

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG DẠNG RÃNH VÀ VẬT LIỆU THANH DẪN RÔTO ĐẾN ĐẶC TÍNH ĐỘNG CƠ LSPMSM DỰA TRÊN PHẦN MỀM ANSYS MAXWELL**Trần Thanh Tuyền¹, Trần Hữu Phúc^{2*}, Nguyễn Thị Phúc¹, Trần Văn Thương¹**¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh²Trường Đại học Công nghệ Đông Á**Email: phucth@eaut.edu.vn***TÓM TẮT**

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) được thiết kế dựa trên kết cấu rôto lồng sóc của động cơ không đồng bộ. Mục tiêu của bài báo này là áp dụng phần mềm Ansys Maxwell để đánh giá ảnh hưởng của một số loại hình dạng rãnh rôto lồng sóc đến quá trình động của động cơ LSPMSM. Phương pháp này giúp đánh giá ảnh hưởng hình dạng cũng như vật liệu chế tạo thanh dẫn rôto đến đặc tính với số lượng thanh dẫn không đổi và giảm chi phí nghiên cứu đối với động cơ điện hiện nay. Đối với nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng thông số của động cơ LSPMSM với thông số tính toán cho trước với công suất 11kW, 4 cực, trong đó stato sử dụng dây quấn đồng khuôn 2 lớp. Đánh giá ảnh hưởng của hình dạng rãnh, nhóm tác giả sử dụng 4 kiểu rãnh khác nhau với kích thước thay đổi sau đó dựa trên phần mềm Ansys Maxwell để đưa ra kết quả đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM cho từng dạng rãnh. Ngoài ra, nhóm tác giả cũng thay đổi hai loại vật liệu sử dụng chế tạo rôto lồng sóc là nhôm và đồng để đánh giá hiệu quả của việc sử dụng từng loại vật liệu này. Kết quả cung cấp cánh nhìn tổng quan hơn về thiết kế thanh lồng sóc cho động cơ LSPMSM.

Từ khóa: *Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp, động cơ không đồng bộ, hình dạng rãnh rôto, vật liệu lồng sóc, phần mềm ansys maxwell.*

STUDYING THE EFFECTS OF SLOT SHAPE AND ROTOR BAR MATERIAL ON THE PERFORMANCE OF LSPMSM MOTORS BASED ON ANSYS MAXWELL SOFTWARE**ABSTRACT**

The line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) is designed based on the squirrel cage rotor structure of the asynchronous motor. The objective of this paper is to apply Ansys Maxwell software to evaluate the influence of some types of squirrel cage rotor slot shapes on the dynamic process of the LSPMSM motor. This method helps to evaluate the influence of the shape as well as the material of the rotor conductor on the characteristics with a constant number of conductors and reduce the research cost for current electric motors. For this study, the authors used the parameters of the LSPMSM motor with the given calculation parameters with a capacity of 11 kW, 4 poles, in which the stator uses 2-layer copper wire. To evaluate the influence of the slot shape, the authors used 4 different slot types with varying sizes, then based on Ansys Maxwell software to give the results of the starting characteristics of the LSPMSM motor for each slot type. In addition, the authors also changed two types of materials used to manufacture the squirrel cage rotor, aluminium and copper, to evaluate the effectiveness of using each of these materials. The results provide a more comprehensive view of the design of squirrel cage bars for LSPMSM motors.

Keywords: *Line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM), Asynchronous motor, rotor slot geometry, cage material, ansys maxwell software.*

Ngày nhận bài: 18/02/2025 Ngày nhận bài sửa: 24/04/2025 Ngày duyệt đăng bài: 28/05/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ điện đóng vai trò chính trong một số ngành công nghiệp trên toàn thế giới vì chúng là xương sống của ngành công nghiệp nặng và sản xuất (Saidur, 2010). Triển vọng cải thiện hiệu suất của động cơ đã thu hút được nhiều sự chú ý trong thập kỷ qua khi tính đến mối quan ngại về sự nóng lên toàn cầu và các tác động môi trường khác. Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) đã thay thế động cơ không đồng bộ (KĐB) trong nhiều ứng dụng và đã giúp tiết kiệm đáng kể năng lượng tiêu thụ (McElveen, Holub, & Martin, 2017). Tuy nhiên, các động cơ PMSM không có khả năng tự khởi động khi được kết nối trực tiếp với hệ thống điện và do đó việc sử dụng các động cơ PMSM không thể trở nên chiếm ưu thế.

Một giải pháp được các nhà sản xuất đang nghiên cứu là kết hợp giữa động cơ PMSM với rôto lồng sóc (còn được gọi là động cơ LSPMSM) (Palangar & cộng sự, 2021). Trong trường hợp này, rôto bao gồm: a) một lồng sóc tương tự như những động cơ KĐB tương ứng nhằm cải thiện mô men khởi động và mô men động cơ ở trạng thái đồng bộ và b) Nam châm vĩnh cửu (NCVC) tạo ra mô men đồng bộ ở trạng thái làm việc ổn định. Động cơ LSPMSM những năm gần đây đang trở nên phổ biến hơn vì chúng thể hiện những ưu điểm rõ ràng so với các động cơ KĐB về hiệu suất, hệ số công suất và mật độ công suất. Hơn nữa, động cơ này ít nhạy cảm hơn với độ méo điện áp nguồn cung cấp. Tuy nhiên, quy trình thiết kế LSPMSM khá phức tạp vì có rất nhiều thông số hình học cần được chỉ định và nhiều yêu cầu phải được đáp ứng. Thực tế là động cơ LSPMSM có hiệu suất trạng thái ổn định cao dễ dàng đạt được khi kết hợp quy trình tối ưu hóa khả năng khởi động và vẫn đảm bảo được làm việc ở chế độ tốc độ đồng bộ.

Nhằm đạt được các mục tiêu trên, các nhà nghiên cứu đã nghiên cứu cho đến nay tác động của hình dạng thanh rôto (Jędryczka & cộng

sự, 2018), độ tự cảm từ hóa (Yan, Wang, & Yang, 2017), mô men hãm của nam châm, ảnh hưởng của các khe hở khi lắp đặt NCVC (Mingardi, Bianchi, & Dai Prè, 2017), ... Hơn nữa, nhiều cấu hình rôto đã được đề xuất và một số cấu hình "lai" cũng đã được phát triển để đạt được hiệu suất cao hơn, tiềm năng tiết kiệm năng lượng lớn hơn và thể tích nam châm nhỏ hơn. Phần lớn các cấu trúc trên đã được nghiên cứu đầy đủ trong trường hợp động cơ LSPMSM "cổ điển" có NCVC bên trong sẽ được sử dụng trong các ứng dụng khác nhau (Iyer & cộng sự, 2018). Đối với động cơ LSPMSM, chỉ một số ít công trình nghiên cứu đã đóng góp cho hướng này khi xem xét càng nhiều đặc điểm trạng thái ổn định và tạm thời càng tốt. Hơn nữa, người ta thấy rằng tài liệu thiếu các ví dụ trình bày mạch từ chính xác của LSPMSM, đặc biệt là khi sử dụng nghiên cứu cấu hình của rôto khi gắn NCVC bên trong nhiều lớp hoặc nhiều đoạn.

Xét đến những điều trên, bài báo đã đề cập đến ảnh hưởng của kết cấu rãnh rôto và vật liệu chế tạo thanh dẫn rôto đến đặc tính làm việc của động cơ LSPMSM. Trong phần này, nhóm tác giả cố định vị trí nam châm với hình dạng và kích thước NCVC không đổi, chủ yếu đánh giá đến hình dạng và vật liệu chế tạo thanh dẫn rôto giúp cải thiện đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM.

2. MÔ HÌNH TOÁN VÀ CÁC THÔNG SỐ THANH DẪN RÔTO CỦA ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP

2.1. Mô hình toán học của động cơ LSPMSM khi khởi động

Hệ phương trình điện áp stato trên hệ quy chiếu d-q (Yang, Yan, & Wang, 2023).

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình điện áp rôto trên hệ quy chiếu dq:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = 0 \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{dq\Psi}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: ω_r tương ứng là tốc độ góc rôto. Ψ_{rd} , Ψ_{rq} tương ứng là từ thông móc vòng rôto do NCVC sinh ra, từ thông móc vòng rôto quy đổi dọc trục và ngang trục. Ψ_{sd} , Ψ_{sq} tương ứng là từ thông móc vòng stato dọc trục và ngang trục. i_{sd} , i_{sq} là thành phần dòng điện stato dọc trục và ngang trục. i_{rd} , i_{rq} là thành phần dòng điện rôto quy đổi dọc trục và ngang trục. R_s , R_r là tương ứng điện trở của dây quấn stato và rôto. Phương trình từ thông của stato và rôto (Yang, Yan, & Wang, 2023):

$$T_e = \frac{3p}{2} \left[(L_{md} - L_{mq}) i_{sd} i_{sq} + (L_{md} i'_{rd} i_{sq} - L_{mq} i'_{rq} i_{sd}) + \Psi_m i_{sq} \right] \quad (6)$$

Trong đó: i'_{rd} , i'_{rq} là thành phần dòng điện rôto quy đổi dọc trục và ngang trục. Đặt:

$$\begin{aligned} T_{RT} &= (L_{md} - L_{mq}) i_{sd} i_{sq} \\ T_{IT} &= L_{md} i'_{rd} i_{sq} - L_{mq} i'_{rq} i_{sd} \\ T_{MT} &= \Psi_m i_{sq} \end{aligned}$$

Do đó, ta phân tích mô men điện từ ra làm 3 thành phần:

$$T_e = T_{RT} + T_{IT} + T_{MT} \quad (7)$$

Với TRT, TIT và TMT: tương ứng là thành phần mô men từ trở, mô men KĐB và mô men kích từ do NCVC sinh ra.

Từ phương trình (7), có thể thấy mô men điện từ của động cơ LSPMSM phức tạp hơn nhiều mô men của động cơ KĐB và động cơ đồng bộ NCVC. Thành phần mô men TRT và TMT tương ứng là thành phần mô men của động cơ đồng bộ NCVC, thành phần này khi

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = (L_{sd} + L_{md}) i_{sd} + L_{md} i_{rd} + \Psi_m \\ \Psi_{sq} = (L_{sq} + L_{mq}) i_{sq} + L_{mq} i_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = (L_{rd} + L_{md}) i_{rd} + L_{md} i_{sd} + \Psi_m \\ \Psi_{rq} = (L_{rq} + L_{mq}) i_{rq} + L_{mq} i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: Ψ_m là từ thông móc vòng stato do NCVC sinh ra, L_{sd} , L_{sq} , L_{md} , L_{mq} lần lượt là điện cảm tản dây quấn stato, điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục và ngang trục. L_{rd} , L_{rq} là tương ứng là điện cảm tản rôto dọc trục và ngang trục. Phương trình mô men điện từ của động cơ LSPMSM được xác định như sau (Yang & cộng sự, 2023):

$$T_e = \frac{3p}{2} (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) \quad (5)$$

Hay

khởi động nhỏ hơn rất nhiều thành phần TIT. Do đó thực tế khi khởi động mô men của động cơ LSPMSM phụ thuộc lớn vào thành phần mô men KĐB.

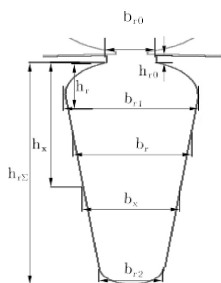
2.2. Điện trở và điện cảm rôto của động cơ LSPMSM

2.2.1. Điện trở rôto

Điện trở của các thanh dẫn của lồng sóc rôto được xác định theo phương trình sau (Qiu & cộng sự, 2019):

$$R_{rd} = K \frac{k_2 l_2 \rho}{S l_2} \quad (8)$$

Trong đó R_{rd} là điện trở thanh dẫn lồng sóc (Ω); K , k_2 là các hệ số; Z_2 là số rãnh rôto của động cơ KĐB; ρ là điện trở suất của vật liệu thanh dẫn ở nhiệt độ tính toán; S là tiết diện thanh dẫn rôto (mm^2); l_2 là chiều dài của rôto (mm);



Hình 1. Kích thước rãnh để xác định chiều sâu quy đổi rãnh rôto

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Khi khởi động thì đa phần dòng điện sẽ chạy trên bề mặt của thanh dẫn phía ngoài gần khe hở không khí, sẽ đóng vai trò quan trọng trong đặc tính khởi động. Khi đó dòng điện bề

mặt càng lớn thì mô men khởi động của động cơ sẽ càng lớn. Vì vậy để xác định chiều sâu của rãnh khi làm việc, ta có các thông số của rãnh như Hình 1 (Ghosh và cộng sự, 2019). Trong đó $h_{r\Sigma}$ là chiều cao của đồng (Cu) hay nhôm (Al) trong rãnh; h_r là độ sâu của rãnh quy đổi khi có hiện tượng hiệu ứng làm cơ sở tính điện trở thanh dẫn, h_x là độ sâu của rãnh quy đổi khi có hiện tượng hiệu ứng làm cơ sở tính điện cảm thanh dẫn.

$$\begin{cases} h_r = \frac{h_{r\Sigma}}{1+k_\phi} \\ h_x = h_{r\Sigma} k_\psi \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó k_ϕ và k_ψ là các hệ số phụ thuộc vào chiều cao tương đối của rãnh.

$$h_\xi = 2\pi h_{r\Sigma} 10^{-1} \sqrt{\frac{b'_r s f_1 10^{-5}}{b_r \rho}} \quad (10)$$

Với b'_r/b_r là bề rộng của thanh dẫn so với bề rộng của rãnh; ρ là điện trở suất của thanh dẫn.

Như vậy ta có điện trở thanh dẫn khi tính đến dòng điện mặt ngoài $R_{r\xi}$ (Yetgin, & Durmuş, 2021):

$$R_{r\xi} = R_{td} k_r \quad (11)$$

Trong đó k_r là hệ số hiệu ứng mặt ngoài. Để đánh giá ảnh hưởng của hình dạng rãnh rôto ta có các hình dạng rãnh như mô tả ở Hình 2. Với công thức tính toán diện tích rãnh như sau:

Diện tích rãnh R1 ($B_{r2} < B_{r1}$):

$$S_{r1} \square \frac{1}{2} \left(\frac{B_{r1}}{2} \right)^2 \pi + \frac{B_{r1} + B_{r2}}{2} H_{r2} + \frac{1}{2} \left(\frac{B_{r2}}{2} \right)^2 \pi \quad (12)$$

Diện tích rãnh R2 ($B_{r2} = B_{r1}$):

$$S_{r2} \square \frac{B_{r1} + B_{r2}}{2} H_{r2} + \frac{B_{r1} + B_{r1}}{2} H_{r1} \quad (13)$$

Diện tích rãnh R3:

$$S_{r3} \square \left(\frac{B_{r1}}{2} \right)^2 \pi \quad (14)$$

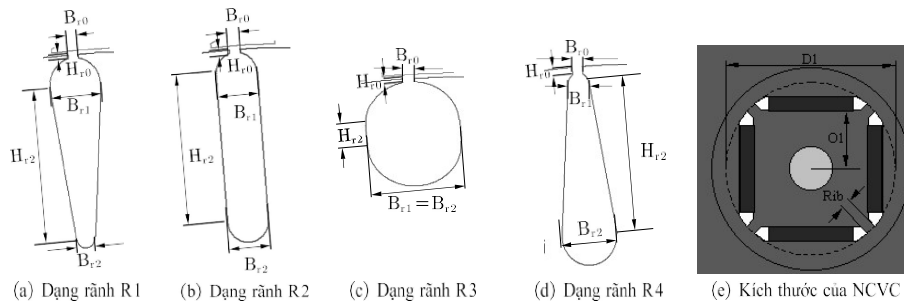
Diện tích rãnh R4 (tương tự R1 nhưng $B_{r2} > B_{r1}$):

$$S_{r4} \square \frac{1}{2} \left(\frac{B_{r1}}{2} \right)^2 \pi + \frac{B_{r1} + B_{r2}}{2} H_{r2} + \frac{1}{2} \left(\frac{B_{r2}}{2} \right)^2 \pi \quad (15)$$

Khi rôto đúc nhôm thì diện tích rãnh và diện tích nhôm bằng nhau. Nếu rôto sử dụng thanh đồng thì diện tích đồng/ diện tích rãnh được chọn là 0,85. Điện trở rôto khi xét đến hiệu ứng bề mặt (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001):

$$R_{2\xi} = R_{r\xi} + \frac{2R_v}{\left(2\sin\frac{\pi p}{Z_2}\right)^2} \quad (16)$$

Trong đó R_v là điện trở vành ngắn mạch, Z_2 là số rãnh stato.



Hình 2. Các dạng rãnh rôto và kích thước NCVC của động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

2.2.2. Điện cảm rôto

Dòng điện mặt ngoài gây ra sự thay đổi hệ số từ dẫn tản $\lambda_{r2\xi}$ của rãnh rôto (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001) còn các hệ số từ tản khác không bị ảnh hưởng. Khi đó tổng hệ số từ dẫn khi xét đến dòng điện mặt ngoài sẽ là:

$$\sum\lambda_{2\xi} = \lambda_{r2\xi} + \lambda_{t2} + \lambda_{d2} \quad (19)$$

Trong đó λ_{t2} là hệ số từ dẫn tạp, λ_{d2} là hệ số từ dẫn phần đầu nối dây quấn. Ta có điện kháng tản của rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài được tính như sau (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001):

Khi đó điện trở rôto quy đổi xét đến hiệu ứng mặt ngoài xác định như sau:

$$R'_{2\xi} = R_{2\xi}k \quad (17)$$

Trong đó k là hệ số quy đổi dây quấn rôto lồng sóc sang stato. Như vậy ta có thể thấy khi xảy ra hiệu ứng bề mặt sẽ làm thay đổi chiều sâu của rãnh rôto từ đó thay đổi điện trở của rôto và ảnh hưởng đến mô men làm việc và khởi động của động cơ.

Rãnh ở Hình 1, 2 ta sử dụng rãnh dạng hình quả lê nên hệ số từ dẫn tản xét đến hiệu ứng mặt ngoài là:

$$\lambda_{r2\xi} = \left[\frac{h_{r2} - b_1}{b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8S_r} \right) + 0,66 - \frac{b_{r0}}{2b_1} \right] k + \frac{h_{r0}}{b_{r0}} \quad (18)$$

$$X_{2\xi} = X_2 \frac{\sum\lambda_{2\xi}}{\sum\lambda_2} \quad (20)$$

Trong đó X_2 và $\sum\lambda_2$ tương ứng là điện kháng tản và tổng hệ số từ dẫn không xét đến hiệu ứng mặt ngoài.

Khi đó điện kháng rôto quy đổi xét đến hiệu ứng mặt ngoài xác định như sau:

$$X'_{2\xi} = X_{2\xi} \frac{4m_1 (w_1 k_{d1})^2}{Z_2} \quad (21)$$

Từ trên ta có thể thấy được ảnh hưởng của hình dạng rãnh rôto kết hợp với hiệu ứng mặt ngoài sẽ ảnh hưởng đến thông số đầu ra của động cơ. Mô men điện từ KĐB của động cơ

LSPMSM khi có hiệu ứng mặt ngoài (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001):

$$T_{đt\xi} = \frac{m_1 U_1 p R_2'_{2\xi} / s}{2\pi f_1 \left[(R_1 + C_1 R_2'_{2\xi} / s) + (X_1 + C_1 X_2'_{2\xi}) \right]} \quad (22)$$

Từ đó ta có mô men cực đại KĐB tính đến hiệu ứng mặt ngoài (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001):

$$T_{\max\xi} = \frac{1}{2C_1 \cdot 2\pi f_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2'_{2\xi})^2} \right]} m U^2 p \quad (23)$$

3. ẢNH HƯỞNG VẬT LIỆU LỒNG SÓC VÀ HÌNH DẠNG RÃNH RÔTO ĐẾN ĐẶC TÍNH KHỞI ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ LSPMSM

3.1. Thiết lập mô hình mô phỏng

Bảng 1. Thông số thiết kế động cơ LSPMSM 11 kW 4 cực

Thông số	Giá trị	Đơn vị	Thông số	Giá trị	Đơn vị
Tốc độ định mức $n_{đm}$	1460	rpm	Công suất định mức	11	kW
Số rãnh stato Z_l	48		Số đôi cực	4	
Đường kính ngoài stato D_n	272	mm	Hệ số ép chặt	0,95	
Đường kính trong stato D	177	mm	Chiều dài stato - rôto	105	mm
Vật liệu làm lõi thép stato	Steel_1008		Số rãnh rôto	40	
Độ mở miệng rãnh stato B_{s0}	3,0	mm	Khe hở không khí	0,1	mm
Chiều rộng tối đa phần trên của rãnh stato B_{s1}	9,5	mm	Kiểu dây quấn stato	Hai lớp	
Chiều rộng đáy thân rãnh stato B_{s2}	7,0	mm	Đường kính dây bao gồm cách điện d_{cd}	1,828	mm
Chiều cao miệng rãnh stato H_{s0}	0,4	mm	Chiều cao vành ngăn mạch	22	mm
Chiều cao thân rãnh stato H_{s2}	22,5	mm	Bước dây quấn (bước ngắn)	10	
Dây dẫn stato	Copper		Đường kính trục rôto	53	mm
Vật liệu làm lõi thép rôto	Steel_1008		Bề rộng vành ngăn mạch	24	mm
Kích thước DI của NCVC	115	mm	Kích thước OI của NCVC	38	mm
Kích thước Rib của NCVC	2	mm	Loại vật liệu làm NCVC	NdFe35	
Chiều rộng của NCVC	60	mm	Độ dày của NCVC	10	mm

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Thực nghiệm mô hình thiết lập sử dụng thay đổi các kích thước với các hình dạng rãnh

Từ đó ta có mô men khởi động KĐB tính đến hiệu ứng mặt ngoài (Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh, 2001):

$$T_{kđ\xi} = 2\pi f_1 \left[\left(\frac{1}{R_1 + C_1 R_2'_{2\xi}} \right)^2 + \left(\frac{1}{X_1 + C_1 X_2'_{2\xi}} \right)^2 \right] m U^2 p R \quad (24)$$

Từ phương trình (22), (23) và (24), mô men KĐB có liên quan đến điện kháng, điện trở của rôto khi xảy ra hiệu ứng mặt ngoài. Do đó khi hình dạng của rãnh rôto thay đổi dẫn đến

giá trị của điện kháng và điện trở của rôto thay đổi từ đó ảnh hưởng đến đặc tính làm việc của động cơ.

Phần mềm Ansys Maxwell là phần mềm ứng dụng phương pháp PTHH để mô phỏng và mô hình hóa. Nhóm tác giả thiết lập mô hình mô phỏng sử dụng thông số động cơ như sau Bảng 1.

rôto khác nhau cho quá trình mô phỏng như Bảng 2.

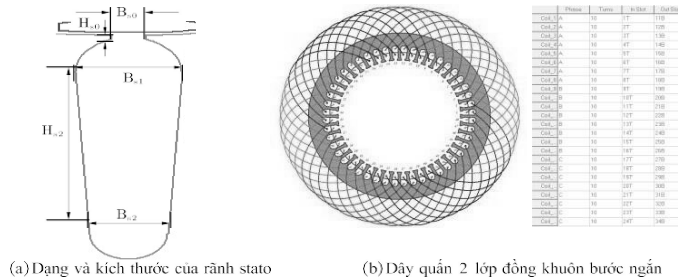
Bảng 2. Bảng kích thước rãnh rôto của động cơ với số rãnh rôto khác nhau

Thông số	Dạng rãnh của rôto			
	R1	R2	R3	R4
Lồng đơn				
Độ mở miệng rãnh rôto B_{r0} (mm)	1,5	1,5	1,5	1,5
Chiều rộng tối đa phân trên của rãnh rôto B_{r1} (mm)	7,8	5,56	11,36	8,0
Chiều rộng đáy thân rãnh rôto B_{r2} (mm)	3,0	5,56	11,36	8,0
Chiều cao miệng rãnh rôto H_{r0} (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
Chiều cao thân rãnh stato H_{s2} (mm)	20,0	20,0	3	0
Tổng diện tích rãnh rôto S_r (mm²)	135,4	135,4	135,4	135,4

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

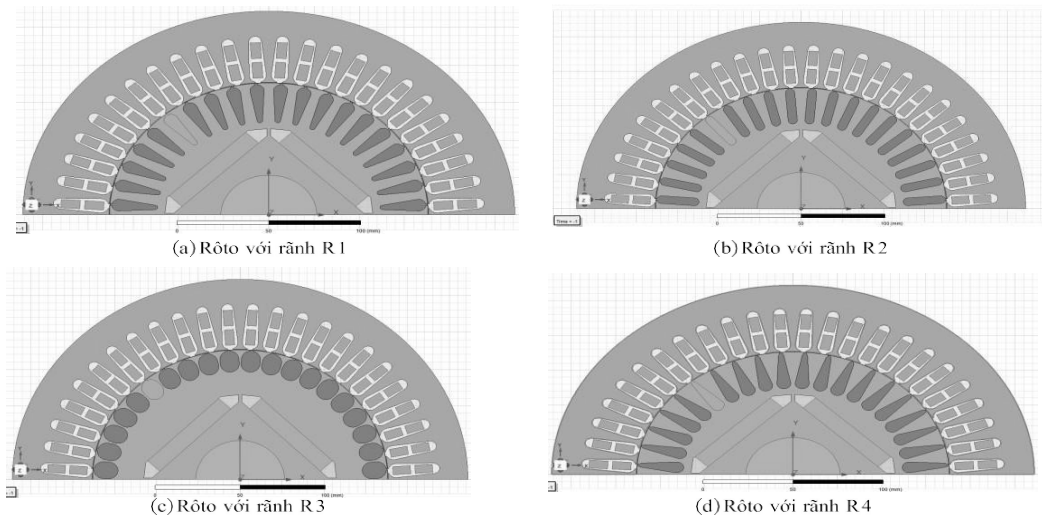
Trong mô hình mô phỏng để đảm bảo chính xác, các thông số cơ bản của stato động cơ cho từng trường hợp đều giống nhau, các thông số này dựa trên kết quả tính toán động

cơ 11kW 4 cực trong tài liệu của Qiu và cộng sự (2019). Stato sử dụng với thông số như trong Bảng 1 và dạng dẫn với cách quấn dây stato như Hình 3.



Hình 3. Dạng rãnh và cách quấn dây của stato của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả



Hình 4. Cấu trúc rôto của mô hình động cơ LSPMSM 11kW 4 cực

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

3.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

Sau khi mô phỏng ta có bảng kết quả tính của của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực với

hình dạng rãnh và vật liệu lồng sóc rôto khác nhau:

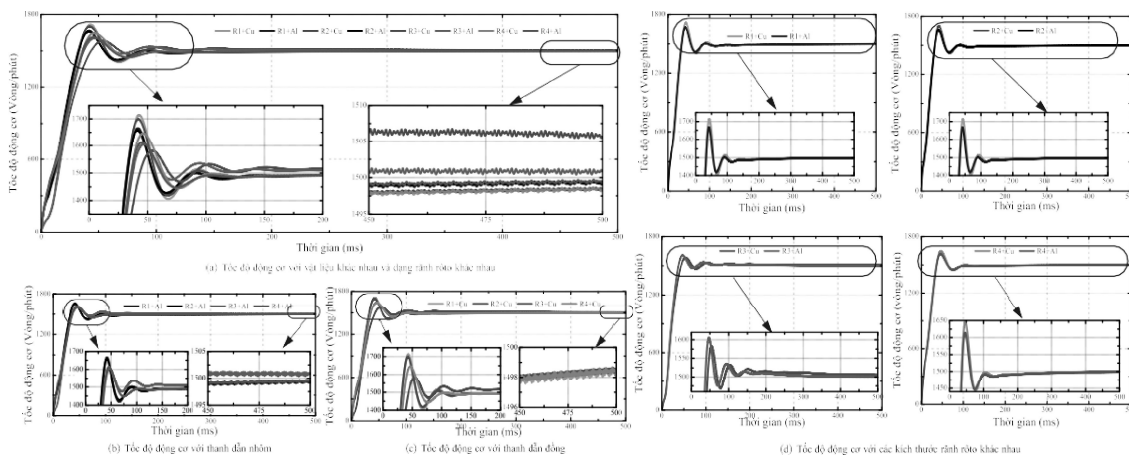
Bảng 3. Bảng kết quả thông số của động cơ LSPMSM 11kW 4 cực với số rãnh rôto khác nhau

Thông số	Dạng rãnh và vật liệu lồng sóc của rôto							
	R1+Cu (Đồng)	R1+Al (Nhôm)	R2+Cu (Đồng)	R2+Al (Nhôm)	R3+Cu (Đồng)	R3+Al (Nhôm)	R4+Cu (Đồng)	R4+Al (Nhôm)
Diện tích rãnh rôto (mm ²)	135,4	135,4	135,4	135,4	135,4	135,4	135,4	135,4
Hiệu suất động cơ (%)	97,378	97,378	97,108	97,108	97,2412	97,2412	97,4424	97,4424
Hệ số công suất	0,9668	0,9668	0,9201	0,9201	0,5878	0,5878	0,9791	0,9791
Mô men định mức (Nm)	70,0576	70,0576	70,0699	70,0699	25,3401	25,3401	70,0478	70,0478
Dòng điện định mức (A)	16,2616	16,2616	17,1382	17,1382	9,68884	9,68884	16,0454	16,0454
Mô men cực đại (Nm)	198,7411	198,7411	196,7188	196,7188	227,6209	227,6209	173,6898	173,5127
Mô men khởi động (Nm)	24,9765	37,6436	24,1992	36,4892	30,5486	45,9397	18,9395	28,6242

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Qua kết quả Bảng 3 có thể thấy khi sử dụng vật liệu lồng sóc khởi động là nhôm thì giúp cho động cơ LSPMSM có mô men khởi động sẽ tốt hơn. Ngoài ra thì dòng điện định mức và mô men cực đại của động cơ KĐB khi

sử dụng vật liệu đồng hay nhôm thì giá trị gần như tương đương nhau. Để đánh giá chính xác hơn, nhóm tác giả sẽ mô phỏng động cơ LSPMSM 11kW 4 cực trên phần mềm Ansys Maxwell 2D.

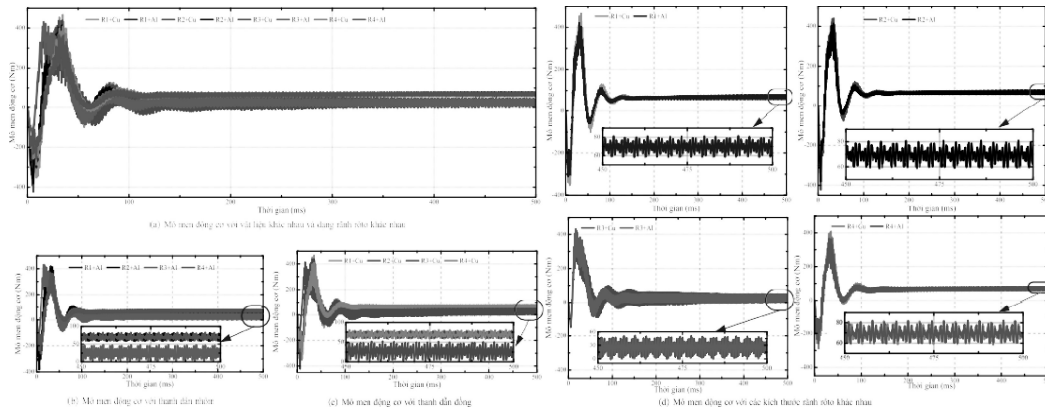


Hình 5. Đồ thị tốc độ động cơ LSPMSM với dạng rãnh rôto và vật liệu lồng sóc khác nhau

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Qua Hình 5 có thể thấy các đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM phụ thuộc rất nhiều vào hình dạng rãnh rôto và vật liệu chế tạo lồng sóc của động cơ. Trên Hình 5a có thể thấy với rãnh R3 dạng rãnh tròn sát bề mặt rôto nên ảnh hưởng bởi hiệu ứng bề mặt nhiều nhất làm giúp động cơ có thời gian khởi động ngắn, tuy nhiên động cơ này có tổn hao nhiều dẫn đến sai số tốc độ làm việc cao. Ngược lại đối với rãnh R4 là rãnh hình ô van có kích thước có $Br_2 > Br_1$ nên hiệu ứng bề mặt của dòng điện trong rôto khi động cơ khởi động

ảnh hưởng ít nên có thể thấy độ vọt lố tốc độ thấp. Qua Hình 5b và 5c có thể thấy các rãnh R1 ($Br_2 < Br_1$) và rãnh R2 ($Br_2 = Br_1$) là đặc tính gần như giống nhau. Hình 5d cho thấy sự khác nhau của đặc tính tốc độ động cơ khi thay đổi vật liệu chế tạo rôto lồng sóc, khi sử dụng thanh dẫn đồng có thể thấy sai số tốc độ được cải thiện rõ rệt, tốc độ làm việc bám sát tốc độ đồng bộ hơn, đồng thời độ vọt lố của tốc độ ban đầu cũng thấp hơn so với sử dụng thanh dẫn nhôm.

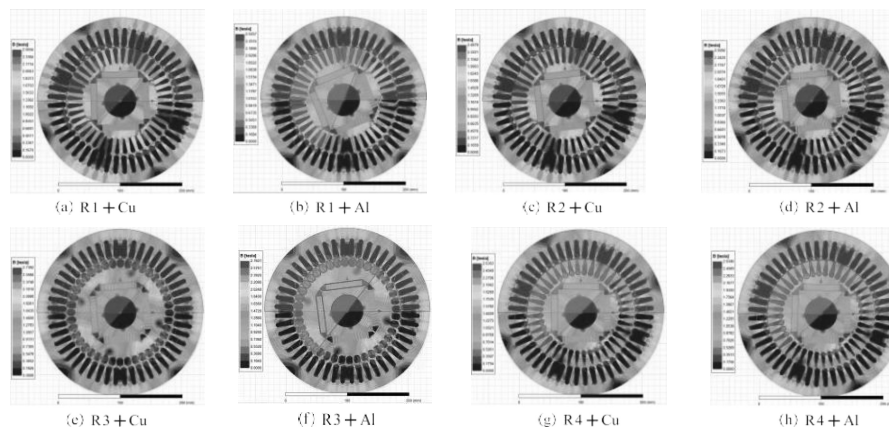


Hình 6. Đồ thị mô men động cơ LSPMSM với dạng rãnh rôto và vật liệu lồng sóc khác nhau

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Qua Hình 6 có thể thấy các đặc tính mô men khởi động của động cơ đồng bộ LSPMSM cũng bị ảnh hưởng bởi hình dạng rãnh rôto và vật liệu chế tạo lồng sóc. Trên Hình 6a có thể thấy với rãnh R3 dạng rãnh tròn sát bề mặt rôto nên ảnh hưởng bởi hiệu ứng bề mặt nhiều nhất làm giúp động cơ có mô men khởi động lớn đồng thời biên độ dao động cũng ít nhất tuy nhiên động cơ này khi làm việc ở chế độ ổn định thì có gợn sóng mô men lớn hơn và giá trị mô men làm việc cũng nhỏ hơn so với các dạng rãnh khác. Ngược lại đối với rãnh R1 và R2 là rãnh có kích thước bằng nhau kéo dài nên hiệu ứng bề mặt của dòng điện trong rôto khi động

ơ khởi động nên độ dao động mô men lớn. Qua Hình 6b và 6c có thể thấy các rãnh R3 là rãnh khắc phục được nhược điểm do rãnh R2 và R4 tạo ra đó là cải thiện được mô men khởi động. Hình 6d cho thấy sự khác nhau của đặc tính mô men động cơ khi thay đổi vật liệu chế tạo rôto lồng sóc. Khi sử dụng thanh dẫn nhôm có thể thấy mô men khởi động lớn hơn đồng thời độ dao động của mô men cũng ít hơn so với sử dụng thanh dẫn đồng. Hình 7 cho thấy phân bố của từ thông trên rôto và stato của động cơ với các trường hợp hình dạng rãnh rôto và vật liệu lồng sóc khác nhau.



Hình 7. Từ thông stato của tổ hợp khe stato- rôto khác nhau

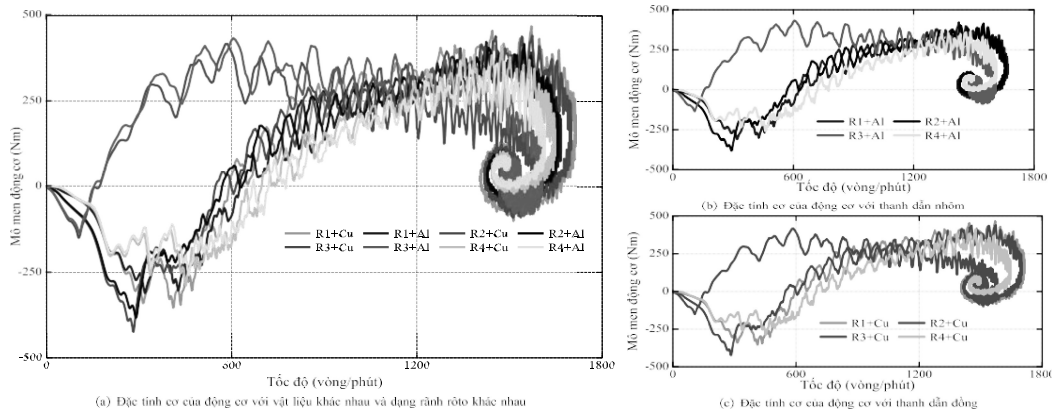
Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Từ Hình 8 có thể thấy các đặc tính cơ của động cơ đồng bộ LSPMSM khi mô phỏng 2D

trên phần mềm Ansys Maxwell. Từ các đường đặc tính cho thấy động cơ LSPMSM rôto có

dạng rãnh R3 có mô men khởi động cũng như mô men cực đại là tốt nhất. Đối với các rãnh còn lại thì rãnh R1 và R2 có chất lượng đặc tính cơ dao động lớn với mô men khởi động. Đối với R4 thì có mô men khởi động có mô men cực đại nhỏ nhất. Điều này cho thấy động cơ LSPMSM với rãnh R3 là thiết kế tối ưu hơn so

với các loại rãnh khác. Đối với sử dụng thanh dẫn bằng nhôm và đồng thì có thể thấy khi sử dụng thanh dẫn bằng nhôm thì mô men cực đại không khác nhau nhưng mô men khởi động được cải thiện rõ rệt. Do đó động cơ LSPMSM được thiết kế dạng rãnh R3 mang lại tối ưu thiết kế cho động cơ LSPMSM



Hình 8. Đặc tính cơ của động cơ mô phỏng 2D với kích thước rãnh và vật liệu rôto khác nhau

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng động cơ LSPMSM 11kW 4 cực được làm mô hình nghiên cứu phân tích ảnh hưởng của hình dạng rãnh rôto và vật liệu chế tạo lồng sóc đến chế độ làm việc của động cơ LSPMSM và rút ra các kết luận sau:

- Sử dụng mô hình mô phỏng trên phần mềm Ansys Maxwell với động cơ LSPMSM giúp đánh giá được các ưu nhược điểm của từng dạng rãnh rôto khác nhau cũng như việc sử dụng các vật liệu khác nhau chế tạo lồng sóc.

- Mô hình nghiên cứu với 04 cấu trúc hình học khác nhau cho các rãnh rôto của động cơ và đồng thời sử dụng 2 loại vật liệu đồng và nhôm để chế tạo thanh dẫn rôto. Nhóm tác giả đã đưa ra kết quả và so sánh đánh giá chi tiết kết quả đạt được như mô men và tốc độ của động cơ LSMPSM;

- Thông qua các kết quả đạt được có thể thấy dạng rãnh R3 và vật liệu sử dụng chế tạo thanh dẫn rôto là nhôm là phương pháp tối ưu

nhất để có được mô men cực đại, mô men khởi động, thời gian khởi động cũng như độ gợn sóng mô men thấp nhất.

Như vậy các kết quả này sẽ góp phần giúp các nhà nghiên cứu làm việc trong lĩnh vực này so sánh các hình dạng khác nhau của khe rôto và vật liệu lồng trong việc tối ưu thiết kế động cơ LSPMSM, vốn là động cơ tiết kiệm năng lượng có khả năng thay thế cho động cơ KĐB trong tương lai ở Việt Nam. Bằng cách áp dụng phương pháp tối ưu hóa phù hợp với kết quả thu được, có thể đạt được hiệu suất cao hơn, đặc biệt bằng cách cải thiện hệ số công suất của động cơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Ghosh, P. K., Sadhu, P. K., Basak, R., & Sanyal, A. (2020). Energy efficient design of three phase induction motor by water cycle algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1139-1147.

Iyer, K. L. V., Lai, C., Mukundan, S., Dhulipati, H., Mukherjee, K., & Kar, N. C. (2018). Investigation of interior

- permanent magnet motor with dampers for electric vehicle propulsion and mitigation of saliency effect during integrated charging operation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1254-1265.
- Jędrzycka, C., Knypiński, Ł., Demenko, A., & Sykulski, J. K. (2018). Methodology for cage shape optimization of a permanent magnet synchronous motor under line start conditions. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1-4.
- McElveen, R. F., Holub, R., & Martin, W. E. (2017). Replacing induction motors with caged rotor permanent magnet motors: Application considerations & cost analysis. In *2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)* (pp. 435-442).
- Mingardi, D., Bianchi, N., & Dai Prè, M. (2017). Geometry of line start synchronous motors suitable for various pole combinations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 4360-4367.
- Palangar, M. F., Soong, W. L., Bianchi, N., & Wang, R. J. (2021). Design and optimization techniques in performance improvement of line-start permanent magnet synchronous motors: A review. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(9), 1-14.
- Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). The influence of stator-rotor slot combination on performance of high-voltage asynchronous motor. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 1126-1134.
- Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 877-898.
- Trần Khánh Hà & Nguyễn Hồng Thanh. (2001). *Thiết kế máy điện*. Hà Nội, Việt Nam: Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- Yan, B., Wang, X., & Yang, Y. (2017). Starting performance improvement of line-start permanent-magnet synchronous motor using composite solid rotor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1-4.
- Yang, Y., Yan, B., & Wang, X. (2023). Dynamic model of a line-start permanent magnet synchronous motor equipped with hybrid rotor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10(2), 2974-2987.
- Yetgin, A. G., & Durmuş, B. (2021). Optimization of slot permeance coefficient with average differential evolution algorithm for maximum torque values by minimizing reactances in induction machines. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2685-2693.