

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN (FEM) ĐỂ THIẾT KẾ NAM CHÂM ĐIỆN DÙNG TRONG THIẾT BỊ ĐIỆN MỎ

Đỗ Như Ý

Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Email: donhuy@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Nam châm điện là bộ phận quan trọng trong thiết bị điện có nhiệm vụ tạo ra lực hút điện từ để thiết bị điện làm việc. Hiện nay việc tính toán thiết kế nam châm điện thường dùng phương pháp giải tích. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để giải các phương trình vi phân bậc cao rất hiệu quả và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật. Trong bài báo này, tác giả trình bày phương pháp sử dụng phần tử hữu hạn để phân tích điện từ trường do nam châm điện tạo ra. Kết quả phân tích và mô phỏng sẽ giúp cho người thiết kế trong việc hiệu chỉnh thông số để tối ưu hóa thiết kế nam châm điện dùng trong thiết bị điện mỏ.

Từ khóa: cơ cấu điện từ, nam châm điện, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các thiết bị điện mỏ như aptomat, khởi động từ.v.v.. sử dụng nam châm điện là một bộ phận chính để tạo ra lực hút điện từ trong quá trình làm việc. Để các thiết bị điện mỏ có kích thước tối ưu, nhỏ gọn mà vẫn đảm bảo làm việc tin cậy thì việc tính toán thiết kế nam châm điện là một khâu quan trọng trong việc tính toán thiết kế thiết bị điện mỏ.

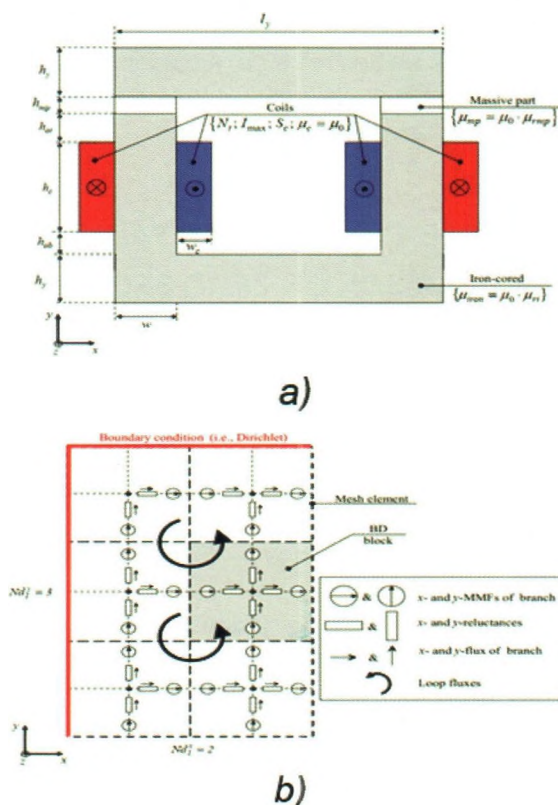
Hiện nay việc tính toán thiết kế nam châm điện thường được tính theo phương pháp giải tích hay còn gọi là phương pháp mạch từ tương đương. Phương pháp này sử dụng rất nhiều hệ số kinh nghiệm và hệ số kết cấu của mạch từ [1]. Nhược điểm của phương pháp này là khi kết cấu của nam châm điện phức tạp hoặc khi mạch từ bị bão hòa thì việc tính toán điện từ trường sẽ khó khăn, độ chính xác không cao ngoài ra sử dụng phương pháp giải tích không xác định được phân bố của từ trường trong mạch từ và không gian.v.v.. gây khó khăn trong việc tối ưu hóa thiết kế nam châm điện.

Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) dùng để giải các phương trình vi phân bậc cao rất hiệu quả và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như phân tích cơ học, phân tích nhiệt, và phân tích điện từ trường. Việc áp dụng phương pháp FEM kết hợp với mô phỏng số trong thiết kế nam châm điện khắc phục những hạn chế của phương pháp giải tích sẽ giúp ích nhiều cho người thiết kế trong việc hiệu chỉnh và tối ưu hóa công tác thiết kế thiết bị điện mỏ [2].

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp giải tích

Kết cấu nam châm điện thường gặp trong các thiết bị điện mỏ có hình dạng như Hình H.1 [1].



H.1. Kết cấu nam châm điện (a) và mạch từ thay thế (b)

Theo [1] lực hút điện từ tại một khe hở không khí của nam châm điện được xác định theo các công thức:

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S = \frac{1}{2\mu_0} B_{\delta m}^2 \sin^2(\omega t) \cdot S$$

$$F = \frac{1}{2S\mu_0} \Phi_{\delta m}^2 \sin^2(\omega t)$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\delta m}^2}{G^2} \frac{dG}{d\delta} \sin^2(\omega t)$$

trong đó: F - lực điện từ; B_δ - là từ cảm tại khe hở không khí;

Φ_δ - là từ thông qua tiết diện S của bề mặt cực từ;

G - từ dẫn tương đương của mạch từ; μ₀ - từ thẩm không khí.

Trong công thức trên, lực hút điện từ được tính toán khi đã xác định được biên độ từ cảm tại khe hở không khí B_{δm} và biên độ từ thông Φ_{δm}. Hai giá trị này có thể được tính toán giải tích bằng phương pháp mạch từ tương đương.

Khi áp dụng phương pháp giải tích để giải các thông số B_{δm} và Φ_{δm} cần có các giả thiết sau: Coi khe hở không khí là đủ nhỏ để bỏ qua từ trường tản; Bỏ qua từ trường rò; Coi vật liệu dẫn từ có đặc tính B-H tuyến tính; Bỏ qua tổn thất từ trễ và tổn thất dòng điện xoáy.v.v.. Những giả thiết này làm cho các kết quả tính toán theo phương pháp giải tích có độ chính xác không cao hoặc sẽ cho các kết quả sai khi nam châm điện làm việc ở vùng bão hòa mạch từ.

2.2. Phương pháp phân tử hữu hạn

Phân bố từ trường trong mạch từ và không gian xung quanh cơ cấu điện từ là nghiệm của phương trình Poisson viết cho trường điện từ của mô hình nam châm điện. Mô hình này được xây dựng dựa trên định luật Maxwell – Ampe. Theo phương trình Maxwell - Faraday viết cho trường hợp của nam châm điện ở trạng thái xác lập như sau [3],[4]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{1}$$

trong đó: \vec{J} - mật độ dòng điện một chiều chảy trong cuộn dây nam châm điện, A/m²;

\vec{H} - cường độ từ trường, H/m.

Cường độ từ trường \vec{H} có liên hệ với mật độ từ thông \vec{B} như biểu thức.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \tag{2}$$

trong đó: μ₀ - độ từ thẩm của chân không;

μ_r - độ từ thẩm tương đối của môi trường dẫn từ.

Trong trường điện từ, \vec{B} được tính toán qua đại lượng vector từ thế \vec{A} như sau:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{3}$$

Thay (2) và (3) vào (1), ta thu được phương trình.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \tag{4}$$

Phương trình (4) có dạng tổng quát của phương trình Poisson, có thể được diễn giải trong mô hình phân tích ứng với hệ tọa độ Oxyz như sau:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) + J = 0 \tag{5}$$

Giải (5), tìm được \vec{A} , sau đó dựa vào (2) và (3) để tính được mật độ từ thông B và cường độ từ trường H như sau:

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{k} \tag{6}$$

Điện áp đặt vào hai cực cuộn dây và điện trở một chiều của cuộn dây, có thể xác định được mật độ dòng điện từ các phương trình:

$$U = R_{dc} i + L \frac{di}{dt}; I_{dc} = \frac{U}{R_{dc}} \tag{7}$$

trong đó: U - điện áp đặt vào 2 cực cuộn dây;

R_{dc} - điện trở của cuộn dây ;

L - điện cảm của cuộn dây;

I_{dc} - dòng điện trong cuộn dây;

S_{dq} - tiết diện cuộn dây; .

Phương pháp FEM là một kỹ thuật giải phương trình (5) để xác định vector từ thế \vec{A} , từ đó tính toán được từ cảm \vec{B} và cường độ từ trường \vec{H} theo các công thức (3) và (2), qua đó xác định phân bố từ trường trong không gian với độ chính xác cao. Tiếp theo, lực từ của nam châm điện sẽ được tính theo công thức ứng suất Maxwell [3] hoặc dựa theo phương pháp năng lượng như sau:

$$F_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{inst} d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{dW(i, \delta)}{d\delta} d(\omega t)$$

trong đó F_{av} - lực từ trung bình;

F_{inst} - lực từ tức thời;

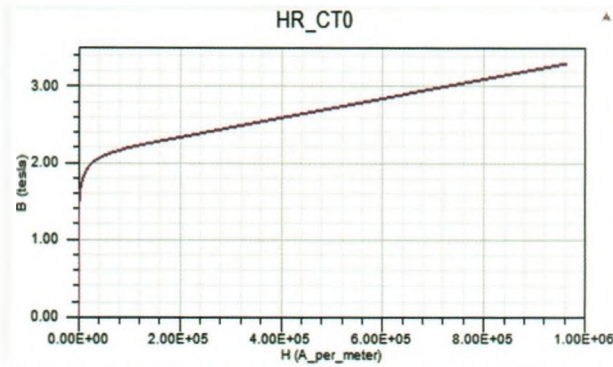
W(i, s) - năng lượng của từ trường;

δ - là độ dài khe hở không khí.

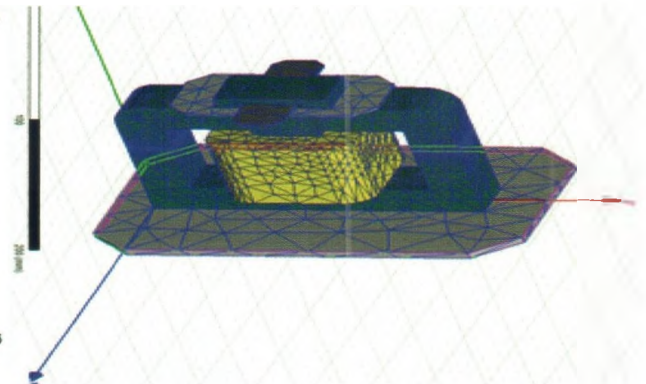
Việc tính toán bằng phương pháp FEM không cần phải đưa ra các giả thiết giống như phương pháp giải tích. Ngoài ra còn có thể khảo sát phân bố điện từ trường trong mạch từ và không khí xung quanh của mạch từ qua đó giúp tối ưu việc thiết kế nam châm điện trong các thiết bị điện mỏ.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Khi chế tạo nam châm điện đã sử dụng thép CTO để làm mạch từ, đặc tính dẫn từ (theo catalog)



H.2. Đặc tính B-H của thép CT0 làm mạch từ



H.3. Chia lưới nam châm điện

của thép CT0 nêu trên Hình H.2 với từ trường bão hòa của thép CT0 là $B_{bh}=2,5T$.

Sử dụng phương pháp FEM để phân tích phân bố từ trường trong không gian của nam châm điện với thông số thiết kế cơ bản: Số vòng dây $W=2000$ (vòng); dòng điện danh định $I = 40$ (A); kết cấu như hình H.3, phương pháp FEM gồm 4 bước cơ bản sau đây [5],[6]:

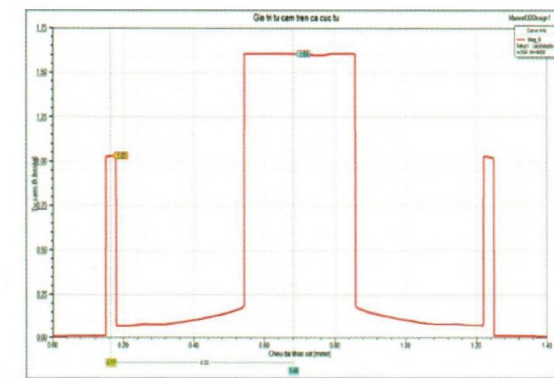
- Rời rạc hóa miền phân tích thành các miền con (element). Các phần tử liên kết với nhau tạo thành lưới (mesh);
- Chọn hàm liên thuộc và xấp xỉ lời giải trên mỗi phần tử;
- Ghép tất cả các phần tử trong miền phân tích để thu được ma trận hệ thống;
- Giải ma trận hệ thống bằng phương pháp lặp.

Để tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn cần phải có sự hỗ trợ của các máy tính số và các chương trình phần mềm được viết dựa trên nền tảng toán học của FEM.

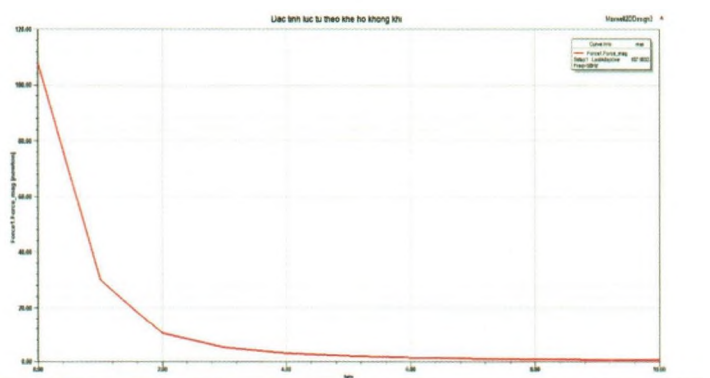
Kết quả mô phỏng về phân bố từ trường trong cấu trúc nam châm điện của khởi động từ được thể hiện trên Hình H.4

Từ kết quả phân bố màu và phân bố giá trị ở các hình trên cho thấy từ cảm B trong cực từ chính là lớn nhất, có giá trị $B_{max1}=1.7$ (T), hai cực từ bên có từ cảm là $B_{max2}=1,05T$, so với giá trị bão hòa của mạch từ $B_{bh}=2,6T$. Điều này cho thấy, khi nam châm điện làm việc với dòng điện 40A thì mạch từ của nó chưa bị bão hòa. Như vậy thấy rằng, thiết bị đang sử dụng vật liệu từ quá mức, chưa tận dụng hết khả năng dẫn từ của vật liệu CT0. Vì vậy, nam châm điện sẽ làm việc trong điều kiện thuận lợi, tổn hao sắt nhỏ, phát nóng nhẹ hơn.

Khảo sát lực hút điện từ của nam châm điện theo độ dài khe hở không khí thu được quan hệ như trên Hình H.4. Lực hút điện từ của nam châm điện giảm phi tuyến khi độ dài khe hở không khí tăng dần. Lực hút điện từ cực đại khi khe hở không khí nhỏ nhất ($\delta_{min} = 0.05mm$) là 102.62N và lực hút cực tiểu khi khe hở không khí lớn nhất ($\delta_{max} = 10mm$) là 0.57N. Do phần động của nam châm điện được đặt để dịch chuyển theo phương nằm ngang nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của tải trọng phản ứng, lực hút cực tiểu đã tính toán đủ lớn để đảm bảo đóng chắc chắn nam châm điện khi chịu

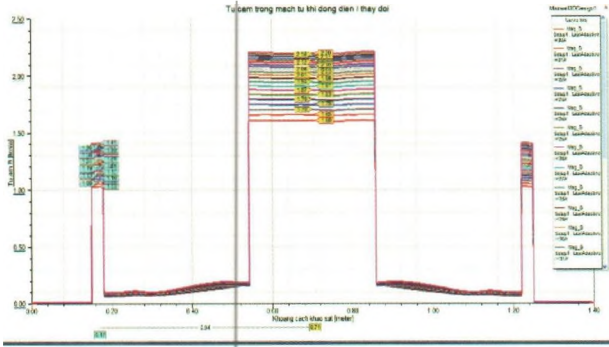


a)

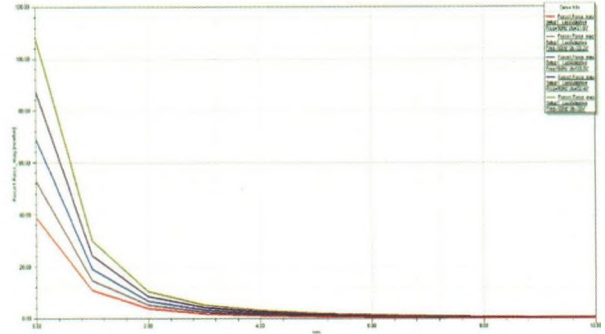


b)

H.4. Phân bố từ trường trên cực từ (a) và lực từ tại khe hở không khí (b)



a)



b)

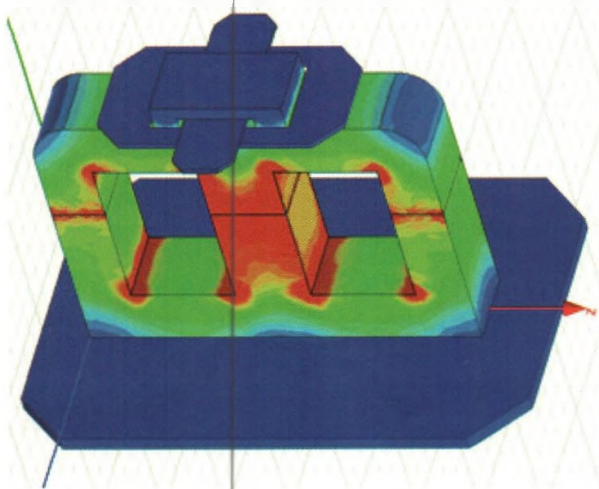
H.5. Thay đổi từ trường trên cực từ (a) và lực điện từ tại khe hở không khí (b)

lực cản đàn hồi của cơ cấu lò xo.

Trong mạng điện mô điện áp đặt trên cuộn hút nam châm điện của công tắc tơ cho phép giảm tới 65%. Khảo sát khi điện áp đặt trên cuộn dây của nam châm điện tới 65% điện áp định mức thì phân bố từ trường trên cực từ và lực điện từ sinh ra trên khe hở không khí của nam châm điện thu được như trên Hình H.5.

Việc thay đổi điện áp đặt vào cuộn dây dẫn tới từ cảm trên cực từ giảm cũng như lực điện từ sinh ra trên khe hở không khí bị giảm. Khi điện áp trên cuộn dây giảm xuống còn 65% điện áp định mức thì từ cảm sinh ra trên cực từ chính và cực từ bên có giá trị tương ứng $B_{max1}=1.3 (T)$, hai cực từ bên có từ cảm là $B_{max2}=0,85T$ điều này dẫn tới lực từ sinh ra trên khe hở không khí bị suy giảm lực điện từ lớn nhất sinh ra trên khe hở không khí đạt 39N.

Sử dụng phương pháp FEM, có thể khảo sát được sự phân bố từ trường trên cực từ. Kết quả phân bố từ trường trên cực từ được chỉ ra trên Hình H.6.



H.6. Phân bố từ trường trên mạch từ

Kết quả phân tích từ trường trong mạch từ nhận thấy rằng:

- Điểm tập trung lớn nhất là trên mạch từ chính ở giữa, mạch từ bên cạnh có mức độ tập trung từ trường thấp hơn như vậy có thể thiết kế mạch từ bên cạnh nhỏ hơn mạch từ ở giữa để tối ưu hóa vật liệu làm mạch từ nam châm điện;

- Một số điểm trên mạch từ có từ trường tập trung lớn. Đó là các điểm ở góc mạch từ đưa đến mạch từ ở những điểm này có thể bị bão hòa sớm. Do vậy, để tránh bị bão hòa mạch có thể thiết kế mạch từ nam châm điện có dạng vát góc để giảm bớt hiện tượng bão hòa mạch từ.

5. KẾT LUẬN

Sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn FEM để phân tích từ trường của nam châm điện sử dụng trong thiết bị điện mỏ đã đưa ra được những kết quả định tính và định lượng về phân bố từ trường trên cực từ của nam châm điện, lực điện từ trên khe hở không khí. Kết quả phân tích này sẽ giúp cho người thiết kế trong việc hiệu chỉnh thông số của nam châm điện từ đó tối ưu hóa thiết kế nam châm điện sử dụng trong các thiết bị điện mỏ.

Mô hình phân tích và phương pháp nghiên cứu trình bày trong bài báo này có thể áp dụng mở rộng đối với các nam châm điện có kết cấu mạch từ phức tạp, hoạt động ở nhiều chế độ khác nhau kể cả chế độ bão hòa mạch từ. Áp dụng phương pháp FEM trong tính toán thiết kế nam châm điện sẽ mang lại hiệu quả cao, nâng cao độ tin cậy và tối ưu hóa vật liệu được sử dụng

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Trần Bá Đề, Đỗ Như Ý (2006), Khí cụ điện, Đại học Mỏ - Địa chất.
2. Đặng Văn Đào, Lê Văn Doanh (2001), Các phương pháp hiện đại trong nghiên cứu tính toán thiết kế kỹ thuật điện, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
3. Youcef Benmessaoud, Frédéric Dubas* and Mickael Hilairret (2019), Combining the Magnetic Equivalent Circuit and Maxwell–Fourier Method for Eddy-Current Loss Calculation, Math. Comput. Appl.
4. Nicola Bianchi (2005), Electrical Machine Analysis using Finite Elements, CRC Press.
5. John R. Brauer (2014), Magnetic Actuators and Sensors, IEEE Press, Wiley.
6. Yoshihiro Kawase, Satoshi Tatsuoka and Tadashi Yamaguchi (1994), “3-D Finite Element Analysis of Operating Characteristics”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 5, pp. 3244- 3247, September.

Lời cảm ơn: Nội dung nghiên cứu trong bài báo được hỗ trợ kinh phí từ đề tài nghiên cứu Khoa học công nghệ thuộc Chương trình Công nghệ khai khoáng mã số 012.2020.CNKK.QG.

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD TO DESIGN OF ELECTRO-MAGNET USED IN MINING ELECTRICAL EQUIPMENT**ABSTRACT**

The electromagnet is an important part in explosion-proof electrical equipment that is responsible for creating electromagnetic attraction for these devices. At present, analytical methods are often used to design electromagnet's design. The finite element method (FEM) for solving high-order differential equations is very effective and is applied in many fields of engineering. In this paper, the author presents how to use the FEM method to analyze the electromagnetic field generated by an electromagnet. The results of analysis and simulation will help the designer in adjusting parameters to optimize the design of the electromagnet used in mining electrical equipment.

Keywords: electromagnetic structure, electromagnet, Finite Element Method (FEM)

Ngày nhận bài: 22/01/2022;

Ngày gửi phản biện: 23/01/2022;

Ngày nhận phản biện: 15/02/2022;

Ngày chấp nhận đăng: 20/02/2022.

Trách nhiệm pháp lý của các tác giả bài báo: Các tác giả hoàn toàn chịu trách nhiệm về các số liệu, nội dung công bố trong bài báo theo Luật Báo chí Việt Nam.