

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

Đỗ Như Ý^{1*}, Đỗ Anh Tuấn², Lê Anh Tuấn³, Lưu Văn Uy⁴

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất

²Trung tâm Công nghệ Laser, Viện Ứng dụng Công nghệ

³Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

⁴Trường Cao đẳng Việt - Hàn Quảng Ninh

Ngày nhận bài 4/7/2022; ngày chuyển phản biện 6/7/2022; ngày nhận phản biện 28/7/2022; ngày chấp nhận đăng 3/8/2022

Tóm tắt:

Mức độ tiêu thụ điện năng của khâu thông gió mỏ nói chung và quạt thông gió cục bộ nói riêng chiếm tỷ trọng lớn trong toàn mỏ. Việc tiết kiệm điện năng cho quạt thông gió cục bộ đưa đến việc giảm thiểu điện năng tiêu thụ chung của toàn bộ xí nghiệp mỏ là một trong những yêu cầu cần thiết. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ nam châm vĩnh cửu (NCVC) đất hiếm với mật độ từ trường cao, động cơ đồng bộ NCVC khởi động trực tiếp (LSPMSM) cũng đang nổi lên như một giải pháp thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc (IM) để tiết kiệm năng lượng. Bài báo tính toán thiết kế LSPMSM 15 kW, 660/1.140 VAC, 3 pha, tốc độ 3.000 vòng/phút, từ đó mô phỏng khảo sát đặc tính làm việc của LSPMSM với tải định mức của quạt thông gió mỏ, làm tiền đề thay thế IM trong thực tế.

Từ khóa: động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp, động cơ không đồng bộ, nam châm vĩnh cửu.

Chỉ số phân loại: 2.3

Design of high-performance explosion proof motor of 3,000 rpm for local exhaust ventilation in underground mining

Nhu Y Do^{1*}, Anh Tuan Do², Anh Tuan Le³, Van Uy Luu⁴

¹Hanoi University of Mining and Geology

²National Center for Laser Technology, National Center for Technological Progress

³Hanoi University of Industry

⁴Vietnam - Korea College of Quang Ninh

Received 4 July 2022; accepted 3 August 2022

Abstract:

The power consumption of mine ventilation in general and local exhaust ventilation in particular accounts for a large proportion of the whole mine. Saving energy for the local exhaust ventilation that leads to the reduction of the overall power consumption of the entire mining enterprise is one of the necessary requirements. With the rapid development of rare earth, permanent magnet technology with high magnetic field density, line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) is becoming a suggestion of partially replacing for squirrel cage induction motors (IM) to save energy. The present results are a calculation of designing for the LSPMSM of 15 kW, 660/1,140 VAC, 3 phases, 3,000 rpm, and simulation of operating characteristics of the LSPMSM with the rated load of the exhaust ventilation of mine to replace the IM in practice.

Keywords: induction motor, line-start permanent magnet synchronous motor, permanent magnet.

Classification number: 2.3

Đặt vấn đề

Quạt thông gió cục bộ là phụ tải loại 1 trong khai thác mỏ hầm lò. Để đảm bảo an toàn trong khai thác mỏ, quạt thông gió cục bộ làm việc liên tục không nghỉ kể cả ngày lễ. Mức độ tiêu thụ điện năng của khâu thông gió mỏ nói chung và quạt thông gió cục bộ nói riêng chiếm tỷ trọng lớn trong toàn mỏ. Việc tiết kiệm điện năng cho quạt thông gió cục bộ sẽ giúp giảm thiểu điện năng tiêu thụ chung của toàn bộ xí nghiệp mỏ [1]. Đây 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 IM truyền thống bằng việc sử dụng các loại động cơ thể hệ mới hiệu suất cao nhằm mục tiêu tiết kiệm năng lượng. Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ NCVC đất hiếm với mật độ từ trường cao, tích số năng lượng lớn như chủng loại nam châm Neodimium... đã khiến LSPMSM nổi lên như một giải pháp thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ IM và phù hợp với các loại tải như quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ [2].

Đối với LSPMSM, mặc dù được khẳng định là động cơ có hiệu suất, hệ số công suất cao, mật độ mômen lớn [3-5], nhưng nếu thiết kế không tốt thì các thông số vận hành sẽ không đảm bảo, thậm chí không đạt được các tiêu chuẩn của IM [6]. Bài báo thiết kế khảo sát mô phỏng LSPMSM 15 kW, 660/1.140 VAC, 3 pha, tốc độ 3.000 vòng/phút và trình bày ứng dụng FEM trong đánh giá giải pháp thiết kế.

Thiết kế LSPMSM, 15 kW, 3.000 vòng/phút

LSPMSM bản chất là sự cải tiến từ động cơ đồng bộ NCVC và động cơ không đồng bộ. Nói cách khác, là sự lai tạp giữa động cơ không đồng bộ và động cơ đồng bộ bằng cách đặt các thanh

*Tác giả liên hệ: Email: donhuy.hung@gmail.com

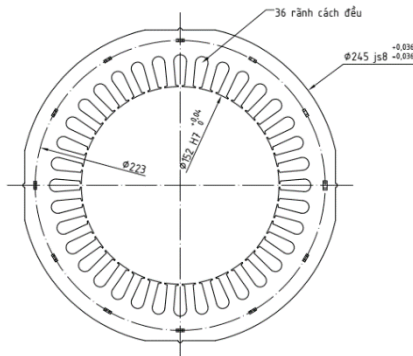
NCVC vào IM. Do vậy, LSPMSM ngoài sở hữu ưu điểm của động cơ đồng bộ NCVC, còn có ưu điểm của IM là khả năng tự khởi động trực tiếp [3, 7].

Cấu hình LSPMSM

Bảng 1. Thông số của LSPMSM.

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài stator	Din	245	mm
Đường kính trong stator	Dout	152	mm
Vật liệu thép stator	Steel 1008		
Số rãnh stator	Z1	36	Rãnh
Chiều dài khe hở không khí	g	0,5	mm
Điện áp nguồn cấp	Uđm	660/1.140	V
Tần số nguồn cấp	f	50	Hz

Stator: LSPMSM điển hình có cấu tạo stator giống động cơ không đồng bộ. LSPMSM trong bài báo có thông số như ở bảng 1. Kích thước IM được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Kích thước IM 15 kW tốc độ 3.000 vòng/phút [2].

Cấu hình rotor: Rotor của LSPMSM tương tự IM là nó có lồng sóc. Tuy nhiên, LSPMSM khác biệt so với động cơ IM ở chỗ nó có gắn thêm các thanh NCVC trong lõi thép rotor. Khi tính toán thiết kế NCVC đặc biệt lại càng khó khăn đối với loại động cơ có tốc độ cao 3.000 vòng/phút.

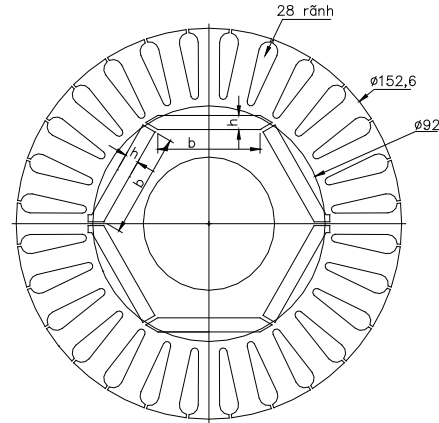
Việc tính toán NCVC không tốt sẽ gây khó khăn cho việc gia công chế tạo, hiệu suất của động cơ thấp, động cơ không khởi động được, thời gian khởi động lâu... Ngoài ra, NCVC có chi phí cao, do vậy nếu việc tính toán không tối ưu, sẽ dẫn đến khó thương mại hóa loại động cơ này trong thực tế [3].

NCVC sử dụng trong 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 lượng cực đại (BH_{max}). Thể tích của NCVC V_m được xác định theo công thức sau:

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

với k_{of} : hệ số quá tải, chọn $k_{of}=2$; k_{fd} : hệ số hình dáng từ hóa, chọn sơ bộ $k_{fd}=1$; k_{EC} : hệ số sức điện động (0,6-0,95), chọn $k_{EC}=0,9$; P_{dm} : công suất định mức; ξ : hệ số sử dụng nam châm (0,3-0,7), chọn $\xi=0,5$; B_r : mật độ từ dư; H_c : cường độ từ trường cực đại; p : tần số; f : số cực.

Thông thường, để đảm bảo tối ưu trong thiết kế, chế tạo, cũng như lắp ráp NCVC trong LSPMSM, độ dày của NCVC thường trong khoảng giá trị 5-6 mm [4]. Từ đó, có thể xác định được thông số kích thước của NCVC có giá trị tương ứng: $h=5,5$ mm và $b=40$ mm. Thông số NCVC trong LSPMSM được thể hiện ở hình 2.



Hình 2. Thông số NCVC trong LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút [2].

Ứng dụng FEM đánh giá giải pháp thiết kế

Để đánh giá sự phù hợp của thông số NCVC đã được tính toán cho LSPMSM, cần phải khảo sát phân bố điện từ trường cũng như đặc tính làm việc của động cơ. 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 động cơ điện. Mô hình này được xây dựng dựa trên định luật Maxwell - Ampe. Phương trình Maxwell - Faraday viết cho trường hợp của động cơ điện ở trạng thái xác lập như sau [2, 6]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

trong đó: $\vec{H}$: cường độ từ trường (H/m); $\vec{J}$: mật độ dòng điện một chiều chảy trong cuộn dây nam châm điện (A/m^2).

Cường độ từ trường $\vec{H}$ có liên hệ với mật độ từ thông $\vec{B}$ theo biểu thức sau:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2)$$

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:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3)$$

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

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

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 $\vec{B}$ và cường độ từ trường $\vec{H}$ 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 2 cực cuộn dây và điện trở một chiều của cuộn dây, có thể xác định được mật độ dòng điện từ các phương trình:

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

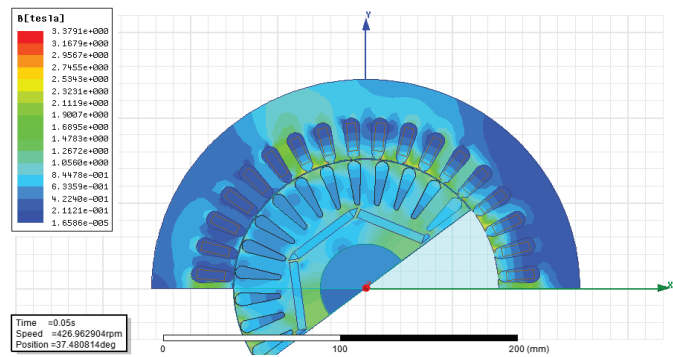
trong đó: U : điện áp đặt vào 2 cực cuộn dây; R_{dc} : điện trở của cuộn dây; L : điện cảm của cuộn dây; I_{dc} : dòng điện trong cuộn dây; S_{dq} : tiết diện cuộn dây.

FEM là một kỹ thuật để 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. Từ đó sẽ giúp ích nhiều cho người thiết kế và vận hành trong việc hiệu chỉnh thông số của cơ cấu điện từ của máy tuyến từ để tối ưu hóa phân bố từ trường trong không gian nhằm nâng hiệu quả hoạt động của máy. Phương pháp FEM gồm 4 bước cơ bản:

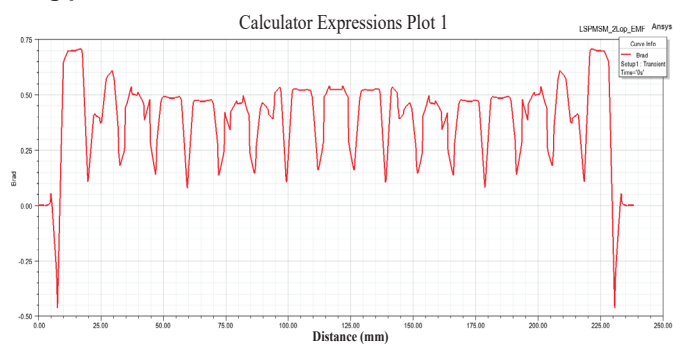
- Rời rạc hóa miền phân tích thành các miền con. Các phần tử liên kết với nhau tạo thành lưới.
- Chọn hàm liên thuộc và xấp xỉ lời giải trên mỗi phần tử.
- Ghép tất cả các phần tử trong miền phân tích để thu được ma trận hệ thống.
- Giải ma trận hệ thống bằng phương pháp lặp.

Kết quả và bàn luận

Để tính toán theo FEM, 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 phương pháp này.

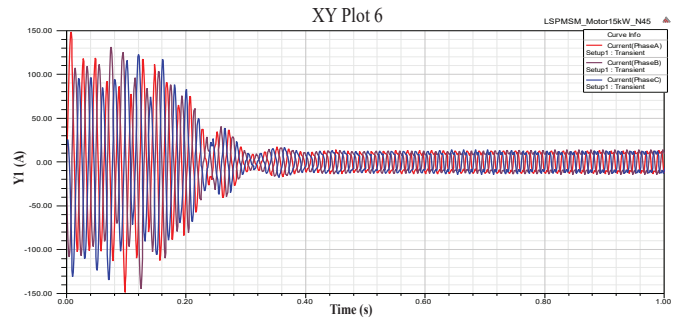


Hình 3. Phân bố điện từ trường trong LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút.

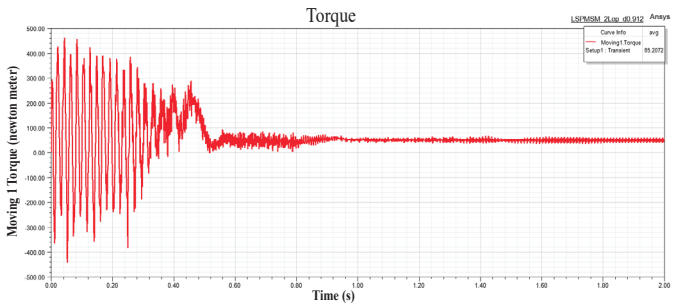


Hình 4. Đặc tính phân bố mật độ từ trường LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút.

Hình 3 và 4 trình bày phân bố điện từ trường trong động cơ. Kết quả cho thấy, phân bố điện từ trường trong động cơ tương đối đều, tuy nhiên vẫn còn tồn tại một số điểm mà từ trường tập trung ở những điểm này có thể bị bão hòa sớm hơn các điểm khác. Xuất hiện các từ thông đập mạch trong mạch từ làm cho động cơ xuất hiện hiện tượng rung động khi làm việc, qua đó cần tiếp tục cải thiện giải pháp thiết kế để động cơ có thể làm việc êm dịu và cho hiệu suất cao hơn.



Hình 5. Đặc tính dòng điện khởi động với tải định mức của LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút.



Hình 6. Đặc tính mômen khởi động với tải định mức của LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút.

Hình 5 và 6 cho thấy đặc tính dòng điện khởi động và đặc tính mômen khởi động khi làm việc với tải định mức. Từ kết quả mô phỏng nhận thấy rằng, LSPMSM hoàn toàn có thể khởi động và làm việc được với tải định mức (quạt gió), sau khoảng thời gian khởi động, động cơ sẽ làm việc ổn định ở tốc độ 3.000 vòng/phút.

Kết luận

Bài báo đề xuất giải pháp thiết kế phương án bố trí và tối ưu thông số của NCVC trong LSPMSM. Kết quả cho thấy, đối với đường đặc tính tốc độ khởi động và đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành xác lập, cấu hình NCVC thiết kế tốt, tuy nhiên trong quá trình làm việc có thể vẫn phát sinh rung ồn, điều này sẽ tiếp tục được cải thiện bằng việc tối ưu hóa quá trình thiết kế bố trí NCVC trên rotor của LSPMSM.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được hỗ trợ kinh phí từ Đề tài mã số ĐT.CNKK. QG.012/21. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Xuân Hà và cs (2014), *Giáo trình thông gió mô*, 390tr, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [2] Do Nhu Y, et al. (2021), "Numerical simulation method application in the design of a line-start permanent magnet synchronous motor", *National Scientific Conference on Mechanics, Electrical, Automation*.
- [3] Nguyễn Vũ Thanh (2015), *Nghiên cứu thiết kế tối ưu động cơ 3 pha nam châm vĩnh cửu*, Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [4] A.H. Isfahani, et al. (2011), "Evaluation of synchronization capability in line start permanent magnet synchronous motors", *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, DOI: 10.1109/IEMDC.2011.5994801.
- [5] R.J. Wang, et al. (2014), "A study of rotor topologies of line-start PM motors for cooling fan applications", *Proceedings of the 22nd South African Universities Power Engineering Conference*, DOI: 10.13140/2.1.2238.8482.
- [6] V. Elistratova (2016), "Optimal design of line-start internal permanent magnet synchronous motor of high efficiency", *38th IAS Annual Meeting*, DOI: 10.1109/IAS.2003.1257835.
- [7] L.S. Maraaba, et al. (2019), "Mathematical modeling, simulation and experimental testing of interior-mount LSPMSM under stator inter-turn fault", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **34**(3), pp.1213-1222.