P + P_M)$ cực từ. Đây là điều biến *áp chế sóng mang*, tên gọi điều biến biên độ cực từ là không đúng.

Stator được quấn dây cho P cực từ, góc giữa các trục pha là r (2π / 3) rad; r là số nguyên (không là bội số của 3). Góc giữa các trục pha đối với các cực từ điều biến là:

$$\left(\frac{P \mp P_M}{P}\right) r \left(\frac{2\pi}{3}\right) = (1 \mp P_M / P)\, r \left(\frac{2\pi}{3}\right)$$

Với r = số nguyên, không phải bội số của 3.

Với điều biến áp chế P_1 cực từ, góc giữa các trục pha là bội số của 2 π, nghĩa là:

$$(1 - P_M / P)\, r \left(\frac{2\pi}{3}\right) = n(2\pi);\ n = \text{số nguyên}$$

$$P_M / P = \left(1 - \frac{3\,n}{r}\right) \qquad (9.79)$$

Góc giữa các trục pha của P_2 cực từ là:

$$(1 + P_M/P)\, r \left(\frac{2\,\pi}{3}\right) = \left(2 - \frac{3n}{r}\right) r \left(\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$= 2r\left(\frac{2\,\pi}{3}\right) - n\,(2\,\pi) = 2\,r\left(\frac{2\,\pi}{3}\right) \qquad (9.80)$$

Vì r được chọn là một số nguyên (không phải bội số của 3), góc trong pt (9.80) là số nguyên bội số của ($2\pi/3$) và từ trường quay chỉ tương ứng với $P_2 = (P + P_M)$ cực từ. Tương tự, P_2 cực từ có thể được điều biến và P_1 cực từ là triển khai.

Ví dụ, đặt P = 8, từ pt (9.74) nếu chọn n = 1 và r = 4 thì:

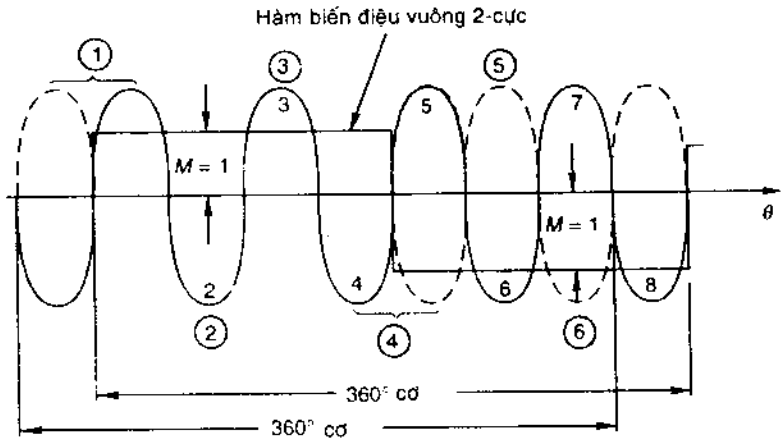
$$P_M = \frac{1}{4} P = 2$$

$$P_1 = P - P_M = 6 \text{ cực (được điều biến)}$$

$$P_2 = P + P_M = 10 \text{ cực}$$

Trong thực tiễn, sóng lực từ động biến điệu (sóng mang) là sóng vuông có biên độ M = 1. Sự biến điệu thực hiện bằng cách phân chia cuộn dây mỗi pha thành P_M nhóm và đảo nối kết luân phiên các nhóm.

Hình 9.48 minh họa 8 cực từ trên mỗi pha, cho thấy hàm điều biến sóng vuông 2 cực ($P_M = 2$) định vị đối xứng với P = 8 cực. Giá trị M = - 1 là các nhóm cực 5, 6, 7, 8 đấu dây ngược, các cực ngược dấu ký hiệu bằng nét gạch ngắn. Cũng trên Hình này, $P_1 = 6$ cực, ký hiệu bằng các số trong vòng tròn; nhưng $P_2 = 10$ là không thấy rõ. Từ pt (9.78) chỉ có thể thấy khi sóng điều biến là sóng vuông cơ sở (trong không gian). Các thành phần sóng hài (của sóng vuông) tạo ra các cực biến điệu riêng, nhưng thường không đáng kể. Trong ví dụ này $P_1 = 6$ cực cho kết quả áp chế trong $P_2 = 10$ cực, khi các nhóm cực 5, 6, 7, 8 được đấu ngược (nối ngược). Động cơ chạy tương ứng với 8 cực (nguyên thủy) và 10 cực (điều biến).



Hình 9.48. *Quấn dây 8-cực với biến điệu vuông 2-cực.*

Kỹ thuật điều biến biên độ cực từ cho phép hai tốc độ không theo tỷ số 2:1, do đó kích cỡ và giá thành máy điện giảm đáng kể.

Ví dụ 9.13. Động cơ cảm ứng được quấn dây theo điều biến biên độ cực từ có 20 cực từ ban đầu và hàm điều biến có 8 cực. Động cơ chạy ở hai vận tốc là bao nhiêu?

Giải

$$P = 20,\ P_M = 8$$

$$P_1 = 20 - 8 = 12$$

$$P_2 = 20 + 8 = 28$$

Từ pt (9.79)

$$P_M / P = \frac{8}{20} = \frac{2}{5} = \left(1 - \frac{3n}{r}\right);\ n = 1,\ r = 5$$

P_1 cực được áp chế

$$\text{Vận tốc (20 cực)} = \frac{120 \times 50}{20} = 300 \text{ v/ph}$$

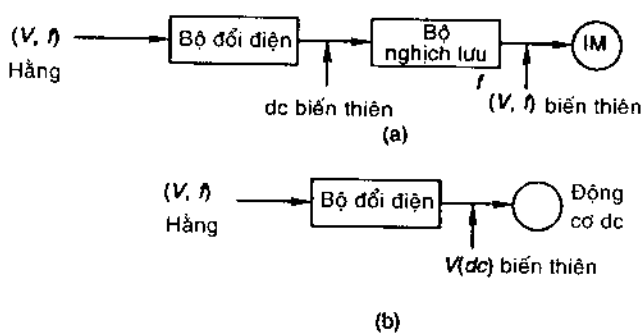
$$\text{Vận tốc (28 cực)} = \frac{120 \times 50}{28} = 214.286 \text{ v/ph}$$

Điều khiển tần số

Vận tốc đồng bộ có thể được điều khiển vô cấp trong khoảng rộng bằng cách thay đổi tần số điện cung cấp. Từ pt (9.1), từ thông khe hở không khí tổng cực từ là:

$$\Phi_r = \frac{1}{4.44\ K_{w1}\ N_{ph1}} \cdot \left(\frac{V}{f}\right) \tag{9.81}$$

Để tránh bão hòa trong lõi rotor và stator, do làm tăng đỉnh nhọn dòng điện từ hóa, từ thông Φ_r phải giữ không đổi khi tần số f thay đổi. Để đạt được điều đó, theo pt (9.81), khi f biến thiên, V phải thay đổi sao cho V/f không đổi. Nguồn điện không đổi (V, f) cấp nguồn điện biến đổi (V, f) qua bộ đổi điện và bộ nghịch lưu được minh họa trên Hình 9.49 (a) sử dụng mạch SCR. Hình 9.49 (b) minh họa sơ đồ điều khiển tốc độ qua bộ nghịch lưu và động cơ dc (động cơ shunt). Ưu điểm của hệ thống này là động cơ vận hành mạnh, ít bảo trì, giá tiền thấp so với động cơ dc. Trong tương lai gần, hệ thống điều khiển vận tốc động cơ cảm ứng loại này sẽ có nhiều cải tiến hơn và kỹ thuật SCR sẽ được giảm giá nhiều.



Hình 9.49 *So sánh sơ đồ điều khiển vận tốc trong động cơ cảm ứng và động cơ dc*

Đặc tuyến moment - độ trượt - f biến đổi, V/f không đổi

V_0 = điện áp định mức.

f_0 = tần số danh định.

X'_{20} = điện kháng dừng rotor danh định được đối chiếu lên stator (ở tần số f_0)

Ở tần số f bất kỳ

$$V = \left(\frac{f}{f_0}\right) V_0$$

$$X'_2 = \left(\frac{f}{f_0}\right) X'_{20}$$

$$\omega_s = \left(\frac{f}{f_0}\right) \omega_{s0}$$

Bỏ qua trở kháng stator, từ các pt (9.29), (9.31).

$$s_{max,T} = \left(\frac{f_0}{f}\right)\left(\frac{R_2}{X'_{20}}\right) = \left(\frac{f_0}{f}\right) s_{max,T,0} \tag{9.82}$$

$$T_{max} = \frac{3}{\left(\frac{f}{f_0}\right)\omega_{s0}} \cdot \left[\frac{0.5\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 V_0^2}{\left(\frac{f}{f_0}\right) X'_{20}}\right]$$

$$= \frac{3}{\omega_{s0}} \cdot \frac{0.5\, V_0^2}{X'_{20}} \quad = \text{hằng số, độc lập với } f \tag{9.83}$$

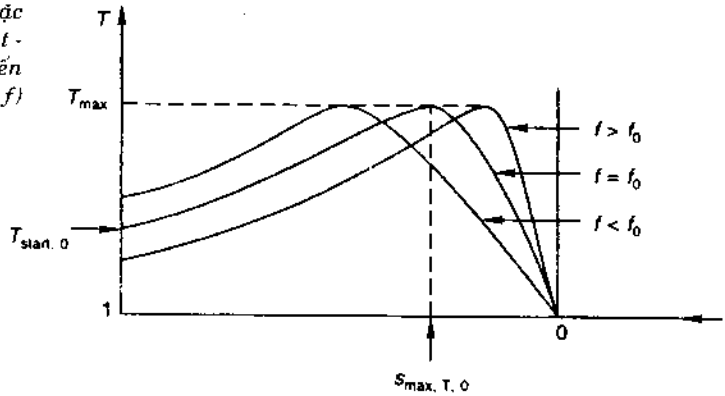
$$T_{\text{khởi động}} = \frac{3}{\left(\frac{f}{f_0}\right)\omega_{s0}} \cdot \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 V_0^2\, R'_2}{R'^2_2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 X'^2_{20}} \tag{9.84}$$

Từ các pt (9.82), (9.84), có thể thấy độ trượt ở moment cực đại giảm khi f tăng, moment cực đại không đổi và moment khởi động giảm khi f tăng.

Với độ trượt giá trị thấp, sử dụng biểu thức gần đúng từ các pt (9.34), (9.35):

$$I'_2 = \frac{s\left(\frac{f}{f_0}\right) V_0}{R'_2} \tag{9.85}$$

$$T = \frac{3}{\left(\frac{f}{f_0}\right)\omega_{s0}} \cdot \frac{s\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 V_0^2}{R'_2} = \frac{3}{\omega_{s0}} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)\left(\frac{sV_0^2}{R'_2}\right) \tag{9.86}$$

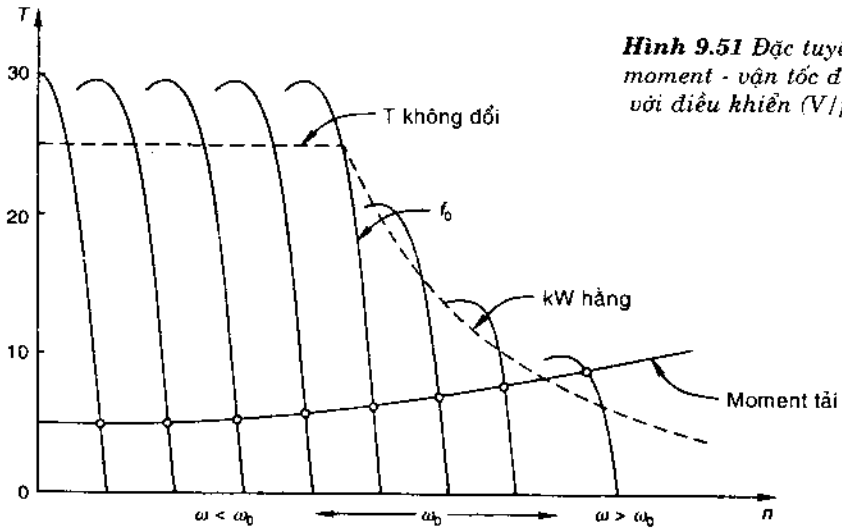


Hình 9.50 *Đặc tuyến moment - độ trượt; f biến thiên, (V/f) không đổi.*

Từ các pt (9.85) và (9.86) có thể thấy dòng điện và moment tăng với f ở độ trượt cho trước.

Đặc tuyến moment - độ trượt của động cơ ở tần số trên và dưới giá trị danh định được vẽ phác trên Hình 9.50.

Đặc tuyến moment - độ trượt với điều khiển V/f động cơ cảm ứng được nêu trên Hình 9.51. Đối với vận tốc $\omega < \omega_0$ (tương ứng với f_0), V/f không đổi, moment cực đại của động cơ không đổi và moment tải cũng không đổi. Đối với



Hình 9.51 *Đặc tuyến moment - vận tốc đối với điều khiển (V/f)*

vận tốc $\omega > \omega_0$, V/*f* không đổi khi V lớn hơn giá trị định mức, bộ nghịch lưu không thể cấp giá trị V này. Nên V/*f* ở vùng vận tốc này được phép giảm và moment động cơ giảm tỷ lệ với $(V/f)^2$ (tương ứng với Φ^2_{max}). Vùng điều khiển tốc độ này có thể dẫn tải kW (nhỏ) không đổi (moment giảm theo vận tốc). Phương pháp điều khiển tốc độ này bao gồm các đặc tuyến moment - vận tốc như điều khiển vận tốc Ward - Leonard trong động cơ dc kích thích song song (kích từ shunt). Với mức phát triển nhanh, các thiết bị điện tử điều khiển trong động cơ cảm ứng sẽ thay thế dần các động cơ dc.

Ví dụ 9.14. Động cơ cảm ứng 3 pha, 50 Hz có điện áp định mức V_1. Moment đánh thủng của động cơ ở tần số và điện áp định mức xảy ra với độ trượt 0.2. Động cơ chạy ở nguồn điện V_2, 60 Hz. Bỏ qua trở kháng stator.

(a) Nếu $V_2 = V_1$, tìm tỷ số các dòng điện và các moment khi khởi động. Tìm tỷ số các moment cực đại.

(b) Tìm tỷ số V_2/V_1, nếu động cơ có cùng giá trị dòng điện và moment khởi động ở 50Hz và 60 Hz.

Giải

(a)
$$s_{max,T} = \frac{R'_2}{X'_2} = 0.2$$

Với X'_2 = điện kháng rotor dừng. Ở điện áp định mức (V_1) và tần số 50Hz

$$I_s(1) = I'_2(1) = \frac{V_1}{\sqrt{R'^2_2 + X'^2_2}} \qquad \text{(i)}$$

$$T_s(1) = \frac{V_1^2 R'_2}{R'^2_2 + X'^2_2} \qquad \text{(ii)}$$

$$T_{max}(1) = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{0.5 V_1^2}{X'_2} \qquad \text{(iii)}$$

Ở điện áp V_2 và tần số 60Hz

$$I_2(2) = I'_2(2) = \frac{V_2}{\sqrt{R'^2_2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2 X'^2_2}} \qquad \text{(iv)}$$

$$T_s(2) = \frac{V_2^2 R'_2}{R'^2_2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2 X'^2_2} \qquad \text{(v)}$$

$$T_{max}(2) = \frac{3}{\left(\frac{6}{5}\right)\omega_s} \cdot \frac{0.5\,V_2^2}{\left(\frac{6}{5}\right)X_2'} \qquad \text{(vi)}$$

Chia các pt (iv), (v), (vi) tương ứng cho (i), (ii), (iii)

$$\frac{I_s(2)}{I_s(1)} = \frac{V_2}{V_1} \cdot \sqrt{\frac{R_2'^2 + X_2'^2}{R_2'^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2 X_2'^2}}$$

$$= \frac{V_2}{V_1} \cdot \sqrt{\frac{s_{max,T}^2 + 1}{s_{max,T}^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2}} = 1 \times \sqrt{\frac{(0.2)^2 + 1}{(0.2)^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2}} = 0.838$$

$$\frac{T_s(2)}{T_s(1)} = \frac{V_2^2}{V_1^2} \cdot \frac{s_{max,T}^2 + 1}{s_{max,T}^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2} = 1 \times \frac{(0.2)^2 + 1}{(0.2)^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2} = 0.703$$

$$\frac{T_{max}(2)}{T_{max}(1)} = \frac{V_2^2}{V_1^2}\left(\frac{6}{5}\right)^2 = 0.694$$

(b) $$\frac{V_2}{V_1} \cdot \sqrt{\frac{(0.2)^2 + 1}{(0.2)^2 + \left(\frac{6}{5}\right)^2}} = 1$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 1.19$$

Tỷ số này cũng bằng với tỷ số moment khởi động

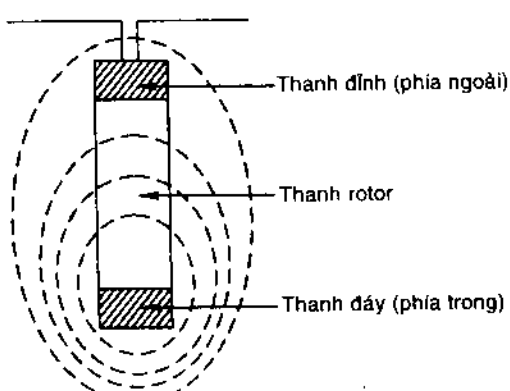
Rotor rãnh sâu/ lồng sóc kép

Động cơ cảm ứng vòng trượt có các ưu điểm so với động cơ lồng sóc là rotor được thiết kế với điện trở thấp để có thể vận hành tốt (hiệu suất cao, độ trượt thấp,...), đặc tuyến khởi động tốt (dòng điện khởi động thấp, moment khởi động cao,...) và khởi động đơn giản bằng cách ghép thêm điện trở ngoài vào mạch rotor lúc khởi động và ngắt ra dần cho đến khi rotor đạt đến vận tốc bình thường. Tuy nhiên, động cơ cảm ứng với rotor lồng sóc có điện trở rotor phù hợp với đặc điểm vận hành sau khi khởi động rất tốt, nhưng khi khởi động có dòng điện khởi động cao, moment khởi động thấp, do đó phải giảm

điện áp khởi động để hạn chế dòng điện khởi động (moment khởi động tỷ lệ với bình phương điện áp trên stator). Nhưng với giá thành thấp, bền chắc và ít bảo trì, hấp dẫn các nhà thiết kế tìm cách cải tiến đặc tính khởi động mà không làm suy giảm các đặc tính vận hành. Khi khởi động động cơ lồng sóc, tần số dòng điện rotor bằng tần số dòng điện stator (50 Hz), và khi chạy bình thường tần số này giảm thành $f_2 = sf$ (có thể thấp đến 2.5 Hz). Hiện tượng tự biến đổi điện trở rotor từ giá trị cao khi khởi động (điện trở 50 Hz) đến giá trị thấp khi chạy (điện trở 2.5 Hz) là hiệu ứng mặt ngoài và lân cận xảy ra trong dây dẫn mang dòng điện xoay chiều (ac). Đối với dạng dây dẫn có tiết diện bình thường (tròn hay vuông) như các thanh rotor, sự biến đổi này không đủ sức hình thành dòng điện khởi động thấp, moment khởi động cao. Để gia tăng sự biến đổi theo hiệu ứng điện trở ac trong các thanh rotor, có thể sử dụng rotor lồng sóc kép hoặc rotor rãnh sâu.

Rotor rãnh sâu

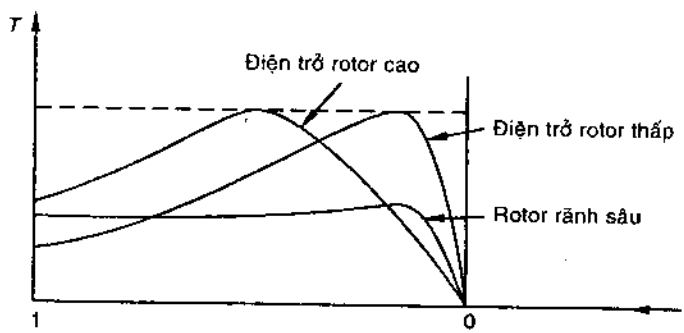
Rotor có các thanh lồng sóc bề ngang hẹp, nằm trong các rãnh sâu nửa kín (Hình 9.52). Từ thông rò được tạo nên bởi dòng điện trong thanh dẫn là các đường nét đứt trên Hình. Một thanh rotor có thể xem như gồm nhiều phần tử thanh song song hợp lại. Các thanh thành phần này đa số ở đỉnh và đáy (tiết diện) trên thanh lồng sóc. Từ thông liên kết trên các thanh thành phần đáy lớn hơn nhiều so với thành phần đỉnh. Kết quả là điện kháng (điện kháng 50 Hz) khởi động trên phần đáy lớn hơn nhiều so với phần đỉnh, dòng điện phần đỉnh lớn hơn nhiều so với dòng điện ở đáy và sớm pha hơn vì có điện kháng thấp hơn. Do đó, trên mặt cắt ngang (tiết diện) thanh lồng sóc rotor, mật độ dòng điện phân bố tăng từ đáy đến đỉnh tiết diện. Sự phân bố dòng điện



Hình 9.52 *Rotor rãnh sâu và từ thông rò*

không đồng nhất gây ra tổn thất ohm lớn hơn, nghĩa là điện trở hiệu dụng của thanh (lồng sóc) trở nên lớn hơn nhiều so với điện trở dc.

Khi vận tốc rotor gần bằng vận tốc đồng bộ, tần số dòng điện rotor ($f_2 = sf$) trở nên rất thấp và điện kháng trong các thành phần thanh dẫn trở nên bằng nhau, mật độ dòng điện trở nên hầu như đồng nhất, điện trở gần bằng giá trị điện trở dc. Bằng cách chọn các thanh có tiết diện phù hợp, sẽ có điện trở rotor khởi động (điện trở 50 Hz) lớn hơn nhiều lần điện trở rotor khi chạy (điện trở dc). Rotor rãnh sâu có dòng điện khởi động thấp, moment khởi động cao và điện trở chạy thấp, nghĩa là chế độ vận hành khởi động và chạy đạt tốt như mong muốn. Với điện kháng rotor ở trạng thái dừng cao hơn rotor lồng sóc bình thường, moment đánh thủng thấp hơn. Các đặc tuyến moment - độ trượt của rotor rãnh sâu và rotor rãnh bình thường với điện trở rotor cao và thấp được minh họa trên Hình 9.53.

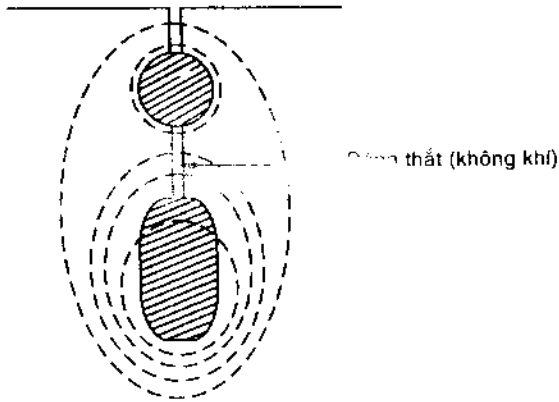


Hình 9.53. *So sánh đặc tuyến T - s giữa rotor rãnh sâu, rotor điện trở thấp và rotor điện trở cao.*

Rotor lồng sóc kép

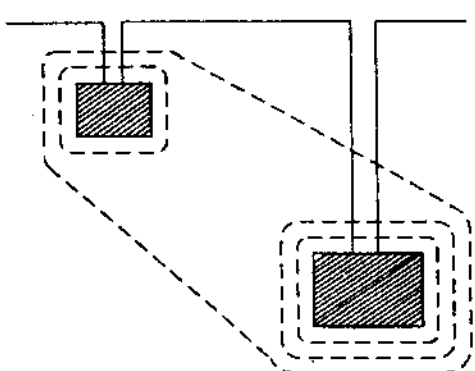
Rotor lồng sóc kép tuy đắt tiền hơn nhiều nhưng có chế độ khởi động tốt hơn, vận hành cũng tốt hơn so với rotor rãnh sâu. Các thanh lồng sóc gồm hai tầng, hai đầu có vòng ngắn mạch. Các thanh phía trên có tiết diện lớn hơn các thanh phía dưới, nên điện trở cao hơn. Các rãnh nối giữa hai bộ thanh lồng sóc kép được nêu trên Hình 9.54. Cách phân tích tương tự như cấu trúc rotor rãnh sâu, các thanh ngoài (phía trên) có liên kết từ thông rò thấp hơn nhiều và điện kháng cũng thấp hơn. Tự liên kết từ thông rò của các thanh ngoài/ trong được điều khiển bằng kích cỡ rãnh thất không khí, do đó từ thông chính không đi qua đường dẫn sắt giữa hai rãnh, "bỏ qua" các thanh dưới, nên không góp phần hình thành moment.

Hình 9.54 Từ thông rò của rãnh trên rotor lồng sóc kép.

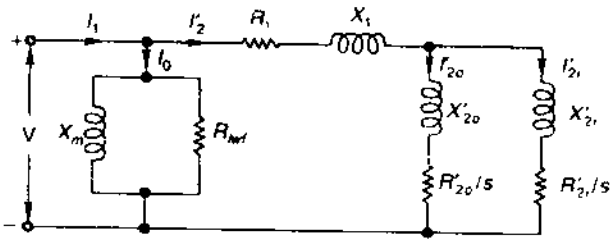


Lồng sóc ngoài có điện trở cao và điện kháng thấp, còn lồng sóc trong có điện trở thấp và điện kháng cao. Khi khởi động, dòng điện bị lồng sóc ngoài cản lại, kết quả là dòng điện khởi động giảm và moment khởi động tăng. Khi rotor chạy bình thường, hai lồng sóc có điện kháng khác nhau, vì tần số thấp của dòng điện rotor tác động dẫn điện tỷ lệ theo điện trở dc, và rotor điện trở thấp với từ thông khe hở không khí tạo thành chế độ vận hành khá tốt. Dòng điện khởi động chủ yếu trên lồng sóc ngoài, nên dễ gây ra quá nhiệt và làm cháy lồng sóc ngoài có điện trở cao.

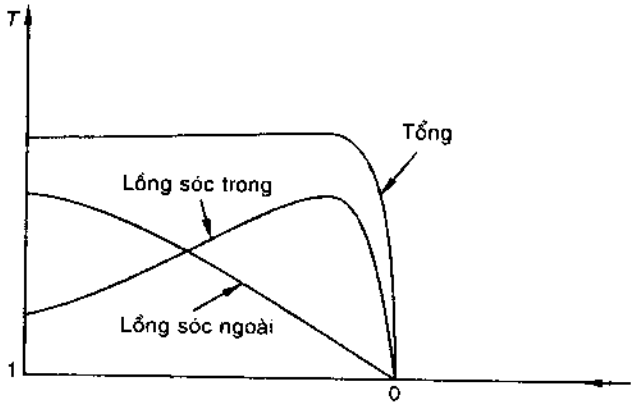
Cấu trúc khác của rotor lồng sóc kép được minh họa trên Hình 9.55 (mặt cắt ngang một phần rotor). Đường nét đứt là từ thông rò của rãnh.



Hình 9.55. *Cấu trúc rotor lồng sóc với hai lồng sóc có rãnh sâu khác nhau.*



Hình 9.56 *Mô hình mạch gần đúng của động cơ cảm ứng lồng sóc kép*



Hình 9.57 *Đặc tuyến moment - độ trượt của động cơ lồng sóc kép*

Để phân tích đơn giản, có thể giả thiết hai lồng sóc được ghép từ độc lập nhau, mô hình mạch gần đúng được nêu trên Hình 9.56. Đặc tuyến moment - độ trượt là tổng hai đặc tuyến thành phần lồng sóc trong và ngoài được nêu trên Hình 9.57.

Hiện nay cấu trúc rotor lồng sóc thông thường chiếm đa số, đối với yêu cầu moment khởi động nhỏ. Cấu trúc rotor rãnh sâu thường dùng cho các ứng dụng moment khởi động cao hơn và cấu trúc lồng sóc kép có moment khởi động cao hơn nữa. Đối với các động cơ cỡ lớn cần moment khởi động rất cao, thường sử dụng cấu trúc rotor vòng trượt đắt tiền.

Ví dụ 9.15. Rotor lồng sóc kép có trở kháng dừng của lồng sóc trong và ngoài là (0.01 + j 0.5) Ω và (0.05 + j 0.1) Ω. Trở kháng stator được coi là không đáng kể .

Hãy tính tỷ số moment hai lồng sóc (i) Khi khởi động và (ii) Khi chạy với độ trượt 5%

Giải

Từ pt (9.31) (khi nhìn từ phía stator)

$$T_s = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 R_2^2}{R_2^2 + X_2^2}$$

Với V' = lực điện động cảm ứng trong rotor

Thay các giá trị

$$T_{s0} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 (0.05)^2}{(0.05)^2 + (0.1)^2}$$

$$T_{si} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 (0.01)}{(0.01)^2 + (0.5)^2}$$

$$\frac{T_{s0}}{T_{si}} = \frac{(0.01)^2 + (0.5)^2}{(0.05)^2 + (0.1)^2} \times \left(\frac{0.05}{0.01}\right) = 100$$

Từ pt (9.28) (khi nhìn từ phía rotor)

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 (R_2 / s)}{(R_2 / s)^2 + X_2^2}$$

Thay các giá trị

$$T_o = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 (0.05 / 0.05)}{(0.05 / 0.05)^2 + (0.1)^2}$$

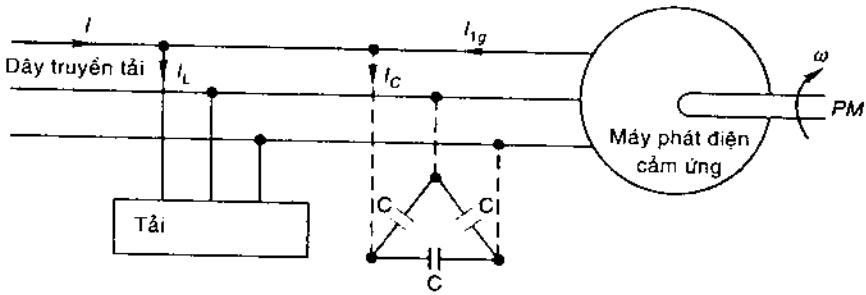
$$T_i = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V'^2 (0.01 / 0.05)}{(0.01 / 0.05)^2 + (0.3)^2}$$

$$\frac{T_o}{T_i} = \frac{(0.01 / 0.05)^2 + (0.5)^2}{(0.05 / 0.05)^2 + (0.1)^2} \times \frac{0.05}{0.01} = 1.436$$

Chú ý: Moment lồng sóc ngoài gấp 100 lần lồng sóc trong khi khởi động, và khi chạy ở tốc độ ổn định chỉ gấp có 1.436 lần

Máy phát điện cảm ứng

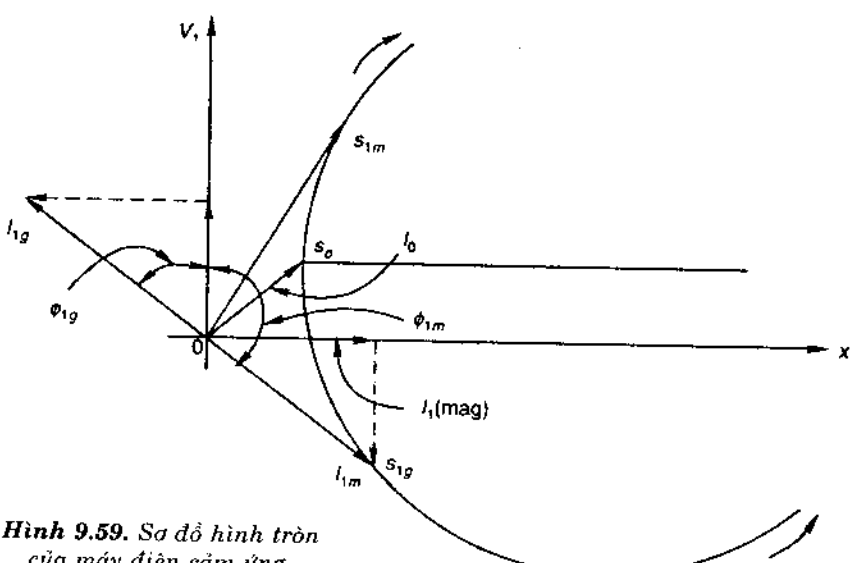
Từ Hình 9.14 và Ví dụ 9.7, có thể thấy máy điện cảm ứng là dạng máy phát điện khi s < 0 (độ trượt âm). Máy phát điện cảm ứng về bản chất là loại không đồng bộ (dị bộ) vì được dùng như máy phát điện dùng sức gió không có



Hình 9.58. *Máy phát điện cảm ứng bổ sung điện năng cho mạng truyền tải.*

vận tốc cố định. Loại máy phát này được dùng ở vùng xa để cấp điện bổ sung cho đường dây truyền tải yếu. Đường dây truyền tải từ máy phát điện cảm ứng đến tải cục bộ được nêu trên Hình 9.58. Động cơ truyền động rotor phải được tự động điều khiển để tăng vận tốc máy phát khi cần tăng tải.

Hình 9.59 minh họa sơ đồ hình tròn của máy điện cảm ứng mở rộng đến vùng chế độ máy phát, dưới trục OX là vùng độ trượt âm. Ở độ trượt = s_{1g}, động cơ lấy dòng điện I_{1m} trễ pha so với điện áp nguồn V_1 vì $\Phi_{1m} > 90^0$. Điều



Hình 9.59. *Sơ đồ hình tròn của máy điện cảm ứng.*

này có nghĩa là hệ số công suất pf âm (cos Φ_{1m}), công suất điện ra khỏi máy điện trong chế độ vận hành máy phát. Dòng điện phát ra cấp lên đường dây là

$$I_{1g} = - I_{1m}$$

với hệ số công suất cos Φ_{1g} sớm pha. Máy điện lấy thành phần dòng điện trễ pha 90^0 để cung cấp cho yêu cầu dòng điện từ hóa. Dây truyền tải phải dẫn thành phần dòng điện trễ pha của tải và dòng điện từ hóa của máy phát điện cảm ứng, tạo ra tải phản kháng VAR trễ pha khá lớn trên dây truyền tải yếu. Để giảm nhẹ tải này, cần nối ghép các tụ điện song song cân bằng (nối Δ) qua các đầu dây máy phát cảm ứng. Các tụ điện này lấy dòng điện sớm pha hoặc cấp dòng điện từ hóa trễ pha tương đương của máy phát.

Tần số vận hành của hệ thống được nêu trên Hình 9.58 được xác định theo tần số đường dây.

Máy phát điện cảm ứng độc lập

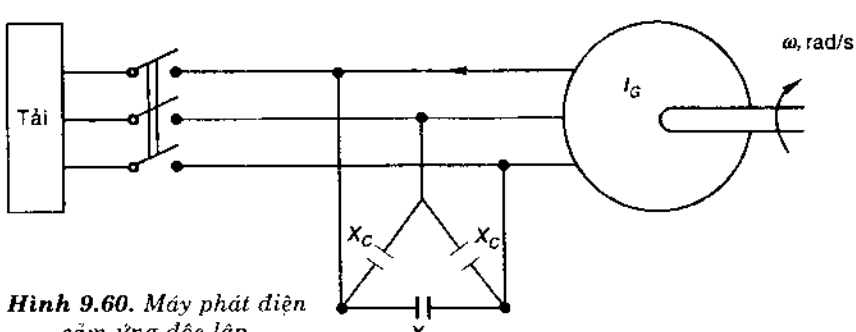
Hình 9.60 minh họa máy phát cảm ứng độc lập cấp điện cho tải. Tụ điện nối Δ qua các đầu dây của máy phát và cấp dòng điện từ hóa cần thiết để kích thích máy phát độc lập. Khi máy phát có tải, tần số vận hành phụ thuộc vận tốc rotor nhưng bị tải ảnh hưởng, còn dung kháng (X_C) xác định điện áp ở tần số vận hành.

Gọi: ω_0 = tần số định mức

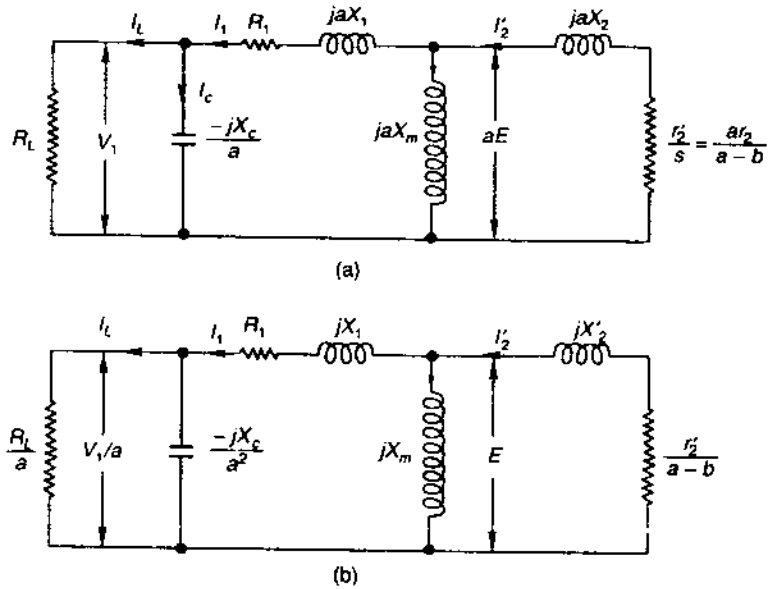
ω_s = tần số vận hành (stator)

ω = tần số stator tương ứng vận tốc động cơ

$a = \omega_s / \omega_0$ và $b = \omega / \omega_0$



Hình 9.60. *Máy phát điện cảm ứng độc lập.*



Hình 9.61. *Mô hình mạch của máy phát điện cảm ứng.*

Độ trượt máy điện (âm) được tính theo biểu thức:

$$s = (\omega_s - \omega)/ a\omega_0$$

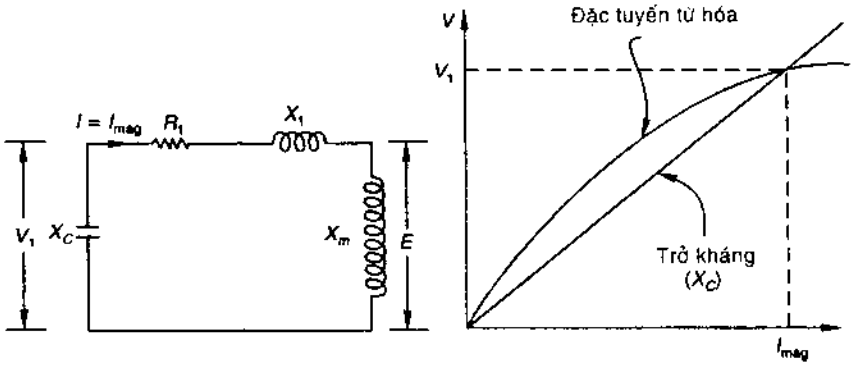
$$= (a\omega_0 - b\omega_0)/ a\omega_0 = (a - b)/ a; \quad b > a$$

Giả sử điện kháng máy điện, điện kháng kích thích, và lực điện động cảm ứng trong máy điện tương ứng với tần số định mức ω_0, mạch tương đương mỗi pha của hệ thống với tần số vận hành $\omega_s = a\omega_0$ được minh họa trên Hình 9.61 (a) với tải là điện trở thuần. Chia cho a, mạch được đưa về tần số định mức ω_0 (cố định) (Hình 9.61 (b)).

Điện áp của máy phát

Xét máy phát điện (Hình 9.60) chạy ở vận tốc đồng bộ không tải (cầu dao ngắt) với các tụ điện nối Δ treo trên các đầu dây. Mạch rotor để hở và mô hình mạch được nêu trên Hình 9.62 (a).

Dòng điện dẫn vào động cơ là $I_1 = I_{mag}$ (dòng điện từ hóa). Nếu bỏ qua sụt áp trên trở kháng stator (R_1, X_1), có thể có:



Hình 9.62. *Đặc tuyến V-I_{mag} của máy phát điện cảm ứng.*

$V_1 \approx E$ lực điện động cảm ứng.
$= E\ (I_{mag})$ đặc tuyến từ hóa.

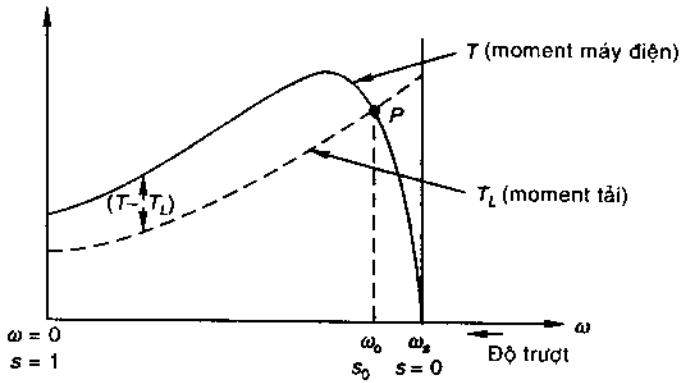
$V_1 = X_C I_{mag}$ điện áp đây trở kháng.

Tương tự máy phát dc kích từ song song (shunt), đặc tuyến từ hóa và đường trở kháng (điện áp) được nêu trên Hình 9.62 (b). Giao điểm của chúng là điện áp không tải. Đây là trường hợp ở tần số định mức. V_1 sẽ thay đổi nhẹ khi tần số stator thực thay đổi so với tần số định mức.

Động lực học máy điện cảm ứng: thời gian tăng tốc

Nói chung, hằng thời gian cơ của máy bất kỳ thường lớn hơn nhiều so với hằng thời gian điện. Do đó, phân tích động lực học có thể được đơn giản hóa bằng cách bỏ qua thời gian chuyển tiếp điện, các kết quả vẫn tương đối chính xác.

Mô hình mạch của động cơ cảm ứng (Hình 9.8(b)) có độ trượt không đổi, nhưng độ trượt thay đổi khi khởi động động cơ. Hình 9.63 minh họa đặc tuyến moment - độ trượt của động cơ và moment - tải theo độ trượt (vận tốc). Mỗi điểm trên đặc tuyến (T_L - s) là moment tải của động cơ khi chạy ở vận tốc ổn định. Động cơ chỉ khởi động khi $T > T_L$ và đạt đến vận tốc vận hành ổn định ω_o khi $T = T_L$ nghĩa là ở tại giao điểm P của hai đặc tuyến moment - vận tốc. Có thể kiểm tra bằng phương pháp gây nhiễu; nếu vì lý do nào đó, vận tốc lớn hơn ω_0, $(T - T_L) < 0$, hỗn hợp tải - máy điện giảm tốc, và trở về điểm vận hành, điều ngược lại sẽ xảy ra khi vận tốc giảm xuống dưới ω_0.



Hình 9.63. *Đặc tuyến moment - độ trượt (vận tốc) của động cơ và tải.*

Trong khi tăng tốc

$$T - T_L = J\frac{d\omega}{dt} \tag{9.87}$$

với J = quán tính động cơ và tải

$$\omega = (1 - s)\,\omega_s$$

Do đó, pt (9.87) có dạng

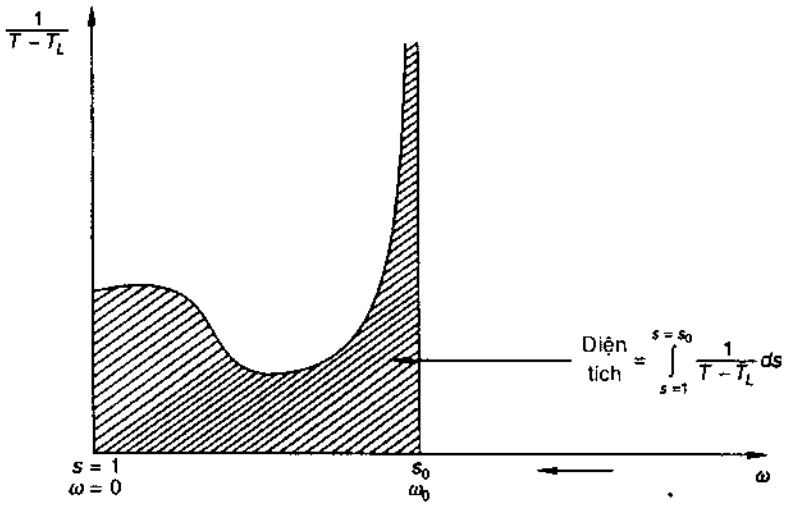
$$T - T_L = -J\omega_s\frac{ds}{dt} \tag{9.88}$$

Lấy tích phân

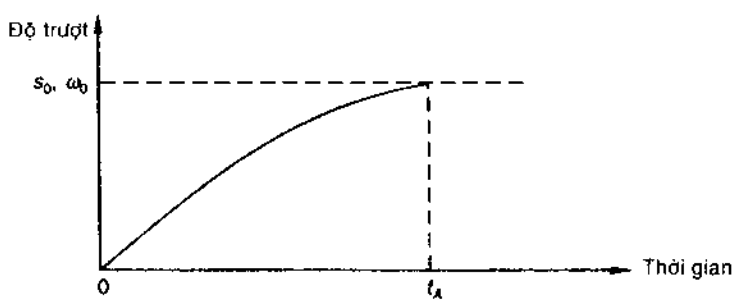
$$t\Big|_0^{t_A} = -\frac{1}{J\omega_s}\int_{s_1}^{s_2}\frac{1}{T - T_L}ds \tag{9.89}$$

Do đại lượng $1/(T - T_L)$ là phi tuyến tích phân trong pt (9.89) phải được tính bằng đồ thị (hoặc bằng số) (Hình 9.64) đối với trường hợp $s_1 = 1$ và $s_2 = s_0$. Do $1/(T - T_L) = \infty$ ở s_0, tích phân thực tế chỉ tính đến 90 - 95% tùy theo độ chính xác mong muốn.

Hình 9.65 minh họa độ trượt (vận tốc) thay đổi theo thời gian trong khi tăng tốc đạt đến giá trị ổn định s_0 (ω_0) ở thời điểm t_A, đó là thời gian tăng tốc. Do tính phi tuyến của hàm $(T - T_L)$ theo độ trượt, đặc tuyến thời gian - độ trượt (vận tốc) trên Hình 9.65 không phải là đường hàm số mũ.



Hình 9.64. *Tính tích phân pt (9.89) bằng đồ thị.*



Hình 9.65. *Đồ thị độ trượt - thời gian.*

Khởi động không tải ($T_L = 0$)

Tong trường hợp này, moment ma sát tải và máy $T_L = 0$.

Giả thiết các tổn thất stator là không đáng kể ($R_1 = 0$), moment động cơ được tính từ pt (9.22):

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}(r_2' / s)}{(r_2' / s)^2 + (X_1 + x_2')^2} \qquad (9.90)$$

Từ pt (9.24)

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{0.5\, V_{TH}^2}{(X_1 + x_2')} \tag{9.91}$$

với độ trượt theo pt (9.23)

$$s_{max,T} = \frac{r_2'}{X_1 + x_2'} \tag{9.92}$$

Từ các pt (9.90) và (9.91)

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{2(X_1 + x_2')(r_2'/s)}{(r_2'/s)^2 + (X_1 + x_2')^2} = \frac{2}{\left[\dfrac{(r_2'/s)}{X_1 + x_2'} + \dfrac{X_1 + x_2'}{(r_2'/s)}\right]} \tag{9.93}$$

Thay pt (9.92) vào (9.93)

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{2}{\dfrac{s_{max,T}}{s} + \dfrac{s}{s_{max,T}}} \tag{9.94}$$

Do $T_L = 0$, moment động cơ là moment tăng tốc, nghĩa là:

$$T = \frac{2T_{max}}{s/s_{max,T} + s_{max,T}/s} = J\frac{d\omega}{dt} = -J\omega_s \frac{ds}{dt} \tag{9.95}$$

Thời gian t_A để chuyển độ trượt từ s_1 đến s_2 được tính bằng tích phân pt (9.95).

$$t_A = \frac{-J\omega_s}{2T_{max}}\left[\int_{s_1}^{s_2} \frac{s}{s_{max,T}}\,ds + \int_{s_1}^{s_2} \frac{s_{max,T}}{s}\,ds\right]$$

$$t_A = \frac{J\omega_s}{2T_{max}}\left[\frac{s_1^2 - s_2^2}{2\,s_{max,T}} + s_{max,T}\ln\frac{s_1}{s_2}\right] \tag{9.96}$$

Thời gian tăng tốc để máy điện đạt được vận tốc đồng bộ (từ lúc khởi động) được tính từ pt (9.96) với $s_1 = 1$ và $s_2 = s$, nghĩa là:

$$t_A = \frac{J\omega_s}{2T_{max}}\left[\frac{1 - s^2}{2\,s_{max,T}} + s_{max,T}\ln\frac{1}{s}\right] \tag{9.97}$$

Tối ưu s_{max} để có thời gian tăng tốc nhỏ nhất

Để tìm giá trị tối ưu $s_{max,T}$ sao cho máy điện có thời gian tăng tốc nhỏ nhất từ s_1 đến s_2, pt (9.96) phải được lấy vi phân tương ứng với $s_{max,T}$ và bằng zero:

$$\left(s_{max,T}\right)_{tối\ ưu} = \sqrt{\frac{(s_1 - s_2)^2}{2\ln(s_1/s_2)}} \tag{9.98}$$

Đối với thời gian tăng tốc nhỏ nhất từ khởi động đến độ trượt s (bất kỳ), giá trị tối ưu $s_{max,T}$ được tính theo pt (9.98) với $s_1 = 1$ và $s_2 = s$:

$$\left(s_{max,T}\right)_{tối\ ưu} = \sqrt{\frac{(1 - s)^2}{2\ln(1/s)}} \tag{9.99}$$

$$t_A(\min) = \frac{J\omega_s}{2\,T_{max}}\left[\frac{1 - s^2}{2\,(s_{max,T})_{tối\ ưu}} + (s_{max,T})_{tối\ ưu}\ln\frac{1}{s}\right] \tag{9.100}$$

Hơn nữa, để tính giá trị tối ưu điện trở rotor để tăng tốc máy điện từ s_1 đến s_2, cần thay pt (9.98) vào (9.92):

$$\left(r_2'\right)_{tối\ ưu} = \left(X_1 + x_2'\right)\left[\frac{s_1^2 - s_2^2}{2\ln s_1/s_2}\right] \tag{9.101}$$

$$\left(r_2'\right)_{tối\ ưu} = \left(X_1 + x_2'\right)\left(s_{max,T}\right)_{tối\ ưu} \tag{9.102}$$

Ví dụ 9.16. Động cơ cảm ứng vòng trượt nối sao, 3 pha, 415V, 6 cực, 50 Hz, có tổng điện kháng stator và rotor là 1.5 Ω được đối chiếu lên stator. Máy điện cấp tải thuần quán tính. Moment quán tính của rotor và tải là 11 kgm^2. Dùng khởi động trực tiếp từ điện áp dây và điện trở mạch rotor được điều chỉnh để tải đạt đến 0.96 vận tốc đồng bộ với thời gian ngắn nhất. Bỏ qua tổn thất stator, hãy tính thời gian tăng tốc và giá trị điện trở rotor được đối chiếu lên stator.

Giải

$$s = 1 - 0.96 = 0.04$$

Thay vào pt (9.99)

$$\left(s_{max,T}\right)_{tối\ ưu} = \left[\frac{1 - (0.04)^2}{2\ln(1/0.04)}\right]^{1/2} = 0.394$$

Từ các pt (9.102) và (9.100)

$$(r_2')_{tối\ ưu} = 1.5 \times 0.394 = 0.591\ \Omega$$

$$t_A(\min) = \frac{J\omega_s}{2T_{max}}\left[\frac{1-s^2}{2\,(s_{max,T})_{tối\ ưu}} + (s_{max,T})_{tối\ ưu}\ln\frac{1}{s}\right]$$

$$= \frac{11\,(2\pi \times 1000/60)}{2 \times 509.29}\left[\frac{1-(0.04)^2}{2 \times 0.394} + 0.394 \times \ln\left(\frac{1}{0.04}\right)\right]$$

$$= 2.867\ s$$

Động cơ cảm ứng hiệu suất cao

Với chi phí năng lượng ngày càng cao, chi phí vận hành của động cơ cảm ứng phụ thuộc hiệu suất và vốn đầu tư ban đầu. Yêu cầu về hiệu suất cao, tiết kiệm năng lượng đối với động cơ cảm ứng, buộc các nhà thiết kế và chế tạo phải nâng cao chất lượng sản phẩm của họ. Vài kỹ thuật quan trọng được sử dụng để thiết kế động cơ cảm ứng hiệu suất cao so với kiểu thiết kế tiêu chuẩn, được liệt kê sau đây:

- Giảm mật độ dòng điện trong cuộn dây đồng quấn stator, kết quả là giảm tổn thất đồng, nhưng tăng trọng lượng đồng và giá thành.
- Giảm mật độ từ thông trong khe hở không khí bằng cách tăng chiều dài lõi stator và rotor, điều này làm giảm bão hòa từ và tổn thất lõi.
- Thể tích thép stator lớn hơn sẽ cải thiện việc truyền nhiệt ra ngoài động cơ và giảm nhiệt độ vận hành, các quạt rotor được thiết kế với dạng cánh khí động lực tốt hơn để giảm tổn thất quạt.
- Sử dụng thép kỹ thuật điện chất lượng cao để giảm tổn thất từ trễ.
- Sử dụng thép kỹ thuật điện trở suất rất cao với dạng lá cán chuẩn rất mỏng để giảm dòng điện xoáy.
- Rotor được gia công chính xác để tạo khe hở không khí đồng nhất, làm giảm tổn thất tải.

Chương 10

Động cơ công suất nhỏ

Giới thiệu

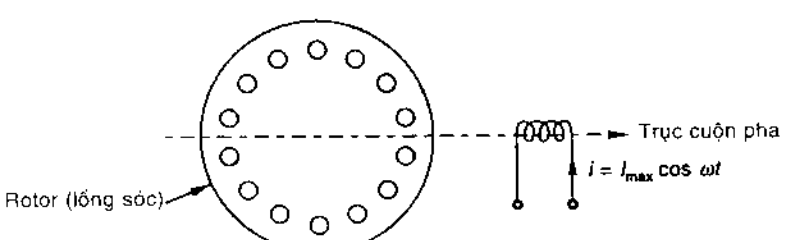
Các động cơ 3-pha được sử dụng trong các ứng dụng có công suất định mức cao. Vì lý do kinh tế, đa số các gia đình, văn phòng, thôn quê,... được cung cấp điện ac 1-pha, các yêu cầu công suất cấp cho tải nhỏ hơn. Nguồn điện này chỉ thích hợp với các động cơ cỡ nhỏ (dưới 1 kW). Các động cơ này được dùng trong quạt, tủ lạnh, máy xay sinh tố, máy hút bụi, máy giặt, các dụng cụ nhà bếp, thiết bị cầm tay ...

Tuy các động cơ đó có cấu trúc đơn giản hơn so với động cơ 3-pha, nhưng phân tích chúng phức tạp hơn và cần đến một số khái niệm chưa phân tích ở phần trước.

Trong Chương này, các động cơ công suất nhỏ, được trình bày định lượng và bán định lượng, sau đó sẽ xử lý chi tiết hơn, được dùng với mục đính thiết kế/phân tích chính xác.

Động cơ cảm ứng 1-pha

Động cơ cảm ứng 1-pha gồm dây quấn phân bố 1 pha trên stator và rotor lồng sóc bình thường (Hình 10.1), với tiện lợi là dây quấn stator có dạng tập trung. Hai phương pháp chính để phân tích động cơ này là lý thuyết *từ trường ngang* và lý thuyết *từ trường quay*.



Hình 10.1 *Động cơ cảm ứng 1 pha*

Từ trường đập mạch như hai từ trường quay

Hình 10.1 minh họa sơ đồ động cơ cảm ứng 1-pha với một cuộn dây stator và rotor lồng sóc. Cuộn dây được phân bố trong không gian sao cho lực từ động cơ sở (không gian) là thành phần chính của phân bố lực từ động thực. Sóng hài không gian của lực từ động, như trong trường hợp động cơ cảm ứng 3-pha, được coi là không đáng kể. Khi cuộn dây tải dòng điện hình sine, sẽ tạo ra lực từ động phân bố hình sine trong không gian với giá trị đỉnh đập mạch theo thời gian. Khi nhìn từ trục cuộn dây, lực từ động ở thời điểm t bất kỳ là:

$$F = F_{đỉnh} \cos \theta \qquad (10.1)$$

Với θ = góc đo từ trục cuộn dây.

$$F_{đỉnh} = F_{max} \cos \omega t \qquad (10.2)$$

Lực từ động phân bố cả về không gian và thời gian theo biểu thức:

$$F = F_{max} \cos \theta \cos \omega t \qquad (10.3)$$

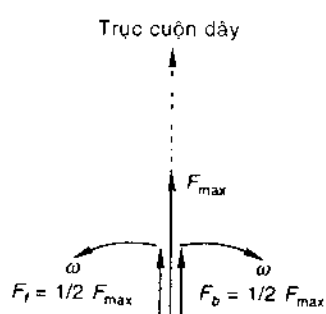
Biến đổi phương trình này theo lượng giác:

$$F = \frac{1}{2} F_{max} \cos (\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos (\theta + \omega t) \qquad (10.4)$$

Phương trình (10.4) cho thấy từ trường 1-pha đập mạch có thể được coi là sự xếp chồng hai từ trường quay ở vận tốc đồng bộ ($\omega = 2\pi f$ rad/s) ngược chiều nhau:

$\frac{1}{2} F_{max} \cos (\theta - \omega t)$; trường quay thuận, F_f

$\frac{1}{2} F_{max} \cos (\theta + \omega t)$; trường quay ngược, F_b



Hình 10.2 *Hai từ trường quay tương đương của từ trường đập mạch*

Cả hai từ trường này có biên độ = 1/2 F_{max} là giá trị cực đại của từ trường đập mạch theo trục cuộn dây. Sự phân chia từ trường đập mạch thành hai từ trường quay ngược chiều được minh họa trên Hình 10.2, với vị trí hai từ trường quay ở thời điểm lực từ động bằng + F_{max} dọc theo trục cuộn dây.

Độ trượt rotor tương ứng với hai từ trường quay

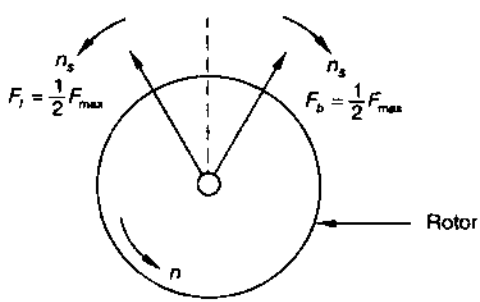
Đối với cuộn dây 1 pha (Hình 10.1), Hình 10.3 biểu thị các từ trường quay thuận và ngược dọc theo rotor đang quay với vận tốc n cùng chiều với từ trường thuận. Độ trượt rotor tương ứng với từ trường quay thuận F_f:

$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s \qquad (10.5a)$$

và độ trượt rotor tương ứng với từ trường quay ngược F_b là:

$$s_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{2n_s - (n_s - n)}{n_s} = (2 - s) \qquad (10.5b)$$

Độ trượt rotor tương ứng với hai từ trường quay khác nhau được tính theo hai phương trình trên.



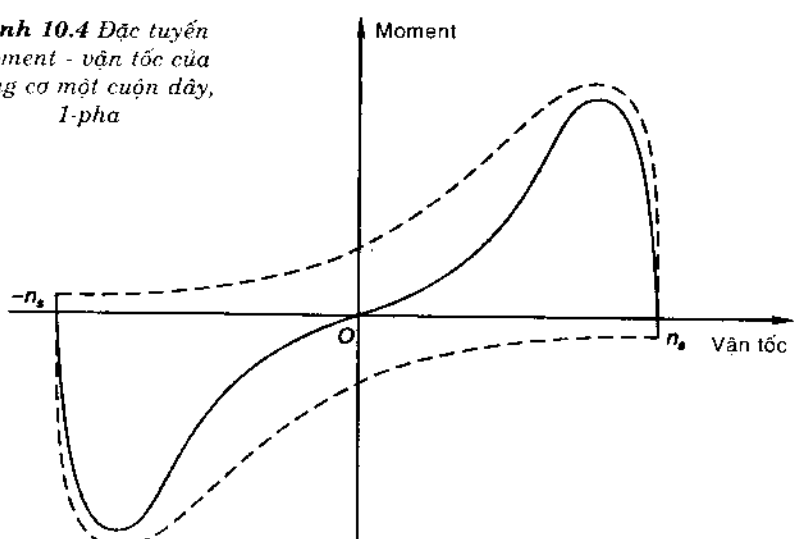
Hình 10.3. *Các từ trường quay thuận và ngược.*

Đặc tuyến moment - độ trượt

Xử lý định tính. Trong điều kiện rotor dừng (n = 0, nghĩa là s = 1), hai từ trường quay trượt qua rotor, với cùng độ trượt s = 1, (pt 10.5(a) và (b)) cảm ứng dòng điện bằng nhau trong rotor lồng sóc. Hai từ trường quay, có cùng cường độ, tạo ra hai moment bằng nhau và ngược chiều (đối ngẫu) nên moment khởi động bằng zero. Vì thế, động cơ cảm ứng một cuộn dây ***không thể tự khởi động***. Hơn nữa, hai từ trường quay cảm ứng lực điện động tổng hợp trong stator, cân bằng với điện áp cung cấp, giả sử trở kháng cuộn dây stator thấp.

Nếu rotor được chế tạo chạy theo vận tốc n cùng chiều với từ trường thuận, lúc này hai độ trượt là s và (2 - s). Đối với vận hành bình thường (2 - s) >> s, từ trường ngược cảm ứng dòng điện rotor lớn hơn nhiều so với trạng thái dừng và có hệ số công suất thấp. Lực từ động rotor đối nghịch tương ứng, cùng với trở kháng stator, gây ra từ trường ngược có cường độ bị suy giảm lớn. Từ trường quay thuận, có độ trượt thấp, cảm ứng dòng điện rotor nhỏ hơn và hệ số công suất cao hơn so với trạng thái rotor dừng. Điều này dẫn đến sóng từ thông thuận tăng nhanh. Từ trường ngược giảm và từ trường thuận lớn, phụ thuộc độ trượt. Sự chênh lệch từ trường này gia tăng khi độ trượt s (tương ứng với từ trường thuận) giảm hoặc vận tốc rotor quay thuận đạt gần với vận tốc đồng bộ. Khi gần đạt vận tốc đồng bộ, từ trường thuận lớn hơn nhiều lần từ trường ngược. Kết quả là có moment quay. Cả hai từ trường này luôn luôn cảm ứng lực điện động trên cuộn dây stator để cân bằng điện áp cung cấp. Đặc tuyến moment - vận tốc hoàn chỉnh là tổng hai đặc tuyến moment (thuận và ngược) - vận tốc được nêu trên Hình 10.4. Kết quả làm yếu một từ trường đồng thời làm tăng cường độ từ trường kia, dẫn đến đặc tuyến moment - vận tốc tương tự động cơ cảm ứng 3-pha trong vùng vận tốc gần đồng bộ.

Từ trường thuận và từ trường phản ứng ngược của rotor cũng như từ trường ngược và từ trường phản ứng thuận chuyển động ngược chiều với vận tốc tương đối $2n_s$ tạo ra các moment đập mạch sóng hài thứ hai có giá trị trung bình bằng zero. Kết quả là động cơ 1-pha có tiếng ồn lớn hơn động cơ 3-pha,



Hình 10.4 *Đặc tuyến moment - vận tốc của động cơ một cuộn dây, 1-pha*

do có moment đập mạch. Thực chất moment đập mạch là kết quả trực tiếp của công suất đập mạch trong mạch 1-pha. Đặc tuyến moment - vận tốc của máy điện 1 pha có trục tung moment biểu thị giá trị hiệu dụng moment.

Phân tích bán định lượng

Động cơ 1-pha với rotor dừng tác động đơn giản tương tự biến áp với mô hình mạch trên Hình 10.5 (a), bỏ qua nhánh tổn thất lõi. Ký hiệu m trong stator tương ứng với cuộn dây chính và E_m là lực điện động cảm ứng trên stator được tạo ra do từ trường xoay chiều.

Động cơ bây giờ được xét theo lý thuyết từ trường quay. Lực điện động cảm ứng tổng hợp gồm hai thành phần bằng nhau được cảm ứng do hai từ trường quay đối nghịch (bằng nhau và ngược chiều), nghĩa là:

$$\overline{E}_m = \overline{E}_{mf} + \overline{E}_{mb};\ \overline{E}_{mf} = \overline{E}_{mb} \qquad (10.6)$$

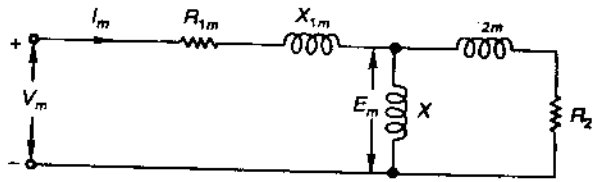
Trở kháng từ hóa và rotor được chia thành hai nửa bằng nhau được mắc nối tiếp như trên Hình 10.5 (b). Động cơ được xem như gồm hai động cơ nối tiếp, mỗi động cơ tương ứng một từ trường quay. Mạch của hai động cơ thành phần giống nhau trong điều kiện dừng khi rotor có cùng độ trượt tương ứng với từng từ trường quay.

Khi rotor chạy ở vận tốc n, theo từ trường quay thuận, độ trượt là s, và (2 - s) tương ứng với từ trường quay ngược, mô hình mạch được nêu trên Hình 10.5 (c), có thể thấy $Z_f/2 >> Z_b/2$ và $E_{mf} >> E_{mb}$, nghĩa là hiệu ứng động cơ từ trường thuận trội hơn, tạo ra moment quay.

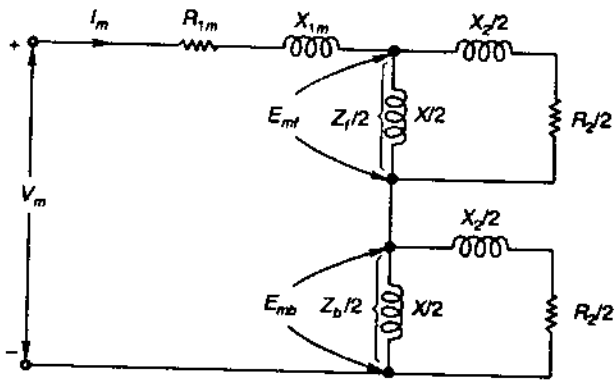
Thực tiễn cho thấy, hai từ trường quay được tạo nên ở trạng thái dừng có cường độ không bằng nhau, để động cơ tự khởi động. Để đạt được điều này, động cơ cần thêm một cuộn dây, là *cuộn dây phụ*, ở vị trí *không gian vuông góc* với cuộn dây chính, có số vòng quấn ít hơn và dây quấn mảnh hơn (so với cuộn dây chính). Cuộn dây này được cắt ra khỏi mạch ngay sau khi khởi động, ngoại trừ trường hợp động cơ *chạy tụ điện*, có thể được nối để cải thiện hệ số công suất.

Phân tích đặc tính vận hành

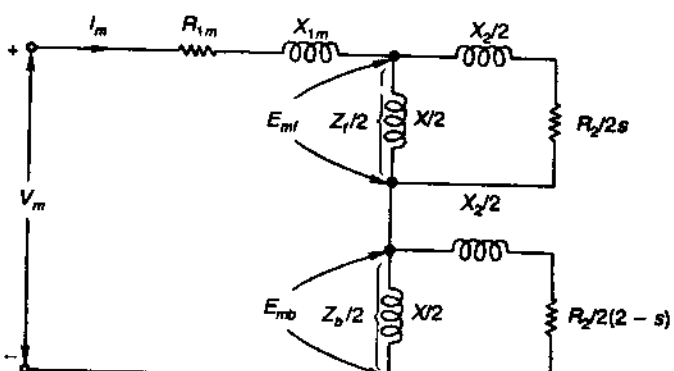
Đặc tính vận hành của động cơ cảm ứng 1-pha có thể được xác định từ sự phân tích mô hình mạch (Hình 10.5), như trong trường hợp động cơ cảm ứng 3-pha. Kết quả phân tích cũng tương tự như trong động cơ 3-pha, bởi vì mô hình mạch về cơ bản là như nhau.



(a) Mạch tương đương biến áp của động cơ 1-pha với rotor dừng.



(b) Mạch tương đương từ trường quay của động cơ 1-pha với rotor dừng



(c) Mạch tương đương từ trường quay của động cơ 1-pha trong điều kiện vận hành

Hình 10.5. *Các mạch tương đương của động cơ 1-pha.*

Công suất trong khe hở không khí đối với từ trường thuận và ngược:

$P_{gf} = \frac{1}{2} I_m^2 R_f$ = công suất khe hở không khí của từ trường thuận (10.7a)

$P_{gb} = \frac{1}{2} I_m^2 R_b$ = công suất khe hở không khí của từ trường ngược (10.7b)

Với I_m là dòng điện trong cuộn dây chính stator. R_f và R_b là phần thực của số phức trở kháng Z_f và Z_b tương ứng (Hình 10.5 (c)).

Moment được tạo nên do hai từ trường này là

$$T_f = \frac{1}{\omega_s} P_{gf} \qquad (10.8\ a)$$

$$T_b = \frac{1}{\omega_s} P_{gb} \qquad (10.8\ b)$$

Với ω_s = vận tốc đồng bộ (rad/s)

Hai từ trường đang quay ngược chiều nhau, tạo ra moment tổng hợp T:

$$T = T_f - T_b$$

$$T = \frac{1}{\omega_s}\left(P_{gf} - P_{gb}\right) = \frac{I_m^2}{2\omega_s}\left(R_f - R_b\right) \qquad (10.9)$$

Tổn thất đồng trên rotor bằng độ trượt nhân với công suất khe hở không khí, nên:

Tổn thất đồng rotor tương ứng từ trường thuận = sP_{gf}

Tổn thất đồng rotor tương ứng từ trường nghịch = $(2 - s)\ P_{gb}$

Tổng tổn thất đồng rotor = $sP_{gf} + (2 - s)\ P_{gb}$ (10.10)

Công suất điện biến đổi thành công suất cơ tổng hợp là:

$$P_m = (1 - s)\ \omega_s T$$

$$P_m = (1 - s)\ (P_{gf} - P_{gb}) \qquad (10.11)$$

Khai triển pt (10.11):

$$P_m = (1 - s)\ P_{gf} + [1 - (2 - s)]\ P_{gb} \qquad (10.12)$$

P_m chính là công suất điện vào động cơ, khi tổn thất đồng không đáng kể.

$$P_{elect} = P_{gf} + P_{gb} \qquad (10.13)$$

Ví dụ 10.1. Động cơ cảm ứng 1 pha, dây quấn đơn, 220V, 6 cực từ, 50 Hz, có các thông số mạch tương đương được đối chiếu lên stator như sau:

$R_{1m} = 3.0\ \Omega \quad X_{1m} = 5.0\ \Omega \quad R_2 = 1.5\ \Omega \quad X_2 = 2.0\ \Omega$

Bỏ qua dòng điện từ hóa. Khi động cơ chạy ở 97% vận tốc đồng bộ, hãy tính:

a) Tỷ số E_{mf}/E_{mb}

b) Tỷ số V_f/V_b

c) Tỷ số T_f/T_b

d) Moment tổng toàn phần.

e) Tỷ số T_f/ (moment tổng) và T_b/ (moment tổng)

Giải

Độ trượt = s = 1 - 0.97 = 0.03

(a) Từ Hình 10.5 (c):

$$\frac{E_{mf}}{E_{mb}} = \frac{Z_f}{Z_b} = \frac{|jX|\left|\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right)\right|}{|jX|\left|\left(\frac{R_2}{2-s} + jX\right)\right|}$$

Bỏ qua dòng điện từ hóa, $X = \infty$.

$$\frac{E_{mf}}{E_{mb}} = \frac{|R_2/s + jX_2|}{|R_2(2-s) + jX_2|} = \frac{|(11.5/0.03) + j2|}{|11.5/(2-0.03) + j2|} = 23.38$$

(b) V_f và V_b là hai thành phần của điện áp stator:

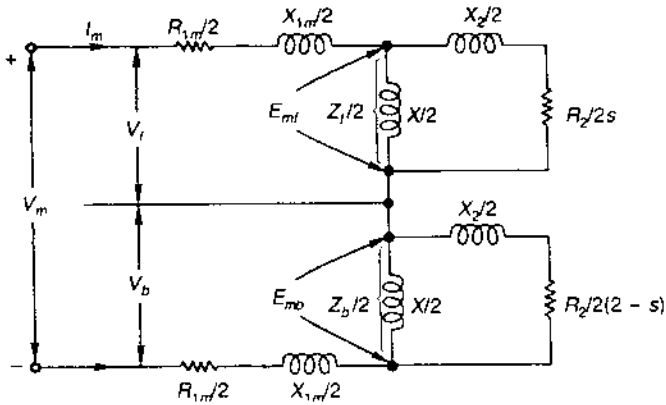
$$\overline{V}_m = \overline{V}_f + \overline{V}_b$$

Hai thành phần này được xác định bằng mô hình mạch trên Hình 10.6 có dạng đối xứng.

Vì $X = \infty$, do đó:

Trở kháng tương ứng thành phần V_f

$$= \frac{1}{2}\left[\left(3 + \frac{1.5}{0.03}\right) + j(5+2)\right] = \frac{1}{2}(53 + j7)$$



Hình 10.6. *Mạch điện minh họa Ví dụ 10.1*

Trở kháng tương ứng thành phần V_b

$$= \frac{1}{2}\left[\left(3 + \frac{1.5}{1.97}\right) + j(5+2)\right] = \frac{1}{2}(3.76 + j7)$$

Từ đó: $$\frac{V_f}{V_b} = \frac{|53 + j7|}{|3.76 + j7|} = 6.73$$

(c) Từ các pt (10.8a) và (10.8b):

$$\frac{T_f}{T_b} = \frac{P_{gf}}{P_{gb}} = \frac{\frac{1}{2} I_m^2 R_2/s}{\frac{1}{2} I_m^2 R_2/(2-s)} = \frac{2-s}{s} = \frac{2-0.03}{0.03} = 65.7$$

(d) Tổng trở kháng được nhìn từ các đầu dây stator là:

$$\overline{Z}\,(\text{Total}) = \frac{1}{2}\left[(53 + j7) + (3.76 + j7)\right] = 28.38 + j7 = 29.2\,\angle 13.9^0$$

$$I_m = \frac{220}{29.2} = 7.53\text{ A}$$

$$n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000\text{ rpm}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.72\text{ rad / s}$$

$$T_f = \frac{1}{\omega_s} I_m^2 \frac{R_2}{2s} \qquad \text{(i)}$$

$$T_b = \frac{1}{\omega_s} I_m^2 \frac{R_2}{2(2-s)} \qquad \text{(ii)}$$

$$T_{Total} = T_f - T_b$$

$$T_{Total} = \frac{I_m^2 R_2}{2\omega_s}\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2-s}\right)$$

$$= \frac{(7.53)^2 \times 1.5}{2 \times 104.72}\left(\frac{1}{0.03} - \frac{1}{1.97}\right) = 13.31 \text{ Nm} \qquad \text{(iii)}$$

(e) Từ các pt (i), (ii) và (iii)

$$\frac{T_f}{T_{Total}} = \frac{1/s}{1/s - 1/(2-s)} = \frac{1}{1 - \frac{s}{2-s}} = 1.015$$

$$\frac{T_b}{T_{Total}} = \frac{1/(2-s)}{1/s - 1/(2-s)} = \frac{1}{\frac{2-s}{s} - 1} = 0.015$$

Ví dụ 10.2. Thí nghiệm trên cuộn dây chính của động cơ cảm ứng 1-pha, 1 kW, 4 cực, 215V, 50 Hz có các kết quả sau:

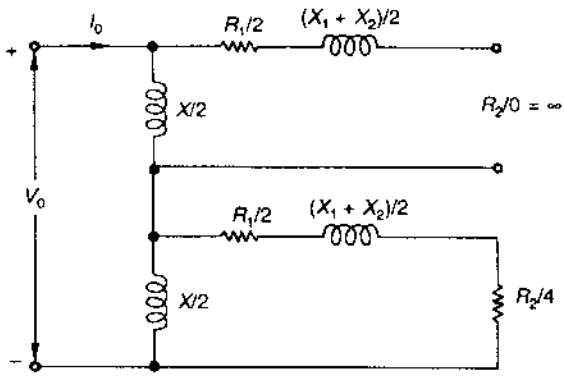
Thí nghiệm không tải	Thí nghiệm khóa rotor
$V_0 = 215V$	$V_{SC} = 85A$
$I_0 = 3{,}9$ A	$I_{SC} = 9.80A$
$P_0 = 185$ W	$P_{SC} = 390$ W
R_1 là 1.6 Ω	

a) Tính các thông số mô hình mạch, giả sử điện kháng từ hóa ở các đầu dây vào mạch.

b) Xác định dòng điện dây, hệ số công suất, moment trục và hiệu suất động cơ ở vận tốc 1440 v/ph.

Giải

a) Các thông số mô hình mạch được tính bằng cách dùng cả hai thí nghiệm không tải và khóa rotor.



Hình 10.7. *Mạch không tải của Ví dụ 10.2.*

(i) Thí nghiệm không tải:

Giả sử độ trượt bằng zero, mô hình mạch không tải (Hình 10.7) với điện kháng từ hóa ở các đầu vào.

Khi mạch ngược (từ trường ngược) ngắn mạch:

$$\frac{X}{2} = \frac{215}{3.9} = 55.1\ \Omega$$

Tổn thất quay: $P_0 = 185W$

(ii) Thí nghiệm khóa rotor (s = 1):

Mô hình mạch trên Hình 10.8:

$$390 = 85 \times 9.8 \times \cos\phi_{SC}$$

$$\phi_{SC} = 62^0 \text{ trễ pha.}$$

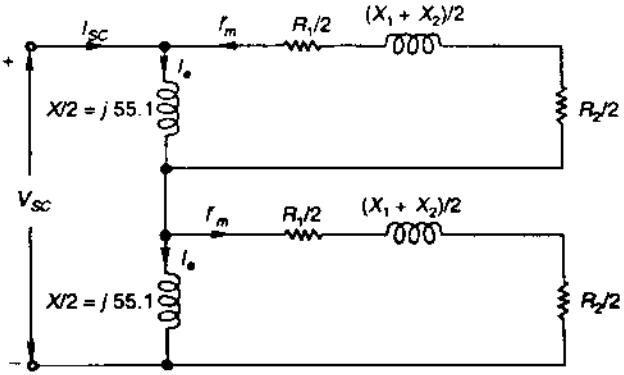
Từ Hình 10.8:

$$\bar{I}_e = \frac{V_{SC}}{jX} = \frac{85}{j2 \times 55.1} = -j0.77\ A$$

$$\bar{I}'_m = \bar{I}_{SC} - \bar{I}_e = 9.8\angle -62^0 - (-j0.77) = 4.6 - j7.88 = 9.13\angle -59.7^0$$

$$\bar{Z}_f = (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)$$

$$= \frac{V_{SC}}{\bar{I}'_m} = \frac{85}{9.13\angle -59.7^0} = 9.31\angle 59.7^0 = 4.7 + j\,8.04$$



Hình 10.8. *Mô hình mạch rotor khóa của Ví dụ 10.2.*

$R_1 + R_2 = 4.7\ \Omega$

$R_1 = 1.6\ \Omega$ (giả thiết)

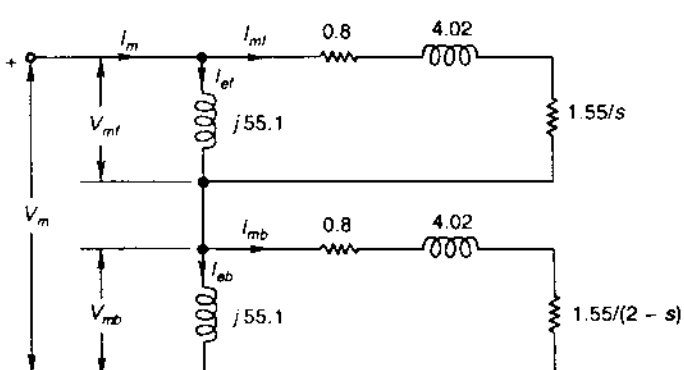
$R_2 = 3.1\ \Omega$

$X_1 + X_2 = 8.04\ \Omega$

Mô hình mạch có giá trị các thông số trên Hình 10.9.

(b) $$s = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

$$1.55 / s = \frac{1.55}{0.04} = 38.75;\ 1.55 / (2 - s) = \frac{1.55}{1.96} = 0.79$$



Hình 10.9. *Kết quả tính toán từ Ví dụ 10.2.*

$$\overline{Z}_f(\text{total}) = j\,55.1 \parallel (0.8 + 38.75 + j\,4.02)$$
$$= j\,55.1 \parallel (39.55 + j\,4.02) = 30.8\,\angle 39.6^0$$
$$= 23.73 + j\,19.63$$

$$\overline{Z}_b(\text{total}) = j\,55.1 \parallel (0.8 + 0.79 + j\,4.02)$$
$$= j\,55.1 \parallel (1.59 + j\,4.02) = 4.02\,\angle 70^0 = 1.37 + j\,3.78$$

$$\overline{Z}(\text{total}) = (23.73 + j\,19.63) + (1.37 + j\,3.78)$$
$$= 25.1 + j\,23.41 = 34.3\,\angle 43^0$$

$$\overline{I}_m = \frac{215}{34.3\,\angle 43^0} = 6.27\,\angle -43^0$$

$$\overline{I}_L = I_m = 6.27\text{ A}; \quad pf = \cos 43^0 = 0.731$$

$$P_m = 215 \times 6.27 \times 0.731 = 985.4\text{ W}$$

$$\overline{I}_{mf} = 6.27\,\angle -43^0 \times \frac{j\,55.1}{39.55 + j\,59.12} = 4.86\,\angle -9.2^0$$

$$\overline{I}_{mb} = 6.27\,\angle -43^0 \times \frac{j\,55.1}{1.59 + j\,59.12} = 5.84\,\angle -41.4^0$$

$$T = \frac{1}{157.1}\left[(4.84)^2 \times 38.75 - (5.84)^2 \times 0.79\right] = 5.6\text{ Nm}$$

$$P_m = 157.1\,(1 - 0.04) \times 5.6 = 844.6\text{ W}$$

Tổn thất quay = 185W

$$P_{out} = 844.6 - 185 = 659.6\text{ W}$$

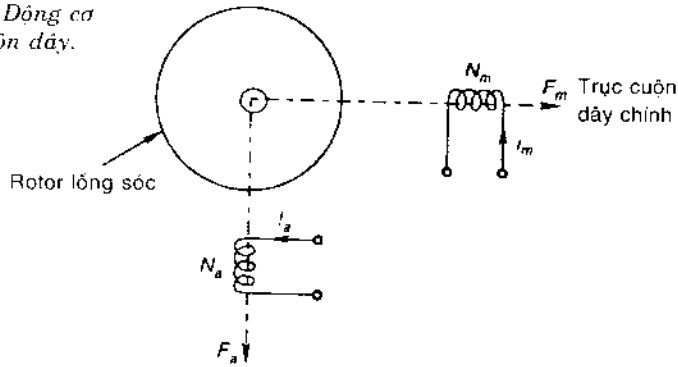
$$\eta = \frac{659.6}{985.5} = 66.9\%$$

$$T(\text{trục}) = 659.6 / 157.1 = 4.12\text{ Nm}$$

Động cơ 1 pha 2 cuộn dây

Để hiểu hiện tượng từ trường phân bố theo hướng tạo ra moment khởi động trong động cơ 1-pha, cần có kiến thức về động cơ 3-pha cân bằng. Hình 10.10 minh họa động cơ lồng sóc hai cuộn dây quấn, các trục cuộn dây stator lệch pha không gian 90^0. Hai cuộn dây được kích thích bằng hai dòng điện lệch pha thời gian 90^0:

Hình 10.10 Động cơ 1-pha 2 cuộn dây.



$$F_m = N_m I_m = N_a I_a = F_a \qquad (10.14)$$

với I_m = giá trị hiệu dụng dòng điện trên dây quấn chính.

I_a = giá trị hiệu dụng dòng điện trên dây quấn phụ.

Theo quan hệ pha:

$$\overline{F}_m = \overline{F}; \qquad \overline{F}_a = -j\overline{F} \text{ (trễ pha)} \qquad (10.15)$$

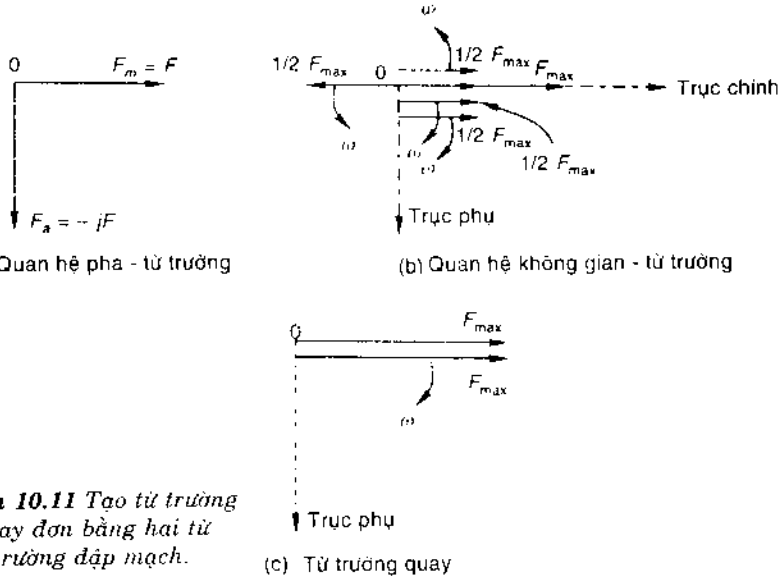
Các cuộn dây này tạo ra hai từ trường đập mạch lệch pha 90^0 không gian (theo chiều các trục cuộn dây tương ứng). Giá trị cực đại của từ trường đỉnh Ampere - vòng đối với mỗi trường là $F_{max} = \sqrt{2}F$. Hình 10.11 (a) minh họa quan hệ pha - thời gian của từ trường đập mạch chính và phụ. Hình 9.11(b) minh họa quan hệ pha - không gian của các thành phần quay ở thời điểm từ trường chính nằm dọc theo trục cuộn dây có giá trị F_{max} trong khi giá trị từ trường phụ bằng zero tương ứng sơ đồ pha trên Hình 10.11(a). Trong bốn thành phần từ trường quay, có hai thành phần quay ngược chiều kim đồng hồ triệt tiêu khi đối diện, còn lại là hai thành phần quay cùng chiều kim đồng hồ cộng lại thành một từ trường quay F_{max} (Hình 10.11(c)).

Tóm lại, hai từ trường đập mạch có cường độ bằng nhau và lệch pha 90^0 không gian (định hướng theo các trục cuộn dây) tạo ra một từ trường quay và quay từ chiều sớm pha đến trục trễ pha (cùng chiều kim đồng hồ).

Dễ dàng nhận thấy, nếu đảo pha của hai từ trường $\overline{F}_m = \overline{F}$ và $\overline{F}_a = j\overline{F}$, chiều quay của từ trường tổng hợp sẽ ngược lại. Các kết quả đối với động cơ cảm ứng 2-cuộn dây có thể được tính theo lượng giác từ Hình 10.11.

$$F_m(\theta,t) = F_{max}\cos q\cos\omega t$$

$$F_a(\theta,t) = F_{max}\cos(90^0 - \theta)\cos(\omega t - 90^0).$$



Hình 10.11 *Tạo từ trường quay đơn bằng hai từ trường đập mạch.*

Từ trường tổng

$$F_m + F_a = F_{max}(\cos\theta\cos\omega t + \cos(\theta - 90^0)\cos(\omega t - 90^0))$$

Có thể rút gọn thành

$$F_m + F_a = F_{max}\cos(\theta - \omega t).$$

Đây là từ trường quay có biên độ bằng F_{max}.

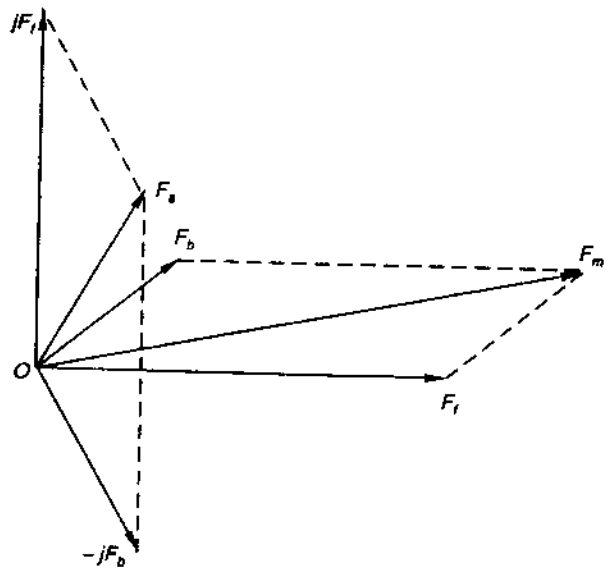
Từ trường đập mạch không cân bằng

Tập hợp hai đại lượng hình sine thiết lập *hệ thống hai pha cân bằng*, hai pha đó có biên độ bằng nhau và lệch pha 90^0, chúng được gọi là không cân bằng.

Hai từ trường đập mạch F_m và F_a của hai cuộn dây (Hình 10.10) thiết lập tập hợp không cân bằng (trường hợp động cơ cảm ứng 1-pha 2 cuộn dây). Theo lý thuyết thành phần đối xứng hai pha, tập hợp từ trường không cân bằng có thể được chia thành hai tập hợp cân bằng theo thứ tự pha ngược nhau. Do đó:

$$\overline{F}_m = \overline{F}_f + \overline{F}_b \qquad (10.16a)$$

$$\overline{F}_a = j\overline{F}_f - j\overline{F}_b \qquad (10.16b)$$



Hình 10.12 *Hai pha lực từ động biểu thị theo các thành phần đối xứng của chúng*

Với $\overline{F}_f$ và $j\overline{F}_f$ thiết lập một tập hợp cân bằng (thuận).

$\overline{F}_b$ và $j\overline{F}_b$ thiết lập thứ tự pha đảo ngược.

Các phép toán từ pt (10.16) được minh họa trên sơ đồ pha (Hình 10.12).

Đảo ngược pt (10.16) có dạng:

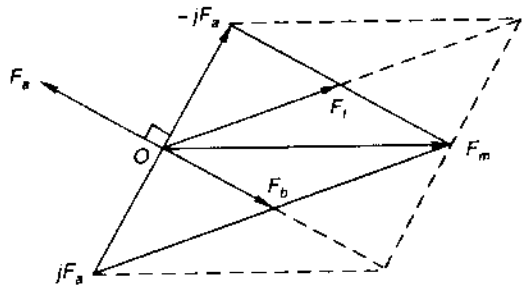
$$\overline{F}_f = \frac{1}{2}\left(\overline{F}_m + j\overline{F}_a\right) \tag{10.17a}$$

$$\overline{F}_b = \frac{1}{2}\left(\overline{F}_m + j\overline{F}_a\right) \tag{10.17b}$$

Các thành phần đối xứng thuận và nghịch có thể được tính theo tập hợp hai từ trường không cân bằng. Hình 10.13 minh họa sơ đồ pha được tính từ pt (10.17).

Thật vậy, tập hợp pha bất kỳ (có thể là điện áp hoặc dòng điện) có thể được biểu diễn tương tự theo các thành phần đối xứng của chúng và ngược lại.

Từ pt (10.16) có thể thấy hai từ trường F_m và F_a (giả thiết là vuông góc trong không gian) có thể được tách thành hai tập hợp thành phần đối xứng là $\overline{F}_f$, $j\overline{F}_f$ và $\overline{F}_b$, $-j\overline{F}_b$. Các từ trường thành phần của mỗi tập hợp có lượng



Hình 10.13 *Các thành phần đối xứng của các lực từ động 2-pha.*

bằng nhau và có không gian và thời gian đều vuông góc, tập hợp đầu tạo ra từ trường quay thuận, và tập hợp sau tạo từ trường quay ngược. Do đó, hai từ trường đập mạch không cân bằng vuông góc không gian tương đương với hai từ trường quay ngược chiều nhau.

Ví dụ 10.3. Động cơ 1-pha hai cuộn dây có dòng điện cuộn dây chính, phụ $I_m = 15$ A và $I_a = 7.5$ A ở trạng thái dừng. Dòng điện cuộn dây phụ sớm pha so với dòng điện dây chính theo góc $\alpha = 45^0$. Hai cuộn dây đặt vuông góc trong không gian và số vòng là $N_m = 800$ và $N_a = 100$. Hãy tính biên độ sóng từ động stator thuận và ngược. Xác định cường độ dòng điện phụ và góc lệch pha α với dòng điện cuộn dây chính nếu chỉ có từ trường ngược.

Giải

Lực từ động được tạo ra từ cuộn dây chính

$$\overline{F}_m = N_m \overline{I}_m = 80 \times 15 \angle 0 = 1200 \angle 0$$

Lực từ động được tạo ra từ cuộn dây phụ

$$\overline{F}_a = N_a \overline{I}_a = 100 \times 7.5 \angle 60^0 = 750 \angle 60^0$$

Từ pt (10.7a), từ trường thuận là:

$$\overline{F}_f = \frac{1}{2}\left(\overline{F}_m - j\,\overline{F}_a\right) = \frac{1}{2}\left(1200\angle 0^0 - j\,750\,\angle 45^0\right) = 334.8 - j\,265.2$$

$$F_f = 427.1 \text{ AT}$$

Tương tự, từ pt (10.17b), từ trường ngược là:

$$\overline{F}_b = \frac{1}{2}\left(\overline{F}_m - j\,\overline{F}_a\right) = \frac{1}{2}\left(1200\angle 0^0 + j\,750\,\angle 45^0\right) = 865.2 + j\,265.2$$

$$F_b = 904.9 \text{ AT}$$

Do triệt từ trường thuận:

$$\overline{F}_b = \frac{1}{2}\left(1200\angle 0^0 + j\,100\,I_a\,\angle\alpha\right) = 0$$

$$1200 + 100\,I_a \sin\alpha + j\,100\,I_a \cos\alpha = 0$$

Phần thực và phần ảo bằng zero

$$100\,I_a \cos\alpha = 0$$

$$\alpha = 90^0$$

$$1200 + 100\,I_a \sin 90^0 = 0$$

$$I_a = -\,12\ A$$

Chú ý, dấu trừ chỉ có nghĩa nối cuộn dây phụ tương ứng với cuộn dây chính.

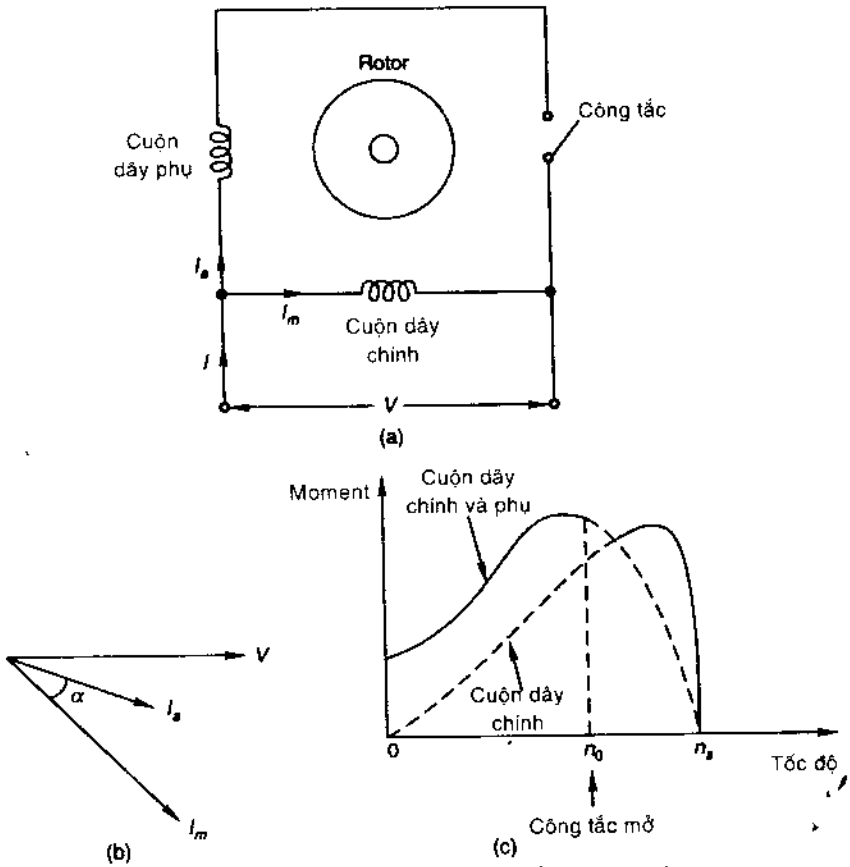
Động cơ chia pha

Khi động cơ có hai cuộn dây stator, dù chúng được kích thích từ cùng điện áp (nguồn điện 1 pha), các dòng điện trong hai cuộn dây có thể bị lệch pha bằng cách điều chỉnh trở kháng cuộn dây phụ so với cuộn dây chính. $\overline{F}_m$ và $\overline{F}_a$ kết hợp thiết lập tập hợp từ trường không cân bằng với quan hệ 90^0 pha không gian. Hai thành phần đối xứng là không cân bằng $F_f \neq F_b$ (nên có $F_f > F_b$); từ trường quay thuận được tạo ra mạnh hơn từ trường quay ngược, kết quả sẽ tạo ra moment khởi động. Đây là cách động cơ 1-pha được chế tạo để tự khởi động. Quả vậy, sự chia pha có thể được đề nghị, trong đó từ trường ngược giảm đến zero ở vận tốc xác định, cho phép tạo ra sự vận hành cân bằng, nhưng chỉ ở một vận tốc có thể được chọn tối ưu.

Hai phương pháp chia pha quan trọng là:

Động cơ chia pha dùng điện trở: Sơ đồ động cơ dùng điện trở để chia pha được nêu trên Hình 10.14(a). Động cơ sử dụng cuộn dây phụ với tỷ số R/X cao hơn so với cuộn dây chính. Tỷ số R/X cao đạt được bằng cách quấn dây mảnh hơn, số vòng ít hơn trên cuộn dây phụ. Cuộn dây phụ được đặt trên đỉnh rãnh (sát với khe hở không khí) để giảm điện kháng. Sự khác nhau về tỷ số R/X tạo ra dòng điện trong cuộn dây phụ I_a sớm pha hơn dòng điện trong cuộn dây chính I_m theo góc α (Hình 10.14b). Các từ trường được tạo nên do hai dòng điện này cũng lệch pha theo góc α, từ đó tạo nên hệ thống từ trường không cân bằng, kết quả là tạo thành moment khởi động.

Đặc tuyến moment - vận tốc của loại động cơ này được minh họa trên Hình 10.14c. Ở vận tốc n_0, công tắc ly tâm hoạt động, sau đó động cơ chỉ chạy



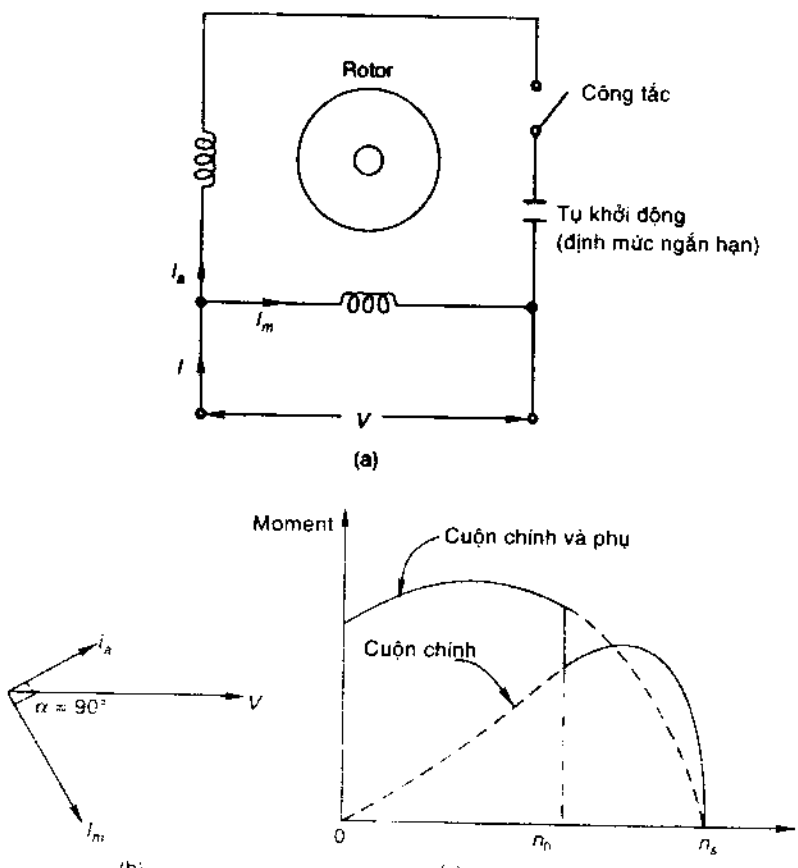
Hình 10.14 *Động cơ chia pha bằng điện trở*

với cuộn dây chính. Cuộn dây phụ chỉ cần được thiết kế để chạy trong thời gian ngắn, cuộn dây chính được thiết kế để chạy liên tục. Giá trị α, là độ lệch pha giữa hai dòng điện, tốt nhất là ở 30^0 (Hình 10.14 (c)). Loại động cơ này có moment khởi động không cao.

Động cơ chia pha dùng tụ điện. Moment khởi động thấp trong động cơ chia pha bằng điện trở được khắc phục bằng cách sử dụng tụ điện mắc nối tiếp với cuộn dây phụ (lý tưởng khi $\alpha = 90^0$). Sau khi khởi động, tụ điện có thể được nối tiếp tục vào cuộn dây phụ để cải thiện đặc tính vận hành và hệ số công suất. Do đó có hai loại động cơ chia pha bằng tụ điện (còn gọi là *động cơ tụ điện*).

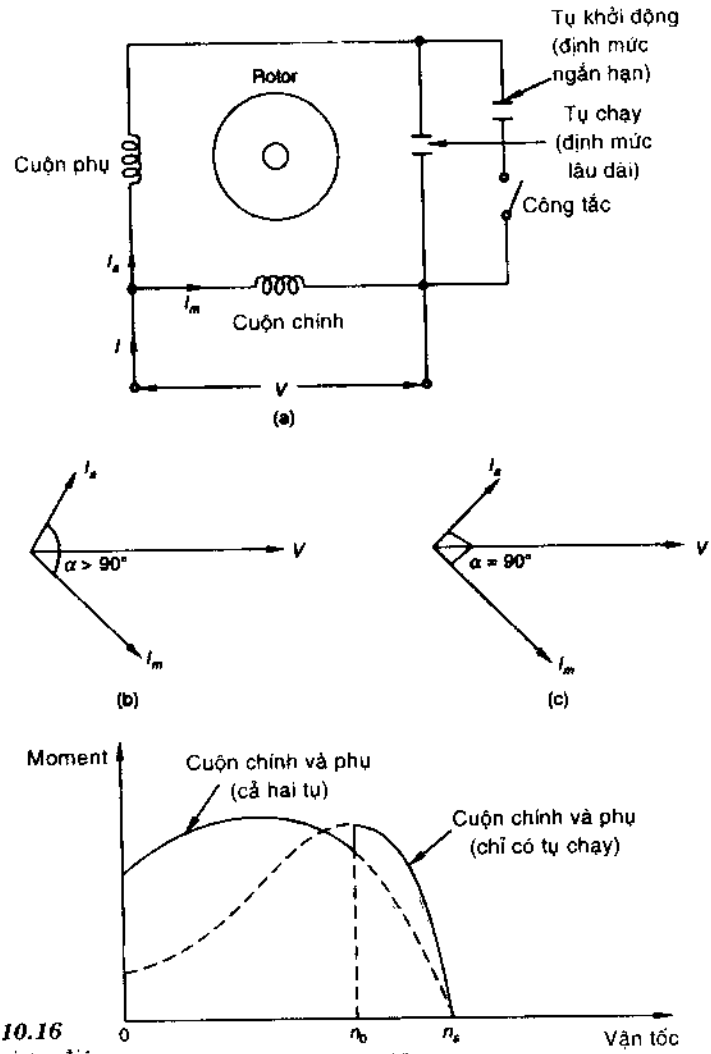
a) Động cơ khởi động bằng tụ điện. Sơ đồ mạch được nêu trên Hình 10.15 (a), động cơ chỉ dùng tụ điện để khởi động. Giá trị tụ điện thường được chọn sao cho $\alpha = 90^0$ (Hình 10.15 (b)). Đặc tuyến moment - vận tốc với công tắc ly tâm được nêu trên Hình 10.15 (c). Moment khởi động cao. Chú ý, tụ điện chỉ cần định mức ngắn hạn. Vì định mức VAR cao đối với tụ điện, nên tụ điện hóa học (tụ hóa) thường được dùng với khoảng giá trị điện dung không dưới 250 μF.

Tụ điện và công tắc ly tâm (kết hợp), làm tăng giá động cơ và làm giảm độ tin cậy.



Hình 10.15 *Động cơ chia pha bằng tụ điện khởi động.*

b) Động cơ hai tụ điện: Sơ đồ mạch được nêu trên Hình 10.16(a). Động cơ hai tụ điện không chỉ dùng tụ để khởi động mà còn dùng để vận hành. Tụ được dùng khi vận hành là tụ điện chạy, cải thiện đặc tính vận hành của động cơ. Hình 10.16(b) minh họa sơ đồ pha, khi khởi động, $\alpha > 90^0$ (điện), sau khi ngắt tụ điện khởi động, $\alpha = 90^0$ (điện) (Hình 10.16(c)).



Hình 10.16
Động cơ hai tụ điện

Hình 10.16 (d) minh họa đặc tuyến moment-vận tốc của động cơ hai tụ điện. Cuộn dây phụ và tụ điện chạy được thiết kế để có tập hợp từ trường 2 pha cân bằng ở vận tốc xác định, không tồn tại từ trường quay ngược, do đó cải thiện hiệu suất động cơ, đồng thời loại trừ được moment sóng hài thứ hai, động cơ chạy êm hơn.

Chú ý, tụ điện khởi động có giá trị lớn và được định mức ngắn hạn, tụ điện chạy có giá trị nhỏ, được định mức theo vận hành liên tục, động cơ tự khởi động khi tụ điện chạy vẫn hiện diện trong mạch. Tuy giảm moment khởi động, không có công tắc chuyển mạch, nhưng đơn giản và giảm chi phí. Động cơ loại này được gọi là *động cơ tụ điện chạy* hoặc *tụ điện thường xuyên*.

Ví dụ 10.4. Trở kháng cuộn dây chính và phụ của động cơ cảm ứng 1-pha khởi động bằng tụ điện là:

Cuộn dây chính $\overline{Z}_{1m} = 3 + j\,2.7$

Cuộn dây phụ $\overline{Z}_{1a} = 7 + j\,3$

Hãy xác định giá trị tụ điện mắc nối tiếp với cuộn dây phụ để có lệch pha $\alpha = 90^0$ giữa các dòng điện của hai cuộn dây khi khởi động.

Giải

Chọn điện áp cung cấp để quy chiếu các góc pha.

Góc pha của dòng điện trên cuộn dây chính:

$$\angle\overline{I}_m = -\angle\overline{Z}_{1m} = -\angle(3 + j\,2.7) = -42^0$$

Góc pha của dòng điện trong cuộn dây phụ với tụ điện mắc nối tiếp:

$$\angle\overline{I}_a = -\angle[(7 + j\,3) - j/\omega C]$$

$$\alpha = \angle\overline{I}_a - \angle\overline{I}_m$$

$$90^0 = -\tan^{-1}\left(\frac{3 - \frac{1}{\omega C}}{7}\right) - (-42^0)$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{3 - \frac{1}{\omega C}}{7}\right) = -48^0$$

$$\frac{3 - \frac{1}{\omega C}}{7} = -1.11$$

$$\omega = 2\pi \times 50 \text{ rad / s}$$

Điện dung tụ:

$$C = 295.5\ \mu F$$

Động cơ cực từ xẻ rãnh

Hình 10.17 minh họa động cơ cực từ rãnh với rotor lồng sóc. Trên mặt mỗi cực từ chính, xẻ một rãnh nhỏ chia mặt cực từ thành hai phần nhỏ và lớn. Trên phần nhỏ, có một vòng băng đồng dẹp, ngắn mạch, ôm bọc cực từ nhỏ, tạo thành cực từ phụ. Vòng ngắn mạch này được gọi là *cuộn dây rãnh phụ*. Từ thông biến đổi hình sine được tạo ra bằng kích thích ac (1-pha), cảm ứng lực điện động trong cuộn dây rãnh phụ. Dòng điện cảm ứng trong cuộn dây rãnh phụ tạo ra từ thông riêng trên cực phụ (của cực từ chính).

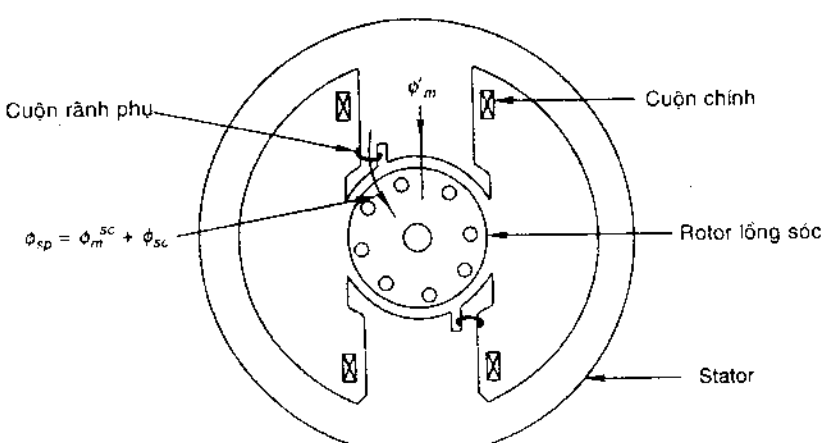
Từ thông trong cuộn dây chính là:

$$\phi_m = \phi_{max} \sin \omega t \qquad (10.8)$$

$$\phi_m = \phi_m^{sc} + \phi'_m$$

trong đó: ϕ_m^{sc} thành phần từ thông liên kết cuộn dây rãnh phụ.

ϕ'_m thành phần từ thông đi qua khe hở không khí.



Hình 10.17 *Động cơ cực từ rãnh.*

Lực điện động cảm ứng trong cuộn dây rãnh phụ:

$$e_{sc} = \frac{d\phi_m^{sc}}{dt} = \phi_{max}^{sc}\,\omega\cos\omega t \quad \text{(từ cuộn một vòng)} \qquad (10.19)$$

Trở kháng cuộn dây rãnh phụ

$$\overline{Z}_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} = Z_{sc}\angle\theta_{sc} \qquad (10.20)$$

Dòng điện trong cuộn dây rãnh phụ

$$i_{sc} = \frac{\phi_{max}^{sc}\,\omega\cos(\omega t - \theta_{sc})}{Z_{sc}} \qquad (10.21)$$

Từ thông được cảm ứng từ dòng điện i_s:

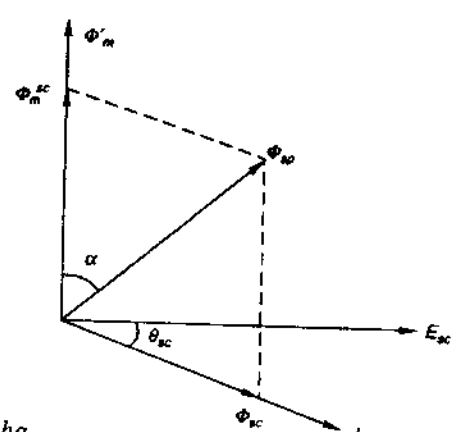
$$\phi_{sc} = \frac{1 \times i_{sc}}{\mathcal{R}} = \frac{\phi_{max}^{sc}}{Z_{sc}\mathcal{R}}\cos(\omega t - \theta_{sc}) \qquad (10.22)$$

với $\mathcal{R}$ = từ trở của đường dẫn ϕ_{sc}

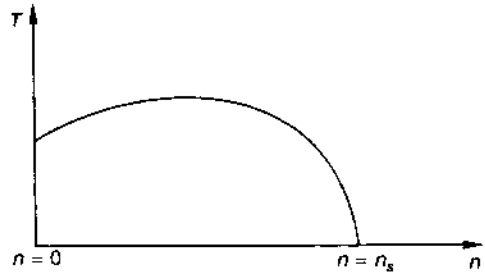
Theo các pt (10.21), (10.22), pha dòng điện $\overline{I}_{sc}$ và từ thông Φ_{sc} chậm pha so với lực điện động cảm ứng $\overline{E}_{sc}$ theo góc θ_{sc}, còn từ pt (10.19), pha từ thông $\overline{\Phi}_m^{sc}$ sớm pha 90^0 so với $\overline{E}_{sc}$; pha $\overline{\Phi}'_m$ đồng pha với Φ_m^{sc}.

Từ thông tổng trong cực từ phụ là tổng pha từ thông $\overline{\Phi}_{sp}$:

$$\overline{\Phi}_{sp} = \overline{\Phi}_m^{sc} + \overline{\Phi}_{sc}$$



Hình 10.18 *Sơ đồ pha*



Hình 10.19 *Đặc tuyến vận tốc - moment của động cơ cực từ rãnh*

như trên Hình 10.18, và chậm pha so với $\overline{\Phi}'_m$ theo góc α. Hai từ thông biến thiên theo hàm sine $\overline{\Phi}'_m$ và $\overline{\Phi}'_{sp}$, dịch chuyển trong không gian có góc lệch pha thời gian là α, tạo ra các trường quay thuận và nghịch, và từ đó tạo ra moment tổng. Đặc tuyến vận tốc-moment của động cơ xẻ rãnh được minh họa trên Hình 10.19. Động cơ này tự khởi động (không như động cơ một cuộn dây 1-pha).

Từ sơ đồ pha trên Hình 10.18, từ thông tổng trên cực từ phụ $\overline{\Phi}_{sp}$ chậm pha hơn từ thông trên cực từ chính $\overline{\Phi}'_m$, làm cho rotor quay theo chiều từ $\overline{\Phi}'_m$ đến $\overline{\Phi}_{sp}$ (từ cực từ chính còn lại đến cực phụ). Động cơ có chiều quay xác định, không thể đảo ngược. Sự đảo chiều động cơ có thể đạt được bằng cách dùng hai cuộn dây rãnh phụ trên hai phía mỗi cực từ và bằng cách hở mạch một tập hợp cuộn dây rãnh phụ còn tập hợp kia ngắn mạch.

Động cơ cực từ xẻ rãnh là động cơ tự khởi động với một cuộn dây đơn (không có cuộn dây phụ), có giá thấp và có cấu trúc hơi lớn. Động cơ có hiệu suất thấp và hệ số công suất thấp, khả dụng với công suất từ 1/ 300 đến 1/ 20 kW, được dùng trong quạt điện, máy tạo ẩm, máy ghi âm,... Nguyên lý cực xẻ rãnh được dùng trong khởi động đồng hồ điện và các động cơ thời chuẩn 1-pha.

So sánh động cơ cảm ứng 1-pha và 3-pha

Trong động cơ cảm ứng 3-pha, moment cực đại độc lập với điện trở rotor, và độ trượt tương ứng tăng theo điện trở rotor. Moment cực đại trong động cơ cảm ứng 1-pha giảm khi điện trở động cơ tăng trong khi độ trượt ở moment cực đại cũng tăng.

Vì có sự hiện diện của từ trường ngược, nên đặc tính vận hành của động cơ 1-pha thấp hơn động cơ 3-pha cùng kích cỡ. Moment cực đại thấp hơn với độ

trượt tương ứng cao hơn và tổn thất lớn hơn. Ngoài ra, động cơ 1-pha đòi hỏi công suất (VA và Watt) vào lớn hơn, do tiêu phí công suất cho từ trường quay ngược. Tổn thất đồng stator của động cơ 1-pha lớn hơn do cuộn dây đơn phải dẫn toàn bộ dòng điện. Những điều này làm giảm hiệu suất và tăng nhiệt độ trong động cơ 1-pha. Đối với định mức vận tốc và công suất cho trước, động cơ 1-pha có kích thước khung lớn hơn động cơ 3-pha. Hơn nữa, động cơ 1-pha còn đòi hỏi cuộn dây phụ. Mặc dù có các yếu tố này, chi phí của động cơ 1-pha công suất nhỏ tương đối thấp so với động cơ 3-pha khi được sản xuất hàng loạt. Trong thực tế, nguồn điện gia dụng tiêu chuẩn thường là ac, 1-pha, 220V, 50Hz, phù hợp với các động cơ 1-pha công suất nhỏ.

Đặc tính vận hành, so sánh giá thành và chọn động cơ cảm ứng 1-pha

Việc lựa chọn động cơ 1-pha thường dựa vào các hệ số như giá thành ban đầu, chi phí vận hành, đặc tính vận hành, trọng lượng, kích cỡ, và các yêu cầu ứng dụng khác, trong đó đặc tính vận hành và giá thành là hai hệ số quan trọng. Đặc tính vận hành cao đi đôi với giá thành cao, giữa hai hệ số này cần chọn phối hợp theo ứng dụng.

Giá thành động cơ điện trở chia pha là thấp nhất, động cơ tụ điện thường cao hơn, và động cơ hai tụ điện là cao nhất. Các ứng dụng phổ biến đối với các động cơ này được liệt kê như sau:

Động cơ chia pha điện trở. Có dòng khởi động thấp, moment khởi động trung bình, dùng cho các tải dễ khởi động và các ứng dụng trong quạt, bơm ly tâm, thiết bị văn phòng, máy giặt,... có định mức khoảng 1/20 đến 1/2 kW.

Động cơ khởi động tụ điện. Có moment khởi động cao, được dùng cho các tải khó khởi động, như máy nén khí, máy bơm, máy nén khí trong tủ lạnh, máy lạnh (điều hòa nhiệt độ), băng tải, máy công cụ công suất nhỏ ... có định mức đến 6 kW.

Động cơ tụ điện thường xuyên. Có moment khởi động cao nhưng công suất nhỏ hơn động cơ khởi động tụ điện, cần chọn phối hợp giữa đặc tính vận hành, khởi động, chạy và giá thành tụ điện. Vì với tụ điện thường xuyên, hệ số công suất chạy và hiệu suất cao hơn, vận hành ổn định và ít ồn hơn, loại động cơ này được dùng cho các tải dễ và khó khởi động.

Động cơ hai tụ. Kết hợp các ưu điểm của hai loại động cơ dùng tụ điện, hiệu suất và hệ số công suất cao, động cơ được sử dụng cho các tải dễ và khó khởi động.

Động cơ rãnh xẻ. Giá thành rẻ, moment khởi động thấp, hệ số công suất thấp, hiệu suất chạy thấp, khả dụng với cỡ nhỏ 1/20 kW như quạt, máy bán hàng, máy photocopy,...

Động cơ đồng bộ 1-pha

Động cơ từ trở

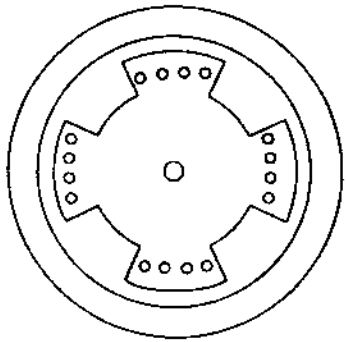
Động cơ từ trở 3-pha đã được trình bày trong phần máy điện cực lồi không kích thích. Biểu thức moment từ trở của động cơ 1-pha được xác định từ nguyên lý bảo toàn năng lượng. Nói chung, trong động cơ từ trở, mỗi khi stator tạo ra từ trường quay trong không gian và rotor không phải hình trụ, từ trở của từ trường từ rotor đến từ trường quay là hàn theo góc không gian. Nguồn gốc của moment từ trở là xu hướng rotor tự chỉnh thẳng hàng trong vị trí từ trở cực đại với từ thông quay đồng bộ của từ trường thuận. Động cơ có thể tự khởi động theo nguyên lý cảm ứng bằng cách đặt các thanh đồng ngắn mạch ở phần lồi của rotor.

Trong động cơ từ trở 1-pha, từ trường quay có thể được tạo ra bằng một trong các phương pháp chia pha nêu trên. Cấu trúc cực từ lồi trên rotor được thực hiện bằng cách bỏ bớt vài răng của rotor động cơ cảm ứng (Hình 10.20(a)). Các răng còn lại chứa các thanh đồng để có moment cảm ứng khởi động. Sau khi khởi động, rotor đạt đến tốc độ gần đồng bộ do tác động cảm ứng và được đưa vào đồng bộ trong nửa chu kỳ dương của moment đồng bộ biến thiên theo hàm sine. Điều này chỉ có thể xảy ra nếu rotor có quán tính thấp và tải nhẹ. Đặc tuyến moment - tốc độ của động cơ từ trở với khởi động cảm ứng được nêu trên Hình 10.20(b). Từ Hình này có thể thấy moment khởi động phụ thuộc vào vị trí rotor do rotor có cực lồi. Hiện tượng này được gọi là "kẹt khi khởi động", để có hiệu suất động cơ đồng bộ theo yêu cầu, kích cỡ khung được dùng phải lớn hơn động cơ cảm ứng 1-pha bình thường.

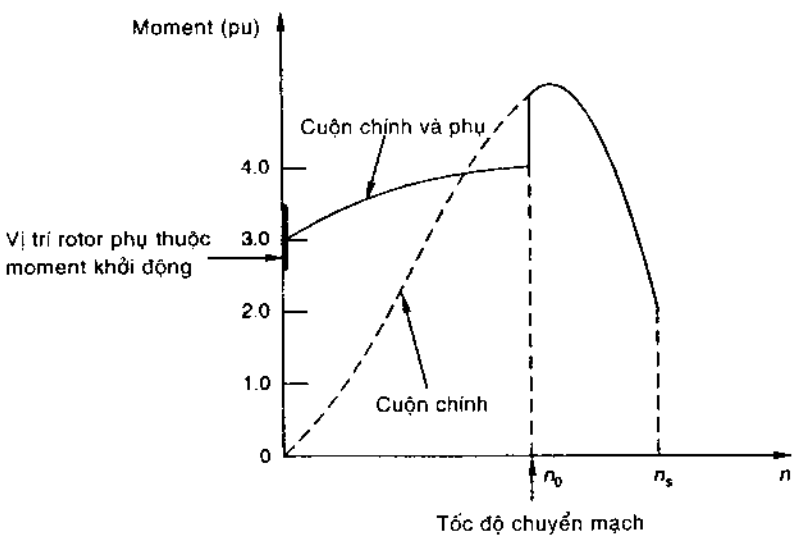
Động cơ từ trễ

Stator của động cơ từ trễ có các cuộn dây quấn chính và phụ với một tụ điện nối thường xuyên để chia pha. Giá trị tụ điện được chọn để tạo ra hai pha cân bằng. Rotor là loại cực ẩn bằng thép cứng (có tổn thất từ trễ cao) và không có cuộn dây (không có các thanh ngắn mạch lồng sóc). Hai cuộn dây stator được phân bố để tạo ra từ trường quay gần như theo hàm sine. Điều này cần thiết để giảm tổn thất sắt do sóng hài không gian của từ trường.

Hiện tượng từ trễ gây ra sự từ hóa rotor chậm pha hơn sóng lực từ động được hình thành trên stator. Kết quả là từ thông rotor chậm pha theo góc δ so



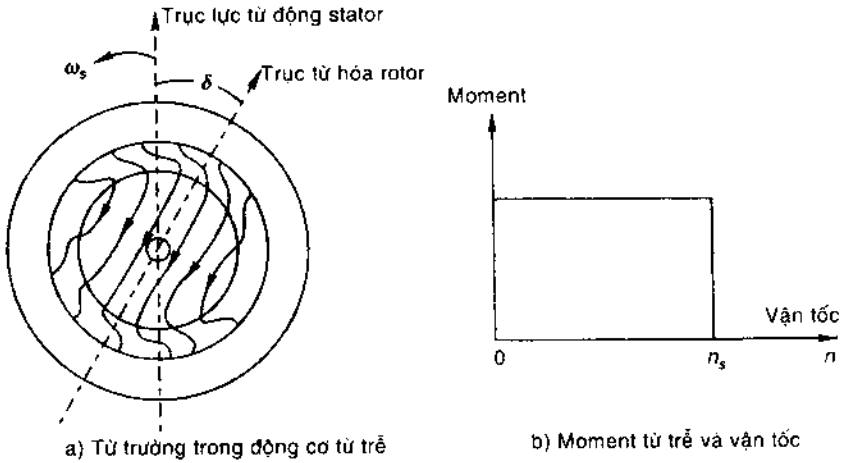
(a) Đặc điểm cấu trúc động cơ từ trở 4 - cực



(b) Đặc tuyến moment - vận tốc động cơ từ trở

Hình 10.20. *Động cơ từ trở và đặc tuyến moment - vận tốc.*

với trục lực từ động stator. Hình 10.21(a) minh họa điều kiện từ trường trong động cơ ở thời điểm bất kỳ. Khi góc δ phụ thuộc từ trễ, sẽ không đổi với mọi vận tốc rotor. Moment tương tác (moment từ trễ) giữa trường rotor và stator là không đổi ở mọi vận tốc (Hình 10.21(b)). Dưới ảnh hưởng của moment từ trễ, rotor gia tốc êm và chạy với vận tốc đồng bộ. Điều này tương phản với hiện tượng "kéo vào" trong động cơ từ trở khi đồng bộ hóa.



Hình 10.21. *Động cơ từ trễ.*

Tổn thất từ trễ:

$$P_h = K_h f_2 B^x \tag{10.23}$$

với B = mật độ từ thông cực đại, $f_2 = sf$ = tần số rotor

$$\text{Công suất qua khe không khí} = \frac{P_h}{s} \tag{10.24}$$

$$\text{Moment} = \frac{P_h}{s\omega_s} = \frac{K_h s f B^2}{s\omega_s} = \frac{K_h f B^2}{\omega_s} = \text{Hằng số} \tag{10.25}$$

Thành phần thứ hai của moment do tổn thất dòng điện xoáy gây ra được hình thành đồng thời trong rotor.

$$P_e = K_e f_2^2 B^2 = K_e s^2 f^2 B^2 \tag{10.26}$$

$$T = \frac{P_e}{s\omega_s} = \left(\frac{K_e f^2 B^2}{\omega_s}\right) s \tag{10.27}$$

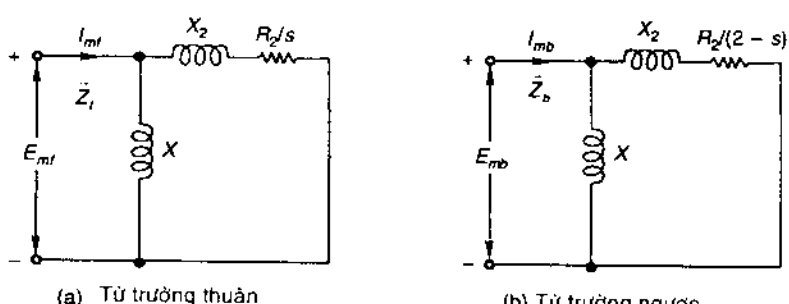
Theo pt (10.27), moment dòng điện xoáy cao nhất khi khởi động, giảm tuyến tính với độ trượt, và triệt tiêu ở vận tốc đồng bộ. Thành phần moment này hỗ trợ moment từ trễ khi khởi động, cải thiện đặc tuyến khởi động cho động cơ từ trễ.

Động cơ từ trễ có tiếng ồn thấp so với động cơ cảm ứng 1-pha do tải chạy với vận tốc đồng nhất. Điều này là do động cơ từ trễ vận hành với vận tốc đồng bộ và các điều kiện 2-pha gần như cân bằng, không bị rung động (động cơ cảm ứng rung động khi độ trượt thay đổi theo tải). Hơn nữa, đối với động cơ này, rotor phẳng (không có rãnh) cho phép giảm tiếng ồn rõ rệt. Vận hành nhiều tốc độ tương đối dễ thực hiện bằng cách sắp xếp thay đổi các cuộn dây stator (thay đổi cực từ stator); rotor không quấn dây phản ứng tạo ra số cực từ như stator. Động cơ có đặc tính vận hành khởi động tốt (moment khởi động bằng moment chạy), do đó, rất thích hợp khi cần gia tốc với tải quán tính cao.

Mô hình mạch động cơ cảm ứng 1-pha

Sự không cân bằng cuộn dây và hai cuộn dây chính và phụ đều được cấp điện từ một nguồn làm cho hai từ trường chính và phụ không cân bằng. Pha dọc theo các trục cuộn dây có thể được tách thành các thành phần đối xứng $\overline{F}_f$ và $\overline{F}_b$ theo pt (10.17). Tập hợp các thành phần thuận $\overline{F}_f$ và $j\overline{F}_f$ tạo ra từ trường quay thuận. Tập hợp các thành phần ngược $\overline{F}_b$ và $-j\overline{F}_b$ cho kết quả từ trường quay ngược.

Độ trượt rotor tương ứng với hai từ trường quay là s và (2 - s) theo pt (10.5). Mạch từ hóa và rotor từ hai từ trường quay khi được quy chiếu theo cuộn dây chính là khác nhau (Hình 10.22).



Hình 10.22 *Nhánh từ hóa và mạch rotor theo các từ trường quay được quy chiếu lên cuộn dây chính và phụ*

Chú ý, tổn thất không tải là không đáng kể và điện dẫn tổn thất không được biểu thị trong hai mạch này. Trở kháng từ E_{mf}, lực điện động cảm ứng của từ trường thuận trong cuộn dây chính, là:

$$\overline{Z}_f = jX_{ll}\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) \quad (10.28a)$$

Trở kháng từ E_{mb}, lực điện động cảm ứng của từ trường ngược trong cuộn dây chính, là:

$$\overline{Z}_b = jX_{ll}\left(\frac{R_2}{2-s} + jX_2\right) \quad (10.28b)$$

$$\overline{E}_{mf} = \overline{Z}_f \overline{I}_{mf} \quad (10.29a)$$

$$\overline{E}_{mb} = \overline{Z}_b \overline{I}_{mb} \quad (10.29b)$$

Với $\overline{I}_{mf}$ = dòng điện thành phần thuận trong cuộn dây chính

$\overline{I}_{mb}$ = dòng điện thành phần ngược trong cuộn dây chính

$$\overline{I}_m = \text{Dòng điện cuộn dâychính} = \overline{I}_{mf} + \overline{I}_{mb} \quad (10.30)$$

Phương trình (10.16) được biến đổi theo dòng điện.

Đặt N_m = số vòng cuộn dây chính tương đương.

N_a = số vòng cuộn dây phụ tương đương.

$$a = \frac{N_a}{N_m} \quad \text{hoặc} \quad N_a = a\,N_m \quad (10.31)$$

Từ pt (10.16):

$$\overline{F}_m = N_m\overline{I}_m = N_m\overline{I}_{mf} + N_m\overline{I}_{mb} \quad (10.32a)$$

$$\overline{F}_a = N_a\overline{I}_a = aN_m\overline{I}_a = jN_m\overline{I}_{mf} - jN_m\overline{I}_{mb} \quad (10.32b)$$

Từ pt (10.32):

$$\overline{I}_m = \overline{I}_{mf} + \overline{I}_{mb} \quad (10.33a)$$

$$\overline{I}_a = j\frac{\overline{I}_{mf}}{a} - j\frac{\overline{I}_{mb}}{a} \quad (10.33b)$$

Dòng điện trong cuộn dây phụ là $\overline{I}_a$, nhưng do các vòng dây cuộn phụ và chính khác nhau, dòng điện cuộn dây phụ quy chiếu theo cuộn chính:

$$I'_a = \left(\frac{N_a}{N_m}\right) I_a = aI_a \quad (10.34)$$

Từ pt (10.33), các thành phần đối xứng của dòng điện trong cuộn dây chính và phụ được quy chiếu theo cuộn dây chính là:

$$\bar{I}_{mf} = \frac{1}{2}\left(\bar{I}_m - ja\bar{I}_a\right) \tag{10.35a}$$

$$\bar{I}_{mb} = \frac{1}{2}\left(\bar{I}_m + ja\bar{I}_a\right) \tag{10.35b}$$

Từ trường quay thuận tiến đến cuộn dây phụ 90^0 trước cuộn dây chính và ngược lại đối với từ trường quay ngược. Do đó, lực điện động trong cuộn dây phụ được cảm ứng từ hai từ trường là:

$$\bar{E}_{af} = ja\bar{E}_{mf} \tag{10.36a}$$

$$\bar{E}_{ab} = -ja\bar{E}_{mb} \tag{10.36b}$$

Điện áp hai đầu cuộn dây chính và phụ tương ứng là $\bar{V}_m$ và $\bar{V}_a$. Điện áp cuộn dây phụ từ cuộn dây chính là V_a/a. Các điện áp này cũng được chia theo các thành phần đối xứng:

$$\bar{V}_m = \bar{V}_{mf} + \bar{V}_{mb} \tag{10.37a}$$

$$\frac{\bar{V}_a}{a} = j\bar{V}_{mf} - j\bar{V}_{mb} \tag{10.37b}$$

$$\bar{V}_{mf} = \frac{1}{2}\left(\bar{V}_m - j\frac{\bar{V}_a}{a}\right) \tag{10.38a}$$

$$\bar{V}_{mb} = \frac{1}{2}\left(\bar{V}_m + j\frac{\bar{V}_a}{a}\right) \tag{10.38b}$$

Xét điện áp trên cuộn dây chính $\bar{V}_m$, điện áp này gồm ba thành phần là lực điện động cảm ứng bởi từ trường quay thuận, lực điện động cảm ứng bởi từ trường quay ngược và sụt áp trên trở kháng cuộn dây $\bar{Z}_{1m}$ có dòng điện I_m đi qua:

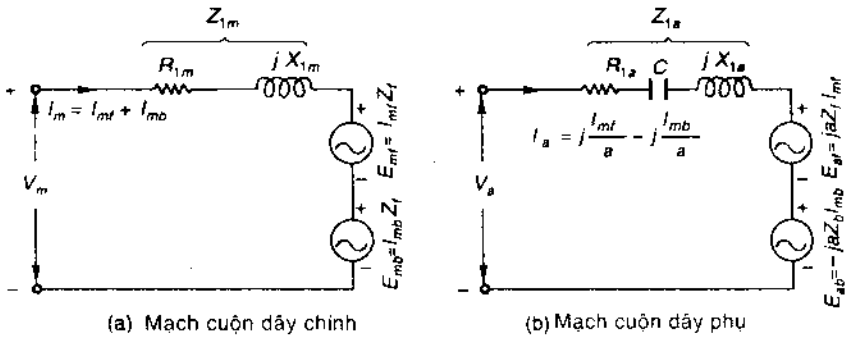
$$\bar{V}_m = \bar{I}_m\bar{Z}_{1m} + \bar{E}_{mf} + \bar{E}_{mb} \tag{10.39a}$$

Thay $\bar{E}_{mf}$ và $\bar{E}_{mb}$ từ pt (10.29):

$$\bar{V}_m = \bar{I}_m\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f\bar{I}_{mf} + \bar{Z}_b\bar{I}_{mb} \tag{10.39b}$$

Tương tự, điện áp trên cuộn dây phụ $\bar{V}_a$ gồm ba thành phần là:

$$\bar{V}_a = \bar{I}_a\bar{Z}_{1a} + \bar{E}_{af} + \bar{E}_{ab} \tag{10.40a}$$



Hình 10.23. *Các thành phần điện áp.*

Với $\overline{Z}_{1a}$ là trở kháng cuộn dây của cuộn dây phụ bao gồm cả các tụ điện khởi động/chạy. Sử dụng pt (10.36):

$$\overline{V}_a = \overline{I}_a\overline{Z}_{1a} + ja\overline{E}_{mf} - ja\overline{E}_{mb} \tag{10.40b}$$

$$\overline{V}_a = \overline{I}_a\overline{Z}_{1a} + ja\overline{Z}_f\overline{I}_{mf} - ja\overline{Z}_b\overline{I}_{mb} \tag{10.40c}$$

Mạch tương ứng được nêu trên Hình (10.23b)

Thay I_m từ pt (10.33a) vào pt (10.39b)

$$\overline{V}_m = \left(\overline{Z}_{1a} + \overline{Z}_f\right)\overline{I}_{mf} + \left(\overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_b\right)\overline{I}_{mb} \tag{10.41a}$$

Thay I_a từ pt (10.33b) vào pt (10.40c):

$$\overline{V}_a = j\left(\frac{\overline{Z}_{1a}}{a} + a\overline{Z}_f\right)\overline{I}_{mf} - j\left(\frac{\overline{Z}_{1a}}{a} + a\overline{Z}_b\right)\overline{I}_{mb} \tag{10.41b}$$

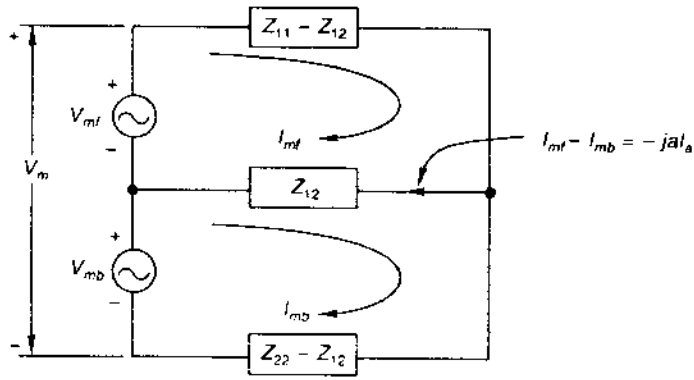
Thay $\overline{V}_m$ và $\overline{V}_a$ trong pt (10.41a) và (10.41b) vào pt (10.38a) và (10.38b):

$$\overline{V}_{mf} = \left(\frac{\overline{Z}_{1m}}{2} - \frac{\overline{Z}_{1a}}{2a^2} + \overline{Z}_f\right)\overline{I}_{mf} - \frac{1}{2}\left(\frac{\overline{Z}_{1a}}{a^2} - \overline{Z}_{1m}\right)\overline{I}_{mb} \tag{10.42a}$$

$$\overline{V}_{mb} = \frac{1}{2}\left(\frac{\overline{Z}_{1m}}{a^2} - \overline{Z}_{1m}\right)\overline{I}_{mf} + \left(\frac{\overline{Z}_{1m}}{2} + \frac{\overline{Z}_{1a}}{2a^2} + \overline{Z}_b\right)\overline{I}_{mb} \tag{10.42b}$$

trong đó:

$$\overline{Z}_{11} = \left(\frac{\overline{Z}_{1m}}{2} + \frac{\overline{Z}_{1a}}{2a^2} + \overline{Z}_f\right) \tag{10.43a}$$



Hình 10.24. *Mô hình mạch từ pt(10.44).*

$$\overline{Z}_{12} = \frac{1}{2}\left(\frac{\overline{Z}_{1a}}{a^2} - \overline{Z}_{1m}\right) \tag{10.43b}$$

$$\overline{Z}_{22} = \left(\frac{\overline{Z}_{1m}}{2} + \frac{\overline{Z}_{1a}}{2a^2} + \overline{Z}_{1}\right) \tag{10.43c}$$

Các pt (10.42a) và (10.42b) có thể viết dưới dạng:

$$\overline{V}_{mf} = \overline{Z}_{11}\overline{I}_{mf} - \overline{Z}_{12}\overline{I}_{mb} \tag{10.44a}$$

$$\overline{V}_{mb} = \overline{Z}_{12}\overline{I}_{mf} - \overline{Z}_{22}\overline{I}_{mb} \tag{10.44b}$$

Hình 10.24 minh họa mô hình mạch sử dụng pt (10.44) và pt (10.37).

Chú ý

$$\overline{Z}_{11} - \overline{Z}_{12} = \overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_{f} \tag{10.45a}$$

$$\overline{Z}_{22} - \overline{Z}_{12} = \overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_{b} \tag{10.45b}$$

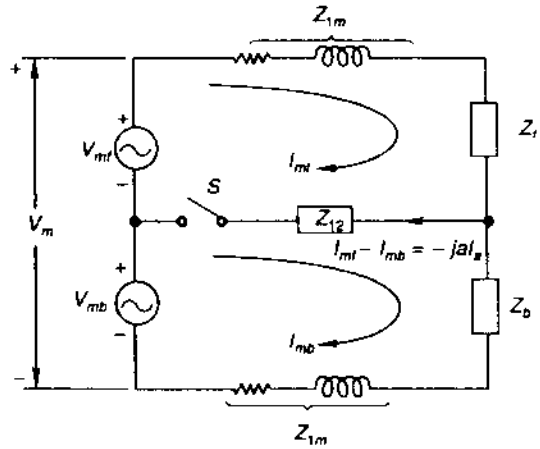
$$\overline{I}_{mf} - \overline{I}_{mb} = ja\overline{I}_{a} \tag{10.45c}$$

Từ mô hình mạch trên Hình 10.24 vẽ thành dạng mạch trên Hình 10.25, việc ngắt cuộn dây phụ khi vận hành tương đương với công tắc S hở mạch.

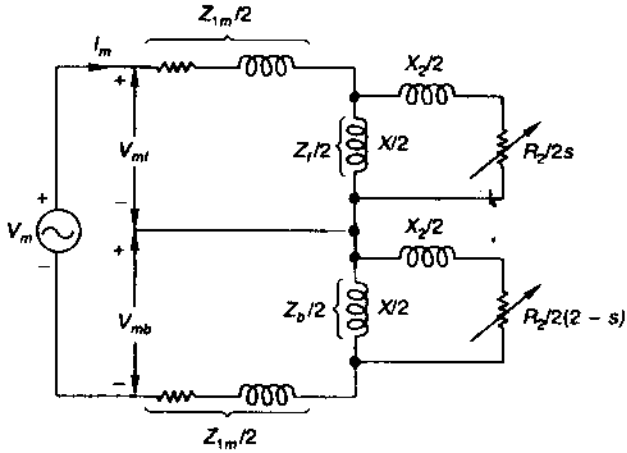
Khi cuộn dây phụ được ngắt nối kết:

$$\overline{I}_{mf} = \overline{I}_{mb} - \frac{1}{2}\overline{I}_{m} \tag{10.46}$$

$$\overline{V}_{m} = \overline{V}_{mf} + \overline{V}_{mb} \tag{10.47}$$



Hình 10.25. *Mạch động cơ cảm ứng 1-pha (nối cả hai cuộn dây)*



Hình 10.26. *Mạch động cơ cảm ứng 1-pha (chỉ nối cuộn dây chính).*

Bằng cách tăng gấp đôi dòng điện và giảm trở kháng một nửa, sẽ nhận được mô hình mạch điện như trên Hình 10.26. Mô hình mạch này tương tự mạch trên Hình 10.5(c).

Từ pt (10.42)

$$\bar{I}_{mf} = \frac{\bar{V}_{mf}\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_b + \bar{Z}_{12}\right) + \bar{V}_{mb}\bar{Z}_{12}}{\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{12}\right)\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_b + \bar{Z}_{12}\right) - \bar{Z}_{12}^2} \qquad (10.48a)$$

$$\bar{I}_{mb} = \frac{\bar{V}_{mb}\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{12}\right) + \bar{V}_{mf}\bar{Z}_{12}}{\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{12}\right)\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_b + \bar{Z}_{12}\right) - \bar{Z}_{12}^2} \qquad (10.48b)$$

Dòng điện cuộn dây

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{mf} + \bar{I}_{mb} \qquad (10.49a)$$

$$\bar{I}_a = \frac{j}{a}\left(\bar{I}_{mf} - \bar{I}_{mb}\right) \qquad (10.49b)$$

$$\bar{I}_L = \bar{I}_m + \bar{I}_a = I_L\angle\theta \qquad (10.50a)$$

$$Pf = \cos\theta \qquad (10.50b)$$

$$P_{in} = V_L I_L \cos\theta \qquad (10.50c)$$

Moment hình thành và công suất cơ được tính theo:

$$T = \frac{2}{\omega_s}\left(I_{mf}^2 R_f - I_{mb}^2 R_b\right) \qquad (10.51)$$

$$P_m = 2\left(I_{mf}^2 R_f - I_{mb}^2 R_b\right)(1 - s) \qquad (10.52)$$

Trở kháng tụ điện đối với vận hành cân bằng ở vận tốc xác định

Đối với vận hành 1-pha cân bằng

$$\bar{V}_L = \bar{V}_{mf} + \bar{V}_{mb}$$

$$\bar{I}_{mb} = 0$$

Từ pt (10.48b):

$$\bar{V}_{mb}\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{12}\right) + \bar{V}_{mf}\bar{Z}_{12} = 0$$

$$\bar{Z}_{12} = \frac{-\bar{V}_{mb}\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f\right)}{\bar{V}_{mf} + \bar{V}_{mb}} = \frac{-\bar{V}_{mb}\left(\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f\right)}{\bar{V}_L} \qquad (10.53)$$

Từ pt (10.38b)

$$\bar{V}_{mb} = \frac{1}{2}\left(\bar{V}_m + j\frac{\bar{V}_a}{a}\right)$$

Đối với vận hành 1-pha:

$$V_m = V_a = V_L$$

$$\overline{V}_{mb} = \frac{V_L}{2}\left(1 + \frac{j}{a}\right) \tag{10.54}$$

Thay pt (10.54) vào pt (10.53)

$$\overline{Z}_{12} = -\frac{1}{2}\left(1 + \frac{j}{a}\right)\left(\overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_{1f}\right) \tag{10.55}$$

Với $\overline{Z}_{12}$ xác định trong pt (10.43b)

$$\overline{Z}_{12} = -\frac{1}{2}\left(\overline{Z}_{1a} / a^2 - \overline{Z}_{1m}\right)$$

$$\overline{Z}_{1a} = a^2\left(2\overline{Z}_{12} + \overline{Z}_{1m}\right) = (R_C - jX_C) + (R_{1a} + X_{1a}) \tag{10.56}$$

$$R_C - jX_C = \overline{Z}_{1a} - (R_{1a} + jX_{1a}) \tag{10.57}$$

Ví dụ 10.5. Động cơ hai tụ điện 1/2 kW, 4 cực, 50 Hz, 220V có các thông số mạch như sau:

$R_{1m} = 4.2\ \Omega$	$X_{1m} = 11.3\ \Omega$
$R_{1a} = 5.16\ \Omega$	$X_{1a} = 12.1\ \Omega$
$R_1 = 250\ \Omega$	$a = 1.05\ \Omega$
$R_2 = 7.48\ \Omega$	$X_2 = 7.2\ \Omega$

Tổn thất lõi, ma sát, và quạt gió = 45 W

(a) Tính moment và dòng điện khởi động nếu hai tụ điện song song bằng 70 μF.

(b) Tính giá trị tụ điện chạy đối với từ trường ngược bằng zero khi động cơ chạy ở độ trượt 0.04. Ý nghĩa của giá trị điện trở kết hợp này là gì?

(c) Hãy tính đặc tính vận hành động cơ đối với tụ điện chạy ở Phần (b). Giả sử $R_C = 0$.

Giải

(a) $s = 1$

$$\overline{Z}_f = \overline{Z}_b = j250 \| (7.48 + j7.2) = 10.1\angle 45.6^0 = 7.07 + j7.22$$

$$\overline{Z}_{1a} = (5.16 + j12.1) - j\frac{10^6}{314 \times 70} = 5.16 - j33.4$$

$$\overline{Z}_{1s} / a^2 = 4.68 - j30.29$$

$$\overline{Z}_{12} = \frac{1}{2}\left(\overline{Z}_{1s} / a^2 - \overline{Z}_{1m}\right) = \frac{1}{2}(4.68 - j30.29 - 4.2 - j11.3)$$

$$= 0.24 - j20.8 = 20.8\angle -89.3^0$$

$$\overline{V}_{mf} = \frac{220}{2}\left(1 - \frac{j}{1.05}\right) = 151.9\angle -43.60^0$$

$$\overline{V}_{mb} = \frac{220}{2}\left(1 + \frac{j}{1.05}\right) = 151.9\angle 43.60^0$$

$$\overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_f + \overline{Z}_{12} = \overline{Z}_{1m} + \overline{Z}_b + \overline{Z}_{12}$$

$$= (4.2 + j11.3) + (7.07 + j7.22) + (0.24 - j20.8)$$

$$= 11.51 - j2.28 = 11.73\angle -11.2^0$$

Thay vào các pt (10.48a) và (10.48b)

$$\overline{I}_{mf} = \frac{151.9\angle -43.6^0 \times 11.73\angle -11.2^0 + 151.9\angle 43.6^0 \times 20.8\angle -89.3^0}{(11.73)^2\angle -22.4^0 - (20.8)^2\angle -178.6^0}$$

$$= \frac{4928\angle -49^0}{561.3\angle -4.3^0} = 8.78\angle -44.7^0 = 6.24 - j6.18$$

$$\overline{I}_{mb} = \frac{151.9\angle 43.6^0 \times 11.73\angle -11.2^0 + 151.9\angle -43.6^0 \times 20.8\angle -89.3^0}{561.3\angle -4.3^0}$$

$$= \frac{-1506\angle 64.6^0}{561.3\angle -4.3^0} = -2.68\angle 68.9^0 = -0.96 - j2.5$$

$$n_s = 1500 \text{ v/ph}; \quad \omega_s = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157.1 \text{ rad / s}$$

$$T_s = \frac{2}{157.1} \times 7.07\left\{(8.78)^2 - (2.68)^2\right\} = 6.31 \text{ Nm}$$

$$\overline{I}_m = \overline{I}_{mf} + \overline{I}_{mb} = 5.28 - j8.68$$

$$\overline{I}_a = \frac{j}{a}(\overline{I}_{mf} - \overline{I}_{mb}) = \frac{j}{1.05}(7.2 - j3.68) = 3.5 + j6.86$$

$$\overline{I}_L = \overline{I}_m + \overline{I}_a = 8.87 - j1.82 = 8.97\angle -11.7^0$$

$$\overline{I}_L(\text{start}) = 8.97 \text{ A}$$

(b) s = 0.04

$$\overline{Z}_f = j250 \,||\left(\frac{7.48}{0.04} + j7.2\right)$$

$$= j250 \,||(187 + j\,7.2) = 147\,\angle 38.2^0 = 115.5 + j\,90.9$$

Từ pt (10.55)

$$\overline{Z}_{12} = -\frac{1}{2}\left(1 + \frac{j}{a_f}\right)\left(\overline{Z}_{1a} + \overline{Z}_f\right)$$

$$= -\frac{1}{2}\left(1 + \frac{j}{1.05}\right)\left[(4.2 + j\,11.3) + (115.5 + j\,90.9)\right]$$

$$= -108.6\,\angle 84.1^0 = -11.2 - j\,108$$

Từ pt (10.56)

$$\overline{Z}_{1a} = a^2(2\,\overline{Z}_{12} + \overline{Z}_{1m})$$

$$= (1.05)^2\left[2\,(-11.2 - j\,108) + (4.2 + j\,11.3)\right] = -201 - j\,225.7$$

Từ pt (10.57)

$$R_C - j\,X_C = (-20.1 - j\,225.7) - (5.16 + j\,12.1) = -25.3 - j\,238$$

$$X_C = \frac{1}{314 \times C}$$

$$C = \frac{10^6}{314 \times 238} = 13.4\ \mu F$$

R_C âm là không thực tế, nên vận hành cân bằng hoàn toàn không xảy ra

(c) s = 0.04

$$\overline{Z}_f = 147\angle 38.2^0 = 115.5 + j\,90.9$$

$$\overline{Z}_b = j250 \,||\left(\frac{7.48}{1.96} + j\,7.2\right)$$

$$= j250 \,||(3.82 + j\,7.2) = 7.92\,\angle 63^0 = 3.6 + j\,7.06$$

$$\overline{Z}_{1a} = (5.16 + j\,12.1) - j\frac{10^6}{314 \times 13.4} = 5.16 - j\,225.6$$

$$\overline{Z}_{1a} / a^2 = 4.86 - j\,204.6$$

$$\bar{Z}_{12} = \frac{1}{2}(4.86 + j\,204.6 + 4.2 + j\,11.3) = 0.24 + j\,108 = 108\angle -89.9^0$$

$$\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_f + \bar{Z}_{12} = 4.2 + j\,11.3$$
$$= 115.5 + j\,90.9$$
$$= 0.24 + j\,108$$
$$= 119.9 + j\,5.8 = 120\angle 2.8^0$$

$$\bar{Z}_{1m} + \bar{Z}_b + \bar{Z}_{12} = 4.2 + j\,11.3$$
$$= 3.6 + j\,7.06$$
$$= 0.24 + j\,108$$
$$= 8.04 + j\,89.64 = 90\angle -84.9^0$$

Thay vào các pt (10.48a) và (10.48b)

$$\bar{I}_{mf} = \frac{151.9\angle -43.6^0 \times 90\angle -84.9^0 + 151.9\angle 43.6^0 \times 108\angle -89.9^0}{120\angle -2.8^0 \times 90\angle -84.9^0 - (108)^2\angle -179.8^0}$$
$$= \frac{22735\angle -82.9^0}{16177\angle -41.6^0} = 1.405\angle -41.3^0 = 1.06 - j\,0.927$$

$$\bar{I}_{mb} = \frac{151.9\angle 43.6^0 \times 120\angle -2.8^0 + 151.9\angle -43.6^0 \times 108\angle -89.9^0}{120\angle -2.8^0 \times 90\angle -84.9^0 - (108)^2\angle -179.8^0}$$
$$= \frac{2506\angle 0.24^0}{16177\angle -41.6^0} = 0.155\angle 41.8^0 = 0.116 - j\,0.103$$

$$T = \frac{2}{157.1} \times \left[(1.405)^2 \times 115.5 - (0.155)^2 \times 3.6\right] = 2.9\ \text{Nm}$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{mf} + \bar{I}_{mb} = 1.06 - j\,0.927$$
$$\underline{0.12 - j\,0.103}$$
$$\underline{1.18 - j\,0.824}$$

$$\bar{I}_a = \frac{j}{a}(\bar{I}_{mf} + \bar{I}_{mb}) = \frac{j}{1.05}(1.06 - j\,0.927 - 0.12 - j\,0.103)$$
$$= \frac{j}{1.05}(0.94 - j\,1.13) = 1.107 + j\,0.895$$

$$\bar{I}_L = \bar{I}_m + \bar{I}_a) = 2.25 - j\,0.205$$

$$I_L = 2.26; \quad pf = 1$$

$$P_m = 2[(1.405)^2 \times 115.5 - (0.155)^2 \times 3.6](1 - 0.04) = 437.8 \text{ W}$$

$$P_{out} = 437.8 - 45 = 392.8 \text{ W}$$

$$P_{in} = 2.26 \times 220 = 497.2 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{392.8}{497.2} = 79\%$$

Động cơ cân bằng 2-pha được cấp điện từ nguồn không cân bằng

Trong động cơ cân bằng 2-pha:

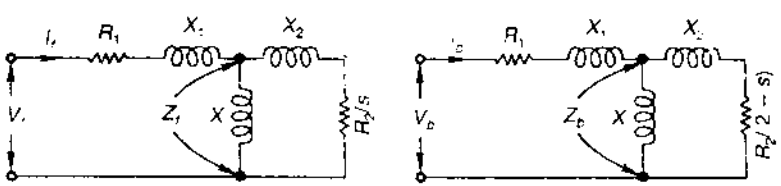
$$a = \frac{N_a}{N_m} = 1$$

$$\overline{Z}_{1a} = \overline{Z}_{1m}$$

Trong pt (10.43b):

$$\overline{Z}_{12} = 0$$

Nghĩa là sự ghép giữa hai mạch động cơ thuận và ngược (Hình 10.25) sẽ triệt tiêu, $\overline{I}_{mf}$ và $\overline{I}_{mb}$ được xác định từ mạch độc lập (Hình 10.27).



(a) Mô hình mạch thành phần thuận (b) Mô hình mạch thành phần ngược

Hình 10.27 *Mô hình mạch động cơ 2-pha cân bằng được cấp điện từ nguồn không cân bằng*

Ví dụ 10.6. Động cơ lồng sóc 2-pha, 4 cực, 1 kW, 220V, 50Hz có các thông số mô hình mạch (Ω/pha) được cho như sau:

$R_1 = 3\ \Omega$ $\qquad$ $R_2 = 2.6\ \Omega$

$X_1 = X_2 = 2.7\Omega$ $\qquad$ $X = 110\ \Omega$

Tổn thất lõi, quạt gió, và ma sát = 200 W

Điện áp cấp được điều chỉnh sao cho:

$$\overline{V}_a = 110\angle 90^0 \quad \text{và} \quad \overline{V}_m = 220\angle 0^0$$

a) Tính moment khởi động và dòng điện khởi động (trong mỗi pha)

b) Tính đặc tính vận hành động cơ ở s = 0.04

c) Động cơ chạy ở s = 0.04, pha a hở mạch, tính điện áp qua pha này.

Giải

Từ các pt (10.38a) và (10.38b) (a = 1)

$$\overline{V}_f = \frac{1}{2}(220 - j\,110\angle 90^0) = 165\text{ V}$$

$$\overline{V}_b = \frac{1}{2}(220 + j\,110\angle 90^0) = 55\text{ V}$$

(a) s = 1

$$\overline{Z}_f = \overline{Z}_b = j\,110 \parallel (2.6 + j\,2.7) = 3.66\angle 47.4^0 = 2.48 + j\,2.69$$

$$\overline{Z}_f(\text{total}) = \overline{Z}_b(\text{total}) = (3 + j\,2.7) + (2.48 + j\,2.69)$$

$$= 5.48 + j\,5.39 = 7.69\angle 44.5^0$$

$$\overline{I}_f = \frac{165}{7.69\angle 44.5^0} = 21.45\angle -44.5^0 = 15.3 - j\,15.03$$

$$\overline{I}_b = \frac{55}{7.69\angle 44.5^0} = 7.15\angle -44.5^0 = 5.1 - j\,5.01$$

$$\overline{I}_s = \frac{2}{157} \times 2.48\,|(21.45)^2 - (7.15)^2| = 12.9\text{ Nm}$$

$$\overline{I}_m = \overline{I}_f + \overline{I}_b = 20.4 - j\,20.04 = 28.6\angle -44.4^0$$

$$I_m = 28.6\text{ A}$$

$$\overline{I}_a = j(\overline{I}_f - \overline{I}_b) = 10.2 + j\,10.02 = 14.3\angle 44.5^0$$

$$I_a = 14.3\text{ A}$$

(b) $$\overline{Z}_f = j110 \parallel \left(\frac{2.6}{0.04} + j\,2.7\right) = 55.1\angle 32.4^0 = 46.5 + j\,29.5$$

$$\overline{Z}_b = j110 \left\| \left(\frac{2.6}{2 - 0.04} + j2.7 \right) \right. = 29.3 \angle 64.5^0 = 1.26 + j2.64$$

$$\overline{Z}_f(\text{total}) = (3 + j2.7) + (46.5 + j29.5) = 49.5 + j32.2 = 59 \angle 33^0$$

$$\overline{Z}_b(\text{total}) = (3 + j2.7) + (1.26 + j2.64) = 4.26 + j5.34 = 6.83 \angle 51.4^0$$

$$\overline{I}_f = \frac{165}{59 \angle 33^0} = 2.79 \angle -33^0 = 2.34 - j1.52$$

$$\overline{I}_b = \frac{55}{6.83 \angle 51.4^0} = 8.05 \angle -51.4^0 = 5.02 - j6.29$$

$$n_s = 1500 \text{ v/ph} \quad \text{hoặc } \omega_s = 157.1 \text{ rad/s}$$

$$T_s = \frac{2}{\omega_s}\left(I_f^2 R_f + I_b^2 R_b\right)$$

$$= \frac{2}{157.1}\left[(2.79)^2 \times 46.5 + (8.05)^2 \times 1.26\right] = 3.57 \text{ Nm}$$

$$\overline{I}_m = \overline{I}_f + \overline{I}_b = (2.34 - j1.52) + (5.02 - j6.29)$$

$$= 7.36 - j7.81 = 10.73 \angle -46.7^0$$

$$\overline{I}_a = j(\overline{I}_f - \overline{I}_b) = j[(2.34 - j1.52) - (5.02 - j6.29)]$$

$$= -4.77 - j2.68 = -5.47 \angle 29.3^0$$

$$I_m = 10.73 \text{ A}; \quad I_a = 5.47 \text{ A}$$

$$P_m = \omega_s(1 - s)T = 157.1(1 - 0.04) \times 3.57 = 538.4 \text{ W}$$

$$P_{out} = 538.4 - 200 = 338.4 \text{ W}$$

$$P_{in}^m = 220 \times 10.73 \times \cos 46.7^0 = 1619 \text{ W}$$

$$P_{in}^a = 220 \times 5.47 \times \cos 29.3^0 = 1049 \text{ W}$$

$$P_{in} = 1619 + 1049 = 2668 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{338.4}{2668} = 12.7\% \text{ (thấp do vận hành không cân bằng)}$$

(c) $$\overline{I}_a = j(\overline{I}_f - \overline{I}_b) = 0$$

$$\overline{I}_f = \overline{I}_b \qquad \text{(i)}$$

$$\overline{V}_m = \overline{V}_{mf} + \overline{V}_{mb} = 220 \text{ V} \qquad \text{(ii)}$$

$$\overline{V}_a = j(\overline{V}_{mf} - \overline{V}_{mb}) = ? \qquad \text{(iii)}$$

$$\overline{I}_f = \frac{\overline{V}_{mf}}{\overline{Z}_f(\text{total})} = \frac{\overline{V}_{mb}}{\overline{Z}_b(\text{total})} = \overline{I}_b$$

$$\frac{\overline{V}_{mf}}{\overline{V}_{mb}} = \frac{\overline{Z}_f(\text{total})}{\overline{Z}_b(\text{total})} \qquad \text{(iv)}$$

$$= \frac{59\angle 33^0}{6.83\angle 51.4^0} = 8.63\angle -18.4^0 \qquad \text{(v)}$$

Giải các pt (ii) và (v)

$$\overline{V}_{mf} = 198.2\angle -1.9^0 = 198.1 - j\,6.6$$

$$\overline{V}_{mb} = 22.96\angle 16.5^0 = 22.01 + j\,6.5$$

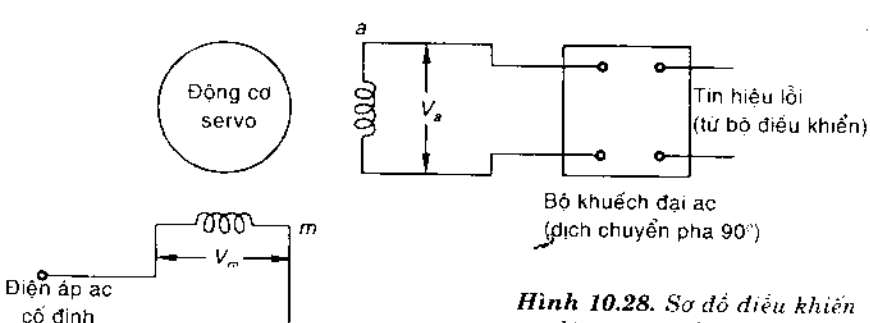
$$\overline{V}_a = j(176.1 - j\,13.10 = 13.1 + j\,176.1 = 176.6\angle 85.7^0$$

$$V_a = 176.6 \text{ V}$$

Góc của V_a gần bằng 90^0

Động cơ trợ động 2-pha (động cơ servo 2-pha)

Đối với ứng dụng điều khiển công suất thấp, động cơ trợ động 2-pha (cân bằng) rất thích hợp, được điều khiển bằng bộ khuếch đại ac. Moment động cơ được điều khiển bằng cách thay đổi điện áp cung cấp vào *pha điều khiển* (pha



Hình 10.28. *Sơ đồ điều khiển động cơ trợ động 2-pha.*

a) của động cơ (Hình 10.28). Pha thứ hai (pha chính m) là *pha chuẩn so sánh* được kích thích với điện áp đồng bộ ac cố định. Cả hai điện áp trên hai pha được cấp từ một nguồn (để thiết lập từ trường quay trong khe hở không khí). Điện áp pha điều khiển được dịch pha 90^0 so với điện áp pha chuẩn bằng mạch dịch pha ở trong các tầng khuếch đại điện áp của bộ khuếch đại. Moment động cơ đảo chiều bằng cách đảo pha của điện áp pha điều khiển.

Đối với vận hành ổn định tuyến tính, đặc tuyến moment - vận tốc của động cơ trợ động phải tuyến tính với độ dốc âm (moment giảm khi vận tốc tăng). Đặc tuyến moment - vận tốc của động cơ cảm ứng bình thường không tuyến tính, đặc tuyến không ổn định với tải bình thường trong vùng vận tốc từ zero đến vận tốc ở moment đánh thùng. Đây là vùng vận hành hữu dụng của động cơ trợ động với hệ thống điều khiển dương. Đặc tuyến tuyến tính theo mong muốn sẽ đạt được trong động cơ khi rotor được thiết kế với điện trở cao để moment cực đại xảy ra ở độ trượt - 0.5. Điện trở cao còn tác động đến đặc tính quan trọng khác, không hình thành moment 1-pha gây nhiễu đặc tuyến điều khiển của động cơ.

Moment 1-pha được tính theo pt (10.9):

$$T(1-\text{pha}) = \frac{I_m^2}{2\omega_s}\left(R_f - R_b\right)$$

Khi rotor có điện trở lớn, $R_f \approx R_b$, moment này gần như bằng zero.

Đặc tuyến moment - vận tốc của động cơ trợ động với các giá trị điện áp pha a được vẽ trên Hình 10.29. Nếu điện áp pha chuẩn là $V_m \angle 0^0$, điện áp pha điều khiển là:

$$\overline{V}_a = aV_m \angle 90^0; \qquad a = \text{biến số}.$$

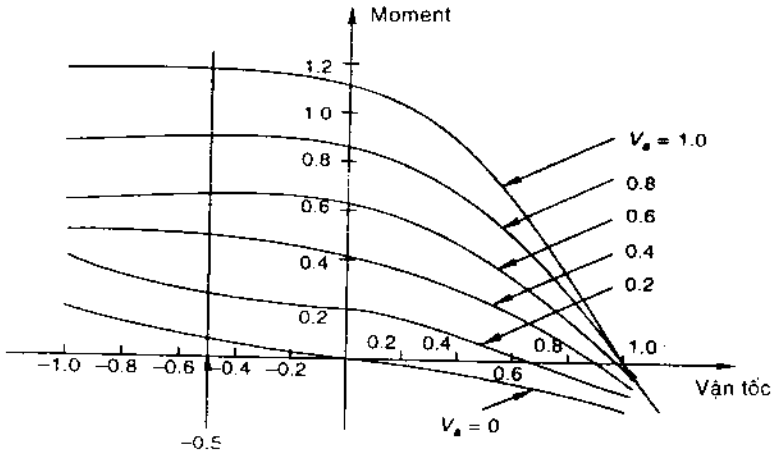
$$V_{mf} = \frac{V_m}{2}(1+a) \tag{10.58a}$$

$$V_{mb} = \frac{V_m}{2}(1-a) \tag{10.58b}$$

Động cơ được kích thích với kiểu điện áp không cân bằng đặc biệt, góc lệch pha 90^0 duy trì cố định, trong khi điện áp pha a thay đổi. Đặc tuyến moment-vận tốc tương ứng (Hình 10.29) gần như tuyến tính với vận tốc động cơ và điện áp pha a.

Dựa vào giả thiết tuyến tính, có thể xác định các quan hệ:

$$T = KV_a - f\omega \tag{10.59a}$$



Hình 10.29 *Đặc tuyến moment-vận tốc của động cơ trợ động; V_a biến thiên, hiệu số pha 90° (tốn định)*

với ω = vận tốc rotor

$$T = J\omega + f_0\omega \tag{10.59b}$$

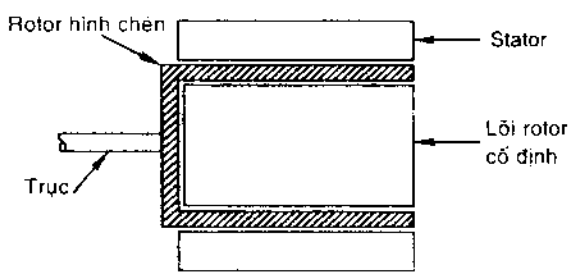
với J = quán tính động cơ; f_0 = ma sát nhớt của động cơ.

Biến đổi Laplace pt (10.59a), (10.59b), hàm truyền của động cơ:

$$G_M(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{Js + (f_0 + f)} = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}$$

Với $K_m = K/(f_0 + f)$ = hằng số khuếch đại động cơ.

$\tau_m = j/(f_0 + f)$ = thời hằng động cơ.



Hình 10.30 *Sơ đồ cấu trúc động cơ trợ động rotor hình chén*

Trong các động cơ trợ động công suất định mức dưới vài watt, có thể đạt được quán tính thấp bằng cách sử dụng rotor hình chén (Hình 10.30) với lõi rotor cố định.

Động cơ trợ động ac có nhiều ưu điểm so với động cơ dc - mạch điều khiển sử dụng bộ khuếch đại ac, quán tính rotor thấp (đáp ứng nhanh), cấu trúc rotor cho phép ít bảo trì, không có chổi quét trên vòng trượt,... Rotor chịu được nhiệt độ cao, không cần cách nhiệt.

Máy đo vận tốc quay ac (Tachometer)

Hệ thống điều khiển (sóng mang) ac thường cần tín hiệu hồi tiếp tần số sóng mang có biên độ tỷ lệ với vận tốc. Máy đo vận tốc quay ac cung cấp các tín hiệu này. Máy đo vận tốc quay ac thường là động cơ cảm ứng 2-pha; với pha (m) được kích thích từ tần số sóng mang và cuộn dây pha a hở mạch (Hình 10.31). Để có quán tính thấp, cấu trúc rotor hình chén thường được sử dụng. Điện áp trên pha a tỷ lệ với vận tốc rotor và pha a có độ dịch pha gần 90^0 (Ví dụ 10.5).

Đối với cuộn dây 2-pha cân bằng:

$$\overline{Z}_{1a} / a^2 = Z_{1m}$$

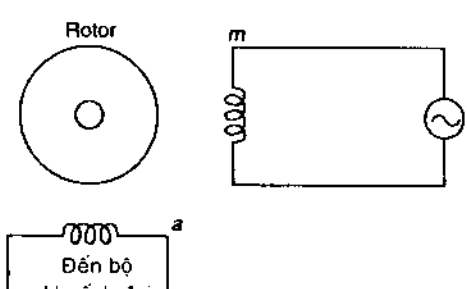
Với pha a hở mạch

$$\overline{I}_a = j\left(\overline{I}_f - \overline{I}_b\right) = 0 \qquad (10.60)$$

$$\overline{I}_f = \overline{I}_b \qquad (10.61)$$

$$\frac{\overline{V}_{mf}}{\overline{V}_{mb}} = \frac{\overline{Z}_f(\text{tổng})}{\overline{Z}_b(\text{tổng})} = \overline{A}_z$$

$$V_m\angle 0^0 = \overline{V}_{mf} + \overline{V}_{mb}$$



Hình 10.31 *Sơ đồ máy đo vận tốc quay hai pha*

$$\overline{V}_{mb} = \frac{V_m}{1 + \overline{A}_z}$$

$$\overline{V}_{mf} = \frac{V_m \overline{A}_z}{1 + \overline{A}_z}$$

$$\overline{V}_a = j\left(\overline{V}_{mf} - \overline{V}_{mb}\right) = jV_m\left(\frac{1 - \overline{A}_z}{1 + \overline{A}_z}\right)$$

Vì $\overline{Z}_f$ (tổng) và $\overline{Z}_b$ (tổng) phụ thuộc vận tốc (độ trượt), nên $\overline{A}_z$ cũng phụ thuộc vận tốc (độ trượt), do đó V_a cũng phụ thuộc vận tốc (theo phương trình trên). Với X_2/R_2 (rotor) rất lớn hoặc rất nhỏ, quan hệ V_a - vận tốc đều tuyến tính. X_2/R_2 thấp có độ nhạy vận tốc thấp nhưng có khoảng tuyến tính rộng và ngược lại. Giá trị khoảng giữa của X_2/R_2 thường đáp ứng hầu hết các yêu cầu kỹ thuật. Độ dịch pha hơi nhỏ hơn 90^0, nhưng không nhạy với vận tốc.

Máy đo vận tốc quay ac được dùng với hệ thống điều khiển 400 Hz. Cấu trúc chính xác cao là cần thiết để bảo đảm độ đồng tâm và tránh ghép nối trực tiếp giữa hai cuộn dây hai pha.

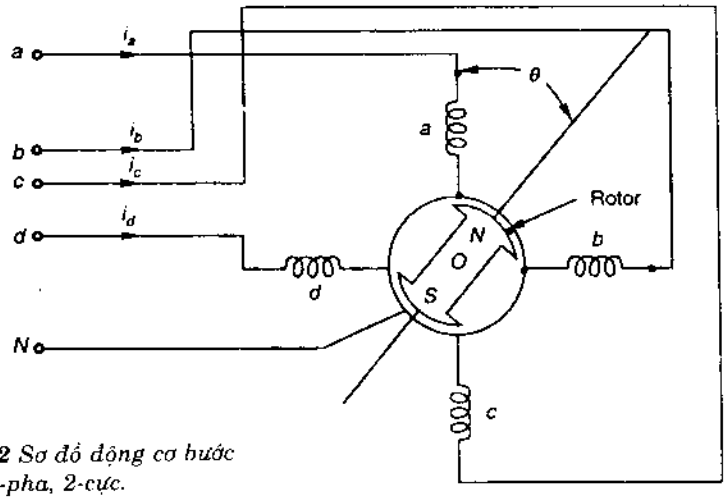
Động cơ bước

Động cơ bước là loại động cơ đồng bộ đặc biệt được thiết kế để quay theo góc xác định (bước) với mỗi xung điện được cấp từ bộ điều khiển. Các bước thường dùng là 7.5^0, 15^0 hoặc lớn hơn. Động cơ bước được dùng trong hệ thống điều khiển vị trí dạng số (digital) theo chế độ hở. Các lệnh vào là dạng dãy xung làm quay trục theo góc xác định.

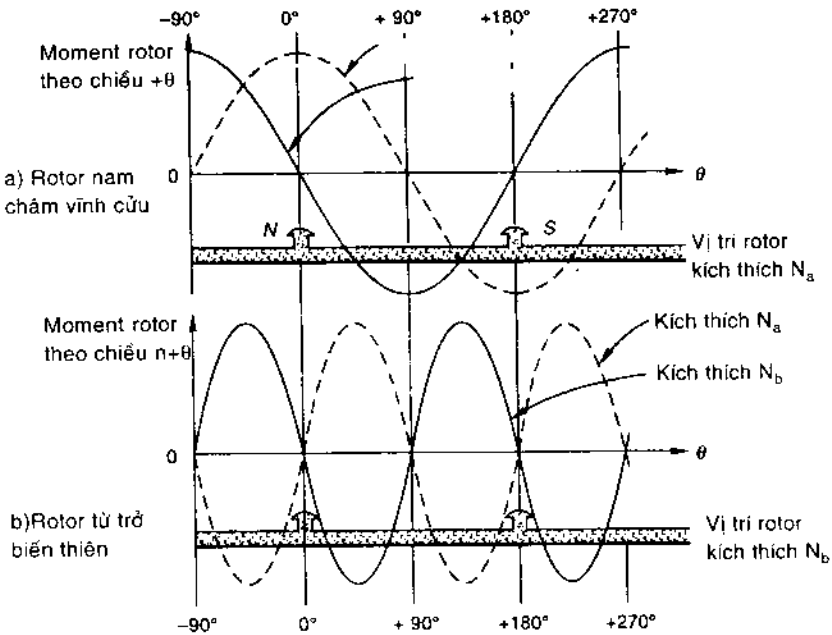
Sử dụng động cơ bước có hai ưu điểm. Một là tương thích với hệ thống số (digital); hai là không cần bộ cảm biến vị trí và vận tốc, mà nhận trực tiếp bằng cách đếm xung vào và đếm tuần hoàn nếu cần thông tin vận tốc. Động cơ bước có phạm vi ứng dụng rộng, các động cơ đưa giấy vào máy in, đầu ghi trong ổ đĩa cứng và mềm, chuyển vị đầu in, ... Phạm vị ứng dụng tăng lên khi các động cơ này có công suất lớn hơn và giá thành ngày càng giảm.

Sự vận hành cơ bản của động cơ bước 4-pha với rotor hai cực lồi được minh họa trên Hình 10.32. Giả sử rotor được kích thích bằng nam châm vĩnh cửu.

Rotor thẳng hàng với trục từ trường stator, moment tỷ lệ với sinθ, θ là góc dịch chuyển giữa trục rotor và trục từ trường stator. Đặc tuyến moment - góc được nêu trên Hình 10.33 (a) với pha a và pha b đều được kích thích. Giả sử rotor ở vị trí $\theta = 0^0, 45^0, 90^0$ khi pha a, a + b, b... được kích thích. Vị trí ổn định



Hình 10.32 *Sơ đồ động cơ bước 4-pha, 2-cực.*



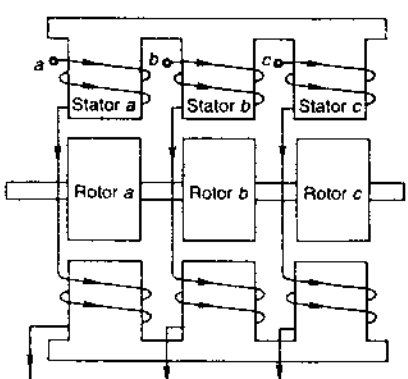
Hình 10.33 *Đặc tuyến góc - moment của động cơ bước*

của rotor tương ứng với góc có moment bằng zero và moment dương với góc nhỏ hơn hoặc âm với góc lớn hơn. Do đó, với pha a được kích thích, vị trí ổn định là $\theta = 0^0$, nhưng không ổn định ở $\theta = 180^0$, và moment có giá trị cực đại ở $\theta = 90^0$. Mỗi kích thích pha tương ứng với một vị trí rotor duy nhất. Mô hình kích thích cuộn dây pha theo các bước 22.5^0, 11.25^0 và nhỏ hơn trên mỗi xung vào mạch. Đặc tính thứ hai của động cơ bước (rotor nam châm vĩnh cửu) là khi kích thích, sẽ đến đúng vị trí, thuận tiện trong các ứng dụng chính xác.

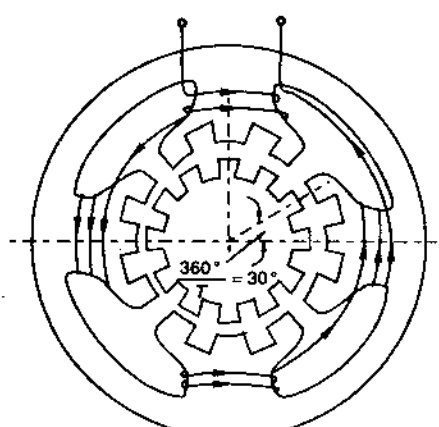
Xét rotor cực lồi được làm bằng vật liệu sắt từ (không phải nam châm vĩnh cửu), loại động cơ này hoạt động tương tự động cơ từ trở biến thiên. Rotor sắt từ tìm vị trí có từ trở cực tiểu với trường stator. Trên Hình 10.32, có thể thấy với pha a kích thích, điều này xảy ra ở $\theta = 0^0$ và 180^0 là vị trí moment trên rotor bằng zero. Ở $\theta = 90^0$, rotor có từ trở vô hạn (∞) đến trục pha a và moment ở đó cũng bằng zero. Do đó moment rotor là hàm sin 2θ (Hình 10.33(b)). Nhìn từ phía stator, có hai kích thích khá dĩ đối với vị trí rotor đã cho.

Động cơ bước từ trở biến thiên

Động cơ loại này gồm một hoặc nhiều chồng stator, các rotor - stator có chung khung máy và các rotor có chung một trục (Hình 10.34). Cấu tạo các rãnh và rãnh rotor - stator được nêu trên Hình 10.35. Cỡ răng và số răng của rotor và stator bằng nhau, trên Hình này chúng được sắp thẳng hàng với nhau. Các stator có các xung kích thích, trong khi rotor không kích thích.

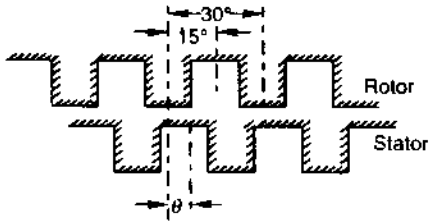


Hình 10.34. *Tiết diện dọc của động cơ từ trở biến thiên ba chồng.*

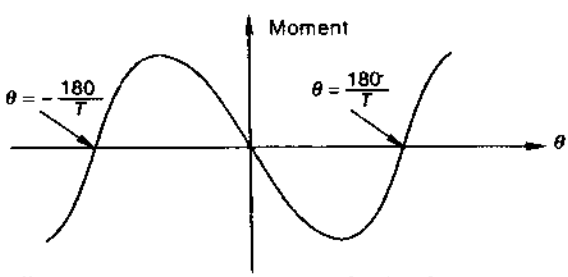


Hình 10.35. *Mặt sau của stator và rotor (12 răng) của động cơ từ trở nhiều chồng.*

Xét riêng cặp rotor và stator trên sơ đồ khai triển (Hình 10.36). Khi kích thích stator, rotor bị kéo đến vị trí trở kháng cực tiểu gần nhất, là vị trí có các răng rotor và stator thẳng hàng). Moment tĩnh tác động trên rotor là hàm của góc lệch θ. Có hai vị trí moment bằng zero là θ = 0, răng rotor và stator thẳng hàng, và θ = 360^0/ (2 x T) = 180^0/ T, với T = số răng rotor, răng rotor và stator thẳng hàng. Dạng đặc tuyến moment tĩnh - góc của một chồng trong động cơ bước được nêu trên Hình 10.37, gần như có dạng hàm sine. Vị trí các răng thẳng hàng khi θ = 0 là vị trí ổn định, còn vị trí răng - rãnh thẳng hàng khi θ = 180^0/ T là không ổn định, nghĩa là ở vị trí θ = 180^0/T, chiều quay rotor bị tác động từ thành phần nhiễu. Rotor bị khóa vào stator ở vị trí θ = 0^0 (hoặc bội số của 360^0/ T). Đặc tuyến moment - vận tốc động lực khác với đặc tuyến trên do lực điện động cảm ứng tốc độ trong các cuộn dây stator.



Hình 10.36. *Sơ đồ các răng của cặp rotor - stator.*



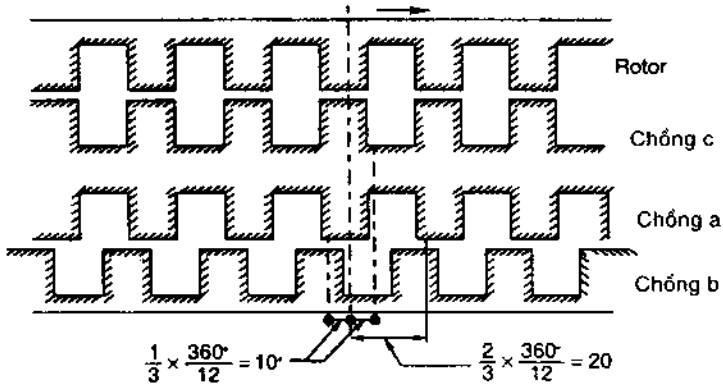
Hình 10.37 *Đường cong góc - moment tĩnh của chông rotor - stator trong động cơ bước.*

Khi mọi rotor có các răng thẳng hàng, và có n stator được xếp chồng, các răng stator có vị trí khác nhau theo chuyển vị góc:

$$\alpha = \frac{360^0}{nT} \qquad (10.63)$$

Hình 10.38 minh họa sơ đồ khai triển động cơ bước, 3 chồng, theo vị trí, tại đó các răng rotor chồng c thẳng hàng với stator.

$$\alpha = \frac{360^0}{3 \times 12} = 10^0 \qquad (10.64)$$

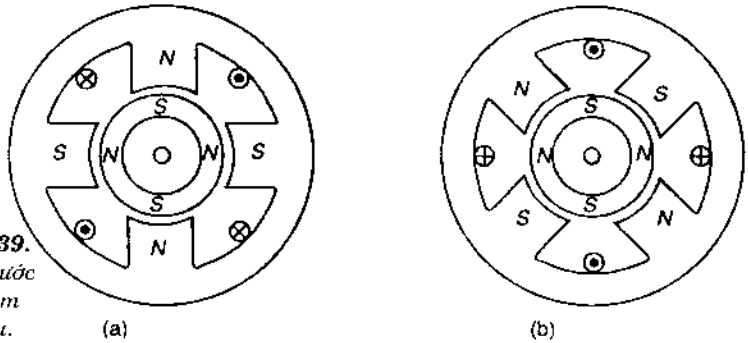


Hình 10.38 *Khai triển các chồng rotor - stator của động cơ bước ba chồng.*

Trong rotor nhiều chồng, số pha bằng số chồng. Nếu pha a stator được kích xung điều khiển, rotor sẽ quay với góc 10^0 theo chiều mũi tên trên Hình. Nếu pha b được kích thích, rotor sẽ chuyển động 10^0 ngược chiều với mũi tên trên Hình. Chuỗi xung theo thứ tự abcab làm cho rotor chuyển động theo các bước 10^0 với chiều mũi tên, còn thứ tự bacba sẽ làm cho rotor quay theo chiều ngược lại. Sự điều khiển trực tiếp chỉ có thể thực hiện với không dưới ba pha.

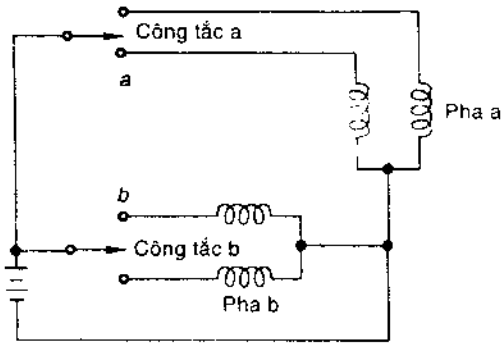
Động cơ nam châm vĩnh cửu

Hình 10.39 minh họa các pha (xếp chồng) của động cơ bước 2-pha, 4 cực, nam châm vĩnh cửu. Rotor bằng vật liệu ferit hoặc đất hiếm được từ hóa vĩnh cửu. Pha b trên chồng stator lệch với pha a theo góc 90^0. Khi kích thích pha a, các cực rotor - stator thẳng hàng (Hình 10.39(a)). Nếu pha b cũng được kích thích, các cực stator hiệu dụng sẽ dịch chuyển ngược chiều kim đồng hồ theo



Hình 10.39. *Động cơ bước nam châm vĩnh cửu.*

Hình 10.40. Sơ đồ chuyển mạch động cơ nam châm vĩnh cửu 2-pha.



góc 22 ½^0 (Hình 10.39b), và rotor sẽ chuyển động tương ứng. Nếu khử kích thích pha a (pha b vẫn được kích thích), rotor sẽ chuyển động tiếp 22½^0. Đảo chiều dòng điện pha a sẽ tạo ra chuyển động thuận 22 ½^0. Do đó, dễ dàng hình dung phương pháp đảo chiều chuyển động rotor.

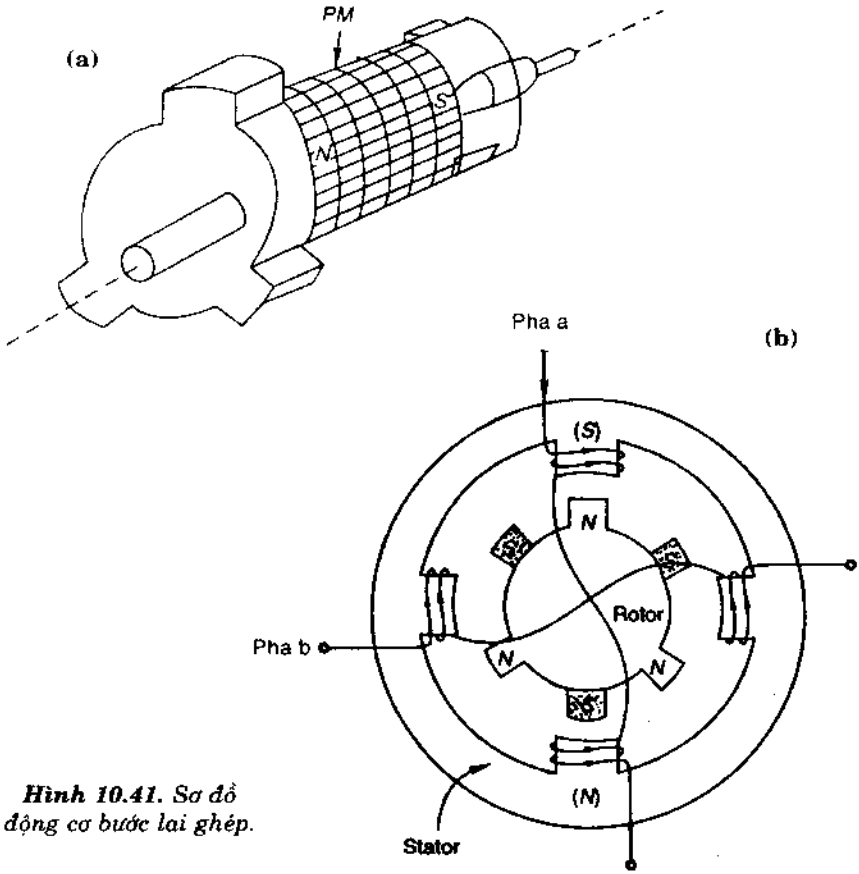
Để đơn giản hóa quy trình chuyển mạch với mạch điện tử, có thể mắc hai cuộn dây cho từng pha. Sơ đồ chuyển mạch được nêu trên Hình 10.40.

So với động cơ từ trở biến thiên, động cơ bước nam châm vĩnh cửu thường vận hành với bước lớn hơn, có thể đến 90^0, và tốc độ đáp ứng cực đại đến 300 xung/s.

Động cơ bước lai ghép

Thực chất động cơ này là động cơ bước nam châm vĩnh cửu với đặc tính cấu trúc xếp chồng răng rotor theo kiểu động cơ từ trở. Stator chỉ có một bộ các cực từ dây quấn kích thích tương tác với hai chồng rotor. Nam châm vĩnh cửu được đặt dọc trục rotor có dạng mặt trụ hình khuyên trên trục động cơ. Các chồng ở hai đầu rotor được tạo răng. Tất cả các răng ở một đầu rotor trên một chồng có cùng cực tính và các răng được xếp chồng ở đầu kia rotor có cực tính ngược lại. Hai bộ răng này lệch nhau nửa bước răng (còn gọi là bước cực). Cấu trúc chi tiết được nêu trên Hình 10.41 a và b, với mỗi chồng có 3 răng, nên bước răng $\gamma_t = 360^0/3 = 120^0$. Động cơ này có một stator, 2-pha, 4-cực.

Xét pha a stator kích thích để cực từ đỉnh stator là cực từ Nam và cực từ đáy stator là cực từ Bắc. Khi răng gần nhất của chồng phía trước (giả sử là cực từ Bắc) được kéo vào vị trí khóa với cực từ Nam stator (đỉnh); đồng thời ở phía đáy stator, răng rotor (cực tính Nam) được khóa vào cực Bắc stator. Rotor ở vị trí này, có lực đẩy cân bằng nhau, nên đây là vị trí ổn định và tổng moment trên rotor bằng zero.



Hình 10.41. *Sơ đồ động cơ bước lai ghép.*

Nếu kích thích chuyển từ pha a đến pha b, cực từ stator bên phải là cực từ Nam và cực từ bên trái là cực Bắc, rotor sẽ quay ngược chiều kim đồng hồ theo góc $\gamma_t / 4 = 120^0/4 = 30^0$ để đến vị trí khóa mới. Rotor sẽ quay theo chiều kim đồng hồ nếu pha b được kích thích ngược chiều. Rotor quay cùng chiều với moment.

Nếu loại bỏ kích thích stator, rotor vẫn tiếp tục giữ vị trí khóa như cũ. Động cơ lai ghép có bước chính xác hơn động cơ nam châm vĩnh cửu, khi tăng số răng xếp chồng và cộng thêm cặp xếp trên rotor. Ví dụ với chồng 7 răng, bước chuyển động là $(360^0/7)/ 4 = 12.75^0$. So với động cơ từ trở biến thiên, động cơ lai ghép có dòng điện kích thích stator nhỏ hơn nhiều, vì rotor được kích thích bằng nam châm vĩnh cửu.

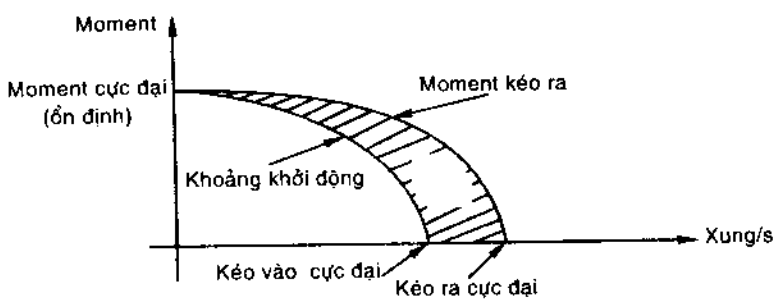
Trong động cơ lai ghép, có thể đạt được nửa bước bằng cách kích thích pha a rồi kích thích pha b trước khi ngắt kích thích pha a và tiếp tục. Bước bất kỳ đều thực hiện được bằng cách kích thích hai pha theo tỷ lệ phù hợp.

Động cơ bước lai ghép có các bước góc thường dùng là 15^0, 7.5^0, 2^0 và 0.72^0. Việc chọn các bước phụ thuộc vào độ phân giải góc được yêu cầu trong ứng dụng.

Moment và tốc độ xung

Khi tốc độ bước tăng, rotor có thời gian truyền động tải từ vị trí này đến vị trí kế tiếp ngắn hơn sự dịch chuyển dòng điện trong dây quấn stator. Vượt quá tốc độ xung xác định (xung/s), động cơ không thể chuyển động theo xung điều khiển và bắt đầu bỏ qua các xung. Khoảng khởi động được nêu trên Hình 10.42, trong đó vị trí tải tuân theo tốc độ xung, nhưng không thể khởi động, dừng hoặc đảo chiều theo lệnh xung. Tốc độ xung cực đại phải tăng khi giảm tải. Động cơ từ trở biến thiên có thể vận hành với tốc độ đáp ứng vị trí cực đại đến 1200 xung/ s.

Sự bỏ qua bước cũng có thể xảy ra nếu biên độ dao động của động cơ quá lớn ở vị trí khóa.

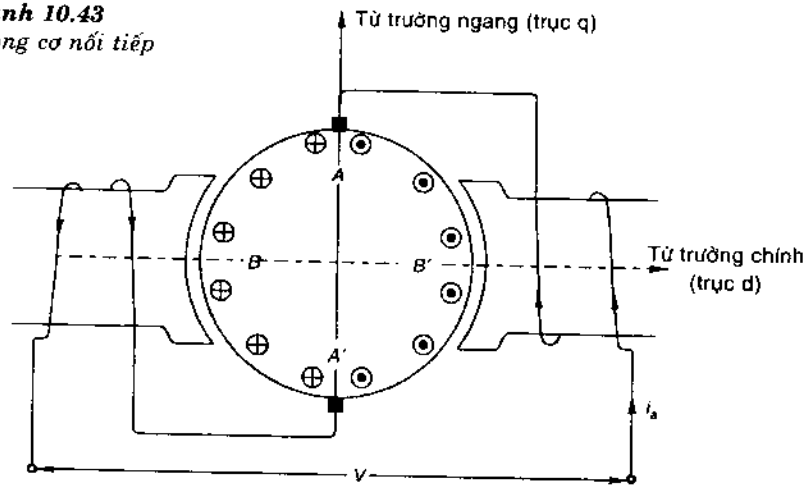


Hình 10.42. *Quan hệ moment - xung/s của động cơ bước.*

Động cơ nối tiếp - Động cơ vạn năng

Động cơ nối tiếp có thể chạy với nguồn điện dc hay ac (1-pha), nhưng các lõi rotor và stator phải được ghép bằng lá sắt từ để giới hạn tổn thất sắt. Hình 10.43 minh họa mặt cắt ngang động cơ nối tiếp có điện nguồn ac. Khi dòng điện phần ứng xoay chiều, cực tính từ trường cũng xoay chiều đồng pha (Hình 10.44) và hình thành moment ($\propto \phi i_a$) đơn hướng (dương) với thành phần đập mạch trên và ngang giá trị trung bình. Thành phần moment đập mạch được lọc từ quán tính tải và rotor sao cho các xung vận tốc hầu như không đáng kể.

Hình 10.43
Động cơ nối tiếp



Phần ứng mang dòng điện tạo ra từ thông ngang theo trục q (trục ngang) trong không gian vuông góc với từ thông chính (trục d). Hai phần từ thông này vuông góc và xoay chiều theo tần số điện nguồn. Mỗi phần từ thông này cảm ứng lực điện động quay và lực điện động tĩnh (biến áp) trong phần ứng.

Lực điện động của từ trường chính (trục d)

Trong trường hợp dc, lực điện động quay được cảm ứng trong dây quấn phần ứng bổ sung vào giá trị cực đại ở chổi quét trục q. Lực điện động xoay chiều đồng dạng với từ thông/cực từ. Cường độ lực điện động này là cực đại trong cuộn dây BB' (Hình 10.43) và là zero trong cuộn dây AA' dưới chổi quét, do đó không ảnh hưởng đến sự chuyển mạch.

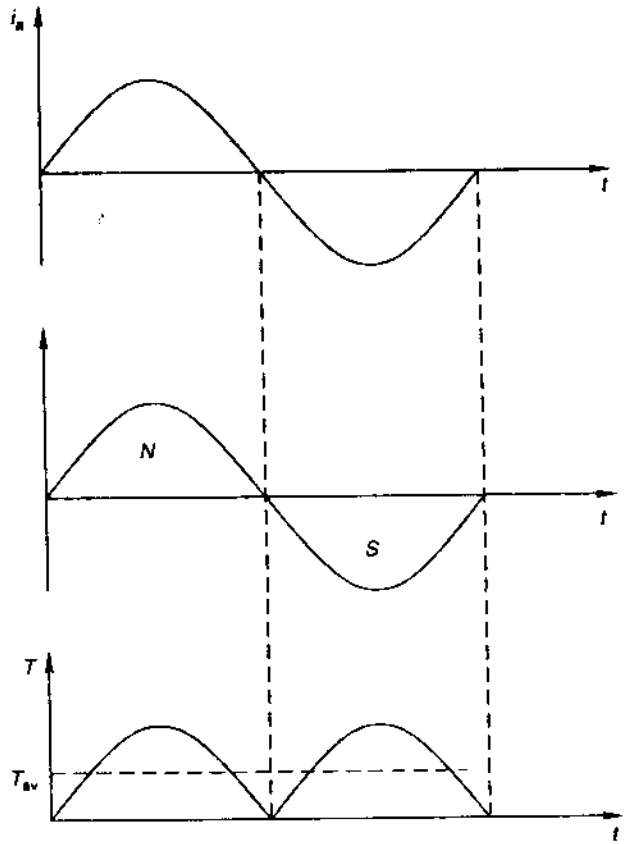
Do biến thiên thời gian của từ thông/cực từ, phần lực điện động biến áp (tĩnh) được cảm ứng trong cuộn dây phần ứng, bổ sung cho giá trị zero chung ở chổi quét. Các lực điện động này có giá trị zero trong cuộn BB' và giá trị cực đại trong cuộn dây AA'. Vì cuộn dây AA' ngắn mạch do chổi quét, sự chuyển mạch gây ra đánh lửa ở chổi quét.

Giá trị hiệu dụng của lực điện động quay được tạo nên bởi từ trường chính là:

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\Phi nZ}{60} \times \left(\frac{P}{A}\right) \qquad (10.65)$$

với Φ = giá trị cực đại của từ thông/ cực từ.

Lực điện động này cùng pha với pha từ thông chính.



Hình 10.44 *Moment trong động cơ nối tiếp kích thích ac*

Lực điện động của từ trường ngang (từ trường trục q)

Lực điện động quay được tạo ra do từ trường ngang (trục q) cảm ứng lực điện động zero ở chổi quét. Lực điện động này bằng zero trong cuộn dây BB' và cực đại trong cuộn dây AA', trong quá trình chuyển mạch có gây nhiễu.

Mặt khác, lực điện động biến áp của cuộn dây phần ứng bổ sung giá trị xác định và biến đổi xoay chiều sớm pha hơn từ thông ngang theo góc 90^0. Lực điện động này có cực đại trong cuộn dây BB' và bằng zero trong cuộn dây AA', không ảnh hưởng đến sự chuyển mạch.

Giá trị hiệu dụng của lực điện động biến áp E_t ở chổi quét được tính như sau:

$$E_t = \sqrt{2}\pi K_b f \Phi_a N_p \qquad (10.66)$$

với N_p = số vòng dây/ đường dẫn song song

Φ_a = từ thông (ngang) phần ứng.

K_b = hệ số không gian, dù các lực điện động cuộn dây đồng pha, nhưng đại lượng này thay đổi theo hàm cosine của góc giữa trục cuộn dây và trục chổi quét.

$$K_b = 2/\pi$$

Từ đó:

$$E_t = 2\sqrt{2} f \Phi_a N_p \qquad (10.67)$$

Tỉ số giữa lực điện động biến áp và lực điện động quay:

$$\frac{E_t}{E_a} = \frac{2\sqrt{2} f \Phi_a N_p}{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right)}$$

$$N_p = \frac{Z}{2A}$$

$$\frac{E_t}{E_a} = \frac{120 f \Phi_a}{nP\Phi} = \frac{n_s}{n} \cdot \frac{\Phi_a}{\Phi} \qquad (10.68)$$

với E_t = lực điện động biến áp.

E_a = lực điện động quay.

$n_s = \frac{120f}{P}$ = tốc độ đồng bộ .

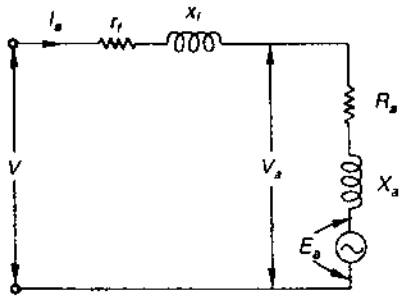
Mô hình mạch và sơ đồ pha

Lực điện động cảm ứng trong phần ứng là tổng lực điện động biến áp và lực điện động do điện cảm rò (x_a):

$$j\bar{I}_a x_a + j\bar{E}_t = j\bar{I}_a(x_a + j\bar{E}_t / \bar{I}_a)$$

Do E_t được tạo ra bởi từ thông ngang có nguồn gốc từ dòng điện phần ứng, E_t và I_a phải cùng pha:

$$\bar{E}_t / \bar{I}_a = x_{at}$$



Hình 10.45 *Mô hình mạch động cơ nối tiếp vận hành ac*

Do đó, lực điện động cảm ứng trong mạch phần ứng là:

$$j\bar{I}_a(x_a + x_{at}) = j\bar{I}_a X_a$$

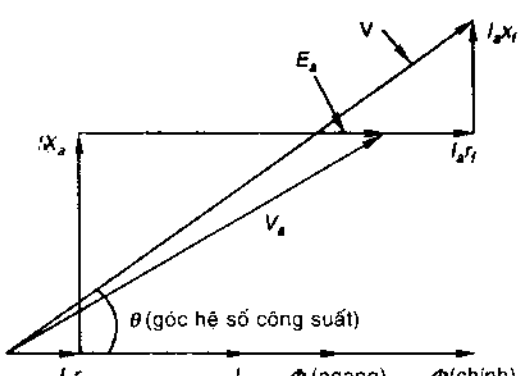
$$X_a = x_a + x_{at} \tag{10.69}$$

Mô hình mạch động cơ nối tiếp với vận hành ac được nêu trên Hình 10.45, với r_f, x_f là điện trở và điện kháng trường

Từ mô hình mạch trên Hình 10.45

$$\bar{V} = \bar{I}_a(r_f + jx_f) + \bar{I}_a(r_a + jX_a) + \bar{E}_a \tag{10.70}$$

Sơ đồ pha tương ứng được nêu trên Hình 10.46. Pha từ thông $\bar{\Phi}$ (chính) và $\bar{\Phi}$ (ngang) được giả thiết là cùng pha với dòng điện động cơ $\bar{I}_a$. Tuy nhiên, trong thực tế $\bar{I}_a$ sớm pha hơn từ thông một góc nhỏ do tổn thất dòng điện xoáy và từ trễ của động cơ.



Hình 10.46 *Sơ đồ pha của động cơ nối tiếp vận hành ac*

Moment hình thành

Như đã đề cập, moment này về bản chất có dạng xung với giá trị trung bình và thành phần sóng hài thứ hai là chủ yếu.. Moment trung bình có biểu thức:

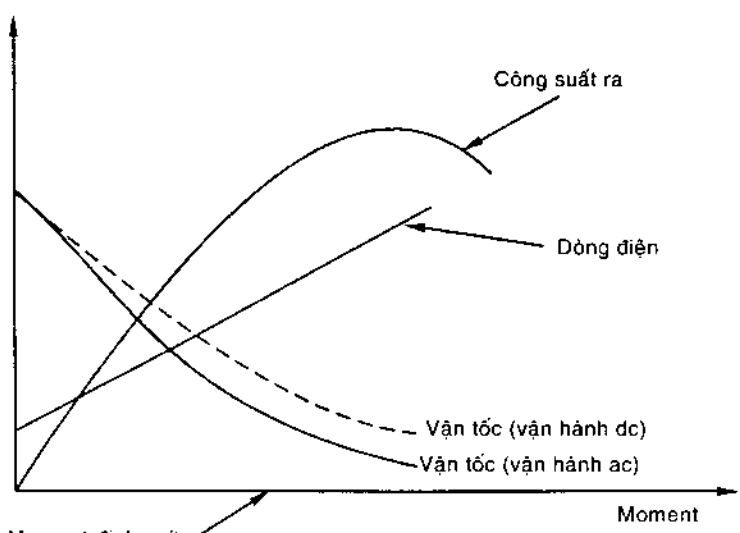
$$T_{av}\omega_m = E_a I_a \qquad (10.71)$$

Với động cơ nối tiếp, E_a tương ứng theo I_a (giả sử mạch từ tuyến tính), moment tỷ lệ với bình phương dòng điện phần ứng, trở thành tỷ lệ thuận khi dòng điện phần ứng lớn do sự bão hòa mạch từ.

Đặc tuyến vận hành

Hình 10.47 minh họa đặc tuyến vận hành của động cơ nối tiếp vận hành ac. Đặc tuyến vận tốc - moment là dạng nối tiếp tiêu biểu. Đặc tuyến với vận hành dc là đường nét đứt, cao hơn đường vận hành ac. Vì có sụt áp trên điện kháng $I_a(x_f + X_a)$ trong vận hành ac, nên E_a và vận tốc thấp hơn đối với dòng điện và moment cho trước. Hệ số công suất của động cơ nối tiếp vận hành ac kém hơn vì điện kháng nối tiếp $(x_f + X_a)$ lớn.

Vận tốc không tải của động cơ vạn năng, không như các máy điện khác, rất cao (đến 20000 v/ph). Động cơ có kích cỡ nhỏ hơn các loại khác có cùng

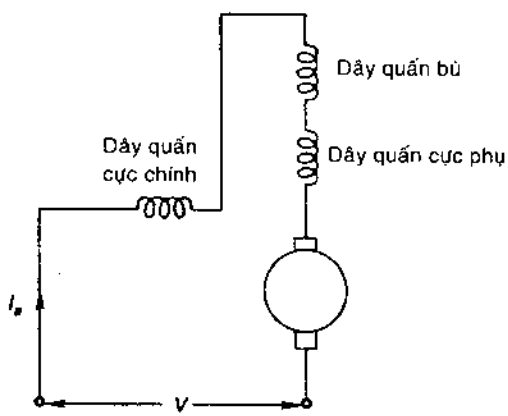


Hình 10.47 *Đặc tuyến vận hành động cơ nối tiếp*

định mức tải. Động cơ vạn năng được dùng với tải nhẹ, như máy hút bụi, dụng cụ cầm tay ... vận hành với vận tốc cao (1500 - 15000 v/ph).

Dây quấn cực phụ và dây quấn bù

Để cải thiện hệ số công suất của động cơ nối tiếp, từ thông ngang, chủ yếu chịu trách nhiệm về điện kháng phần ứng, phải được khử bằng cuộn dây bù mắc nối tiếp với mạch phần ứng. Trục cuộn dây này dọc theo trục chổi quét và dây quấn phải trải rộng trên toàn bước cực để có sự trung hòa từ thông ngang một cách hiệu quả. Tương tự máy điện dc, cuộn dây cực phụ phải hiệu quả trên vùng liên cực hẹp. Sơ đồ nối dây của các dây quấn stator và phần ứng được nêu trên Hình 10.48.



Hình 10.48 *Dây quấn stator trong động cơ nối tiếp vận hành ac*

Ví dụ 10.7. Động cơ vạn năng (vận hành ac) có phần ứng hai cực với 960 vòng dây. Với tải xác định, vận tốc động cơ là 5000 v/ph và dòng điện phần ứng là 4.6A. Điện áp và công suất vào phần ứng là 100V và 300 W

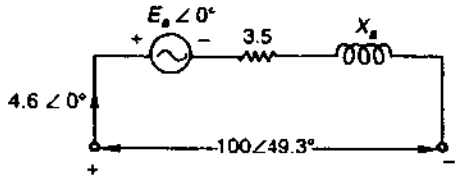
Giả sử điện trở phần ứng là 3.5 Ω. Hãy tính:

(a) Điện kháng phần ứng hiệu dụng.

(b) Giá trị cực đại của từ thông/cực từ.

Giải

Điều kiện vận hành với điện áp và dòng điện trong mạch phần ứng được nêu trên Hình 10.49.



Hình 10.49. *Mạch điện minh họa Ví dụ 10.7.*

$100 \times 4.6 \cos \phi = 330$ W

$$\phi = 49.3^0$$

(trễ pha do bản chất phản ứng trong mạch)

(a) Từ mạch trên, có thể viết:

$$\frac{100\angle 49.3^0 - E_a\angle 0^0}{3.5 \times jX_a} = 4.6\angle 0^0$$

$\overline{E}_a$ cùng pha với $\overline{I}_a$

$$65.2 + j\,75.8 - E_a = 16.1 + j\,4.6\,X_a$$

Cân bằng phần thực và phần ảo:

$$E_a = 65.2 - 16.1 = 49.1 \text{ V}$$

$$X_a = \frac{75.8}{4.6} = 16.5\,\Omega$$

(b) $$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Phi n Z}{60}\left(\frac{P}{A}\right) = 16.5\,\Omega$$

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \times 49.1 \times 60}{5000 \times 960} = 0.868 \text{ mWb}$$

Chương 11

Điều khiển động cơ bằng các bộ chuyển đổi công suất

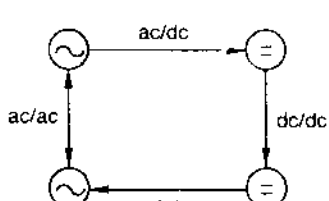
Giới thiệu

Điện tử công suất là công nghệ đa ngành sử dụng các linh kiện bán dẫn công suất, các mạch chuyển đổi, máy điện, điện tử tín hiệu, lý thuyết điều khiển, máy vi tính, các mạch tích hợp mức cao, các kỹ thuật CAD/CAM ... Công suất điện được xử lý bằng điện tử công suất để điện năng thích hợp với nhiều ứng dụng, chẳng hạn nguồn ac và dc có điều chỉnh điện áp, gia công điện hóa, điều khiển cấp nhiệt và chiếu sáng, truyền động máy điện, nung nóng bằng cảm ứng, hàn điện tử, lọc tích cực đường dây tải điện, ... Điều quan trọng trong điện tử công suất là bảo toàn năng lượng, nhằm sử dụng điện năng tiết kiệm và hiệu quả hơn.

Bộ chuyển đổi công suất lấy điện từ một nguồn điện nào đó và chuyển sang dạng thích hợp dễ điều khiển để dùng cho tải hoặc quá trình cần dùng công suất đó. Các nguồn điện chính có thể là 1-pha hoặc 3-pha 50/60 Hz ac, lấy từ mạng điện, cũng có thể là từ các acquy, tế bào năng lượng,...

Bốn hình thức chuyển đổi công suất cơ bản (Hình 11.1) là ac qua dc; dc qua ac; dc thành dc và ac thành ac. Một ví dụ cho việc chuyển đổi công suất được yêu cầu để truyền động động cơ tốc độ thay đổi với điện thế thay đổi/ tần số thay đổi.

Các bộ chuyển đổi hiện đại chắc chắn, gọn nhẹ, linh hoạt, dễ điều khiển. Bốn hình thức cơ bản nói trên diễn ra theo hình thức chỉnh lưu (ac/dc); tạo xung (dc/dc); nghịch lưu (dc/ac) và chuyển đổi vòng (ac/ac).



Hình 11.1 *Bốn hình thức cơ bản chuyển đổi công suất*

Các linh kiện bán dẫn

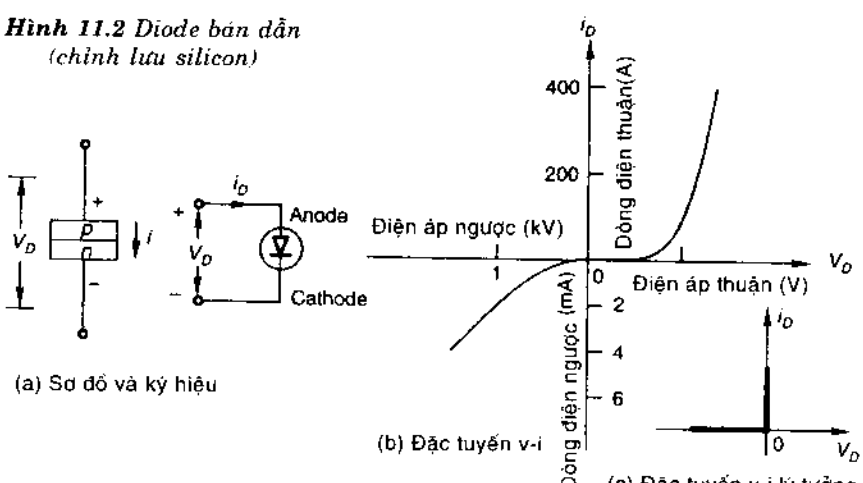
Các linh kiện chính được dùng để điều khiển động cơ là diode, bộ chỉnh lưu silic có điều khiển (SCR), thyristor, triac, diac, transisitor,.... Các linh kiện này thường được phân loại theo cấu trúc, gồm linh kiện hai lớp như diode, ba lớp như transistor, bốn lớp như các thyristor. Mỗi linh kiện đều có điện áp cực đại, khả năng đáp ứng (tốc độ), thời gian và dòng điện, ...

Diode

Hình 11.2 (a), minh họa diode dựa trên tính chất vật liệu loại p- và loại n- trong tiếp giáp. Diode lý tưởng có trở kháng là zero đối với dòng ở một hướng và có trở kháng vô hạn ở hướng ngược lại. Diode trong thực tế có trở kháng thuận rất thấp, có sụt áp 0.3 - 0.7 V ở mọi mức dòng điện, và dòng điện ngược vài miliampere khi *điện áp khóa* (*điện áp ngược - đỉnh*) khoảng 1 kV. Đặc tuyến v - i của diode và dạng lý tưởng được dùng để phân tích mạch diode (Hình 11.2 (b), 11.2 (c)). Mức điện áp (tối đa 5 kV) cố định với đặc tuyến ngược được gọi là điện áp đánh thủng. Các thông số chính của diode gồm điện áp khóa, dòng thuận trung bình, và nhiệt độ làm việc tối đa (gần 125°C cho các loại chỉnh lưu silicon). Cần bão hòa diode đối với các đỉnh điện áp, quá dòng và quá nhiệt.

Diode "tự do" thường được dùng trong hệ thống điều khiển động cơ để có đường dẫn dòng điện liên tục trong mạch cảm ứng sau khi ngắt mạch linh kiện công suất giữa động cơ và nguồn điện.

***Hình 11.2** Diode bán dẫn (chỉnh lưu silicon)*

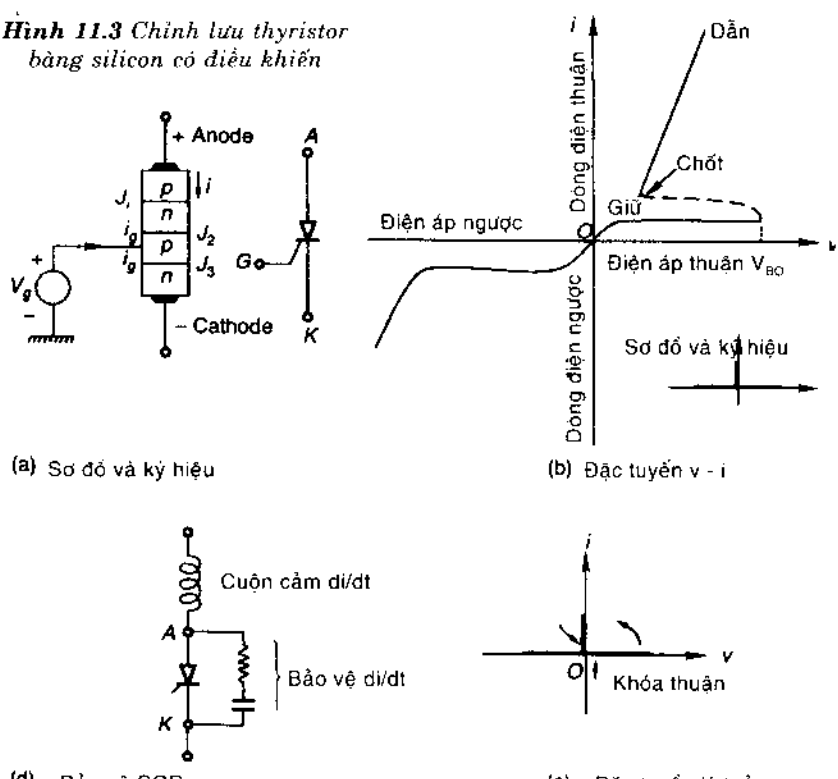


Diode Zener, tuy không phải là linh kiện điều khiển công suất thực sự, nhưng thường được dùng làm linh kiện cảm biến và điều khiển điện áp trong nhiều bộ điều khiển động cơ.

Chỉnh lưu có điều khiển (SCR)

Linh kiện chuyển mạch bán dẫn này còn được gọi là thyristor. Đây là linh kiện đóng ngắt bán dẫn 4 lớp, 3 tiếp giáp, hai trạng thái bán dẫn ổn định (ON - OFF). Cực đến lớp p ngoài là anode, cực đến lớp n ngoài là cathode và cực đến lớp p trong là cổng (Hình 11. 3 (a)). Anode được nối đến đế tản nhiệt. Mức điện thế và dòng điện hiệu dụng của các SCR có thể lên đến 10kV và 3500 A với tốc độ 1 μs tương ứng với công suất điều khiển 30 MW. Linh kiện định mức cao nêu trên có thể đóng mạch từ điện áp nguồn thấp khoảng 1A và 10W, do đó độ khuyếch đại công suất rất cao (3×10^6).

Hình 11.3 *Chỉnh lưu thyristor bằng silicon có điều khiển*



(a) Sơ đồ và ký hiệu

(b) Đặc tuyến v - i

(d) Bảo vệ SCR

(c) Đặc tuyến lý tưởng

Hình 11.3 (b) minh họa đặc tuyến tĩnh Volt - Ampere của SCR. Đặc tuyến thuận không đổi cho đến V_{BO} (điện áp đánh thủng), tại điểm này dòng bắt đầu tăng vọt đến điểm được xác định theo điện thế cung cấp và trở kháng ngoài và được gọi là trạng thái dẫn. SCR giữ ở trạng thái này cho đến khi dòng thuận hạ xuống dưới mức dòng giữ (vài miliampere). Tại điểm này SCR trở về trạng thái khóa thuận (J_1 và J_3 phân cực thuận, J_2 phân cực nghịch). Bằng cách tăng dòng cổng, cả điện áp đánh thủng thuận lẫn dòng giữ đều có thể giảm xuống. Do đó, SCR có thể làm việc được, tức là dẫn tại giá trị điện áp thuận xác định, bằng cách điều khiển dòng cổng. Đặc tuyến lý tưởng của SCR nêu trên Hình 11.3 (c).

SCR có ba chế độ vận hành

1. Chế độ khóa thuận (J_1 và J_3 phân cực thuận, J_2 phân cực nghịch). Đây là trạng thái đóng.
2. Chế độ dẫn thuận - Trạng thái hoạt động.
3. Chế độ khóa nghịch (J_1 và J_3 phân cực nghịch, J_2 phân cực thuận). Đây cũng là trạng thái đóng.

Khi phân cực thuận, SCR có thể được kích hoạt bằng một trong các phương pháp dưới đây:

1. Khi có xung khởi động (trigger) dương kích vào cổng, SCR nhanh chóng chuyển qua chế độ điều hòa sau khoảng thời gian xác định. Thời gian kích hoạt toàn phần, gồm thời gian trễ và thời gian dòng tăng lên, khoảng 0.2 đến 0.1 μs và tùy thuộc đặc tính xung khởi động (xung trigger). SCR tiếp tục dẫn sau khi ngưng xung khởi động, tạo dòng thyristor hơi lớn hơn dòng giữ.
2. SCR cũng có thể dẫn bằng cách tăng điện áp thuận vượt quá mức điện áp đánh thủng V_{BO}.
3. SCR cũng có thể được kích hoạt không cần xung khởi động ở cổng, nếu cấp điện áp thuận đột ngột dv/dt mớ và có thể cải thiện sự vận hành của mạch. Có thể dùng mạch R-C đơn giản (Hình 11.3(d)) để hạn chế dv/dt của điện áp thuận được cấp vào.
4. Nếu dòng trong thyristor tăng với tốc độ quá cao, nghĩa là di/dt cao, linh kiện SCR có thể bị hỏng. Do đó, cần mắc cảm kháng nối tiếp để giữ di/ dt dưới giới hạn an toàn.

Phương pháp điều khiển cổng, dùng tín hiệu dương ở cổng để phân cực thuận SCR là phương pháp đơn giản và hiệu quả để kích hoạt SCR. Sử dụng

điều khiển cổng, linh kiện có thể được kích bằng tín hiệu cổng dc hoặc tín hiệu cổng xung. Thời gian mở toàn phần tùy thuộc các thông số mạch anode, biên độ tín hiệu cổng và thời gian dòng tăng lên.

SCR dẫn có thể được ngắt bằng cách giảm dòng dẫn xuống dưới dòng giữ (vài mA), và đảo phân cực (cathode dương so với anode) trong thời gian ngắt-đóng tối thiểu (10 - 100 μs). Ngoài ra, tỷ suất tăng điện thế anode sau ngắt - đóng phải được giới hạn, nếu không, linh kiện có thể bắt đầu dẫn trở lại.

Điều quan trọng khi sử dụng SCR để điều khiển động cơ là linh kiện và mạch đảo mạch. Trong các mạch ac, dòng điện đi qua giá trị zero làm cho linh kiện ngắt ngắt một cách tự động. Điều này được gọi là *đảo mạch tự nhiên*. SCR có thể được đảo mạch đồng bộ có hoặc không có thời gian trễ với điện áp đi qua zero mỗi khi thiên áp thuận. Trong ứng dụng mạch dc, không có giá trị zero tự nhiên, dòng thuận qua SCR có thể giảm bằng cách mắc rẽ với đường dẫn tổng trở thấp hoặc dùng điện áp ngược để có thiên áp cưỡng bức, được gọi là *đảo mạch cưỡng bức*.

SCR có thể bị hư hại do tỷ suất tăng (dv/dt) điện áp anode quá cao. Các điện áp chuyển tiếp hệ thống của sóng đỉnh có thể được triệt bằng các bộ lọc ở ngõ vào. Các tính năng bảo vệ cần thiết gồm (i) giới hạn nhiệt độ, (ii) bảo vệ chống quá dòng (do ngắn mạch, ...), (iii) triệt các dòng và các điện áp chuyển tiếp xung.

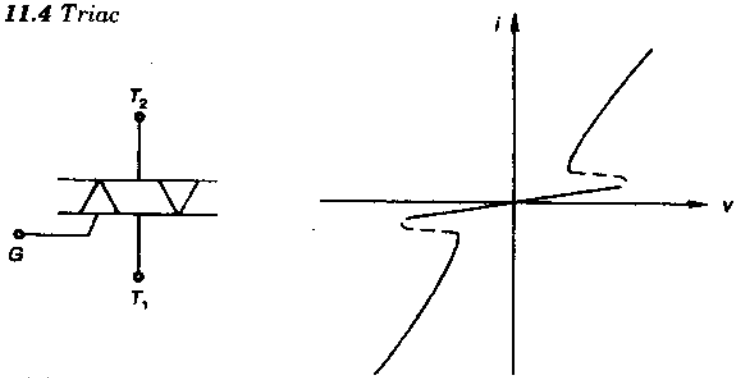
Hai kiểu SCR thường dùng trong mạch điều khiển động cơ là bộ nghịch lưu và bộ chuyển đổi. Các SCR nghịch lưu được dùng bộ chuyển đổi chu kỳ, động cơ dc không chổi than, còn bộ chuyển đổi được dùng trong bộ chỉnh lưu điều khiển pha, bộ điều áp ac, ... Các kiểu này có thời gian đáp ứng khác nhau và được chọn theo ứng dụng thực tế. Các bộ SCR kích hoạt bằng ánh sáng (LASER) được dùng trong các ứng dụng điện áp và dòng cao, chẳng hạn các bộ bù VAR và HVDC. Định mức điện áp của LASER có thể đến 4 kV với dòng 1500A, di/dt khoảng 250A/μs và dv/dt khoảng 2kV/ μs.

Triac

Triac là mạch đóng ngắt hai lớp với 3-cực, anode, cathode, và cổng, có thể dẫn cả hai chiều như hai SCR nối đối song song hoặc kề lưng trên một vi mạch, được dùng ở các bộ điều khiển công suất. Hiện nay đang có các triac công suất trung bình (1000V - 2000A) với tốc độ 1 μs. Hình 11.4 minh họa ký hiệu và đặc tuyến v-i của một triac.

So với cặp thyristor đối song thì mạch điều khiển triac kinh tế và đơn giản hơn, nhưng khó áp dụng cho tải cảm ứng và thời gian ngắt-đóng dài hơn.

Hình 11.4 Triac



(a) Ký hiệu (b) Đặc tuyến v - i

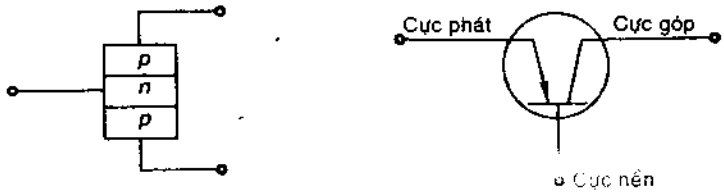
Triac thường được dùng cho các mạch điều khiển pha có tải điện trở (các loại đèn mờ, bộ điều khiển nhiệt ...).

Các thyristor đóng - mở bằng cổng (GTO)

Khác với SCR, linh kiện GTO có khả năng mở bằng cách kích xung dòng cổng âm. Điều này là do cực phát - cổng cho phép chuyển hướng dòng cực góp p-n-p và do đó có thể khử hiệu ứng tái sinh dòng trong mạch cục bộ pnp - npn. Tuy nhiên, độ khuếch đại dòng đóng-ngắt của GTO không cao (4 hoặc 5), do vậy, linh kiện với dòng đỉnh 2000A sẽ yêu cầu xung dòng âm 500A. Thế nhưng, công suất trung bình tương ứng nhỏ và dễ hấp thụ từ linh kiện MOSFET công suất. Hiện tượng đóng - ngắt hơi phức tạp, đôi khi dẫn đến điện áp đỉnh tại anode do phản kháng của mạch và phân rã di/dt của dòng anode. Điều này tạo ra khả năng đánh thủng thứ hai. Hơn nữa, mạch anode có thể kéo theo các tổn thất. Do đó cần phải thiết kế mạch giảm shock với tụ có điện dung lớn. Các tổn thất lớn trong quá trình đóng - ngắt hạn chế tần số điều biến độ rộng xung PWM của GTO trong khoảng 1 đến 2 kHz. Tuy còn vài nhược điểm, nhưng GTO hầu như đã thay thế SCR trong bộ chuyển đổi cấp điện áp chuyển mạch cưỡng bức do giảm được kích cỡ, độ phức tạp của mạch điều khiển, và tăng hiệu suất. Linh kiện GTO thông dụng trong các bộ truyền động máy ac, hệ thống UPS, ...

Transistor công suất

Đây là loại linh kiện có các định mức thích hợp để điều khiển động cơ, có kết cấu 3 lớp *p-n-p* hoặc *n-p-n* (Hình 11.5), được gọi là transistor tiếp giáp lưỡng cực (BJT).



***Hình 11.5** Transistor công suất p-n-p*

Khi vận hành bình thường, tiếp giáp nền - phát được phân cực thuận và tiếp giáp nền - góp phân cực nghịch. Dòng cực góp hơi nhỏ hơn dòng cực phát. Có thể dùng dòng cực nền để điều khiển dòng cực góp. Ngoại trừ các động cơ nhỏ, các transistor được dùng trong chế độ đóng-ngắt. Cấu hình cực phát chung thường được dùng để đạt độ khuếch đại công suất cao hơn. Điện áp bão hòa cực phát chung V_{CE} (SAT) của các transistor công suất trong khoảng 0.3 - 0.7 V, nhỏ hơn sụt áp trên anode - cathode của SCR, tổn thất công suất trung bình của transistor cũng thấp hơn SCR có công suất tương đương.

Transistor công suất được điều khiển bằng dòng cực nền. Dòng cực nền liên tục để giữ transistor ở trạng thái bão hòa. Trong linh kiện dòng cao, độ khuếch đại dòng nền - góp thấp hơn 10, do đó cần có dòng cực nền vài ampere để giữ cho transistor ở trạng thái đóng, tổn thất công suất trên mạch nền khá lớn. Thời gian dòng tăng khi đóng có thể giảm bằng cách tăng tốc tạm thời dòng nền. Để bắt đầu quá trình ngắt, tích điện bão hòa quá mức, tỷ lệ với dòng cực nền, phải được khử ở vùng nền trước khi transistor có thể bắt đầu quay lại trạng thái ngắt. Thời gian trì hoãn này có thể giảm đến tối thiểu bằng cách đưa dòng điện nghịch vào cực nền trong quá trình ngắt.

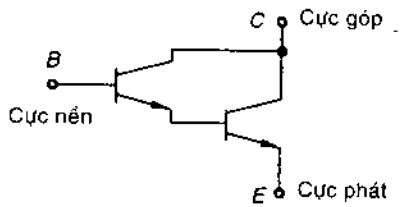
Transistor công suất không có khả năng chịu dòng tăng vọt và chỉ có thể chịu được mức biến đổi dòng điện thấp. Không có tác động tái sinh trong transistor, nhưng cần dòng nền liên tục để giữ trạng thái đóng (thông), trong khi SCR chỉ cần một xung, tác dụng lên cổng là có thể hoạt động. Tuy nhiên, thời gian đóng ngắt của transistor nhanh hơn SCR và trong transistor cũng không gặp phải vấn đề chuyển mạch như SCR. Các transistor công suất được dùng nhiều trong các ứng dụng công suất thấp đến trung bình, thay cho GTO và thyristor.

Các ứng dụng transistor công suất thường trong khoảng vài kW đến hàng trăm kW, tần số chuyển mạch đến 10 - 15kHz, định mức của loại linh kiện này đến 600V, 500A.

Mạch Darlington công suất

Hình 11.6 minh họa cặp transistor nối theo mạch Darlington. Nếu dòng nền transistor này nối với một transistor khác, độ khuếch đại transistor công suất tăng rõ rệt. Transistor phát động có thể đặt trên cùng vi mạch silicon. Với độ lợi dòng có thể đạt 250 lần nhưng thời gian điều khiển dài hơn.

Hình 11.6
Transistor Darlington

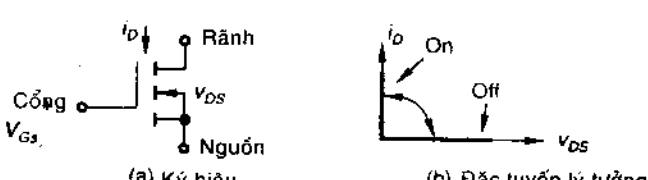


Mạch MOSFET công suất

Transistor hiệu ứng trường, bán dẫn oxide kim loại (MOSFET) là linh kiện cải tiến từ transistor hiệu ứng trường (FET) được sử dụng trong mạch đóng ngắt tác dụng nhanh ở vài mức công suất. Không như transistor hai cực, điều khiển bằng dòng, MOSFET là linh kiện được điều khiển bằng điện áp. Các cực chính là rãnh và nguồn, dòng từ rãnh đi vào nguồn được điều khiển theo điện áp cổng (Hình 11.7a).

Khi điện áp cổng - nguồn đủ lớn, linh kiện đóng hoàn toàn, và sẽ ngắt khi điện áp sụt xuống dưới giá trị ngưỡng, $V_{GS}(th)$. Đặc tuyến lý tưởng được nêu trên Hình 11.7.

MOSFET công suất là linh kiện đơn cực, không tiếp giáp, được điều khiển bằng điện áp. Tốc độ đóng ngắt cao nên ít tổn thất trong quá trình đóng ngắt. MOSFET thường được dùng trong các ứng dụng đóng ngắt cao tần từ vài watt đến vài kilowatt, với định mức đến 500V, 40A.



***Hình 11.7** MOSFET công suất.*

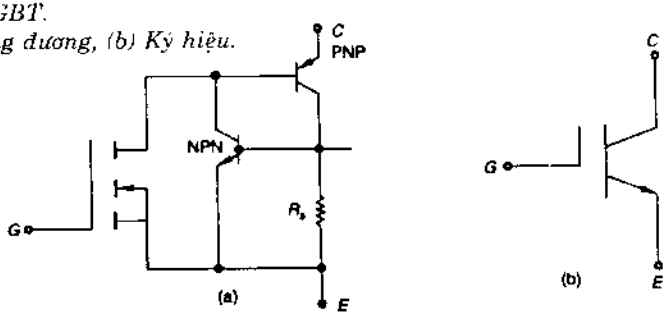
Các linh kiện công suất hiện đại

IGBT (Transistor hai cực cổng cách ly)

Linh kiện IGBT về cơ bản là transistor lai lưỡng cực chuyển mạch đóng - ngắt cổng MOS, kết hợp các tính năng của MOSFET (điều khiển điện áp), BJT (tác động nhanh và công suất cao), và thyristor. Linh kiện này còn được gọi là MOSIGT, COMFET, và GEMFET.

Hình 11.8 minh họa sơ đồ mạch tương đương và ký hiệu linh kiện IGBT. Linh kiện này có những ưu điểm hơn hẳn BJT và MOSFET trong các ứng dụng công suất và tần số trung bình. IGBT thường được sử dụng trong mạch truyền động động cơ ac, dc, các hệ thống UPS,...

Hình 11.8. *IGBT.*
(a) Mạch tương đương, (b) Ký hiệu.



Bảng 11.1 *Các đặc tính của IGBT*

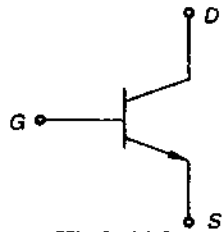
- Không có vấn đề như ở thyristor.
- Mật độ dòng cao hơn BJT và MOSFET.
- Thông dụng trong các truyền động ac công suất trung bình.
- SOA (khoảng vận hành an toàn) bị giới hạn theo T_j (nhiệt độ trên tiếp giáp).
- Tỷ số điện dung cổng góp và điện dung cổng phát thấp, cải thiện hiệu ứng hồi tiếp.

SIT (Transistor cảm ứng tĩnh)

Đây là linh kiện cao tần, công suất cao (Hình 11.9), có các đặc tính tương tự đèn triode, thích hợp trong chế độ kích hoạt và chế độ chuyển mạch được dùng trong các bộ khuếch đại VHF/UHF và viba.

***Bảng 11.2** Các đặc tính của SIT*

• Linh kiện tương tự đèn triode công suất cao, tần số cao (1500V, 180A).
• Tốc độ đóng ngắt nhanh hơn MOSFET (t_{ON} = 0.35 μs; t_{OFF} = 0.35 μs).
• Điện dung, điện trở cổng - nguồn thấp.
• SOA bị giới hạn bởi T_j
• Dễ mắc song song các linh kiện.
• Không thích hợp với các ứng dụng PE tổng quát.

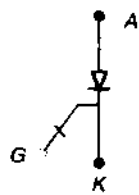


***Hình 11.9.** Ký hiệu linh kiện*

SITH (Thyristor cảm ứng tĩnh)

Hình 11.10 minh họa ký hiệu linh kiện này. Đây là diode P^+NN^+. Tương tự SIT, SITH là linh kiện thường mở với vùng N bão hòa. SITH là linh kiện công suất cao, tương tự GTO, tự điều khiển (1200V, 800A). So sánh GTO và SITH:

1. Khác với GTO, SITH là linh kiện thường mở không đối xứng.
2. Điện áp sụt lớn hơn (4V).
3. Độ khuếch đại dòng ngắt nhỏ hơn (1 đến 3).
4. Tần số đóng ngắt cao hơn (t_{ON} = 2 μs; t_{OFF} = 9 μs) và tổn thất do đóng ngắt thấp hơn.
5. Mức dv/dt và di/dt cao hơn (2kV/ μs, 900A/ μs).
6. SOA được cải tiến và T_j bị giới hạn.



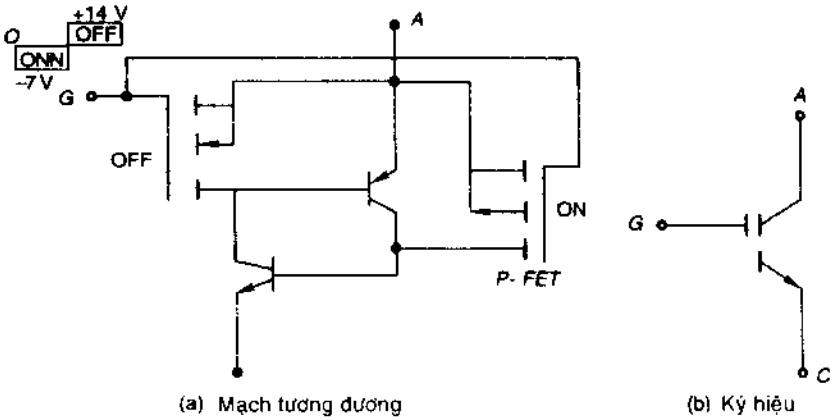
***Hình 11.10.** Ký hiệu linh kiện.*

MCT (Thyristor điều khiển MOS)

MCT là linh kiện bán dẫn tương tự thyristor, có thể đóng hoặc ngắt bằng xung ngắn trên cổng MOS. Đây là loại linh kiện đóng ngắt công suất cao, tần số cao, sụt dẫn thấp. MCT là kết nối song song hàng ngàn ô đơn vị trên cùng

***Bảng 11.3** Các đặc tính của MCT*

• Linh kiện công suất cao tương tự thyristor nhưng đóng-ngắt bằng cổng MOS.
• Các ưu thế cổng MOS.
• Khóa không đối xứng, sụt dẫn thấp (1 - 2V).
• Tốc độ đóng ngắt tương đương IGBT (t_{ON} = 0.2 μs, t_{OFF} = 2.5 μs).
• SOA bị giới hạn theo T_j
• C_{in} cố định, không có hiệu ứng Miller.
• Dễ mắc song song các linh kiện.



Hình 11.11. *MCT*

vi mạch. Hình 11.11 minh họa mạch tương đương và ký hiệu linh kiện này. MCT cũng có thể mắc nối tiếp - song song để đáp ứng các yêu cầu công suất cao. Bảng 11.3 cung cấp các thông số của MCT 50A, 500V với T_j = 150°C.

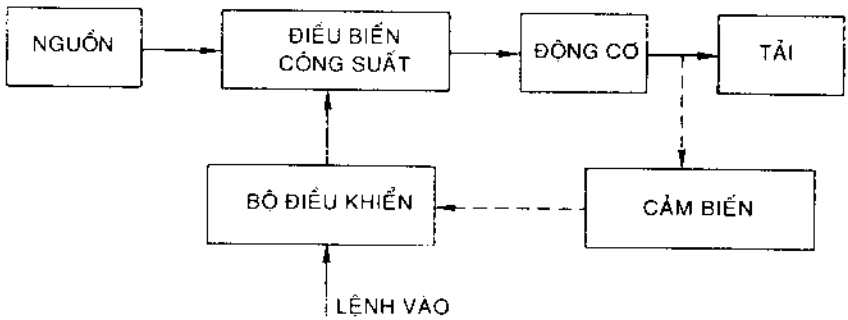
Ngoài việc sử dụng trong các truyền động dc, ac, MCT còn được dùng trong các hệ thống UPS, cấp nhiệt cảm ứng, các bộ đổi dc - ac,...

So sánh các linh kiện hiện đại

Nói chung, SITH là linh kiện công suất lớn nhất và SIT là linh kiện tần số cao nhất hiện nay. Tuy SIT là linh kiện công suất cao, tần số rất cao, nhưng độ sụt dẫn lớn. SITH là linh kiện điều khiển bằng dòng điện, nhưng độ lợi dòng ngắt thấp. Mọi linh kiện công suất cho đến nay đều có khả năng khóa điện áp không đối xứng. Mặc dầu IGBT, SIT và SITH đều có đặc tính tuyến tính trong vùng hoạt động, nhưng chỉ có IGBT có thể có chế độ hoạt động khi có điều kiện sự cố, còn các linh kiện khác vẫn bão hòa do đặc tuyến i - v hầu như thẳng đứng. Có lẽ MCT có sự phối hợp tốt nhất về độ sụt dẫn, nhiệt độ tiếp giáp, *dv/dt, di/dt,* và tốc độ chuyển mạch chỉ chậm hơn SIT.

Các truyền động điện

Sự phát minh thyristor mở ra khả năng sử dụng các bộ truyền động bán dẫn. Sự cải tiến liên tục các bộ chuyển đổi công suất và các chiến lược truyền động - điều khiển mới, chẳng hạn điều khiển định hướng trường (vector) của



Hình 11.12 *Sơ đồ khối của hệ thống truyền động điện.*

các truyền động ac, điều khiển chế độ trượt, các chiến lược tiết kiệm năng lượng,... đưa đến các cải tiến quan trọng về công nghệ và hiệu suất truyền động.

Trước đây, các ứng dụng truyền động tốc độ biến thiên thường dùng động cơ dc. Động cơ cảm ứng lồng sóc, có giá bằng khoảng 1/3 động cơ dc cùng định mức, có thể được thiết kế với tốc độ, moment, và định mức công suất cao hơn. Động cơ rotor dây quấn cũng có định mức công suất cao. Do các ưu thế này, các truyền động ac đang dần dần thay thế động cơ dc trong nhiều ứng dụng tốc độ biến thiên.

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, động cơ bước, và động cơ từ trở cũng được sử dụng trong các hệ thống truyền động.

Nhu cầu về chuyển đổi công suất phát sinh khi bản chất của công suất điện khả dụng khác với công suất điện được yêu cầu cho động cơ. Nói chung, các nguồn điện 1-pha, 3-pha, 50Hz được sử dụng phổ biến (trừ các ứng dụng hàng không và vũ trụ thường dùng nguồn điện 400Hz để đạt tỷ số công suất-trong lượng động cơ cao). Động cơ dc không chổi than đang được dùng để thay thế động cơ trợ động dc với công suất không quá vài kW.

Các bộ chuyển đổi công suất

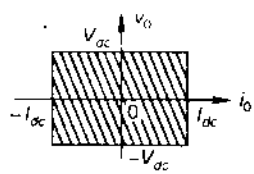
Với các thyristor, các bộ chuyển đổi có thể thực hiện theo kiểu chuyển mạch tự nhiên hoặc chuyển mạch cưỡng bức. Trong các bộ chuyển đổi chuyển mạch tự nhiên, mạch có khả năng ngắt thyristor theo sự chuyển mạch đường dây, điện áp tải, cộng hưởng tải hoặc tự chuyển mạch. Trong đó, sự chuyển mạch thyristor sẽ kích hoạt sự chuyển mạch trong các bộ chuyển đổi chuyển

mạch cưỡng bức, các thyristor bị ngắt bằng xung điện áp (chuyển mạch theo điện áp) hoặc dòng (chuyển mạch theo dòng) mắc song song hoặc nối tiếp.

Theo chức năng, có bốn loại cơ bản đã được đề cập (Hình 11.1). Ngoài ra còn có bộ chuyển đổi ac/dc, chuyển đổi vòng và điều hòa điện thế ac/ac dùng các SCR với loại chuyển mạch tự nhiên. Các mạch nghịch lưu có thể xếp loại theo nguồn, như các bộ nghịch lưu nguồn điện áp (VSI) và các bộ nghịch lưu nguồn theo dòng (CSI). Sự phân loại này tùy thuộc vào mạch lọc và điều khiển trên các cực dc của bộ chuyển đổi. VSI đóng-ngắt điện áp dc ở các khối điều khiển đến tải, còn trong CSI, dòng dc được đóng ngắt trong các khối đến tải.

Các bộ chuyển đổi transistor, không cần mạch chuyển đổi phụ, hầu như hoàn toàn thay thế các bộ chuyển đổi SCR dưới 100 Hp. Hiện nay các transistor tiếp giáp lưỡng cực công suất cao cũng có thể dùng các bộ điều biến chiều rộng xung (PWM) để cải tiến dạng sóng dòng động cơ.

Ngoài ra, có thể phân loại theo cách khác, tùy thuộc công suất từ bộ chuyển đổi chỉ đi theo một chiều (từ nguồn đến tải), được gọi là bộ chuyển đổi góc một phần tư hoặc có hai chiều (tải có thể tái sinh), là bộ chuyển đổi hai góc phần tư. Có bốn kiểu vận hành góc một phần tư. Bằng cách dùng hai bộ chuyển đổi ghép đối lưng với nhau để tạo điện áp và dòng ra, và cả hai đều có thể đảo chiều sẽ tạo ra bộ chuyển đổi kép. Các kiểu chuyển đổi này thường được dùng trong các truyền động tốc độ biến thiên công suất cao.



Hình 11.13.
Vận hành cả bốn góc phần tư trong bộ chuyển đổi kép.

Các bộ chuyển đổi ac/dc

Khi công suất hàng chục kW, có thể dùng các bộ chỉnh lưu 3-pha, thường dùng mạch cầu điều khiển toàn sóng/nửa sóng. Các hệ thống chuyển đổi nửa sóng có hệ số công suất tốt hơn bộ chuyển toàn sóng. Hệ số công suất kém là vấn đề lớn, nhiều kỹ thuật khác nhau, chẳng hạn cổng không đối xứng, điều khiển phân cực điện áp,... đã được thử nghiệm để cải tiến. Một số bộ điều khiển kích cổng đã được dùng để kiểm soát góc kích đáp ứng điện áp điều khiển biến thiên. Sự điều khiển dựa trên bộ vi xử lý rất thông dụng do khả năng thực hiện quy luật điều khiển bất kỳ. Các bộ chuyển đổi điều khiển 2-pha được nối đối song trong bộ chuyển đổi kép, được dùng cho các truyền động động cơ dc.

Các bộ chuyển đổi ac/ac

Các bộ điều khiển điện áp dựa trên thyristor (có cùng tần số ra) dùng nguyên lý điều khiển pha thường được sử dụng nhiều, kể cả các truyền động kiểu thiết bị 1-pha. Các bộ chuyển đổi vòng điều khiển pha được dùng trong truyền động ac tần số không đổi - tốc độ biến thiên (VSCF) công suất lớn.

Bộ chuyển đổi dc/dc

Các bộ chuyển đổi dc/dc trực tiếp chuyển nguồn dc điện áp cố định thành nguồn dc điện áp biến thiên và có thể được dùng như máy biến áp dc để tăng - giảm điện áp. Bộ tạo xung thyristor chuyển mạch cưỡng bức với kiểu chuyển mạch điện áp trước đây được gọi là bộ tạo xung kiểu chuyển mạch. Các bộ tạo xung thường được dùng để điều khiển động cơ kéo, điều khiển điện trở rotor trong các động cơ cảm ứng có vành trượt và trong các thiết bị ngắt mạch dc.

Bộ chuyển đổi dc/ac

Nhiều bộ chuyển đổi dc/ac trực tiếp hoặc các bộ nghịch lưu, ngày nay sử dụng các mạch phụ khác nhau để chuyển mạch cưỡng bức hoặc các thiết bị đóng ngắt mới. Như đã đề cập, chúng có thể là loại nguồn điện áp hoặc nguồn dòng. Trong các bộ nghịch chuyển nguồn dòng, dòng điện một chiều bị giới hạn theo một cực tính và do đó công suất đảo tái sinh được thực hiện bằng cách đảo cực điện áp một chiều. Trong các bộ nghịch lưu điện áp, cực tính điện áp một chiều không thể thay đổi và do đó cần đảo chiều dòng một chiều để tái sinh bằng cách dùng bộ chuyển đổi có hồi tiếp.

VSI

Mạch công suất VSI được cấp điện từ điện áp dc cố định hoặc biến thiên (khi được cấp từ một nguồn ac thông qua bộ chuyển đổi điều khiển pha hoặc bộ chỉnh lưu diode có bộ tạo xung), với tụ lọc và cuộn cảm nhỏ. VSI được dùng trong các truyền động động cơ ac với điện áp và tần số biến thiên hoặc trong các UPS có điện áp và tần số không đổi.

Bộ nghịch chuyển nguồn dòng điện (CSI)

CSI thực chất là bộ VSI kép. Bộ chỉnh lưu điều khiển pha hoặc bộ chỉnh lưu diode tiếp sau là bộ tạo xung với vòng dòng điện và cuộn cảm lớn cung cấp nguồn dòng điện có thể điều chỉnh. Ưu điểm của CSI so với VSI là mạch công

suất tin cậy và ổn định, vận hành cả bốn góc phần tư, ... các hạn chế bao gồm khoảng tần số thấp hơn, cần có cảm kháng nối kết dc lớn và các tụ có điện dung lớn, tính không ổn định của vòng hở, các xung moment và nhiệt sóng hài trong máy được cấp điện từ nguồn CSI, ...

Bộ chuyển đổi ma trận

Bộ chuyển đổi ma trận với thuật toán chuyển mạch thích hợp có khả năng tạo ra sóng biến thiên hầu như theo hàm sine và có thể vận hành với hệ số công suất đơn vị, trễ, hoặc sớm pha, khi cung cấp công suất cho tải hệ số công suất trễ pha có tần số biến thiên. Có thể vận hành theo chế độ cả bốn góc phần tư, với dòng trễ hoặc sớm pha. Đặc tính quan trọng của bộ chuyển đổi này là hoàn toàn không có "nối kết dc", không cần tụ và cuộn cảm để hỗ trợ dòng điện hoặc điện áp nối kết.

Điều khiển

Các kỹ thuật điều khiển mờ (fuzzy control), ANN, và ES (hệ thống cao cấp) đang được sử dụng trong điều khiển điện tử công suất. Các kỹ thuật ES có tiềm năng lớn trong thiết kế hệ thống tự động, lập mô hình, mô phỏng, điều khiển thời gian thực, kiểm tra và chẩn đoán.

Các bộ chuyển đổi điện tử công suất có khả năng thực hiện hầu như mọi kiểu điều khiển hoặc chuyển đổi công suất điện. Các nỗ lực nghiên cứu hiện nay hướng tới việc giảm chi phí, kích cỡ, trọng lượng, tổn thất, và tăng độ tin cậy, đạt được hiệu suất cao hơn.

Điều khiển động cơ bằng thyristor

Nhiều mạch điều khiển thyristor đã được thiết kế để sử dụng trong điều khiển động cơ, tùy theo loại nguồn cung cấp (ac/dc), kiểu và kích cỡ động cơ.

Đối với điều khiển động cơ dc, nguồn công suất động cơ được điều khiển từ nguồn cung cấp ac điện áp không đổi, nhận được nhờ các *bộ chỉnh lưu có điều khiển* hoặc từ các bộ chuyển đổi dùng thyristor và diode. Sự điều khiển điện áp dc có thể đạt được bằng cách kích các thyristor theo góc điều chỉnh với điện áp nguồn. Góc này là góc kích và mạch điều khiển là *điều khiển pha*. Phương pháp điều khiển cơ bản thứ hai là *điều chỉnh tích hợp chu kỳ*. Ở đây dòng đi vào cổng từ nguồn ac cho một số chu kỳ hoàn tất và bị ngắt trong vài chu kỳ tiếp theo, quá trình lặp đi lặp lại liên tục. Sự điều khiển được áp dụng bằng cách điều chỉnh tỷ số giữa thời gian đóng và mở. Phương pháp này thích hợp để điều khiển các động cơ dc nhỏ hơn 1 kW.

Các phương pháp điều khiển theo pha và tích hợp chu kỳ cũng được áp dụng cho các động cơ ac khi không yêu cầu mạch chuyển đổi.

Điều khiển các động cơ dc được cấp từ nguồn dc thông qua mạch đóng ngắt thyristor được gọi là bộ tạo xung. Bộ điều khiển tạo xung mở, đóng theo chu kỳ, trong đó sự điều khiển điện áp trung bình có thể đạt được bằng cách thay đổi thời gian đóng - mở. Điều này điều khiển động cơ hiệu quả và vô cấp. Động cơ cũng có thể được vận hành trong chế độ hãm tái sinh. Bộ điều khiển tạo xung yêu cầu sự chuyển mạch cưỡng bức của thyristor.

Để điều khiển các động cơ ac từ nguồn dc, thường dùng thyristor, transistor hoặc MOSFET. Các mạch đóng ngắt chuyển năng lượng từ nguồn dc tới tải có tần số thay đổi ac và/hoặc điện áp thay đổi. Do hoạt động đóng ngắt, dạng sóng điện áp ac có bậc. Lượng sóng hài được lọc bởi các động cơ ac. Khi nguồn cấp công suất thường là ac, mạch hoàn chỉnh để nhận điện áp và tần số biến thiên, cần sử dụng cả bộ chuyển đổi và nghịch chuyển.

Bộ chuyển đổi vòng là bộ điều khiển nhận trực tiếp điện năng có tần số và điện áp biến thiên từ nguồn tần số cố định, không cần tầng dc trung gian. Cơ chế của bộ điều khiển tần số và điện áp là sự kết hợp các cơ chế được sử dụng trong bộ chuyển đổi điều khiển pha và bộ nghịch chuyển điều biến xung. Bộ chuyển đổi vòng có vài nhược điểm nên ít thông dụng, do chỉ tạo ra các tần số phụ, với lượng sóng hài lớn và hệ số công suất vào thấp. Các bộ này được dùng để truyền động vận tốc thấp, điều khiển tuyến tính các động cơ trong các hệ thống vận tải tốc độ cao.

Điều khiển động cơ dc qua các bộ chuyển đổi

Điều khiển động cơ dc bằng các bộ chuyển đổi điều khiển pha rất tiện lợi và hiệu quả, trong đó điện áp ac vào được chuyển thành điện áp ra dc có điều khiển. Quá trình chuyển mạch, chuyển dòng điện từ một thyristor đến thyristor khác, trong các bộ chuyển này quá trình chuyển mạch là tự nhiên.

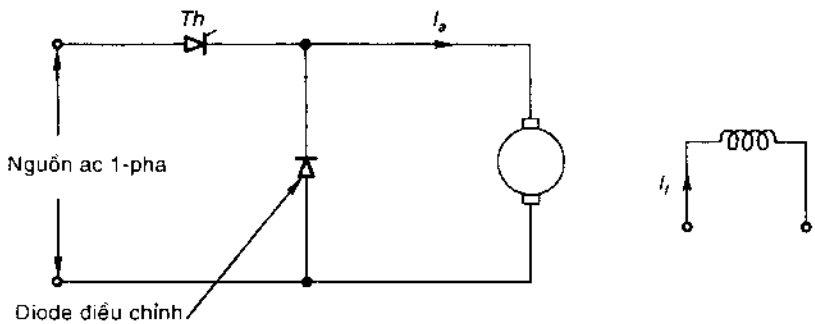
Khi thyristor hoạt động, sẽ phân cực đảo chiều thyristor ngõ ra và ngắt thyristor này, do đó, không cần mạch điện chuyển mạch riêng rẽ. Hiệu suất chuyển đổi công suất trong các bộ chuyển đổi này khoảng 95%, do tổn thất trong các thyristor tương đối thấp. Các bộ chuyển đổi này thường được sử dụng để điều khiển các động cơ dc dưới 1 kW và trong các động cơ lớn có sử dụng các truyền động đảo chiều tốc độ biến thiên ở các nhà máy cán có mức công suất lớn tới vài megawatt.

Trong vài loại bộ chuyển đổi (bán chuyển đổi), diode được mắc ghép song song vào hai cực động cơ để tiêu thụ năng lượng từ nhằm cung cấp dòng điện

liên tục cho động cơ khi khóa các thyristor. Ngoài ra, bộ chuyển đổi này còn được dùng để bảo vệ, tránh các quá áp chuyển tiếp.

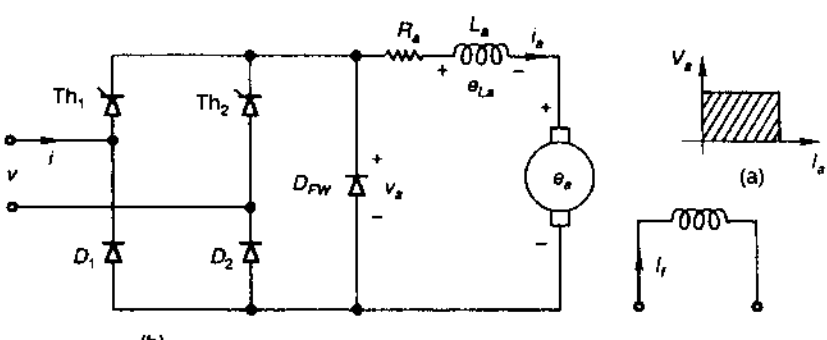
Các bộ chuyển 1-pha

Bộ chuyển đổi nửa sóng 1-pha (Hình 11.14), được dùng để điều khiển động cơ dc kích thích riêng rẽ, gồm một thyristor và một diode mắc rẽ. Trong mạch này, dòng động cơ luôn luôn bị gián đoạn, do đó động cơ hoạt động không tốt. Bộ chuyển đổi này chỉ được dùng cho các động cơ dưới 400W.



Hình 11.14 *Bộ chuyển đổi nửa sóng, 1-pha*

Bộ bán chuyển đổi (Hình 11.5(a)) là loại chuyển đổi góc một phần tư, cấp điện áp và dòng một cực tính tại các cực dc, do đó, không có sự hãm tái sinh, tức là công suất từ động cơ dc về nguồn ac. Do không có sự tái sinh, bộ này được dùng vì lý do kinh tế.



Hình 11.15 *Bộ bán chuyển đổi cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ*

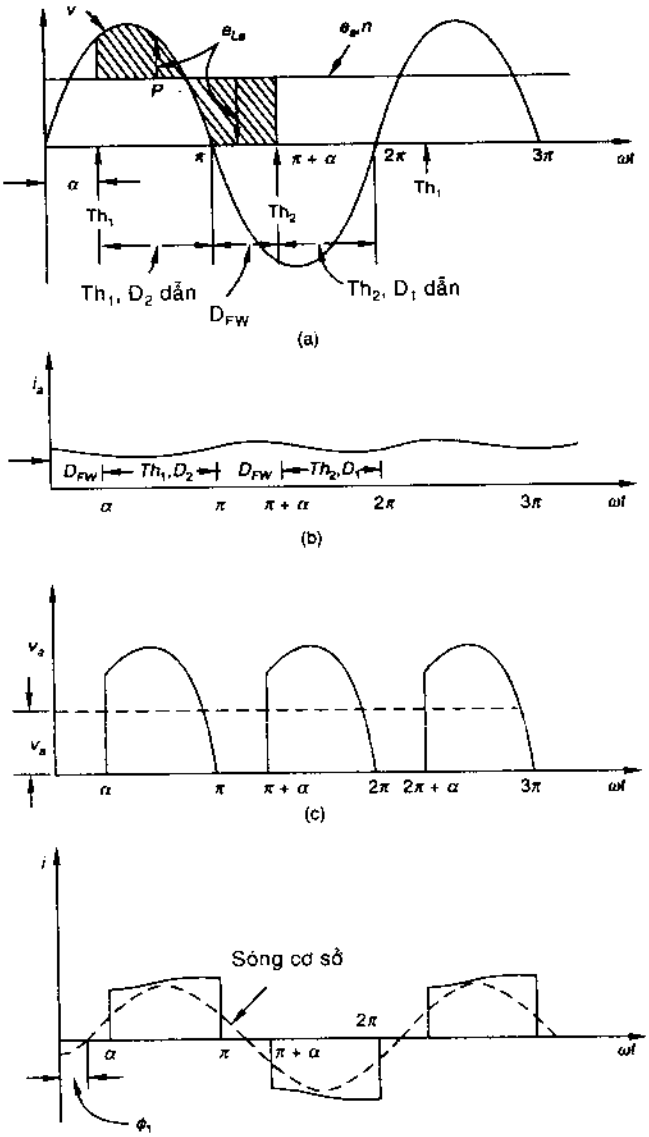
Hình 11.15 (b) minh họa mạch bộ bán chuyển đổi cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ. Điện trở phần ứng R_a và cảm kháng L_a mắc nối tiếp với lực điện động cảm ứng phần ứng e_a, điện áp cực phần ứng là v_a, có hai thyristor, hai diode và một diode tự do (nối song song với cực động cơ). Giả sử dòng phần ứng, làm việc ở trạng thái ổn định, là liên tục trên toàn bộ khoảng vận hành. Điện áp trạng thái ổn định và dạng sóng dòng điện được nêu trên Hình 11.16. Thyristor Th_1 được kích ở góc α và Th_2 tại góc $\pi + \alpha$ so với điện áp nguồn v và quá trình lặp lại liên tục.

Trong trạng thái ổn định, khi Th_1 kích ($\omega t = \alpha$), Th_1 và D_2 dẫn và động cơ nối vào nguồn, tức là $v_a = v$. Tại $\omega t = \pi$, v_a hướng theo chiều âm vì cực điện áp nguồn thay đổi. Điều này làm cho D_{FW}, diode tự do phân cực thuận và dòng phần ứng qua Th_1D_2 chuyển đến D_{FW}, điều đó có nghĩa là Th_1 chuyển mạch (tự nhiên). Các cực động cơ ngắn mạch qua D_{FW} trong khoảng $\pi < \omega t < \pi + \alpha$ làm cho dòng phần ứng liên tục trong thời kỳ này, khi động cơ không nối với nguồn. Tại $\omega t = \pi + \alpha$, Th_2 được kích và Th_2D_1 dẫn, làm cho D_{FW} đảo chiều phân cực và do đó mạch hở. Động cơ nối dương với nguồn trong thời kỳ tiếp theo $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$. Quá trình này lặp lại liên tục.

Có nhiều dạng sóng điện áp và dòng của động cơ dc kích thích riêng biệt được cấp điện qua bộ bán chuyển đổi (Hình 11.16). Mặc dù điện áp mắc song song qua cực động cơ (Hình 11.16(c)) có các sóng hài trên giá trị dc ổn định, giả sử, động cơ không đáp ứng với các sóng hài này và do đó vẫn chạy ở tốc độ không đổi n và có lực điện động cảm ứng không đổi. Do Th_1 kích tại $\omega t = \alpha$, nên dòng động cơ được tính như sau:

$$\frac{1}{L_a}\int_{\alpha}^{\omega t}(v - e_a)d(\omega t)\ \frac{1}{L_a}\int_{\alpha}^{\omega t}(v - e_a)d(\omega t);\ \text{giả thiết } R_a \text{ không đáng kể.} \quad (11.1)$$

Từ Hình 11.16 (a) có thể thấy $v > e_a$ nên dòng điện và lực điện động cảm ứng của động cơ e_a đều tăng. Trong thời kỳ này, một phần năng lượng được chuyển cho tải và phần khác tích lũy trong cảm kháng động cơ (L_a). Phía ngoài điểm P, $v < e_a$ và dòng giảm, gây ra sự đảo điện áp qua cảm kháng động cơ, năng lượng của L_a cấp cho hệ thống. Trong thời kỳ $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, diode tự do tiếp tục phân cực thuận do đảo chiều điện áp cảm ứng. Trong thời kỳ này, một phần năng lượng tích trữ trong L_a bị tiêu thụ để cấp cho tải cơ học. Dòng động cơ, tốc độ và lực điện động cảm ứng đều giảm. Quá trình này lặp lại trong thời kỳ tiếp theo ($\pi + \alpha < \omega t < 2\pi + \alpha$) qua Th_2D_1 và sau đó qua D_{FW}. Dòng này được lấy từ nguồn (Hình 11.16 (d)) là một phần của dòng phần ứng qua các thời kỳ (α, π), ($\pi + \alpha$, 2π)... khi động cơ nối vào nguồn cung cấp. Không cần sử dụng diode tự do. Tại $\omega t = \pi$, D_1 được phân cực thuận, dẫn qua Th_1D_1 để kích hoạt Th_2. Tại $\omega t = 2\pi$, diode tự do dẫn điện qua Th_2D_2, quá trình được lặp lại.



Hình 11.16 *Dạng sóng điện áp và dòng điện của bộ bán chuyển đổi cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ; dòng phần ứng liên tục.*

Dòng phần ứng không liên tục

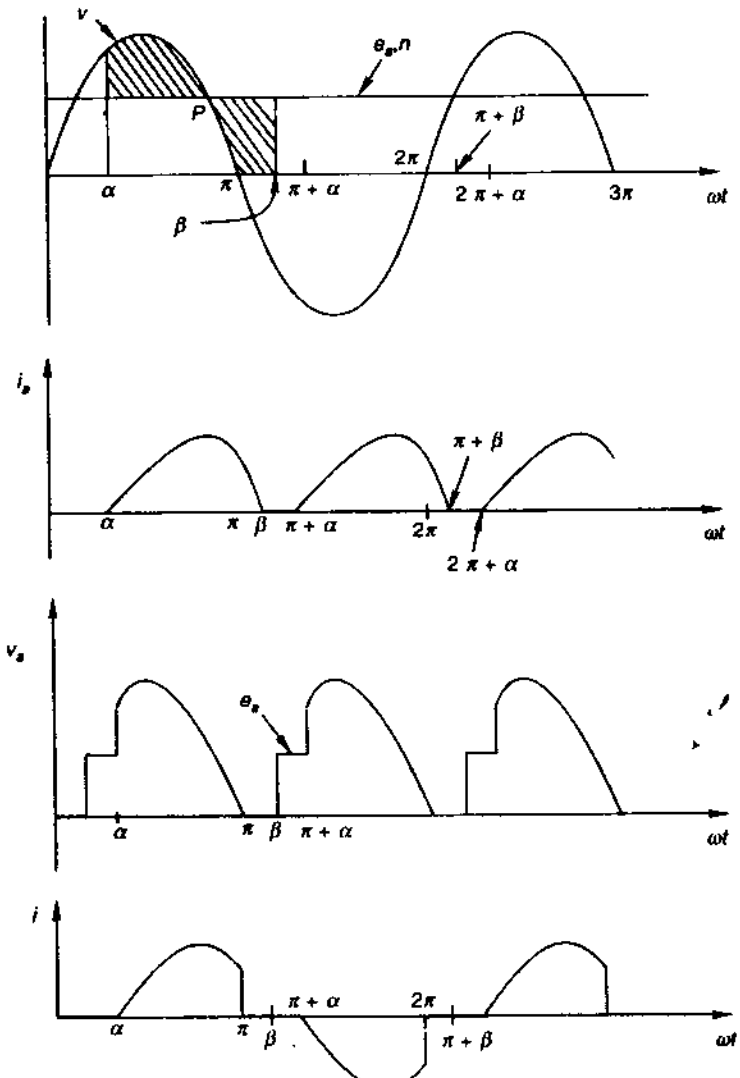
Dòng phần ứng không liên tục khi góc kích lớn, tốc độ cao và moment thấp. Sự làm việc của động cơ bị xấu đi do dòng phần ứng không liên tục. Tỷ số đỉnh đến trung bình và giá trị hiệu dụng với dòng phần ứng trung bình tăng. Vì vậy, để có thể vận hành động cơ theo chế độ dòng liên tục, cần có bộ ngắt mạch phần ứng từ bên ngoài, làm giảm tỷ suất suy giảm dòng điện trong quá trình vận hành diode tự do.

Dạng sóng dòng điện và điện áp đối với bộ bán chuyển đổi với dòng không liên tục được nêu trên Hình 11.17. Động cơ được nối với nguồn qua Th_1D_2 trong thời kỳ $\alpha < \omega t < \pi$. Khi quá trị số π, động cơ bị ngắn mạch qua diode tự do D_{FW}. Dòng phần ứng giảm xuống zero tại góc β (góc cắt) $< \pi + \alpha$, trước khi thyristor bị kích, do đó dòng không liên tục. Thời kỳ từ α đến π, thời kỳ dẫn qua Th_1D_2, điện áp cực động cơ bằng điện áp vào. Thời kỳ π đến β, điện áp cực động cơ là zero, các cực động cơ bị ngắn mạch do diode tự do. Từ β đến $\pi + \alpha$, động cơ chạy theo đà và điện áp bằng lực điện động cảm ứng. Có thể thấy sóng dòng điện cơ sở từ nguồn có góc trễ điện áp là ϕ_1 ($< \alpha$).

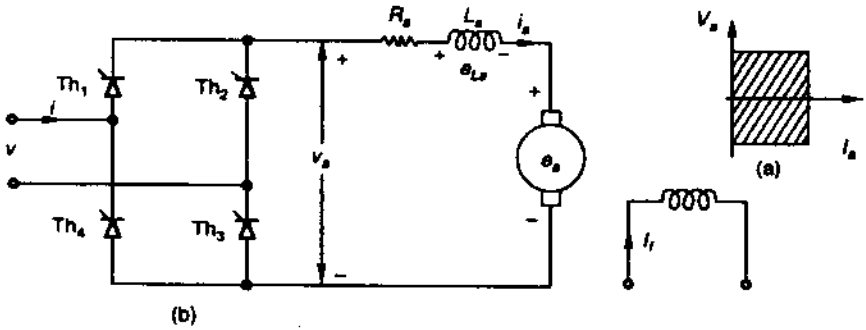
Bộ chuyển đổi hoàn toàn

Hình 11.18(a) minh họa bộ chuyển đổi hoàn toàn, hai góc phần tư, trong đó sự phân cực điện áp ngõ ra có thể đảo chiều, nhưng dòng điện vẫn một chiều do các thyristor cùng chiều. Bộ chuyển đổi hoàn toàn dùng bốn thyristor nhưng không có diode tự do. Bộ chuyển đổi hoàn toàn cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng biệt được nêu trên Hình 11.18. Dạng sóng điện áp và dòng điện được nêu trên Hình 11.19, với giả thiết dòng phần ứng i_a hầu như không đổi. Các thyristor dẫn theo các khoảng $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$ và nối vào động cơ để cấp điện. Tại $\pi + \alpha$, thyristor Th_2Th_4 được khởi động. Ngay khi đó, điện áp cung cấp xuất hiện phân cực nghịch qua Th_1Th_3. Đây là sự chuyển mạch tự nhiên. Dòng động cơ chuyển từ Th_1Th_3 đến Th_2Th_4. Thời kỳ từ α đến π, năng lượng từ nguồn đến động cơ (v, i dương và do đó v_a, i_a dương). Tuy nhiên, thời kỳ từ π đến $\pi + \alpha$, một phần năng lượng được cấp trở lại nguồn (v và i phân cực ngược, do đó v_a và i_a ngược chiều với dòng năng lượng). Có thể thấy sóng dòng điện cơ sở từ nguồn bị trễ pha với điện áp theo góc $\phi_1 = \alpha$.

Dạng sóng điện áp và dòng điện đối với $\alpha > 90^0$ được nêu trên Hình 11.20. Điện áp cực trung bình của động cơ khi đó là âm. Nếu đảo các cực động cơ, động cơ sẽ vận hành theo chế độ máy phát cấp năng lượng trở lại nguồn ac. Đây là kiểu làm việc nghịch đảo của bộ chuyển đổi và được dùng trong chế độ hãm tái sinh của động cơ. Điều cần lưu ý là trong thời kỳ dẫn của Th_1Th_3 hoặc Th_2Th_4, do điện áp nguồn cung cấp là âm, dòng phần ứng bắt đầu giảm, làm đảo cực tính của cảm kháng nên các thyristor dẫn tiếp tục phân cực thuận.



Hình 11.17 *Dạng sóng dòng điện và điện áp của bộ bán chuyển đổi cấp điện động cơ dc kích thích riêng rẽ; dòng phần ứng không liên tục*



Hình 11.18. *Bộ chuyển đổi hoàn toàn, cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ.*

Dạng sóng điện áp và dòng trong trường hợp dòng phần ứng gián đoạn tương tự bộ bán chuyển đổi (Hình 11.17).

Đặc tuyến moment - tốc độ

Giả sử dòng phần ứng liên tục, đối với bộ bán chuyển đổi có sự tác động của diode tự do, phương trình mạch phần ứng là:

$$v_a = v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \qquad \alpha < \omega t < \pi \tag{11.2}$$

$$v_a = 0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \qquad \pi < \omega t < \pi + \alpha \tag{11.3}$$

Đối với bộ chuyển đổi hoàn toàn, phương trình phần ứng là:

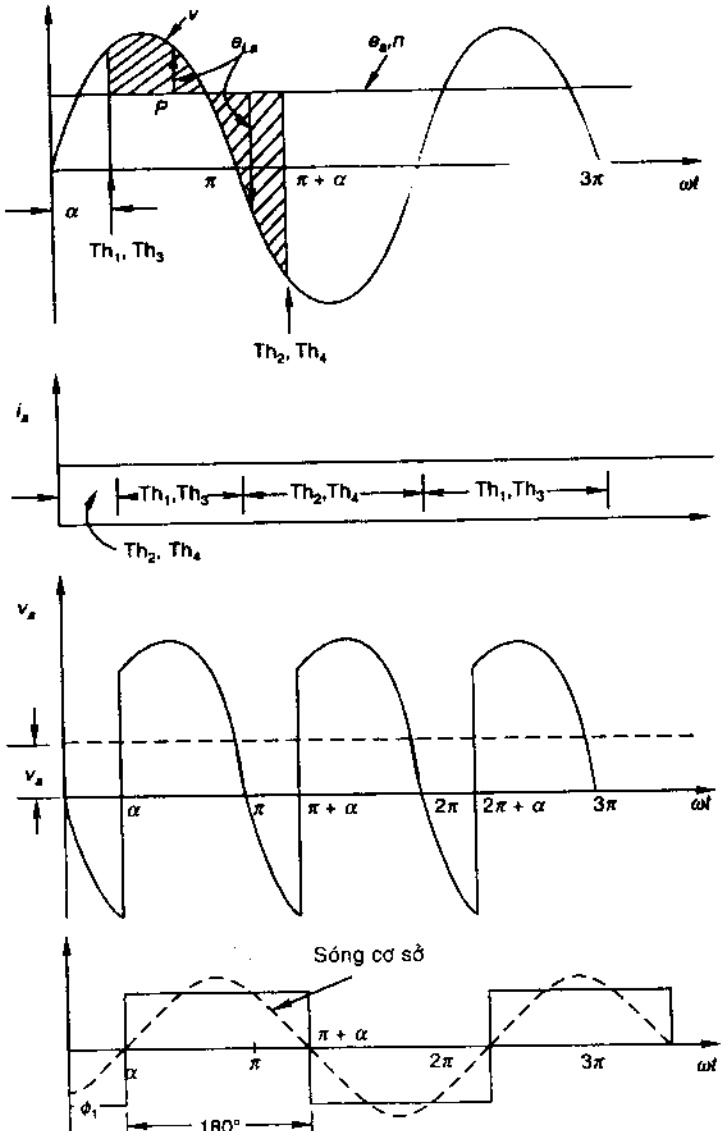
$$v_a = v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \qquad \alpha < \omega t < \pi + \alpha \tag{11.4}$$

Với $v = \sqrt{2}\ V \sin \omega t$, điện áp trung bình ở động cơ là: Với bộ bán chuyển đổi

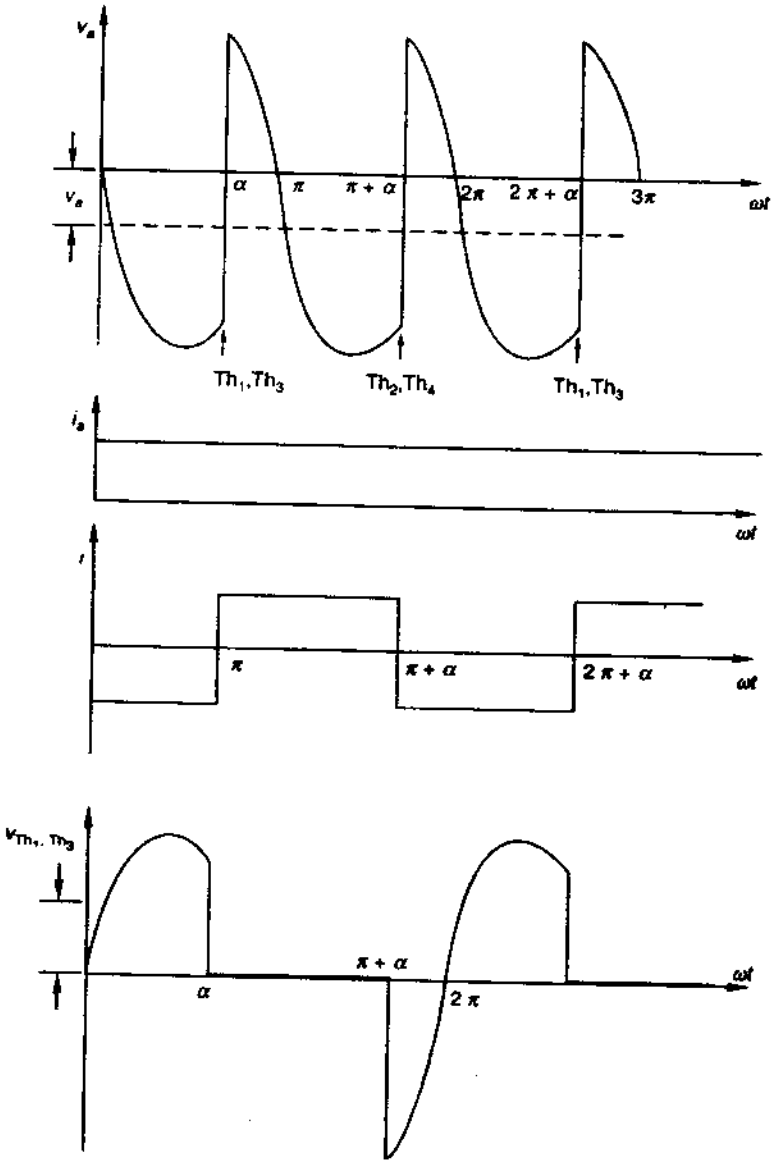
$$V_a = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}\ V \sin \omega t\ d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos \alpha) \tag{11.5}$$

Với bộ chuyển đổi hoàn toàn

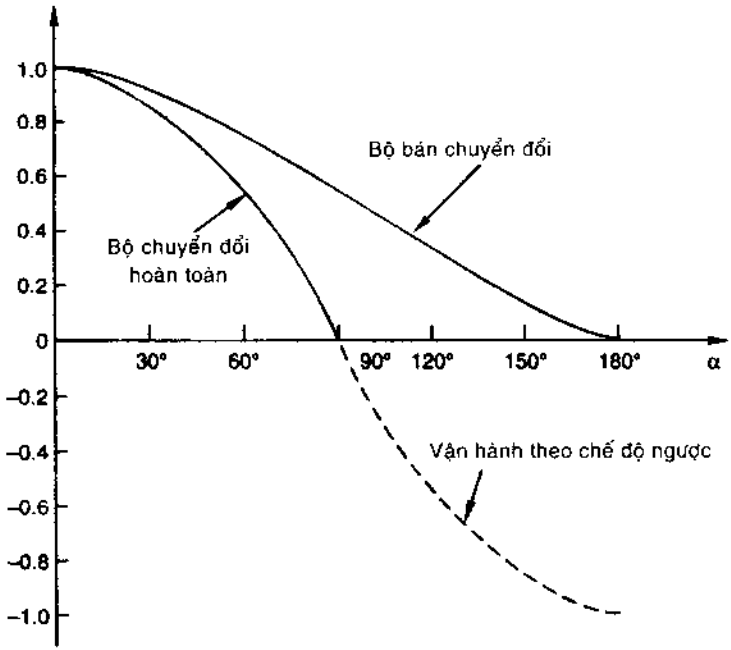
$$V_a = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}\ V \sin \omega t\ d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \tag{11.6}$$



Hình 11.19 *Dạng sóng điện áp và dòng của bộ chuyển đổi hoàn toàn, cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ, dòng phần ứng liên tục, $\alpha < 90^0$*



Hình 11.20 *Dạng sóng điện áp và dòng điện của bộ chuyển đổi hoàn toàn; α > 90°*



Hình 11.21 *Sự biến thiên điện áp cực trên bộ chuyển đổi theo góc khởi động α*

Hình 11.21 minh họa sự biến thiên điện áp động cơ theo hàm của góc khởi động trong cả hai kiểu bộ chuyển đổi. Trong trường hợp bộ chuyển đổi hoàn toàn, sự vận hành đảo sẽ xảy ra khi $90^0 < \alpha < 180^0$.

Phương trình động cơ đối với các giá trị trung bình:

$$E_a = K_a \Phi n \tag{11.7}$$

$$T = K_a \Phi I_a \tag{11.8}$$

Và:

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_a \Phi} \tag{11.9}$$

Thay I_a từ pt (11.8) và V_a từ pt (11.5), (11.6) vào pt (11.9), đặc tuyến moment - tốc độ có dạng: Bộ bán chuyển đổi:

$$n = \frac{\left(\sqrt{2}V/\pi\right)(1 + \cos\alpha)}{K_a \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \Phi)^2} T \tag{11.10}$$

Bộ chuyển đổi hoàn toàn:

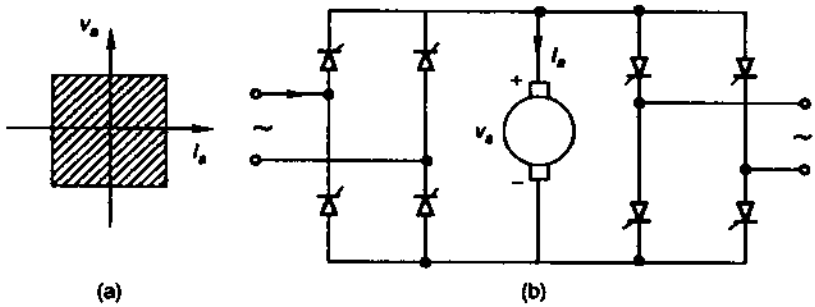
$$n = \frac{2\sqrt{2}V\cos\alpha}{K_a\Phi} - \frac{R_a}{(K_a\Phi)^2}T \qquad (11.11)$$

Số hạng đầu tiên trong các pt (11.10) và (11.11) là tốc độ không tải lý thuyết, số hạng thứ hai là độ sụt tốc độ gây ra do điện trở phần ứng. Tốc độ không tải lý thuyết có thể thay đổi theo góc α.

Trong trường hợp dòng không liên tục, điện áp trung bình tại các cực động cơ phụ thuộc góc β (góc cắt), góc này phụ thuộc tốc độ trung bình động cơ n, dòng điện trung bình của động cơ I_a, và góc α.

Bộ chuyển đổi kép

Bộ chuyển đổi kép (Hình 11.22), có thể vận hành ở cả bốn góc phần tư, là hai bộ bán chuyển đổi để chuyển dc ở cả hai chiều, được dùng để cung cấp sự đảo chiều dòng điện hầu như tức thời tại các cực của động cơ.



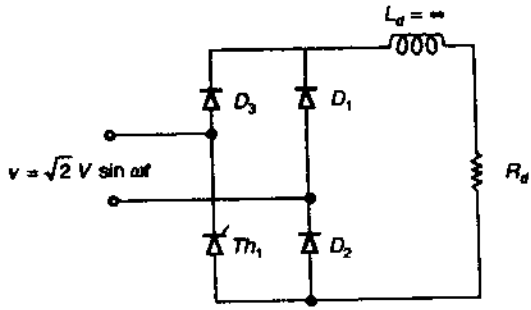
Hình 11.22. Bộ chuyển đổi kép.

Điều khiển động cơ dc kích thích nối tiếp

Các bộ bán chuyển đổi và chuyển đổi hoàn toàn được dùng để điều khiển động cơ dc kích thích nối tiếp. Cảm kháng tổng của mạch rất cao do kích từ nối tiếp nên dòng phần ứng hầu như liên tục. Các phương trình về động cơ như thông lượng/cực tỷ lệ với dòng phần ứng. Các xử lý tương tự như ở động cơ dc kích thích riêng rẽ.

Ví dụ 11.1 Bộ chuyển đổi 1-pha (Hình 11.23), giả sử có góc khởi động thyristor là α.

Hình 11.23. Mạch bộ chuyển đổi 1-pha.



a) Hãy vẽ dạng sóng điện áp tải, giả sử dòng ra là I_a không đổi.

b) Hãy vẽ dạng sóng dòng điện qua Th_1, D_1, D_2 và D_3

c) Tính công suất cấp cho tải, biết V = 100V, R_d = 10 Ω và góc khởi động $\alpha = 45^0$.

Giải

(a), (b) Các dạng sóng được vẽ trên Hình 11.24

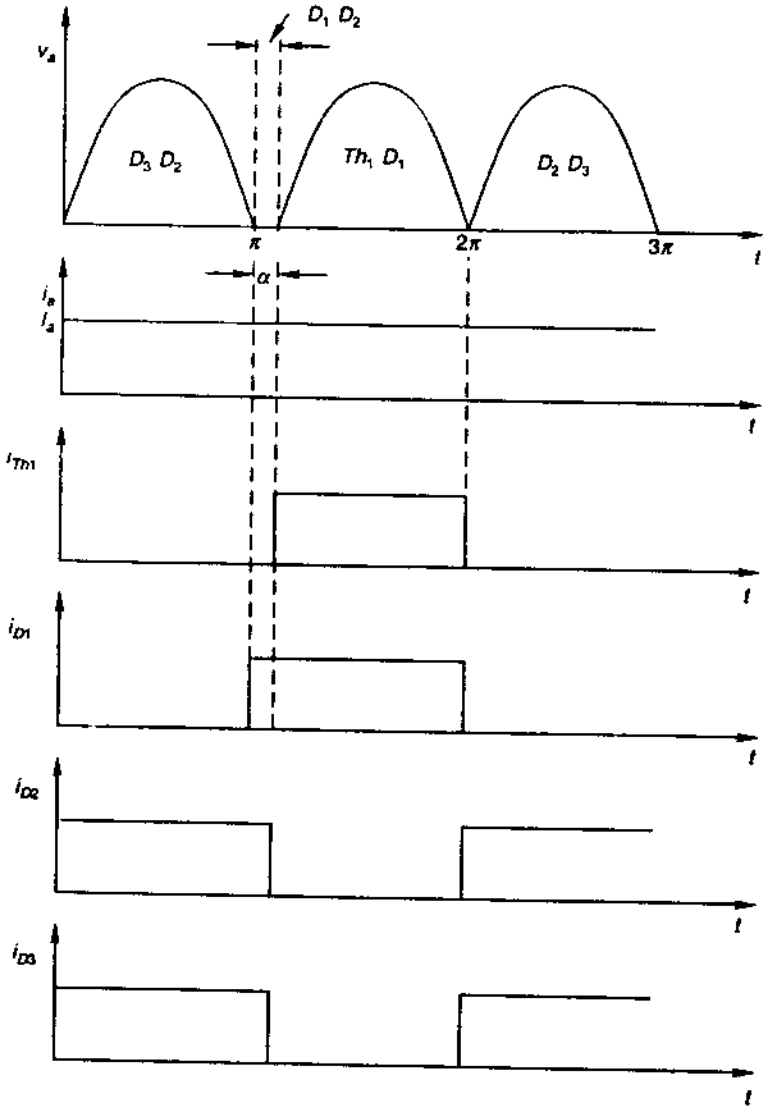
c)
$$V_a = \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}\sqrt{2}V\sin\omega t\, d(\omega t) + \int_{\pi+\pi/4}^{2\pi}(-\sqrt{2}V\sin\omega t)\, d(\omega t)\right]$$

$$= \frac{V}{\sqrt{2}\pi}\left(2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{100}{\sqrt{2}\pi}\left(2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 60.93\ V$$

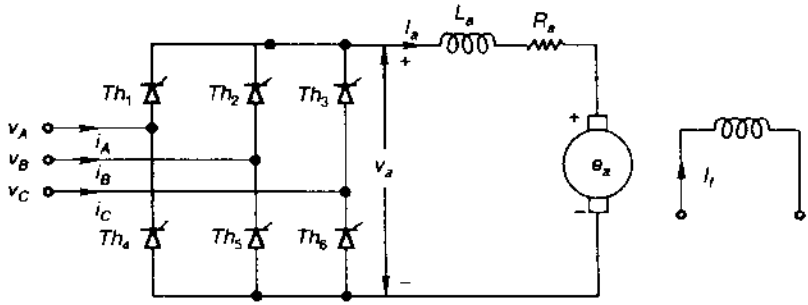
Công suất tải $P_a = \dfrac{V_a^2}{R_d} = \dfrac{(60.93)^2}{10} = 371.2\ W$

Các bộ chuyển đổi 3-pha

Các động cơ công suất lớn được cấp điện từ nguồn 3-pha qua bộ chuyển đổi 3-pha. Trong bộ chuyển đổi 3-pha tần số gợn sóng của điện áp cực động cơ cao hơn bộ chuyển 1-pha, nên các yêu cầu lọc dòng điện động cơ tương đối ít và dòng hầu như liên tục. Các bộ chuyển đổi 3-pha có thể là loại nửa sóng, loại bán chuyển đổi, chuyển đổi hoàn toàn và chuyển đổi kép. Bộ chuyển đổi 3-pha nửa sóng ít được sử dụng do các dòng cung cấp có chứa thành phần dc. Bộ bán chuyển đổi và chuyển đổi hoàn toàn thường được sử dụng. Bộ chuyển đổi kép được dùng trong các truyền động đảo chiều với mức công suất tải vài MW. Bộ bán chuyển đổi cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ (Hình 11.25).



Hình 11.24. *Các dạng sóng điện áp và dòng điện từ Ví dụ 11.1.*



Hình 11.25 *Bộ bán chuyển đổi 3-pha cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ.*

Hình 11.26 (a) minh họa dạng sóng điện áp dùng cho bộ chuyển đổi này. Các quy chiếu góc khởi động α của thyristor là ωt_1, ωt_2, ωt_3 ... cách đều 120^0. Ba thyristor được kích theo thứ tự với khoảng cách thời gian 120^0. Sau khi Th_1 khởi kích, diode D_2 hoặc D_3 dẫn, tùy thuộc điện áp nào dương hơn, V_{AB} hay V_{AC}. Đối với giá trị α cho trước, có thể thấy (Hình 11.26b) diode D_2 dẫn đến quá 90^0 thì D_3 dẫn Th_2 kích khởi. Kế đó D_3 và D_1 dẫn cho tới khi Th_3 kích khởi, và sau đó là D_1, D_2 dẫn theo trình tự. Quá trình này lặp lại tạo nên dạng sóng điện áp V_a (Hình 11.26b). Với trị số α này, không cần đến diode tự do để dẫn dòng phần ứng. Dòng phần ứng i_a và dòng điện nguồn i_A được nêu trên Hình 11.26 c và 11.26 d. Dòng i_{A1} cơ sở của dòng i_A trễ pha theo góc ϕ_1 do hệ số công suất nhỏ hơn đơn vị.

Với góc kích khởi α = 60^0, chỉ một diode dẫn trong thời kỳ dẫn của một thyristor. Thứ tự dẫn khi đó là Th_1D_3, Th_2D_3, Th_2D_1, Th_3D_2. Với các giá trị α lớn hơn, V_{AC} âm trước khi Th_2 kích khởi, làm ngắt dòng nên i_a đi qua diode tự do D_{FW}.

Nếu không dùng diode tự do, quá trình dẫn sẽ qua diode và thyristor của một nhánh cho trước, chẳng hạn sau khi D_3 ngưng dẫn, dòng điện sẽ đi qua Th_1D_1.

Giá trị trung bình điện áp phần ứng V_a giảm liên tục khi α tăng. Đồng thời góc trễ ϕ_1 của i_{A1} tăng làm giảm hệ số công suất.

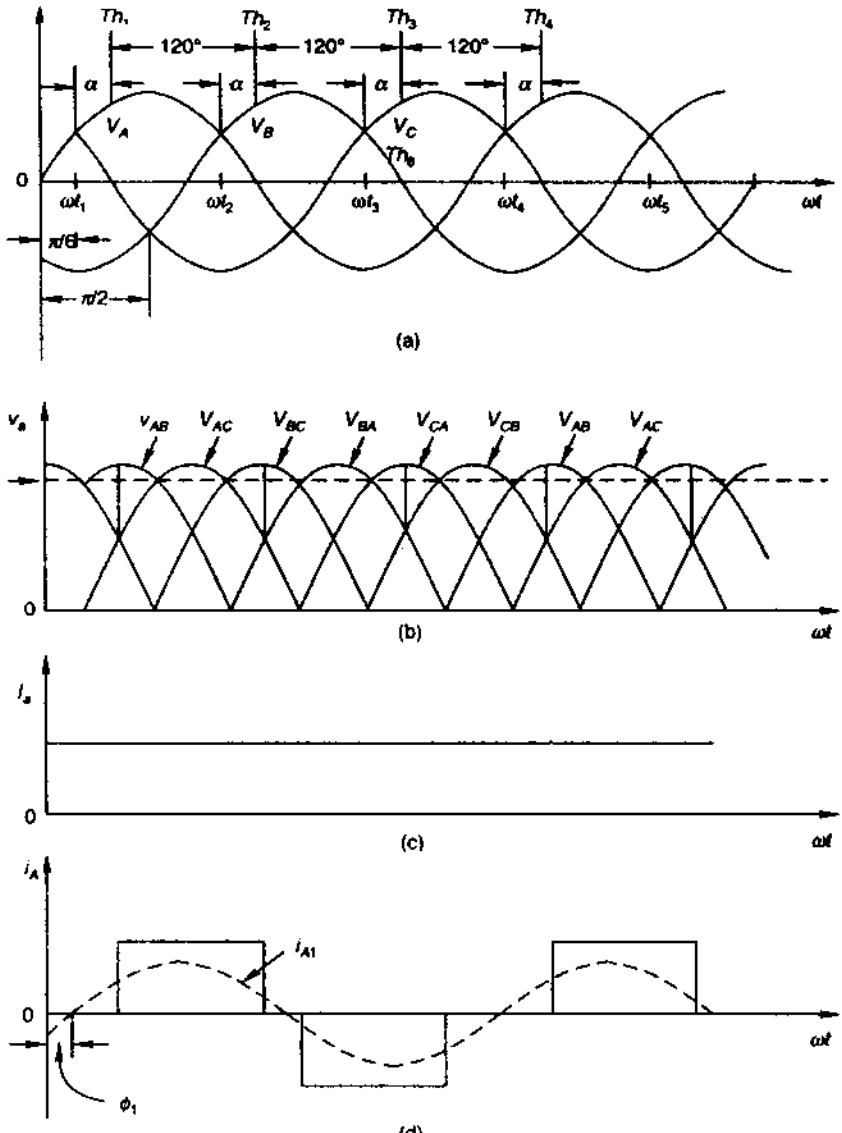
Điện áp phần ứng trung bình v_a có dạng:

Điện áp cung cấp là:

$$V_A = \sqrt{2}\ V \sin \omega t$$

$$V_B = \sqrt{2}\ V \sin (\omega t - 2\pi / 3)$$

$$V_C = \sqrt{2}\ V \sin (\omega t - 4\pi / 3)$$



Hình 11.26 *Dạng sóng điện áp và dòng điện của bộ chuyển đổi 3-pha cấp điện cho động cơ dc kích thích riêng rẽ.*

Trường hợp dòng phần ứng liên tục

(i) $\alpha < 60^0$

$$V_a = \frac{3}{2\pi}\left[\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2}(V_A - V_B)\,d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi/6+\alpha+2\pi/3}(V_A - V_C)\,d(\omega t)\right]$$

$$= \frac{3}{2\pi}\left[\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2}\sqrt{6}\,V\sin(\omega t - \pi/6)\,d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi/6+\alpha+2\pi/3}\sqrt{6}\,V\sin(\omega t - \pi/6)\,d(\omega t)\right]$$

$$V_a = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi}(1 + \cos\alpha) \qquad (11.12a)$$

(ii) $\alpha \geq 60^0$

$$V_a = \frac{3}{2\pi}\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\pi}(V_A - V_B)\,d(\omega t)$$

$$= \frac{3}{2\pi}\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\pi}\sqrt{6}V\sin(\omega t - \pi/6)\,d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi}(1 + \cos\alpha) \qquad (11.12b)$$

Chú ý, các pt (11.12a) và (11.12b) là đồng nhất. Biểu thức của pt (11.10) về tốc độ động cơ trung bình có dạng:

$$n = \frac{(3\sqrt{6}/2\pi)(1 + \cos\alpha)}{K_a\Phi} - \frac{R_a}{(K_a\Phi)^2}T \qquad (11.13)$$

Ví dụ 11.2. Tải điện trở được mắc vào bộ bán chuyển đổi 3-pha qua lò phản ứng lớn. Nếu công suất ra tại các cực tải là 15kW, hãy tính

(a) Giá trị góc kích khởi, giả sử $R_0 = 1.5\ \Omega$ và $V_{\text{cung cấp}}$ (pha) = 100V, hiệu dụng.

(b) Giá trị trung bình của dòng điện qua các thyristor và diode.

Giải

Từ pt (11.13)

$$V_a(\alpha) = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi}(1 + \cos\alpha) = \sqrt{P_0R_0}\,\frac{3\sqrt{6}\times 100}{2\pi}(1 + \cos\alpha) = \sqrt{15000\times 1.5}$$

$$\alpha = 73.6^0$$

$$I_a = \frac{\sqrt{15000 \times 1.5}}{1.5} = 100 \text{ A}$$

$$I_{Th}(av) = I_D(av) = \frac{I_a}{3} = \frac{100}{3} = 33.3 \text{ A}$$

Điều khiển động cơ dc qua các bộ tạo xung

Để điều khiển động cơ dc vận hành từ nguồn dc, cần điều khiển mức điện áp dc. Ví dụ, các truyền động xe điện ngầm, xe điện, xe chạy bằng acquy. Các phương pháp thuận tiện chuyển đổi nguồn điện áp dc cố định thành điện áp dc biến thiên gồm:

Điều khiển điện trở. Biến trở được mắc vào giữa tải và nguồn. Phương pháp này hao tốn nhiều năng lượng. Hơn nữa, đối với điện áp ra cho trước cần có các giá trị điện trở khác nhau để tạo ra các dòng tải khác nhau.

Cụm máy phát - động cơ. Kích thích máy phát riêng rẽ để có điện áp biến thiên từ zero đến giá trị định mức với cực tính bất kỳ, nhưng loại thiết bị này cồng kềnh, kém hiệu quả, và đáp ứng chậm.

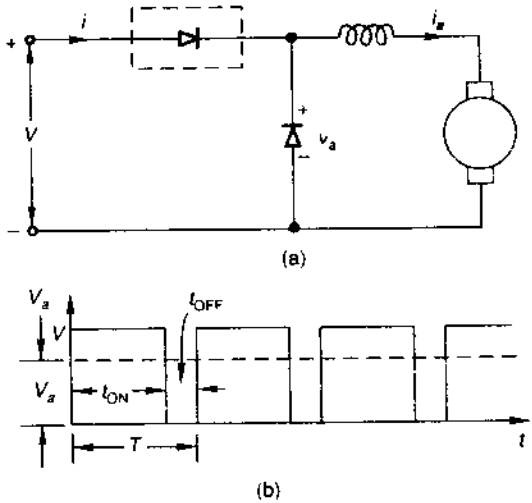
Dòng chỉnh lưu nghịch (nghịch lưu). Nguồn dc có thể được chuyển sang dạng ac bằng bộ nghịch lưu, qua biến áp để có điện áp thích hợp và chỉnh lưu thành dạng dc. Do có hai tầng chuyển đổi nên bộ này cồng kềnh, kém hiệu quả.

Bộ tạo xung dc. Bộ tạo xung, về cơ bản là bộ đóng ngắt bằng điện tử để mở nguồn điện dc cố định trong những khoảng thời gian ngắn, đưa điện nguồn vào các cực động cơ theo chuỗi xung. Quá trình này điều khiển điện áp trung bình cung cấp cho động cơ. Bộ tạo xung cũng dễ dàng làm việc ở chế độ tái sinh. Bộ tạo xung cung cấp điện áp dc điều khiển vô cấp và hiệu quả, ít tốn kém, không cồng kềnh so với ba phương pháp nêu trên, có đáp ứng nhanh và tái sinh, đây là công nghệ mới và được coi là máy biến áp dc - dc với tỷ số thay đổi liên tục.

Nguyên lý vận hành

Bộ tạo xung, về cơ bản là bộ đóng ngắt thyristor mắc nối tiếp với tải (Hình 11.27a). Một diode mắc song song qua tải để dẫn dòng tải khi thyristor ngắt. Thyristor có thể mở và đóng theo chu kỳ thời gian và chu kỳ này được lặp lại. Dòng dc qua bộ tạo xung trong thời kỳ mở đòi hỏi phải có mạch chuyển đổi cưỡng bức để ngắt thyristor. Giá trị trung bình của dạng sóng điện áp ra của bộ tạo xung được nêu trên Hình 11.27b.

Hình 11.27 Mạch tạo xung cơ bản và dạng điện áp ra.



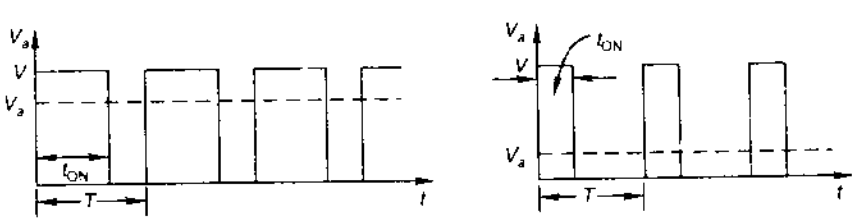
$$V_a = V\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = V\frac{t_{ON}}{T} = \alpha V \qquad (11.14)$$

trong đó, t_{ON} = thời gian đóng trong một chu kỳ.
t_{OFF} = thời gian ngắt trong một chu kỳ.
T = chu kỳ tạo xung.

$\alpha = \frac{t_{ON}}{T}$ = chu kỳ làm việc.

Do đó, có thể thấy điện áp ra của bộ tạo xung được điều khiển theo chu kỳ làm việc, và có thể thay đổi theo các cách sau đây:

1. Hệ thống tần số cố định. Trong hệ thống này $f = 1/T$ (cố định), tức là tần số tạo xung hoặc chu kỳ được cố định và t_{ON} biến thiên để điều khiển α. Đây là *điều biến chiều rộng xung* (Hình 11.28).



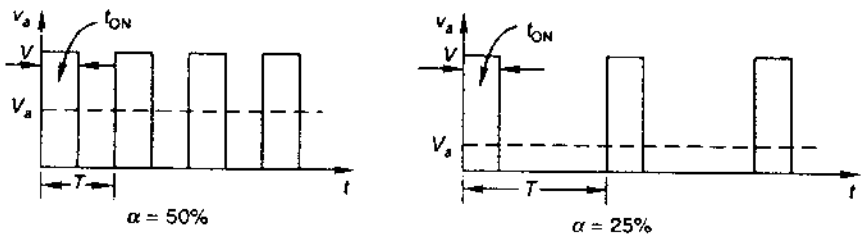
Hình 11.28. *Điều biến chiều rộng xung.*

2. Hệ thống tần số biến thiên. Ở đây, chu kỳ tạo xung T thay đổi và t_{ON} hoặc t_{OFF} cố định (Hình 11.29). Đây là *điều biến tần số*. Phương pháp điều khiển này có hai khó khăn:

(i) Điều khiển V_a đòi hỏi thay đổi tần số xung trong khoảng rộng, thiết kế mạch bộ lọc để thay đổi tần số là điều khó khăn

(ii) Khi điện áp ra thấp, giá trị lớn của t_{OFF} làm cho dòng động cơ không liên tục.

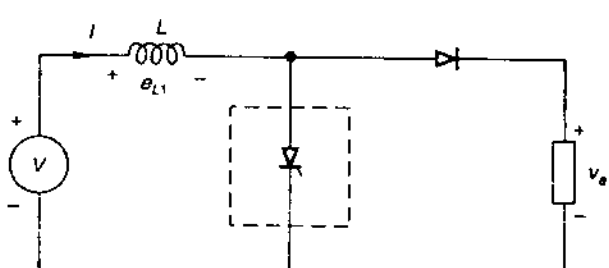
Các tần số tạo xung cao vài trăm chu kỳ/ giây được sử dụng trong thực tế.



Hình 11.29. *Điều biến tần số xung.*

Bộ tạo xung tăng

Cấu hình bộ tạo xung (Hình 11.27a) tạo ra điện áp ra nhỏ hơn điện áp vào. Có thể nhận được điện áp ra cao hơn điện áp tải ngõ vào bằng cách dùng mạch tạo xung được minh họa trên Hình 11.30. Khi bộ tạo xung hoạt động, cuộn cảm trong mạch là nguồn và năng lượng từ nguồn được lưu trong cuộn này. Khi bộ tạo xung ngắt, dòng trong cuộn cảm buộc phải qua diode và tải. Dòng giảm làm cho điện áp trên cuộn cảm đảo chiều và cộng vào điện áp nguồn, do đó điện áp tải cao hơn điện áp nguồn (v_a > V). Năng lượng trong cuộn cảm được đưa vào tải.



Hình 11.30
Cấu hình bộ tạo xung tăng

Trên cơ sở các giá trị trung bình, trong thời kỳ bộ tạo xung làm việc, năng lượng trong cuộn cảm từ nguồn là

$$W_{L,in} = VIt_{ON} \qquad (11.15)$$

Trong thời kỳ bộ tạo xung ngắt, năng lượng từ cuộn cảm cấp cho tải là:

$$W_{L,out} = (V_a - V)It_{OFF} \qquad (11.16)$$

Giả sử không có tổn thất trên hệ thống, trong trạng thái ổn định hai năng lượng này bằng nhau:

$$VIt_{ON} = (V_a - V)It_{OFF} \qquad (11.17)$$

từ đó:

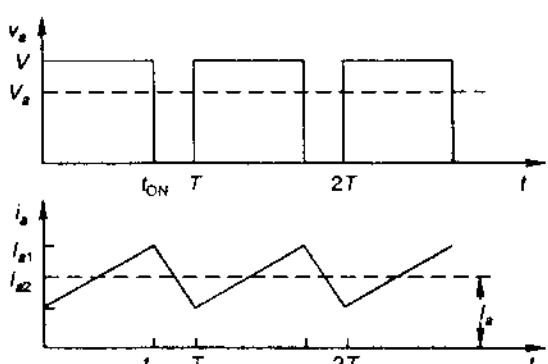
$$V_a = V\frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{OFF}} = V\frac{T}{T - t_{ON}} = \frac{V}{1 - \alpha} \qquad (11.18)$$

Vì α thay đổi trong khoảng 0 đến 1, điện áp tải lý thuyết thay đổi từ V đến ∞.

Bộ tạo xung tăng điện áp có thể được dùng để hãm tái sinh động cơ dc. Từ Hình 11.30, nếu V là điện áp phần ứng động cơ và V_a là nguồn dc, năng lượng được cấp từ điện áp giảm của động cơ đến nguồn điện áp ổn định nhưng cao hơn.

Dạng sóng điện áp và dòng điện

Dạng sóng điện áp và dòng điện đối với mạch bộ tạo xung (Hình 11.27a), và trường hợp dòng liên tục được minh họa trên Hình 11.31.



Hình 11.31 *Dạng sóng điện áp và dòng điện của bộ tạo xung.*

Chuyển mạch bộ tạo xung

Như đã đề cập, thyristor trong bộ tạo xung bị ngắt nhờ mạch chuyển phụ. Sự chuyển mạch có thể được phân loại như sau:

1. Chuyển mạch cưỡng bức. Trong loại chuyển mạch này, dòng qua thyristor bị giảm cưỡng bức đến zero để ngắt mạch. Điều này được thực hiện bằng hai cách:

a) Chuyển mạch điện áp. Tụ tạm thời phân cực ngược để ngắt thyristor đang dẫn.

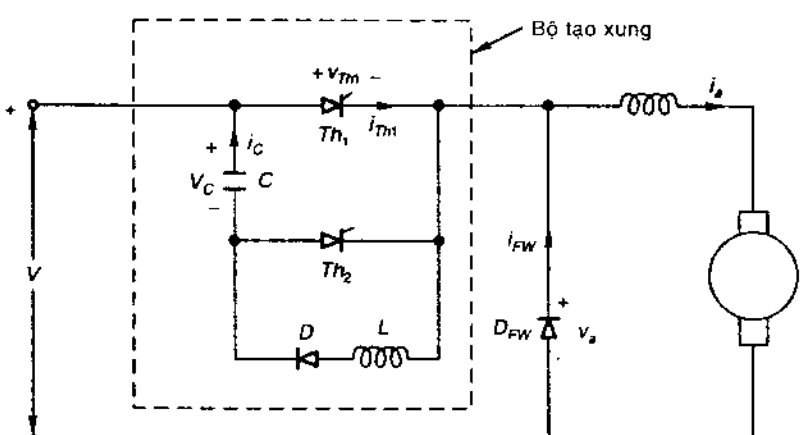
b) Chuyển mạch dòng. Xung dòng điện bị cưỡng bức đi qua thyristor đang dẫn theo chiều ngược lại. Khi dòng bằng zero, thyristor bị ngắt.

2. Chuyển mạch tải. Dòng tải qua thyristor hoặc giảm đến zero (khi dùng chuyển mạch tự nhiên) hoặc đến linh kiện khác, từ thyristor đang dẫn.

Chuyển mạch điện áp

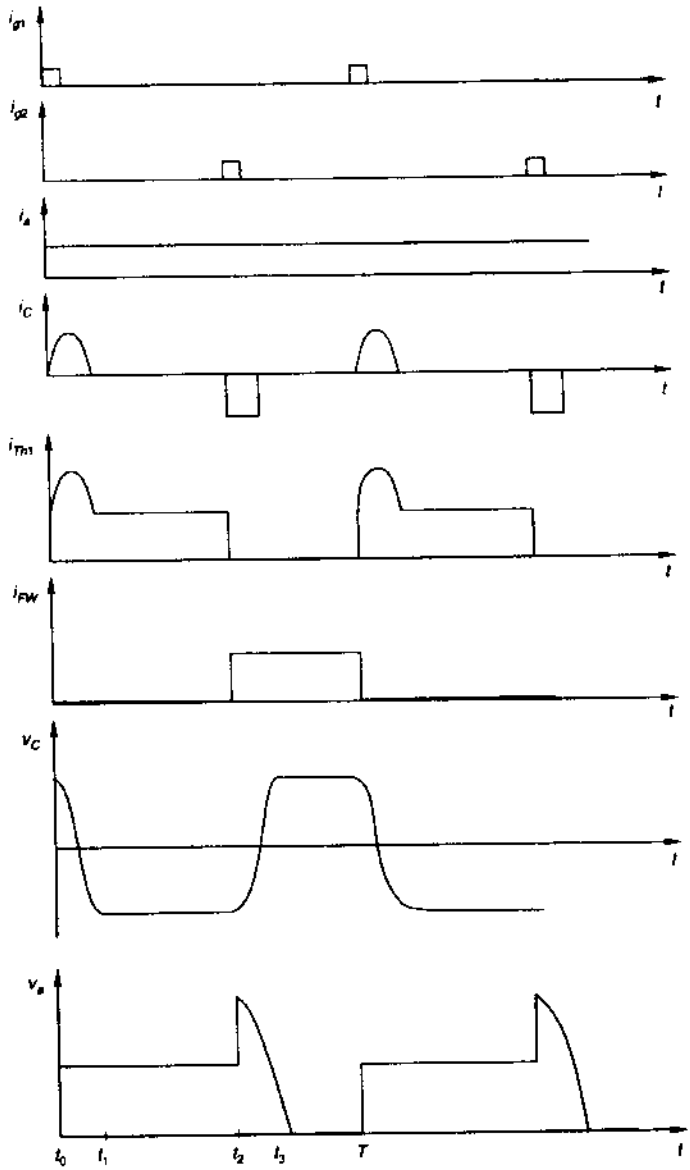
Mạch này gồm thyristor phụ Th_2, diode D, cảm kháng L và tụ điện C (Hình 11.32), còn mạch tạo xung là phần trong khung với các nét đứt.

Để khởi động mạch, tụ điện C lúc đầu được tích điện bằng cách kích khởi thyristor Th_2, điện tích từ nguồn qua C, Th_2 và tải với thyristor đang tích điện bị ngắt khi dòng tích điện bằng zero.



Hình 11.32. *Chuyển mạch điện áp trong bộ tạo xung.*

Hình 11.33
Dạng sóng dòng điện và điện áp trong bộ tạo xung chuyển mạch điện áp



Sóng dòng điện và điện áp của bộ tạo xung chuyển mạch điện áp được nêu trên Hình 11.33. Thyristor chính Th_1 khởi kích tại t_0. Dòng điện theo hai ngả - dòng tải i_a qua Th_1 và dòng chuyển mạch i_C qua C, Th_1, L và D. Dòng i_C dao động theo tần số được xác định từ mạch nối tiếp LC. Khi kết thúc xung i_C thứ nhất, C được tích điện âm và điode D khóa dòng điện.

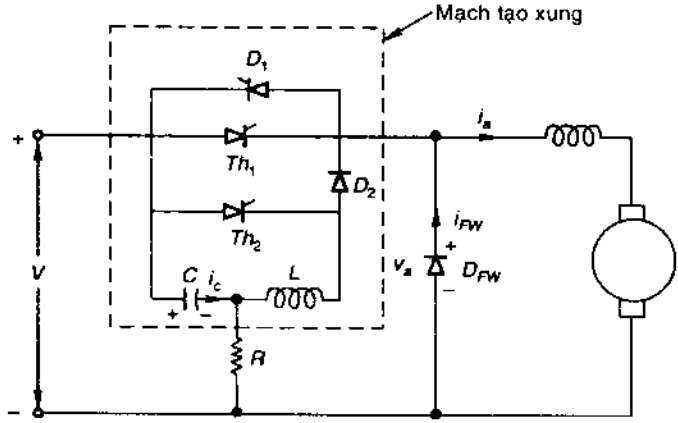
Để ngắt Thyristor chính Th_1, thyristor phụ Th_2 được khởi kích tại t_2, làm tụ điện C tích điện hoàn toàn để phân cực nghịch Th_1 và ngắt thyristor này. Tụ điện C tự tích điện dương từ nguồn qua Th_2 và tải, Th_2 ngắt tại t_3, quá trình tích điện chấm dứt khi dòng tích điện giảm đến zero, tải được chuyển mạch. Dòng tải khi đó đi qua D_{FW}. Tại t = T, Thyristor chính lại được kích khởi và chu kỳ được lặp lại.

Bộ tạo xung đơn giản này được dùng rộng rãi trong quá khứ, có nhược điểm là tụ phải được tích điện trước để bắt đầu vận hành. Hơn nữa, điện áp tăng gấp đôi khi sự chuyển mạch được khởi động từ Th_2.

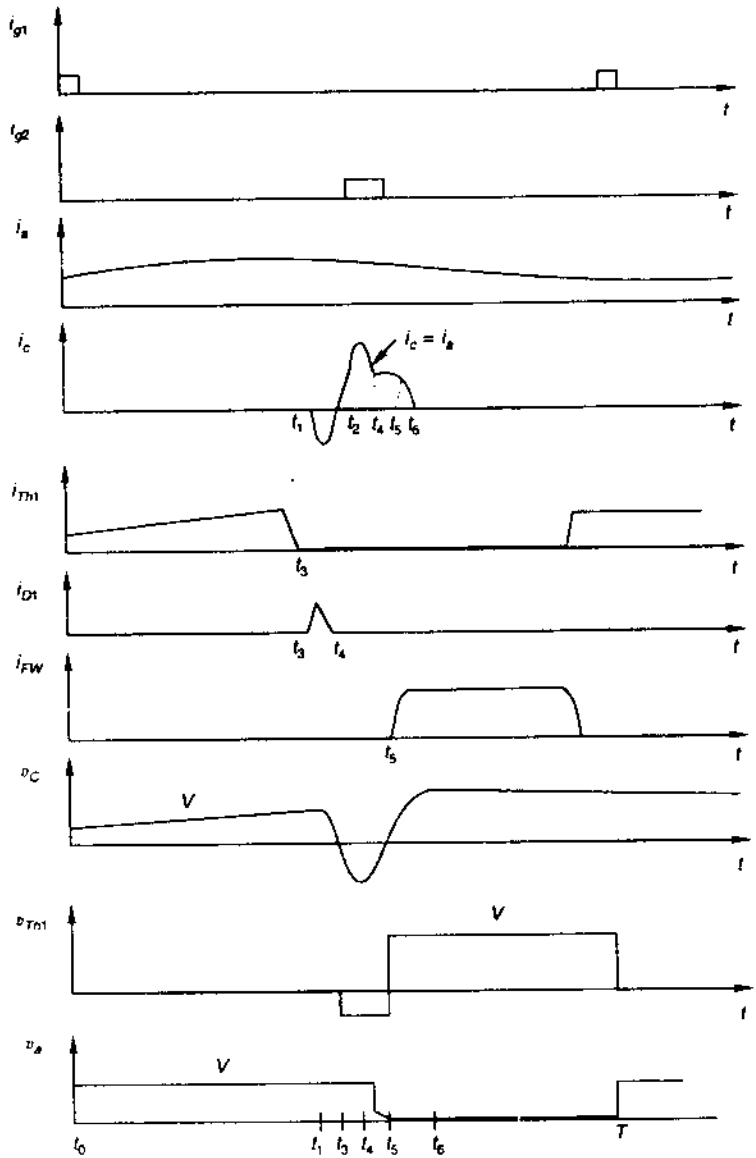
Chuyển mạch bằng dòng điện

Hình 11.34 minh họa bộ tạo xung chuyển mạch bằng dòng điện. Thyristor chính Th_1 của bộ tạo xung được chuyển mạch bằng xung dòng điện được tạo ra trong mạch chuyển. Thứ tự vận hành được giải thích dưới đây, các dạng sóng được nêu trên Hình 11.35.

Tụ C được tích điện qua nguồn V. Thyristor chính Th_1 được khởi kích tại $t = t_0$. Các cực tải được nối vào nguồn và dòng tải đi qua Th_1. Tại $t = t_1$, sự chuyển mạch của Th_1 được khởi kích bằng thyristor phụ Th_2, dòng điện dao



Hình 11.34 *Chuyển mạch bằng dòng điện trong bộ tạo xung.*



Hình 11.35 *Dạng sóng dòng điện và điện áp trong bộ tạo xung chuyển mạch dòng*

động đi qua mạch C, Th_2 và L. Khi i_C đảo chiều tại t_2, thyristor Th_2 ngắt (chuyển mạch tự nhiên), dòng dao động i_C qua D_2 và Th_1. Tại t_3; $i_C = i_{Th1}$, và do đó dòng zero đi qua Th_1 để ngắt, diode D_1 bắt đầu dẫn dòng $i_c = i_a$ và duy trì sự phân cực ngược ở Th_1.

Tại t_4, $i_C = i_a$ và $i_{D1} = 0$, D_{FW} không phân cực thuận, dòng tải đi qua V, C, L, D_2 và tải.

Tại t_5, D_{FW} trở thành phân cực thuận và bắt đầu dẫn dòng tải i_a. Mạch dao động gồm C và L khi đó chịu các điều kiện mới thông qua E, C, L, D_2, và D_{FW}, dòng i_C giảm đến zero tại t_6, v_c lớn hơn E. Trong quá trình t_5 đến t_6, $i_0 = i_C + i_{FW}$ và do đó, khi i_C giảm xuống, i_{FW} tăng dần. Từ t_6 trở đi, dòng tải đi qua D_{FW} và giảm xuống. Điện áp tụ v_c cũng giảm, do phóng điện qua R.

Tại t = T, thyristor Th_1 lại được kích, và chu kỳ lặp lại. Bộ tạo xung này có nhiều ưu điểm. Sự chuyển mạch có độ tin cậy cao khi dòng tải thấp hơn dòng chuyển đỉnh i_C. Tụ luôn luôn được nạp điện với cực tính đúng. Thyristor phụ Th_2 được chuyển mạch tự nhiên khi dòng điện đi qua giá trị zero.

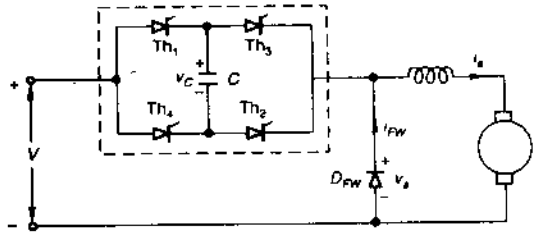
Chuyển mạch theo tải

Trong phương pháp chuyển mạch này, dòng tải qua thyristor giảm đến zero khi dòng động cơ được dẫn qua diode tự do. Hình 10.36(a) minh họa mạch tạo xung được chuyển mạch bằng tải. Các cặp thyristor Th_1Th_2 và Th_3Th_4 luân phiên dẫn dòng tải, dòng dẫn của cặp bất kỳ sẽ giảm đến zero do sự tích điện của tụ C. Các dạng sóng dòng điện và điện áp của bộ tạo xung chuyển mạch tải được nêu trên Hình 11.36(b).

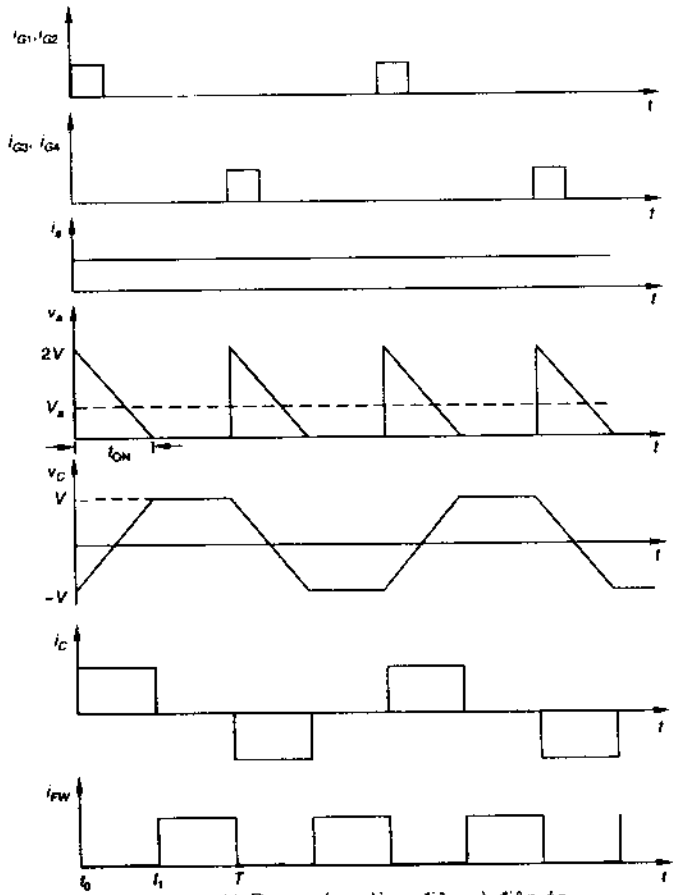
Khi vận hành, tụ C được tích điện âm (Hình 11.32a), tại $t = t_0$, các thyristor Th_1Th_2 kích khởi. Điện áp tại các cực động cơ tức thì vọt lên 2V. Mạch động cơ do cảm ứng, lấy dòng điện hầu như không đổi. Tụ C do đó tích điện dương theo tốc độ đồng đều và điện áp ở động cơ giảm tuyến tính. Tụ được tích điện dương tại $t = t_1$, dòng điện qua thyristor dẫn (Th_1Th_2) sụt xuống zero và các thyristor này bị khóa. Dòng động cơ từ thời điểm này được diode tự do D_{FW} dẫn. Tại cuối chu kỳ (t = T) các thyristor Th_3Th_4 được kích khởi, làm tụ điện qua Th_1Th_2 tích điện, phân cực ngược và ngắt các thyristor đó. Chu kỳ lặp lại.

Giá trị trung bình của điện áp ra bộ tạo xung được điều khiển bằng cách thay đổi tần số kích khởi của bộ tạo xung, do đó, đây là bộ tạo xung điều biến tần số. Đối với dòng tải không đổi:

$$t_{ON} = \frac{2VC}{I_a} \qquad (11.19)$$



(a) Mạch tạo xung với chuyển mạch theo tải



(b) Dạng sóng dòng điện và điện áp

Hình 11.36. *Mạch và dạng sóng của bộ tạo xung chuyển mạch theo tải.*

Điện áp ra là: $V_a = V\dfrac{t_{ON}}{T} = Vt_{ON}f$

$$V_a = \frac{2V^2Cf}{I_a} \qquad (11.20)$$

với f = tần số tạo xung

Tại tần số tạo xung cực đại:

$$f_{max} = \frac{1}{t_{ON}}$$

$$V_a\Big|_{f_{max}} = V \qquad (11.21)$$

Từ pt (11.20) $$V_a = \frac{2V^2C}{I_a}f_{max}$$

$$f_{max} = \frac{I_a}{2VC} \qquad (11.22a)$$

Giá trị tụ điện được chọn theo dòng tải cực đại $I_{a,max}$. Từ pt (11.22a), giá trị này là

$$C = \frac{I_{a,max}}{2Vf_{max}} \qquad (11.22b)$$

Ví dụ 11.3. Xe chạy bằng acquy, được điều khiển bằng bộ xung chuyển mạch tải (Hình 11.27a). Điện áp acquy là 100V, dòng khởi động là 100A và tần số bộ tạo xung cực đại là 4kHz. Tính giá trị tụ điện C chuyển mạch.

Giải

Từ pt (11.22b)

$$C = \frac{I_{a,max}}{2Vf_{max}} = \frac{100}{2 \times 100 \times 4000}\,F = 125\,\mu F$$

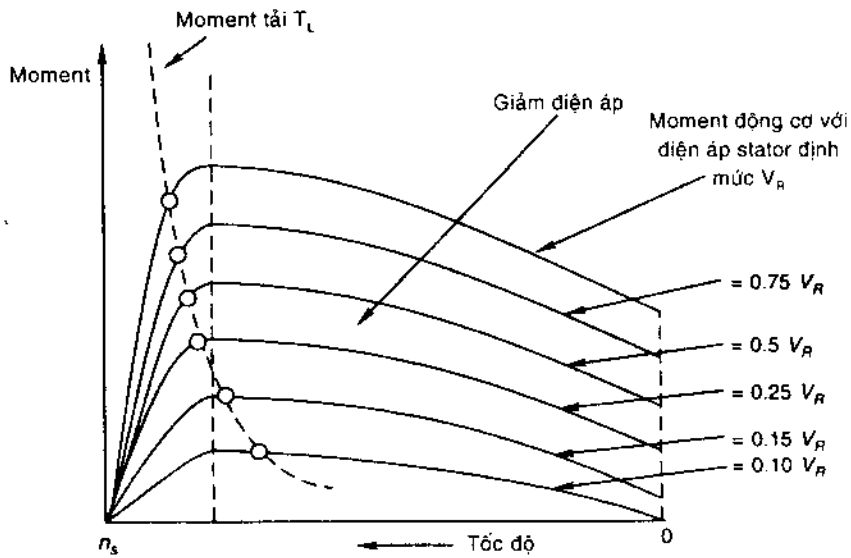
Tụ giấy công suất thấp ít tổn thất có thể được dùng nếu không có tụ C với định mức 125 μF, 100A

Điều khiển động cơ ac

Cách duy nhất để điều khiển tốc độ của động cơ đồng bộ là điều khiển tần số vào và điện áp sao cho V/f không đổi. Các động cơ cảm ứng có thể được điều khiển bằng một trong các phương pháp sau đây:

1. Điều khiển điện áp stator. Có thể áp dụng cho các động cơ nhỏ, các quạt, vì moment tải tăng theo tốc độ. Như đã đề cập, có hai cách để điều chỉnh giá trị điện áp stator hiệu dụng là điều khiển pha và điều khiển chu kỳ tích phân.

Đặc tuyến moment - tốc độ của động cơ cảm ứng với điều khiển điện áp stator được nêu trên Hình 11.37. Moment cực đại giảm theo bình phương điện áp. Sự điều hòa tốc độ chỉ có thể đối với tải có moment tăng theo tốc độ, và không thể đạt được đối với các tốc độ thấp, do tốc độ giảm nhanh.

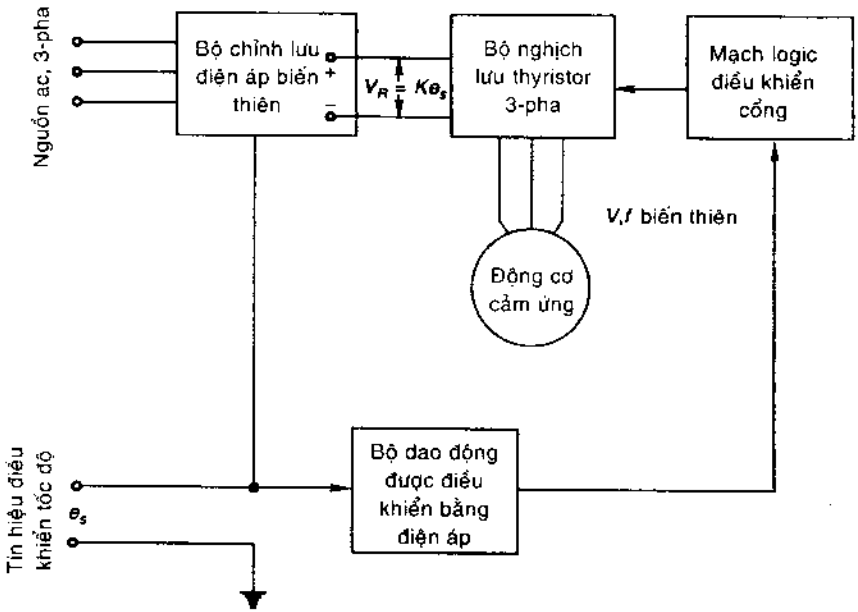


Hình 11.37 *Đặc tuyến moment - tốc độ của động cơ cảm ứng với các giá trị điện áp stator.*

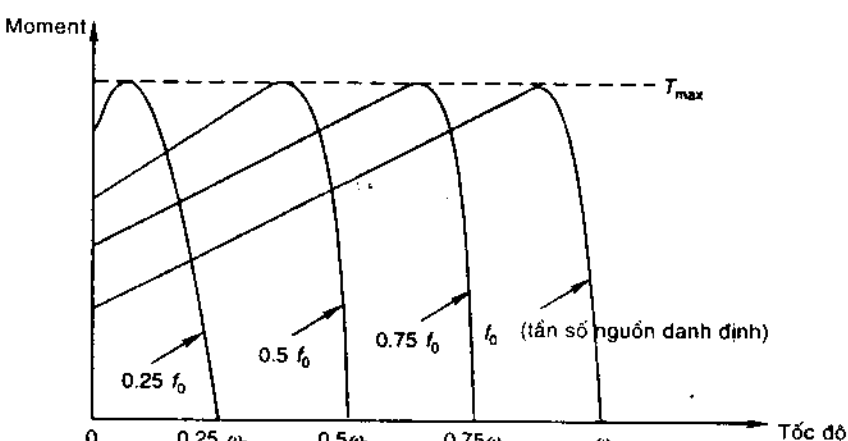
2. Điều khiển tần số. Tần số vào thay đổi được nhờ bộ nghịch lưu, đối với tần số dưới mức bình thường, điện áp stator cũng thay đổi sao cho V/ *f* không đổi, duy trì từ thông tổng/ cực trong khe hở không khí. Hệ thống điều khiển theo tần số được nêu trên Hình 11.38. Hệ thống này chỉ sử dụng cho các truyền động có đặc tính động cơ cảm ứng hầu như không yêu cầu bảo trì.

Bộ phận chính của mạch điều khiển tần số là bộ nghịch lưu thyristor 3- pha.

Đặc tuyến trượt - moment của bộ điều khiển tần số thay đổi, V/*f* - không đổi được nêu trên Hình 9.40, và Hình 11.39 ở dạng tốc độ - moment. Có thể thấy moment cực đại không đổi do từ thông/cực có giá trị xác định.



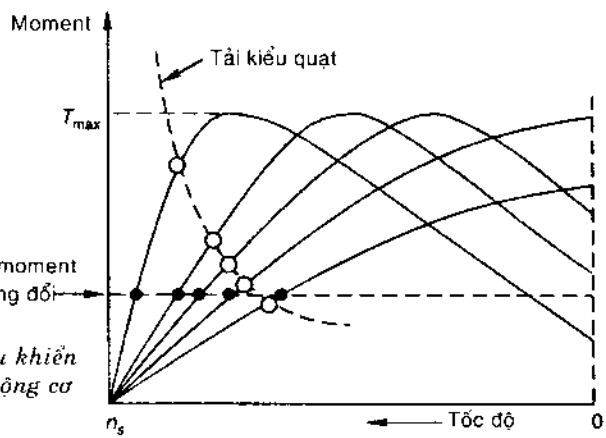
Hình 11.38 *Điều khiển tần số đối với tốc độ động cơ cảm ứng; tốc độ ∝ e_s, từ thông/cực không đổi*



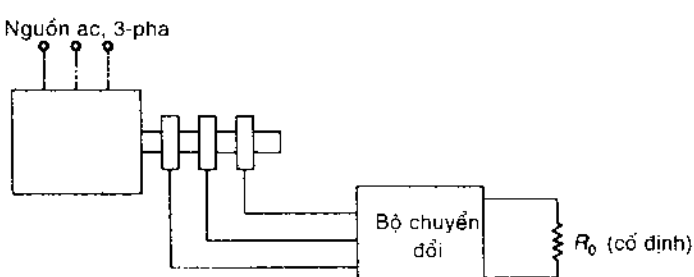
Hình 11.39 *Động cơ cảm ứng - tần số thay đổi; vận hành V/f hằng.*

3.Điều khiển độ trượt. Sự điều khiển dưới đồng bộ của tốc độ động cơ cảm ứng là có thể bằng cách dùng biến trở trong mạch rotor của động cơ cảm ứng rotor dây quấn. Phương pháp này tạo ra khoảng tốc độ rộng và moment khởi động cao (Hình 11.40). Moment cực đại trong trường hợp này là không đổi. Sự điều khiển tốc độ có thể được áp dụng cho tải có moment không đổi và tải kiểu quạt điện. Nhược điểm chính của bộ điều khiển tốc độ này là hiệu suất thấp do năng lượng tổn thất ở điện trở ngoài.

Phương pháp điều khiển độ trượt dựa trên nguyên lý chung là độ trượt trong động cơ cảm ứng tăng khi tăng tổn thất điện trong mạch động cơ. Tổn thất mạch rotor biến thiên có thể đạt được bằng cách mắc bộ chuyển đổi có điều khiển vào mạch động cơ và điện trở cố định (Hình 11.41).



Hình 11.40 *Điều khiển độ trượt trong động cơ cảm ứng.*



Hình 11.41 *Điều khiển độ trượt của động cơ cảm ứng rotor dây quấn với bộ chuyển đổi trong mạch rotor*

Thay vì lãng phí năng lượng trượt bằng điện trở ngoài, có thể hồi phục năng lượng này, đưa trở lại nguồn điện, để khắc phục nhược điểm hiệu suất thấp của phương pháp điều khiển độ trượt.

Mạch phục hồi công suất trượt

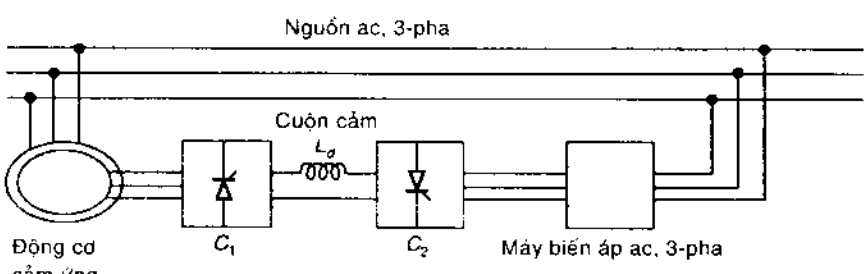
Năng lượng tổn thất do trượt được đưa trở lại nguồn bằng mạch Scherbius hoặc được dùng để truyền động cho động cơ phụ nối ghép cơ học với trục động cơ cảm ứng.

Mạch Scherbius

Hình 11.42 minh họa sơ đồ mạch tầng chuyển đổi tĩnh Scherbius được dùng để phục hồi công suất trượt. Để đạt được sự điều khiển tốc độ đồng bộ dưới và đồng bộ trên, các bộ chuyển đổi C_1 và C_2 phải là các cầu thyristor điều khiển hoàn toàn. Một bộ thực hiện chức năng tại tần số trượt theo kiểu chỉnh lưu hoặc nghịch lưu, bộ thứ hai vận hành với tần số hệ thống điện nguồn theo kiểu nghịch lưu hoặc chỉnh lưu. Tại tốc độ gần đồng bộ, khi lực điện động tần số trượt không đủ để chuyển mạch tự nhiên, cần có các kết nối đặc biệt hoặc phương pháp chuyển mạch cưỡng bức. Nếu bộ chuyển đổi C_1 là loại (cầu diode) không điều khiển thì tầng chuyển đổi và bộ điều khiển sẽ kinh tế và đơn giản hơn, nhưng chỉ có thể điều khiển tốc độ dưới đồng bộ.

Cần có máy biến áp 3-pha giữa C_2 và nguồn cung cấp với điện áp lớn, do điện áp giữa các vành trượt bị hạn chế và có thể rất thấp để nghịch chuyển trực tiếp vào mạch ac.

Nhược điểm chính của truyền động tầng dưới đồng bộ là hệ số công suất thấp, đặc biệt tại các tốc độ giảm. Tiêu thụ công suất phản kháng của bộ nghịch lưu lớn làm cho hệ số công suất của truyền động tầng giảm thấp.



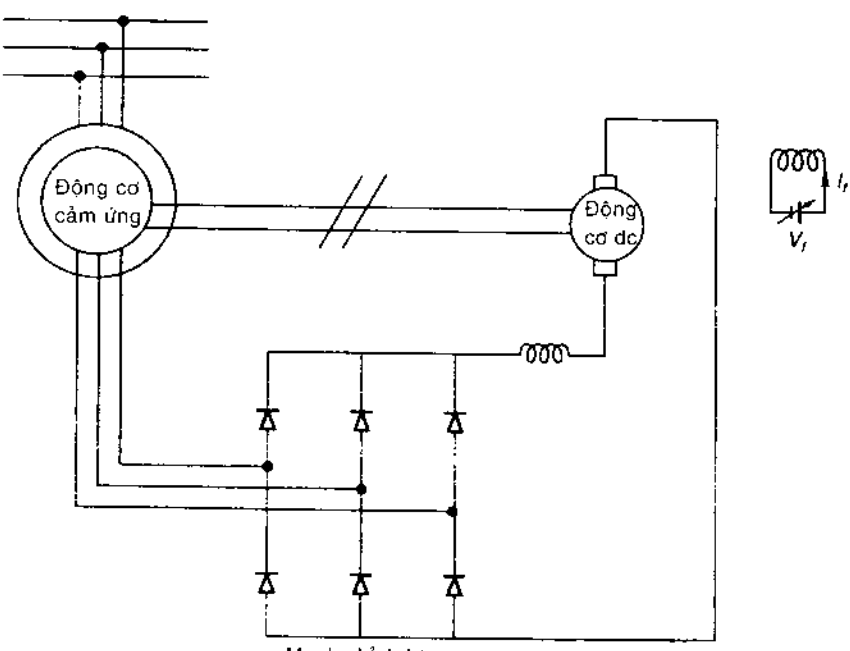
Hình 11.42 *Sơ đồ mạch truyền động Scherbius tĩnh*

Truyền động này được áp dụng trong các truyền động bơm và quạt công suất lớn có yêu cầu điều khiển tốc độ trong phạm vi hẹp. Nếu độ trượt tối đa là S_{max}, mức công suất của cầu diode, bộ nghịch lưu và máy biến áp có thể là S_{max} nhân với định mức công suất động cơ.

Truyền động này bảo đảm điều khiển moment không đổi. Điều khiển công suất không đổi có thể đạt được bằng mạch truyền động Kramer tĩnh.

Truyền động Kramer tĩnh

Hệ thống truyền động tốc độ biến thiên Kramer tĩnh (Hình 11.43) gồm động cơ cảm ứng vành trượt và động cơ dc được cấp điện từ bộ chỉnh lưu. Các máy này được nối điện theo tầng. Quá trình phục hồi công suất trượt được thực hiện qua bộ chỉnh lưu và động cơ dc. Moment cung cấp cho tải là tổng các moment động cơ cảm ứng và động cơ dc. Sự điều khiển tốc độ được thực hiện bằng cách điều khiển dòng kích thích của động cơ dc.



Hình 11.43 *Sơ đồ mạch truyền động Kramer tĩnh*

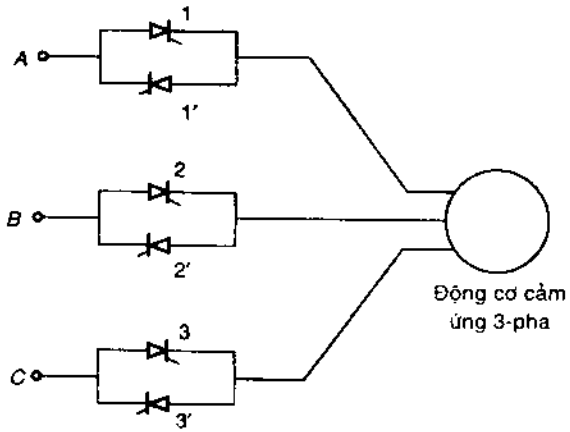
Nếu có yêu cầu khoảng tốc độ rộng, cầu diod có thể được thay bằng cầu thyristor. Tốc độ có thể được điều khiển từ mức đứng yên. Vì hệ thống Kramer tĩnh không có bộ nghịch lưu chuyển mạch trên mạch điện nên ít gây ra công suất phản kháng và lượng hài của dòng cũng ít hơn hệ thống Scherbius tĩnh, nhưng đòi hỏi sự bảo trì chổi than và vành góp của động cơ dc phụ, và moment quán tính lớn.

Có thể thấy để điều khiển tốc độ của động cơ cảm ứng cần hiểu sự vận hành của thiết bị chuyển công suất dc thành ac tần số biến thiên. Trước khi xét điều này, cần hiểu mạch điều khiển pha được dùng để điều khiển điện áp stator.

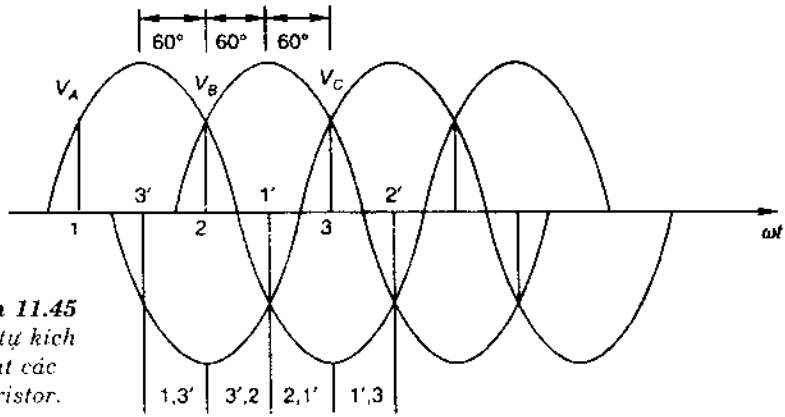
Điều khiển pha động cơ cảm ứng

Hình 11.44 minh họa mạch điều khiển pha của động cơ cảm ứng 3-pha. Hai thyristor nối đối song trên mỗi nhánh. Thứ tự kích hoạt các thyristor trong mọi chế độ vận hành là 1, 3', 2, 1', 3 và 2' (Hình 11.45). Khoảng góc giữa các lần kích hoạt là 60^0 và tần số kích là 6 lần tần số vào. Từ Hình 11.45, có thể thấy khi 3' được kích hoạt thì 1 và 3 dẫn 60^0, kế đó 2 được kích hoạt, 3' và 2 dẫn trong 60^0 kế tiếp, ...

Mỗi thyristor sau khi được kích hoạt sẽ dẫn 120^0. Khi thyristor dẫn, sẽ biết giá trị điện áp pha tương ứng. Khi một pha hở mạch, điện áp sẽ cảm ứng do dòng điện trong hai cuộn dây còn lại của động cơ.



Hình 11.44. *Mạch điều khiển pha động cơ cảm ứng 3-pha*



Hình 11.45 *Thứ tự kích hoạt các thyristor.*

Các bộ nghịch lưu

Bộ nghịch lưu chuyển điện nguồn dc thành điện áp nguồn có tần số biến thiên, là bộ điều biến công suất cơ bản của truyền động động cơ ac tốc độ biến thiên. Cấu hình của các bộ nghịch lưu tương đối đơn giản và nguyên lý vận hành dựa trên các mạch điện tử.

Nghịch lưu nửa cầu 1-pha

Hình 11.46a minh họa cấu hình mạch nghịch lưu nửa cầu 1-pha, có hai thyristor và hai diode tự do. Mỗi thyristor được tạo cổng tại tần số $f = 1/T$ của nguồn cung cấp ac được yêu cầu. Các tín hiệu cổng của hai thyristor có góc pha 180^0. Từ Hình 11.46b, có thể thấy tín hiệu ra là dạng sóng ac chữ nhật.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ rad / s}.$$

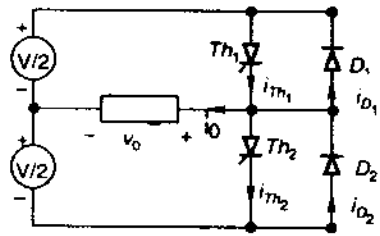
Với T = chu kỳ kích hoạt thyristor.

Dạng sóng ra cấp cho tải có thể gồm có các thành phần RLC. Mô hình mạch của bộ nghịch lưu được nêu trên Hình 11.47a. Sau vài chu kỳ điện áp nguồn v_{th} ổn định dần, sự biến thiên dòng điện theo thời gian sẽ ổn định ở dạng tuần hoàn.

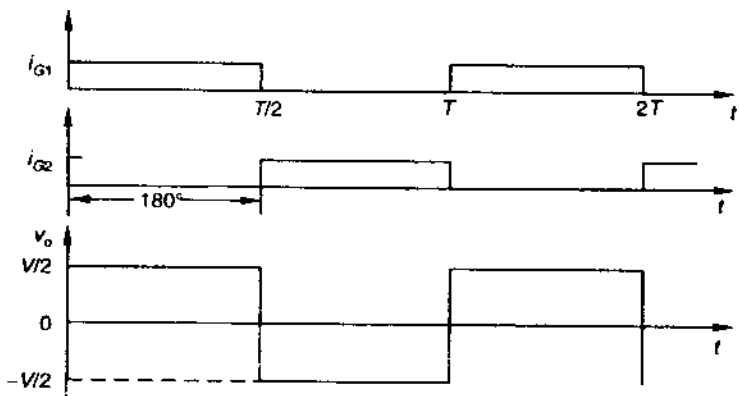
$$I_0 = \mp I_{01} \qquad t = T/2$$

$$i_0 = \pm I_{01} \qquad t = 0, T \qquad (11.23)$$

Hình 11.46 Bộ nghịch lưu nửa cầu 1-pha



(a)



(b)

Trong khoảng 0 < t < T/ 2

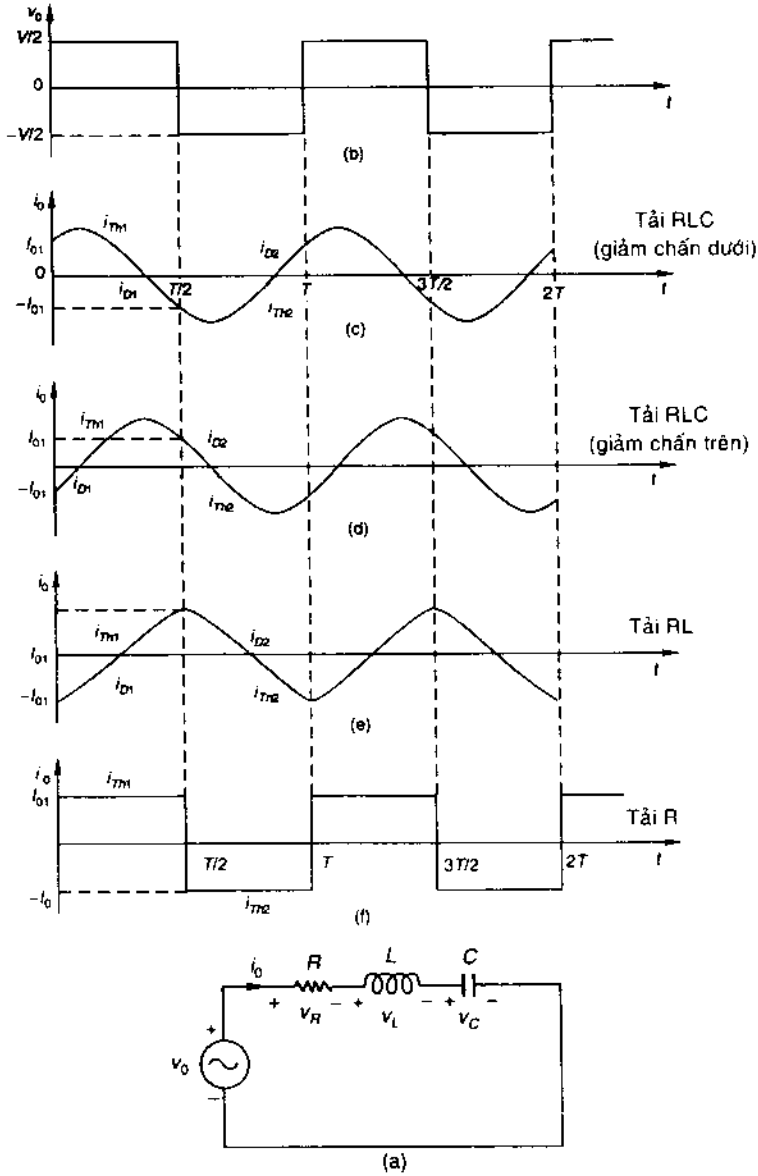
$$v_0 = \frac{V}{2} = v_R + v_L + v_C$$

$$\frac{V}{2} = Ri_0 + L\frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_0 dt + V_{C0} \qquad (11.24)$$

Với V_{C0} là điện áp qua tụ điện tại t = 0. Lấy vi phân pt (11.24)

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di_0}{dt} + \frac{1}{LC} i_0 = 0 \qquad (11.25)$$

Bản chất của dạng sóng tùy thuộc vào mạch giảm chấn. Dạng sóng điện áp ra (chữ nhật) và các dạng sóng dòng khác nhau đối với các đặc tuyến tải khác nhau được nêu trên Hình 11.47.



Hình 11.47 *Mạch và dạng sóng ra của bộ nghịch lưu.*

Trường hợp tải RLC giảm chấn dưới (Hình 11.47c) dòng thyristor Th_1 tiến đến 0 và thyristor này ngắt trước khi Th_2 được tạo cổng. Các điều kiện mạch làm cho diode D_1 phân cực thuận dẫn dòng tự do i_{D1}. Ngay khi Th_2 được kích hoạt, D_1 bị phân cực nghịch và dòng chuyển từ D_1 đến Th_2. Quá trình này lặp lại cho Th_2 và D_2, và chu kỳ tiếp tục.

Trường hợp tải RLC giảm chấn trên (Hình 11.47d) và tải RL (Hình 11.47e), Th_1 buộc phải ngắt tại T/2 trong khi vẫn còn dòng điện. Do đó, điện áp qua thành phần L của tải sẽ đảo chiều, D_2 phân cực thuận, dẫn dòng điện tự do. Khi dòng điện mạch có xu hướng đảo chiều, D_2 ngắt và dòng điện được dẫn qua Th_2, tạo cổng tại t = T/2. Đối với tải R lý tưởng (Hình 11.47f) về lý thuyết không có dòng điện tự do. Điều này không có nghĩa là loại bỏ diode tự do bởi vì mạch thực tế luôn luôn có cảm kháng.

Bộ nghịch lưu cầu 1-pha

Nhược điểm chính của bộ nghịch lưu nửa cầu (Hình 11.46) là cần có điện nguồn dc 3-dây. Điều này được khắc phục bằng cách dùng mạch nghịch lưu cầu (Hình 11.48) với 4 thyristor và 4 diode tự do. Thứ tự tạo cổng thyristor và các dạng sóng ra được nêu trên Hình 11.48b. Các thyristor Th_1 và Th_3 cần được tạo cổng đồng thời ở tần số $f = 1/T$ còn Th_2 và Th_4 được tạo cổng lệch pha 180° so với Th_1 và Th_3.

Ví dụ 11.4. Tải nối vào ngõ ra của bộ nghịch lưu cầu 1-pha có R = 10 Ω mắc nối tiếp với L = 0.05H. Hãy xác định dạng sóng điện áp và dòng tải cho hai nửa chu kỳ đầu tiên với sóng ngõ ra chữ nhật tại 50Hz. Điện áp vào bộ nghịch lưu là V_{dc} = 250V.

Tìm biểu thức của dòng ở trạng thái ổn định trong mỗi nửa chu kỳ.

Giải

Hằng số thời gian tải : $\tau = L / R = \dfrac{0.05}{10} = 0.005$ s

Thời gian nửa chu kỳ: $\dfrac{1}{10}$ s

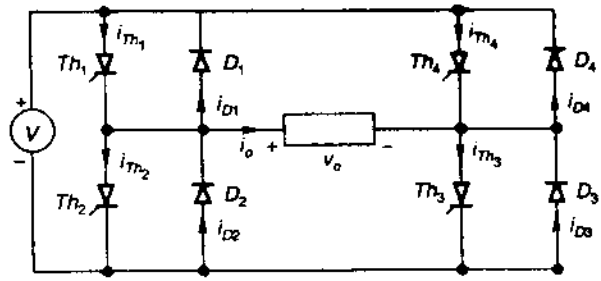
Đối với nửa chu kỳ đầu, dòng lúc đầu là zero.

$$v_0 = +250 \text{ V}$$

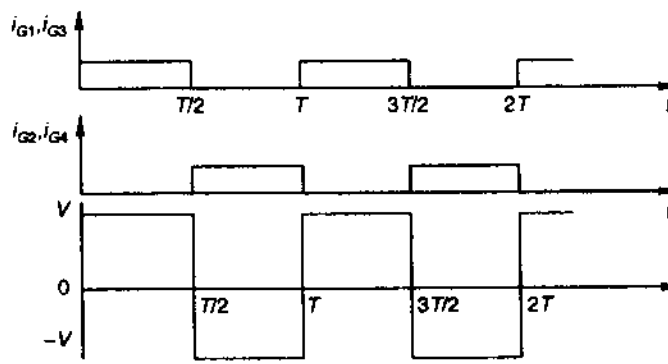
$$i_0 = 25 - 25e^{-t/\tau} = 25\,(1 - e^{-200t})$$

i_0 (tại cuối nửa chu kỳ đầu) = $25\,(1 - e^{-2})$

Hình 11.48. *Mạch và các dạng sóng của bộ nghịch lưu cầu 1-pha.*



(a)



(b)

Đối với nửa chu kỳ thứ hai

$$v_0 = -250 \text{ V}$$

$$i_0 = -25 + 25 + [25\,(1 - e^{-2})]\, e^{-200t}$$

Dòng trạng thái ổn định

Từ Hình 11.47(c), trong nửa chu kỳ dương:

$$i_0 = 25 - (25 + I_{01})\, e^{-200t}$$

$$i_0(T/2) = 25 - (25 + I_{01})\, e^{-2} = I_{01}$$

$$I_{01} = 25 \times \frac{1 - e^{-2}}{1 + e^{-2}} = 19$$

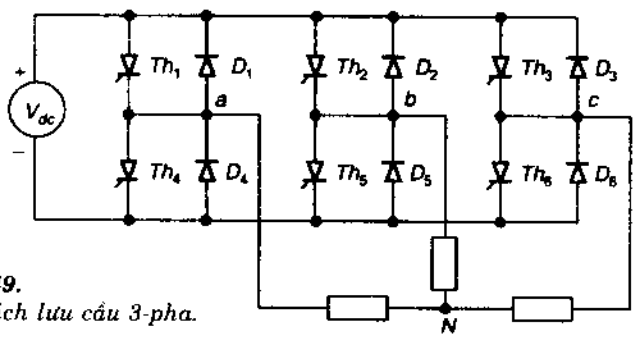
$$i_0 = 25 - (25 + 19)\, e^{-200t}$$

$$= 25 - 44\, e^{-200t} \text{ (nửa chu kỳ + ve)}$$

$$= 25 + 44\, e^{-200t} \text{ (nửa chu kỳ - ve)}$$

Nghịch lưu cầu 3-pha

Bộ nghịch lưu 3-pha cơ bản là nghịch lưu 6-bậc. Bậc được xác định khi có sự thay đổi trong thứ tự kích hoạt thyristor. Bộ nghịch lưu cầu thyristor 3-pha (Hình 11.49), với Th_1 đến Th_6 là 6 thyristor mang tải và D_1 đến D_6 là 6 diode tự do. Mỗi cặp thyristor trong một nhánh (Th_1 và Th_4; Th_2 và Th_5; Th_3 và Th_6) được tạo cổng tại T/2 và lệch pha với nhau, không được phép tạo cổng đồng thời. Th_1, Th_2 và Th_3 được kích hoạt lệch pha tuần tự 120^0 và tiếp đến là Th_4, Th_5, Th_6. Đây là điều bắt buộc để nhận được các điện áp ngõ ra lệch pha 120^0.

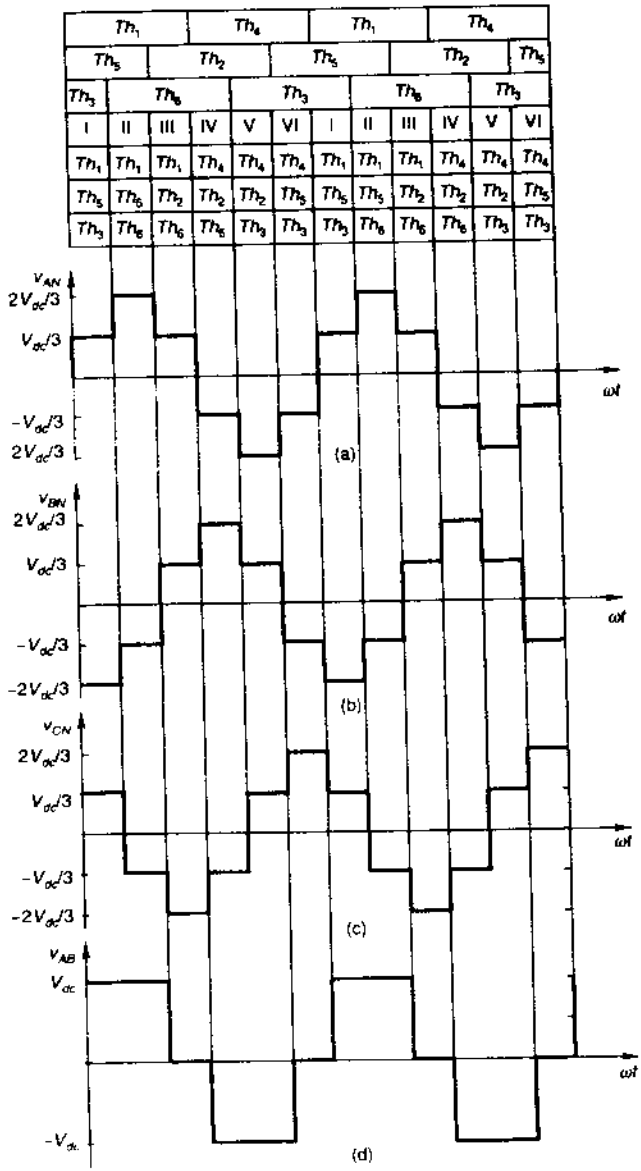


Hình 11.49.
Mạch nghịch lưu cầu 3-pha.

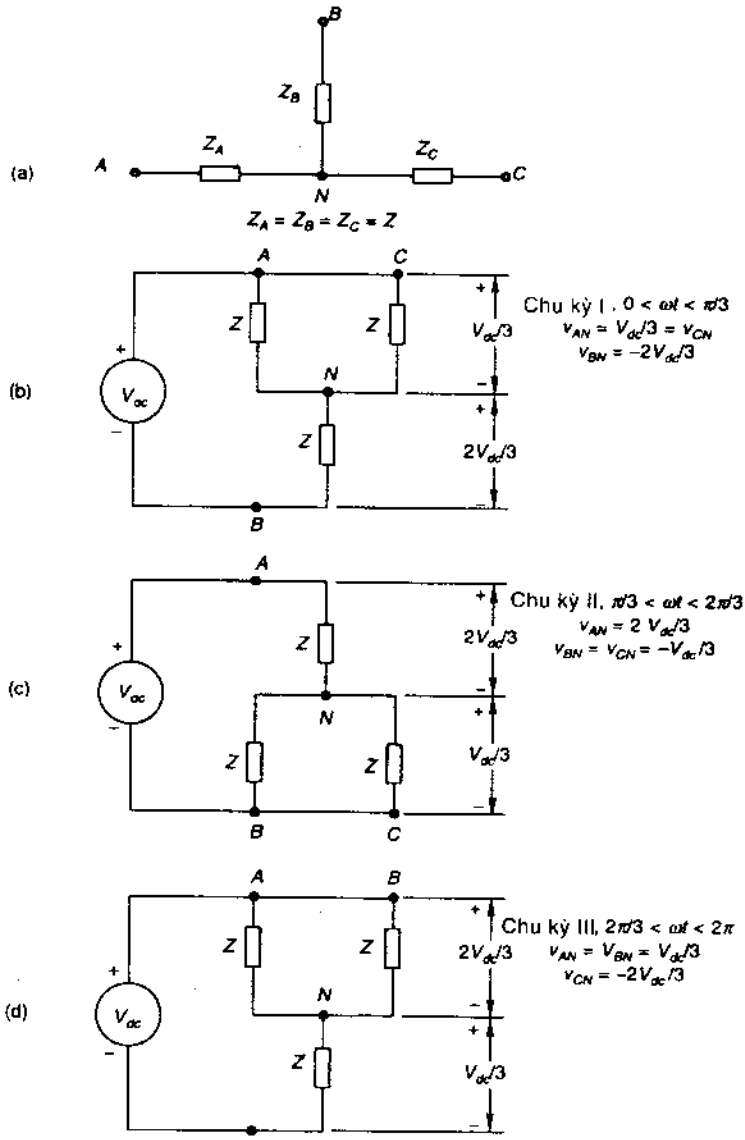
Hình 11.50 biểu diễn các chu kỳ dẫn của các thyristor khác nhau theo thứ tự kích hoạt nêu trên. Với góc 2π, có 6 chu kỳ (một phần sáu của mỗi chu kỳ tuần hoàn) và các thyristor đang dẫn trong các chu kỳ này là đồng nhất, trong chu kỳ bất kỳ chỉ có 3 thyristor dẫn. Tần số kích hoạt là sáu lần tần số ra. Các sơ đồ mạch trong 3 chu kỳ liên tiếp tương ứng với nửa chu kỳ dương của v_{AN} được nêu trên Hình 11.51 và các điện áp ra được xác định theo điện áp dc (V_{dc}) ngõ vào. Các dạng sóng điện áp của ba điện áp pha - trung hòa của bộ nghịch lưu 3-pha (Hình 11.49) cũng được xác định theo quy trình nêu trên, các điện áp này lệch pha 120^0. Thứ tự pha có thể đảo ngược bằng cách đảo thứ tự kích hoạt các thyristor. Các điện áp giữa các dây nguồn được xác định bằng cách lấy hiệu các điện áp pha. Dạng sóng của $v_{AB} = v_{AN} - v_{BN}$ được minh họa trên Hình 11.50(d). Các thành phần điện áp cơ bản tạo thành tập hợp cân bằng. Các diode cho phép dòng điện đi qua lệch pha với điện áp.

Điều khiển hài và điện áp bộ nghịch lưu

Khi áp dụng các bộ nghịch lưu để điều khiển động cơ, cần thay đổi V và f (nhưng V/ f không đổi). Hơn nữa, các bộ nghịch lưu cung cấp điện áp ac không theo hàm sine cho động cơ. Mạch lọc bên ngoài không thể dùng được do khó



Hình 11.50. *Thứ tự dẫn điện của các thyristor trong bộ nghịch lưu cầu 3-pha và dạng sóng điện áp ra.*

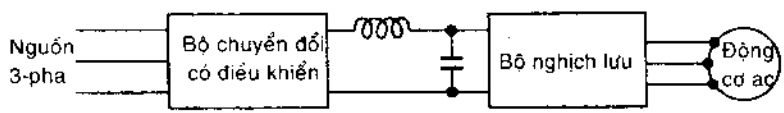


Hình 11.51. *Các mạch và điện áp ra trong 3 chu kỳ liên tiếp của bộ nghịch lưu cầu 3-pha.*

khăn khi vận hành các bộ nghịch lưu trên khoảng tần số rộng. Do đó, cần giảm lượng hài ở ngõ ra ac của bộ nghịch lưu.

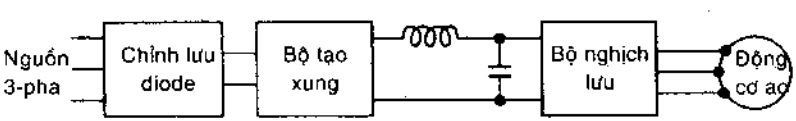
Tần số nghịch lưu được điều chỉnh bằng cách thay đổi tốc độ kích hoạt các thyristor, điện áp có thể được điều khiển bằng một trong các phương pháp dưới đây:

1. Điều khiển điện áp vào dc. Trong mạch này, bộ chuyển đổi có điều khiển cung cấp điện áp dc biến thiên cho bộ nghịch lưu (Hình 11.52). Phương pháp này có thuận lợi là lượng hài điện áp cố định ở ngõ ra, nhưng độ tin cậy của phần chuyển mạch không cao khi các giá trị dc thấp do điện áp chuyển mạch trong nhiều bộ nghịch lưu tỷ lệ với điện áp dc.



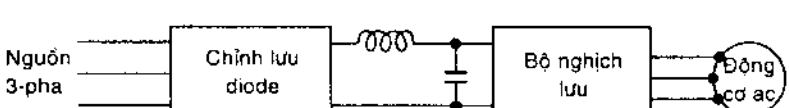
Hình 11.52. *Điều khiển điện áp dc.*

2. Điều khiển điện áp dc bằng bộ tạo xung. Điện áp dc ra không đổi của bộ chỉnh lưu cầu toàn sóng 3-pha được điều khiển bằng mạch tạo xung (Hình 11.53). Mạch này có hệ số công suất cao ở ngõ vào ac của bộ chỉnh lưu cầu và đáp ứng điện áp nhanh do có hằng thời gian nhỏ của mạch lọc LC ở phía ngõ ra của bộ tạo xung tần số cao. Mạch có sự chuyển mạch (của bộ nghịch lưu) không ổn định ở các điện áp dc ngõ vào thấp, cần phải dùng hai bộ điều khiển công suất mắc nối tiếp.



Hình 11.53. *Điều khiển điện áp bằng bộ tạo xung.*

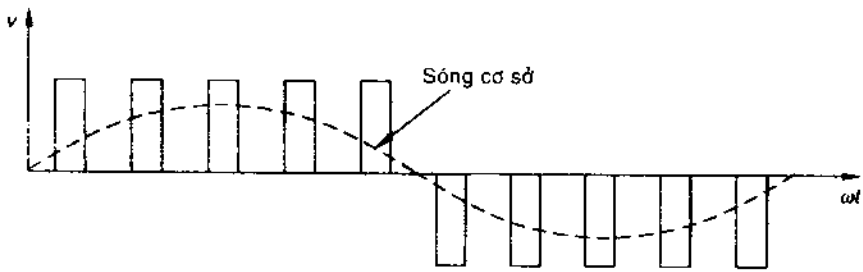
3. Sử dụng bộ nghịch lưu với điều khiển điện áp độc lập. Các mạch nghịch lưu cải tiến cho phép điều khiển độc lập điện áp và tần số ngõ ra (Hình 11.54).



Hình 11.54. *Mạch nghịch lưu với điều khiển điện áp độc lập.*

Các bộ nghịch lưu với điều biến chiều rộng xung

Thay vì xung chữ nhật ở ngõ ra (Hình 11.46 và 11.48) trong mỗi nửa chu kỳ, mạch chuyển có thể cải tiến để tạo ra một loạt các xung ngắn trong từng nửa chu kỳ (Hình 11.55). Biên độ dạng sóng ra cơ sở có thể được điều khiển bằng cách thay đổi các chu kỳ ON/ OFF. Phương pháp điều khiển điện áp này được gọi là điều biến chiều rộng xung, có lượng hài thấp khi điện áp ngõ ra thấp. Hơn nữa, lượng hài thấp khó lọc ở sóng ra giảm rõ rệt so với xung chữ nhật ở ngõ ra.



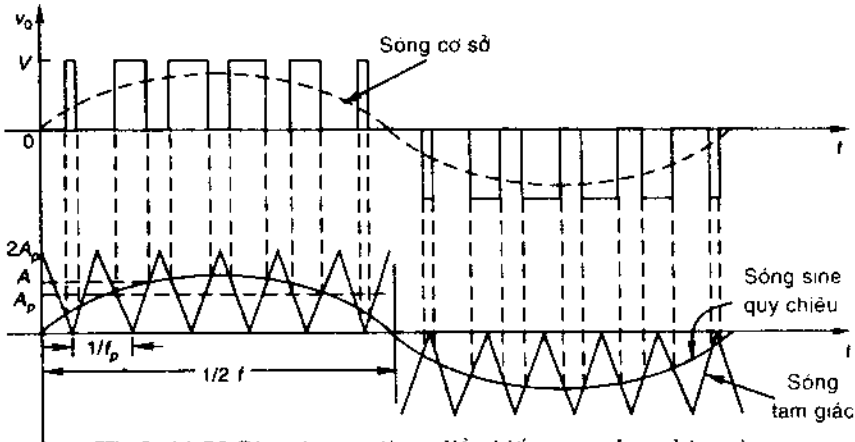
Hình 11.55. *Các xung liên tiếp và sóng cơ sở.*

Điều biến xung dạng hàm sine

Trong điều biến xung dạng hàm sine, chiều rộng xung, thay vì đồng nhất (Hình 11.55), là hàm sine của vị trí góc theo sóng quy chiếu, do đó giảm lượng sóng hài. Hàm điều khiển gồm sóng sine biên độ A biến thiên, tần số ngõ ra cơ sở $f = 1/T$, sóng tam giác biên độ A_p không đổi và tần số f_p với thành phần thẳng của biên độ A_p (Hình 11.56). Dạng sóng tam giác phân cực đảo chiều cực tính ở cuối mỗi nửa chu kỳ điện áp. Các tín hiệu cổng xung được tạo ra do sự so sánh dạng sóng tam giác và sóng sine. Các xung cổng nhận được trong các khoảng thời gian, trong đó tín hiệu sine dương hơn tín hiệu tam giác. Công thức tính số lượng xung cổng trong nửa chu kỳ là:

$$N = \frac{f_p}{2f} = \text{số nguyên} \qquad (11.26)$$

Các góc kích hoạt và chuyển mạch của các thyristor được xác định bằng giao điểm của hai tín hiệu quy chiếu. Từ Hình 11.56, có thể thấy biên độ sóng điện áp cơ sở được điều khiển bằng cách thay đổi biên độ A của sóng sine trong khoảng $0 < A < A_{max}$ với $A_{max} = 2A_p$. Nếu A lớn hơn A_{max}, số xung ra sẽ ít hơn N (pt 11.26). Trong giới hạn này xung ra trở thành xung chữ nhật có chiều rộng nửa chu kỳ như trường hợp nghịch lưu cầu bình thường (không điều biến).

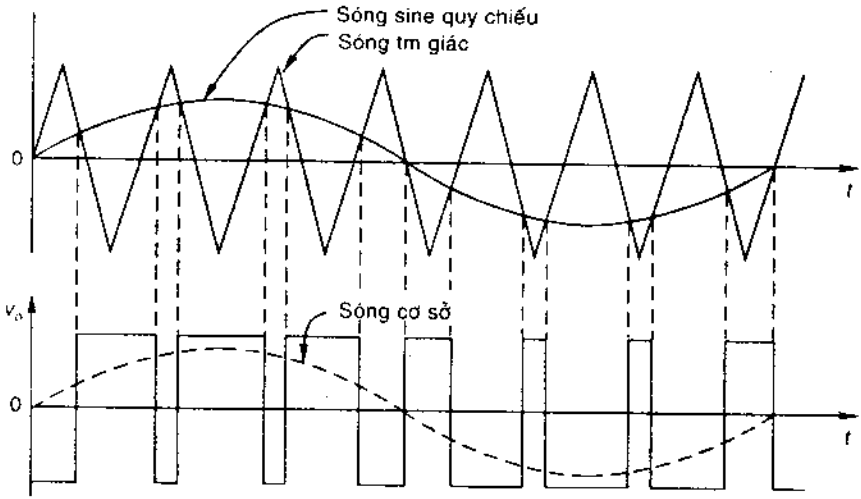


Hình 11.56 *Điện áp ra với sự điều biến xung dạng hàm sine*

Các tín hiệu cổng nhận được như trên được dùng để kích các thyristor trong bộ nghịch lưu cầu (Hình 11.48). Các thyristor Th_1 và Th_3 được tạo cổng trong khoảng xung dương, Th_2 và Th_4 được tạo cổng theo xung âm. Trong các khoảng giá trị 0 của các tín hiệu cổng được tạo xung Th_1 và Th_4 hoặc Th_2 và Th_3 được tạo cổng do điện áp ra là zero. Điện thế ra được nêu trên Hình 11.56 là bản sao các tín hiệu cổng được tạo xung sinh ra do so sánh dạng sóng tam giác và sóng sine cấp cho mạch chuyển mạch.

Khảo sát mạch của bộ nghịch lưu nửa cầu (Hình 11.46a) cho thấy không có cách nào để điện áp tải giảm đến zero, luôn luôn có $v_0 = \pm V_{dc}/2$. Phương pháp điều biến xung sine, do đó không thể sử dụng được. Phương pháp điều biến khác có thể được dùng trong bộ nghịch lưu nửa cầu (Hình 11.57). Sự điều khiển điện áp đạt được bằng cách thay đổi biên độ sóng sine quy chiếu. Loại điều khiển điện áp này ít được dùng vì tỷ số biên độ hài với biên độ thành phần cơ sở của sóng điện áp ra cao.

Việc sử dụng bộ nghịch lưu điều biến chiều rộng xung (PWM) để điều khiển động cơ ac được minh họa trên Hình 11.54. Ở đây, bộ nghịch lưu được cấp điện từ bộ chỉnh lưu diode điện áp dc không đổi, sự điều khiển điện áp ac tại cực động cơ đạt được qua bộ nghịch lưu. Ưu điểm của sơ đồ này là đòi hỏi chuyển đổi công suất điều khiển đơn nên hệ số công suất của nguồn ac đến bộ chỉnh lưu diode khá cao. Hơn nữa, lượng hài tần số thấp của nghịch lưu PWM thấp hơn so với nghịch lưu (không điều biến) bình thường. Trong truyền động PWM, hiệu suất nghịch lưu hơi giảm do nhiều chuyển mạch trên một nửa chu kỳ. Tần số chuyển mạch nên tăng đến mức cho phép bằng các linh kiện để



Hình 11.57. *Sự điều biến trong bộ nghịch lưu nửa cầu.*

nhận được sự cân bằng giữa tăng tổn thất trong bộ nghịch lưu và giảm tổn thất trên máy (do lượng hài giảm).

Kỹ thuật hạn chế sóng hài trong các bộ nghịch lưu PWM được chú ý nhiều. Trong phương pháp này, các vạch được tạo ra theo các góc cho trước trên sóng vuông, cho phép điều khiển điện áp với sự hạn chế các sóng hài chọn lọc.

Chuyển mạch cưỡng bức

Trong các bộ nghịch lưu và bộ tạo xung, hệ thống thyristor được cấp điện từ nguồn dc, dòng thuận không thể đi qua điểm zero một cách tự nhiên, do đó phải cưỡng bức để trở thành zero tại thời điểm thích hợp bằng mạch phụ, được gọi là mạch chuyển mạch. Ngoài việc buộc dòng thuận đi qua giá trị zero, mạch chuyển mạch còn cung cấp điện áp ngược cho thyristor được chuyển mạch trong khoảng thời gian đủ dài (ít nhất là bằng thời gian ngắt) để tăng tốc và hoàn tất quá trình phục hồi của trạng thái khóa thyristor. Quá trình ngắt thyristor này là *chuyển mạch cưỡng bức.*

Nói chung, mạch chuyển mạch cưỡng bức có mạch dao động LC, được xem là nguồn điện áp hoặc dòng điện liên hệ với thyristor.

Nguồn điện áp chuyển mạch có thể mắc nối tiếp với thyristor hoặc song song qua linh kiện phụ. Mạch chuyển mạch cưỡng bức được chia thành hai nhóm

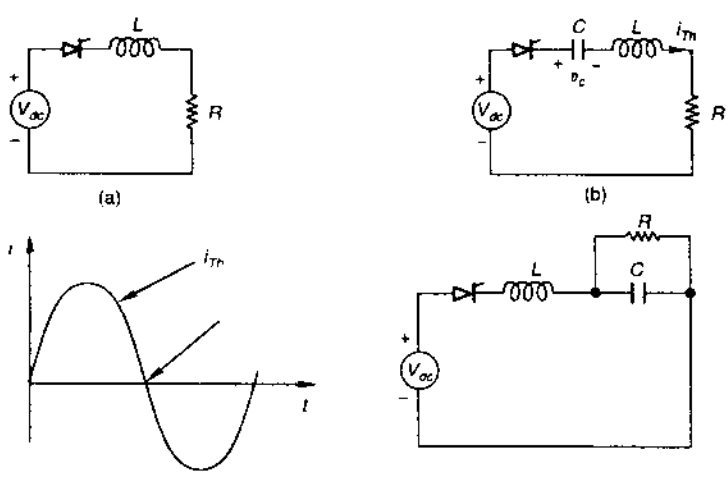
(i) *Chuyển mạch nối tiếp*, trong đó tụ điện chuyển mạch mắc nối tiếp với thyristor ngắt.

(ii) *Chuyển mạch song song*, trong đó tụ điện chuyển mạch mắc song song với thyristor ngắt.

1. Ngắt cộng hưởng nối tiếp

Loại chuyển mạch này còn được gọi là chuyển mạch tải do phụ thuộc vào bản chất của tải. Trong mạch trên Hình 11.58(a), nếu thyristor hoạt động, sẽ không ngắt một cách tự nhiên, do tính liên tục của dòng điện. Để ngắt thyristor này, cần có một tụ mắc nối tiếp trong mạch (Hình 11.58(b)) sao cho mạch là giảm chấn dưới. Nếu cảm kháng tải không đáng kể, cần mắc cuộn cảm nối tiếp trong mạch để tạo dao động, Hình 11.58(c) minh họa dòng dao động của mạch (Hình 11.58 b) khi không có thyristor. Ở cuối xung dòng điện dương thứ nhất, dòng thyristor sụt xuống zero và ngắt. Trong lúc đó, tụ C được tích điện dương, phân cực ngược thyristor để hoàn tất quá trình ngắt. Dòng qua thyristor gần như là hình sine nên dòng chuyển mạch ban đầu có di/dt thấp, giới hạn tổn thất chuyển mạch.

Loại mạch chuyển này được vận hành thành công ở 20 - 30 kHz, giới hạn tần số có xét đến thời gian ngắt phải dưới 1/4 chu kỳ tuần hoàn của dao động mạch. Điểm yếu của loại chuyển mạch này là điều hòa tải kém.

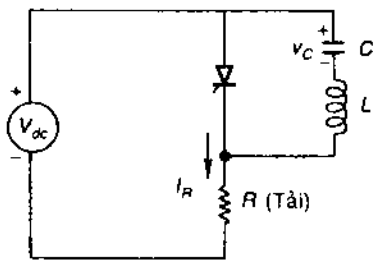


Hình 11.58. *Các mạch chuyển mạch mắc nối tiếp.*

Hình 11.58 (d) minh họa cấu hình thứ hai của mạch chuyển mạch mắc nối tiếp. Ở đây mạch dao động sẽ làm C tích điện tới điện áp gần gấp đôi điện áp nguồn (tức là 2 V_{dc}), sự ngắt được thực hiện với khoảng thời gian ngắn hơn.

2. Ngắt cộng hưởng song song

Hình 11.59 trình bày nguyên lý chuyển mạch song song. Khi thyristor ngắt, C tích điện đến V_{dc}. Khi thyristor hoạt động, dẫn dòng tải I_R và dòng dao động của mạch LC. Dòng trong mạch LC đảo chiều trong phần dao động nửa thứ hai (Hình 11.58c), làm giảm dòng thyristor đến zero và ngắt thyristor này. Điện tích vẫn còn trên C phân cực ngược thyristor sau khi dòng điện đi qua giá trị zero.

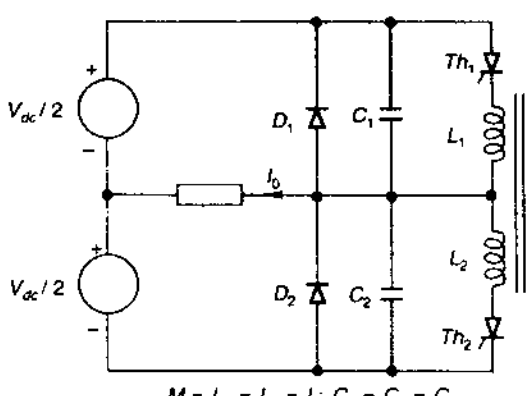


***Hình 11.59** Mạch chuyển mạch song song*

Lợi điểm của các loại chuyển mạch này là điều hòa tải rất tốt và điện áp qua thyristor bị giới hạn, không vượt quá điện áp nguồn. Nếu điện trở R tăng, việc tích điện của tụ C sẽ chậm, làm tăng thời gian ngắt tối thiểu. Vì vậy, mạch này chỉ dùng cho các tải điện trở không đổi.

3. Chuyển mạch bù

Hình 11.60 minh họa mạch nghịch lưu nửa cầu 1-pha có mắc thêm các tụ chuyển mạch C_1, C_2 và điện cảm L_1, L_2. Mạch này cung cấp sự chuyển mạch điện áp xung bổ sung. Trong mạch này, nếu Th_1 hoạt động sẽ kích hoạt Th_2 chuyển dòng tải đến Th_2; Th_1 ngắt. Giả sử tải là cảm ứng, dòng tải I_0 hầu như ổn định. Khi Th_1 đang dẫn, sụt áp qua L_1 không đáng kể vì mức thay đổi dòng tải nhỏ. Tụ C_2 vì vậy tích điện đến V_{dc}, điện áp nguồn. Năng lượng trong từ trường của cuộn cảm là $\frac{1}{2}LI_0^2$, I_0 là dòng tải.



***Hình 11.60** Mạch chuyển mạch bù.*

Khi Th_2 được kích, điện áp V_{dc} của C_2 xuất hiện qua L_2, do đó điện áp V_{dc} cảm ứng qua L_1 phân cực ngược Th_1 và ngắt thyristor này. Dòng I_0 bị ngắt trong L_1, sẽ chuyển qua L_2 vì từ thông không thể thay đổi tức thời.

Hơn nữa, vì dòng tải điện cảm không thể ngắt, nên được cấp dòng $I_0/2$ đồng đều từ C_1 và C_2. Tụ C_1 tích điện và C_2 phóng điện với cùng tỷ suất. Tụ C_2 khi đó song song với L_2 (Th_2 hoạt động) và dòng dao động xuất hiện trong vòng kín. Tại phần tư chu kỳ dao động thứ nhất, dòng dao động tăng tới giá trị cực đại I_m. Tại thời điểm này, Th_2 dẫn I_m qua hai tụ điện. Như vậy dòng điện qua C_1 và C_2 là $(I_0 + I_m)/2$ (Hình 11.61 b).

Trong quá trình này, C_1 tích điện đến điện áp nguồn và điện áp cảm ứng qua L_1 giảm, Th_1 phân cực thuận. Tại cuối quá trình tích điện, khi C_1 đạt mức V_{dc}, điện áp qua C_2 đồng thời giảm đến zero.

Khi C_2 có xu hướng tích điện ngược trong phần tư chu kỳ dòng dao động kế tiếp, diode D_2 chuyển qua chế độ dẫn và dòng $(I_0 + I_m)$ đi qua diode này. Dòng I_m qua L_2 và năng lượng tiêu tán qua Th_2 và D_2, khi đó Th_2 sẽ ngắt (Hình 11.61c).

Tụ C_1 được tích điện hoàn toàn đến V_{dc} và dòng tải I_0 được cấp qua D_2 (Hình 11.61d). Sau khi I_0 giảm đến zero qua diode tự do D_2, D_2 khóa và Th_2 lại được kích hoạt hoặc được kích nếu vẫn dẫn dòng điện. Dòng tải theo chiều ngược lại.

Sơ đồ chuyển mạch trên Hình 11.60 đã được dùng ở cả ba nhánh của bộ nghịch lưu cầu 3-pha.

Ví dụ 11.5. Hình 11.62 trình bày mạch được dùng cho bộ tự chuyển mạch bằng cộng hưởng.

(a) Với thyristor ở trạng thái khóa, điện áp tụ ở trạng thái ổn định và dòng tải là bao nhiêu?

(b) Viết công thức dòng tải, dòng qua thyristor và $V_C(t)$ sau khi thyristor hoạt động tại t = 0

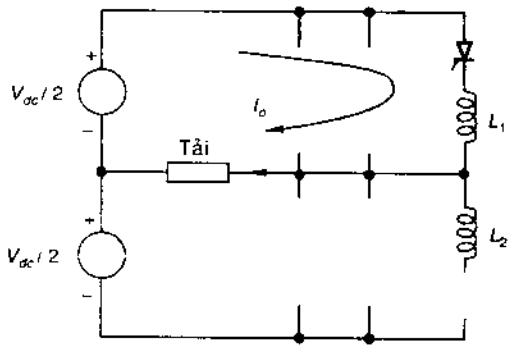
(c) Tính thời gian thyristor ngưng dẫn.

Giải

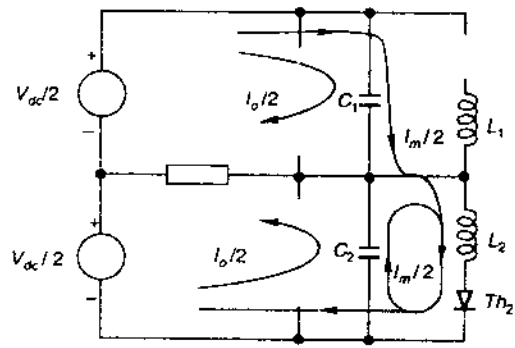
(a) $V_C = 200V$; $I_L = 0$

(b) $$V_C(t) = 200\cos\frac{t}{\sqrt{LC}} = 200\cos 316t$$

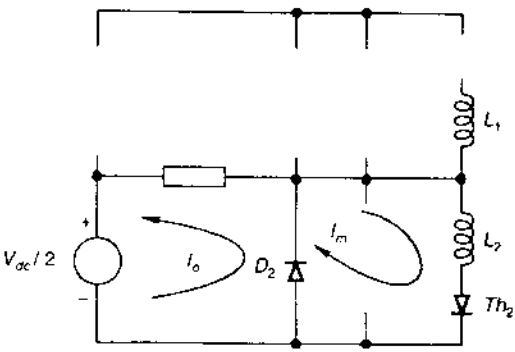
i_C (theo chiều thuận của thyristor)



(a) Mạch trước khi kích hoạt Th_2



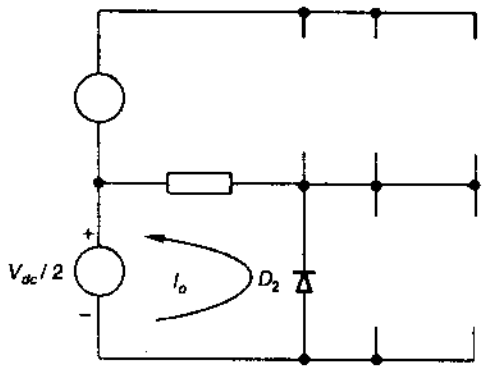
(b) Mạch sau khi ngắt Th_1



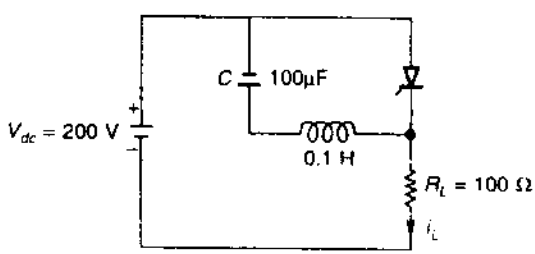
(c) Mạch khi tiêu tán năng lượng của L_2

Hình 11.61. *Hoạt động của mạch chuyển mạch bù.*

Hình 11.61 (tt)



(d) Mạch khi có dòng qua D_2



Hình 11.62. *Mạch điện minh họa Ví dụ 11.5.*

$$V_C(t) = -C\frac{dv_C(t)}{dt} = 6.32 \sin 316\,t$$

$$i_L = \frac{200}{100} = 2\text{ A}$$

$$i_{Th} = 2 + 6.32 \sin 316\,t$$

(c) Thyristor ngưng khi

$$2 + 6.32 \sin 316\,t = 0$$

$$t = 1.096 \text{ ms}$$

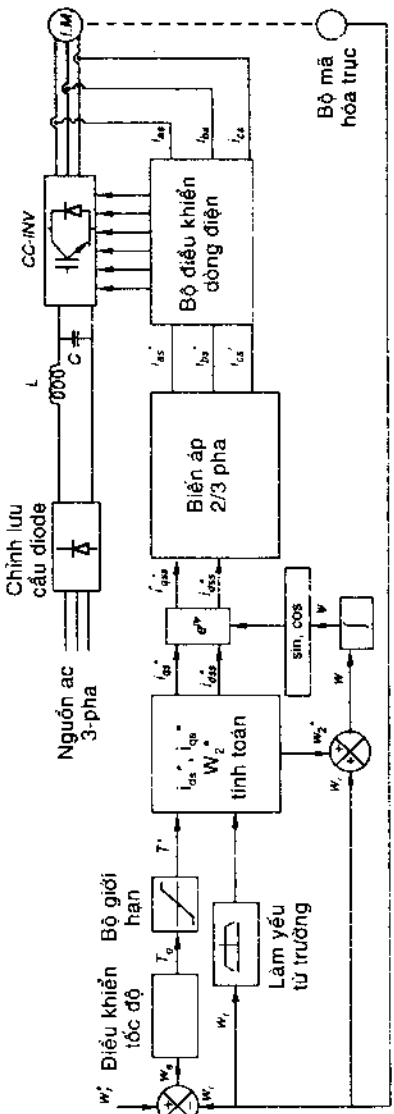
Điều khiển vector của động cơ cảm ứng

Ý tưởng đều khiển vector cho động cơ cảm ứng là truyền động điện với hiệu suất cao hơn động cơ dc kích thích riêng rẽ. Cùng với điều này, động cơ cảm ứng có bộ truyền động mạnh hơn, tin cậy, dễ bảo trì, và rẽ hơn so với truyền động dc. Vài năm trước, động cơ dc kích thích riêng rẽ được coi là tối

ưu trong công nghiệp. Điều này là nhờ hiệu suất động lực nhanh hơn so với động cơ cảm ứng. Sự đáp ứng động lực nhanh hơn của động cơ dc nhờ sự điều khiển moment độc lập và từ thông trong động cơ. Trước khi có sự điều khiển vector cho động cơ, các phương pháp điều khiển tốc độ được chấp nhận rộng rãi đối với truyền động của động cơ cảm ứng lồng sóc gồm điều khiển điện áp, tần số, điện trở rotor, điều khiển v/f, điều khiển độ trượt, và điều khiển hồi phục công suất trượt. Các phương pháp đó đều là điều khiển vô hướng, động cơ lồng sóc có hiệu suất động lực thấp hơn so với động cơ dc kích thích riêng rẽ.

Truyền động động cơ cảm ứng lồng sóc với điều khiển vector hoặc định hướng trường kích thích có mức hiệu suất động lực cao và bộ điều khiển vòng kín có độ ổn định lâu dài. Tuy không có sự khác biệt rõ rệt giữa điều khiển vô hướng và điều khiển vector, nhưng điều khiển vector có vài tính chất cho phép nâng cao hiệu suất động lực. Điều khiển vector còn được gọi là điều khiển độc lập, trong đó vector moment và vector dòng từ thông được điều khiển tương tự động cơ dc kích thích riêng rẽ có mạch bù.

Trong chế độ điều khiển vector, mạch điều khiển truyền động động cơ lồng sóc được tuyến tính hóa và hoạt động tương tự động cơ dc kích thích riêng rẽ có mạch bù. Sự điều khiển dòng điện phần ứng tác động trực tiếp đến moment điện từ xuất



Hình 11.63 *Phương pháp điều khiển vector gián tiếp để truyền động động cơ cảm ứng*

hiện ở bộ truyền động sử dụng động cơ dc kích thích riêng rẽ có mạch bù. Tương tự, trong phương pháp điều khiển vector, hai dòng điện vuông góc, chịu trách nhiệm tạo ra từ thông và moment, được điều khiển độc lập và đáp ứng của thành phần moment của dòng điện là rất cao, do đó điều khiển moment nhanh hơn, hiệu suất động lực học của bộ truyền động cao hơn.

Theo nghĩa rộng, điều khiển động cơ cảm ứng lồng sóc tượng tự động cơ dc kích thích riêng rẽ có mạch bù, được coi là điều khiển vector. Trong trường hợp này, dòng stator được biểu thị theo hệ tọa độ quay đồng bộ với vector lực từ động rotor hoặc stator. Các dòng stator theo hệ tọa độ này được chia thành hai thành phần trực giao tạo ra từ thông rotor và moment trong động cơ. Điều này tương tự động cơ dc, trong đó moment và từ thông được điều khiển một cách độc lập thông qua thành phần dòng điện trường và thành phần dòng điện phần ứng riêng rẽ.

Sự điều khiển độc lập hai dòng điện (i_{ds}* và i_{qs}*) trực giao được thực hiện với cấu trúc mạch được nêu trên Hình 11.63. Cấu trúc điều khiển này cung cấp ba dòng điện quy chiếu pha, là các dòng lý tưởng cần duy trì qua các cuộn dây động cơ để điều khiển vector. Trong điều khiển hai dòng điện trực giao, ba dòng điện pha qua các cuộn dây động cơ được điều chỉnh sao cho sát với các dòng điện lý tưởng. Trong quá trình chuyển tiếp, các dòng điện thay đổi rất nhanh và tạo ra sự thay đổi nhanh của thành phần tạo moment của dòng điện trực giao. Do đó, trong điều khiển vector, cần sử dụng bộ nghịch lưu với sự điều chỉnh dòng điện nhanh.

Trong điều khiển vector động cơ cảm ứng, các thành phần từ thông và moment của vector dòng điện stator được điều khiển độc lập. Đối với điều này, các dòng điện lệnh (i_{ds}* và i_{qs}*) được lấy từ cấu trúc điều khiển động cơ, do đó tạo ra ba dòng điện quy chiếu pha (i_{as}*, i_{bs}*, và i_{cs}*). Ba dòng này qua các cuộn dây động cơ (i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) được duy trì sao cho các dòng trực giao (i_{ds} và i_{qs}) trong động cơ tương hợp với các dòng điện lệnh (i_{ds}* và i_{qs}*). Để đạt được điều này, thường sử dụng bộ nghịch lưu nguồn điện áp được điều khiển bằng dòng điện (CC-VSI). Từ Hình 11.63 có thể thấy các lệnh moment và từ thông (i_{ds}* và i_{qs}*) được cấp cho cấu trúc điều khiển vector. Khi đáp ứng các dòng điện lệnh này, cấu trúc điều khiển thực hiện các mức từ thông và moment cần thiết trong mạch truyền động thông qua sự điều chỉnh ba dòng điện pha.

Trong điều khiển vector của động cơ cảm ứng, từ thông rotor được điều chỉnh thông qua sự điều khiển dòng điện các cuộn stator. Để điều chỉnh từ thông rotor, cần biết vị trí từ thông này. Vị trí từ thông rotor được cảm biến hoặc ước tính. Do đó, tùy theo phương pháp luận được dùng để xác định vị trí vector từ thông rotor, điều khiển vector được chia thành điều khiển trực tiếp và điều khiển gián tiếp.

Phụ lục 1

Phân tích mạch trạng thái ổn định

Biểu thị pha của các sóng sine

Các dạng sóng sine (Hình 1.1) có thể được biểu thị theo phương trình

$$a = \sqrt{2}\,A \sin(\omega t + \phi)$$

trong đó $\sqrt{2}\,A$ = biên độ cực đại của sóng sine

A = giá trị rms của sóng sine

$\omega = 2\pi f$ = tần số (rad/s)

f = tần số (Hz)

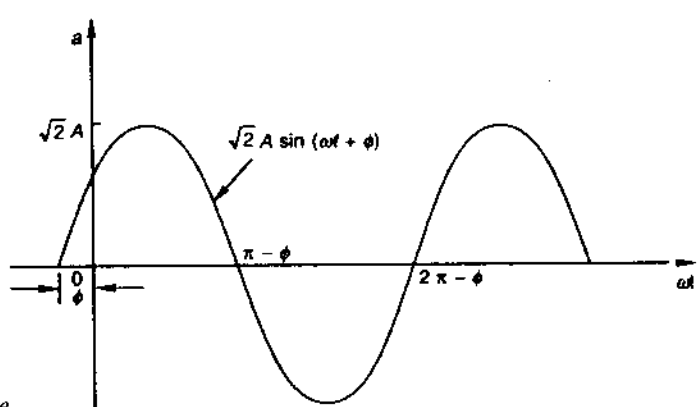
ϕ = góc pha

Phương trình trên cũng được viết dưới dạng

$$a = \sqrt{2}\,A \sin(\omega t + \phi) = \mathrm{Im}\left[\sqrt{2}\,A\,e^{j\phi}e^{j\omega t}\right] \quad (1.1a)$$

$$= \mathrm{Im}\left[\sqrt{2}\,\overline{A}e^{j\omega t}\right] \quad (1.1b)$$

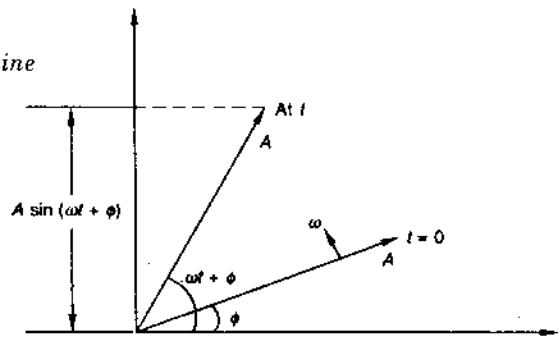
trong đó $\overline{A} = Ae^{j\phi} = A\angle\phi$ (1.2)



Hình 1.1.
Dạng sóng sine.

Theo pt 1.1b, sóng sine có thể biểu thị theo pha $\overline{A}$ từ pt (1.2), trong đó A là độ lớn của pha biểu thị giá trị rms của sóng sine và ϕ là góc pha. Bằng cách tính theo số ảo, đại lượng $\overline{A}e^{j\omega t}$ trong pt (1.1b), có thể tìm được giá trị tức thời của sóng sine biểu thị vector pha $\overline{A}$. Phương pháp thứ hai là sử dụng đồ thị pha (Hình 1.2), trong đó vector pha $\overline{A}$ là đại lượng có hướng với độ lớn A tại góc ϕ tính từ trục qui chiếu. Sự quay ngược chiều kim đồng hồ theo góc ω rad/s sẽ đẩy vector $\overline{A}$ theo giá trị $e^{j\omega t}$ trong pt (1.1b). Từ đồ thị có thể dễ dàng nhận thấy, hình chiếu của vector pha trên trục y ở thời điểm t nhân với $\sqrt{2}$ là giá trị tức thời của sóng sine biểu thị theo vector pha.

Hình 1.2
Đồ thị pha của sóng sine



Cộng các vector pha

Cộng (hoặc trừ) hai hoặc nhiều sóng sine cùng tần số có thể được thực hiện dễ dàng bằng đồ thị pha. Ví dụ,

$$\sqrt{2}\,A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sqrt{2}\,A_2 \sin(\omega t + \phi_2) = \sqrt{2}\,A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.3)$$

Hai sóng sine trong pt (1.3) được biểu thị theo các vector pha

$$\overline{A}_1 = A_1 e^{j\phi_1}$$

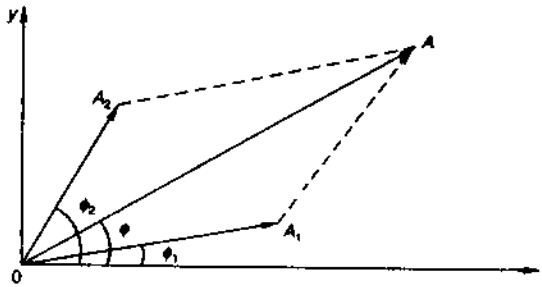
$$\overline{A}_2 = A_2 e^{j\phi_2}$$

Do chúng có cùng tần số, chúng tĩnh tại với nhau (Hình 1.3). Do đó, trong khi cộng, chiều quay của các vector pha không có ý nghĩa; chỉ xét khi cần tìm giá trị tức thời của sóng sine. Phương pháp vector pha rất hữu dụng khi xử lý các sóng sine có cùng tần số.

Dạng vector pha của pt (1.3) như sau

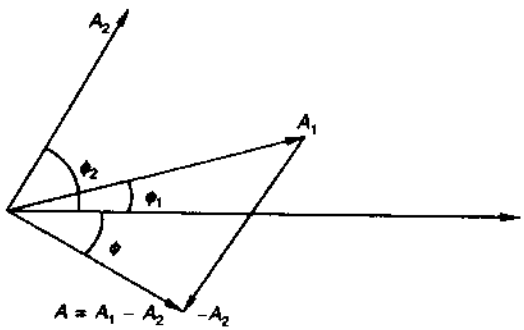
$$\overline{A}_1 + \overline{A}_2 = \overline{A} = Ae^{j\phi} \quad (1.4)$$

Hình 1.3 Cộng các vector pha của hai sóng sine cùng tần số



Phép cộng các vector pha được nêu trên Hình 1.3, phép trừ được nêu trên Hình 1.4

Hình 1.4 Trừ các vector pha



Trạng thái ổn định của điện xoay chiều

Mạch được kích thích với ac sau các chuyển tiếp, sẽ đạt đến trạng thái ổn định, trong đó điện áp và dòng điện ở mọi điểm trong mạch đều có dạng hàm sine với mạch bao gồm các phần tử tuyến tính. Do đó trạng thái ổn định ac của các phần tử tuyến tính - điện trở, cảm kháng, dung kháng - có thể thiết lập mô hình theo các vector pha điện áp và dòng điện.

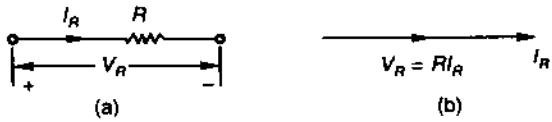
Điện trở

Đối với phần tử điện trở trên Hình 1.5a

$$\overline{V}_R = R\overline{I}_R \tag{1.5}$$

trong đó điện áp qua điện trở là *đồng pha* với dòng điện (đồ thị pha trên Hình 1.5b). Phương trình 1.5 được viết dưới dạng

Hình 1.5.
Mạch điện trở.



$$\overline{I}_R = G\overline{V}_R \tag{1.6}$$

trong đó $G = \dfrac{1}{R}$

Cảm kháng

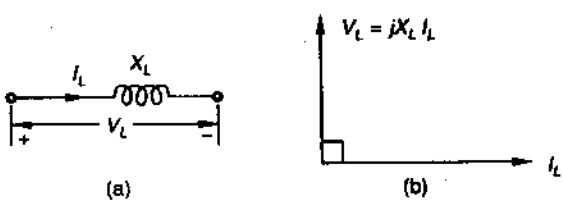
Đối với phần tử cảm ứng (L) trên Hình 1.6 a

$$\overline{V}_L = jX_L\overline{I}_L \tag{1.7}$$

trong đó $X_L = \omega L = 2\pi f L$ (1.8)

Đồ thị pha tương ứng pt 1.7 được vẽ trên Hình 1.6b, trong đó điện áp qua cuộn cảm và dòng điện lệch pha với dòng điện trễ 90^0.

Hình 1.6.
Mạch có cuộn cảm.



Phương trình 1.7 được viết lại dưới dạng

$$\overline{I}_L = -jB_L B\overline{V}_L \tag{1.9}$$

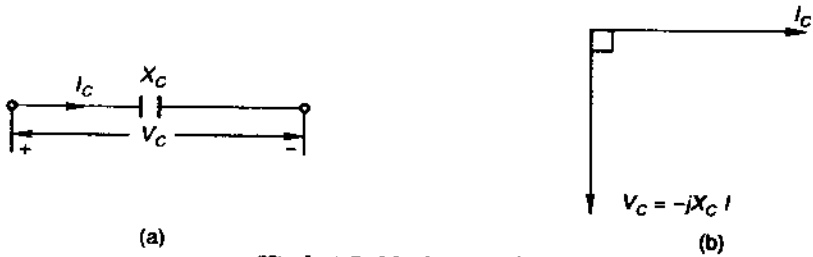
trong đó $B_L = \dfrac{1}{X_L} = \dfrac{1}{\omega L}$ (1.10)

Điện dung

Đối với phần tử điện dung (c) trên Hình 1.7 a

$$\overline{V}_C = -jX_C\overline{I}_C \tag{1.11}$$

trong đó $X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{2\pi f C}$ (1.12)



Hình 1.7. *Mạch có tụ điện.*

Ứng với pt (1.11), đồ thị pha được vẽ trên Hình 1.7b, trong đó dòng điện sớm pha 90^0 so với điện áp. Phương trình 1.11 có thể viết dưới dạng

$$\bar{I}_C = jB_C\bar{V}_C \tag{1.13}$$

trong đó $\quad B_C = \dfrac{1}{X_C} = \omega C$

Mạch RL nối tiếp

Áp dụng định luật Kirchhoff ở dạng vector pha cho mạch RL nối tiếp trên Hình 1.8 a

$$\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_L = R\bar{I} + jX_L\bar{I} = (R + jX_L)\bar{I} \tag{1.14}$$

Bằng cách sử dụng các quan hệ nêu trên, đồ thị pha tương ứng pt (1.13) được vẽ trên Hình 1.8b, trong đó dòng điện trễ pha so với điện áp là

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X_L}{R} \tag{1.15}$$

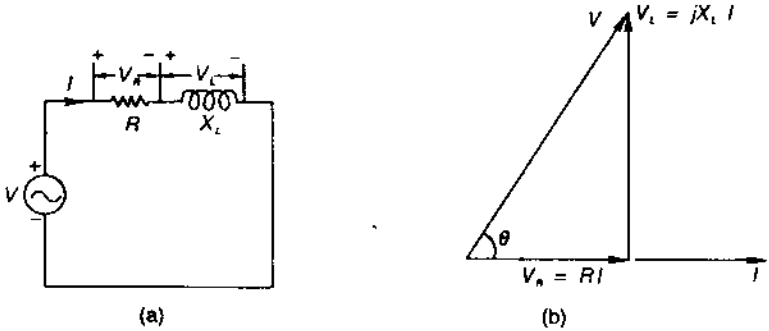
Phương trình (1.14) có thể được viết dưới dạng

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{R + jX_L} \tag{1.16}$$

Tổng trở trong mạch được xác định theo

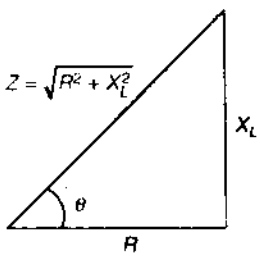
$$\begin{aligned}\bar{Z} &= (R + jX_L) = \text{tổng trở (số phức)} \\ &= Z\angle\theta\end{aligned} \tag{1.17}$$

trong đó $\quad \theta = \tan^{-1}\dfrac{X_L}{R}$



Hình 1.8. *Mạch RL nối tiếp.*

là góc trễ pha giữa dòng điện và điện áp trong mạch. Tổng trở của mạch này được biểu thị theo số phức trên Hình 1.9, trong đó tổng trở không phải là vector pha.



Hình 1.9 *Tam giác tổng trở*

Phương trình 1.16 có thể được viết dưới dạng

$$\overline{I} = \frac{\overline{V}}{\overline{Z}} = \frac{V}{Z} \angle -\theta \text{ (với } \overline{V} = V \angle 0^0) \qquad (1.18)$$

$$\overline{I} = \overline{Y}\,\overline{V} \qquad (1.19)$$

trong đó $\overline{Y} = \dfrac{1}{\overline{Z}}$ (1.20a)

$= G - jB$ (1.20b)

G = điện dẫn của mạch.

B = điện nạp của mạch.

Dễ dàng nhận thấy trong mạch này có

$$G = \frac{R}{R^2 + X_L^2} \tag{1.21}$$

$$B = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} \tag{1.22}$$

Mạch RL song song

Xét mạch RL song song (Hình 1.10a) được kích thích bằng điện áp V. Hai phần tử của mạch này là

$$\overline{I}_R = \frac{\overline{V}}{R} = G\overline{V}; \qquad \overline{I}_L = \frac{\overline{V}}{jX_L} = -jB_L\overline{V}$$

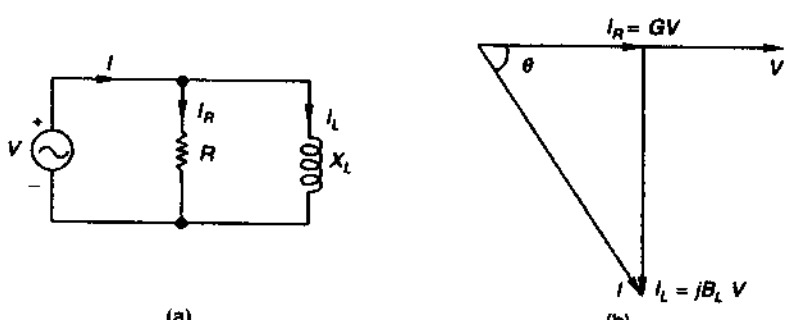
Áp dụng định luật Kirchhoff

$$\overline{I} = \overline{I}_R + \overline{I}_L = (G - jB_L)\overline{V} = \overline{Y}\overline{V} \tag{1.23}$$

trong đó $\overline{Y} = G - jB_L$

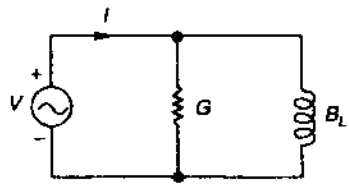
Đồ thị pha của pt (1.23) được vẽ trên Hình 1.10 b, trong đó

$$\theta = \tan^{-1}\frac{B_L}{G} = \text{góc dòng điện trễ pha so với điện áp.}$$



Hình 1.10 Mạch RL song song

Từ pt (1.20b) có thể dễ dàng nhận thấy mạch song song tương đương của mạch nối tiếp (Hình 1.8) được nêu trên Hình 1.11, trong đó G và B được tính theo các pt (1.21) và (1.22).



***Hình 1.11** Mạch song song tương đương của mạch RL nối tiếp trên Hình 1.8*

Bạn đọc có thể dễ dàng tìm được mạch nối tiếp tương đương với mạch RL song song trên Hình 1.10 bằng cách sử dụng pt (1.23).

Tổng trở/ điện dẫn trong mạch nối tiếp/ song song

Đối với tổng trở trong mạch nối tiếp

$$\overline{Z} = \overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 + \ldots \qquad (1.24)$$

hoặc

$$\frac{1}{\overline{Y}} = \frac{1}{\overline{Y}_1} + \frac{1}{\overline{Y}_2} + \ldots \qquad (1.25)$$

Đối với điện dẫn trong mạch song song

$$\overline{Y} = \overline{Y}_1 + \overline{Y}_2 + \ldots \qquad (1.26)$$

hoặc

$$\frac{1}{\overline{Z}} = \frac{1}{\overline{Z}_1} + \frac{1}{Z_2} + \ldots \qquad (1.27)$$

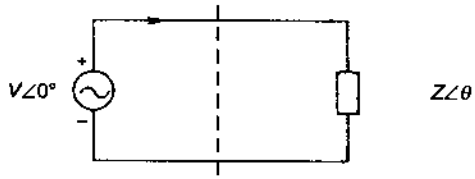
Dạng tổng trở trong pt (1.24) tương đối thuận tiện cho mạch nối tiếp và dạng điện dẫn trong pt (1.26) thuận tiện cho mạch song song. Hơn nữa, cần nhớ các phối hợp mạch song song/nối tiếp luôn luôn phải sử dụng các phép toán số phức

Công suất trong mạch ac (một pha)

Xét Hình 1.12, trong đó nguồn 1 - pha cung cấp cho tải có tổng trở $Z \angle \theta$. Ở dạng tức thời

$$v = \sqrt{2}\ V \sin \omega t$$

$$i = \sqrt{2}\ I \sin (\omega t - \theta)$$



Hình 1.12. *Mạch ac 1-pha.*

Công suất tức thời được tính theo

$$p = vi = 2VI \sin \omega t \sin (\omega t - \theta) = VI \left[\cos \theta - \cos (2\omega t - \theta)\right] \qquad (1.28)$$

Dễ dàng nhận thấy công suất tức thời có thành phần không đổi và thành phần dao động với tần số gấp đôi (2ω). Công suất trung bình (hoạt động) cung cấp cho tải trong một chu kỳ hoàn chỉnh là

$$P = VI \cos \theta \quad W \qquad (1.29)$$

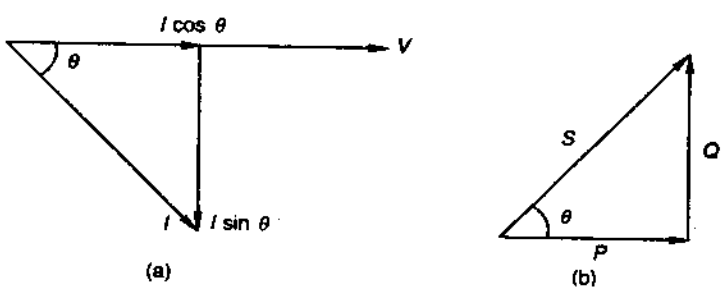
$$\cos \theta = \text{hệ số công suất (pf)} \qquad (1.30)$$

và có thể trễ pha hoặc sớm pha tùy theo dòng điện trễ pha hoặc sớm pha so với điện áp.

Công suất cũng có thể được biểu diễn bằng đồ thị pha từ Hình 1.13(a), trong đó thành phần dòng điện Icosθ đồng pha với điện áp cung cấp công suất hoạt động cho tải. Thành phần dòng điện thứ hai Isinθ cung cấp công suất phản ứng cho tải, nghĩa là

$$Q = VI \sin \theta \qquad VAR \qquad (1.31)$$

Công suất phản ứng có thể được đo theo đơn vị kVAR hoặc MVAR đối với thiết bị công suất lớn. Công suất phản ứng là *dương* khi *trễ pha* so với tải và *âm* khi *sớm pha* so với tải.



Hình 1.13. *Đồ thị i - v và tam giác S - P - Q.*

Công suất phức

Công suất phức thường biểu thị theo dạng phức

$$\overline{S} = \overline{V}\,\overline{I} \tag{1.32}$$

$\overline{V} = Ve^{j\phi}, \overline{I} = Ie^{j(\phi-\theta)}$; $\overline{I}$ trễ pha so với $\overline{V}$ góc θ

$$\overline{S} = Ve^{j\phi}.Ie^{-j(\phi-\theta)} = VIe^{j\theta} = VI\cos\theta + jVI\sin\theta \tag{1.33}$$

$$= P + jQ \tag{1.34}$$

Có thể thấy Q dương khi θ trễ pha

Biểu đồ pha của công suất phức theo pt (1.34) được vẽ trên Hình 1.13b trong đó dấu của θ ngược với dấu trên Hình 1.13a là do sự phối hợp dòng điện trong pt (1.32). Từ biểu đồ pha có thể thấy

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = VA \tag{1.35}$$

$$pf = \cos\theta = \cos\tan^{-1}\frac{Q}{P}\text{; trễ pha khi Q dương} \tag{1.36}$$

sớm pha khi Q âm

Đối với mạch nối tiếp RL (Hình 1.8).

$$\overline{S} = \overline{V}\,\overline{I} = \overline{Z}\,\overline{I}\,\overline{I}^* = (R + jX_L)I^2 = RI^2 + jX_LI^2 \tag{1.37}$$

Trong đó $P = RI^2$ = công suất thực tiêu thụ trong phần tử điện trở

$Q = X_LI^2$ = công suất phản kháng trong phần tử phản kháng (cảm ứng)

Mạch RLC song song

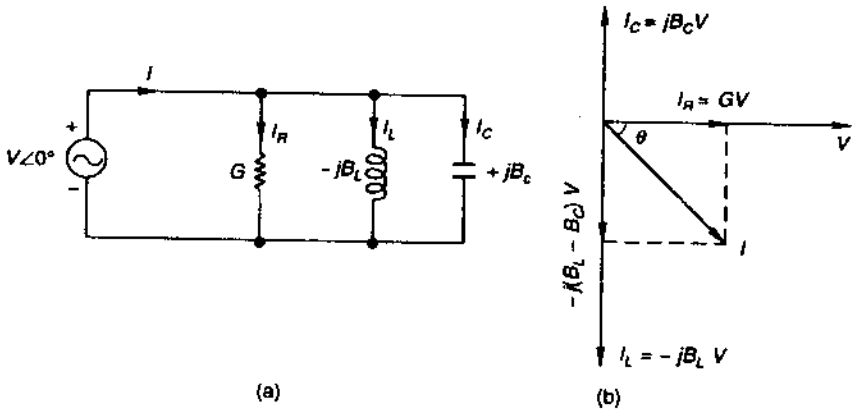
Xét mạch RLC song song (Hình 1.14a), có thể thấy

$$\overline{I} = GV - j(B_L - B_C)V \tag{1.38}$$

có biểu đồ pha được biểu thị trên Hình 1.14b. Ở đây

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_L - B_C}{G}\right) \tag{1.39}$$

trễ khi $B_L > B_C$ và sớm khi $B_L < B_C$. Hệ số công suất của mạch này được biểu thị theo



***Hình 1.14** Mạch RLC song song*

$$\cos\theta = \cos\tan^{-1}\left(\frac{B_L - B_C}{G}\right) \tag{1.40}$$

Có thể dễ dàng nhận thấy, đối với tải cho trước (G và B_L), hệ số công suất có thể điều chỉnh bằng B_C theo điện dung

Công suất phức tiêu thụ ở mạch này là

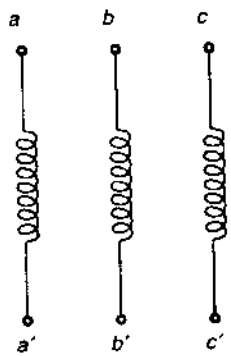
$$\overline{S} = GV^2 + j(B_L - B_C)V^2 \tag{1.41}$$

Với công suất thực cố định (GV^2), công suất phản kháng có thể được điều khiển bằng cách điều chỉnh điện dung (B_C), do đó hệ số công suất mạch có thể được điều khiển theo điện dung.

Phụ lục 2

Các hệ thống 3 - pha

Các hệ thống và các thiết bị 3 - pha được sử dụng nhiều trong lĩnh vực năng lượng điện, bao gồm phát điện công suất trung bình đến cao, truyền tải, và tiêu thụ điện năng. Hệ thống 3 - pha có tính kinh tế cao hơn và có các ưu điểm vận hành tốt hơn so với hệ thống 1 - pha



Hình 2.1. *Ba cuộn dây pha.*

Dòng điện và điện áp 3 - pha

Tập hợp ba điện áp/ emf bằng nhau về độ lớn và có hiệu số pha 120^0 tạo thành các điện áp 3 - pha/ emf cân bằng. Các điện áp 3 - pha có độ lệch pha khác nhau sẽ ở trạng thái không cân bằng. Điều này cũng được áp dụng cho tập hợp ba dòng điện. Hình 2.1 minh họa ba cuộn dây (pha) có điện áp/ emf tạo thành hệ thống cân bằng. Dạng tức thời của hệ thống có thể được biểu thị theo

$$e_{aa'} = \sqrt{2}\ E \sin \omega t \qquad (2.1\ a)$$

$$e_{bb'} = \sqrt{2}\ E \sin (\omega t - 120^0) \qquad (2.1\ b)$$

$$e_{cc'} = \sqrt{2}\ E \sin (\omega t - 240^0) \qquad (2.1\ c)$$

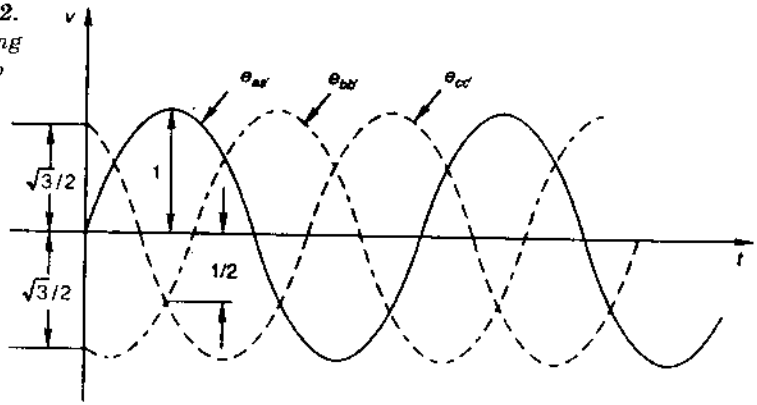
Dạng sóng của ba điện áp được nêu trên Hình 2.2. Trong trường hợp đang khảo sát, điện áp của pha a sớm pha so với pha b và điện áp pha b sớm pha so với c; các điện áp 3 - pha có thứ tự pha abc. Thứ tự pha cũng có thể là abc với a trễ pha b và b trễ pha c.

Trong dạng biểu đồ pha, pt (2.1) có thể viết dưới dạng

$$\overline{E}_{aa'} = E\angle 0^0 \qquad (2.2\ a)$$

$$\overline{E}_{bb'} = E\angle -120^0 \qquad (2.2\ b)$$

$$\overline{E}_{cc'} = E\angle -240^0 \qquad (2.2\ c)$$



Hình 2.2. *Dạng sóng điện áp 3-pha.*

Xét tổng điện áp tức thời

$$e_{aa'} + e_{bb'} + e_{cc'} = \sqrt{2}E\left[\sin\omega t + \sin(\omega t - 120^0) + \sin(\omega t - 240^0)\right]$$

hoặc $$e_{aa'} + e_{bb'} + e_{cc'} = 0 \qquad (2.3)$$

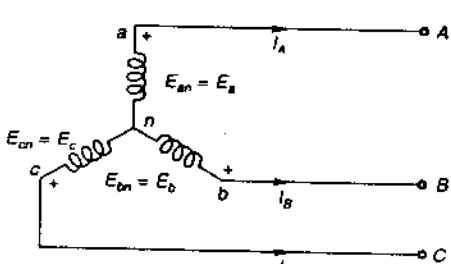
Do đó, có thể thấy tổng các điện áp (hoặc dòng điện) 3 - pha cân bằng là bằng zero ở mọi thời điểm. Điều này cũng có thể nhận thấy từ Hình 2.2. Dạng phương trình pha là

$$\overline{E}_{aa'} + \overline{E}_{bb'} + \overline{E}_{cc'} = 0 \qquad (2.4)$$

Các cuộn dây ba pha (Hình 2.1) có thể mắc theo hai cách, sao và tam giác

Mắc sao

Trong kiểu mắc này, ba đầu cùng cực tính (a', b', c') của các cuộn pha được nối với nhau tạo thành *điểm trung hòa*, ba đường dây được nối với các đầu phía ngoài (a,b,c) (Hình 2.3).



Hình 2.3 *Mắc sao.*

Từ Hình 2.3 có thể thấy

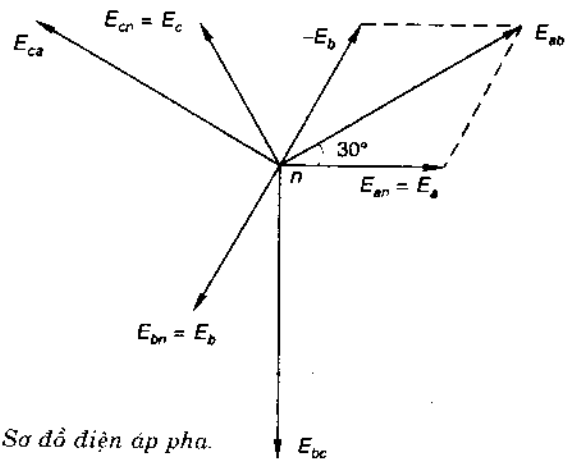
$$\overline{E}_{an} = \overline{E}_a = \overline{E}_{aa'} = E\angle 0^0 \qquad (2.5\ a)$$

$$\overline{E}_{bn} = \overline{E}_b = \overline{E}_{bb'} = E\angle -120^0 \qquad (2.5\ b)$$

$$\overline{E}_{cn} = \overline{E}_c = \overline{E}_{cc'} = E\angle -240^0 \qquad (2.5\ c)$$

Các điện áp pha này được nêu trên biểu đồ pha (Hình 2.4). Từ sơ đồ nối kết trên Hình 2.3, có thể thấy điện áp giữa a và b (hoặc A và B) là

$$\overline{E}_{ab} = \overline{E}_{an} - \overline{E}_{bn}$$



Hình 2.4. *Sơ đồ điện áp pha.*

Từ phép toán pha trên Hình 2.4

$$\overline{E}_{ab} = \sqrt{3}\,\overline{E}_{an}\angle 30^0 = \sqrt{3}\,E\angle 30^0 \qquad (2.6\ a)$$

Tương tự

$$\overline{E}_{bc} = \overline{E}_{bn} - \overline{E}_{cn} = \sqrt{3}\,\overline{E}_{bn}\angle 30^0 = \sqrt{3}\,E\angle -90^0 \qquad (2.6\ b)$$

$$\overline{E}_{ca} = \overline{E}_{cn} - \overline{E}_{an} = \sqrt{3}\,\overline{E}_{cn}\angle 30^0 = \sqrt{3}\,E\angle 150^0 \qquad (2.6\ c)$$

Từ sơ đồ pha hoàn tất (Hình 2.4), đối với các điện áp pha cân bằng, các điện áp tuyến cũng tạo thành tập hợp cân bằng với bước tiến pha 30^0 so với các điện áp pha. Khi tính theo độ lớn:

$$E\,(\text{dây} - \text{dây}) = \sqrt{3}\,E\,(\text{pha})$$

$$E_L = \sqrt{3}\,E_p \qquad (2.7)$$

Từ Hình 2.3 có thể nhận thấy

$$\bar{I}_A = \bar{I}_a \qquad (2.8\ a)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_b \qquad (2.8\ b)$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_c \qquad (2.8\ c)$$

Nếu các dòng điện pha là tập hợp cân bằng, các dòng điện đường dây cũng cân bằng (Hình 2.5). Trong hệ thống cân bằng, θ là hiệu góc pha giữa điện áp và dòng điện của pha tương ứng. Tính theo độ lớn

$$I\,(\text{dây}) = I\,(\text{pha})$$

$$I_L = I_p \qquad (2.9)$$

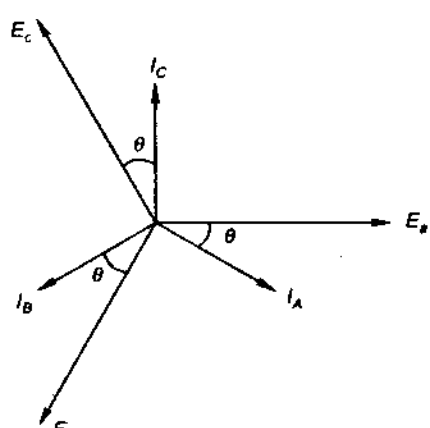
Do các dòng điện là cân bằng

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0 \qquad (2.10)$$

Tuy nhiên, với dây trung hòa cô lập trong mắc sao, kể cả khi các dòng điện không cân bằng, pt (2.10) vẫn đúng

Tóm lại, quan hệ độ lớn trong mắc sao là:

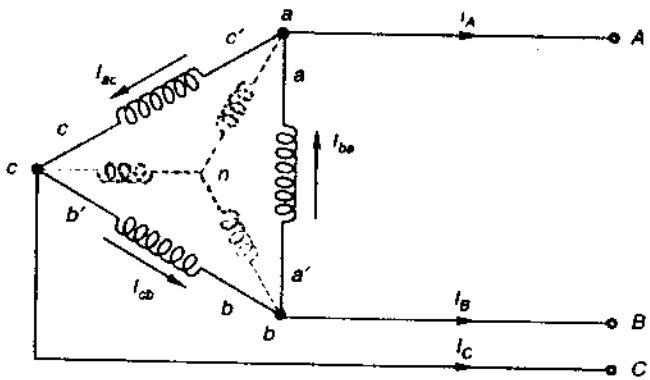
$$E_L = \sqrt{3}E_p; \qquad I_L = I_p \qquad (2.11)$$



Hình 2.5. *Sơ đồ pha dòng điện và điện áp.*

Mắc tam giác

Các cuộn pha trên Hình 2.1 có thể mắc tam giác bằng cách nối ac', ba', và cb' và nối ba đường dây ra ngoài từ các nút đó. Có thể nhận thấy, điện áp qua vòng lặp khép kín do mắc tam giác tạo thành sẽ là $\overline{E}_{aa'} + \overline{E}_{bb'} + \overline{E}_{cc'} = 0$ (tập hợp cân bằng các điện áp pha và do đó mắc tam giác không gây ra ngắn mạch)



Hình 2.6. *Mắc tam giác.*

Trong mắc tam giác, các dòng điện pha và dòng điện đường dây có quan hệ (Hình 2.6)

$$\overline{I}_A = \overline{I}_{ba} - \overline{I}_{ac} = \sqrt{3}\,\overline{I}_{ba}\angle -30^0 \qquad (2.12\ a)$$

$$\overline{I}_B = \overline{I}_{cb} - \overline{I}_{ba} = \sqrt{3}\,\overline{I}_{cb}\angle -30^0 \qquad (2.12\ b)$$

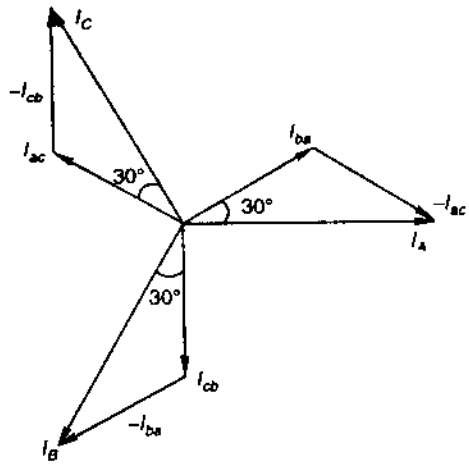
$$\overline{I}_C = \overline{I}_{ac} - \overline{I}_{cb} = \sqrt{3}\,\overline{I}_{ac}\angle -30^0 \qquad (2.12\ c)$$

Các quan hệ này cũng có thể thấy được trên biểu đồ pha (Hình 2.7). Khi các dòng điện pha cân bằng, các dòng điện đường dây cũng cân bằng, và ngược lại. Khi tính theo độ lớn

$$I_L = \sqrt{3}\,I_p \qquad (2.13)$$

Dễ dàng nhận thấy

$$E_L = E_p \qquad (2.14)$$

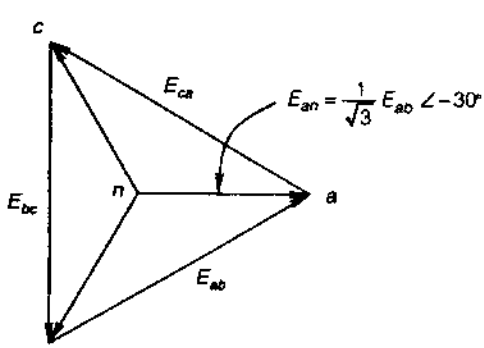


Hình 2.7. *Giản đồ pha mắc tam giác.*

Mắc sao tương đương của mắc tam giác

Có thể sẽ thuận tiện khi làm việc với mắc sao tương đương của mắc tam giác. Sự tương đương này được vẽ bằng đường nét đứt trên Hình 2.6. Các quan hệ độ lớn của điện áp và dòng điện đã cho có thể được áp dụng dễ dàng. Quan hệ góc pha giữa điện áp tam giác và điện áp sao tương đương được xác định từ Hình 2.8. Quan hệ pha tương ứng giữa các dòng điện được nêu trên Hình 2.7.

Từ các Hình 2.7 và 2.8 cũng có thể dễ dàng nhận thấy sự mắc tam giác tương đương của mắc sao.



Hình 2.8. *Mắc sao tương đương của mắc tam giác.*

Công suất

Các điện áp pha và dòng điện trong mạch ba pha cân bằng (sao hoặc tam giác) có thể được viết ở dạng tức thời

$$e_a = \sqrt{2}\, E_p \sin \omega t \qquad (2.15\ a)$$

$$e_b = \sqrt{2}\, E_p \sin(\omega t - 120^0) \qquad (2.15\ b)$$

$$e_c = \sqrt{2}\, E_p \sin(\omega t - 240^0) \qquad (2.15\ c)$$

và

$$i_a = \sqrt{2}\, I_p \sin(\omega t - \theta) \qquad (2.16\ a)$$

$$i_b = \sqrt{2}\, I_p \sin(\omega t - \theta - 120^0) \qquad (2.16\ b)$$

$$i_c = \sqrt{2}\, I_p \sin(\omega t - \theta - 240^0) \qquad (2.16\ c)$$

trong đó θ là góc pha giữa dòng điện pha và điện áp pha.

Quan hệ vector pha giữa các điện áp pha và dòng điện cân bằng được nêu trên Hình 2.5

Công suất tức thời trong mỗi pha là

$$P_a = e_a i_a = E_p I_p \left[\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta)\right] \qquad (2.17\ a)$$

$$P_b = e_b i_b = E_p I_p \left[\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta - 240^0)\right] \qquad (2.17\ b)$$

$$P_c = e_c i_c = E_p I_p \left[\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta - 480^0)\right] \qquad (2.17\ c)$$

Công suất tức thời toàn phần là

$$P = P_a + P_b + P_c = 3\, E_p I_p \cos\theta \qquad (2.18)$$

Chú ý, tổng của ba đại lượng cosine, có hiệu số pha 120^0, là zero. Từ pt (2.18) có thể thấy, công suất tức thời toàn phần trong hệ thống ba pha cân bằng là hằng số và bằng ba lần công suất trung bình của mỗi pha. Điều này là ngược với công suất trong hệ thống một pha (pt 1.28), có thành phần dao động tần số gấp đôi. Tính không đổi của công suất tức thời trong hệ thống ba pha cân bằng là ưu điểm quan trọng, tạo ra moment đồng nhất cho các máy quay và không có moment xung như trong các máy 1 - pha. Đây là một trong nhiều lý do để hệ thống 3 - pha được chấp nhận rộng rãi trừ các ứng dụng công suất thấp.

Do đó, trong hệ thống cân bằng sao/tam giác

$$P = 3\ E_p I_p \cos\theta \tag{2.19}$$

Chuyển đổi các giá trị pha thành các giá trị đường dây

$$P = \sqrt{3}\ E_L I_L \cos\theta = 3I_p^2 R_p \tag{2.20}$$

$$Q = \sqrt{3}\ E_L I_L \sin\theta = 3I_p^2 X_p \tag{2.21}$$

trong đó R_p = điện trở nối tiếp tương đương của tải.

X_p = điện kháng nối tiếp tương đương của tải.

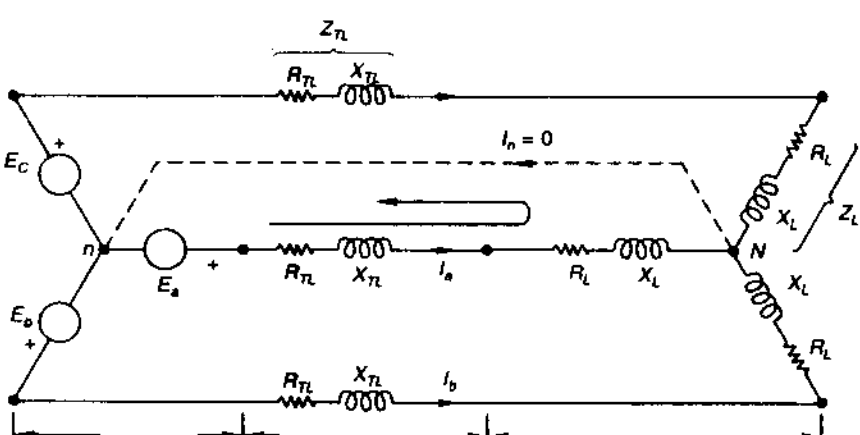
Góc pha của tải được tính theo

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X_p}{R_p} = \cos^{-1}\frac{R_p}{Z_p} = \tan^{-1}\frac{Q}{P} \tag{2.22}$$

Trong hệ thống 3 - pha cân bằng, các pha có hệ số công suất như nhau

Các mạch ba pha

Hình 2.9 minh họa hệ thống 3 - pha cân bằng - nguồn, tuyến truyền dẫn, và tải. Nguồn và tải được giả thiết là mắc sao tuy chúng vẫn có thể được mắc tam giác. Hai dây trung hòa là cô lập, kể cả khi các dây này được nối (đường



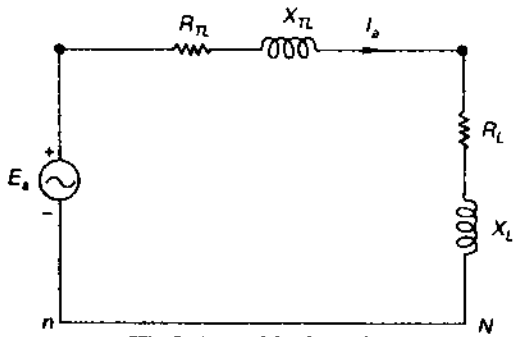
Hình 2.9 *Hệ thống ba pha cân bằng*

nét đứt), dòng điện trong nối kết trung hoà là zero do các dòng điện cân bằng ($\overline{I}_n = \overline{I}_a + \overline{I}_b + \overline{I}_c = 0$). Đối với pha a qui chiếu

$$\overline{E}_a = (\overline{Z}_{TL} + \overline{Z}_L)\overline{I}_a \tag{2.23}$$

Do dòng điện zero trong nối kết trung hòa, nếu có, tổng trở của chúng cũng không xuất hiện trong pt (2.23). Các dòng điện và điện áp trong các pha khác phải có cùng độ lớn được cho theo pt (2.23), nhưng lệch pha 120°. Phương trình (2.23) tương ứng mạch 1 - pha được nêu trên Hình 2.10 có nghiệm hoàn toàn xác định nghiệm của mạch 3 - pha trên Hình 2.9. Nếu tải hoặc phần bất kỳ của hệ thống là không cân bằng, phải thực hiện trên cơ sở ba pha bằng cách viết ba phương trình vòng

Sự phân tích hệ thống ba pha cân bằng theo cách này là rất đơn giản, được thực hiện dựa trên cơ sở một pha. Khi tính các chi tiết, có thể thực hiện trực tiếp hoặc chuyển đổi thành mắc sao tương đương. Qui trình này được minh họa trong ví dụ 2.1



***Hình 2.10**. Mạch 1-pha.*

Sự chuyển đổi sao - tam giác

Hình 2.11 minh họa ba tổng trở mắc tam giác với mắc sao tương đương, bằng đường chấm chấm, cần tìm bằng cách thiết lập phương trình các tổng trở giữa cả ba cặp 2 - đầu dây. Giữa các đầu dây a và b

$$\overline{Z}_a + \overline{Z}_b = \overline{Z}_{ab} \parallel (\overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}) = \frac{\overline{Z}_{ab}(\overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca})}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \tag{2.24}$$

tương tự

$$\overline{Z}_b + \overline{Z}_c = \frac{\overline{Z}_{bc}(\overline{Z}_{ca} + \overline{Z}_{ab})}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \tag{2.25}$$

$$\overline{Z}_c + \overline{Z}_a = \frac{\overline{Z}_{ca}(\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc})}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \tag{2.26}$$

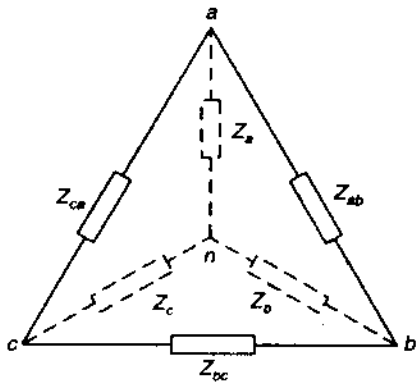
Giải

$$\overline{Z}_a = \frac{\overline{Z}_{ab}\overline{Z}_{ca}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \quad (2.27)$$

$$\overline{Z}_b = \frac{\overline{Z}_{ab}\overline{Z}_{bc}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \quad (2.28)$$

$$\overline{Z}_c = \frac{\overline{Z}_{ca} + \overline{Z}_{bc}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca}} \quad (2.29)$$

Giải các pt (2.24) đến (2.26), tổng trở tam giác tương đương của mắc sao có thể tính được. Kết quả được rút gọn như sau:



Hình 2.11. *Tổng trở mắc tam giác.*

$$\overline{Z}_{ab} = \frac{\overline{Z}_a\overline{Z}_b + \overline{Z}_b\overline{Z}_c + \overline{Z}_c\overline{Z}_a}{\overline{Z}_c} \quad (2.30)$$

$$\overline{Z}_{bc} = \frac{\overline{Z}_a\overline{Z}_b + \overline{Z}_b\overline{Z}_c + \overline{Z}_c\overline{Z}_a}{\overline{Z}_a} \quad (2.31)$$

$$\overline{Z}_{ca} = \frac{\overline{Z}_a\overline{Z}_b + \overline{Z}_b\overline{Z}_c + \overline{Z}_c\overline{Z}_a}{\overline{Z}_b} \quad (2.32)$$

Nếu các tổng trở là cân bằng, từ các pt (2.27) đến (2.29) hoặc (2.30) đến (2.32), có thể suy ra:

$$\overline{Z}_Y = 3\overline{Z}_\Delta \quad (2.33)$$

Ví dụ 2.1. Tải mắc tam giác cân bằng có tổng trở (4 + j3) Ω/pha được mắc với nguồn 3-pha, 230V. Hãy tìm dòng điện đường dây, hệ số công suất, công suất, VA phản kháng, VA toàn phần.

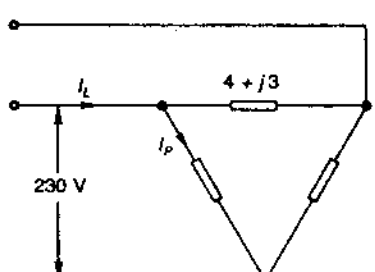
Giải

Từ Hình 2.12

$V_p = V_L = 230$ V

$$I_p = \frac{230\angle 0^0}{4 + j3} = 46\angle -36.9^0 \text{ A}$$

p*f* = cos 36.9⁰ = 0.8 trễ pha.



Hình 2.12. *Mạch điện minh họa Ví dụ 2.1.*

$I_L = \sqrt{3}I_p = \sqrt{3} \times 46 = 79.6$ A

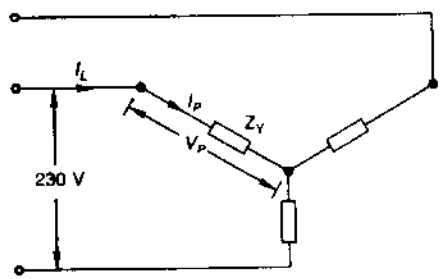
$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta = \sqrt{3} \times 230 \times 79.6 \times 0.8 = 25.36$ kW

$Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin\theta = \sqrt{3} \times 230 \times 79.6 \times 0.6 = +19.02$ kVAR

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 31.7$ kVA

Giải theo mắc sao tương đương

Hình 2.13.
Mắc sao tương đương.



Từ Hình 2.13

$$\overline{Z}_Y = \frac{1}{3}(4 + j\,3)$$

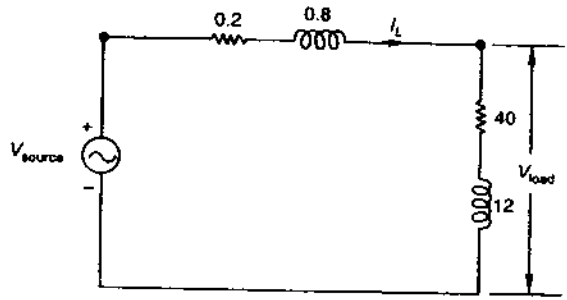
$$V_p = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8 \text{ V}$$

$$\overline{I}_L = \overline{I}_p = \frac{132.8\angle 0^0}{\frac{1}{3}(4 + j\,3)} = 79.6\angle -36.9^0$$

Từ đó có thể xác định các đại lượng còn lại

Ví dụ 2.2. Nguồn 3 - pha, 400V (điện áp đầu dây được giả thiết là không đổi, độc lập với tải) cung cấp cho tải với tổng trở mắc sao tương đương (40 + j12) Ω/ pha qua tổng trở tuyến truyền dẫn (0.2 + j0.8) Ω/ tuyến. Hãy tính:

a. Dòng điện tuyến.
b. Điện áp tải.
c. Công suất, công suất phản kháng và VA do tải tiêu thụ.
d. Tổn thất công suất và tổn thất công suất phản kháng trên tuyến.
e. Công suất, công suất phản kháng và VA do nguồn cung cấp.



Hình 2.14. *Mạch điện minh họa Ví dụ 2.2.*

Giải

Hình 2.14 minh họa mạch từng pha của hệ thống (trên cơ sở mắc sao)

$$V_{nguồn} = 400\sqrt{3} = 231 \text{ V}$$

$$\overline{Z}(\text{tổng}) = (0.2 + j\,0.8) + (40 + j\,12) = 40.2 + j\,12.8 = 42.2\angle 17.7^0$$

$$I_L = \frac{231}{42.2} = 5.47 \text{ A}$$

$$\overline{Z}_{tải} = 40 + j\,12 = 41.8\,\angle 16.7^0$$

$$V_{tải} = 5.47 \times 41.8 = 228.6 \text{ V (pha - trung tính)}$$
$$= 396 \text{ V (dây - dây)}$$

$$P_{tải} = 3 \times (5.47)^2 \times 40 = 3.59 \text{ kW}$$

$$Q_{tải} = 3 \times (5.47)^2 \times 12 = 1.077 \text{ kVAR}$$

$$S_{tải} = \sqrt{(3590)^2 + (1077)^2} = 3.748 \text{ kVA}$$

$$P_{Dây} = 3 \times (5.47)^2 \times 0.2 = 18 \text{ W}$$

$$Q_{Dây} = 3 \times (5.47)^2 \times 0.8 = 72 \text{ VAR}$$

$$P_{nguồn} = 3.59 + 0.018 = 3.608 \text{ kW}$$

$$Q_{nguồn} = 1.077 + 0.072 = 1.149 \text{ kVAR}$$

$$S_{nguồn} = \sqrt{(3.608)^2 + (1.149)^2} = 3.786 \text{ kVA}$$

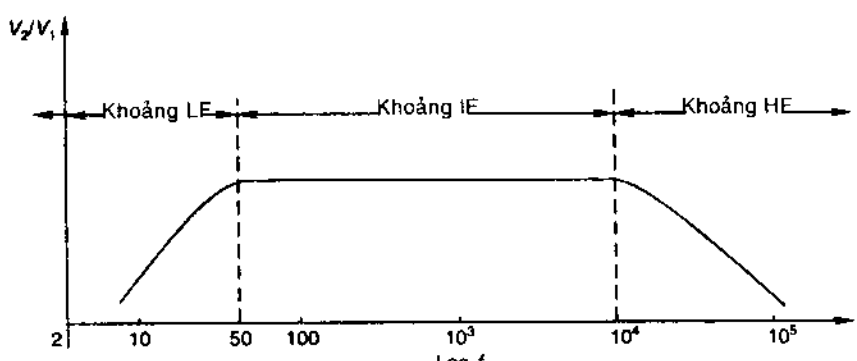
Phụ lục 3

Một số vấn đề về máy biến áp

Sự đáp ứng tần số

Trong các bộ khuếch đại điện tử, các máy biến áp được sử dụng ở tầng ra với tần số biến thiên trên khoảng rộng. Trong các ứng dụng tần số biến thiên, đáp ứng tần số của máy biến áp là rất quan trọng. Sự đáp ứng tần số là V_2/V_1 với V_1 và tải có tần số biến thiên. Sự đáp ứng tần số phẳng trên dải tần số là điều mong muốn. Biến thiên tương ứng của góc pha của điện áp tải (V_2) theo điện áp nguồn (V_1) là đáp ứng pha. Góc pha nhỏ là chấp nhận được.

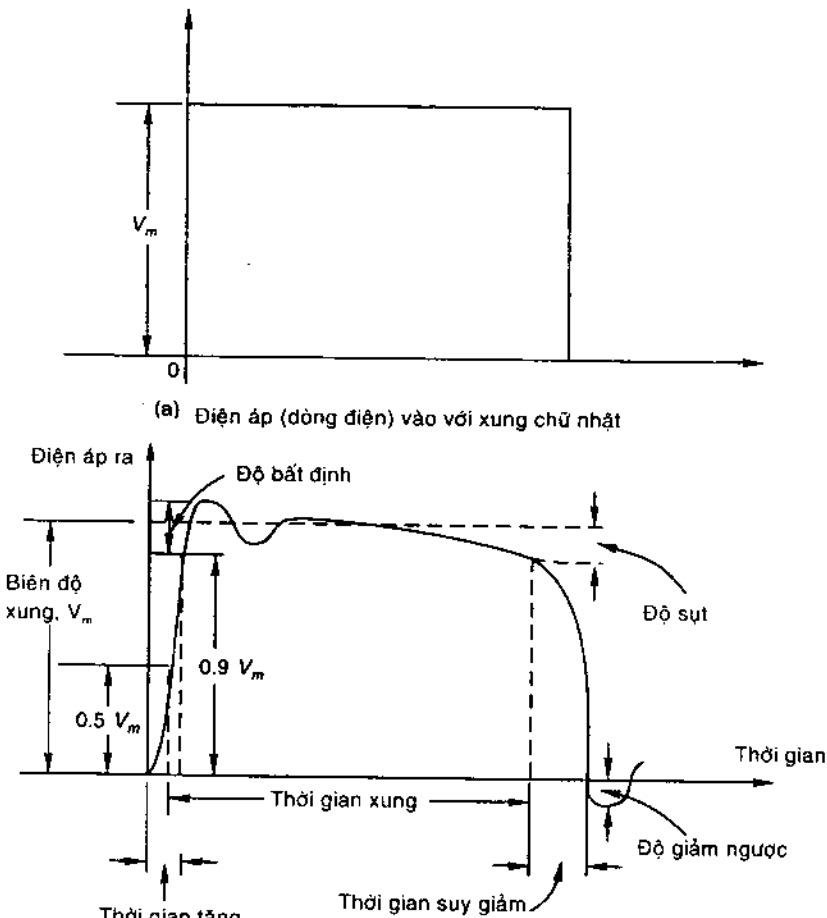
Khoảng tần số hoàn chỉnh có thể được chia làm 3 phần - khoảng tần số thấp (LF), tần số trung gian (IF), và tần số cao (HF). Máy biến áp được thiết kế để mạch tương đương là áp dụng được trong khoảng IF. Ở đây, điện kháng từ hóa của máy biến áp là lớn không ảnh hưởng đến tỷ số điện áp, các điện kháng nối tiếp của cuộn dây là đủ nhỏ để V_2/V_1 hầu như không đổi (Hình 3.1). Trong khoảng LF, máy biến áp lấy dòng điện từ hóa lớn, gây ra sự sụt điện áp lớn trong cuộn sơ cấp, V_2/V_1 giảm liên tục khi giảm tần số. Điện áp ra V_2 là zero đối với dc ($f = 0$). Trong khoảng HF, cần xét đến ảnh hưởng của các điện dung tinh chỉnh trung gian, tinh chỉnh. Các ảnh hưởng kết hợp của cảm kháng nối tiếp tăng và dung kháng song song giảm với sự tăng tần số làm cho điện áp giảm rõ rệt. Sự đáp ứng tần số của máy biến áp theo trục tần số logarit được minh họa trên Hình 3.1.



Hình 3.1 *Đáp ứng tần số (V2/V1 - log f) của máy biến áp.*

Các máy biến áp xung

Các máy biến áp được dùng trong các mạch xung hoặc digital được gọi là máy biến áp xung. Các máy này thường vận hành từ nguồn kích thích không liên tục, do đó phải tính đến điện dung phân phối của các cuộn biến áp



Hình 3.2. *Xung ra của máy biến áp xung.*

Đối với máy biến áp xung, công suất trung bình thường rất thấp, nhưng công suất đỉnh khá lớn. Tuy nhiên, hiện nay các máy biến áp xung công suất đỉnh thấp và trung bình đã được phát triển cho nhiều ứng dụng điện tử và điều khiển, chẳng hạn các mạch cổng của SCR. Điều quan trọng là máy biến áp tái tạo xung nhập (sóng chữ nhật) với mức chính xác tối đa có thể ở cuộn thứ cấp. Hình 3.2 a minh họa xung nhập sóng vuông. Chiều rộng xung này thay đổi đến 25μs và suy giảm hoàn toàn trước khi xung kế tiếp xuất hiện. Để tìm dạng sóng ra, cần phân tích sự chuyển tiếp. Hình 3.2 b minh họa xung ra tương ứng, khi biết các thông số biến áp xung.

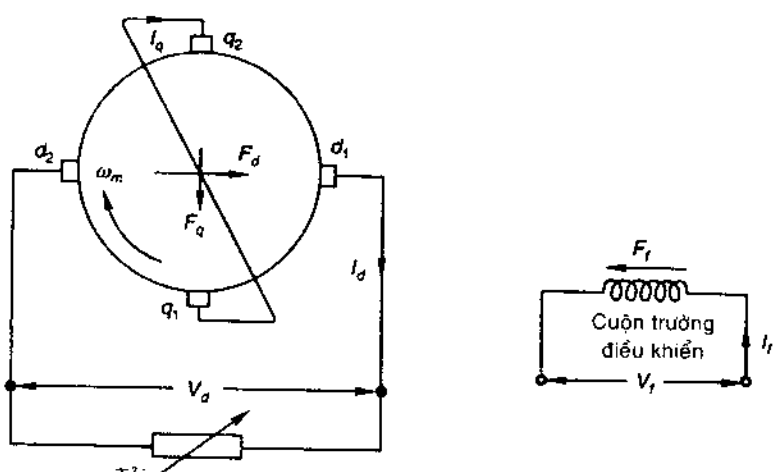
Sự phân tích được thực hiện bằng cách giải các phương trình vi phân sử dụng mạch tương đương của máy biến áp có điện dung. Khi có điện dung, các dao động thường được triệt tiêu. Cảm kháng rò rỉ được duy trì ở giá trị tối thiểu nếu cần thời gian dâng xung ở mức tối thiểu.

Các biến áp xung có kích cỡ nhỏ chỉ với vài vòng dây để giảm cảm kháng rò rỉ. Lõi biến áp là ferrites, hoặc hợp kim có độ thấm từ cao để đạt được điện cảm từ hóa cao. Do khoảng thời gian giữa các xung là dài so với thời gian xung, máy biến áp xung có thể có các mức công suất xung cao.

Phụ lục 4

Các máy trường xoay

Ở tầng ra của hệ thống điều khiển, tín hiệu điều khiển điện công suất thấp là cần thiết để điều khiển công suất điện lớn đối với ứng dụng công suất lớn. Hiện tại, các bộ khuếch đại công suất SCR đáp ứng tốt cho các yêu cầu này. Trước khi có các SCR, sự khuếch đại công suất lớn với các hằng thời gian liên quan tương đối thấp thường được thực hiện bằng các máy dc với từ trường ngang. Mặc dù, máy phát dc thông thường là bộ khuếch đại công suất - công suất trường nhỏ điều khiển công suất lớn ở các đầu dây phần ứng - nhưng ứng dụng công suất không đủ cao và sự đáp ứng không ổn định. Các máy trường xoay khắc phục các nhược điểm này của máy phát dc, có các cuộn dây trên trục d và q của stator, các cặp chổi than trên rotor tạo thành các trục q và d định hướng lực từ động sử dụng thế năng của máy dc. Các máy trường xoay có hai bộ chổi than cho một cặp cực. Do đó, chúng sử dụng lực từ động phần ứng để cung cấp sự kích thích và đạt được độ lợi công suất cao. Các máy trường xoay vận hành tương tự hai máy phát dc theo bậc được bố trí trong một khung máy. Có nhiều kiểu máy phát trường xoay.



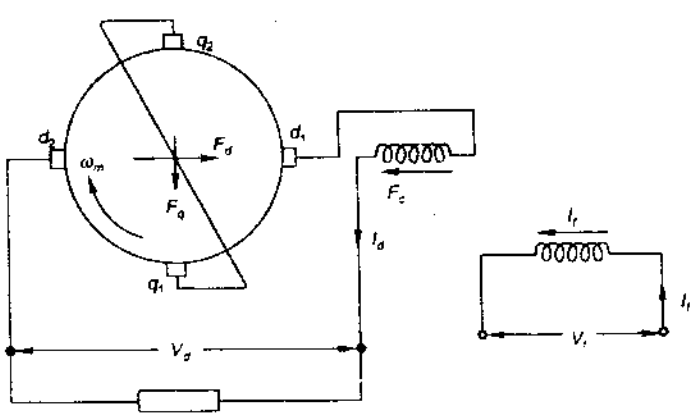
Hình 4.1 *Sơ đồ máy phát trường xoay có dòng điện không đổi*

Máy phát dc thông dụng được cải tiến thành máy trường xoay bằng cách có thêm một cặp chổi than ở trục d (Hình 4.1). Các chổi than trục q bị ngắn mạch, công suất ra là từ các chổi than trục d. Các cuộn trường điều khiển lực từ động, tạo ra lực điện động trục q làm cho dòng điện trục q ngắn mạch có thể hoạt động. Lực điện động trục q do đó được thiết lập sẽ cảm ứng lực điện động trục d làm cho dòng điện trục d đi qua tải. Lực điện động phản kháng trục d theo định luật Lenz, ngược với lực F_f. Đối với F_f và điện trở tải cho trước, hệ thống sẽ ổn định dẫn đến các giá trị không đổi của I_q và I_d. Sự tăng tải (giảm điện trở tải) làm tăng F_d, trung hòa thêm F_f, lực điện động trục d giảm, do đó ngăn cản sự tăng dòng điện tải. Đối với F_f cho trước (kích thích điều khiển) dòng điện ra của máy hầu như không đổi trong khoảng biến thiên tải tương đối rộng, nghĩa là máy này vận hành tương tự máy phát dòng điện không đổi.

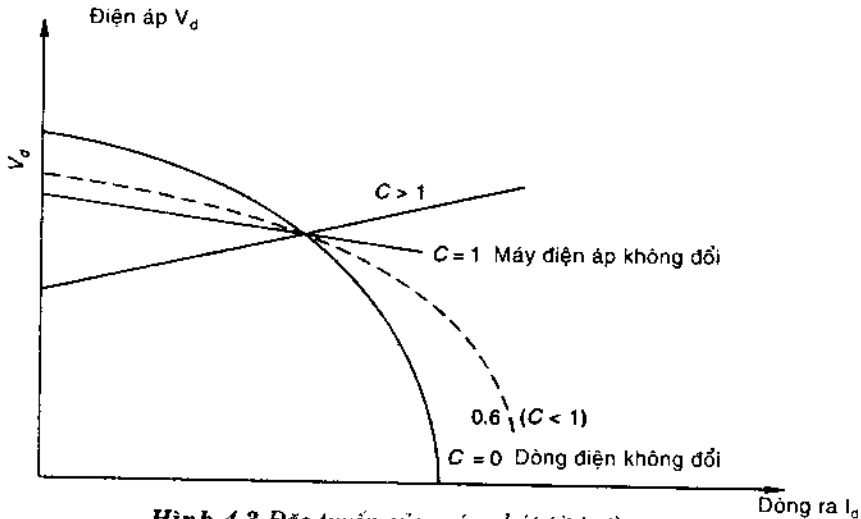
Để chuyển đổi máy phát dòng điện không đổi thành máy có điện áp không đổi, có công dụng lớn hơn, lực trục d phải được triệt tiêu bằng cuộn dây bù bố trí ở trục d trên stator (Hình 4.2). Dòng điện ra của trục d sẽ đi qua cuộn dây bù tạo thành lực điện động, F_c ngược chiều với lực điện động phần ứng của trục d. Tác dụng hồi tiếp của dòng điện tải bị giảm đến mức tối thiểu. Từ thông trục d chủ yếu phụ thuộc vào dòng điện cuộn trường, mở rộng khoảng điều khiển đối với từ thông trục d tổng. Do sự khác biệt về phân phối không gian của F_d và F_c, không thể trung hòa F_d một cách chính xác.

Theo định nghĩa

$$C = \frac{\text{Số vòng bù hiệu dụng}}{\text{Số vòng phần ứng hiệu dụng}}$$



Hình 4.2 *Sơ đồ máy phát trường xoay có điện áp không đổi*



Hình 4.3 *Đặc tuyến của máy phát từ trường xoay*

Tác dụng của hệ số bù C đối với đặc tuyến tải của máy được minh họa trên Hình 4.3. Đối với máy dòng điện không đổi, C = 0, đối với máy điện áp không đổi C = 1, do đó máy này có đặc tuyến tương tự máy phát kích thích riêng rẽ. Từ Hình 4.3 có thể thấy máy dòng điện không đổi không bao giờ vận hành bị hở mạch, và máy điện áp không đổi không bao giờ bị ngắn mạch.

Để tạo ra F_q cho trước với I_q nhỏ, cuộn dây trục q mắc nối tiếp thường được dùng trên stator của máy điện áp không đổi. Các dòng điện trục d và q đi qua phần ứng của máy biến áp không đổi thường tự triệt tiêu lẫn nhau, do đó làm tăng định mức của máy này. Điều này còn do sự khuếch đại công suất lớn (V_dI_d/ V_fI_f) trong khoảng 10^5.

Các máy điện áp không đổi được dùng để cung cấp sự khuếch đại công suất có điều khiển trong nhiều hệ thống điều khiển, chẳng hạn bộ điều áp trong hệ thống kích thích của máy phát dc lớn để tạo ra hoặc tăng điện áp nối tiếp với cuộn trường của bộ kích thích chính. Máy điện áp không đổi còn được dùng làm máy phát trong hệ thống điều khiển tốc độ hoặc vị trí. Trong các hệ thống điều khiển hiện đại, các chức năng này được thực hiện bằng mạch SCR.

Phụ lục 5

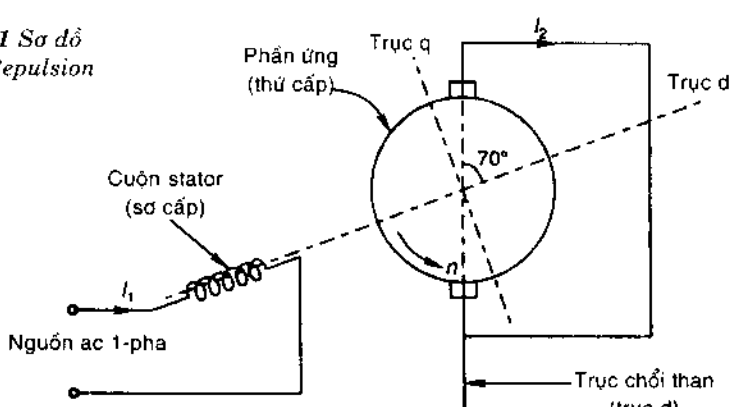
Các máy AC vành góp

Như phần đầu đã đề cập, động cơ cảm ứng có tốc độ không đổi trong khoảng vận hành, động cơ lồng sóc thường có moment khởi động thấp. Trong Chương 9, nhiều phương pháp thực hiện điều khiển tốc độ và bảo đảm moment khởi động tốt đã được trình bày. Giải pháp khác cho các vấn đề này là máy ac vành góp. Do thừa hưởng các vấn đề của sự góp ac, các động cơ ac vành góp chỉ được chế tạo với kích cỡ trung bình. Với việc sử dụng thyristor, tác dụng chuyển đổi tần số của vành góp được chuyển cho mạch SCR. Tuy các máy ac vành góp vẫn còn được sử dụng ở các cơ sở công nghiệp cũ, nhưng hiện nay hầu như không còn sử dụng.

Các nguyên lý và đặc tính cấu trúc cơ bản của hai máy ac vành góp - động cơ Repulsion (1 - pha), và động cơ Schrage (3 - pha) sẽ được trình bày dưới đây.

Động cơ Repulsion

Loại động cơ này tương tự động cơ dc nối tiếp với rotor được cấp năng lượng theo nguyên lý cảm ứng. Các rãnh stator chứa cuộn kích 1 - pha tương tự cuộn chính của động cơ cảm ứng 1 - pha. Rotor có cuộn dc phân phối được mắc với vành góp ở một đầu. Các chổi than ngắn mạch để có đường dẫn điện khép kín (Hình 5.1).



Hình 5.1 *Sơ đồ động cơ Repulsion*

Nếu các chổi than được bố trí ở trục d, lực điện động của máy biến áp trong cuộn phần ứng sẽ cực đại là sẽ có dòng ngắn mạch I_2, nhưng không có moment xuất hiện khi các trường rotor và stator thẳng hàng. Nếu các chổi than được đặt theo trục q, lực điện động biến áp trong phần ứng sẽ có tổng là zero, dòng điện $I_2 = 0$, và không có moment. Điều cơ bản là dòng điện phần ứng phải hoạt động và sự di chuyển góc phải hiện hữu giữa hai trường này, các chổi than được đặt theo vị trí trung gian tạo thành góc khoảng 70^0 với trục d. Để giảm tổn thất dây đồng, rotor chạy theo chiều định hướng với trục q, quay ngược chiều kim đồng hồ với các chổi than di chuyển từ trục d (Hình 5.1). Điều này xuất hiện tương tự sự đẩy giữa hai trường. Chiều quay sẽ đảo ngược nếu các chổi than di chuyển theo hướng ngược lại trên trục d.

Động cơ Repulsion bình thường có đặc tuyến tốc độ - moment tương tự động cơ ac mắc nối tiếp, moment khởi động cao và có xu hướng quá tốc độ khi tải nhẹ.

Động cơ Repulsion - cảm ứng

Nguyên lý Repulsion thường được sử dụng để có moment khởi động cao khi dòng điện khởi động tương đối thấp. Khi máy được gia tốc đến gần vận tốc vận hành, có thể được chuyển thành động cơ cảm ứng 1 - pha để cung cấp các đặc tuyến chạy với tốc độ hầu như không đổi. Điều này có thể đạt được, nếu, cùng với cuộn góp phía ngoài, rotor có cuộn lồng sóc bên trong. Các moment xuất hiện và được cộng với nhau. Loại động cơ được gọi là *động cơ Repulsion - cảm ứng*. Khi khởi động, dòng điện ở lồng sóc bị giới hạn do điện trở tương đối cao và cuộn vành góp tạo phần moment chính, nhưng trong các điều kiện vận hành, moment ở lồng sóc sẽ tăng lên, bù cho sự giảm trên đặc tuyến tốc độ - moment của cuộn vành góp.

Động cơ khởi động Repulsion, vận hành cảm ứng

Vận tốc không đổi và moment khởi động cao có thể đạt được trong động cơ Repulsion bằng cách cung cấp thiết bị vận hành bằng lực ly tâm để làm ngắn mạch tất cả các đoạn của vành góp khi động cơ gia tốc đến một nửa tốc độ vận hành. Điều kiện ngắn mạch này tạo ra sự tương đương động cơ lồng sóc khi vận hành ở tốc độ bình thường.

Các động cơ này rất thích hợp cho những khu vực hẻo lánh, sử dụng các đường dây tải điện dài, 1 - pha, do moment khởi động cao mà không đòi hỏi dòng điện lớn, tốc độ vận hành hầu như không đổi trong khoảng moment rộng. Hiện nay, loại động cơ này đã được thay thế bằng động cơ cảm ứng một pha, hai tụ điện.

Động cơ vành góp 3 - pha

Nguyên lý

Quan hệ moment - trượt của động cơ cảm ứng là

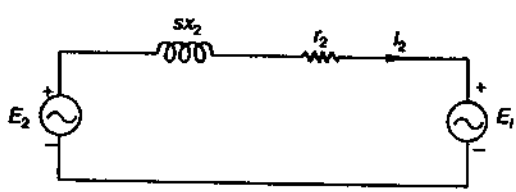
$$T = \frac{3\, I_2^2\, r_2}{s\, \omega_s} \tag{5.1}$$

Đối với moment cho trước, độ trượt được điều khiển bằng $I_2^2\, r_2$, tổn thất dây đồng ở rotor, hoặc công suất điện bị lấy khỏi (hoặc cung cấp cho) mạch rotor. Điều này có thể đạt được một cách hiệu quả bằng cách cung cấp lực điện động độ trượt - tần số cho mạch rotor (Hình 5.2). Quan hệ moment - độ trượt từ pt (5.1) được tổng quát hóa theo

$$T = \frac{3\,(I_2^2\, r_2 \pm E_i I_2 \cos\phi_2)}{s\, \omega_s} \tag{5.2}$$

$$s\overline{E}_2 \pm \overline{E}_i = \overline{I}_2 \overline{Z}_2$$

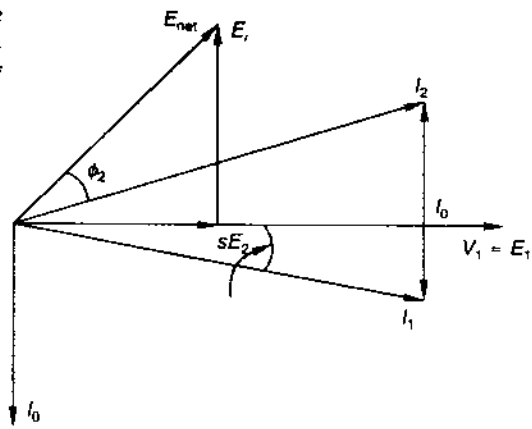
$$\overline{I}_2 = \frac{s\overline{E}_2 \pm \overline{E}_i}{\overline{Z}_2} \tag{5.3}$$



Hình 5.2 *Sự điều khiển độ trượt bằng cách cung cấp lực điện động độ trượt - tần số cho mạch rotor*

Khi lực điện động này, E_i, đồng pha với lực điện động cảm ứng rotor, sE_2, công suất điện $E_2\, I_2 \cos\phi_2$ được lấy ra khỏi mạch rotor và dấu cộng được dùng trong pt (5.2). Mặt khác, khi E_i đối pha với sE_2, công suất điện $E_2 I_2 \cos\phi_2$ được đưa vào mạch rotor và dấu trừ được dùng trong pt (5.2). Từ pt (5.2) có thể thấy, đối với moment cho trước, giả sử dòng điện rotor I_2 hầu như không đổi, độ lớn của E_i đồng pha sẽ tăng, độ trượt tăng (tốc độ giảm). Khi pha của E_i đảo ngược, và E_i tăng, tử số trong pt (5.2) sẽ có dấu âm, xuất hiện độ trượt, nghĩa là sẽ đạt được tốc độ đồng bộ. Nếu pha của lực điện động cung cấp thay đổi với độ lớn của E_i không đổi, có thể đạt được sự điều khiển đối với hệ số công suất dòng điện rotor và dòng điện sơ cấp. Góc sớm pha của E_i sẽ cải thiện hệ số công suất. Điều này được minh họa trên Hình 5.3 khi E_i sớm pha 90^0 so với sE_2.

Hình 5.3 Điều khiển hệ số công suất bằng cách cung cấp lực điện động cho rotor



Sự phát sinh emf độ trượt - tần số

Do lực điện động cung cấp phải có tần số trượt, bộ chuyển đổi công suất với tần số (và điện áp) biến thiên là cần thiết để trao đổi công suất điện với các thiết bị tần số cố định. Điều này cho phép duy trì hiệu suất cao cho toàn bộ hệ thống.

Hiện nay, điều này được thực hiện bằng các bộ chuyển đổi tần số sử dụng thyristor. Sự sắp xếp theo kiểu cũ được dùng cho mục đích này là vành góp. Nguyên lý chuyển đổi tần số tổng quát hóa bằng vành góp được giải thích dưới đây (Hình 5.4).

Phần ứng dây quấn dc chạy với tốc độ n v/ph, các cực máy quay theo chiều ngược lại với tốc độ $n_{trượt}$ v/ph so với các chổi than cố định (Hình 5.4). Tần số của lực điện động cảm ứng trong phần ứng (rotor) là

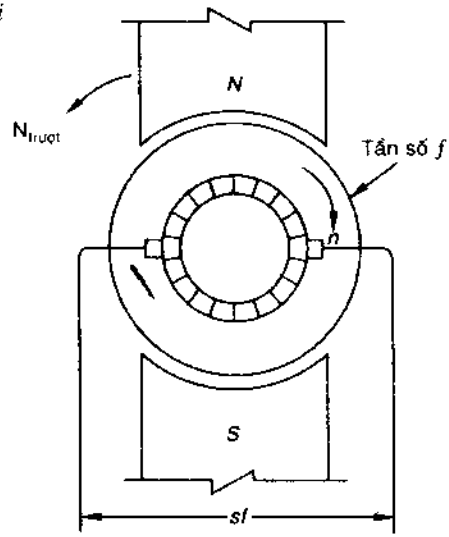
$$f = \frac{(n + n_{trượt})P}{120} = \frac{n_s P}{120} \qquad (5.4)$$

Nếu các trục là cố định, lực điện động xuất hiện ở các chổi than phải là dc. Đối với mỗi vòng quay của các cực, emf của các chổi than không đi hết một vòng. Nói chung, tần số của lực điện động ở các chổi than phải là

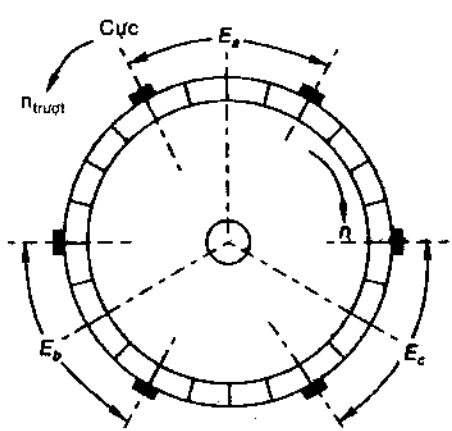
$$f_{chổi\ than} = \frac{n_{trượt}P}{120} = \left(\frac{n_{trượt}}{n_s}\right)f = sf \qquad (5.5)$$

Do đó, tần số lực điện động trong phần ứng tương ứng tốc độ tương đối của các cực so với phần ứng này, nghĩa là $n_s = n + n_{trượt}$, và tại chổi than sẽ tương ứng $n_{trượt}$.

Hình 5.4 Sự chuyển đổi tần số tổng quát hóa



Nếu $n_s = n + n_{trượt}$ được giữ không đổi, số vòng quay của lực điện động/ vành góp sẽ giữ không đổi đối với từ thông/ cực cố định. Độ lớn lực điện động ở chổi than có thể thay đổi bằng cách nối số lượng vành góp thích hợp để điều chỉnh đối xứng các chổi than - di chuyển cả hai chổi than theo góc bằng nhau, lại gần hoặc ra xa nhau. Pha của lực điện động chổi than có thể thay đổi bằng cách di chuyển cả hai chổi than theo cùng góc và cùng chiều.



Hình 5.5 Các lực điện động 3 - pha được nối từ bộ chuyển đổi tần số tổng quát

Tập hợp các lực điện động ba pha cân bằng có độ lớn điều chỉnh được sẽ được nối từ vành góp bằng cách đặt ba cặp chổi than dịch chuyển (Hình 5.5).

Động cơ Schrage

Phương pháp nhận được lực điện động độ trượt - tần số và đưa vào phần thứ cấp của động cơ cảm ứng nêu trên được phối hợp trong một máy có tên là động cơ Schrage. Về cơ bản, đây là động cơ cảm ứng 3 - pha đảo ngược với cuộn sơ cấp trên rotor và cuộn thứ cấp trên stator. Trường khe không khí tổng sẽ chạy với tốc độ đồng bộ n_s ứng với rotor chạy với tốc độ n theo chiều ngược lại khi cuộn stator bị ngắn mạch. Do đó, trường này chạy với tốc độ trượt theo dòng điện tần số trượt cảm ứng stator trong đó sẽ tạo ra moment. Rotor còn có cuộn dc trong cùng các rãnh như các dây dẫn sơ cấp, nhưng được đặt gần miệng rãnh hơn. Điều này sẽ làm giảm điện cảm rò rỉ của các cuộn dc. Cuộn dc được gọi là cuộn thứ ba hoặc *cuộn điều chỉnh*. Cuộn này được nối với vành góp trên đó có ba cặp chổi than di động để lấy các lực điện động 3 - pha cung cấp cho cuộn thứ cấp (stator), điều khiển tốc độ và hệ số công suất. Do từ trường quay di chuyển với tốc độ trượt ($n_{trượt}$), tần số của lực điện động chổi than luôn luôn là tần số trượt. Sơ đồ của động cơ Schrage 2 - cực được nêu trên Hình 5.6

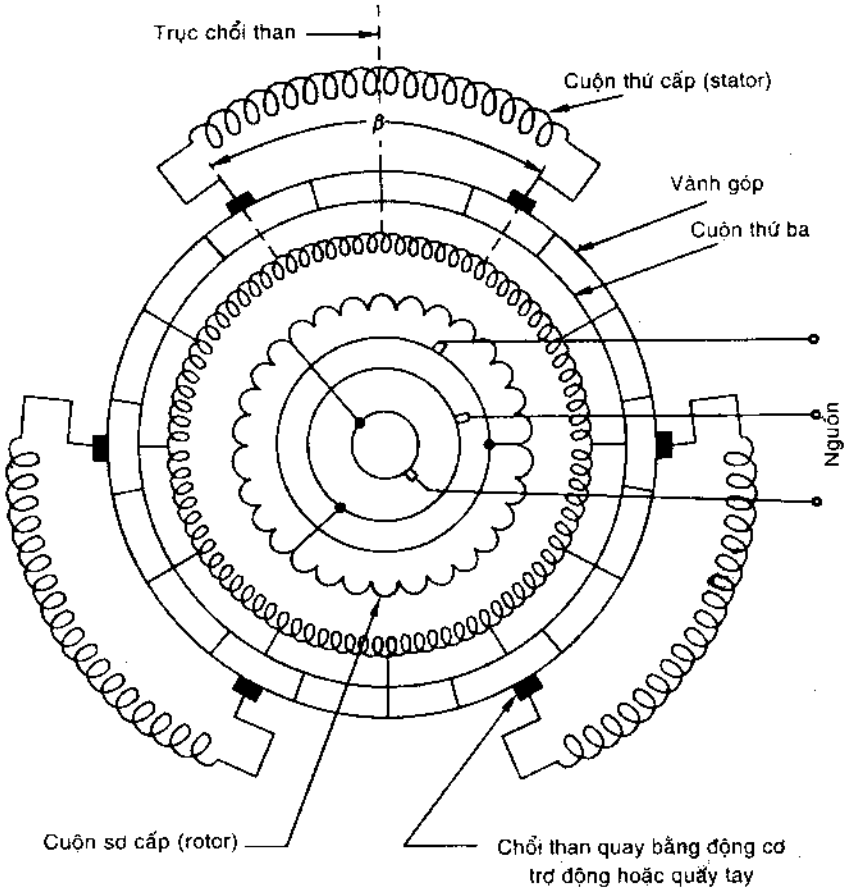
Bằng cơ cấu bánh răng thích hợp, các cặp chổi than có thể di chuyển tới lui theo cả hai chiều cung cấp sự điều khiển cơ học đối với cường độ và pha của lực điện động do đó đạt được sự điều khiển tốc độ và hệ số công suất của động cơ.

Khi các chổi than di chuyển sao cho lực điện động ngược với dòng điện thứ cấp, tốc độ sẽ giảm (độ trượt dương), và ngược lại sẽ làm tăng tốc độ, khi độ trượt âm. Khi các chổi than ở trên cùng một đoạn của vành góp, nghĩa là góc ngăn cách chổi than là zero, cuộn thứ cấp bị ngắn mạch và động cơ chạy theo độ trượt tương tự động cơ cảm ứng đảo ngược. Đối với góc ngăn cách chổi than β, tốc độ không tải của động cơ là

$$n \approx n_s (1 - C \sin 0.5 \beta) \qquad (5.6)$$

trong đó C là hằng, có giá trị phụ thuộc vào tỷ số vòng dây của cuộn vành góp rotor và stator, β là góc ngăn cách chổi than. Đối với góc chổi than cho trước, hệ số công suất của động cơ có thể điều khiển bằng cách dịch chuyển từng chổi than của cặp chổi than theo cùng chiều. Sự khởi động có thể bị ảnh hưởng do sự chuyển đổi trực tiếp với góc chổi than 180^0 điện, nghĩa là một bước cực, đến vị trí tốc độ thấp nhất (lực điện động ngược với dòng điện rotor).

Tốc độ động cơ có thể thay đổi từ 0.4 n_s đến 1.4 n_s. Hiệu suất của máy khi có tải hơi thấp hơn so với động cơ cảm ứng, do máy Schrage có thêm các thành



Hình 5.6 *Sơ đồ động cơ Schrage 2 - cực*

phần ở dạng vành góp và chổi than, làm tăng tổn thất trong cuộn thứ ba. Các vấn đề về vành góp và khảo sát thiết kế giới hạn công suất ra trong khoảng 25 kW/ cực và đặt cuộn sơ cấp trên rotor làm cho điện áp cung cấp không được phép quá 600V. Động cơ này được dùng làm bộ truyền động moment không đổi và công suất thay đổi trực tiếp với tốc độ, thường dùng cho máy in ấn, máy xeo giấy, cần trục, máy dệt, ...

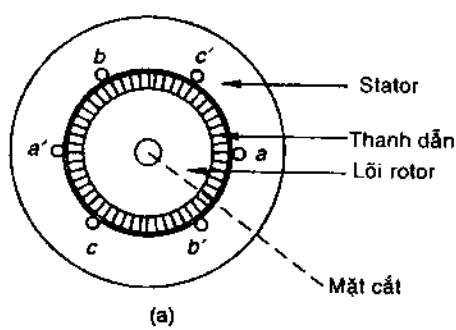
Phụ lục 6

Động cơ cảm ứng tuyến tính (LIM)

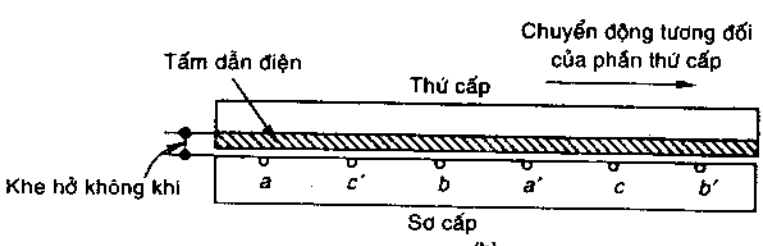
Động cơ cảm ứng tuyến tính (LIM) tạo ra sự chuyển động tuyến tính có nhiều cấu hình khác nhau. Ở đây sẽ trình bày cấu hình phổ biến nhất của loại động cơ này.

Cấu hình

LIM là phiên bản của động cơ cảm ứng hình trụ. Nếu động cơ cảm ứng cơ bản (Hình 6.1 a) được cắt theo trục và khai triển trên mặt phẳng (Hình 6.1 b) sẽ tương ứng LIM. Mạch từ tương ứng được nêu trên Hình 6.2 b. Dây thứ cấp ở dạng tấm, khe không khí lớn hơn so với động cơ cảm ứng bình thường do dây thứ cấp làm mở rộng khe không khí. Khe không khí của LIM khoảng 25mm còn động cơ cảm ứng hình trụ có khe này khoảng 1mm.

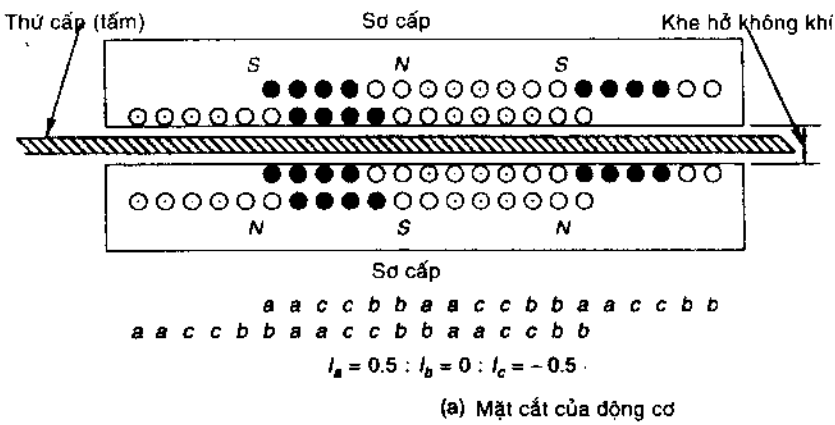


Hình 6.1 *Phiên bản tuyến tính của động cơ cảm ứng quay lồng sóc.*

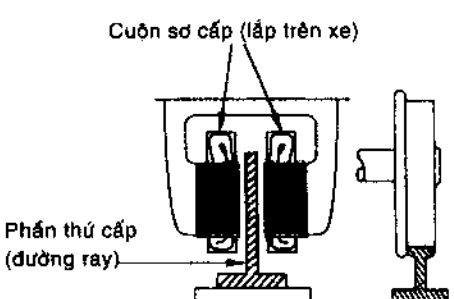


Trường khe không khí dịch chuyển tuyến tính theo chiều (acb) (giả sử thứ tự pha là abc). Các dòng cảm ứng trong tấm thứ cấp tương tác với trường này tạo ra lực kéo do đó sẽ chuyển động theo chiều chuyển động của trường (Hình 6.1 b). Khác với động cơ hình trụ, LIM có tính không liên tục ở phần cuối. Khi trường này đến đầu cuối (theo chiều chuyển động), sẽ giảm đến zero, trường mới sẽ xuất hiện ở đầu kia. Quá trình tăng và giảm của trường gây ra dòng điện cảm ứng trong tấm thứ cấp, không đóng góp vào lực kéo chỉ gây ra tổn thất tổng trở cho động cơ. Cả phần sơ cấp và thứ cấp đều có thể chuyển động. Phần tĩnh tại phải liên tục suốt chiều dài hành trình.

Lực hút từ tính giữa các thành phần này, có thể cân bằng trong máy quay nhưng không thể cân bằng trong máy phẳng trừ khi sử dụng kết cấu kiểu hai mặt (Hình 6.2 a), trong đó cuộn ba pha, hai lớp ở một trong hai phía của phần



(a) Mặt cắt của động cơ



(b) LIM kiểu kéo

Hình 6.2 *LIM với phần sơ cấp hai mặt*

thứ cấp. Kết cấu này thường được chấp nhận khi cần lực kéo với các phần sơ cấp chiều dài hữu hạn được thực hiện trên xe và phần thứ cấp có dạng thanh dẫn điện liên tục (Hình 6.2 b).

Hiệu suất

Tốc độ

Trong một chu kỳ của tần số cung cấp (f) trường dịch chuyển theo khoảng cách bằng hai bước cực (2τ). Tốc độ đồng bộ của trường này được tính theo

$$v_s = 2\tau f \text{ m/s} \tag{6.1}$$

Cũng như nguyên lý cảm ứng, phần sơ cấp dịch chuyển theo chiều ngược với trường và phần thứ cấp được giữ cố định (trên thanh dẫn) với tốc độ v, sao cho độ trượt được tính theo

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \tag{6.2}$$

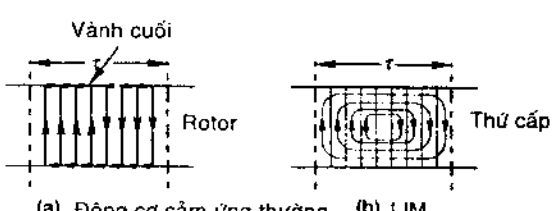
Từ pt (6.1), tốc độ đồng bộ không được điều khiển theo số cực, tốc độ tuyến tính bất kỳ có thể đạt được bằng cách điều chỉnh bước cực. Ví dụ, với $\tau = 1$m

$$v_s = 2 \times 50 = 100 \text{ m/ s}$$

nghĩa là các tốc độ kéo có thể đạt được dễ dàng. Có thể thấy, động cơ có số cực chẵn hoặc lẻ để đạt được tốc độ mong muốn.

Điện trở thứ cấp và đặc tuyến F - v

Hình 6.3 minh họa các đường dẫn dòng điện thứ cấp qua một bước cực của động cơ cảm ứng bình thường và LIM. Lực kéo tới được tạo ra bằng đường dẫn dòng điện thẳng đứng còn các đường dẫn ngang tạo ra lực kéo bên, theo hướng ngược với phần trên và dưới của phần thứ cấp, các đường này triệt tiêu lẫn



Hình 6.3 *Phân bố dòng điện thứ cấp*

Hình 6.4 *Đặc tuyến F - v*

nhau. Dễ dàng nhận thấy, chiều dài tổng của các đường dẫn tạo ra moment trong động cơ cảm ứng bình thường lớn hơn so với LIM. Do đó, năng lượng tiêu tán ở dạng tổn thất điện trở tăng không tạo ra công suất cơ học tương ứng. Do vậy, LIM có điện trở động cơ lớn hơn, vận hành với độ trượt lớn ở lực kéo cho trước và do đó hiệu suất thấp hơn. Đặc tuyến F - v (Hình 6.4), cho thấy ảnh hưởng của điện trở cao ở phần thứ cấp.

Mạch tương đương

LIM khác với động cơ cảm ứng bình thường theo các điểm sau:

- LIM có khe không khí lớn (Hình 6.2 a)
- LIM có sự gián đoạn trường ở hai đầu
- Có điện trở rotor cao

Mạch tương dương của động cơ cảm ứng bình thường áp dụng với các chú ý sau:

- Khe hở không khí lớn nghĩa là điện kháng từ hóa thấp (do đó dòng điện từ hóa cao và hệ số công suất thấp)
- Cảm kháng rò rỉ thứ cấp cao do sự phân phối dòng thứ cấp (Hình 6.3b), phần lớn dòng điện không nối kết qua toàn bộ từ thông khe hở không khí
- Điện trở rotor cao

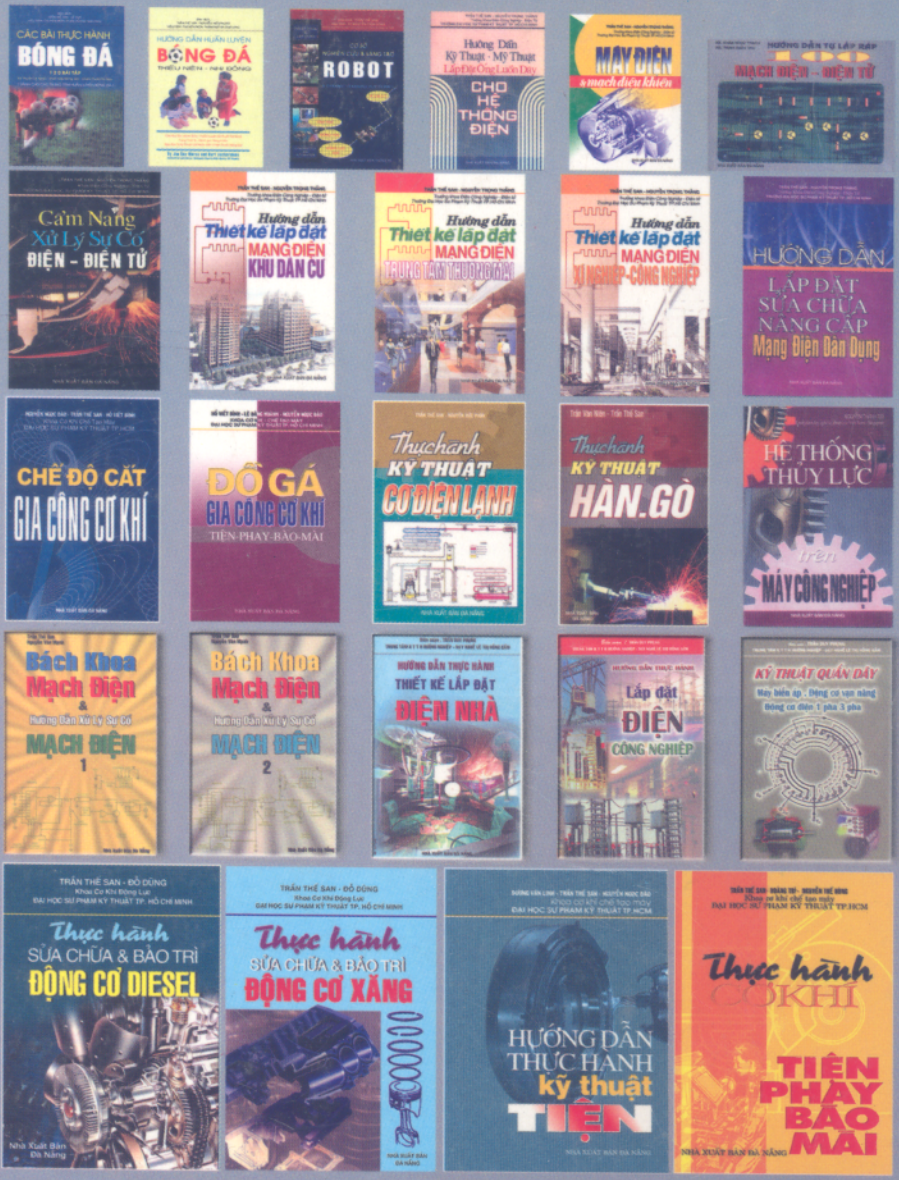
Phụ lục 7

Bảng chuyển đổi đơn vị

Đại lượng	*Đơn vị SI*	*Đơn vị Anh*	*Đơn vị CGS*
Chiều dài	1m	3.281 ft = 39.37 in	100 cm
Khối lượng	1kg	2.205 lb (mass)	1000 gm
Lực	1 N	0.2248 lb	10^5 dynes
Moment	1 Nm	0.738 ft-lb	10^7 dyne cm
Năng lượng	1 J = 1 Ws	0.738 ft-lb	10^7 ergs
Công suất	1 W	1.341×10^{-3}hp	
Moment tuyến tính	1 kgm^2	13.73 $lb\text{-}ft^2$	10^7 g cm^2
Từ thông	1 Wb	10^8 lines	10^8 maxwells
Mật độ từ thông	1 Wb/m^2 = 1T	64.5 kilo lines/in^2	10^4 gauss
Cường độ từ trường	1 A/m	0.025 A/in	0.004π oersted

MỤC LỤC

- MỜI CÁC BẠN TÌM ĐỌC -



- Nơi Phát Hành -

HIỆU SÁCH NGUYỄN TRÃI
4A - Ng Trãi - Q5 - Tp. HCM
ĐT: 8 383 669 - 9 971 765
Email: khanhduy@saigonnet.vn

GIÁ: 87 000đ