

THIẾT KẾ SO SÁNH ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU GẮN BỀ MẶT RÔTO TRONG VÀ RÔTO NGOÀI ỨNG DỤNG CHO Ô TÔ ĐIỆN

DESIGN COMPARISON OF SURFACE-MOUNTED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH INNER AND OUTER ROTOR APPLICATION FOR ELECTRIC VEHICLE

Trần Đức Chuyển, Bùi Hữu Hoàng

Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 15/7/2025, chấp nhận đăng ngày 10/8/2025

Tóm tắt: Động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu gắn bề mặt (SPMSM) là một trong những loại động cơ điện được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực xe điện và truyền động điện trong công nghiệp và dân dụng. Động cơ này nhờ vào những đặc điểm như mật độ công suất cao, khối lượng nhẹ, hiệu suất cao và mômen cao. Có hai loại động cơ SPMSM, đó là SPMSM rôto trong và SPMSM rôto ngoài. Để phân tích và tính toán các ưu nhược điểm, cũng như so sánh hiệu suất của hai loại động cơ này. Vấn đề nghiên cứu SPMSM này đưa ra một mô hình giải tích để thiết kế sơ bộ các thông số chính của SPMSM với cả hai loại rôto trong và rôto ngoài. Sau đó, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để mô phỏng, phân tích và so sánh các thông số điện từ của các động cơ. Kết quả nghiên cứu này cũng là cơ sở để tính toán, phân tích, thiết kế và điều khiển cho máy công nghiệp và đặc biệt là ứng dụng vào lĩnh vực động cơ xe ô tô điện.

Từ khóa: Máy điện, thiết kế máy điện, động cơ ô tô điện, EMF, phần tử hữu hạn, SPMSM.

Abstract: The surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is one of the electric machines applied widely in the fields of electric vehicles (EVs) and electrical drives and electric drives in industry and civil. There are two types of SPMSM motors, namely inner rotor SPMSM and outer rotor SPMSM. To analyze and calculate the advantages and disadvantages, as well as compare the performance of these two types of motors. This SPMSM research problem presents an analytical model to preliminarily design the main parameters of SPMSM with both inner and outer rotor types. Then, the finite element method is used to simulate, analyze and compare the electromagnetic parameters of the motors. This research result is also the basis for calculation, analysis, design and control for industrial machines and especially for application in the field of electric vehicle motors.

Keywords: Electrical machines, electrical machine design, electric car engine, EMF, finite element analysis, SPMSM.

1. MỞ ĐẦU

Động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu nam châm gắn bề mặt (SPMSM) đang ngày càng được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền động điện và xe điện nhờ quá trình công nghiệp hóa và những tiến bộ trong công nghệ [1, 2]. Trong động cơ SPMSM,

nam châm vĩnh cửu được gắn trực tiếp lên bề mặt rôto. Việc tích hợp này giúp tăng mômen, tăng hiệu quả kinh tế, tăng độ bền và giảm năng lượng tiêu thụ. Ngoài ra, loại động cơ này còn được ứng dụng trong các lĩnh vực công nghiệp như điều khiển chuyển động và máy nén, và trong nhiều ứng dụng khác như

khai thác dầu, khai thác mỏ, hệ thống nâng hạ, hệ thống truyền động điện, động cơ hàng hải, và các ứng dụng yêu cầu mômen cao, tốc độ thấp [3, 4].

SPMSM được chia thành 2 loại dựa vào vị trí của rôto: SPMSM rôto trong và SPMSM rôto ngoài. Mỗi loại đều có ưu và nhược điểm riêng. Nghiên cứu đã chứng minh rằng động cơ PMSM rôto ngoài nên được ưu tiên sử dụng hơn so với động cơ PMSM rôto trong bằng hai phương pháp, [5]. Thứ nhất, các tác giả so sánh khả năng tạo và duy trì mômen của hai động cơ bằng cách kiểm tra thể tích hình học của từng loại. Phương pháp thứ hai so sánh hiệu quả từ trường và đặc tính mômen của hai kiểu rôto khi áp dụng vào cùng một kiểu cấu trúc mạch từ. Bài toán nghiên cứu, tính toán và so sánh mật độ từ thông của động cơ SPMSM rôto trong và rôto ngoài ứng dụng trong xe điện bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), [6]. Tuy nhiên, không đưa ra quá trình thiết kế động cơ mà chỉ tập trung và mô phỏng để có được kết quả.

Liên quan đến nghiên cứu thiết kế bộ truyền động bánh răng đồng trục cho bộ điều biến từ thông động cơ để nghiên cứu và so sánh đặc tính mômen của chúng, [7]. Đặc tính mômen của các cấu hình đề xuất được xác định thông qua mô hình phi tuyến sử dụng PTHH. Các nghiên cứu cũng xây dựng một thiết kế với sự kết hợp rãnh và cực cho động cơ PMSM rôto trong (IPMSM) và SPMSM [8, 9]. Độ méo hài tổng hợp, mômen răng, sức phản điện động, nhiễu mômen và các đặc tính tổn hao đều được so sánh trong các thí nghiệm này bằng mô hình tính toán giải tích. Việc nghiên cứu thiết kế tối ưu động cơ IPMSM ứng dụng cho xe điện và xe hybrid bằng phương pháp PTHH để xác định mức dòng điện lý tưởng cho cả hiệu suất và mômen răng [8]. Kết quả cũng cho thấy mômen răng ảnh hưởng như

thế nào đến tiếng ồn và độ rung của động cơ. Khi đi nghiên cứu ảnh hưởng của các hệ số thiết kế khác nhau và sự kết hợp giữa rãnh và cực đến mômen răng của động cơ nam châm vĩnh cửu, [5]. Hiệu suất đa vật lý của động cơ SPMSM và IPMSM đã được so sánh và kiểm tra trong nghiên cứu. Các yêu cầu thiết kế ban đầu về công suất 60 kW và 30.000 vòng/phút giữ nguyên cấu trúc stato, kiểu quấn dây và thể tích. Sau đó, bằng phần mềm Ansys Workbench, PTHH được sử dụng để đảm bảo tuân thủ các yêu cầu về trường ứng suất cho hai cấu trúc rôto. Các mô hình cho động cơ IPM với nam châm nhiều lớp đã được thực hiện để giữ nguyên cấu trúc stato, kiểu quấn dây và thể tích nam châm trong [9].

Như đã phân tích ở trên, cho đến nay đã có nhiều bài viết nghiên cứu về động cơ SPM và IPM cũng như so sánh hiệu suất của chúng. Các nghiên cứu này chưa trình bày chi tiết về quy trình tính toán giải tích các thông số điện từ cũng như so sánh hiệu suất của các động cơ này. Trong nghiên cứu này, đóng góp mới là mô hình giải tích được phát triển chi tiết để xác định các thông số cần thiết của SPMSM với cấu trúc rôto trong và ngoài. Sau đó, PTHH được sử dụng để mô phỏng và so sánh hiệu suất của các động cơ, chẳng hạn như mật độ từ thông, Mômen đầu ra, mômen răng, sức phản điện động, liên kết từ thông và độ tăng nhiệt độ. Các kết quả thu được sẽ được coi là tài liệu tham khảo có giá trị cho việc lựa chọn SPMSM có cấu trúc rôto bên trong hoặc bên ngoài cho các ứng dụng lực kéo.

2. THIẾT KẾ TÍNH TOÁN GIẢI TÍCH

Phần này trình bày thiết kế giải tích SPMSM rôto trong và SPMSM rôto ngoài. Mômen điện từ (M) được tính thông qua công suất điện từ (P_e), [3-5]:

$$M = \frac{P_e}{\frac{2\pi f_1}{p}} \quad (1)$$

Với, p là số cặp cực và f_1 là tần số. Theo [1, 4], ứng suất khe hở không khí (ξ) được tính toán như sau:

$$\xi = \frac{0.5M}{\frac{\pi}{4} F_i^2 L_r} = \frac{\xi_m}{k_{safe}} \quad (2)$$

Trong đó, k_{safe} là hệ số an toàn, ξ_m giá trị ứng suất, F_i là đường kính trong rôto. Hệ số hình dáng của máy được tính như sau, [9]:

$$k_{shape} = \frac{F_i}{L} \quad (3)$$

Mật độ từ dư của nam châm (ϑ_r) được xác định:

$$\vartheta_r = \vartheta_{r,0} \cdot (1 - T_k \cdot (T_r - T_{mt})) \quad (4)$$

Với, T_r là nhiệt độ làm việc của nam châm ($T_{mt} = 30^\circ\text{C}$), T_k là hệ số nhiệt độ ($T_k = 0.001$), $\vartheta_{r,0}$ là mật độ từ dư tại nhiệt độ môi trường ($T_{mt} = 20^\circ\text{C}$). Mật độ từ thông khe hở không khí được tính:

$$\vartheta_g = 4 \cdot \vartheta_m \cdot \frac{\sin(\varphi)}{\pi} \quad (5)$$

Trong đó, φ là góc điện nam châm, ϑ_m là mật độ từ thông tại vị trí làm việc. Từ đó, độ dày nam châm được tính bằng công thức sau, [8]:

$$d_m = \frac{\epsilon_r \frac{\partial_s}{\partial_s - \gamma g} \cdot g}{\frac{\vartheta_r \cdot 4 \sin \alpha}{\vartheta_g \pi} - 1}, \partial_s = \frac{\pi(F_i - 2g)}{Q},$$

$$F_i = \left(\frac{4V_r}{\pi \cdot k_{shape}} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$V_r = \frac{0.5T \cdot k_{shape}}{\xi_m} (6a - b - c - d) \quad (6)$$

Trong đó, g là độ dày khe hở không khí, V_r là thể tích rôto. Từ đây, từ thông nam châm có thể tính được bằng công thức sau:

$$\phi_m = \vartheta_m \cdot L_r \cdot \tau_m, \text{ với } \tau_m = \frac{\alpha \cdot F_i}{p} \quad (7)$$

Với, τ_m là chiều rộng nam châm. Độ dày gông stato (h_{sy}) và độ dày gông rôto (h_{ry}) được tính:

$$h_{sy} = \frac{\vartheta_m \cdot \tau_m}{2 \vartheta_{sy}}, h_{ry} = \frac{\vartheta_m \cdot \tau_m}{2 \vartheta_{ry}} \quad (8)$$

Trong đó, ϑ_{sy} và ϑ_{ry} lần lượt là mật độ từ thông của gông stato và gông rôto. Số vòng dây trên mỗi răng được tính như sau:

$$N = \frac{1.1 \cdot U_p}{2\sqrt{2} \cdot f \cdot q \cdot k_w \cdot \vartheta_{g,pk} \cdot F_i \cdot L_r},$$

$$\vartheta_{g,pk} = \vartheta_g \cdot \cos t \quad (9)$$

Trong đó, $\vartheta_{g,pk}$ là mật độ từ thông cực đại, k_w là hệ số dây quấn (xem hệ số dây quấn đối với dây quấn tập trung tại tài liệu [9]), U_p là điện áp pha, q là số rãnh dưới một pha trên một cực và φ là góc mômen của động cơ ($t = 15^\circ \div 30^\circ$). Tiết diện dây quấn trong mỗi rãnh (D_w) được tính như sau:

$$D_w = S_d \cdot N \cdot n_1 \cdot 2 \quad (10)$$

Với, n_1 số sợi chập, S_d tiết diện một sợi dây. Tiết diện rãnh được biểu diễn công thức (11) ta có:

$$D_{slot} = \frac{D_w}{k_{fill}} \quad (11)$$

Trong đó, k_{fill} là hệ số lấp đầy ($k_{fill} = 0.5522$). Từ thông trên răng stato và bề rộng răng stato được xác định như sau, [8, 9]:

$$\phi_t = \frac{\phi_m \cdot 2p}{Q}, w_t = \frac{\phi_t}{L_r \cdot \vartheta_t} \quad (12)$$

Trong đó, ϑ_t là mật độ từ thông trên răng stato. Đường kính lớn của rãnh (b_1) và đường kính nhỏ của rãnh (b_2) của cả hai cấu hình rôto trong và rôto ngoài được xác định như sau, [3]:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (F_i \pm 2(h_w + h_{so}))}{Q} - w_t,$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 - 4\pi \cdot D_{slot}}{Q}} \quad (13)$$

Trong đó, h_{so} là chiều cao răng và h_w là chiều cao nêm. Dấu “+” tương ứng với rôto trong và dấu “-” tương ứng với rôto ngoài. Từ đó, chiều cao rãnh stato (h_s) và đường kính ngoài rôto được tính:

$$h_s = \frac{2D_{slot}}{b_1 + b_2}, F_{or} = F_i \pm 2h_{yr} \quad (14)$$

Trong đó, dấu “+” tương ứng với rôto ngoài và dấu “-” tương ứng với rôto trong. Đường

kính trục được tính bằng công thức (15):

$$F_{shaft} = F_o - 2(h_{so} + h_w + h_s + h_{sy}) \quad (15)$$

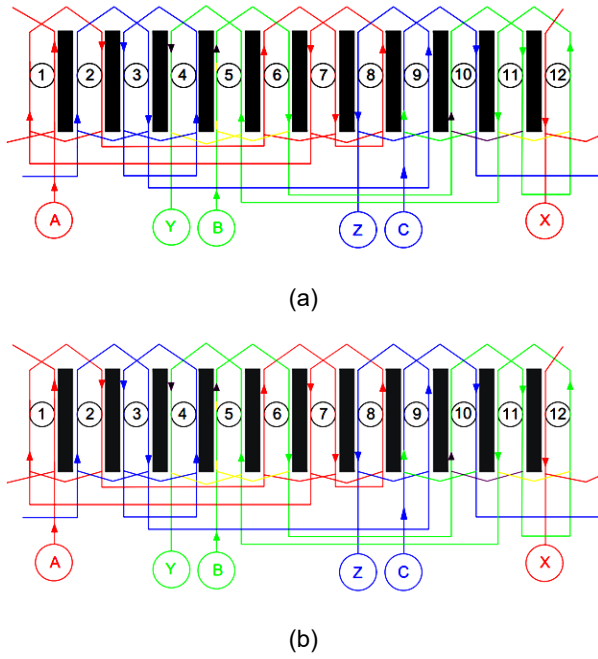
Sau khi các công thức giải tích ở trên được phát triển, một động cơ SPMSM 11.5 kW với cấu hình rôto trong và rôto ngoài được xây dựng. Bảng 1 liệt kê các thông số yêu cầu của động cơ. Bảng 2 trình bày kết quả tính toán giải tích của động cơ với rôto trong và rôto ngoài. Phương pháp PTHH ở Phần 3 sẽ kiểm chứng các kết quả này. Hình 1a và 1b thể hiện sơ đồ quấn dây lần lượt của SPMSM rôto trong và SPMSM rôto ngoài.

Bảng 1. Thông số yêu cầu của động cơ SPMSM rôto trong và rôto ngoài

Thông số	Kí hiệu	SPMSM rôto trong	SPMSM rôto ngoài
Công suất định mức	P_{rated} (kW)	11.5	11.5
Điện áp định mức	U_{rated} (V)	380	380
Hiệu suất	η (%)	94	94
Số pha	m	3	3
Tần số	f (Hz)	50	50
Số cực	2p (cực)	12	12
Hệ số công suất	cos ϕ	0.9	0.9

Bảng 2. Kết quả tính toán giải tích của SPMSM rôto trong và rôto ngoài

Kích thước chính	SPMSM rôto trong	SPMSM rôto ngoài	Đơn vị
Đường kính ngoài stato	274	209	mm
Đường kính trong stato	216	127	mm
Đường kính ngoài rôto	209	245	mm
Đường kính trục rôto	178	216	mm
Chiều dài rôto	216	216	mm
Số rãnh stato	12	12	rãnh
Chiều dài khe hở không khí	1	1	mm
Độ dày nam châm	2.6	2.6	mm



Hình 1. Sơ đồ quấn dây của (a) SPMSM rôto trong và (b) SPMSM rôto ngoài

3. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Như đã đề cập ở phần trước, mô hình tính toán giải tích dễ dàng tính toán để tìm ra được sự khác nhau về thông số thiết kế của hai cấu hình rôto. Trong không gian Euclide R^3 , tập hợp các phương trình Maxwell được biểu thị như sau [2, 9]:

$$\Delta \times H = J_s, \Delta \times E = -j\omega\vartheta, \Delta \cdot \vartheta = 0 \quad (16)$$

Trong đó, J_s là mật độ dòng điện (A/m^2), H là từ trường (A/m), E là điện trường (V/m) và ϑ là mật độ từ thông (Tesla). Công thức (16) được giải bằng các luật cấu thành và điều kiện biên trong phương trình (17) và (18) như sau:

$$\vartheta = \mu H, J = \xi E \quad (17)$$

$$n \times H|_{\Gamma_h} = 0, n \times \vartheta|_{\Gamma_e} = 0 \quad (18)$$

Trong đó, n là vector pháp tuyến đơn vị có hướng từ trong ra ngoài miền μ (với $\mu = \mu_c \cup \mu_c^c$), J là mật độ dòng điện (A/m^2), μ là độ từ thẩm, ξ là độ dẫn điện (S/m). Trường ϑ trong (16) được suy ra từ vector A trong (19).

$$\vartheta = \Delta \times D \quad (19)$$

Kết hợp (16) và (19), trường E được xác định thông qua thế năng vô hướng β trong (20):

$$E = -\zeta_t D - \Delta \beta \quad (20)$$

Phương trình trường điện từ được viết trong miền μ (miền của máy PM) được biểu diễn như [5]. Dựa vào phương trình (16) – (20), ta có:

$$\Delta \times \left[\frac{1}{\epsilon} (\Delta \times D - \vartheta) \right] + \xi \zeta_t D = J_s - \xi \Delta \cdot \beta \quad (21)$$

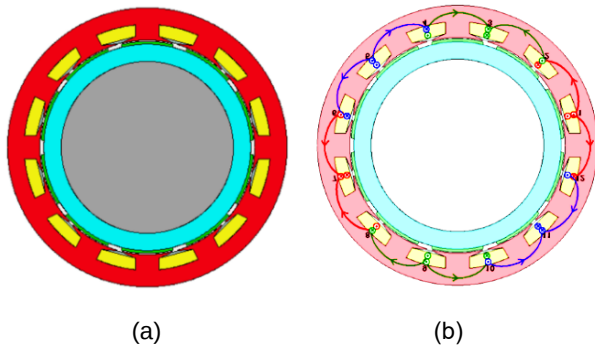
Liên kết từ trường (ϕ) được xác định như sau:

$$\phi = \frac{L}{S} \left(\iint_{\mu^+} D d\mu - \iint_{\mu^-} D d\mu \right) \quad (22)$$

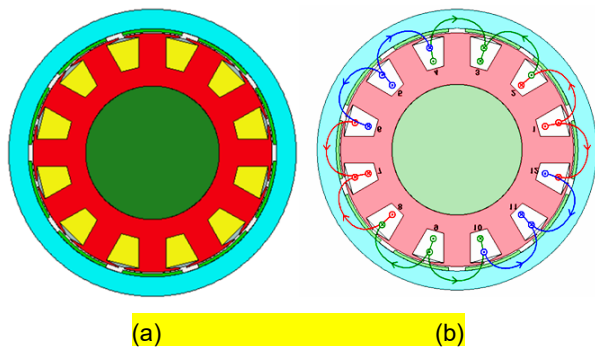
Trong đó, S là tiết diện của chiều dài dây dẫn (L). Ta có thể xác định sức phản điện động bằng cách sử dụng liên kết từ thông (ϕ) ở phương trình (22).

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

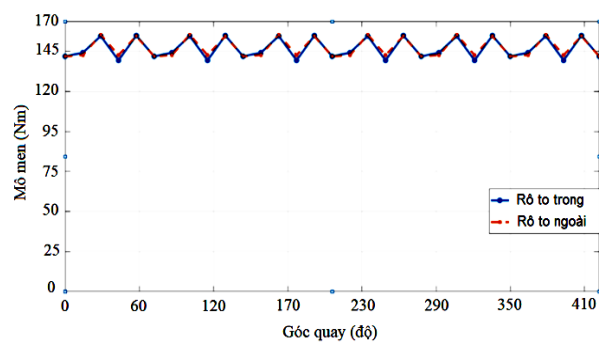
Dựa vào kích thước yêu cầu thu được từ thiết kế giải tích trong bảng 2, phương pháp PTHH để tính toán và mô phỏng mật độ từ thông, mômen đầu ra, mômen răng, sức phản điện động, thành phần song hài của sức phản điện động, liên kết từ thông và độ tăng nhiệt độ. Việc so sánh các thông số điện từ này được thực hiện cho cả cấu hình rôto trong và rôto ngoài. Hình 2 và Hình 3 cho thấy mô hình 2D của SPMSM rôto trong và rôto ngoài. Do đó, SPMSM rôto ngoài sẽ có rãnh sâu hơn so với thiết kế rôto trong. Điều này cho thấy rằng của SPMSM rôto ngoài sẽ có mật độ từ thông cao hơn so với răng của SPMSM rôto trong. Hình 4 biểu diễn mômen đầu ra của hai loại động cơ.



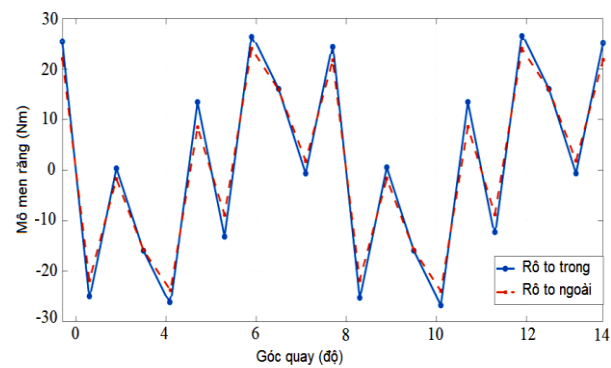
Hình 2. Mô hình 2D của SPMSM rôto trong (a) và (b)



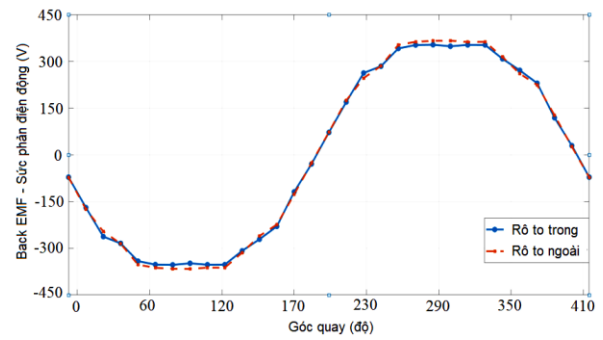
Hình 3. Mô hình 2D của SPMSM rôto ngoài (a) và (b)



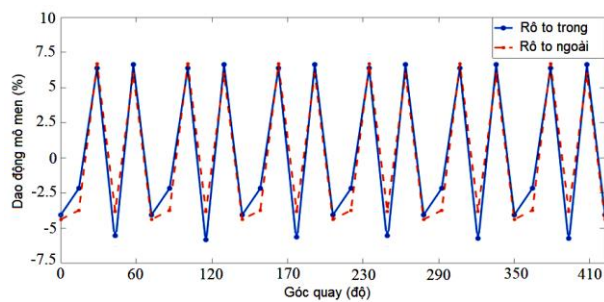
Hình 4. Mômen của máy SPMSM rôto trong và rôto ngoài



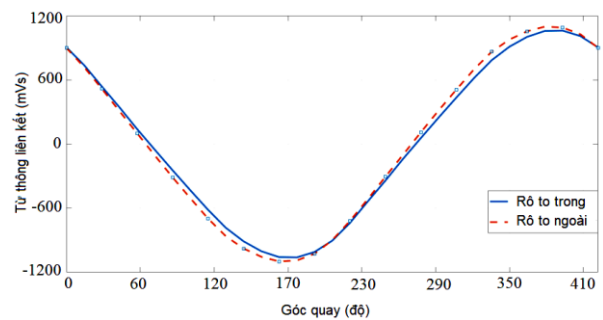
Hình 5. Mômen răng của SPMSM rôto trong và rôto ngoài



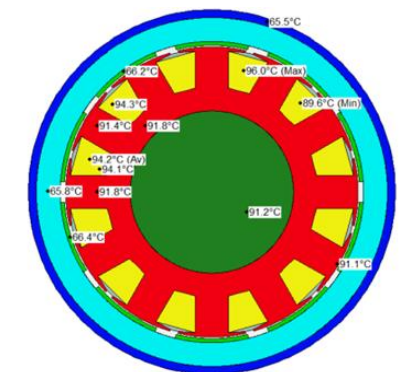
Hình 6. Sức phản điện động của SPMSM rôto trong và rôto ngoài



Hình 7. Dao động mômen của SPMSM rôto trong và rôto ngoài



Hình 8. Từ thông liên kết của SPMSM rôto trong và rôto ngoài



Hình 9. Nhiệt độ mặt cắt ngang trục của SPMSM rôto ngoài

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này kết hợp giữa thiết kế tính toán giải tích và phương pháp PTHH với đối tượng là động cơ SPMSM rôto trong và rôto ngoài. Kết quả thu được là các thông số điện từ, mật độ từ thông, sức phản điện động, mômen, dao động mômen, mômen răng gợn sóng, flux linkage, nhiệt độ. Thông qua PTHH, nghiên cứu đã tập trung vào thiết kế so sánh SPMSM rôto trong và rôto ngoài với dây quấn tập trung để xác định ưu điểm và nhược điểm của từng động cơ. Dữ liệu thu được cho thấy cả SPMSM rôto trong và SPMSM rôto ngoài đều hoạt động tốt nhưng có những ưu điểm và nhược điểm khác nhau. So với SPMSM rôto ngoài, SPMSM rôto trong có ưu điểm là tốc độ cao hơn và nhiệt độ thấp hơn. Ngược lại,

SPMSM rôto ngoài vượt trội hơn SPMSM rôto trong về mômen và độ ổn định. Bài báo này cũng đóng vai trò là nền tảng cho các nghiên cứu sâu hơn, bao gồm các hướng như tối ưu hóa tính toán thiết kế bằng các phương pháp tối ưu như tối ưu bầy bài và thuật toán tiến hóa. Ngoài ra, dữ liệu thu được từ mỗi máy sẽ cung cấp tài liệu tham khảo để lựa chọn SPMSM rôto trong hoặc rôto ngoài phù hợp vào việc ứng dụng cho xe ô tô điện hiện nay. Hướng phát triển nghiên cứu này là ứng dụng để thiết kế chế tạo được các loại máy điện quay trong công nghiệp và dân dụng, những động cơ này trong lĩnh vực điều khiển tự động, đặc biệt là lĩnh vực ô tô điện đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Z. Wang, and B. Liu, "Multi-objective optimization of the hollow shaft direct drive motor," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pages. 168781322311630, Mar (2023).
Doi: 10.1177/16878132231163079.
- [2] M. Wang, L. Wang, R. Huang, and C. Yang, "Event-based disturbance compensation control for discrete-time SPMSM with mismatched disturbances," *International Journal of Systems Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 785-804, Mar (2021). Doi: 10.1080/00207721.2020.1840650.
- [3] L. Feng, S. Yu, F. Zhang, S. Jin, and Y. Sun, "Study on performance of low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor with dynamic eccentricity rotor," *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 1421-1428, August. (2022), Doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.018.
- [4] L. I. Jusoh, E. Sulaiman, F. S. Bahrim, and R. Kumar, "Design Comparison of Inner and Outer Rotor of Permanent Magnet Flux Switching Machine for Electric Bicycle Application," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, August (2017), Vol. 226, pp. 012129, Doi: 10.1088/1757-899X/226/1/012129.
- [5] W.-S. Jung, H.-K. Lee, Y.-K. Lee, S.-M. Kim, J.-I. Lee, and J.-Y. Choi, "Analysis and Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors According to Rotor Type under the Same Design Specifications," *Energies*, Vol. 16, No. 3, pages. 1306, Jan (2023), Doi: 10.3390/en16031306.
- [6] H. Murakami, Y. Honda, H. Kiriya, S. Morimoto, and Y. Takeda, "The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor," in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. ThirtyFourth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, Vol. 2, pp. 840-845, October (1999), Doi: 10.1109/IAS.1999.801607.
- [7] S.-K. Cho, K.-H. Jung, and J.-Y. Choi, "Design Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Compressors of Air-Conditioning Systems Mounted on EVs and HEVs," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, pages. 1-5, Nov. (2018), Doi: 10.1109/TMAG.2018.2849078.

- [8] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, pp. 407–412 (2000), Doi: 10.1109/60.900501.
- [9] G. Du, N. Li, Q. Zhou, W. Gao, L. Wang, and T. Pu, "Multi-Physics Comparison of Surface-Mounted and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for High-Speed Applications," *Machines*, Vol. 10, No. 8, pp. 700, Aug. (2022), Doi: 10.3390/machines10080700

Thông tin liên hệ: **Trần Đức Chuyển**

Điện thoại: 0915311662 - Email: tdchuyen@uneti.edu.vn

Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.