

PERFORMANCE EVALUATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR SIX-PHASE INDUCTION MOTOR UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS

Nguyen Viet Trung¹, Bui Thanh Hieu¹, Do Chi Phi², Pham Thanh Tung^{1*}

¹Vinh Long University of Technology Education, ²Cao Thang Technical College

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	08/8/2025	This paper presents the FCS-MPC method applied to a six-phase induction motor with isolated neutral point and two winding sets shifted by 30 electrical degrees. The control model is developed in the $\alpha\beta xy$ coordinate system, using current and flux information to predict future states and select the optimal voltage vector at each sampling step. The system is simulated in the MATLAB/Simulink environment under three operating conditions: no-load, load, and torque disturbance. The simulation results show that the FCS-MPC controller achieves a tracking speed of 60 rad/s with a settling time under 0.05 s, steady-state error not exceeding ± 1 rad/s in the no-load condition, and maintains the error within ± 5 rad/s under disturbance. The current on the xy-axis is always kept about ± 2 A, reflecting the electromagnetic balance between the two winding sets. The proposed method is suitable for high-performance applications requiring high efficiency, stability, and good disturbance rejection in industrial drive systems and renewable energy systems.
Revised:	26/11/2025	
Published:	26/11/2025	
KEYWORDS		
Six-Phase Induction Motor		
Finite Control Set Model		
Predictive Control		
$\alpha\beta xy$ Transformation		
Multiphase Drives		
MATLAB/Simulink		

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH CHO ĐỘNG CƠ CẢM ỨNG SÁU PHA DƯỚI CÁC ĐIỀU KIỆN VẬN HÀNH KHÁC NHAU

Nguyễn Việt Trung¹, Bùi Thanh Hiếu¹, Đỗ Chí Phi², Phạm Thanh Tùng^{1*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, ²Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thang

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	08/8/2025	Bài báo này trình bày phương pháp FCS-MPC áp dụng cho động cơ cảm ứng sáu pha với trung tính cách ly và hai bộ dây quấn lệch nhau 30° điện. Mô hình điều khiển được xây dựng trong hệ tọa độ $\alpha\beta xy$, sử dụng thông tin dòng điện và từ thông để dự đoán trạng thái tương lai và lựa chọn vector điện áp tối ưu tại mỗi bước lấy mẫu. Hệ thống được mô phỏng trong môi trường MATLAB/Simulink với ba trường hợp vận hành: không tải, có tải, và có nhiễu mô men. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển FCS-MPC đạt tốc độ bám 60 rad/s với thời gian xác lập dưới 0,05 s, sai số trạng thái dừng không quá ± 1 rad/s trong điều kiện không tải, và duy trì sai số dưới ± 5 rad/s khi có nhiễu. Dòng trên trục xy luôn giữ khoảng ± 2 A, phản ánh sự cân bằng điện từ giữa hai bộ dây. Phương pháp đề xuất phù hợp với các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao, độ ổn định, chống nhiễu tốt trong hệ truyền động công nghiệp và năng lượng tái tạo.
Ngày hoàn thiện:	26/11/2025	
Ngày đăng:	26/11/2025	
TỪ KHÓA		
Động cơ cảm ứng sáu pha		
Điều khiển dự báo mô hình dạng tập hữu hạn		
Biến đổi $\alpha\beta xy$		
Truyền động đa pha		
MATLAB/Simulink		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13392>

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự phát triển của các hệ thống truyền động điện công suất cao đòi hỏi các giải pháp điều khiển có độ chính xác và hiệu suất vượt trội [1]. Trong số đó, động cơ cảm ứng sáu pha (Six-Phase Induction Motor – SPIM) đã nhận được sự quan tâm ngày càng tăng trong các ứng dụng đòi hỏi tính dự phòng cao, mật độ công suất lớn, độ tin cậy và khả năng chịu lỗi vượt trội so với động cơ ba pha truyền thống [2]. Nhờ cấu trúc nhiều pha, SPIM cho phép giảm dòng điện mỗi pha, giảm tổn hao và cải thiện hiệu suất tổng thể của hệ thống truyền động [2].

Song song với sự phát triển của phần cứng công suất, các kỹ thuật điều khiển tiên tiến như điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control – MPC) đã được nghiên cứu và ứng dụng mạnh mẽ. Phương pháp MPC cho phép sử dụng mô hình toán học của hệ thống để dự đoán trạng thái tương lai và lựa chọn tín hiệu điều khiển tối ưu thông qua việc tối thiểu hóa một hàm chi phí [3]. Đặc biệt trong điều khiển động cơ cảm ứng, MPC cho phép kiểm soát dòng điện, mô men và từ thông với độ chính xác cao, đồng thời giảm tần số chuyển mạch so với các phương pháp điều khiển tuyến tính truyền thống [3], [4]. Trong bối cảnh đó, nhiều công trình nghiên cứu đã mở rộng MPC cho các hệ thống động cơ đa pha, đặc biệt là SPIM, nhằm khai thác lợi ích từ không gian điều khiển rộng hơn và khả năng điều khiển linh hoạt hơn. Một số biến thể như Finite Control Set MPC (FCS-MPC) tỏ ra phù hợp để áp dụng trong điều khiển thời gian thực nhờ đơn giản hóa thuật toán tối ưu, loại bỏ bộ điều chế, đồng thời vẫn duy trì hiệu năng cao [5], [6].

Tuy nhiên, khi triển khai điều khiển dự báo cho SPIM, vẫn còn tồn tại nhiều thách thức như xây dựng mô hình toán học chính xác, lựa chọn hàm chi phí phù hợp, xử lý từ thông dư thừa và tối ưu hóa công suất chuyển mạch [4]. Đặc biệt, việc đánh giá hiệu năng hệ thống trong các điều kiện vận hành thực tế như không tải, có tải, hoặc có nhiều mô men là cần thiết để kiểm nghiệm tính ổn định và khả năng bám tốc độ quay của hệ điều khiển [7].

Bài báo này trình bày thiết kế và mô phỏng hệ thống điều khiển FCS-MPC áp dụng cho động cơ cảm ứng sáu pha với trung tính cách ly. Mô hình điều khiển được xây dựng trên nền tảng MATLAB/Simulink, kết hợp khối biến đổi Clarke mở rộng và khối dự báo tín hiệu dòng điện – từ thông – mô men. Nghiên cứu nhằm đánh giá hiệu năng điều khiển của hệ thống trong ba điều kiện vận hành: không tải, có tải và có nhiễu mô men, dựa trên các tiêu chí như độ vọt lố, thời gian thiết lập, sai lệch ở trạng thái ổn định và mức độ nhiễu trong tín hiệu điều khiển [8].

Bài báo được tổ chức gồm bốn phần chính: phần 2 trình bày mô hình đối tượng và giải thuật điều khiển; kết quả mô phỏng được trình bày trong phần 3 và phần 4 là kết luận.

2. Mô hình toán và giải thuật điều khiển

2.1. Mô hình toán SPIM

SPIM là lựa chọn tối ưu trong các hệ truyền động yêu cầu mô men cao, độ tin cậy lớn, khả năng điều khiển linh hoạt và vận hành dự phòng tốt hơn so với động cơ ba pha truyền thống [2]. Cấu hình SPIM phổ biến nhất gồm hai bộ dây ba pha lệch nhau 30° điện, trung tính cách ly, hoạt động đồng thời nhưng có thể điều khiển độc lập như Hình 1 [9].

2.1.1. Mô hình điện – không gian trạng thái

Hệ quy chiếu cố định, SPIM được mô tả hệ phương trình điện áp, từ thông như (1)-(4) [9], [10]:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (1) \quad \boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \quad (3) \quad \boldsymbol{\psi}_r = L_r \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_s \quad (4)$$

2.1.2. Biến đổi tọa độ Clarke mở rộng: 6 pha $\rightarrow$ hệ $\alpha\beta\gamma$

Mô hình sáu pha được giảm bậc bằng cách sử dụng biến đổi Clarke mở rộng, ánh xạ không gian 6 chiều về 4 chiều $\alpha\beta\gamma$. Tín hiệu dòng sáu pha được chuyển về hệ $\alpha\beta\gamma$ như (5), (6) [9], [10]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta & i_x & i_y \end{bmatrix}^T = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c & i_x & i_y & i_z \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

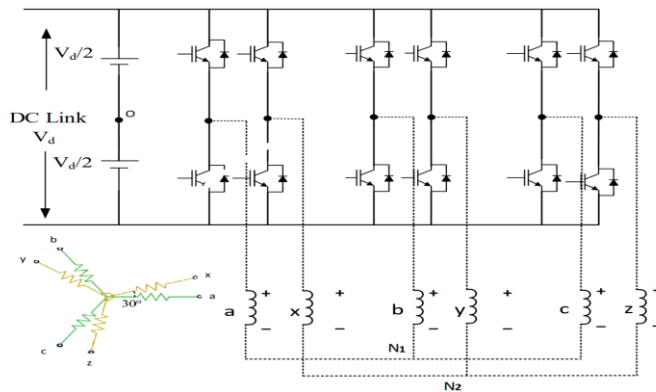
$$\mathbf{C} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0.5 & 0.5 & -1 \\ 1 & -0.5 & -0.5 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0.5 & 0.5 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.1.3. Biểu thức mô men điện từ

Mô men điện từ của SPIM được xác định bằng tích chéo giữa vector từ thông và dòng stator trong mặt phẳng $\alpha\beta$ như (7) [9], [10]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot \text{Im} \{ \psi_s^* \cdot \mathbf{i}_s \} \quad (7)$$

Biểu thức (7) đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng hàm mục tiêu cho MPC – trong đó T_e được dự báo để so sánh với mô men tham chiếu [9], [10].



Hình 1. Sơ đồ tổng quan của một hệ SPIM

Các thông số được sử dụng trong mô phỏng như Bảng 1 [9], [10]:

Bảng 1. Thông số mô phỏng SPIM

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Số đôi cực	p	2	-
Điện trở stator	R_s	11,6	Ω
Điện trở rotor	R_r	10,4	Ω
Điện cảm từ thông	L_m	0,557	H
Điện cảm rò stator	$L_{\sigma s}$	0,04	H
Điện cảm rò rotor	$L_{\sigma r}$	0,04	H
Momen quán tính	J	0,004	kg.m ²
Thời gian lấy mẫu	T_s	4×10^{-5}	s

$L_s = L_{\sigma s} + L_m, L_r = L_{\sigma r} + L_m$: Tổng điện cảm stator và rotor (gồm rò và tương hỗ);

L_m : Điện cảm tương hỗ giữa stator và rotor;

R_s, R_r : Điện trở stator và rotor;

ω_r : Tốc độ góc cơ học của rotor (rad/s);

i_α, i_β : Dòng stator trong mặt phẳng sinh công;

i_x, i_y : Dòng stator trong mặt phẳng không sinh công;

z_1, z_2 : Thành phần không liên quan đến quá trình phát mô men.

2.2. Giải thuật FCS-MPC

MPC là một phương pháp điều khiển hiện đại có khả năng xử lý ràng buộc hệ thống và tối ưu hóa hiệu năng tại mỗi bước lấy mẫu. MPC đặc biệt phù hợp với các hệ truyền động điện phi tuyến như SPIM nhờ khả năng phản ứng nhanh, chính xác và tối ưu hóa mô men đầu ra trong điều kiện vận hành biến thiên [11].

2.2.1. Cấu trúc điều khiển MPC kiểu FCS-MPC

Phương pháp MPC áp dụng trong bài báo là kiểu điều khiển dự báo trạng thái tập hữu hạn FCS-MPC, trong đó:

- Bộ điều khiển nhận các tín hiệu đầu vào: mô men tham chiếu T_{ref} , từ thông tham chiếu ψ_{s_ref} , tốc độ rotor ω_m , dòng stator đo được trên hệ $\alpha\beta xy$: $i_\alpha, i_\beta, i_x, i_y$.
- Dựa trên mô hình toán học, dự đoán từ thông stator và dòng điện ở bước kế tiếp.
- Tính toán mô men điện từ dự đoán T_{pred} .
- Đánh giá hàm chi phí để lựa chọn tổ hợp vector điện áp tối ưu từ 64 trạng thái chuyển mạch của bộ nghịch lưu sáu pha.

2.2.2. Mô hình dự báo và công thức tính

Tại mỗi bước thời gian k , từ thông stator được cập nhật như (8), (9) [12], [13]:

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) + T_s(v_s(k) - R_s i_s(k)) \quad (8)$$

$$\psi_s = \psi_\alpha + j\psi_\beta; v_s = v_\alpha + jv_\beta, i_s = i_\alpha + ji_\beta \quad (9)$$

Từ mô hình điện tương đương SPIM, dòng điện stator được dự đoán như (10) [13]:

$$i_s(k+1) = \left(1 + \frac{T_s}{t_\sigma}\right) i_s(k) + \frac{T_s}{t_\sigma + T_s} \cdot \frac{1}{r_\sigma} \cdot \left[\left(\frac{kr}{\tau_r} - jkr\omega_m \right) \psi_r + v_s \right] \quad (10)$$

Từ thông rotor được ước lượng từ từ thông stator như (11):

$$\psi_r = \frac{L_r}{L_m} \psi_s + \left(L_m - \frac{L_r L_s}{L_m} \right) i_s \quad (11)$$

Mô men điện từ dự đoán như (12):

$$T_{pred} = \frac{3}{2} p \cdot \text{Im} \{ \psi_s^*(k+1) i_s(k+1) \} \quad (12)$$

2.2.3. Hàm chi phí tối ưu

Tại mỗi bước lấy mẫu, tất cả các trạng thái chuyển mạch $S = [S_1, \dots, S_6]$ được xét duyệt (64 trạng thái). Hàm chi phí được định nghĩa để lựa chọn tổ hợp tối ưu như (13):

$$g = |T_{ref} - T_{pred}| + \lambda_F \cdot |\psi_{s_ref} - \psi_s(k+1)| \quad (13)$$

λ_F : hệ số trọng số điều chỉnh giữa mô men và từ thông. Trong nghiên cứu này, giá trị $\lambda_F = 53.3$ được lựa chọn dựa trên thử nghiệm mô phỏng lặp lại với nhiều giá trị khác nhau, sau đó đánh giá theo các tiêu chí: Thời gian đáp ứng tốc độ, độ vọt lố và sai số ổn định.

Trạng thái chuyển mạch tối ưu là trạng thái cho giá trị g nhỏ nhất như (14):

$$S_{opt} = \arg \min g(S_i) \quad (14)$$

2.2.4. Bộ điều khiển PI vòng ngoài

Trong cấu trúc điều khiển FCS-MPC cho động cơ cảm ứng sáu pha (SPIM), bộ điều khiển dự báo được sử dụng để điều khiển vòng trong (dòng – mô men), trong khi vòng ngoài tốc độ được đảm bảo bởi bộ điều khiển PI. Cụ thể, tín hiệu tốc độ đặt ω_{ref} được so sánh với tốc độ thực ω_{meas} ,

sai lệch tốc độ được đưa vào khối PI. Bộ điều khiển PI tính toán và xuất ra mô men tham chiếu T_{ref} , làm đầu vào cho bộ điều khiển dự báo FCS-MPC. Nhờ đó, hệ thống duy trì khả năng bám theo tốc độ mong muốn ngay cả khi có tải hoặc nhiễu mô men tác động.

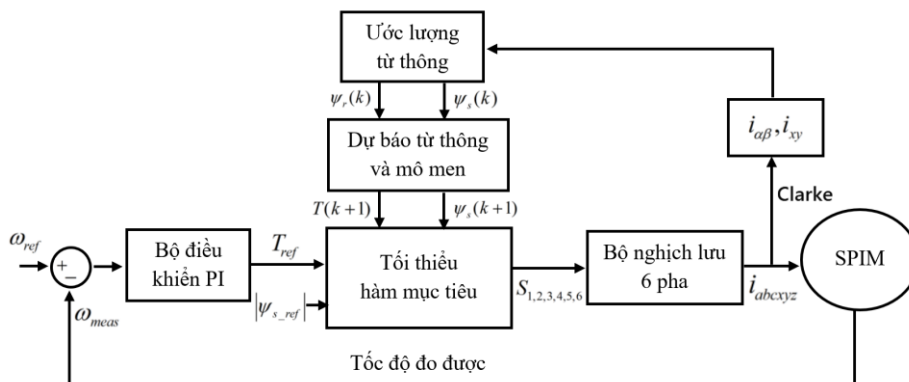
$$\text{Phương trình bộ PI có dạng: } T_{ref}(t) = K_p \Delta \omega(t) + K_i \int_0^t \Delta \omega(\tau) d\tau \quad (15)$$

Các tham số K_p, K_i được lựa chọn theo phương pháp Ziegler–Nichols cải tiến và hiệu chỉnh trên mô phỏng. Việc tích hợp bộ điều khiển PI vòng ngoài với bộ dự báo FCS-MPC vòng trong tạo thành cấu trúc vòng kín phân cấp, vừa tận dụng khả năng phản ứng nhanh và tối ưu hóa của MPC, vừa đảm bảo ổn định dài hạn và bám chính xác tốc độ nhờ PI.

2.2.5. Quy trình thuật toán FCS-MPC_SPIM

Thuật toán điều khiển tại mỗi bước thời gian diễn ra theo trình tự như Hình 2 [11]-[13]:

- Đo lường dòng stator $i_{meas} = [i_\alpha, i_\beta, i_x, i_y]^T$, tốc độ rotor ω_m .
- Ước lượng từ thông stator $\psi_s(k)$ từ tích phân điện áp và dòng đo.
- Lập xét 64 trạng thái: Với mỗi vector điện áp chuyển mạch tương ứng v_s . Dự đoán $\psi_s(k+1)$, $i_s(k+1)$, T_{pred} . Tính hàm chi phí g .
- Lựa chọn tổ hợp S_{opt} cho giá trị g nhỏ nhất.
- Xuất tín hiệu điều khiển tương ứng 6 tín hiệu S1...S2 cho bộ nghịch lưu sáu leg.



Hình 2. Sơ đồ khối nguyên lý điều khiển FCS-MPC_SPIM

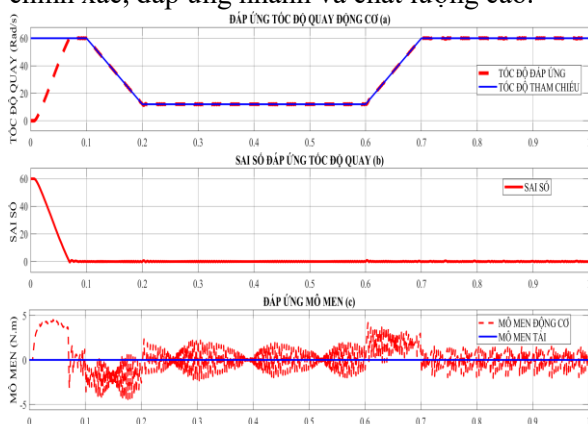
3. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá hiệu năng FCS-MPC_SPIM, ba kịch bản mô phỏng khác nhau đã được thực hiện: không tải, có tải và có nhiễu mô men. Các chỉ tiêu đánh giá gồm: đáp ứng tốc độ, sai số bám tốc độ, đáp ứng mô men và dạng sóng dòng điện sáu pha theo trục $\alpha\beta$ và xy . Tốc độ tham chiếu được đặt dạng bậc thang với ba mức: 60 rad/s, 15 rad/s và quay lại 60 rad/s. Các kết quả được thể hiện từ Hình 3 đến Hình 8.

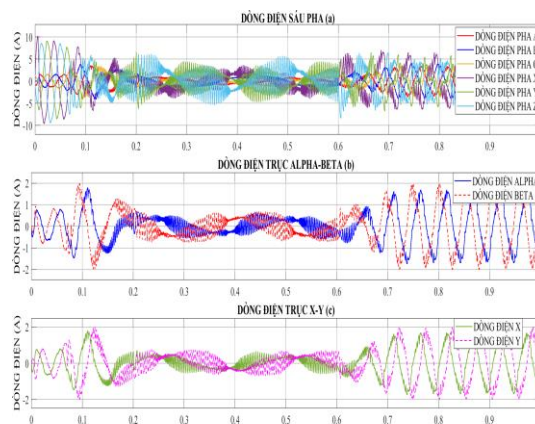
3.1. Trường hợp không tải

Trong điều kiện không tải, hệ thống điều khiển FCS-MPC giúp động cơ nhanh chóng đạt tốc độ tham chiếu 60 rad/s sau khoảng 0,05 s với độ vọt lố và dao động nhỏ (Hình 3a). Khi thay đổi tốc độ về 15 rad/s tại 0,2 s và trở lại 60 rad/s tại 0,6 s, tốc độ phản hồi nhanh, thời gian quá độ ngắn. Sai số bám tốc độ luôn nằm trong khoảng ± 1 rad/s (Hình 3b), chứng tỏ độ chính xác cao. Mô men điện từ dao động nhẹ quanh 0 N.m do không có tải cơ (Hình 3c). Dòng điện sáu pha duy trì cân bằng, hình sin lệch pha đều (Hình 4a). Các thành phần dòng trên trục $\alpha\beta$ dao động khoảng ± 2 A (Hình 4(b)), trong khi dòng trên trục xy chỉ khoảng $\pm 1,5$ A (Hình 4c), thể hiện hiệu quả của

bộ điều khiển trong việc triệt tiêu dòng không sinh công. Hệ thống hoạt động ổn định, điều khiển chính xác, đáp ứng nhanh và chất lượng cao.



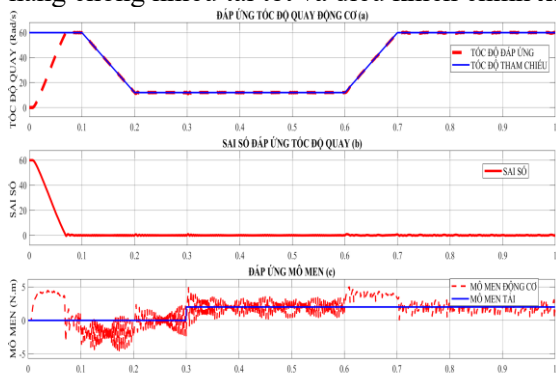
Hình 3. Đáp ứng tốc độ và mô men của động cơ SPIM – Trường hợp không tải



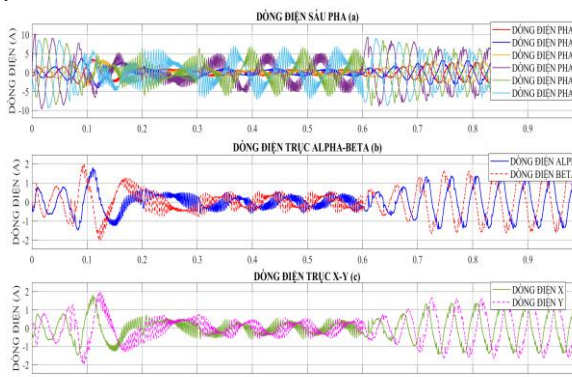
Hình 4. Đáp ứng dòng điện của động cơ SPIM – Trường hợp không tải

3.2. Trường hợp có tải

Khi áp mô men tải 2 N.m tại 0,3 s, hệ thống vẫn đảm bảo đáp ứng tốc độ tốt với dao động nhỏ và thời gian hồi phục nhanh (Hình 5a). Sai số tốc độ tăng tạm thời trong khoảng ± 2 rad/s sau khi áp tải (Hình 5b) nhưng được triệt tiêu nhanh nhờ điều khiển dự báo. Mô men điện từ phản ứng linh hoạt để cân bằng với mô men tải đặt, dao động quanh $\pm 1,5$ N.m (Hình 5c). Dạng sóng dòng điện sáu pha duy trì ổn định và cân bằng (Hình 6a), dòng trục $\alpha\beta$ và xy chỉ dao động nhẹ, biên độ không vượt quá $\pm 2,5$ A và $\pm 1,8$ A tương ứng (Hình 6b, 6c). Điều này cho thấy hệ thống có khả năng chống nhiễu tải tốt và điều khiển chính xác.



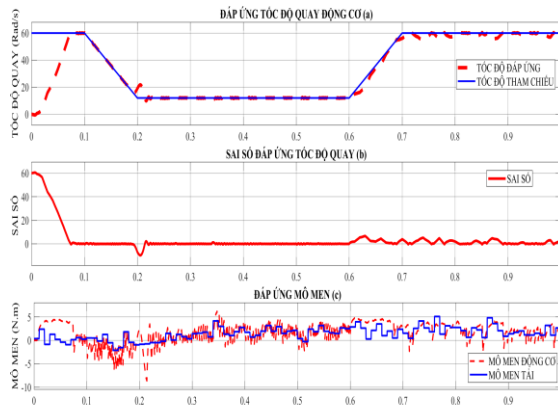
Hình 5. Đáp ứng tốc độ và mô men của động cơ SPIM – Trường hợp có tải



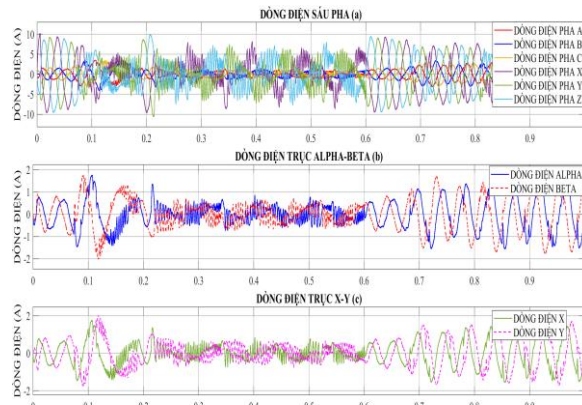
Hình 6. Đáp ứng dòng điện của động cơ SPIM – Trường hợp có tải

3.3. Trường hợp có nhiễu mô men

Để đánh giá độ bền vững, hệ thống được đưa vào nhiễu mô men dạng trắng giới hạn phổ với công suất tương đối 0,01 và thời gian lấy mẫu 0,01 s. Hình 7a cho thấy tốc độ động cơ vẫn bám tốt các mức tham chiếu với thời gian đáp ứng nhanh, dao động nhỏ và sai lệch không vượt quá giới hạn cho phép. Sai số tốc độ duy trì trong khoảng ± 5 rad/s (Hình 7b), không xuất hiện sai số tích lũy. Mô men điện từ bám theo mô men tải có nhiễu, với sai số dao động dưới ± 6 N.m (Hình 7c). Dạng sóng dòng điện sáu pha và dòng $\alpha\beta$, xy trong Hình 8 vẫn đảm bảo giới hạn dòng, với biên độ lần lượt gần ± 3 A và ± 2 A. Kết quả chứng minh khả năng chống nhiễu hiệu quả của hệ thống FCS-MPC.



Hình 7. Đáp ứng tốc độ và mô men của động cơ SPIM – Trường hợp có nhiều mô men tải



Hình 8. Đáp ứng dòng điện của động cơ SPIM – Trường hợp có nhiều mô men tải

Để định lượng hiệu năng FCS-MPC_SPIM trong ba kịch bản mô phỏng (không tải, có tải, nhiều), các chỉ tiêu đánh giá chất lượng điều khiển được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Chỉ tiêu đánh giá hệ thống FCS-MPC_SPIM tại ba trường hợp

Chỉ tiêu đánh giá	Không tải	Có tải 2 N.m	Nhiều mô men
Thời gian đáp ứng (s)	0,18	0,27	0,32
Độ vọt lố (%)	2,15	3,42	4,87
Sai số ổn định (rad/s)	0,11	0,25	0,70
Biên độ dao động mô men điện từ (N.m)	0,05	0,13	0,32
Biên độ dòng stator trục $\alpha\beta$ (A)	4,5	6,1	6,8
Biên độ dòng stator trục xy (A)	0,15	0,28	0,42

Kết quả tổng hợp trong Bảng 2 cho thấy bộ điều khiển FCS-MPC được thiết kế cho SPIM có khả năng đảm bảo chất lượng điều khiển tốt trong các điều kiện vận hành khác nhau. Ở trường hợp không tải, hệ thống đạt thời gian đáp ứng nhanh (0,18 s), độ vọt lố thấp (2,15%), và sai số ổn định gần như bằng không, phản ánh khả năng bám theo tham chiếu tốc độ chính xác.

Khi áp tải 2 N.m, mặc dù các chỉ tiêu có xu hướng tăng (thời gian đáp ứng tăng lên 0,27 s, độ vọt lố 3,42%), nhưng hệ thống vẫn duy trì ổn định với sai số nhỏ (0,25 rad/s) và dao động mô men trong giới hạn cho phép (0,13 N.m). Điều này cho thấy bộ điều khiển đáp ứng tốt với tải thay đổi.

Đặc biệt, khi hệ thống chịu tác động nhiễu mô men ngẫu nhiên, các chỉ tiêu bị ảnh hưởng rõ rệt hơn: thời gian đáp ứng kéo dài (0,32 s), sai số ổn định và dao động mô men tăng (lần lượt 0,7 rad/s và 0,32 N.m). Tuy nhiên, hệ thống vẫn duy trì khả năng ổn định và không xuất hiện dao động vô hạn hay mất điều khiển, chứng tỏ tính bền vững của giải thuật FCS-MPC trong môi trường nhiễu thực tế.

Biên độ dòng điện trục $\alpha\beta$ duy trì trong khoảng 4,5 – 6,8 A, phù hợp với giới hạn vận hành của động cơ. Trong khi đó, dòng điện trục xy – phản ánh chất lượng điều khiển sáu pha – tuy tăng nhẹ trong điều kiện có tải và nhiễu nhưng vẫn ở mức thấp (dưới 0,5 A), chứng tỏ cấu trúc điều khiển giữ được đặc tính cân bằng điện từ và hạn chế tổn hao.

Tổng quan, bộ điều khiển FCS-MPC cho SPIM thể hiện hiệu suất điều khiển cao, tính bám theo nhanh và khả năng chống nhiễu tốt, đáp ứng yêu cầu vận hành trong các điều kiện thay đổi tải và nhiễu thực tế.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày mô hình điều khiển FCS-MPC cho động cơ cảm ứng sáu pha (SPIM) với trung tính cách ly, sử dụng hệ tọa độ $\alpha\beta xy$ và ma trận Clarke mở rộng. Hệ thống được đánh giá trong ba điều kiện vận hành: không tải, có tải và có nhiễu mô men. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều

hiện đạt tốc độ bấp 60 rad/s với thời gian xác lập khoảng 0,05 s, sai số trạng thái dừng khoảng ± 1 rad/s ở chế độ không tải, và duy trì sai số khoảng ± 5 rad/s khi có nhiễu. Mô men đáp ứng nhanh với sai số khoảng $\pm 1,5$ N.m khi có tải. Dòng trên trục xy luôn duy trì khoảng ± 2 A, đảm bảo cân bằng điện từ giữa hai bộ dây quấn lệch 30° điện. Với hiệu năng cao, khả năng khử nhiễu tốt và tính ổn định trong các điều kiện thay đổi, phương pháp FCS-MPC cho SPIM phù hợp cho các hệ truyền động công nghiệp và năng lượng tái tạo. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ hướng đến tối ưu tham số hoặc tích hợp AI nhằm nâng cao hiệu suất và độ thích nghi của hệ thống. Ngoài ra, mặc dù thuật toán FCS-MPC yêu cầu khối lượng tính toán đáng kể, nhưng với số trạng thái hữu hạn (64 vector) và chu kỳ lấy mẫu 40 μ s, việc triển khai trên các nền tảng DSP/FPGA hiện nay là khả thi. Đây cũng sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo để kiểm chứng trên mô hình thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] E. Levi, "Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 433–448, 2016.
- [2] M. A. Frikha, J. Croonen, K. Deepak, Y. Benômar, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, "Multiphase motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends," *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020768.
- [3] M. G. Abdel-Moneim, W. E. Abdel-Azim, A. S. Abdel-Khalik, M. S. Hamed, and S. Ahmed, "Model predictive current control of nine-switch inverter-fed six-phase induction motor drives under healthy and fault scenarios," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 10, no. 2, pp. 1234–1245, 2024.
- [4] J. Su, R. Gao, and I. Husain, "Model predictive control based field-weakening strategy for traction EV used induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2295–2305, 2018.
- [5] M. Mamdouh and M. A. Abido, "Simple predictive current control of asymmetrical six-phase induction motor with improved performance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 8, pp. 7580–7590, 2023.
- [6] J. J. Aciego, I. Gonzalez-Prieto, M. J. Duran, A. Gonzalez-Prieto, and J. Carrillo-Rios, "Guiding the selection of multi-vector model predictive control techniques for multiphase drives," *Machines*, vol. 12, no. 2, 2024, doi: 10.3390/machines12020115.
- [7] M. Ayala, J. Doval-Gandoy, J. Rodas, O. Gonzalez, and R. Gregor, "Current control designed with model based predictive control for six-phase motor drives," *ISA Trans.*, vol. 98, pp. 496–504, 2020.
- [8] M. Slunjski, O. Dordevic, M. Jones, and E. Levi, "Symmetrical/asymmetrical winding reconfiguration in multiphase machines," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12835–12844, 2020.
- [9] I. Gonzalez-Prieto, M. J. Duran, F. Barrero, M. Bermudez, and H. Guzman, "Impact of postfault flux adaptation on six-phase induction motor drives with parallel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 515–528, 2017.
- [10] P. Karamanakos, E. Liegmann, T. Geyer, and R. Kennel, "Model predictive control of power electronic systems: Methods, results, and challenges," *IEEE Open J. Ind. Appl.*, vol. 1, pp. 95–114, 2020.
- [11] P. Goncalves, S. Cruz, and A. Mendes, "Finite control set model predictive control of six-phase asymmetrical machines - An overview," *Energies*, vol. 12, no. 24, 2019, doi: 10.3390/en12244693.
- [12] J. Carrillo-Rios, I. González-Prieto, Á. González-Prieto, M. J. Durán, and J. J. Aciego, "Model predictive control for six-phase induction machines with insight into past current errors," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/app142411684.