

Mô phỏng hệ thống điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất trong phòng thí nghiệm

■ TS. PHẠM TÂM THÀNH; ThS. VŨ NGỌC MINH
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT: Bài báo nghiên cứu cấu trúc hệ thống điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất gồm 4 bộ biến đổi: Bộ chỉnh lưu cầu một pha, bộ chỉnh lưu cầu ba pha, bộ nghịch lưu một pha, bộ nghịch lưu ba pha và phát triển 4 mô hình mô phỏng 4 bộ biến đổi điện tử công suất dựa trên phần mềm PSIM. Các kết quả mô phỏng thể hiện tính chính xác và hiệu quả của mô hình được xây dựng. Các kết quả nghiên cứu của bài báo là cơ sở cho việc triển khai chế tạo các bộ biến đổi điện tử công suất trong phòng thí nghiệm phục vụ công tác đào tạo nguồn nhân lực ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.

TỪ KHÓA: Bộ biến đổi, chỉnh lưu một pha, chỉnh lưu ba pha, nghịch lưu một pha, nghịch lưu ba pha

ABSTRACT: The paper investigates the structure of a system of electronic power inverter with 4 converters single-phase bridge rectifier, three-phase bridge rectifier, single-phase inverter, three-phase inverter and develop 4 simulation models of 4 power electronic converters based on PSIM software. The simulation results show the accuracy and efficiency of the model being built. The research results of the paper are the basis for the deployment of manufacturing electronic power converters in laboratories for human resource training in control and automation technology.

KEYWORDS: Converters, single-phase rectifiers, three-phase rectifiers, single-phase inverters, three-phase inverters

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các bộ biến đổi điện tử công suất sử dụng rất phổ biến trong công nghiệp nói chung và trong ngành GTVT nói riêng: bộ biến đổi AC/DC, DC/DC, DC/AC trong các cấu trúc, cần trục... vận hành tại các cảng biển, các bộ biến đổi AC/DC trong hệ thống tàu điện trên cao...

Các bộ biến đổi điện tử công suất có thể phân thành hai loại: bộ biến đổi điện tử công suất dùng cho tải một chiều, bộ biến đổi điện tử công suất dùng cho tải xoay chiều.

Ở các trường đại học ở Việt Nam và trên thế giới cũng có một số hệ thống thực hành, thí nghiệm các bộ biến đổi điện tử công suất. Tuy nhiên, các hệ thống này không thực sự linh hoạt, là các hệ thống kín, không thể can thiệp được phần mềm điều khiển (firmware). Các hệ thống này không đáp ứng được yêu cầu đào tạo đặc thù tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam. Để có thể chủ động công nghệ và có thể phục vụ cho công tác nghiên cứu khoa học, thực nghiệm để công bố các bài báo khoa học uy tín thì cần thiết phải xây dựng hệ thống thực nghiệm điều khiển các bộ biến đổi điện tử công suất.

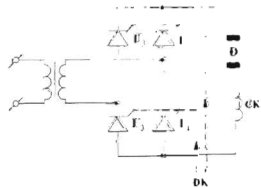
Một số hệ thống biến đổi điện tử công suất đã được nhóm tác giả nghiên cứu, chế tạo bước đầu và đã có một số công trình công bố [1-4], đó là các hệ thống nghịch lưu DC/AC, hệ thống chỉnh lưu AC/DC, các hệ thống này cần được tiếp tục hỗ trợ đầu tư và nghiên cứu để hoàn thiện.

Hiện nay, ở các nước tiến tiến, nhiều công trình nghiên cứu về bộ biến đổi điện tử công suất chỉnh lưu AC/DC [7,11,13] và bộ nghịch lưu [5,6,8,9,10,12,14], các công trình này chủ yếu nghiên cứu phát triển cấu trúc điều khiển. Bài báo tập trung xây dựng mô hình mô phỏng các bộ biến đổi điện tử công suất phục vụ đào tạo và nghiên cứu khoa học. Để có cơ sở chế tạo thành công hệ thống điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất, các tác giả đã tiến hành tính toán mô phỏng để kiểm nghiệm tính toán thiết kế.

2. CẤU TRÚC VÀ THÔNG SỐ CỦA CÁC BỘ BIẾN ĐỔI ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT

2.1. Bộ chỉnh lưu một pha

Sơ đồ cấu trúc chỉnh lưu cầu một pha như Hình 2.1.



Hình 2.1: Sơ đồ mạch chỉnh lưu cầu một pha
Thông số kỹ thuật của bộ chỉnh lưu cầu một pha được đưa ra trong Bảng 2.1.

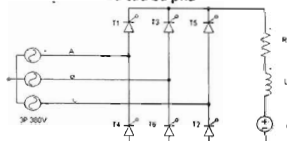
Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật của bộ chỉnh lưu một pha

STT	Thông số	Đơn vị
1	Nguồn cấp	220V~240V
2	Điện áp định mức tải	300VDC
3	Công suất tải	0,5~2,2 kW
4	Tần số đầu vào	47 ~ 63Hz
5	Hiệu suất	92%
6	Công suất tải	2,2 kW
7	Điện áp ra	0-310 V
8	Chế độ điều khiển	Theo pha

2.4. Bộ nghịch lưu ba pha

Hình 2.4: Sơ đồ nguyên lý mạch nghịch lưu ba pha
Bảng 2.4. Thông số kỹ thuật của bộ nghịch lưu ba pha

2.2. Bộ chỉnh lưu cầu ba pha



Hình 2.2: Sơ đồ cấu trúc cầu chỉnh lưu ba pha
Bảng 2.2. Thông số bộ chỉnh lưu ba pha

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Nguồn cấp	1P, 520VDC
2	Hệ số công suất	0,85
3	Tần số điều biến tần nhất	10kHz
4	Tần số đầu ra	0-200Hz
5	Hiệu suất	90%
6	Công suất tải	2,2 kW
7	Điện áp ra	0-380 VAC
8	Chế độ điều khiển	PWM, vector

STT	Thông số	Đơn vị
1	Nguồn cấp	3P, 380V
2	Điện áp định mức	500V
3	Công suất tải	0,5~2,2 kW
4	Tần số đầu vào	47 ~ 63Hz
5	Hiệu suất	92%
6	Công suất tải	2,2kW
7	Điện áp ra	0-519 V
8	Chế độ điều khiển	Theo pha

3. MÔ PHỎNG CÁC BỘ BIẾN ĐỔI ĐIỆN TỬ CÔNG SUẤT

2.3. Bộ nghịch lưu một pha



Hình 2.3: Nguyên lý nghịch lưu áp cầu một pha
Bảng 2.3. Thông số kỹ thuật tải và nguồn cấp mạch nghịch lưu một pha

Các bộ biến đổi điện tử công suất được mô phỏng sử dụng phần mềm PSIM. PSIM do hãng Powersim Inc sản xuất, là phần mềm chuyên dụng cho thiết kế và mô phỏng điện tử công suất, điều khiển động cơ, mô phỏng các hệ thống động lực. PSIM là một phần mềm dễ sử dụng, giao diện đơn giản, thân thiện dễ thao tác, tốc độ mô phỏng nhanh. PSIM được thiết kế để mô phỏng được cả tín hiệu tương tự và tín hiệu số, khả năng phân tích dạng sóng và phân tích nhiệt tốt. PSIM là công cụ mô phỏng mạnh mẽ cho việc phân tích các bộ biến đổi điện tử công suất, thiết kế vòng điều khiển hở và kín, phù hợp để mô tả các hệ thống truyền động điện.

STT	Thông số	Đơn vị
1	Nguồn cấp	1P, 310V
2	Tần số điều biến	10kHz
3	Hệ số công suất	0,85
4	Tần số đầu ra	0-200Hz
5	Hiệu suất	92 %
6	Công suất tải	2,2 kW
7	Điện áp ra	0-220 VAC
8	Chế độ điều khiển	PWM

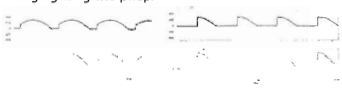
Trong phần này, các tác giả tập trung thiết kế mô phỏng hoạt động của 4 bộ biến đổi điện tử công suất: chỉnh lưu một pha, chỉnh lưu ba pha, nghịch lưu một pha, nghịch lưu ba pha từ đó kiểm nghiệm, đánh giá hoạt động của các bộ biến đổi. Kết quả mô phỏng sẽ giúp tính toán, hiệu chỉnh tham số của các linh kiện trước khi chế tạo thực nghiệm.

3.1. Mô phỏng bộ chỉnh lưu một pha

3.1.1. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 30^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0,5\text{mH}$, $C = 200\mu\text{F}$.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.1a. Dễ dàng nhận thấy dòng điện và điện áp qua van nằm trong ngưỡng cho phép.



a) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 30^\circ$ b) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 90^\circ$
Hình 3.1: Đặc tính dòng, áp trong trường hợp tải thuần trở

3.1.2. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 90^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0,5\text{mH}$, $C = 200\mu\text{F}$.

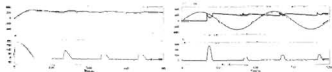
Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.1b.

Bộ nghịch lưu một pha được thiết kế để vận hành trong phòng thí nghiệm. Nguồn cấp cho mạch nghịch lưu một pha lấy từ bộ chỉnh lưu cầu thyristor một pha. Các thông số kỹ thuật được trình bày trên Bảng 2.3.

Để dàng nhận thấy dòng điện và điện áp qua van nằm trong ngưỡng cho phép.

3.1.3. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 0^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0,5\mu\text{H}$, $C = 200\mu\text{F}$.



a) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 0^\circ$ b) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 120^\circ$

Hình 3.2: Đặc tính dòng áp trong trường hợp tải thuần trở

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.2a. Dòng điện ban đầu có giá trị rất lớn $I = 183\text{ A}$, tuy nhiên giá trị này vẫn trong dải làm việc cho phép của van.

3.1.4. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 120^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0,5\mu\text{H}$, $C = 200\mu\text{F}$, $R_{\text{van}} = 0,5$

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.2b.

Với điều kiện xét đến điện trở nội của van và đường dây. Dòng điện ban đầu có giá trị rất lớn $I = 293\text{ A}$, giá trị này vẫn trong dải làm việc cho phép của van.

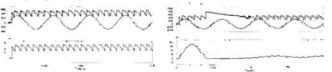
3.2. Mô phỏng bộ chỉnh lưu cầu ba pha

3.2.1. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 30^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0\mu\text{H}$, $C = 0\mu\text{F}$.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.3a.

Để dàng nhận thấy dòng điện và điện áp qua van nằm trong ngưỡng cho phép, đúng với những tính toán.



a) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 30^\circ$ b) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 30^\circ$ có lọc LC

Hình 3.3: Đặc tính dòng, áp trong trường hợp tải thuần trở

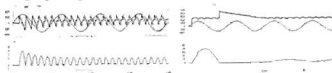
Khi kết hợp mạch lọc LC xảy ra hiện tượng quá áp đầu ra trong một khoảng thời gian ngắn, giá trị điện áp vẫn trong dải cho phép (Hình 3.3b).

3.2.2. Trường hợp tải thuần trở góc điều khiển $\alpha = 90^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0\mu\text{H}$, $C = 200\mu\text{F}$.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.4a.

Để dàng nhận thấy dòng điện và điện áp qua van nằm trong ngưỡng cho phép.



a) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 90^\circ$ b) - Đặc tính dòng, áp với $\alpha = 0^\circ$ có lọc LC

Hình 3.4: Đặc tính dòng, áp

3.2.3. Trường hợp tải thuần trở, góc điều khiển $\alpha = 0^\circ$

Điện cảm mạch lọc $L = 0,5\text{mH}$, $C = 330\mu\text{F}$.

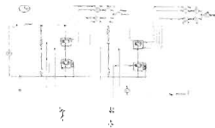
Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.4b.

Dòng điện ban đầu có giá trị rất lớn $I = 40\text{ A}$, tuy nhiên giá trị này vẫn trong dải làm việc cho phép của van.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3.4b.

Với điều kiện xét đến điện trở nội của van và đường dây. Dòng điện ban đầu có giá trị rất lớn $I = 293\text{ A}$, giá trị này vẫn trong dải làm việc cho phép của van.

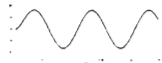
3.3. Mô phỏng bộ nghịch lưu một pha



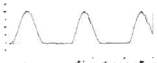
Hình 3.5: Sơ đồ mạch mô phỏng trên PSIM

Tải nghịch lưu một pha có tính chất R-L. Giả định rằng, các van IGBT được điều khiển theo phương pháp PWM, tỉ số điều biến bằng một. Sơ đồ mạch mô phỏng được xây dựng trên phần mềm PSIM được trình bày trên Hình 3.5.

Mô phỏng trong trường hợp điều khiển theo luật PWM với hệ số điều biến bằng 1. Tải dạng R-L với $R = 16\Omega$, $L = 32\text{mH}$. Điện áp nguồn 310V . Bước mô phỏng E-5(s).



Hình 3.6: Mô phỏng dòng điện trong chế độ PWM



Hình 3.7: Tổn thất khi dẫn trên phần tử IGBT và diot nđi



Hình 3.8: Tổn thất chuyển mạch trên phần tử IGBT và diot nđi

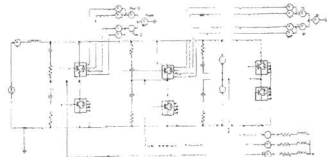


Hình 3.9: Điện áp trên van khi có mạch snubber

Nhận xét: Kết quả mô phỏng cho thấy tính chọn van công suất và các phần tử bảo vệ đạt các yêu cầu đề ra.

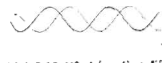
3.4. Mô phỏng bộ nghịch lưu ba pha

Tải nghịch lưu ba pha có tính chất R-L, giả định rằng các van IGBT được điều khiển theo phương pháp PWM, tỉ số điều biến bằng một. Sơ đồ mạch mô phỏng được xây dựng trên phần mềm PSIM được trình bày trên Hình 3.10.

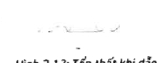


Hình 3.10: Sơ đồ mạch mô phỏng trên PSIM

Mô phỏng trong trường hợp điều khiển theo luật PWM với hệ số điều biến bằng 1. Tải dạng R-L với $R = 39\Omega$, $L = 50\text{mH}$. Điện áp nguồn 520V . Bước mô phỏng E-5(s).



Hình 3.11: Mô phỏng dòng điện trong chế độ PWM



Hình 3.12: Tổn thất khi dẫn trên phần tử IGBT và diot nđi



Hình 3.13: Tồn thất chuyển mạch trên phần tử IGBT và diot nội

Hình 3.14: Điện áp trên van khi có mạch snubber

Nhận xét: Kết quả mô phỏng cho thấy tính chọn van công suất và các phần tử bảo vệ đạt các yêu cầu đề ra.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu, phân tích cấu trúc của các bộ biến đổi điện tử công suất cơ bản nhất phục vụ thực hành thí nghiệm cho sinh viên, học viên chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa để từ đó tiến hành mô phỏng sử dụng phần mềm PSIM.

Các kết quả mô phỏng của bài báo đã phản ánh đúng hoạt động của các bộ biến đổi là cơ sở để triển khai bước chế tạo thực nghiệm hệ thống điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ GTVT trong khuôn khổ đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp Bộ, mã số: DT194021.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Phạm Tâm Thành, Trương Công Mỹ, Hoàng Xuân Bình (2018), *Nghiên cứu xây dựng cấu trúc bộ biến đổi DC/AC ứng dụng cho hệ thống pin năng lượng mặt trời trong phòng thí nghiệm*, Tạp chí GTVT, số tháng 7, tr.113-116.
- [2]. Phạm Tâm Thành (2018), *Xây dựng hệ truyền động điện chỉnh lưu Thyristor - Động cơ điện một chiều của tàu công trình Trường Sa trong phòng thí nghiệm*, Tạp chí GTVT, số tháng 1+2, tr.96-99.
- [3]. Phạm Tâm Thành (2017), *Nghiên cứu, thiết kế chế tạo bộ khởi động mềm cho động cơ điện công suất lớn trên tàu thủy*, Tạp chí GTVT, số tháng 11, tr.87-90.
- [4]. Phạm Tâm Thành, Nguyễn Phùng Quang (2013), *Cấu trúc thực nghiệm hệ truyền động xoay chiều ba pha*, Hội nghị Điều khiển và tự động hóa toàn quốc lần thứ 2, tr.233-237, Đà Nẵng.
- [5]. Arnaud Videt, Mehdi Messaoudi, Nadir Idir, Hocine Boulharts, Heu Vang. (2016), *PWM Strategy for the Cancellation of Common-Mode Voltage Generated by Three-Phase Back-to-Back Inverters*, IEEE Transactions on Power Electronics.
- [6]. Ashok Kumar L, Indragandhi B, Sujith Kumar N. (2018), *Design and Implementation of Single-Phase Inverter without Transformer for PV Applications*, IET Renewable Power Generation: 547-554
- [7]. Axelrod, B., Y. Berkovich, and A. Ioinovici (2003), *A Soft Switching Scheme for Multiphase DC/Pulsating-DC Converter for Three-Phase*, Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS '03. 3(7): 1761-1774.
- [8]. Chi, P.-C. et al. (2017), *Simple Four-Quadrant Grid-Tie Control Scheme with Unity Power Factor Rectifier*

Made for Single-Phase DC/AC Converters, IET Renewable Power Generation 11(11): 1483-1493.

[9]. Dan Sun, Wenzhi Zhou and Zhihao Zhong (2016), *Unified PWM Algorithm Based on Effective Time for Four-Switch Three-Phase Inverter*.

[10]. Dong Quang Dang, Young-Sik Choi, Han Ho Choi, Jin-Woo Jung (June 2015), *Experimental Validation of a Fuzzy Adaptive Voltage Controller for Three-Phase PWM Inverter of a Standalone DG Unit*, IEEE Transactions on Industrial Informatic, vol.11, no.3, pp.632-641.

[11]. Haitao Yang, Yongchang Zhang, Nong Zhang, Paul D. Walker and Jihao Gao (December 2016), *A Voltage Sensorless Finite Control Set-Model Predictive Control for Three-Phase Voltage Source PWM Rectifiers*, Chinese Journal of Electrical Engineering vol.2, no.2.

[12]. Han, Yang et al. (2017), *Stability Analysis of Digital Controlled Single-Phase Inverter with Synchronous Reference Frame Voltage Control*, IEEE Transactions on Power Electronics: 1-1, <http://ieeexplore.ieee.org/document/8022967/>.

[13]. Hatta Sawachan, Pisit Lutanakul and Nopadon Wiwatcharagoses (March 2017), *A Simple Dead-Time Compensation Technique for Single-Phase Full-Bridge PWM Rectifier*, 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10.

[14]. Hu, Jwu Sheng, Jau Nan Lin and Hung Chi Chen (2017), *A Discontinuous Space Vector PWM Algorithm in Abc Reference Frame for Multilevel Three-Phase Cascaded H-Bridge Voltage Source Inverters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 64(11): 8406-8414.

Ngày nhận bài: 03/02/2020

Ngày chấp nhận đăng: 10/3/2020

Người phản biện: PGS. TS. Đinh Anh Tuấn

PGS. TS. Đào Minh Quân