

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

TRINH BIÊN THÙY

**NGHIÊN CỨU KẾT CẤU ROTOR ĐỂ CẢI THIỆN
ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ PHÒNG
NỔ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỎI
ĐỘNG TRỰC TIẾP SỬ DỤNG TRONG
KHAI THÁC MỎ HÀM LÒ**

Ngành: Kỹ thuật điện

Mã số: 9520201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2026

**Công trình được hoàn thành tại: Bộ môn Điện khí hóa,
Khoa Cơ điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất**

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS Đỗ Như Ý

2. TS Lê Anh Tuấn

Phản biện 1: PGS.TS Bùi Kiên Trung

Phản biện 2: TS Nguyễn Thạc Khánh

Phản biện 3: PGS.TS Trần Thanh Sơn

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Trường họp tại Trường Đại học Mỏ - Địa chất vào hồigiờ ... ngày ... tháng... năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc Gia,

- Thư viện Trường Đại học Mỏ - Địa chất

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Hiện nay, công suất và độ sâu khai thác mỏ ngày càng tăng, dẫn đến việc máy móc được sử dụng ngày càng nhiều trong khai thác mỏ nhằm thay thế sức lao động của con người. Việc cơ giới hóa khai thác dẫn tới sử dụng điện năng trong khai thác mỏ ngày một tăng làm cho tỉ trọng giá thành điện năng trên một tấn than khai thác ngày càng lớn.

Các giải pháp trên đã phát huy tác dụng nhất định trong việc sử dụng năng lượng tiết kiệm và hợp lý. Tuy nhiên, phần lớn điện năng tiêu thụ trong khai thác mỏ thuộc về các hệ truyền động điện. Trong khai thác mỏ ở Việt Nam năng lượng điện được tiêu thụ bởi các động cơ chiếm hơn 75% tổng điện năng tiêu thụ của mỏ. Để tiết kiệm năng lượng, một giải pháp thay thế động cơ không đồng bộ phòng nổ (Ex-IM) là sử dụng động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới (Ex-LSPMSM). Do vậy đề tài **“Nghiên cứu kết cấu rôto để cải thiện đặc tính làm việc của động cơ phòng nổ LSPMSM sử dụng trong khai thác mỏ hầm lò”** có ý nghĩa cấp thiết và thực tiễn cao.

2. Mục tiêu của luận án

a. Mục tiêu tổng quát

Đề xuất được kết cấu rôto khi chuyển đổi Ex-IM thành Ex-LSPMSM có đặc tính làm việc và hiệu suất cao.

b. Mục tiêu cụ thể

- Cải hoán thành công Ex-IM loại chiều cao tâm trục 160 mm thành Ex-LSPMSM.

- Cải thiện các thông số: đặc tính khởi động, đặc tính dòng điện của động cơ Ex-LSPMSM nhưng vẫn đảm bảo hiệu suất thiết kế của động cơ.

- Giảm thiểu chi phí giá thành sản xuất qua việc lựa chọn hợp lý nam châm vĩnh cửu sử dụng trong động cơ Ex-LSPMSM.

3. Tính mới và những đóng góp của nghiên cứu

** Về khoa học*

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

- Phân tích đánh giá tác dụng của dòng điện khởi động đến hiện tượng khử từ đối với NCVC trong quá trình khởi động.

- Lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.

** Về thực tiễn*

- Cải hoán động cơ Ex-IM công suất 15 kW, thành động cơ Ex-LSPMSM 15 kW - 3.000 vòng/phút có đặc tính làm việc phù hợp với các tải quạt gió, bơm nước trong khai thác mỏ hầm lò để nâng cao hiệu quả sử dụng điện năng. Giải pháp kỹ thuật đưa ra sẽ giúp ích cho các nhà thiết kế, chế tạo từng bước cải tiến để đưa động cơ Ex-LSPMSM vào trong khai thác mỏ.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu là: Động cơ Ex-LSPMSM có chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút được cải hoán từ động cơ Ex-IM có cùng thông số (công suất 15 kW, số đôi cực từ $2p = 2$) và có cùng chiều cao tâm trục 160 mm.

- Phạm vi nghiên cứu của luận án: Luận án tập trung vào việc nghiên cứu thiết kế cấu trúc và kích thước NCVC trong rôto động cơ, các thông số còn lại của động cơ được giữ nguyên.

5. Nội dung nghiên cứu

- Tổng quan vấn đề nghiên cứu
- Mô hình toán động cơ Ex-LSPMSM
- Xác định kết cấu rôto để cải thiện đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM
- Thực nghiệm và đánh giá kết quả

6. Phương pháp nghiên cứu

Để thực hiện mục tiêu của Luận án, tác giả sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

- Phương pháp nghiên cứu lý thuyết;
- Mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn.
- Phương pháp thực nghiệm.

7. Những điểm mới của luận án

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.
- Lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.
- Chế tạo thử nghiệm thành công động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút trong phòng thí nghiệm ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

Chương 1

TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về động cơ Ex-LSPMSM

Động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Ex-LSPMSM) có cấu tạo là động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (LSPMSM) [9] kết hợp với vỏ phòng nổ (Ex) để sử dụng trong môi trường cháy nổ như khai thác mỏ hầm lò.

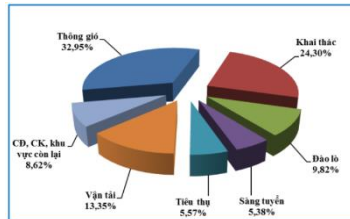
1.1.1. Cấu tạo động cơ Ex-LSPMSM

Động cơ Ex-LSPMSM là sự kết hợp của động cơ đồng bộ rôto nam châm gắn chìm (IPMSM) và động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc [10]. Đối với động cơ Ex-LSPMSM có cấu tạo kết hợp từ cả hai loại động cơ sao cho phát huy tối đa ưu điểm của cả hai loại động cơ nói trên [73].

1.1.2. Đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM

1.1.3. Ứng dụng động cơ LSPMSM trong khai thác than mỏ hầm lò

Trong khai thác than hầm lò, phần lớn điện năng tiêu thụ tập trung ở các hệ truyền động điện phòng nổ. Kết quả thống kê cho thấy phụ tải quạt gió mỏ chiếm tỷ lệ điện năng lớn nhất, khoảng 32,95% tổng điện năng tiêu thụ; tiếp theo là các nhóm tải vận tải, đào lò, sàng tuyển và tiêu thụ phụ trợ [3].



Hình 1.8. Tỷ lệ tiêu thụ điện năng của các khâu trong khai thác mỏ.

1.2. Tổng quan nghiên cứu về kết cấu động cơ LSPMSM

1.2.1. Tổng quan các nghiên cứu trong nước

- Nguyễn Vũ Thanh (2015) [13] tập trung nghiên cứu thuật toán thiết kế, chế tạo hoàn chỉnh động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới điện.

- Lê Anh Tuấn [9] đã xây dựng mô hình toán và mô phỏng đặc tính khởi động của LSPMSM có xét đến bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài cho động cơ 2,2 kW, 1.500 vòng/phút.

- Bùi Minh Định [2] nghiên cứu làm chủ tính toán, thiết kế và công nghệ chế tạo dây động cơ LSPMSM đến 11 kW, 1.500 vòng/phút đạt mức hiệu suất IE2 theo IEC 60034-30.

Nhìn chung, các công trình trong nước đã tạo nền tảng quan trọng về mô hình hóa, thiết kế và chế tạo LSPMSM, nhưng chủ yếu vẫn tập trung ở dải công suất nhỏ hơn, tốc độ thấp hơn và chưa đi sâu vào đối tượng phòng nổ 15 kW – 3.000 vòng/phút dùng trong mỏ hầm lò.

1.2.2. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới

a. Nghiên cứu về cấu trúc bố trí nam châm vĩnh cửu.

Đối với nội dung này có một số nghiên cứu như: [64] đã nghiên cứu kết cấu rôto của động cơ LSPMSM công suất 3,7 kW. Các tác giả đã đưa ra kết cấu của dạng 3 thanh nam châm vĩnh cửu được bố trí trong rôto. Nghiên cứu [37] trình bày một cấu trúc mới của mạch 2 cực LSPMSM - 3.000 vòng/phút (50/60Hz) công suất 37 kW. [28] đã thiết kế kết cấu nam châm vĩnh cửu trong rôto dạng cánh quạt...

b. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến thông số làm việc của động cơ LSPMSM.

Với những ưu điểm thấy rõ của động cơ LSPMSM, việc thiết kế động cơ loại này đã thu hút rất nhiều các nhà nghiên cứu. [78] tính toán thiết kế tối ưu động cơ LSPMSM dựa trên quá trình phân tích điện từ và phân tích nhiệt. [21] nghiên cứu cải tiến mômen, khả năng khởi động và chế độ vận hành xác lập của LSPMSM. [20] Nghiên cứu quá trình khởi động và mô hình toán LSPMSM. [82] nghiên cứu tiến hành so sánh động cơ không đồng bộ (KĐB) và động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) trên nền mô hình d-q của cả

hai loại máy. [69] đưa ra việc phân tích khử từ động cơ LSPMSM-1.500 vòng/phút và đề xuất một giải pháp để có thể giảm hiện tượng khử từ...

c. Nghiên cứu về giải pháp tối ưu thông số động cơ LSPMSM.

Có các nghiên cứu như: [79] trình bày một phương pháp phân tích và tối ưu hóa thiết kế cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM). [95] đưa ra trình tự thiết kế động cơ LSPMSM với các bước lựa chọn kích thước cơ bản tương tự như đối với động cơ IM, kết cấu rôto lồng sóc với nam châm gắn hình nan quạt. [28] tập trung giải quyết bài toán nâng cao hiệu suất và hệ số công suất cho động cơ LSPMSM công suất 7,5 kW thông qua tối ưu hóa cấu trúc rôto. [68] các tác giả tập trung tối ưu hóa kích thước nam châm nhằm giảm chi phí sản xuất động cơ LSPMSM...

Bảng 1.3. So sánh mức độ đóng góp của luận án với các hướng nghiên cứu tiêu biểu về động cơ LSPMSM

Tiêu chí	Nghiên cứu trước	Luận án này
Đối tượng nghiên cứu	Chủ yếu là LSPMSM cho ứng dụng công nghiệp thông thường.	Ex-LSPMSM dùng cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong mỏ hầm lò.
Dải công suất và tốc độ	Phần lớn tập trung ở công suất nhỏ hoặc trung bình; nhiều nghiên cứu ở 1.500 vòng/phút.	Nghiên cứu đối tượng 15 kW, 3.000 vòng/phút.
Kết cấu rôto và khử từ	Chủ yếu khảo sát cấu hình rôto hoặc bố trí nam châm riêng lẻ; ít phân tích khử từ gắn với đối tượng ứng dụng cụ thể.	Đề xuất rôto 3 thanh NCVC không có cầu từ; phân tích ảnh hưởng của dòng điện khởi động đến khử từ và lựa chọn NdFeB loại N38.

1.3. Khoảng trống của nghiên cứu

Từ các nhận xét trên có thể thấy rằng, khoảng trống nghiên cứu chủ yếu tập trung ở bài toán lựa chọn kết cấu rôto phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM công suất trung bình, tốc độ cao, có khả năng ứng dụng trong điều kiện khai thác mỏ hầm lò. Trên cơ sở đó, luận án tập trung nghiên cứu phương án kết cấu rôto để cải hoán động cơ Ex-IM có chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút thành động cơ Ex-LSPMSM phù hợp cho các phụ tải quạt gió và bơm nước trong mỏ hầm lò. Nội dung nghiên cứu không chỉ hướng tới nâng cao hiệu suất mà còn tập trung làm rõ ảnh hưởng của kết cấu rôto và thông số nam châm vĩnh cửu đến đặc tính khởi động, chất lượng dòng điện, khả năng đồng bộ và độ tin cậy làm việc của động cơ.

1.4. Kết luận

- LSPMSM là động cơ lai giữa IM và PMSM nên tận dụng được các ưu điểm của hai loại động cơ trên như có thể khởi động trực tiếp từ lưới do có lồng sóc ở rôto hay làm việc dài hạn ở tốc độ đồng bộ nên không có tổn hao rôto từ đó cải thiện hiệu suất của động cơ và được liệt vào dạng động cơ có hiệu suất cao và siêu cao. Tuy nhiên nhược điểm của loại động cơ này là mômen khởi động thấp.

- Với xu hướng tiết kiệm năng lượng ngày nay Ex-LSPMSM đang được dần thay thế cho động cơ Ex-IM ở một số phụ tải có thông số làm việc phù hợp như quạt gió và bơm thoát nước.

- Các nghiên cứu về động cơ LSPMSM trước đây thường tập trung vào hai hướng là thiết kế tối ưu LSPMSM ngay từ đầu hoặc cải hoán IM thành loại LSPMSM và áp dụng cho dãy động cơ LSPMSM có công suất nhỏ dưới 7,5 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút chưa có công trình nào nghiên cứu đến loại động cơ công suất 11 kW-18.5 kW tốc độ 3.000 vòng/phút (loại chiều cao tâm trục 160 mm, một cặp cực từ)

đây là loại động cơ sử dụng nhiều nhất trong các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ.

Với những vấn đề đã nêu ở trên, luận án sẽ tập trung vào nghiên cứu kết cấu rôto phù hợp để cải hoán động cơ Ex-IM loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút sang động cơ Ex-LSPMSM phù hợp cho bơm nước và quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút.

Nhiệm vụ đặt ra phải phân tích được kết cấu bố trí nam châm, kích thước thông số của nam châm để cải thiện được đặc tính khởi động, mômen, dòng điện và sức điện động ngược của Ex-LSPMSM.

CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH TOÁN ĐỘNG CƠ LSPMSM

2.1. Mô hình toán LSPMSM

Mô hình Ex-LSPMSM Honsinger đề xuất [83].

$$\begin{cases} u_d = r_1 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_q \\ u_q = r_1 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_d \\ 0 = r'_d i'_d + \frac{d\Psi'_d}{dt} \\ 0 = r'_q i'_q + \frac{d\Psi'_q}{dt} \\ M_{dt} = \frac{m}{2} \cdot p \cdot (\Psi_d i_d - \Psi_q i_q) \end{cases} \quad (2.1)$$

Nếu động cơ chỉ có kích từ NCVC

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + L_{md} i_{2d} + \Psi_m \\ \Psi_q = L_q i_q + L_{mq} i_{2q} \\ \Psi_{2d} = L_{2d} i_{2d} + L_{md} i_d + \Psi_m \\ \Psi_{2q} = L_{2q} i_{2q} + L_{mq} i_q \end{cases} \quad (2.2)$$

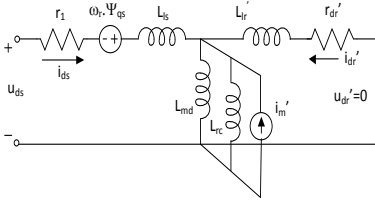
Hệ phương trình điện áp của Ex-LSPMSM theo Honsinger [83].

$$\text{Điện áp stato} \quad \begin{cases} u_{ds} = r_1 i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} \\ u_{qs} = r_1 i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} \end{cases} \quad (2.3)$$

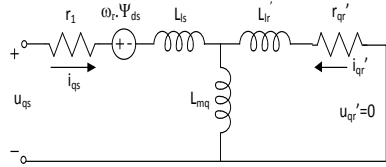
$$\text{Điện áp rôto} \quad \begin{cases} u'_{dr} = r'_{dr} i'_{dr} + \frac{d\Psi'_{dr}}{dt} = 0 \\ u'_{qr} = r'_{qr} i'_{qr} + \frac{d\Psi'_{qr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{Từ thông stato} \quad \begin{cases} \Psi_{ds} = (L_{ls} + L_{md}) i_{ds} + L_{md} i'_{dr} + \Psi'_m \\ \Psi_{qs} = (L_{ls} + L_{mq}) i_{qs} + L_{mq} i'_{qr} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\text{Từ thông rôto} \quad \begin{cases} \Psi'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_{md} (i_{ds} + i'_{dr}) + \Psi'_m \\ \Psi'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_{mq} (i_{qs} + i'_{qr}) \end{cases} \quad (2.6)$$



Hình 2.1. Sơ đồ mạch điện thay thế trục d của Ex-LSPMSM [83]



Hình 2.2. Sơ đồ mạch điện thay thế trục q của Ex-LSPMSM [83]

Mômen điện từ của LSPMSM được xác định [25]:

$$M_{dt} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\underbrace{(L_{md} i'_{dr} i_{qs} - L_{mq} i'_{qr} i_{ds})}_{\text{thành phần mômen không đồng bộ}} + \underbrace{\Psi'_m i_{qs}}_{\text{thành phần mômen kích từ}} + \underbrace{(L_{md} - L_{mq}) i_{ds} i_{qs}}_{\text{thành phần mômen từ trở}} \right] \quad (2.7)$$

$$\text{Mômen điện từ: } M_{dt} = M_{kdb} + M_{kt} + M_{ttr} \quad (2.8)$$

2.2. Mô hình hóa LSPMSM bằng phương pháp phần tử hữu hạn

2.2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

Theo phương trình Maxwell - Faraday viết cho trường hợp của động cơ điện ở trạng thái xác lập như sau [5],[7].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (2.10)$$

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

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2.11)$$

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

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.12)$$

Thay (2.11) và (2.12) vào (2.10), ta thu được phương trình.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.13)$$

Phương trình (2.13) 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:
$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) + J = 0 \quad (2.14)$$

Giải (2.14), tìm được $\vec{A}$, sau đó dựa vào (2.11) và (2.12) để tính được mật độ từ thông B và cường độ từ trường H như sau:
$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.15)$$

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:
$$U = R_{dc} i + L \frac{di}{dt}; I_{dc} = \frac{U}{R_{dc}} \quad (2.16)$$

2.2.2. Các phần mềm FEM phổ biến trong nghiên cứu máy điện

2.2.3. Mô hình hóa LSPMSM trên phần mềm ứng dụng FEM

Động cơ Ex-LSPMSM có các thông số: Công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút và có kích thước được cho trong bảng 2.1 [10]:

Bảng 2.1. Thông số động cơ Ex-LSPMSM công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài Stato	D _{out}	245	mm
Đường kính trong Stato	D _{in}	152	mm
Đường kính ngoài Rôto	D'	151	mm
Đường kính trục Rôto	D _t	52	mm
Vật liệu thép Stato	Steel 1008		
Số lượng rãnh stato	Z ₁	36	Rãnh
Số lượng rãnh rôto	Z ₂	28	Rãnh
Chiều dài khe hở không khí	δ	0,5	mm
Điện áp nguồn	U _n	380/660	V
Tần số	f	50	Hz
Loại NCVC	NdFeB	N38SH	
Kích thước 1 thanh (dài.rộng.dây)	mm	35.34.8	

Việc tính toán sơ bộ kích thước của nam châm vĩnh cửu trong động cơ Ex-LSPMSM thường được tính toán theo các bước sau [5]:

- Tính toán lựa chọn sơ bộ chiều rộng cực đại của nam châm W_m :

$$W_{\max} = \sqrt{2} R_{1\max} \quad (2.17)$$

- Tính toán thể tích tối thiểu nam châm được sử dụng

$$V_m = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_{fd} \cdot (1 + k_{EC}) \cdot P_{dm}}{\pi^2 \cdot \xi \cdot 2 \cdot p \cdot f \cdot B_r \cdot H_c} \quad (2.18)$$

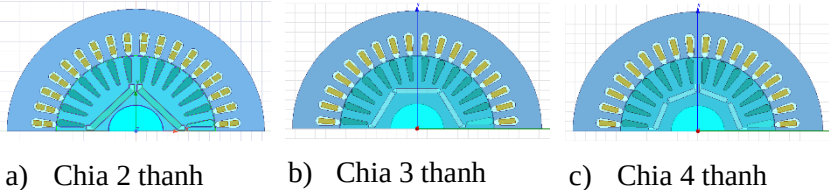
Từ thể tích nam châm V_m và chiều rộng cực đại $b_{\max}$ như trên tính được độ dày tối thiểu của nam châm $h_{\min}$:

$$h_{\min} = \frac{V_m}{H_m \cdot b_{\max}} \quad (2.19)$$

* Nhận xét: Sơ bộ tính toán đối với động cơ Ex-LSPMSM 15 kW tính toán được chiều dày nam châm $h_{\min} = 7,3 \text{ mm}$, $b_{\max} = 34 \text{ mm}$. Khảo sát đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM $n = 3.000 \text{ vòng/phút}$, $P_{dm} = 15 \text{ kW}$, $U_{dm} = 380/660 \text{ V}$, sử dụng loại nam châm vĩnh cửu $N=38$ với độ dày nam châm lựa chọn sơ bộ là: $h = 7 \text{ mm}$. Nhằm nghiên cứu các đặc tính của Ex-LSPMSM, tác giả sử dụng phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng LSPMSM. Các kết quả mô phỏng nhằm mục đích nghiên cứu và đánh giá thiết kế của động cơ.

2.3. Phân tích lựa chọn kết cấu rôto bằng phương pháp phần tử hữu hạn

2.3.1. Lựa chọn loại hình dạng thanh nam châm



Hình 2.6. Cấu hình LSPMSM – 2 cực.

(a), (b) Mô hình dựa trên NCVC1; (c), (d) Mô hình dựa trên NCVC2.

Dựa trên Hình 2.14, các biểu thức toán học sau đây có thể được xây dựng: $\Phi_{r1} = B_r A_{p1} = B_r L_{stk} w_{p1}$ (2.21)

$$\Phi_{r2} = B_r A_{p2} = B_r L_{stk} w_{p2} \quad (2.22)$$

Các tham số từ trở khác nhau và diện tích khe hở không khí có thể được biểu diễn như sau:

$$R_{g1} = \frac{g_o}{\mu_o A_{g1}} \quad (2.23)$$

$$R_{g2} = \frac{g_o}{\mu_o A_{g2}} \quad (2.24)$$

Dựa trên hình dạng rôto của động cơ Ex-LSPMSM, góc cung cực từ ($\theta_\square$) được xác định dựa trên các đoạn nam châm vĩnh cửu

trong mỗi cực, diện tích khe hở không khí hiệu dụng được biểu diễn

$$\text{theo công thức sau [27]: } \frac{\theta_m}{2} = (\theta_{m1} + \theta_{m2}) \quad (2.31)$$

$$\alpha_m = \theta_a + \theta_b; \hat{\theta}_m = \theta_c + \theta_d \quad (2.32)$$

$$A_g = A_{g1} + A_{g2} \quad (2.33)$$

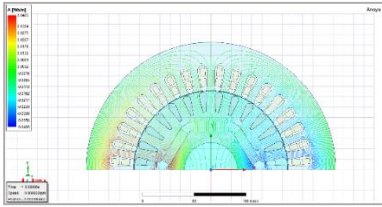
Từ thông rò trong các cầu nối có thể được ước lượng theo công thức sau [27]: $\Phi_{bri} \approx B_{sat} A_{bri}$ (2.39)

Mô hình tương đương phân bố từ thông cho thấy phân bố mật độ từ thông khe hở không khí theo bán kính rôto được xác định bằng mô hình giải tích có độ tương đồng đáng kể với kết quả thu được từ mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Do đó, có thể giả định rằng hai kết quả này là tương đương nhau. $B_{g1} \approx B_{g2} = B_g$ (2.52)

$$B_g(L_{gp}, \alpha_m) = \frac{B_{r1} A_{m1}}{A_{g1} [1 + \gamma(1 + \alpha + \beta)]} \approx \frac{B_{r2} A_{m2} R_{m2}}{A_{g2} (R_{g2} + R_{m2})} \quad (2.53)$$

$$\text{Với } \gamma = 0,31; \alpha = 0,55; \beta = 1,58; B_{r1} = 1,23T; \frac{A_m}{A_g} = 1 \rightarrow B_g = 0,624(T)$$

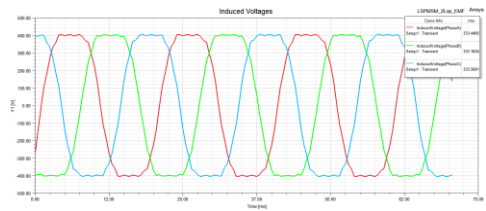
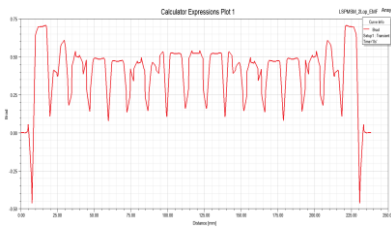
2.3.2.2. Mô hình FEM xác định từ thông khe hở không khí



Hình 2.16. Phân bố từ trường trong động cơ không có cầu từ

Bảng 2.5. So sánh mật độ từ thông khe hở không khí và sức điện động không tải giữa giá trị tham chiếu thiết kế và kết quả mô phỏng FEM

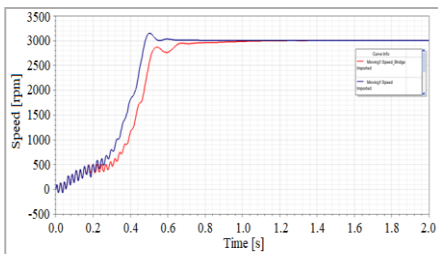
Thông số	Tính toán giải tích	Mô phỏng FEM	Sai số $\Delta E\%$
$B_g(T)$	0,624	0,59	4,8
$E_{1NB}(V)$	380	395	3,8



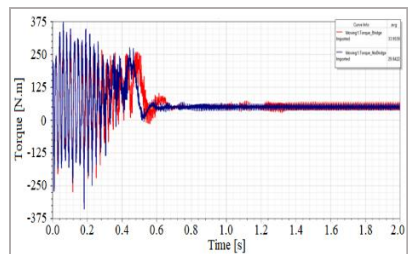
Hình 2.17. Từ thông khe hở không khí (a) và sức điện động không tải B-EMF (b)

* Nhận xét: Sai số giữa mô hình giải tích và mô phỏng FEM đều nhỏ hơn 5%, cho thấy mô hình phần tử hữu hạn xây dựng trong Ansys/Maxwell có độ tin cậy tốt, phù hợp với mô hình giải tích. Vì vậy, trong luận án sẽ sử dụng mô hình FEM để nghiên cứu Ex-LSPMSM thay thế cho mô hình giải tích.

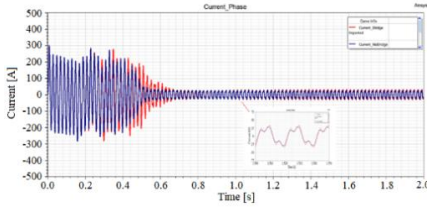
2.3.2.3. Lựa chọn kết cấu rãnh bố trí nam châm vĩnh cửu



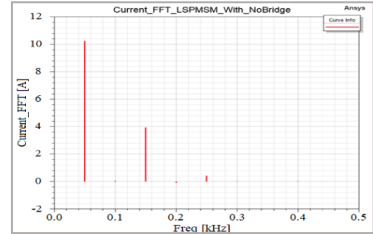
Hình 2.19. Đặc tính khởi động của động cơ



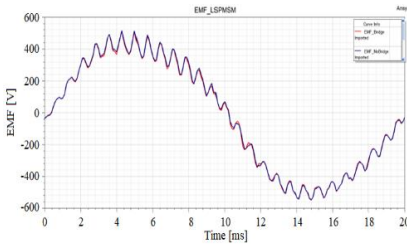
Hình 2.20. Đặc tính mômen xoắn của động cơ



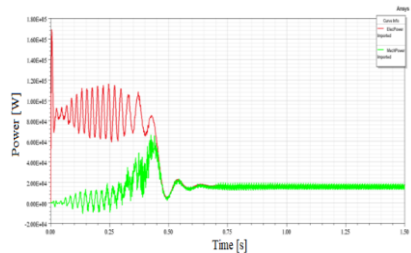
Hình 2.21. Đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành trạng thái ổn định



Hình 2.22. Phân tích FFT sóng hài dòng điện



Hình 2.23. Đặc tính sức điện động không tải.



Hình 2.24. Công suất điện từ và công suất cơ trong quá trình mô phỏng Ex-LSPMSM

* Nhận xét: Dựa trên phần mềm mô phỏng Ansys/Maxwell đã chỉ ra rằng cấu hình rôto không có cầu từ cho phép Ex-LSPMSM có các thông số làm việc tốt hơn. Cấu trúc này được lựa chọn để chế tạo và đánh giá thực nghiệm.

2.4. Kết luận

Chương 2 đã xây dựng và phân tích toàn diện mô hình toán động cơ Ex-LSPMSM, hình thành cơ sở lý thuyết và công cụ mô phỏng phục vụ thiết kế và thực nghiệm ở các chương tiếp theo.

Trên cơ sở mô hình toán của Ex-LSPMSM có xét đến ba thành phần mômen đặc trưng: mômen không đồng bộ trong giai đoạn khởi động, mômen kích từ của nam châm vĩnh cửu, và mômen từ trở.

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được ứng dụng trong phần mềm ANSYS/Maxwell nhằm mô phỏng phân bố từ trường, mômen điện từ và đặc tính khởi động của động cơ. Kết quả so sánh giữa mô

hình giải tích và mô hình số cho sai số dưới 5%, chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy cao của phương pháp mô phỏng được đề xuất.

Dựa trên mô hình FEM, luận án đã khảo sát các phương án kết cấu rôto khác nhau theo số lượng và cách bố trí thanh nam châm (2, 3 và 4 thanh), cũng như ảnh hưởng của cầu từ. Kết quả chỉ ra rằng cấu hình rôto ba thanh nam châm, không có cầu từ là tối ưu nhất với thời gian vào đồng bộ ngắn ($t_s = 0,45$ s), gợn mômen thấp ($RipT = 23,1\%$), tổng méo hài dòng điện nhỏ ($THDi = 14,3\%$) và hiệu suất cao ($\eta = 93,3\%$). Phương án này giúp giảm từ thông rò, tăng mômen khởi động và cải thiện đặc tính điện từ tổng thể.

Như vậy, chương 2 đã xác lập được nền tảng lý thuyết và công cụ mô phỏng đáng tin cậy cho việc thiết kế kết cấu rôto của Ex-LSPMSM, góp phần khẳng định tính khả thi và hiệu quả của mô hình toán kết hợp mô hình phần tử hữu hạn trong nghiên cứu và phát triển động cơ Ex-LSPMSM. Các kết quả này được sử dụng làm cơ sở lựa chọn thông số của kết cấu rôto trong chương 3.

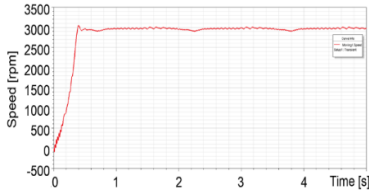
CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH LỰA CHỌN THÔNG SỐ CẤU TRÚC RÔTO CỦA LSPMSM

3.1. Khử từ của nam châm vĩnh cửu

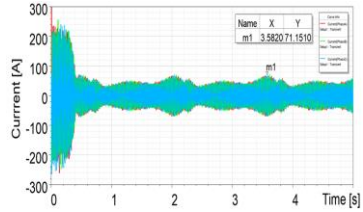
3.1.1. Nam châm vĩnh cửu

3.1.2. Phân tích quá trình khử từ của nam châm vĩnh cửu

Để mô hình hóa hiện tượng khử từ của nam châm, cần thiết lập mối quan hệ giữa B , H và M đối với vật liệu từ. Mối quan hệ này được mô tả thông qua đường cong B – H . $B = \mu_0(H + M)$ (3.2)

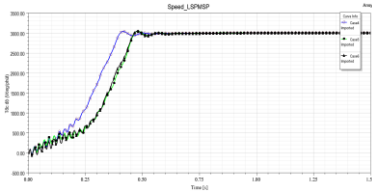


Hình 3.8. Đặc tính tốc độ của động cơ bị khử từ một phần không đối xứng.

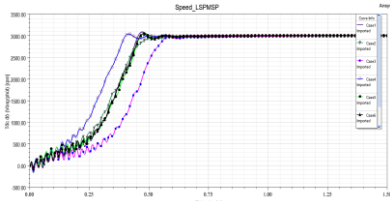


Hình 3.9. Đặc tính dòng điện của động cơ bị khử từ một phần.

* Nhận xét: Kết quả nghiên cứu trên mô hình mô phỏng cho thấy: trong quá trình khởi động Ex-LSPMSM với cấu trúc 3 thanh, hai thanh ngoài dễ bị khử từ nhất, mức độ khử từ của các thanh không giống nhau.



Hình 3.13. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở hai cặp NCVC đối xứng nhau



Hình 3.14. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ của NCVC ở hai dạng một và hai cặp NCVC đối xứng nhau

Bảng 3.3. Hiệu suất của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở một cặp NCVC đối xứng

STT	Hiệu suất $\eta(\%)$	STT	Hiệu suất $\eta(\%)$
Trường hợp 1	91,2	Trường hợp 4	90,2
Trường hợp 2	92,8	Trường hợp 5	92,5
Trường hợp 3	93,3	Trường hợp 6	92,8

* Nhận xét: Từ bảng 3.3 ta nhận thấy rằng, trường hợp 3 ở đây sẽ cho hiệu suất cao nhất (93,3%) nhưng đặc tính khởi động kém nhất. Ngược lại đối với trường hợp 4 có đặc tính khởi động tốt nhất nhưng hiệu suất lại thấp nhất (90,2%).

3.1.3. Điều kiện đảm bảo không bị khử từ NCVC của LSPMSM

Việc tính toán, thiết kế NCVC sao cho tránh được hiện tượng khử từ trong quá trình khởi động của Ex-LSPMSM là rất quan trọng. Có hai loại đường cong khử từ thường được sử dụng: mật độ từ thông qua

nam châm là hàm của trường từ (đường cong BH). Trường hợp xấu nhất của quá trình khử từ không phục hồi là tất cả các sức từ động có chiều ngược với hướng của F_{pm} . Tổng hợp bốn sức từ động F_s , F_r , F_g và F_{pm} sinh ra sức từ động tổng F , được xác định như sau [34]:

$$F = F_{pm} + F_s + F_r + F_g \quad (3.9)$$

Để tránh khử từ không phục hồi như trên đã phân tích thì bề dày NCVC phải đảm bảo theo công thức sau [34]:

$$l \leq l_M \cdot \frac{2}{m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot H_C}{\sqrt{2} \cdot N \cdot k_w} \quad (3.13)$$

$$l \cdot \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot N \cdot k_w}{2 \cdot p \cdot H_C} \leq l_M \quad (3.14)$$

3.2. Phân tích lựa chọn tham số của nam châm vĩnh cửu

3.2.1. Phương pháp phân tích tham số

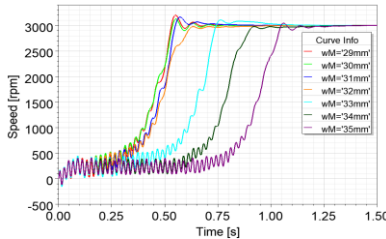
3.2.2. Ứng dụng phương pháp phân tích tham số để lựa chọn thông số NCVC:

$$V_M = \frac{2k_{of}(1+k_{EC})P_2}{\pi^2 \xi 2pfB_r H_C} \quad (3.27)$$

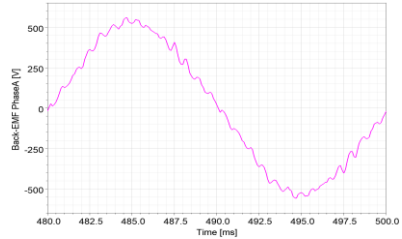
$$l_M \geq \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} N k_{ws}}{2 p H_C} I_p \quad (3.28)$$

Với động cơ Ex-LSPMSM 15 kW nghiên cứu có: $m = 3$; $k_{ws} = 0,92$; $N = 120$ vòng/ph; $H_C = 950000$ A/m; $I = 26,2$ A $\rightarrow I_p = 2,2 \cdot 26,2 = 57,6$ (A)

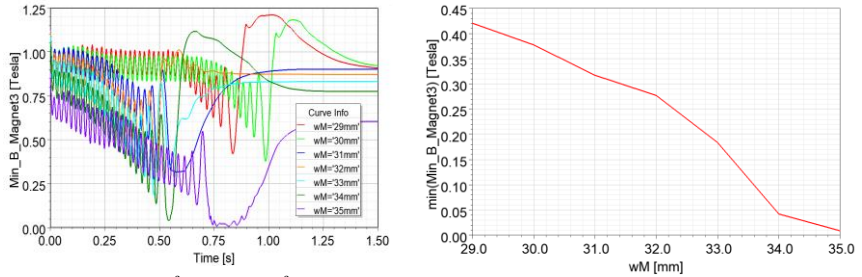
$$\rightarrow l_M \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{3,14} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 120 \cdot 0,92}{2 \cdot 950000} \cdot 57,6 = 9 \text{ mm} \rightarrow \text{chọn } l_M = 9 \text{ mm}$$



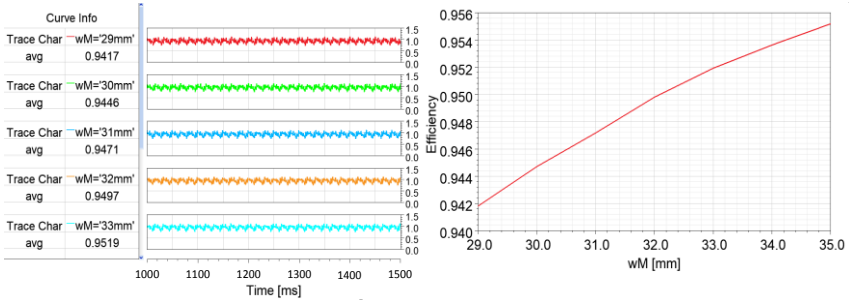
Hình 3.20. Đặc tính tốc độ khởi động của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p = 2$



Hình 3.25. Dạng sóng B-EMF của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p=2$ với $wM = 35$ mm



Hình 3.23. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCV3



Hình 3.26. Đặc tính hiệu suất ở trạng thái vận hành xác lập của Ex-LSPMSM

Bảng 3.8. Hiệu suất làm việc của Ex-LSPMSM ở trạng thái vận hành xác lập

w_M (mm)	Hiệu suất η	w_M (mm)	Hiệu suất η
29	0.9417	33	0.9519
30	0.9446	34	0.9536
31	0.9471	35	0.9551
32	0.9497		

* Nhận xét: Phân tích trên cho thấy rằng để đảm bảo thông số làm việc và tránh nguy cơ khử từ có thể xảy ra trong quá trình khởi động, có thể lựa chọn kích thước NCV3 với chiều dày 9 mm và chiều rộng 33 mm khi bội số dòng khởi động cao hoặc chiều rộng 34 mm khi bội số dòng khởi động nhỏ (đường đặc tính tải không bị suy giảm về phía trái góc $I/4$), khi đó vẫn đảm bảo hiệu suất động cơ ở giá trị 95,19 %, hoặc 95,36%.

3.3. Phân tích kiểm tra lựa chọn loại NCVC

3.3.1. Mật độ từ thông do NCVC sinh ra trong khe hở không khí

Từ dẫn mạch từ ở chế độ không tải được xác định:

$$\Lambda_t = \Lambda_\delta + \Lambda_\sigma = k_{\sigma M} \cdot \Lambda_\delta \quad (3.39)$$

$$\text{Độ từ dẫn của NCVC được xác định: } \Lambda_M = \frac{\mu_0 \mu_{rec} S_M}{h_m} \quad (3.40)$$

Như vậy, từ thông của khe hở không khí được xác định:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_M / k_{\sigma M} + \Lambda_\delta} \Phi_{rem} \quad (3.41)$$

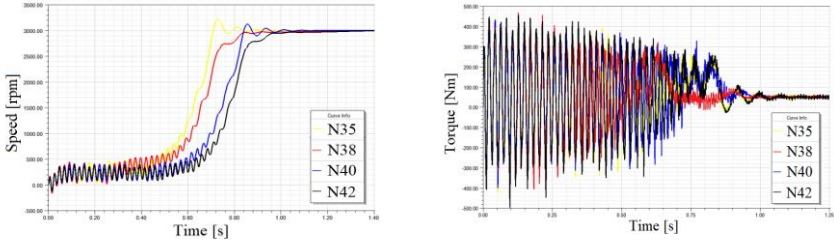
Từ thông khe hở không khí ở chế độ không tải được xác định:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{\Phi_{rem}}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_{C \frac{C_\Phi}{C_p}}} \quad (3.47)$$

Mật độ từ thông khe hở không khí B_{0r} ở chế độ không tải

$$B_{0r} = \frac{B_{rem}}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_{C \frac{C_\Phi}{C_p}}} \quad (3.50)$$

3.3.2. Phân tích lựa chọn loại NCVC



Hình 3.31. Đặc tính khởi động và mômen của Ex-LSPMSM.

Bảng 3.12. Kết quả tính toán đặc tính dòng điện và sức điện động ngược.

Loại	t_{trans} (s)	I_{max} (A)	THD_i (%)	E_{1NB} (V)	ΔE (%)
N35	0,90	308	17,8	389	+2,3
N38	0,95	314	16,1	400	+5,2
N40	0,80	312	14,3	410	+7,1
N42	0,85	337	17,6	420	+10,5

* Nhận xét: Các kết quả đưa ra cho thấy khi sử dụng nam châm N38, N40 cho các kết quả khá tương đồng, chênh lệch nhau không lớn. Đồng thời với đó là giá thành của nam châm N40 cao hơn giá thành của nam châm N38. Do vậy, trong luận án dùng nam châm N38 là phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM 160 mm.

3.4. Kết luận

Chương 3 đã trình bày một cách hệ thống và toàn diện ảnh hưởng khử từ đến hoạt động của động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (Ex-LSPMSM). Kết hợp phân tích lý thuyết, mô phỏng phần tử hữu hạn và đánh giá số liệu để xác định ảnh hưởng của tham số hình học nam châm lên trạng thái từ hóa và khả năng đồng bộ của động cơ.

Trước hết, chương 3 đã phân tích đặc tính khử từ của vật liệu nam châm NdFeB-N38 thông qua đường cong khử từ BH và JH, làm rõ vai trò của điểm uốn trong việc xác định vùng làm việc an toàn. Tại 20°C, điểm knee của vật liệu ở mức khoảng 0,05 T, trong khi ở 60°C tăng lên xấp xỉ 0,3 T, cho thấy nhiệt độ làm việc của rôto là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng giữ từ của nam châm.

Đồng thời với đó, dòng điện khởi động cũng ảnh hưởng lớn đến vấn đề khử từ của NCVC. Trong chương 3 đã phân tích được khả năng khử từ mất đối xứng khi khởi động Ex-LSPMSM cũng như ảnh hưởng của hiện tượng khử từ đối xứng đến quá trình vận hành của động cơ. Từ đó xác định điều kiện giới hạn chiều dày, chiều rộng để tránh hiện tượng khử từ. Kết quả mô phỏng trường điện từ cho thấy chiều rộng nam châm w_M ảnh hưởng đáng kể đến phân bố từ thông trong khe hở không khí và khả năng xảy ra khử từ.

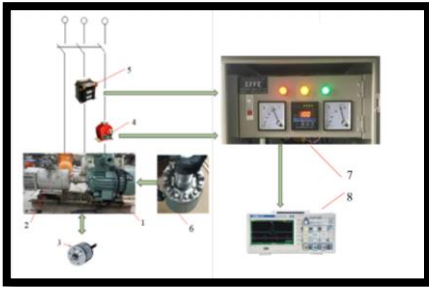
Từ kết quả phân tích lý thuyết và chứng minh trên kết quả mô phỏng đã lựa chọn được thông số phù hợp của NCVC. Trong đó, để tránh hiện tượng khử từ xảy ra thì chiều dày của NCVC lựa chọn là l_M

= 9 mm. Để đảm bảo được nguồn kích từ do NCVC tạo ra thì lựa chọn được bề rộng NCVC $W_M = 33$ mm và chủng loại NCVC lựa chọn là N38.

CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Chế tạo, lắp ráp động cơ Ex-LSPMSM

4.2. Mô hình thí nghiệm

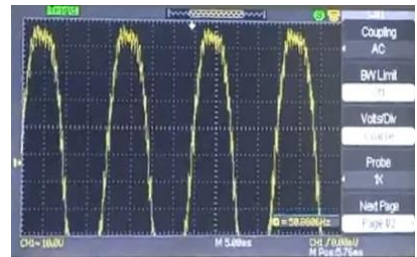


Hình 4.2. Mô hình thử nghiệm trong phòng thí nghiệm

4.3. Kết quả thực nghiệm



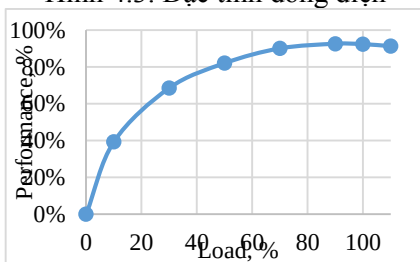
Hình 4.3. Đặc tính dòng điện



Hình 4.4. Kết quả đo sức điện động

Bảng 4.3. Bảng so sánh kết quả I, EMF, η khi thực nghiệm

TT	Giá trị		Mô phỏng	Thực nghiệm	Sai số (%)
1	I	(A)	26,2	25,4	3,1
2	EMF	(V)	365,5	357,9	2,1
3	η	(%)	96,6	92,9	3,8



Hình 4.5. Đặc tính hiệu suất của Ex-LSPMSM

4.4. Kết luận

Chương 4 đã thực hiện chế tạo và thí nghiệm động cơ Ex-LSPMSM công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút trên cơ sở phương án kết cấu rôto được lựa chọn từ các chương trước. Kết quả thực nghiệm cho thấy động cơ vận hành ổn định, dạng sóng dòng điện ở chế độ xác lập gần hình sin, sức điện động không tải có dạng gần sin và hiệu suất đạt giá trị cao ở vùng tải gần định mức.

Về mặt định lượng, kết quả thực nghiệm cho thấy đặc tính dòng điện cho giá trị biên độ dòng điện là 25,4 A giảm hơn dòng mô phỏng 26,2 A (sai khác 3,1%). Biên độ sức điện động ngược đạt 357,9 V sai khác 2,1%. Ngoài ra, dạng sóng của dòng điện và sức điện động ngược có nhiều thành phần sóng hài như mô phỏng đã chỉ ra. Thực nghiệm cũng đã chứng minh hiệu suất của động cơ đạt được 92,9% (sai khác 3,8%) so với 96,6% đạt được khi mô phỏng. Điều này là sai số do công nghệ chế tạo và quá trình đo tạo ra.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã nghiên cứu một cách có hệ thống động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới (LSPMSM) tốc độ 3.000 vòng/phút, công suất 15 kW, hướng tới ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước trong khai thác mỏ hầm lò. Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án đã chỉ ra khoảng trống nghiên cứu đối với động cơ LSPMSM công suất trung bình, tốc độ cao, có yêu cầu vận hành tin cậy và phù hợp với điều kiện làm việc khắc nghiệt của ngành mỏ tại Việt Nam.

Luận án đã nghiên cứu một cách có hệ thống động cơ có chiều cao tâm trục 160 mm nói chung và đối tượng cụ thể là loại 3K160M-2 (15 kW) Ex-LSPMSM, hướng tới ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước trong khai thác mỏ hầm lò.

Nội dung của luận án tập trung vào giải quyết các vấn đề:

- Luận án đã khảo sát các phương án thiết kế khác nhau theo số lượng và cách bố trí NCVC dạng 2,3 và 4 thanh cũng như kết cấu rãnh bố trí NCVC có cầu từ và không có cầu từ. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng cấu hình rôto 3 thanh NCVC không có cầu từ là phù hợp nhất với thời gian đồng bộ hóa ngắn ($t_s = 0,45$ s), độ gợn sóng mômen thấp ($RipT = 23,1\%$), tổng méo hài dòng điện nhỏ ($THDi = 14,3\%$) và hiệu suất cao ($\eta = 93,3\%$).

- Luận án đã phân tích đặc tính khử từ của NCVC và xác định điều kiện tránh khử từ đối với NCVC. Từ sự phân tích kể trên, kết quả tính toán được kích thước NCVC phù hợp để chế tạo là $35 \times 33 \times 9$ mm và loại N38 được sử dụng để chế tạo Ex-LSPMSM.

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng, một động cơ Ex-LSPMSM thực nghiệm đã được chế tạo và thử nghiệm trong phòng thí nghiệm. Kết quả thực nghiệm cho thấy các đặc tính dòng điện, điện áp và hiệu suất của động cơ phù hợp với kết quả mô phỏng, sai lệch nằm trong giới hạn cho phép. Hiệu suất cực đại của động cơ đạt khoảng 92,9% ở vùng tải gần định mức, củng cố tính hợp lý của mô hình nghiên cứu và cho thấy triển vọng ứng dụng thực tế của phương án thiết kế đề xuất.

Những đóng góp mới của luận án bao gồm:

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho động cơ Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ.

- Sử dụng phương pháp phân tích tham số để lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho động cơ Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.

- Chế tạo thử nghiệm thành công động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Ex-LSPMSM) 15 kW trong phòng thí nghiệm ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

CÁC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

- [1] Đỗ Như Ý, Trịnh Biên Thùy (2022), 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, Tạp chí Công nghiệp Mỏ, số 6, tr. 56–62.
- [2] Đỗ Như Ý, Bùi Ngọc Hùng, Trịnh Biên Thùy, Lưu Văn Uy (2023), Phân tích kinh tế – kỹ thuật sử dụng động cơ hiệu suất cao trong khai thác mỏ, Tạp chí Công Thương, số 50 (tháng 2), tr. 32–34.
- [3] Trịnh Biên Thùy, Lê Anh Tuấn, Đỗ Như Ý (2023), Ảnh hưởng của bề dày nam châm vĩnh cửu đến đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút, Hội nghị Khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện – Tự động hóa (MEAE 2023), Kỷ yếu hội nghị.
- [4] Đỗ Như Ý, Trịnh Biên Thùy, Bùi Đức Hùng, Lê Anh Tuấn (2023), Nghiên cứu ảnh hưởng của suy giảm từ đến đặc tính làm việc ở chế độ xác lập của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp 2 cực, 15 kW, Hội nghị Khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện – Tự động hóa (MEAE 2023), Kỷ yếu hội nghị.
- [5] Thuy, T. B., Cuong, N. X., Tuan, L. A., Do, N. Y. (2023), Effect of Permanent Magnet Structure on Working Characteristics of LSPMSM 3000 rpm, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1275, no. 1, p. 012049.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012049>
(Index: Scopus)
- [6] Do, N. Y., Thuy, T. B., Tuan, L. A., Cuong, N. X. (2024), Rotor Configuration for Improved Working Characteristics of LSPMSM in Mining Applications, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, no. 3, pp. 79–86.

DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/079> (Scopus, ESCI (Q3))

- [7] Do, N. Y., Ngo, X. C., Le, A. T., Do, A. T., Thuy, T. B. (2024), Analysis of Permanent Magnet Demagnetization during the Starting Process of a Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor, Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 14, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.8576> (Scopus (Q2))
- [8] Thuy, T. B., Cuong, N. X., Tuan, L. A., Do, N. Y. (2024), Influence of the NdFeB Permanent Magnet on Working Characteristics of LSPMSM, International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA), Springer Proceedings. (Scopus (Q4))
- [9] Le Anh, T., Do Nhu, Y., Trinh Bien, T., & Nguyen Van, H. (2024). Studying on current and speed characteristics of LSPMSM of 15 kW, two-pole under remanence reduction of permanent magnets. In Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Electronics and Automation (EEA 2024).
- [10] Le Anh Tuan, Trinh Bien Thuy, Do Nhu Y (2025), "Parametric analysis to optimize a tradeoff between the efficiency and demagnetization of LSPMSM". International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 563 Vol. 16, No. 2, April 2026, pp. 563~576 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v16i2.pp563-576.