

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ ĐỘNG CƠ ĐIỆN PHÒNG NỔ HIỆU SUẤT CAO ỨNG DỤNG CHO QUẠT CỤC BỘ TRONG CÁC MỎ THAN HẦM LÒ

Đỗ Như Ý
 Trường Đại học Mỏ - Địa chất
 Trịnh Biên Thủy
 Trường Cao đẳng Việt-Hàn Quảng Ninh
 Email: donhuy@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Thông gió mỏ là khâu tiêu thụ nhiều năng lượng trong mỏ hầm lò. Tiết kiệm điện năng cho quạt thông gió cục bộ nhằm giảm điện năng tiêu thụ chung của toàn bộ xí nghiệp mỏ là một yêu cầu cấp thiết. Giải pháp thay thế động cơ không đồng bộ rô to lồng sóc bằng các động cơ hiệu suất cao (LSPMSM) cho các quạt thông gió cục bộ để tiết kiệm năng lượng đang được quan tâm nghiên cứu. Bài báo đề cập tới việc tính toán tối ưu nam châm vĩnh cửu sử dụng trong động cơ LSPMSM ứng dụng cho quạt thông gió cục bộ mỏ để đạt được hiệu suất cao.

Từ khóa: động cơ không đồng bộ, động cơ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thông gió mỏ là khâu tiêu thụ nhiều năng lượng trong các mỏ hầm lò. Việc tiết kiệm điện năng cho quạt thông gió cục bộ nhằm giảm thiểu điện năng tiêu thụ chung của toàn bộ xí nghiệp mỏ là một trong những yêu cầu cần thiết trong khai thác mỏ hiện nay. Đặc trưng của quạt thông gió cục bộ là khi khởi động không cần mômen khởi động lớn đây là một đặc điểm quan trọng để có thể thay thế các loại động cơ không đồng bộ (IM) hiệu suất không cao bằng việc sử dụng các loại động cơ thế hệ mới hiệu suất cao nhằm mục tiêu tiết kiệm năng lượng [1].

Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ nam châm vĩnh cửu (NCVC) chế tạo từ đất hiếm với mật độ từ trường cao, tích số năng lượng lớn, như chủng loại nam châm Neodymium, khiến cho động cơ đồng bộ NCVC khởi động trực tiếp (Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor-LSPMSM) nổi lên như là một giải pháp thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ rô to lồng sóc và sử dụng rất phù với các loại tải như quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ [4].

NCVC sử dụng trong động cơ phòng nổ LSPMSM ảnh hưởng nhiều tới hiệu suất của động cơ. Việc tính toán lựa chọn loại nam châm không phù hợp làm giảm hiệu suất của động cơ. Nếu thiết kế không tốt thì hiệu suất của động cơ LSPMSM thậm chí có thể còn không đạt được hiệu suất như của IM [5, 6]. Việc phân tích, tính toán thiết kế lựa chọn tối ưu NCVC sẽ nâng cao hiệu suất thiết kế chế tạo động cơ LSPMSM.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phân bố từ trường trong mạch từ và không gian xung quanh kết cấu điện từ là nghiệm của phương trình Poisson viết cho trường điện từ của mô hình động cơ điện. Mô hình này được xây dựng dựa trên định luật Maxwell – Ampe. Theo phương trình Maxwell - Faraday viết cho trường hợp của động cơ điện ở trạng thái xác lập như sau [1, 2]:

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

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, A/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: μ_0 - 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:

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

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:

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

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:

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

- 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;
- Sdq - tiết diện cuộn dây.

Phương pháp FEM là một kỹ thuật để giải phương trình (5), xác định vectơ 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.

Áp dụng phương pháp FEM phân tích động cơ LSPMSM sử dụng cho quạt thông gió cục bộ trong khai thác mỏ với thông số $P=15kW$, $660/1140VAC$, vận tốc quay 3.000 r/min .

2.2. Tối ưu hóa lựa chọn nam châm NdFeB theo nhiệt độ làm việc

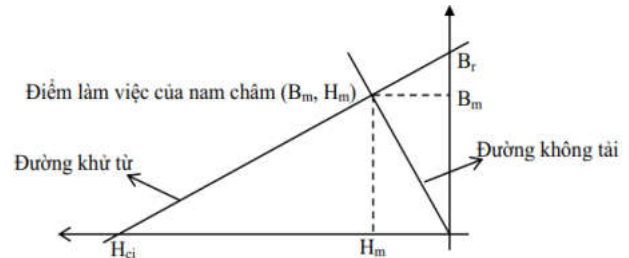
NCVC sử dụng trong động cơ LSPMSM là loại nam châm đất hiếm Neodymium (NdFeB) với mật độ từ trường cao, tích số năng lượng lớn. Khi tính toán thiết kế động cơ LSPMSM thì phức tạp nhất là phần tính toán NCVC đặc biệt lại càng khó khăn đối với loại động cơ có vận tốc quay cao đến 3.000 r/min , thường sử dụng cho quạt thông gió cục bộ trong khai thác mỏ.

Tất cả các vật liệu trên thế giới hiện nay, đều có nhiệt độ hoạt động của riêng nó. Các loại nam châm Neodymium hoạt động theo các nhiệt độ khác nhau, giới hạn theo nhiệt độ được ký hiệu trong Bảng 1.

Bảng 1. Giới hạn nhiệt độ làm việc của loại NCVC

Loại	Nhiệt độ làm việc (°C)
Thường	80
M	100
H	120
SH	150
UH	180
EH	200
VH/AH	230

Hiệu suất của động cơ LSPMSM phụ thuộc nhiều vào NCVC. Trong quá trình làm việc của động cơ có thể phát sinh tổn hao do dòng điện xoáy ở trên các NCVC. Tổn hao dòng xoáy tăng mạnh có thể làm cho nhiệt độ làm việc của NCVC gia tăng và đạt đến ngưỡng nhiệt độ cực đại, gây ra hiện tượng khử từ đảo ngược, làm mất đi khả năng làm việc của nam châm hoặc làm suy yếu từ dư trong nam châm do nhiệt độ cao.

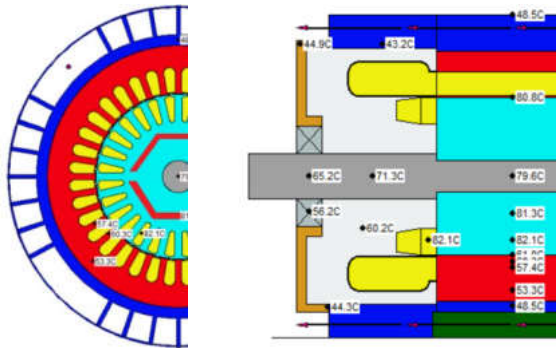


H 2. Đặc tính khử từ của nam châm vĩnh cửu do sự tăng nhiệt

Từ đặc tính trên có thể thấy rằng, để đảm bảo chất lượng của nam châm, với khả năng tận dụng năng lượng cực đại trên cùng một thể tích nam châm sử dụng và ngăn ngừa xảy ra hiện tượng đảo ngược khử từ thì nhiệt độ làm việc của NCVC gắn trên rô to của động cơ LSPMSM phải càng thấp càng tốt.

Như vậy, nếu sử dụng loại NCVC có khả năng chịu nhiệt thấp thì có lợi là giá thành sản phẩm hạ, tuy nhiên trong quá trình làm việc nam châm sẽ bị khử từ làm giảm hiệu suất của động cơ, còn nếu sử dụng loại nam châm có mức độ chịu nhiệt cao thì làm tăng giá thành của sản phẩm. Để tính toán lựa chọn tối ưu được nam châm điện theo phương chịu nhiệt thì cần thiết phải đánh giá khảo sát nhiệt độ làm việc của nam châm khi làm việc. Nghiên cứu phân tích phát nóng khảo sát nhiệt độ của động cơ LSPMSM cho kết quả như mô tả trên Hình H.3.

Từ kết quả khảo sát nhiệt độ của động cơ LSPMSM nhận thấy rằng, nhiệt độ lớn nhất $82,1^{\circ}C$, nhiệt độ này chưa được tính toán trên kết quả mô phỏng đã bỏ qua nhiều giả thiết. Như vậy để đảm bảo NCVC không bị khử từ trong quá trình làm việc cần thiết phải sử dụng loại nam châm chịu được nhiệt độ cao tương ứng với loại M (Bảng 1) có nhiệt độ cho phép khi làm việc tới $100^{\circ}C$.



H.3. Phân bố nhiệt độ của động cơ LSPMSM

2.3. Tối ưu hóa nam châm theo điện từ trường

NCVC sử dụng trong động cơ LSPMSM là loại nam châm đất hiếm NdFeB có mật độ từ dư (B_r), cường độ từ trường lớn nhất (H_{cJ}), Cường độ từ trường nhỏ nhất (H_{cB}), Nhiệt độ làm việc lớn nhất của nam châm (T_w) và tích năng cực đại (BH_{max}). Thể tích của NCVC V_m được xác định theo công thức:

$$V_m = \frac{2 \cdot k_{of} k_{fd} (1 + K_{EC}) P_{đm}}{\pi^2 \xi \cdot 2 \cdot p \cdot f \cdot B_r \cdot H_c}$$

Với k_{of} - là hệ số quá tải; k_{fd} -Hệ số hình dáng từ hóa; K_{EC} -Hệ số sức điện động; $P_{đm}$ -Công suất định mức; P_{max} -Công suất lớn nhất; ξ - Hệ số sử dụng nam châm chọn; B_r - Mật độ từ dư; H_c -Cường độ từ trường cực đại.

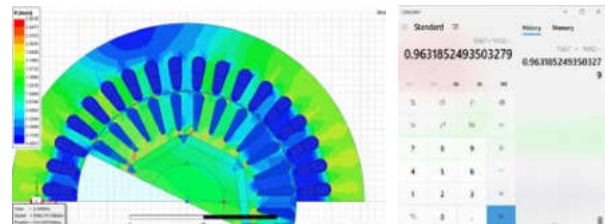
Nam châm vĩnh cửu trong động cơ LSPMSM đóng vai trò như một nguồn từ thông. Với cùng một thể tích, kích thước nam châm thiết kế nếu lựa chọn loại NCVC loại có mật độ từ trường quá cao, sẽ gây ra hiện tượng bão hòa mạch từ làm giảm hiệu suất của động cơ. Trường hợp nếu chọn nam châm loại có mật độ từ trường thấp sẽ dẫn đến không đủ mật độ từ thông từ đó cũng sẽ giảm hiệu suất của động cơ. Do vậy, với mỗi kết cấu hiệu suất của động cơ đạt cao nhất ứng với một mã hiệu nam châm NdFeB.

Việc phân tích lựa chọn tối ưu chủng loại nam châm NdFeB sử dụng trong động cơ điện sẽ có ý nghĩa quan trọng. Kết quả nghiên cứu khi động cơ LSPMSM sử dụng nam châm NdFeB loại N42, N38 và N33 được mô tả trên các Hình H4 và H6.

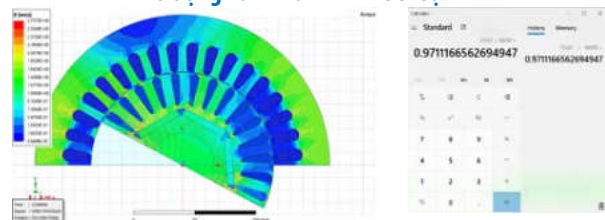
Kết quả nghiên cứu nhận thấy rằng:

- Khi động cơ LSPMSM sử dụng loại nam châm N42 là loại nam châm có từ trường lớn nhất trong ba loại nam châm sử dụng. Tuy nhiên, hiệu suất của động cơ đạt 96,3% chưa phải là hiệu suất lớn nhất. Nguyên nhân là do sử dụng loại nam châm có mật độ từ trường quá lớn làm cho mạch từ rò to của động cơ bị bão hòa làm giảm hiệu suất của động cơ.

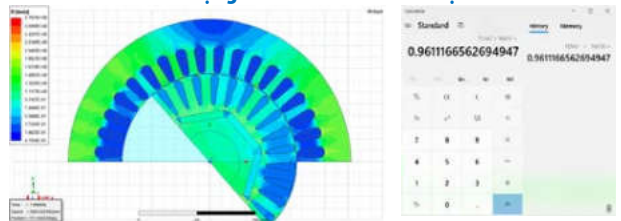
- Khi động cơ sử dụng nam châm loại N33, đây là loại nam châm có mật độ từ thông thấp nhất trong ba loại mô phỏng thì hiệu suất của động cơ đạt 96,1% là hiệu suất thấp nhất trong ba trường hợp. Nguyên nhân đưa đến là do sử dụng loại nam châm có từ trường nhỏ làm cho hiệu suất động cơ giảm.
- Khi động cơ sử dụng nam châm loại N38, động cơ đạt hiệu suất lớn nhất là 97,1% (hiệu suất của động cơ không đồng bộ cùng gam công suất này đạt mức 90,3%) hiệu suất này cao hơn động cơ không đồng bộ 7,1% và cao hơn khi động cơ LSPMSM khi sử dụng các loại nam châm khác khoảng 1%.



H.4. Phân tích động cơ LSPMSM khi sử dụng nam châm vĩnh cửu loại N42



H.4. Phân tích động cơ LSPMSM khi sử dụng nam châm vĩnh cửu loại N38

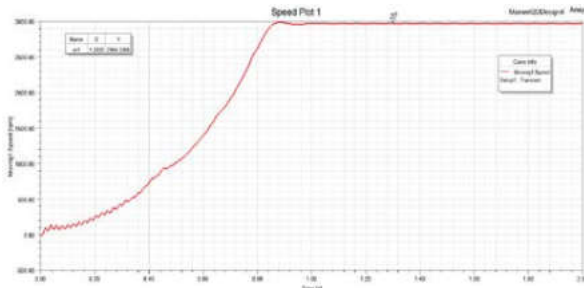


H.4. Phân tích động cơ LSPMSM khi sử dụng nam châm vĩnh cửu loại N33

2.4. Khảo sát đặc tính làm việc của động cơ

Thông qua kết quả nghiên cứu tối ưu NCVC sử dụng trong động cơ LSPMSM theo phương thức nhiệt độ và từ trường, thấy rằng việc để đảm bảo nhiệt độ và hiệu suất động cơ là cực đại 97,1% thì lựa chọn loại NCVC N38M. Khảo sát đặc tính động cơ với loại nam châm vĩnh cửu đã lựa chọn đưa ra trong Hình H.7

Kết quả mô phỏng nhận thấy động cơ được thiết kế có thể tự khởi động và tốc độ động cơ đạt vận tốc quay đồng bộ 3000 r/min hoàn toàn phù hợp với yêu cầu thiết kế.



H 7. Đặc tính tốc độ của động cơ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp

3. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc tính toán lựa chọn tối ưu loại nam châm vĩnh cửu sẽ thiết kế được động cơ có hiệu suất cực đại và tối ưu được chi phí vật liệu sử dụng trong động cơ. Động cơ được thiết kế có đặc tính hoàn toàn phù hợp, đạt hiệu suất lớn nhất là 97,1%, cao hơn hiệu suất của động cơ không đồng bộ 7,1% và cao hơn hiệu suất của động cơ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp khi sử dụng các loại nam châm khác khoảng 1% □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Đỗ Như Ý, Đỗ Anh Tuấn, Lê Anh Tuấn (2022), Thiết kế động cơ phòng nổ hiệu suất cao tốc độ 3.000 vòng/phút sử dụng cho quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
2. Do Nhu Y, Ngo Thanh Tuan, Ngo Xuan Cuong, Le Anh Tuan (2021), Numerical simulation method application in the design of a line-start permanent magnet synchronous motor. HNKH toàn quốc về Cơ khí – Điện - Tự động hóa.
3. Nguyễn Vũ Thanh (2015). Nghiên cứu thiết kế tối ưu động cơ ba pha nam châm vĩnh cửu. Luận án Tiến sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội.
4. Lê Anh Tuấn, Đỗ Như Ý, Bùi Đức Hùng (2022), A study on effect of permanent magnet configurations on starting speed curve and phase current waveform in steady state of line start magnet synchronous motors 15 kW, 3,000rpm. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng.
5. Jian Li, Jungtae Song and Yunhyun Cho (2010), High Performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Pumping System. International Symposium on Industrial Electronics.
6. A. Hassanpour Isfahani, S. Vaez-Zadeh, M. A. Rahman (2011), Evaluation of Synchronization Capability in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, pp. 1346 – 1350.

OPTIMIZING THE DESIGN OF HIGH PERFORMANCE EXPLOSION-PROOF ELECTRIC MOTOR USED FOR LOCAL FANS IN UNDERGROUND MINES

Do Nhu Y, Trinh Bien Thuy

ABSTRACT

Mine ventilation is a major energy consumer in underground mines. Saving energy for the local ventilation fans in order to reduce the power consumption of the mines is an urgent issue. The solution to replace the squirrel-cage asynchronous motor by the high-efficiency motors (LSPMSM) for local ventilation fans to save electrical energy is being studied. The article refers to the optimal calculation of permanent magnets used in LSPMSM motors for mine local ventilation fans to achieve high efficiency.

Keywords: asynchronous motor, line-start synchronous permanent magnet motor, Finite Element Method (FEM);

Ngày nhận bài: 22/10/2022;

Ngày gửi phản biện: 24/10/2022;

Ngày nhận phản biện: 18/11/2022;

Ngày chấp nhận đăng: 10/12/2022.

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.