

Thiết kế tối ưu động cơ nam châm vĩnh cửu bề mặt cho ứng dụng khớp robot cộng tác

Optimization Design of a Surface Permanent Magnet Synchronous Motor for Collaboration robot's joint application

Phạm Duy Học^{1*}, Nguyễn Đức Định¹, Phạm Tiến Dũng¹

¹Vietnam – Korea Institute of Science and Technology

*Corresponding author E-mail: pdhoc@most.gov.vn

Abstract

This paper optimized the surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) using genetic algorithm (GA) for collaboration robot arm joints application. The optimal variables are modeled according to the motor dimensions. The algorithm has significantly improved motor torque performance, with torque ripple reduced to 2.15% and the torque magnitude increased to 1.81Nm. The evaluation results are analyzed on Jmag simulation software. With the optimal motor dimensions, the prototype of SPMSM is manufactured, tested with the testing system including a dynamometer and power analyzers.

Keywords: SPMSM, Optimization, Genetic Algorithm (GA), Ripple Torque, Collaboration robot.

Các từ viết tắt

SPMSM	Surface Permanent Magnet Synchronous Motor
GA	Genetic Algorithm
Cobot	Collaborative Robot

Tóm tắt

Bài báo tiến hành tối ưu hóa động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bề mặt (SPMSM) sử dụng thuật toán di truyền (GA) cho ứng dụng cho khớp cánh tay robot cộng tác. Các biến tối ưu được mô hình hóa theo các biến không gian kích thước của động cơ. Thuật toán đã cải thiện đáng kể chất lượng mô-men động cơ, với độ dao động mô-men giảm từ 14.68% xuống 2.15%; độ lớn mô-men tăng từ 1.61Nm đến 1.81Nm. Các kết quả đánh giá được phân tích trên phần mềm mô phỏng Jmag. Với không gian kích thước tối ưu, nguyên mẫu động cơ được gia công chế tạo, chạy thử nghiệm với hệ thử bao gồm hệ dynamometer và hệ phân tích công suất.

1. Giới thiệu

Robot cộng tác (Collaborative robot - cobot) là một dạng của robot tự động hóa, được phát triển để đảm bảo làm việc an toàn và cộng tác với con người trong không gian làm việc chung. So với hệ thống robot công nghiệp hiện có, cobot thường làm việc trong không gian hẹp hơn, cần thu nhỏ. Vì vậy, cobot được tạo thành từ các mô-đun được tối ưu về không gian, kích thước. Từ yêu cầu đó, động cơ cho khớp cobot cũng được thiết kế theo dạng tách rời rotor, stator, hay còn gọi là động cơ không khung vỏ. Xét các loại động cơ thì động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) được ưu tiên sử dụng cho ứng dụng robot do kích thước nhỏ, tăng tỉ lệ mô-men xoắn với quán tính (Torque to inertia ratio), mô-men xoắn cực đại cao và dải tốc độ rộng.

Cho đến nay, một số nghiên cứu đã được thực hiện để thiết kế và tối ưu động cơ điện đáp ứng các yêu cầu trên đối với ứng dụng robot. O. Ocaik [1] tập trung vào việc thiết kế, phân tích

và xác minh thực nghiệm của một động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) cho một ứng dụng robot di động với một nỗ lực trên việc cực tiểu hóa mô-men cogging và độ dao động tự do mô-men xoắn. Ngoài ra, tác giả này cũng trình bày thiết kế và phân tích động cơ PMSM được sử dụng cho robot dịch vụ [2]. Trong nghiên cứu này, kết cấu rotor nhô ra (overhang rotor structure) được xét đến và một mô hình mạng từ trở chòng chắt xét đến ảnh hưởng của phần nhô ra trong rotor được đề xuất để tính toán nhanh hơn so với phân tích phần tử hữu hạn 3 chiều (3D FEA). Các phương pháp tối ưu hóa đối với động cơ PMSM được phân tích và áp dụng trong các thiết kế động cơ nhằm cải thiện khả năng sinh momen của động cơ, tối thiểu hóa sự dao động momen và cải thiện hiệu suất động cơ tại các điểm làm việc. Bài báo [3] đưa ra phương pháp tối ưu thiết kế động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) sử dụng thuật toán di truyền (GA) kết hợp phương pháp Taguchi. Đề tăng mật độ mô-men xoắn của động cơ khớp robot hơn nữa, S. Zhang [4] đã áp dụng dây nam châm vĩnh cửu halbach vào trong động cơ PMSM và tối ưu thiết kế dựa vào độ nhạy đa đối tượng (multi-objective sensitivity).

Mặc dù dây halbach có nhiều ích lợi như mô-men xoắn đầu ra cao, các tổn thất và độ dao động mô-men xoắn thấp nhưng những lợi ích này dẫn đến việc gia tăng chi phí do những khó khăn trong quá trình gia công chế tạo. Đối với các bài toán tối ưu động cơ PMSM, các phương pháp tối ưu thường gặp khó khăn khi bài toán tối ưu phải tính toán với nhiều tham số. Nhiều bài báo tập trung nghiên cứu cải thiện các phương pháp tối ưu động cơ PMSM. Trong các bài báo [5-8] nhóm tác giả đã đề xuất các thuật toán và mô hình kết hợp phương pháp tối ưu đa đối tượng (Multi objective optimization) nhằm giảm thiểu khối lượng tính toán các tham số, tối ưu hóa thiết kế động cơ PMSM. Bài báo [9] tác giả đưa ra phương pháp tối ưu hóa dựa trên phân tích ảnh hưởng của sóng hài trong dòng điện và phân bố mật độ từ thông của động cơ PMSM giúp cải thiện hiệu suất động cơ đồng thời tối thiểu hóa dao động momen trong động cơ tại từng vùng tốc độ. Trong [10], các tác giả đưa ra phương pháp tối ưu thiết kế động cơ SPMSM sử dụng phương pháp bề mặt phản hồi (Response surface

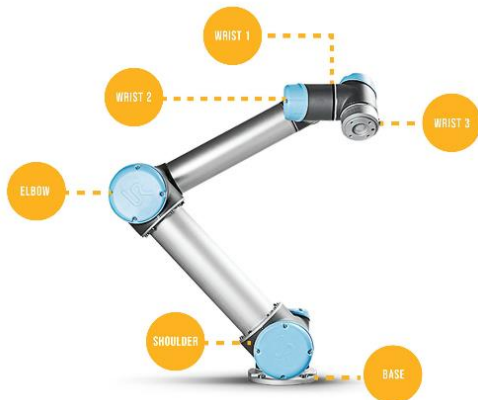
methodology) và tối ưu MOGA (Multi-objective genetic algorithm) kết hợp phương pháp phân tích phần tử hữu hạn 2 chiều (2D-FEA). Nhóm tác giả tối ưu 2 biến ảnh hưởng lớn nhất đến chất lượng momen của động cơ bao gồm độ rộng của rãnh mở stator (slot opening) và tỉ lệ độ rộng của nam châm trên 1 cực (pole pitch) để giảm tác động của momen - cogging, dao động momen xoắn và tổn thất lõi trong động cơ (core loss). Trong bài báo [11], nhóm tác giả trên cũng đề xuất phương án tối ưu động cơ SPM 12 slot - 10 pole sử dụng phương pháp tối ưu Multi-objective optimization kết hợp mô hình mạch từ tương đương của động cơ, phương pháp tối ưu cải thiện đáng kể chất lượng momen của động cơ giúp giảm dao động momen xoắn (Torque ripple) từ 10.9Nm xuống còn 1.59Nm.

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bề mặt (Surface permanent magnet motor - SPM) được sử dụng nhiều trong thiết kế cơ cấu chấp hành thông minh (Smart actuator) cho robot cộng tác. Các dòng sản phẩm robot cộng tác của hãng Universal Robot cũng sử dụng động cơ SPM cho việc thiết kế các cơ cấu chấp hành thông minh [15]. Đối với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu chìm bên trong (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor - IPMSM) được sử dụng nhiều trong các ứng dụng cho xe điện với dải tốc độ làm việc lớn và hiệu suất cao. Trên cơ sở các nghiên cứu về tối ưu động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, nhóm tác giả đề xuất thuật toán tối ưu di truyền (GA) để tối ưu hóa thiết kế động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bề mặt (SPM) cho ứng dụng cho khớp cánh tay robot cộng tác. Thiết kế tối ưu được áp dụng cho động cơ giúp giảm sự dao động momen đầu ra của động cơ và tăng mô-men trung bình động cơ với cùng một không gian kích thước bao của động cơ.

2. Thiết kế động cơ cơ sở cho ứng dụng khớp cánh tay robot cộng tác

2.1. Yêu cầu thiết kế động cơ

Với đặc tính của robot cánh tay nói chung, động cơ nam châm vĩnh cửu dạng bề mặt (SPMSM) thường được lựa chọn sử dụng. Động cơ SPMSM được đề xuất trong bài báo được phát triển cho robot cộng tác có cấu hình 6 bậc tự do, tải trọng 5kg.



Hình 1: Định nghĩa các khớp của cobot cộng tác (hình ảnh robot cộng tác UR5 – Universal robot)

Yêu cầu về tốc độ, mô-men và công suất động cơ được tính toán từ bài toán động học, động lực học của robot cộng tác.

Với tính toán tại cho khớp BASE, yêu cầu kỹ thuật cho động cơ khớp robot cộng tác được liệt kê trong bảng 1.

Bảng 1: Thông số yêu cầu thiết kế của động cơ

Thông số	Giá trị
Công suất đầu ra định mức (P_{mec})	300 (W)
Tốc độ định mức (n)	2000 (rpm)
Tốc độ lớn nhất (n_{max})	3000 (rpm)
Mô-men định mức (T_{max})	1.6 (Nm)
Hiệu suất định mức (η)	86 (%)

2.2. Thiết kế động cơ cơ sở cho khớp robot cộng tác

Từ yêu cầu thiết kế động cơ, không gian kích thước của động cơ được tính toán dựa trên các phương trình điện từ theo tài liệu tham khảo [12].

$$P_{mec} = mEI \quad (1)$$

Trong đó, m là số pha của động cơ, E là giá trị hiệu dụng suất điện động cảm ứng, I là giá trị hiệu dụng dòng điện pha trong động cơ. Giá trị suất điện động cảm ứng của động cơ được tính toán theo giá trị từ thông liên kết Φ_m trong động cơ, giá trị hiệu dụng suất điện động cảm ứng trong động cơ:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega k_w N \Phi_m \quad (2)$$

Trong đó ω là tốc độ định mức của động cơ, k_w là hệ số dây quấn, N là tổng số vòng dây trong 1 pha. Thay phương trình (2) vào (1) ta được:

$$\begin{aligned} P_{mec} &= m \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N k_w \Phi_m I = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega k_w \Phi_m \frac{A\pi D}{2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} 2p\pi n k_w \frac{D}{2p} B_\delta l \frac{A\pi D}{2} \\ &= \frac{\pi^2}{2} k_w A B_\delta D^2 l n = \frac{\pi^2}{2} k_w A B_\delta D^3 \xi n = C_{mec} D^3 \xi n \end{aligned}$$

Phương trình đường kính stator động cơ được tính toán dựa theo phương trình:

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{2P_{mec}}{\pi^2 k_w A B_\delta \xi n}} = \sqrt[3]{\frac{P_{mec}}{C_{mec} \xi n}} \quad (3)$$

Trong đó D_s, l là các giá trị đường kính stator và chiều dài động cơ; A, B_δ, k_w là giá trị mật độ dòng điện, mật độ từ thông tại khe hở không khí và hệ số dây quấn của động cơ; n là tốc độ định mức. Hệ số tỉ lệ $\xi = \frac{l}{D_s}$ là tham số được lựa chọn

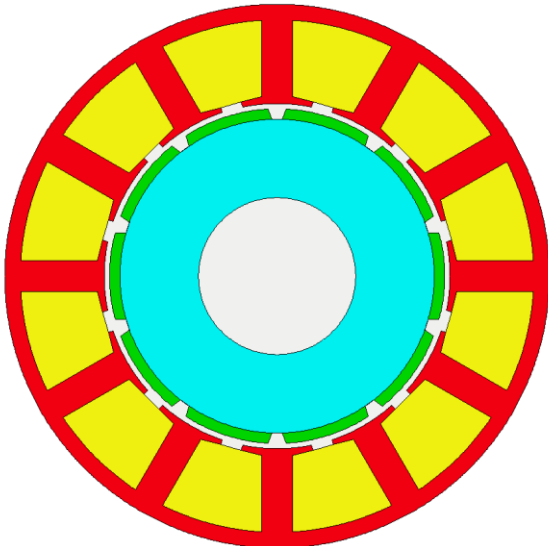
trong tính toán không gian kích thước cho động cơ. Hệ số C_{mec} thể hiện mật độ từ thông và mật độ dòng điện của động cơ.

Với thông số yêu cầu thiết kế động cơ từ bảng 1, các tham số đầu vào được lựa chọn để tính toán không gian kích thước cơ sở cho động cơ đáp ứng yêu cầu thiết kế. Nhóm tác giả lựa chọn hệ số tỉ lệ $\xi = 0.46$ và hệ số $C_{mec} = 68$. [12]

Từ các hệ số đầu vào và phương trình (3), không gian kích thước của động cơ được đưa ra theo bảng 2 đảm bảo thông số kỹ thuật đầu vào của động cơ. [15]

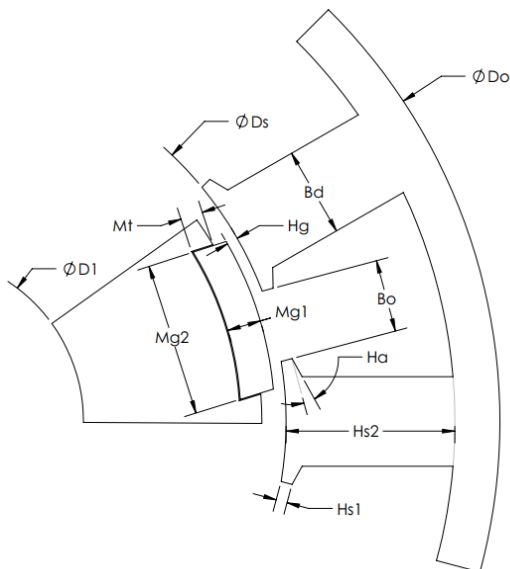
Bảng 2: Thông số không gian kích thước cơ bản của động cơ

Thông số	Giá trị
Đường kính ngoài stator (D_o)	104 (mm)
Chiều dài động cơ (l)	31 (mm)
Đường kính trong stator (D_s)	66 (mm)
Độ rộng khe hở không khí (H_g)	1 (mm)



Hình 2: Động cơ cơ sở được thiết kế

Động cơ 12 rãnh - 10 cực SPMSM đã thiết kế được mô phỏng, đánh giá bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm JMAG. Các tham số động cơ được thể hiện trên hình 3.



Hình 3: Mặt cắt động cơ và các tham số kích thước động cơ

Các tham số của động cơ SPMSM 12 rãnh - 10 cực được thiết kế chính là các tham số ban đầu cho bài toán tối ưu động cơ. Việc tính toán cơ sở chỉ đưa ra được một vài tham số, các tham số còn lại được lựa chọn và liệt kê trong bảng 3. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong bảng 4.

Động cơ được xây dựng với 12 tham số kích thước, gồm có các tham số kích thước của stator, rotor, nam châm và khe hở không khí. Stator có 7 tham số kích thước bao gồm: đường kính ngoài stator (D_o), đường kính trong stator (D_s), độ rộng răng stator (B_d), độ mở rãnh (B_o), chiều sâu rãnh (H_{s2}), độ dày đế rãnh (H_{s1}), góc đế rãnh (H_a). Các tham số kích thước rotor bao gồm: đường kính trong rotor (D_1), chiều cao phần chặn nam châm (M_t). Các tham số về nam châm bao gồm: độ dày nam châm (M_{g1}), chiều rộng nam châm (M_{g2}). Tham số cuối cùng là chiều rộng khe hở không khí (H_g).

Bảng 3: Giá trị ban đầu của tham số động cơ

	Ký hiệu	Mô tả	Đơn vị	Giá trị
Stator	D_o	Đường kính ngoài stator	mm	104
	D_s	Đường kính trong stator	mm	66
	B_d	Độ rộng răng stator	mm	6
	B_o	Độ mở rãnh	mm	4
	H_{s1}	Độ dày đế rãnh	mm	1
	H_{s2}	Chiều sâu rãnh	mm	16
	H_a	Góc đế rãnh	độ	0
Rotor	D_1	Đường kính trong rotor	mm	30
	M_t	Chiều cao phần chặn nam châm	mm	0
Nam châm	M_{g1}	Độ dày nam châm	mm	2
	M_{g2}	Chiều rộng nam châm	độ	150
Airgap	H_g	Khe hở không khí	mm	1

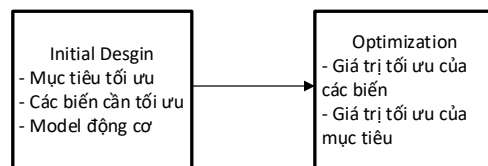
Bảng 4: Giá trị mô phỏng động cơ cơ sở tại tốc độ định mức

Biến	Giá trị
Tốc độ định mức	2000 vòng/phút
Momen định mức	1.6 Nm
Dòng điện pha hiệu dụng	11 A
Công suất đầu vào	382W
Hiệu suất	87.9%
Điện cảm trực d-q ($L_d=L_q$)	0.16 mH

3. Tối ưu động cơ SPMSM cho ứng dụng khớp robot cộng tác

3.1. Tổng quan về tối ưu động cơ sử dụng thuật toán gen di truyền (GA)

Tối ưu đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực thiết kế động cơ điện, đặc biệt với các động cơ có yêu cầu công nghệ cao và nhiều tham số như động cơ cho xe máy điện, ô tô điện, động cơ cho robot,... Dưới đây là sơ đồ các bước thiết kế tối ưu trong động cơ:



Hình 4: Sơ đồ thiết kế tối ưu động cơ điện

Thiết kế tối ưu động cơ gồm hai bước:

- Bước 1: Thiết kế cơ sở
Một cấu hình động cơ cơ sở được thiết kế sao cho đảm bảo các yêu cầu cơ bản về đặc tính. Các thông số động cơ tại thiết kế cơ sở là điều kiện ban đầu trong bài toán tối ưu. Sau bước này, người thiết kế cần xác định rõ: Các biến tối ưu; mục tiêu tối ưu và mô hình tối ưu.
- Bước 2: Tiến hành tối ưu
Với các biến tối ưu, mục tiêu tối ưu, mô hình tối ưu và các điều kiện ban đầu trong bước 1. Người thiết kế tiến hành tối ưu để tìm được cấu hình động cơ tốt nhất.

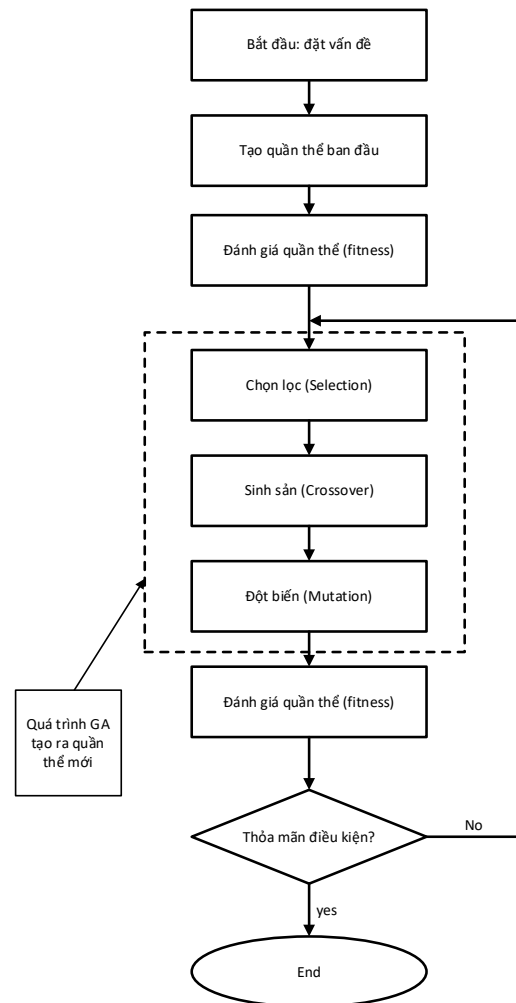
Động cơ cho ứng dụng khớp cánh tay robot công tác đòi hỏi nhiều yêu cầu khắt khe về kỹ thuật, đó là mật độ công suất cao, mật độ mô-men lớn, trọng lượng nhỏ đồng thời độ dao động mô-men cần tối thiểu hóa nhằm giúp robot di chuyển mượt mà và đáp ứng động học tốt. Có hai lớp thuật toán tối ưu chính. Thứ nhất là thuật toán tối ưu dựa trên gradient với các thuật toán điển hình như Gradient, Newton - Raphson, quasi Newton, Gauss Newton,... Thứ hai là lớp các thuật toán tối ưu hiện đại với các thuật toán tối ưu GA, ED, DEA, PSO,... Các thuật toán dựa trên gradient được phát triển sớm và đang được ứng dụng rộng rãi. Tuy vậy, điểm bất lợi của lớp thuật toán dựa trên gradient là chúng ta cần có thông tin gradient của hàm mục tiêu. Nếu hàm mục tiêu là hàm không khả vi hoặc là hàm không rõ (như mô hình FEM trong tối ưu động cơ) thì không thể lấy thông tin về gradient. Hơn nữa, thuật toán gradient là thuật toán tìm kiếm tối ưu cục bộ, trong khi chúng ta luôn muốn tìm kiếm điểm tối ưu toàn cục. Lớp các thuật toán hiện đại giải quyết được các vấn đề trên khi chúng không cần thông tin dạng hàm mục tiêu (chỉ cần biết đầu vào - đầu ra) và luôn tìm kiếm được điểm tối ưu toàn cục. Động cơ điện PMSM là mô hình phức tạp và phi tuyến. Để đánh giá cặn kẽ và chính xác các thông số động cơ, chúng ta thường sử dụng mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM). Do đó, các thuật toán tối ưu hiện đại được sử dụng trong tối ưu động cơ điện [14]. Cụ thể, thuật toán được sử dụng phổ biến là tối ưu gen di truyền (GA). Lưu đồ hình 5 thể hiện các bước trong thuật toán GA để tìm ra điểm tối ưu.

3.2. Mục tiêu tối ưu, biến tối ưu và ràng buộc

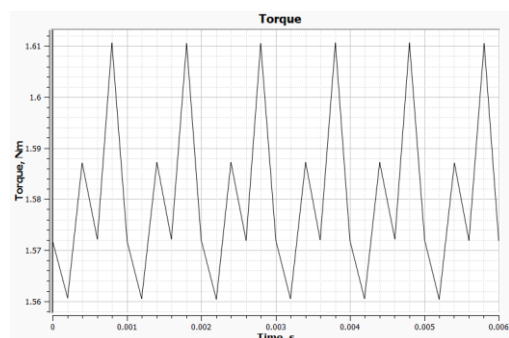
3.2.1. Mục tiêu tối ưu

Để đảm bảo sự đáp ứng nhanh và chính xác của robot, động cơ cần đạt mật độ mô-men xoắn lớn. Mặt khác, động cơ cho ứng dụng khớp robot công tác đòi hỏi yêu cầu cao về chất lượng mô-men để robot có thể hoạt động bền bỉ và trơn tru. Do đó, đảm bảo sự dao động mô-men nhỏ cho động cơ cũng rất quan trọng. Trong công bố này, nhóm tác giả thực hiện tối ưu đồng thời hai mục tiêu trên: tối đa hóa khả năng sinh mô-men và tối thiểu hóa độ dao động mô-men. Độ dao động mô-men trong động cơ bị tác động bởi hai thành phần: mô-men “cogging” và mô-men “ripple”. Mô-men “cogging” là mô-men xoắn không đồng đều do sự tương tác từ trường giữa nam châm vĩnh cửu trên rotor và răng stator. Mô-men “ripple” là mô-men xoắn không đồng đều do sự lệch pha giữa dạng sóng điện áp cảm ứng ngược (back-emf) và dạng sóng dòng điện pha [13]. Hai hiện tượng làm giảm hiệu suất, giảm độ mượt mà, tăng rung động và tiếng ồn trong quá trình làm việc của động cơ. Trong JMAG, mô-men tức thời được tính toán tại

những thời điểm trong khoảng thời gian một chu kỳ điện. Tập hợp liên tiếp các mô-men tức thời, chúng ta có dữ liệu và hình ảnh về mô-men động cơ (hình 6), từ đó người thiết kế có thể đánh giá chất lượng mô-men của động cơ.



Hình 5: Lưu đồ thuật toán gen di truyền (GA)



Hình 6: Mô-men tức thời của động cơ trong một chu kỳ điện

Mô-men động cơ là mục tiêu tối ưu hóa trong bài báo này chính là mô-men trung bình của các mô-men tức thời trong một chu kỳ điện, tên biến của mô-men trung bình động cơ là T_{ave} [3].

$$T_{ave} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_i}{i} \quad (4)$$

Với T_1, T_2, \dots, T_i là các mô-men tức thời tại các thời điểm. Độ dao động mô-men được tính toán theo tỷ lệ giữa hiệu số giữa

mô men tức thời lớn nhất và mô men tức thời nhỏ nhất cho giá trị mô men trung bình (phương trình (5)). Trong nghiên cứu này, giá trị dao động mô men được trích xuất từ dữ liệu mô men tức thời của động cơ trong một chu kỳ điện với tên biến T_{rip} [4].

$$T_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ave}} \cdot 100\% \quad (5)$$

3.2.2. Biến tối ưu

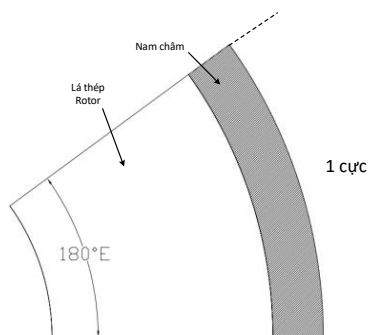
Mô-men động cơ bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố. Các yếu tố quan trọng nhất cần kể đến đó là kích thước động cơ (chiều dài, đường kính động cơ); khe hở không khí; biên dạng nam châm; độ rộng răng và chiều sâu rãnh stator. Với chiều dài và đường kính động cơ, bài báo giữ nguyên với kích thước cơ bản, mục tiêu là tối đa hóa mô-men trong một không gian kích thước bao không đổi. Với khe hở không khí, khi khe hở không khí càng nhỏ, mô-men sinh ra càng lớn. Tuy nhiên, khe hở không khí không thể quá nhỏ do giới hạn về khả năng gia công. Trong công bố này, độ rộng khe hở không khí được cố định giá trị là 1mm. Độ dao động mô-men bị ảnh hưởng bởi hầu hết các tham số đặc biệt là các tham số liên quan đến biên dạng răng, rãnh và biên dạng nam châm.

Bảng 5: Biến tối ưu

Biến tối ưu	Khoảng tối ưu	
	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất
B_d (mm)	4	10
B_o (mm)	2	9
H_{s1} (mm)	0.5	2
H_{s2} (mm)	8	18
H_a (độ)	0	40
M_{g1} (mm)	1	5
M_{g2} (°E)	90	160
M_t (mm)	0	5

Tổng hợp các biến tối ưu trong bài toán được thể hiện trong bảng 5. Giá trị ban đầu và giá trị biên của các biến được thể hiện trong bảng 5.

Lưu ý: Chiều rộng nam châm (M_{g2}) được quy đổi về độ rộng theo góc điện (°E). Chiều rộng tối đa của nam châm là 180°E, tương ứng khi nam châm rộng bao trùm hết một cực của động cơ (hình 7). Vật liệu nam châm được sử dụng là N35UH, với vật liệu nam châm này cho phép nhiệt độ làm việc cao nhất 180°C.



Hình 7: Nam châm khi đạt chiều rộng 180°E

3.2.3. Ràng buộc

a) Ràng buộc diện tích rãnh

Trong bài toán tối ưu này, các thông số kích thước răng và rãnh thay đổi có thể dẫn đến diện tích rãnh chứa dây quấn to ra hoặc nhỏ bớt. Tuy vậy, diện tích rãnh phải có giá trị cận dưới do số lượng dây quấn trong một rãnh đã được cố định. Nếu diện tích rãnh quấn dây quá nhỏ, dây quấn sẽ không thể đi qua. Điều kiện ràng buộc diện tích rãnh được tính toán theo điều kiện ràng buộc của mật độ dòng điện [12]. Do đó, ràng buộc trong bài toán tối ưu là:

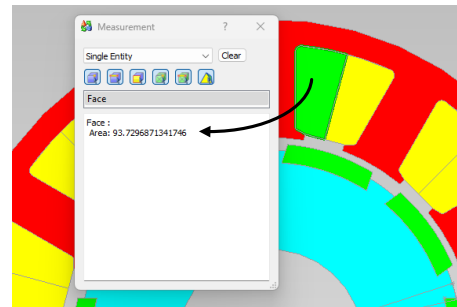
$$S_c = \frac{I}{J}; J < 6.5$$

$$\Rightarrow 1.69 < S_c \quad (6)$$

$$S_{slot_total} = \frac{S_c \cdot N_c}{\sigma}$$

$$\Rightarrow S_{slot_total} > 116 (mm^2)$$

Trong đó S_c là giá trị diện tích 1 dây dẫn, N_c là số dây dẫn trong 1 rãnh, với cách quấn dây thiết kế cho động cơ số dây dẫn trong mỗi rãnh là 24. σ là hệ số lấp đầy của dây dẫn trong 1 rãnh, dựa theo tài liệu [12] nhóm tác giả chọn hệ số lấp đầy là 0.4. J là mật độ dòng điện trong 1 dây dẫn, khoảng giá trị mật độ dòng điện được tính toán theo tài liệu tham khảo [12], I là giá trị hiệu dụng dòng điện pha.



Hình 8: Diện tích một nửa của rãnh

b) Ràng buộc điện áp đầu vào

Để đảm bảo đặc tính tốc độ động cơ, độ lớn của điện áp cảm ứng ngược (Back EMF) không được vượt quá giới hạn điện áp một chiều cấp cho động cơ (Vdc). Cần ràng buộc giá trị điện áp cảm ứng ngược tại tốc độ lớn nhất (3000 rpm) không vượt quá giá trị điện áp cấp. Với phương pháp điều chế PWM, điện áp một chiều cấp vào động cơ là 48V, điện áp pha lớn nhất của động cơ là:

$$V_{phase_peak_max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \cdot \alpha = \frac{48}{\sqrt{3}} \cdot 0,8 \approx 22(V) \quad (7)$$

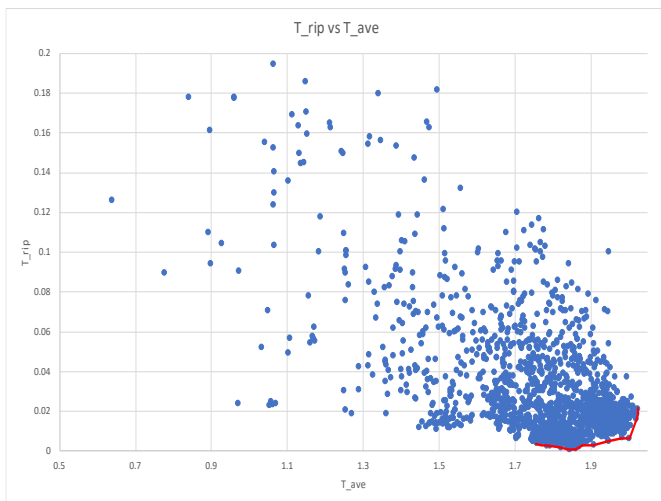
Trong đó, α là hệ số điều chế, ràng buộc của bài toán là:

$$V_{phase_peak} - 22 \leq 0 \quad (8)$$

4. Kết quả

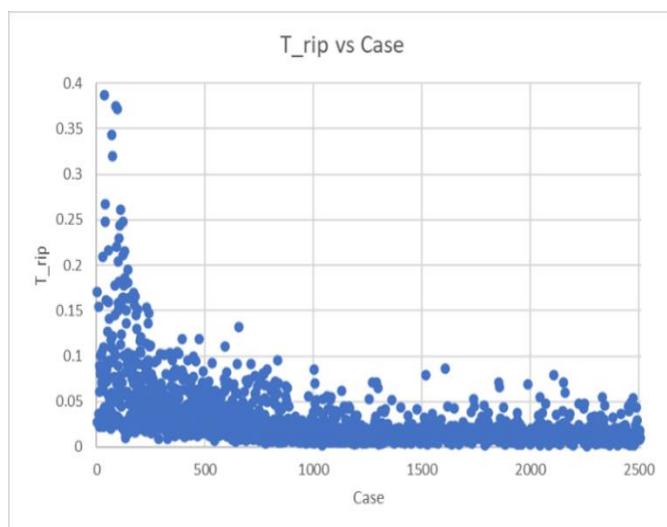
4.1. Kết quả tối ưu

Với số lượng quần thể trong bài toán tối ưu là 50, tổng số lượng cá thể trong tất cả các quần thể là 2506 tương ứng với 2506 cấu hình động cơ khác nhau đã được mô phỏng và phân tích (mỗi cá thể tương ứng với một Case). Kết quả tối ưu hai mục tiêu được thể hiện hình 9.



Hình 9: Kết quả hai hàm mục tiêu T_{rip} và T_{ave} của bài toán tối ưu

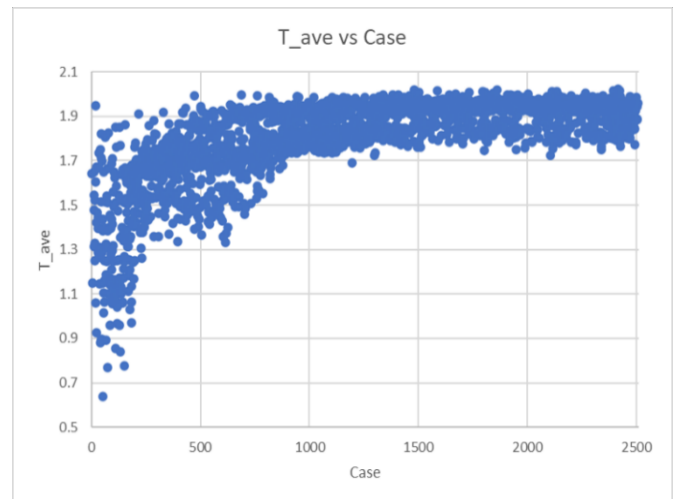
Sau quá trình tối ưu hóa, có những cấu hình độ dao động mô-men giảm xuống dưới 1%, mô-men trung bình lớn nhất có thể lên đến 2Nm. Thuật toán tối ưu giúp tăng mô-men trung bình và giảm đáng kể độ dao động mô-men. Kết quả của bài toán tối ưu đa mục tiêu là đường Pareto màu đỏ trong hình 9. Cụ thể, hai mục tiêu: Tối thiểu hóa T_{rip} và tối đa hóa T_{ave} có sự mâu thuẫn với nhau: Để T_{rip} giảm thì T_{ave} cũng phải giảm và ngược lại, để T_{ave} tăng thì T_{rip} cũng phải tăng. Do đó, các giá trị trên đường Pareto đều có thể được chấp nhận và tùy thuộc vào người thiết kế lựa chọn.



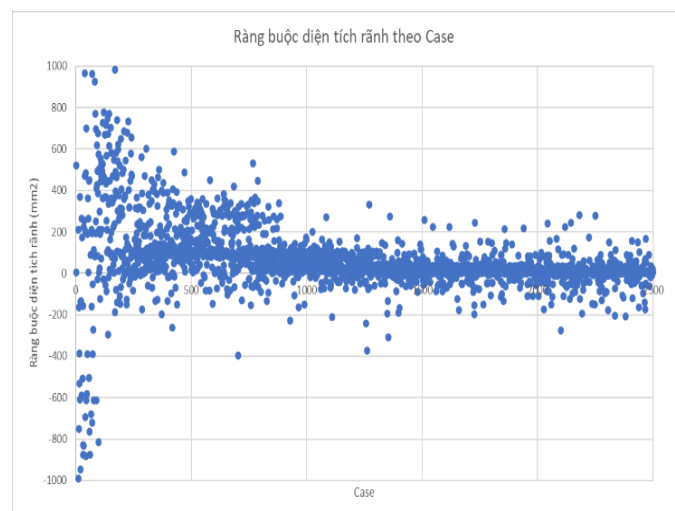
Hình 10: Sự thay đổi của mục tiêu T_{rip} khi tiến hành tối ưu

Hình 10 và 11 thể hiện rõ hơn sự thay đổi của các hàm mục tiêu T_{rip} và T_{ave} trong quá trình tối ưu. Ta có thể thấy, thuật toán tối ưu giúp tìm được các cấu hình có độ dao động mô-men giảm dần và mô-men trung bình tăng dần. Bên cạnh đó, thuật toán cũng đảm bảo các ràng buộc được thỏa mãn.

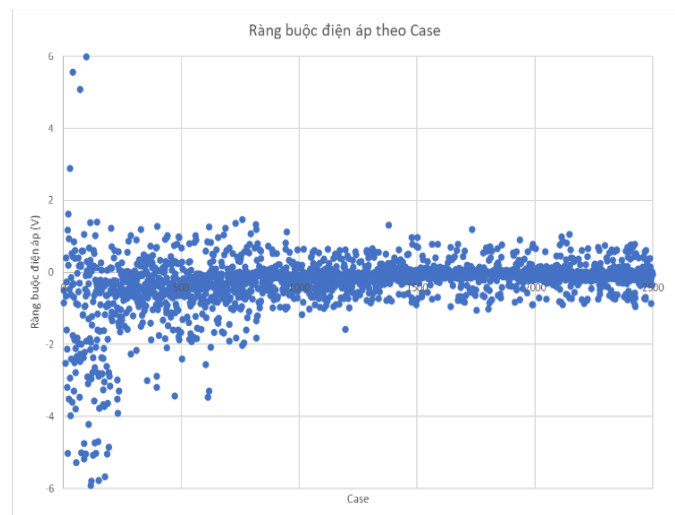
Hình 12 và 13 thể hiện sự thay đổi của các ràng buộc khi tiến hành tối ưu. Tại thời điểm bắt đầu tối ưu, các cấu hình động cơ chưa hoàn toàn đảm bảo các ràng buộc. Tuy vậy, theo tiến trình tối ưu, thuật toán tìm được các cấu hình thỏa mãn các ràng buộc, đồng thời đáp ứng mục tiêu tối ưu.



Hình 11: Sự thay đổi của mục tiêu T_{ave} khi tiến hành tối ưu



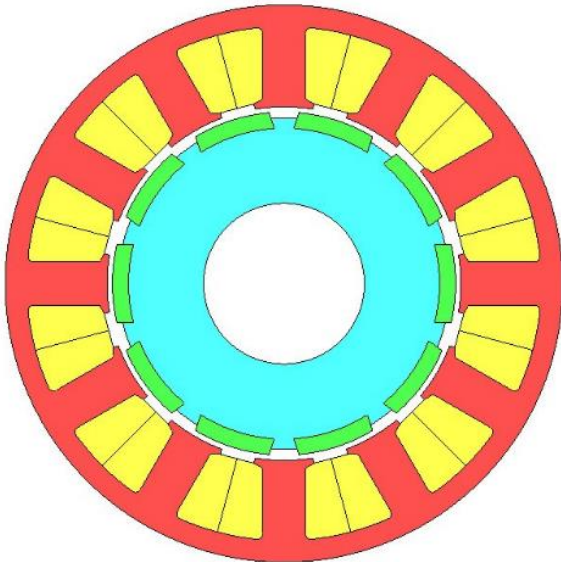
Hình 12: Sự thay đổi ràng buộc điện tích rãnh khi tiến hành tối ưu



Hình 13: Sự thay đổi ràng buộc điện áp khi tiến hành tối ưu

4.2. So sánh động cơ tối ưu và động cơ cơ bản

Qua quá trình tối ưu, cấu hình động cơ tối ưu được chọn và thể hiện trong hình 14. Bảng 6 thể hiện sự thay đổi các tham số động cơ trước và sau tối ưu. Ngoại trừ biến H_{s1} , các biến tối ưu đều thay đổi so với giá trị ban đầu.

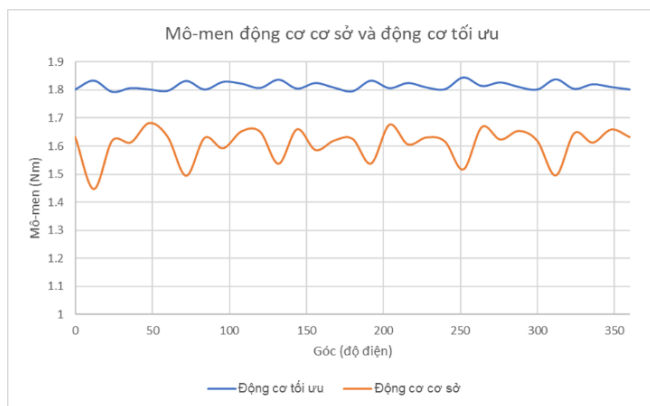


Hình 14: Hình ảnh động cơ sau tối ưu

Bảng 6: Các giá trị biến tối ưu và mục tiêu tối ưu

	Tham số	Giá trị ban đầu	Giá trị tối ưu
Biến tối ưu	B_d (mm)	6	8
	B_o (mm)	4	6.5
	H_{s1} (mm)	1	1
	H_{s2} (mm)	16	15
	H_a (độ)	0	14
	M_{g1} (mm)	2	3
	M_{g2} (°E)	150	130
	M_t (mm)	0	2
Mục tiêu tối ưu	T_{rip} (%)	14.68	2.15
	T_{ave} (Nm)	1.61	1.81

Động cơ sau tối ưu có mô-men được cải thiện đáng kể về chất lượng với mô-men dao động giảm từ 14.68% xuống còn 2.15%; mô-men trung bình tăng từ 1.61Nm lên 1.81Nm. Hình 15 thể hiện hình ảnh mô-men của động cơ cơ sở và động cơ tối ưu trong một chu kỳ điện.



Hình 15: Mô-men động cơ cơ sở và động cơ tối ưu

5. Mô hình động cơ thực tế

5.1. Động cơ thực tế

Dựa trên kết quả tối ưu, nhóm nghiên cứu đã chế tạo nguyên mẫu động cơ SPMSM cho khớp robot cộng tác. Mô hình động

cơ được chế tạo theo dạng động cơ không khung vỏ bao gồm: Stator, rotor và bộ gá chạy thử nghiệm động cơ như trong hình 16. Các kết quả chạy thử nghiệm động cơ được phân tích và so sánh với kết quả mô phỏng.

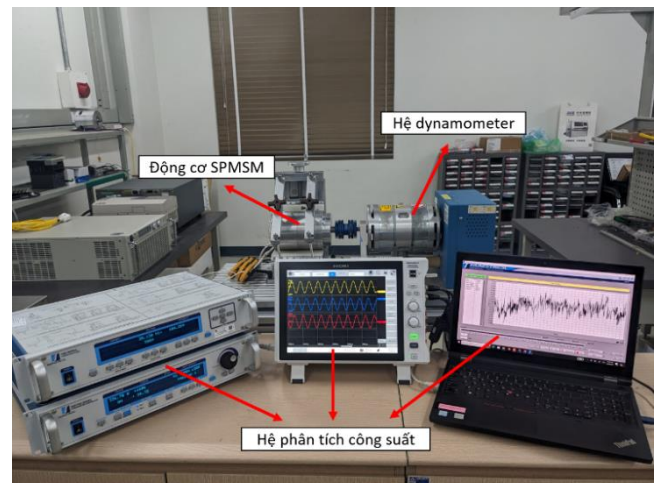


Hình 16: Stator và rotor động cơ



Hình 17: Lắp ráp động cơ hoàn chỉnh

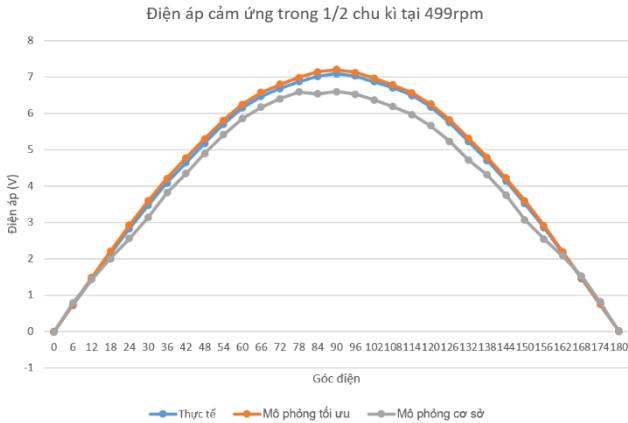
Động cơ được lắp đặt và thử nghiệm trên hệ Dynamometer HD-715 của Magtrol. Hệ thống thử nghiệm được vận hành tại Phòng thí nghiệm Điện tử thuộc Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam - Hàn Quốc.



Hình 18: Nguyên mẫu động cơ SPMSM trên hệ thống thử nghiệm

5.2. Kết quả chạy thực nghiệm

Hệ thử nghiệm Dynamometer HD-715 có khả năng tạo tải, đọc và hiển thị tức thời các thông số: mô-men, điện áp, dòng điện, công suất đầu vào, công suất đầu ra và hiệu suất. Tuy vậy, khả năng đo tức thời mô-men của thiết bị chưa đủ nhanh để thể hiện đường mô-men theo thời gian trong một chu kỳ điện. Nhóm nghiên cứu thực hiện các đo đạc và so sánh các thông số về dạng sóng điện áp cảm ứng, mô-men trung bình, dòng điện và hiệu suất. Hình 19 so sánh biên dạng điện áp cảm ứng tại cùng một tốc độ giữa nguyên mẫu động cơ thực tế và động cơ mô phỏng. Ta có thể thấy, không có sự khác biệt đáng kể về hình dạng và biên độ giữa hai dạng sóng.

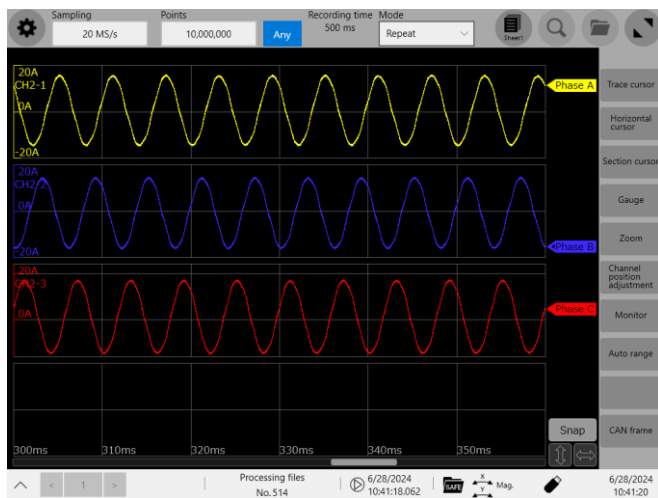


Hình 19: Điện áp cảm ứng trong 1/2 chu kỳ điện tại tốc độ 499 rpm

Hình 20, hình 21 thể hiện kết quả đo thông số đầu ra động cơ và kết quả đo dòng điện pha động cơ trên máy hiện sóng tại điểm làm việc định mức với tốc độ 2000 vòng/phút và momen 1.6Nm. Thông số đo chạy kiểm nghiệm động cơ tại điểm làm việc định mức được so sánh với kết quả mô phỏng thể hiện trong bảng 7.



Hình 20: Kết quả đo thông số đầu ra động cơ tại điểm định mức



Hình 21: Kết quả đo dòng điện tại điểm làm việc định mức

Bảng 7: So sánh các thông số tại điểm làm việc định mức

Các trường hợp thực nghiệm		Dòng điện pha rms (A)		Công suất đầu vào (W)		Hiệu suất (%)	
Momen (Nm)	Tốc độ (v/p)	Mô phỏng	Thực nghiệm	Mô phỏng	Thực nghiệm	Mô phỏng	Thực nghiệm
1.6	2000	10.1	10.5	376	385	89.3	87.4
1.8	2000	11.5	11.7	425	432.6	88.9	87.15

Động cơ thực nghiệm được gia công chế tạo đảm bảo không gian kích thước giống với mô hình động cơ được thiết kế tối ưu. Các kết quả đo được từ thực nghiệm cho thấy tại điểm làm việc định mức của động cơ (tại điểm mô-men 1.6 Nm và tốc độ 2000 v/p), các giá trị dòng điện và công suất đầu vào của động cơ thực nghiệm lớn hơn so với tính toán trong mô phỏng. Sự sai khác giữa kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng một phần do tổn thất cơ khí của cả hệ đo, tuy nhiên như tổng hợp ở bảng 7, sự sai lệch giữa kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng không lớn.

6. Kết luận

Công bố đã trình bày quá trình thiết kế, tối ưu động cơ cho ứng dụng khớp robot cộng tác. Cấu hình động cơ thuộc loại SPMSM không khung vỏ. Thuật toán tối ưu giúp tăng mật độ mô-men và giảm đáng kể dao động mô-men trong động cơ. Cấu hình động cơ tối ưu đó đã được nhóm nghiên cứu gia công, chế tạo nguyên mẫu thành công. Kết quả kiểm nghiệm nguyên mẫu cho thấy các thông số kỹ thuật của động cơ nguyên mẫu không sai khác đáng kể với động cơ tối ưu trong mô phỏng. Từ đó cho thấy, động cơ được nhóm nghiên cứu thiết kế hoàn toàn có thể áp dụng vào thực tiễn cho ứng dụng khớp cánh tay robot.

References

- [1] O. Ocak, B. T. Ertugrul, E. Sincar, C. Oysu and M. Aydin *Design, analysis and experimental verification of a permanent magnet AC servomotor for mobile robot applications*. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012, pp. 196-200.
- [2] J. -M. Seo, I. -S. Jung, H. -K. Jung and J. Ro, *Analysis of Overhang Effect for a Surface-Mounted Permanent Magnet Machine Using a Lumped Magnetic Circuit Model*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 5, pp. 1-7, May 2014.
- [3] C. -C. Hwang, L. -Y. Lyu, C. -T. Liu and P. -L. Li, *Optimal Design of an SPM Motor Using Genetic Algorithms and Taguchi Method*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 11, pp. 4325-4328, Nov. 2008.
- [4] S. Zhang, W. Zhang, R. Wang, X. Zhang and X. Zhang *Optimization design of halbach permanent magnet motor based on multi-objective sensitivity*. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 20-26, March 2020.
- [5] Y. Guo, J. Si, C. Gao, H. Feng and C. Gan. *Improved Fuzzy-Based Taguchi Method for Multi-Objective Optimization of Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Motors*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 6, pp. 1-4, June 2019.
- [6] S. -G. Lee, S. Kim, J. -C. Park, M. -R. Park, T. H. Lee and M. -S. Lim, *Robust Design Optimization of SPMSM for Robotic Actuator Considering Assembly Imperfection of Segmented Stator Core*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 4, pp. 2076-2085, Dec. 2020.
- [7] D. -K. Lim, K. -P. Yi, S. -Y. Jung, H. -K. Jung and J. Ro, *Optimal Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Using a New*

- Surrogate-Assisted Multi-Objective Optimization*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015.
- [8] X. Sun, Z. Shi, G. Lei, Y. Guo and J. Zhu. *Multi-Objective Design Optimization of an IPMSM Based on Multilevel Strategy*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 1, pp. 139-148, Jan. 2021.
- [9] S. -B. Jun, C. -H. Kim, J. H. Lee, J. -K. Kang, Y. -J. Kim and S. -Y. Jung. *Parameter Optimization for Reducing Torque Ripple and Harmonic Losses of Multi-Layered Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors*. IEEE Access, vol. 10, pp. 10536-10552, 2022.
- [10] Mohamed Y. Metwly; Ahmed Hemeida; Ayman S. Abdel-Khalik; Mostafa S. Hamad; Shehab Ahmed. *Design and Multi-Objective Optimization of a 12-Slot/10-Pole Integrated OBC Using Magnetic Equivalent Circuit Approach*. Machines 2021, 9, 329
- [11] Hemeida, A.; Metwly, M.Y.; Abdel-Khalik, A.S.; Ahmed, S. *Optimal Design of A 12-Slot/10-Pole Six-Phase SPM Machine with Different Winding Layouts for Integrated On-Board EV Battery Charging*. Energies 2021, 14, 1848.
- [12] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2009.
- [13] Hanselman, Duane C. *Brushless permanent magnet motor design*. Magna Physics Publishing, ISBN: 1-881855-15-5.
- [14] Lei, G.; Zhu, J.; Guo, Y.; Liu, C.; Ma, B. *A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines*. Energies 2017, 10, 1962.
- [15] D. -K. Hong, W. Hwang, J. -Y. Lee and B. -C. Woo. *Design, Analysis, and Experimental Validation of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Articulated Robot Applications*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018, Art no. 8201304.