

ĐIỀU KHIỂN MÔ MEN ĐỘNG CƠ XOAY CHIỀU 3 PHA AFPMSM SỬ DỤNG THUẬT TOÁN PSO TỐI ƯU THÔNG SỐ PI ỨNG DỤNG CHO XE Ô TÔ ĐIỆN

TORQUE CONTROL OF THREE-PHASE AFPMSM MOTOR BY PSO ALGORITHM OF PI PARAMETER OPTIMIZATION FOR ELECTRIC CARS APPLICATIONS

Võ Thanh Hà^{1,*}, Phạm Thị Giang²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.290>

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất giải pháp cải thiện điều khiển mô men xoắn cho động cơ từ trường dọc trục (AFPMSM) thông qua việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) để điều chỉnh tham số bộ điều khiển PI ứng dụng cho ô tô điện. Thuật toán PSO được thiết kế để tìm kiếm sự tối ưu toàn cục trong không gian tìm kiếm bằng cách thúc đẩy sự tương tác giữa các cá thể trong quần thể. Kết quả của bộ điều khiển PSO_PI đã cải thiện khả quan khả năng đáp ứng nhiễu so với bộ điều khiển PI bằng cách tối ưu các thông số K_p , K_i dựa trên điều kiện vận hành của xe điện. Hiệu quả của giải pháp này được minh chứng thông qua mô phỏng Matlab/Simulink.

Từ khóa: PSO; PI; PSO_PI; AFPMSM; FOC.

ABSTRACT

This article proposes an enhanced torque controller solution for axial flux permanent magnet synchronous motors (AFPMSM) utilizing the swarm optimization algorithm (PSO) to optimize PI controller parameters for automotive applications. Swarm optimization is an evolutionary algorithm that leverages interactions among population individuals to explore a search space. PSO is designed to seek the global optimum within a search space. The outcomes of the PSO_PI torque controller have significantly enhanced the noise response compared to the PI torque controller by adapting parameters K_p , K_i based on electric vehicle operating conditions. The control solution's efficacy in this study is validated through Matlab/Simulink simulations.

Keywords: PSO; PI; PSO_PI; AFPMSM; FOC.

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: vothanha.ktd@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$i_{sd}; i_{sq}$	A	Dòng điện stator trên hệ tọa độ d và q
$u_{sd}; u_{sq}$	V	Điện áp stator trên hệ tọa độ d và q
$L_{sd}; L_{sq}$	H	Điện cảm đồng bộ trên trục d và q
λ_m	Wb	Từ thông
T_m	Nm	Mô men xoắn

CHỮ VIẾT TẮT

DTC	Điều khiển trực tiếp mô men
PSO	Thuật toán bầy đàn PSO
PI	Bộ điều khiển PI
ĐK	Điều khiển

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống truyền động kéo hiện đang được sử dụng trong giao thông vận tải (xe ô tô điện hạng nhẹ, trung bình, nặng, xe tăng, xe buýt điện), hàng hải (cần cầu ở cảng), công nghiệp (máy CNC) và dân dụng (thăng máy tốc độ cao) yêu cầu cải thiện mật độ mô men và phạm vi tốc độ của hệ truyền động [1]. Động cơ từ trường dọc trục nam châm vĩnh cửu (AFPMSM), được đề xuất cho hệ truyền động kéo hiện tại và trong tương lai gần, có nhiều ưu điểm về kích thước, mật độ mô men lớn và độ đập mạch mô men nhỏ [2]. Động cơ AFPMSM giảm đáng kể tổn thất ở rotor và mạch kích từ do được gắn nam châm vĩnh cửu ở rotor [3]. Do đó, hiệu suất và mật độ công suất

của động cơ AFPMSM đã được cải thiện đáng kể. Theo một nghiên cứu khác [4], động cơ AFPMSM có tỷ số mô men/trọng lượng cao vì nó có cấu trúc nhiều cực từ từ thông dọc trục. Động cơ AFPMSM có nhiều lợi thế so với các động cơ thông thường trong nhiều ứng dụng. Điều này hấp dẫn các nhà khoa học và công ty sản xuất động cơ điện đang tìm kiếm các giải pháp điều khiển cho các yếu tố như mô men, tốc độ, vị trí, lực kéo hoặc cải thiện hiệu suất động cơ. Tốc độ động cơ AFPMSM điều khiển mô-men đảm bảo đáp ứng mô-men và tốc độ theo yêu cầu là tập trung vào nghiên cứu về truyền động điện và truyền động kéo cho xe ô tô điện. Động cơ AFPMSM có tốc độ điều khiển mô men dựa trên phương pháp điều khiển trực tiếp mô men (DTC) [5], tựa từ thông rotor (FOC) [6] và kết hợp các thuật toán điều khiển phi tuyến (điều khiển trượt, tựa phẳng, logic mờ...) [7] hoặc tuyến tính (PI, LQR, Dead beat...) [8]. Các nghiên cứu này chỉ xem xét hiệu quả phát huy của từng giải pháp cho bộ điều khiển mô men, tốc độ khi động cơ AFPMSM hoạt động với mô men tải không thay đổi hoặc tham số động cơ thay đổi để đảm bảo đáp ứng mô men có độ đập mạch thấp và đáp ứng tốc độ thực bám chính xác và nhanh chóng [9]. Điều này cho thấy rằng còn rất ít nghiên cứu về giải pháp điều khiển thông minh để nâng cao mô men động cơ AFPMSM khi kết hợp với các thành phần mô men cần thiết cho các tính chất hoạt động của xe ô tô điện, chẳng hạn như chân phanh, chân ga, tác động của độ nghiêng của đường. Việc điều chỉnh tốc độ của AFPMSM thường áp dụng điều khiển PI. Tuy nhiên rất khó để tìm được thông số PI thích hợp. Tham số tích phân tỷ lệ không phù hợp có thể khiến hệ thống không ổn định và nằm ngoài tầm kiểm soát [10-13]. Ngoài ra, vì động cơ là đối tượng điều khiển đa biến, phi tuyến, khớp nối nên phải tinh chỉnh thông số PI để hoạt động ổn định và chính xác. Nhưng bộ điều khiển PI không thể tự động điều chỉnh tham số của nó. Tuy nhiên, thuật toán di truyền [14-16], thuật toán bầy đàn, thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) [17] và nhiều thuật toán tối ưu hóa thông minh khác có thể được đưa ra để giải quyết vấn đề. Các thuật toán này không cần mô hình toán học chính xác và có thể được sử dụng để giải các bài toán phi tuyến phức tạp. Từ đó có thể đưa ra giải pháp lựa chọn thông số PI phù hợp cho việc điều khiển động cơ một cách tự động. Theo nghiên cứu tài liệu [17], do tính đơn giản, dễ thực hiện và không có thông tin độ dốc, vì vậy thuật toán PSO ngày nay trở thành trọng tâm, được sử dụng để giải quyết tối ưu hóa có ràng buộc, tối ưu hóa đa mục tiêu và tối ưu hóa động. Thuật toán PSO được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển robot, nhận dạng mẫu, xử lý tín hiệu, phân loại dữ liệu và hệ thống điện. Vì vậy, trong bài báo này, thuật

toán PSO được áp dụng để điều khiển mô men của động cơ AFPMSM một mặt (một stator và một rotor). Thuật toán PSO được thiết kế để tìm kiếm sự tối ưu toàn cục trong không gian tìm kiếm bằng cách thúc đẩy sự tương tác giữa các cá thể trong quần thể. Vì vậy thuật toán PSO sẽ tối ưu hoá hai thông số bộ điều khiển mô men PI. Hiệu quả của bộ điều khiển PSO sẽ so sánh với bộ PI bằng mô phỏng Matlab/Simulink.

Bài báo trình bày bao gồm 5 phần chính. Phần 1 trình bày tổng quan và tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu. Phần 2 viết về mô hình toán học hệ truyền động kéo ô tô điện. Phần Dựa vào mô hình toán học trong phần 2, để thiết kế bộ điều khiển mô men PI và PSO_PI cho động cơ AFPMSM được thực hiện trong phần 3. Tính đúng đắn của lý thuyết sẽ được minh chứng bằng kết quả mô phỏng về các đáp ứng dòng điện, mô men giữa bộ điều khiển PSO_PI với PI trong phần 4. Phần 5 đưa ra kết luận những đóng góp của nghiên cứu và hướng giải quyết trong tương lai, để cải thiện, nâng cao đáp ứng mô men, độ bền vững hệ truyền động xe ô tô điện trong lý thuyết cũng như triển khai thực nghiệm.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC ĐỘNG CƠ AFPMSM VÀ XE Ô TÔ ĐIỆN

2.1. Mô hình toán học động cơ AFPMSM một mặt

Theo tài liệu [13], nhận thấy động cơ từ trường dọc trục AFPMSM một stator và một rotor có cấu trúc tương tự giống động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu loại cực chìm (IPMSM). Tuy nhiên động cơ AFPMSM có số đôi cực đặt trên stator nhiều hơn động cơ IPMSM, trong đó, động cơ AFPMSM với $p = 6$, khi đó động cơ IPMSM chỉ có $p = 1$. Dựa trên cơ sở khác nhau này, nhận thấy mô hình toán học (cấu tạo, nguyên lý cảm ứng điện từ) theo điều khiển tựa từ thông rotor thì động cơ AFPMSM một mặt có thể sử dụng mô hình trạng thái của động cơ IPMSM, nhưng sẽ được cài đặt với tham số động cơ về điện trở, điện cảm của động cơ AFPMSM. Bên cạnh đó, mô hình toán học động cơ AFPMSM có những khác biệt về giá trị tham số cuộn dây stator và thành phần Back-EMF (lực phản điện động) được tạo ra bởi một nam châm vĩnh cửu và một cuộn dây kích từ khác nhau.

Mô hình toán học động cơ AFPMSM một mặt được xây dựng theo các công thức dưới đây.

Phương trình điện áp trên hệ tọa độ d và q được viết như công thức (1):

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sq} + \frac{dL_{sq}}{dt} & \omega_m L_{sd} \\ -\omega_m & R_{sd} + \frac{dL_{sd}}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_m \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Phương trình mô men được xác định bởi công thức (2):

$$T_m = \frac{3P}{2} (L_{sd} i_{sd} + \lambda_m) i_{sq} - L_{sq} i_{sq} \quad (2)$$

Vi từ thông là một hằng số, nên mô men tỷ lệ thuận với dòng stator trục q. Phương trình mô-men điện từ được cho bởi công thức (3):

$$T_m = T_L + B_1 \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

Trong đó: T_L là mômen tải; B_1 là hệ số ma sát; J là mômen quán tính; ω_m là tốc độ rotor (rad/s).

2.2. Mô hình toán học xe ô tô điện

Mô hình toán học của xe điện được viết theo các công thức dưới đây, bao gồm công thức toán học về bánh xe, các thành phần ngoại lực tác dụng lên thân xe.

Mô hình bánh xe truyền động được viết như công thức (4):

$$\begin{cases} v_{Wh} = \omega_{Wh} R_{Wh} \\ T_{Wh} = T_L = F_t R_{Wh} \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: T_{Wh} là mô men tác động lên bánh xe; ω_{Wh} là tốc độ bánh xe; R_{Wh} là bán kính bán xe; F_t là lực cản; T_L là mô men tải.

Khi bánh xe được truyền động bởi mô men là T_{Wh} và bánh xe tì lên mặt đường với lực N , nó sẽ tác động lên mặt đường một lực F , tương ứng thì mặt đường sẽ tác động một lực có cùng giá trị ngược lại là F_t . Trong trường hợp này, F_t là lực ma sát và là thành phần có ích tạo ra vận tốc V_x được xác định theo công thức (5).

$$F_t = m_v \cdot g \cdot \mu \quad (5)$$

Áp dụng định luật II newton cho các thành phần ngoại lực tác dụng lên thân xe như công thức (6).

$$m_v \frac{dv_{ev}}{dt} = F_t - F_{aero} - F_{roll} - m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

Với: F_t là lực kéo của xe; F_{aero} là lực cản khí động học hay lực cản không khí; F_{roll} là lực ma sát lăn của bánh xe; m_v là tổng khối lượng của xe; g là gia tốc trọng trường; α là góc nghiêng của đường mà xe đang di chuyển; μ là hệ số bám.

Lực cản không khí F_{aero} được tính toán theo công thức (7) khi vận tốc gió $v_{wind} = 0$.

$$F_{aero} = \frac{\rho C_d A_F}{2} (v_{ev} + v_{wind})^2 \quad (7)$$

Trong đó: ρ là mật độ khối lượng của không khí; C_d là hệ số cản khí động học; A_F là khu vực cản phía trước của xe (diện tích mặt cản gió).

Lực cản lăn tồn tại trong trường hợp lốp bị non:

$$F_{roll} = f_r F_{ZY} \quad (8)$$

$$F_{ZY} = m_v g \cos(\alpha) \quad (9)$$

Trong đó: F_{ZY} là phản lực mặt đường theo phương thẳng đứng; f_r là hệ số cản lăn.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MÔ MEN PI VÀ (PSO_PI)

3.1. Bộ điều khiển mô men PI

Theo tài liệu [18] thì bộ điều khiển dòng stator PI trực q được thiết kế theo phương pháp tối ưu độ lớn sau như sau:

$$u_{sq} = K_c^q (i_{sq}^*(t) - i_{sq}(t)) + \frac{K_c^q}{T_i^q} (i_{sq}^*(t) - i_{sq}(t)) dt - \frac{k_r y_{rq}}{T_r L_m}(t) - T_s' r_s w_s(t) i_{sd}(t) \quad (10)$$

Trong đó: $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ là hằng số thời gian rotor.

K_c^q, T_i^q là hệ số tỉ lệ, tích phân được lựa chọn dựa trên mô hình sao cho sai số $e(t) = i_{sq}^*(t) - i_{sq}(t)$ là nhỏ nhất.

Bộ điều khiển PI dòng stator cho động cơ KĐB-RLS như (10) cho thấy sự bù xen kênh, kênh d điều khiển từ thông và kênh q điều khiển mô-men, phù hợp với đặc tính động của mô hình điều khiển. Phương pháp thiết kế đơn giản, ít phụ thuộc vào tham số động cơ.

3.2. Bộ điều khiển mô men PSO_PI

Xét một nhóm gồm n phần tử, mỗi phần tử tìm kiếm vị trí tốt nhất với một vận tốc nhất định. Tiếp tục cập nhật vị trí tốt nhất và những phần tử khác.

Vị trí hiện tại của phần tử l được biểu diễn dưới dạng:

$$K^l = (K_p^l, K_i^l) \text{ với } l = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Vận tốc hiện tại của phần tử l được biểu diễn dưới dạng:

$$V^l = (V_p^l, V_i^l) \text{ với } l = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Vị trí của phần tử l được biểu diễn dưới dạng:

$$P^l = (P_p^l, P_i^l) \text{ với } l = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Vị trí của tất cả các phần tử được thể hiện dưới dạng:

$$P_{best}^g = (P_p^g, P_i^g) \quad (14)$$

Vận tốc và vị trí của tất cả các phần tử được thể hiện theo công thức (15):

$$V^{l+1} = \omega V^l + c_1 \alpha [P^l - K^l] + c_2 \beta [P_{best}^g - K^l] \quad (15)$$

$$K^{l+1} = K^l + V^{l+1} \text{ với } l = 1, 2, \dots, n$$

Trong đó, ω là trọng lượng quán tính không đổi, c_1, c_2 là hệ số học (c_1, c_2 thường nằm trong khoảng $[0, 4]$); α, β là các số giả ngẫu nhiên phân bố đồng đều trên khoảng $[0, 1]$.

Vận tốc của các phần tử thường bị giới hạn bởi tốc độ tối đa. Vì vậy, hệ thống ổn định tránh bị ảnh hưởng của nhiễu. Mặt khác, động cơ cần điều chỉnh nhanh các thông số PI ở giá trị phù hợp trong quá trình khởi động. Sau đó thực hiện tinh chỉnh theo mô men tải để cải thiện hiệu suất của hệ truyền động.

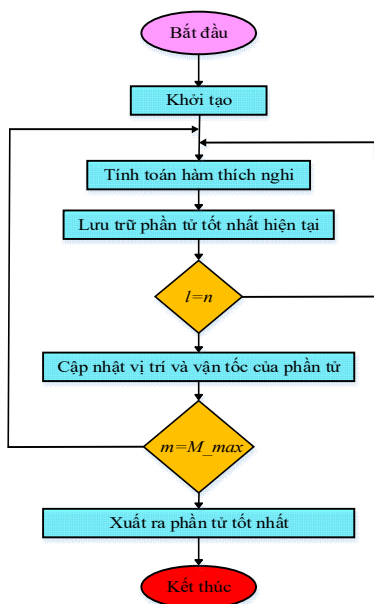
Vì vậy, trong bài báo sử dụng các trọng số thay đổi theo thời gian trong phương trình cập nhật tốc độ (15) để thay thế trọng số không đổi và đặt phạm vi trọng số trong khoảng $[\omega_{max}, \omega_{min}]$. Tại mỗi thời điểm lấy mẫu, các phần tử lặp lại M_{max} lần. Sự lặp lại trong thời gian m của trọng lượng quán tính là"

$$\omega^m = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{M_{max}} \cdot m \quad (16)$$

Cấu trúc liên kết vòng được sử dụng làm cấu trúc liên kết lân cận của tất cả các phần tử. Ảnh hưởng của các phần tử lân cận được phân phối từng phần tử một cho đến khi tìm thấy phần tử tốt nhất. Hàm thích nghi bao gồm sai số dòng điện stator $e(t)$ và đạo hàm sai dòng điện stator $de(t)$ của động cơ AFPMSM là như sau:

$$F = \alpha \cdot |e(t)| + \beta \cdot |de(t)| \quad \alpha, \beta \in [0, 1] \quad (17)$$

Thông qua việc lặp lại M_{max} , tìm thấy phần tử tốt nhất tạo ra hàm thích ứng tối thiểu. Giá trị vị trí (K_p, K_i) của phần tử này trong không gian tìm kiếm là tham số PI tối ưu.



Hình 1. Lưu đồ thuật toán bầy đàn PSO

Lưu đồ thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO được thể hiện qua hình 1.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Kích bản vận hành và mô phỏng cho hệ truyền động xe ô tô điện

Kịch bản vận hành của xe ô tô điện được xây dựng như sau:

- Ban đầu xe đứng yên vận tốc $v = 0$ chân ga và chân phanh đều không tác động.

- Khi chân ga tác động xe bắt đầu tăng tốc vận tốc $v > 0$ khối so sánh điều kiện chuyển trạng thái. Mô men đặt T_e^* được xác định bằng cộng giá trị đầu ra của bảng nội suy giữa chân ga và chân phanh. Cấu trúc điều khiển hệ thống truyền động kéo cho ô tô điện dùng động cơ AFPMSM tích hợp bánh xe như hình 2.

Kịch bản mô phỏng Matlab được xây dựng như sau:

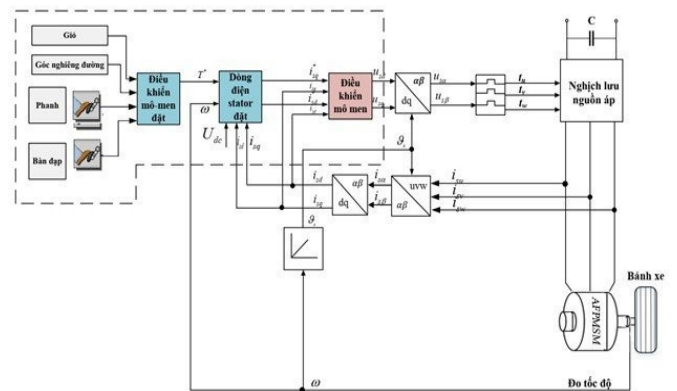
- Giả thiết gia tốc độ của gió bằng 0.

- Xe di chuyển trên đường bằng phẳng nhưng tại thời điểm $t = 3,5s$ đến $4,3s$ xe xuống dốc.

- Tại thời điểm $t = 0s$, xe bắt đầu tăng tốc giá trị chân ga tăng từ 0 đến 1 sau 0,45s. Mômen đặt tối đa 205Nm và duy trì trong 2s.

- Tại $t = 2s$ xe bắt đầu giảm tốc độ và phanh đạt giá trị từ 0 đến 1 tại thời điểm $t = 3,5s$ mô-men giảm dần tới giá trị -205Nm và trở về giá trị 0 tại thời điểm $t = 4,66s$.

Cấu trúc điều khiển hệ thống truyền động động cơ AFPMSM một mặt ứng dụng cho xe ô tô điện như hình 2.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển hệ truyền động động cơ AFPMSM ứng dụng cho xe ô tô điện

4.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

Bộ điều khiển PI và PSO_PI được mô phỏng MATLAB với các tham số PSO tối ưu hai thông số PI và hai thông số tối ưu PI sử dụng thuật toán PSO được thể hiện qua bảng 1 và 2.

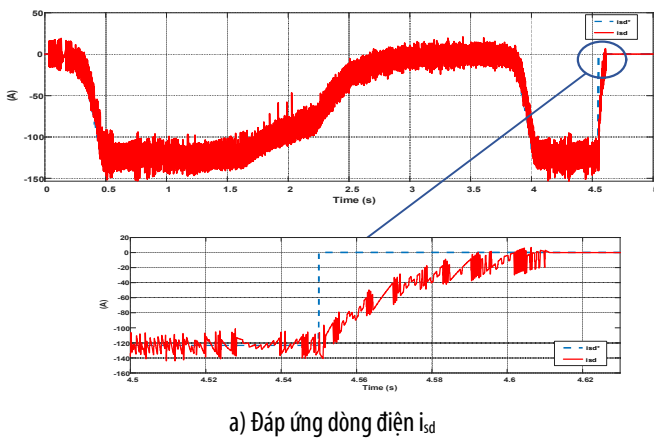
Bảng 1. Tham số PSO tối ưu tham số PI

Tham số PSO	Giá trị
Số cá thể trong quần thể	6
Kích thước quần thể	50
Số lần lặp	15
Trọng số quán tính	0.6
Hệ số kinh nghiệm	2
Hệ số quan hệ xã hội	2

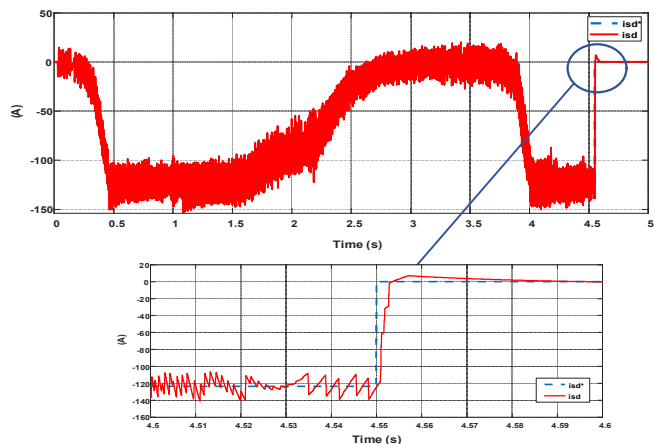
Bảng 2. Thông số tối ưu PI sử dụng PSO

Tham số PI	Giá trị
K_p	6
K_i	50

Mục tiêu của giải pháp điều khiển đề xuất của bài báo là kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển PSO_PI thích nghi được với nhiễu tham số động cơ thông qua mô phỏng so sánh giữa bộ điều khiển PSO_PI và PI. Trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng kịch bản mô phỏng nhiễu tham số động cơ với L_d , L_q tăng lên 20% so với giá trị định mức.



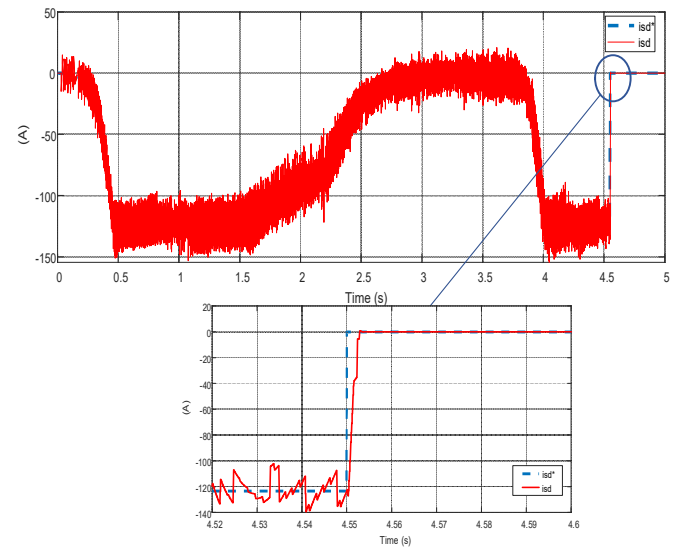
a) Đáp ứng dòng điện i_{sd}



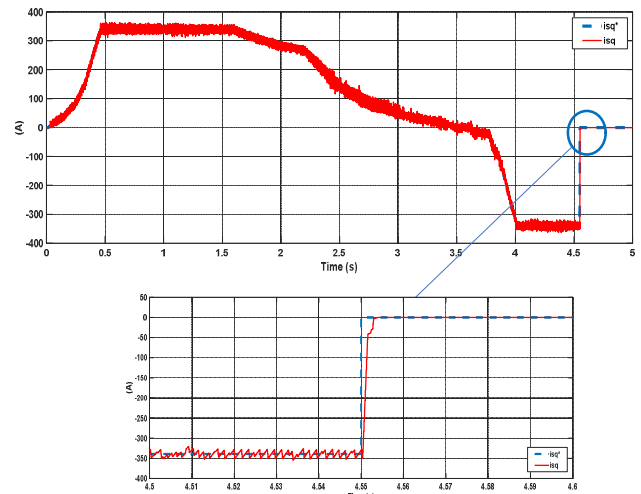
b) Đáp ứng dòng điện i_{sq}

Hình 3. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển PI khi L_d , L_q tăng lên 20%

Các kết quả so sánh đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI với PSO_PI được thể hiện qua hình 3 và 4. Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng dòng điện của bộ điều khiển PI và PSO_PI được thể hiện qua bảng 3.



a) Đáp ứng dòng điện i_{sd}



b) Đáp ứng dòng điện i_{sq}

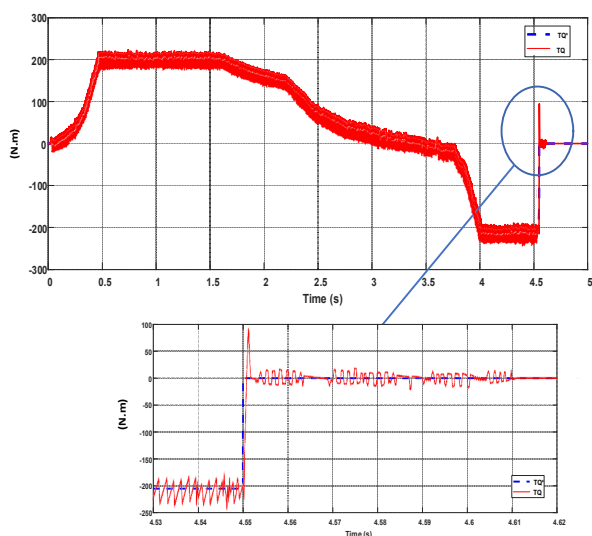
Hình 4. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển PSO_PI khi L_d , L_q tăng lên 20%

Bảng 3. Kết quả đánh giá đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI và PSO_PI

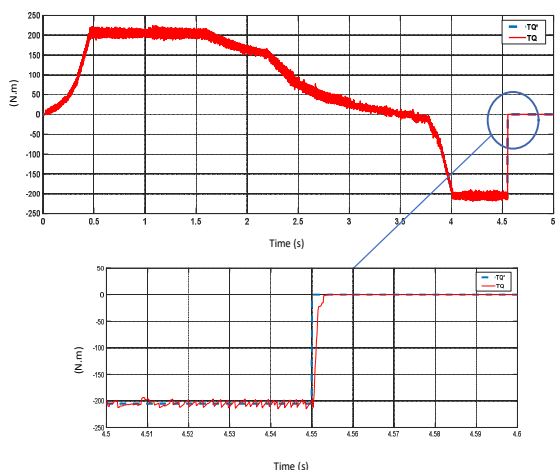
Bộ điều khiển/ Tham số đánh giá	PI	PSO_PI
Dòng điện stator i_{sd}		
Thời gian xác lập	0,5 (s)	0,5 (s)
Độ quá điều chỉnh	10%	0%
Dòng điện stator i_{sq}		
Thời gian xác lập	0,5 (s)	0,5 (s)
Độ quá điều chỉnh	20%	0%

Qua kết quả mô phỏng hình 3 và 4 nhận thấy rằng đáp ứng dòng điện stator của hai bộ điều khiển PI và PSO_PI đều có thời gian xác lập như nhau là 0,5s, Bên cạnh đó, tại thời điểm xác lập, nhận thấy đáp ứng dòng điện stator thực bám sát đáp ứng dòng điện stator đặt, theo yêu cầu. Tuy nhiên đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển PSO_PI không có quá điều chỉnh, trong khi đó bộ điều khiển PI tồn tại quá điều chỉnh dòng điện i_{sd} là 10% và i_{sq} là 20%. Hai bộ điều khiển này đều đưa ra đáp ứng dòng điện i_{sq} có độ đập mạch nhỏ hơn so với i_{sd} .

Kết quả so sánh đáp ứng mô men giữa bộ điều khiển PI và PSO_PI được thể hiện qua hình 5 và 6. Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng mô men của bộ điều khiển PI và PSO_PI được thể hiện qua bảng 4.



Hình 5. Đáp ứng mô men của bộ điều khiển PI khi L_d , L_q tăng lên 20%



Hình 6. Đáp ứng mô men của bộ điều khiển PSO_PI khi L_d , L_q tăng lên 20%

Bảng 4. So sánh đáp ứng mô men bộ điều khiển PI và PSO_PI

Bộ điều khiển/Tham số đánh giá	PI	PSO_PI
Độ đập mạch mô men	8%	3%

Qua các kết quả mô phỏng trên hình 5 và 6 cho thấy rằng đáp ứng mô men của hai bộ điều khiển có dạng giống dòng điện i_{sq} . Bộ điều khiển PSO_PI cho đáp ứng mô men có độ đập mạch nhỏ hơn (3%) so với bộ điều khiển PI (8%). Kết quả này cho thấy hiệu suất của bộ điều khiển PSO_PI khả quan hơn so với bộ điều khiển PI khi giảm được độ đập mạch đáng kể. Điều này có thể góp phần cải thiện ổn định hệ thống và giảm thiểu dao động không mong muốn, từ đó tăng cường hiệu quả hoạt động của hệ thống điều khiển.

5. KẾT LUẬN

Điều khiển mô men sử dụng thuật toán PSO_PI cho động cơ AFPMSM ứng dụng trong xe ô tô điện, được cải thiện khả quan so với bộ điều khiển PI về các đáp ứng, trong trường hợp thông số động cơ thay đổi. Đây là hướng nghiên cứu phù hợp với xu hướng hiện đại đã và đang sử dụng các thuật toán thông minh, thích nghi với nhiều, để tăng hiệu suất truyền động điện và giảm sự phụ thuộc vào mô hình trạng thái của xe ô tô điện. Tuy nhiên bộ điều khiển PSO_PI tốn nhiều thời gian để thực hiện vòng lặp, cần đòi hỏi phần cứng điện tử đủ mạnh để tính toán, ước lượng, tối ưu tham số bộ điều khiển PI trong thời gian thực. Vì vậy, điều quan trọng là công trình khoa học này cần tiếp tục nghiên cứu để cải thiện thuật toán PSO_PI, từ đó giảm thiểu thời gian tính toán và tăng tốc độ phản ứng của hệ thống. Sự đầu tư vào công nghệ điều khiển thông minh sẽ mang lại lợi ích lớn trong việc nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của các hệ thống điện tử trong tương lai. Song song đó, giải pháp điều khiển này cần được triển khai xuống thiết bị thật trong tương lai để minh chứng độ tin cậy, đúng đắn của thuật toán điều khiển.

LỜI CẢM ƠN

Công trình nghiên cứu được thực hiện tại Trường Đại học Giao thông vận tải và Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. X. Zhang, D. Göhlich, J. Li, "Energy-Efficient Torque Allocation Design of Traction and Regenerative Braking for Distributed Drive Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67, 1, 285-295, Jan. 2018.

[2]. Merve Yildirim, Mehmet Polat, H. Kurum, "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electricvehicles," in *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition Antalya*, Turkey, 21-24 Sept 2014.

- [3]. Tahir Aja Zarma, Ahmadu Adamu Galadima, Aminu A. Maruf, "Review of Motors for Electrical Vehicles", *Journal of Scientific Research and Reports*, 2019.
- [4]. J. Shazly, S. Wahsh, A. Yassin, "Thermal modeling of an AFPMSM: A review," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2, 1, 18-26, 2015
- [5]. Saber M. Saleh, Amir Y. Hassan, "Sensorless based SVPWM-DTC of AFPMSM for electric vehicles," *Sci Rep.*, 12: 9023, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-12825-x
- [6]. Garcia X. D. T., et al., "Comparison between FOC and DTC Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motors," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5, 76-81, 2011.
- [7]. Shuang Wang, Jianfei Zhao, Tingzhang Liu, Minqi Hua, "Adaptive Robust Control System for Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor of Electric Medium Bus Based on Torque Optimal Distribution Method," *Energies*, 12, 4681, 2019. doi:10.3390/en1224468.
- [8]. Crococo D., Agostinis MD., Vincenzi N., "Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via Finite Element Method: A Methodology Applied to a Case Study," *J. Mech. Eng.*, 57, 799-809, 2011.
- [9]. Pooja Bhatt, Hemant Mehar, Manish Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle - A Comparative Study," *Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA)*, 2019.
- [10]. D. Tan, C. Lu, "The Influence of the Magnetic Force Generated by the In-Wheel Motor on the Vertical and Lateral Coupling Dynamics of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 6, 4655-4668, 2016.
- [11]. Muhammad Razaqat Ishaque, Muhammad Adil Khan, Muhammad Moin Afzal, Abdul Wadood, Seung-Ryle Oh, Muhammad Talha, Sang-Bong Rhee, "Fuzzy Logic-Based Duty Cycle Controller for the Energy Management System of Hybrid Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage System," *Applied Sciences*, 11, 7, 3192, 2021.
- [12]. Farhan Nagham S., Hasan Fadil A., Humud Abd al-Rahim Dhiyab, "Field oriented control of AFPMSM for electrical vehicle using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)," *Engineering and Technology Journal*, 39, 10, 1571-1582, 2021.
- [13]. Krishnan Ramu, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2001.
- [14]. D. Devaraj, B. Selvabala, "Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 3, 7, 641-649, 2009.
- [15]. AlRashidi M.R., El-Hawary M.E., "A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13, 913-918, 2009.
- [16]. Yu Ren, Xiaobai Xu, "Optimization Research of PSO-PID Algorithm for the Design of Brushless Permanent Magnet Machines," *Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing*, 26-29, 2008.
- [17]. Liuping Wang, Sahn Chai, Deaf Yoo, Lu Gan, Ki Ng, *PID and predictive control of electrical drives and power*. Wiley-IEEE Press, 2015.

AUTHORS INFORMATION

Vo Thanh Ha¹, Pham Thi Giang²

¹University of Transport and Communications, Vietnam

²University of Economics - Technology for Industries, Vietnam