

# NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN MÔ-MEN ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU ỨNG DỤNG CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG XE ĐIỆN

RESEARCH ON TORQUE CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR  
APPLICATION FOR ELECTRIC VEHICLE DRIVE SYSTEM

Nguyễn Đức Quang<sup>1,2,\*</sup>, Giáp Văn Nam<sup>1</sup>,  
Bùi Đăng Quang<sup>1</sup>, Vũ Hoàng Phương<sup>1</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huieh5804.2024.297>

## TÓM TẮT

Xe điện hiện nay đang trong xu thế phát triển mạnh và rất có thể là phương tiện giao thông chủ yếu trong tương lai. Nghiên cứu hệ truyền động cho xe điện là yêu cầu cấp thiết trong khoa học và ứng dụng. Hệ truyền động xe điện cần có đặc tính cơ phù hợp với các chế độ làm việc khác nhau như khởi động, gia tốc, ổn định tốc độ. Mỗi loại động cơ điện cơ đặc tính cơ và các chế độ làm việc khác nhau, trong bài báo này, tác giả công bố kết quả nghiên cứu, đánh giá giải pháp điều khiển mô-men của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM với các trạng thái làm việc khác nhau phù hợp với đặc tính tải của xe điện.

**Từ khóa:** Truyền động xe điện, động cơ đồng bộ, điều khiển mô-men động cơ PMSM.

## ABSTRACT

Electric vehicles are currently in a strong development trend and may very well be the main means of transportation in the future. Researching powertrain systems for electric vehicles is an urgent requirement in science and application. The electric vehicle transmission system needs to have mechanical properties suitable for different working modes such as starting, acceleration, and speed stability. Each type of electromechanical motor has different mechanical characteristics and working modes. In this article, the author announces the results of research and evaluation of torque control solutions of PMSM permanent magnet synchronous motors with different working states are suitable for the load characteristics of electric vehicles.

**Keywords:** Electric vehicle drive, synchronous motor, PMSM motor torque control.

<sup>1</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: quang.nd230042d@sis.hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

## KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\psi_m$	Wb	Từ thông cực từ
$L_s$	H	Điện cảm dây quấn Stator
$L_{sd}, L_{sq}$	H	điện cảm dọc trục, ngang trục của stator
$I_{sd}, I_{sq}$	A	Dòng điện theo hướng dọc trục, ngang trục hệ tọa độ d-q
$I_{dm}$	A	Dòng điện định mức
$U_{dm}$	V	Điện áp dây định mức
$M_{dm}$	N.m	Mô-men định mức của động cơ

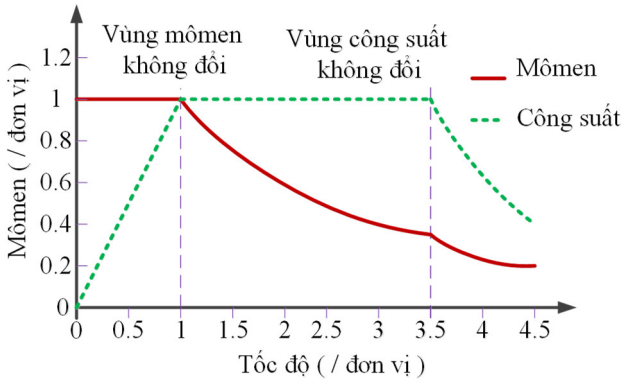
## CHỮ VIẾT TẮT

FOC	Field Oriented Control
RTD	Resolver to Digital
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
IPM	Interior Permanent Magnet Motor
PWM	Pulse Width Modulation
MTPA	Maximum Torque Per Ampere
SVM	Space Vector Modulation
ADC	Analog Digital Converter
PI	Proportion Integral

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hệ truyền động xe điện cần đáp ứng các yêu cầu sau: Có khối lượng nhẹ, kích thước nhỏ gọn, mật độ mô-men và mật độ công suất cao, mô-men lớn ở tốc độ thấp để khởi động hoặc leo dốc. Xe điện có tốc độ từ 0 đến

150km/h, động cơ cần phạm vi tốc độ rất rộng, tốc độ của vùng công suất không đổi phải là 3 đến 4 lần so với vùng mô-men không đổi, như hình 1 [1]. Khả năng quá tải lớn, động cơ có thể tạo ra mô-men gấp hai lần định mức trong khoảng thời gian ngắn. Tiếng ồn động cơ và mô-men đập mạch phải được triệt tiêu, chi phí hợp lý, cạnh tranh với các dòng xe.



Hình 1. Đặc tính tải của xe điện

Mỗi loại động cơ có đặc tính làm việc, đặc tính cơ và các chế độ điều khiển, khống chế khác nhau. Khả năng đáp ứng mô-men, tốc độ của động cơ quyết định chất lượng hệ truyền động xe điện. Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu động cơ PMSM, loại động cơ này có khối lượng nhỏ, mô-men quán tính thấp, đáp ứng mô-men nhanh, cường độ từ trường lớn, thể tích giảm nên PMSM có hiệu suất cao, giảm chi phí và kích thước biến tần, không có tổn thất đồng ở rotor, quá trình tản nhiệt trong động cơ tốt hơn. Một số PMSM có thêm mô-men từ trở trong dải điều khiển giảm từ thông nên có dải công suất rộng [2, 3]. Động cơ IPM các nam châm được đặt trong lõi sắt rotor giảm thiểu từ hóa, có điện cảm dọc trục và điện cảm ngang trục khác nhau, có hai loại mô-men là mô-men của nam châm và mô-men từ trở, có khả năng sinh mô-men lớn để khởi động hoặc leo dốc [4]. Trên cơ sở các đặc điểm, cần nghiên cứu đánh giá khả năng điều khiển và đáp ứng mô-men, tốc độ của loại động cơ IPM với mục tiêu ứng dụng cho hệ truyền động xe điện.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả công bố các tính toán, xây dựng cấu trúc điều khiển, mô phỏng, đánh giá chất lượng của cấu trúc điều khiển vector FOC [5], điều khiển cực đại mô-men MTPA cho động cơ IPM, đặc biệt là khả năng đáp ứng mô-men của loại động cơ này. Các kết quả đã cho thấy tính khả thi của giải pháp điều khiển và sự phù hợp về đặc tính cơ của động cơ với đặc tính cơ của hệ truyền động xe điện [6, 7], từ đó mở ra các hướng nghiên cứu mới trên cơ sở nghiên cứu này.

## 2. MÔ HÌNH TOÁN VÀ CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ PMSM

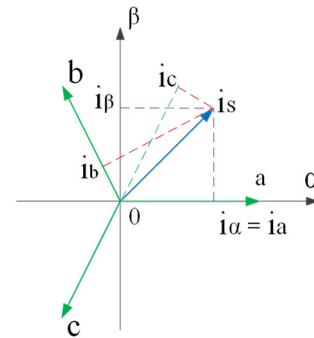
### 2.1. Mô hình toán động cơ PMSM

Công thức chuyển đổi Clarke [8] biểu diễn vector dòng điện stator  $i_s$  gồm  $i_a, i_b, i_c$  trong hệ tọa độ stator cố định a-b-c thành một vector gồm hai thành phần xoay chiều  $i_\alpha, i_\beta$  trong hệ tọa độ trục giao đứng yên  $\alpha$ - $\beta$ .

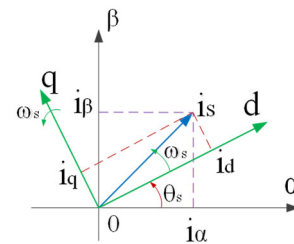
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Công thức chuyển đổi Park: Vector dòng điện trong hệ tọa độ  $\alpha$ - $\beta$  là vector quay với tần số góc của từ trường stator, để đơn giản trong điều khiển, các dòng điện xoay chiều này được biểu diễn thành hai dòng điện một chiều  $i_d, i_q$  [9].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$



Hình 2. Dòng điện stator trên hệ tọa độ cố định và  $\alpha$ - $\beta$



Hình 3. Dòng điện stator trên hệ tọa độ cố định  $\alpha$ - $\beta$  và hệ tọa độ quay d-q

Hệ phương trình vi phân mô tả động cơ đồng bộ trên hệ tọa độ d-q:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\psi}_s \\ \bar{\psi}_s = \bar{i}_s L_s + \bar{\psi}_p \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:  $u_s$  vector điện áp;  $i_s$  vector dòng stator;  $R_s$  điện trở stator;  $\psi_s$  vector từ thông;  $\psi_{sd}, \psi_{sq}$  thành phần trục

dq từ thông stator;  $p_c$  số cặp cực;  $i_{sd}$   $i_{sq}$  dòng stator trục dq. Thành phần điện áp stator trục d-q:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \begin{cases} \psi_{sd} = i_{sd} L_{sd} + \psi_p \\ \psi_{sq} = i_{sq} L_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:  $T_{sd} = \frac{L_{sd}}{R_s}$ ;  $T_{sq} = \frac{L_{sq}}{R_s}$  là hằng số trục d, q của mạch stator, ta có:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{1}{T_{sd}} i_{sd} + \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} + \omega_s \frac{L_{sq}}{L_{sd}} i_{sq} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s \frac{L_{sd}}{L_{sq}} i_{sd} - \frac{1}{T_{sq}} i_{sq} + \frac{1}{L_{sq}} u_{sq} - \omega_s \frac{\psi_p}{L_{sq}} \end{cases} \quad (3)$$

Hệ phương trình Laplace mô tả động cơ PMSM trên hệ tọa độ d-q.

$$i_{sd}(p) = \frac{T_{sd}}{1+pT_{sd}} \left( \omega_s \frac{L_{sq}}{L_{sd}} i_{sq} + \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} \right) \quad (4)$$

$$i_{sq}(p) = \frac{T_{sq}}{1+pT_{sq}} \left( -\omega_s \frac{L_{sd}}{L_{sq}} i_{sd} + \frac{1}{L_{sq}} u_{sq} - \omega_s \frac{\psi_p}{L_{sq}} \right) \quad (5)$$

Giả sử  $J$  là mô-men quán tính của rotor,  $T_c$  là mô-men cản, ta có phương trình cơ học sau:

$$T_e - T_c = J \frac{d\omega_r}{dt}; \omega_r = \frac{\omega_e}{p_c}; J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (6)$$

Với,  $J$  là mô-men quán tính;  $m$ (kg): khối lượng rotor;  $r$ (m): bán kính rotor.

Gọi  $U_{smax}$  là điện áp đỉnh lớn nhất của bộ nghịch lưu, giới hạn điện áp của PMSM sẽ là:

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_{smax}^2; U_{smax} = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

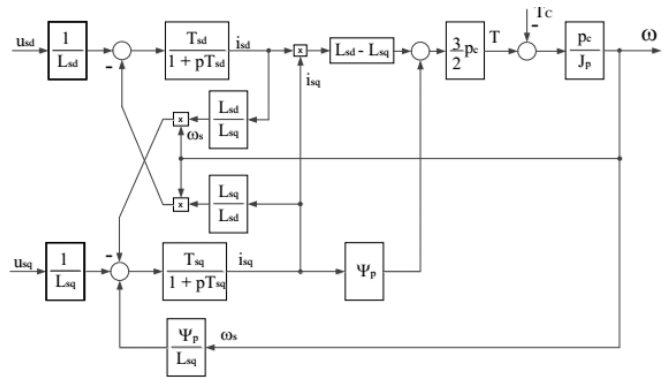
Giới hạn dòng điện  $i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \leq i_{smax}^2$ . Vì FOC dựa trên các phép chiếu nên đạt được quy chiếu không đổi và điều khiển mô-men trực tiếp. Trong hệ quy chiếu (d,q) biểu thức của mô-men được thể hiện như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} p_c i_{sq} [\psi_m + i_{sd}(L_{sd} - L_{sq})] \quad (8)$$

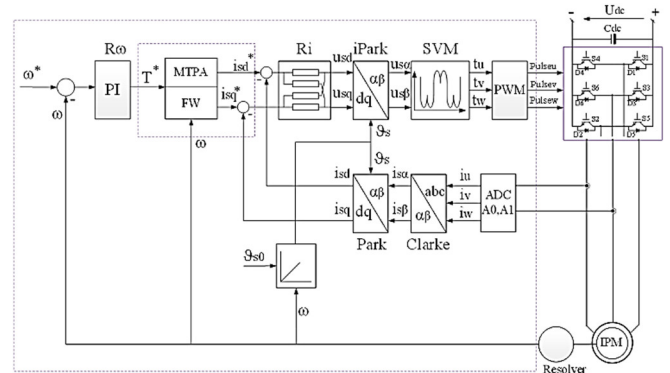
Kết hợp từ các công thức, ta có mô hình động cơ IPM trong hệ tọa độ d-q như thể hiện trên hình 4.

### 2.2. Cấu trúc điều khiển vector động cơ IPM

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng cấu trúc điều khiển FOC cho động cơ IPM như thể hiện trên hình 5.

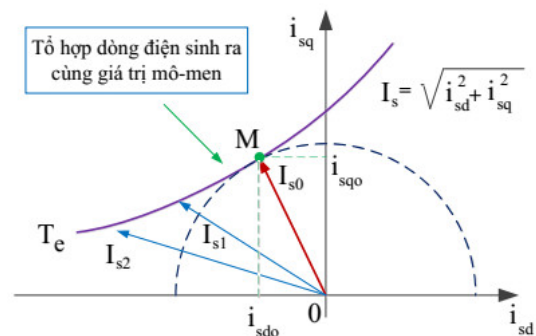


Hình 4. Mô hình IPM trên hệ tọa độ d-q



Hình 5. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển FOC động cơ IPM có cảm biến vị trí

Thuật toán điều khiển cực đại mô-men MTPA cho động cơ IPM như thể hiện trên hình 6.



Hình 7. Tổ hợp dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  cùng tạo ra một giá trị mô men điện từ, phương pháp điều khiển MTPA

Phương trình mô-men động cơ là :

$$T_e = \frac{3}{2} p_c i_{sq} [\psi_m + i_{sd}(L_{sd} - L_{sq})] \quad (9)$$

Thay giá trị dòng điện  $i_{sd} = \sqrt{i_s^2 - i_{sq}^2}$  và lấy đạo hàm mô-men theo dòng điện  $i_{sq}$ , ta có:

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_{sq}} = \frac{3p_c}{2} \left[ \psi_m + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} - (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} \frac{1}{\sqrt{i_s^2 - i_{sq}^2}} \right] = 0 \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow \Psi_m + (L_{sd} - L_{sq})i_{sd} - (L_{sd} - L_{sq})\frac{i_{sq}^2}{i_{sd}} = 0 \quad (11)$$

$$\Rightarrow i_{sd} = \frac{\Psi_m}{2(L_{sq} - L_{sd})} - \sqrt{\frac{\Psi_m^2}{4(L_{sq} - L_{sd})^2} + i_{sq}^2} \quad (12)$$

Công thức (12) cho phép biểu diễn dòng  $i_{sd}$  theo dòng  $i_{sq}$  để đạt mô-men lớn nhất.

$$T_e = \frac{3p_c}{4} \left[ \frac{\Psi_m i_{sq}}{+(L_{sd} - L_{sq})i_{sd}i_{sq}} \right] = \frac{3p_c}{4} \left[ \frac{\Psi_m I_s \cos\beta}{+\frac{1}{2}(L_{sq} - L_{sd})I_s^2 \sin 2\beta} \right] \quad (13)$$

Ngoài ra, để mô-men đạt giá trị cực đại thì góc  $\beta$  (góc giữa véc tơ dòng điện  $I_s$  và trục q) cần kiểm soát, tiến hành giữ  $I_s$  không đổi, thay đổi  $\beta$  cho đến khi T cực đại. Để tính góc  $\beta$  ta lấy đạo hàm của T với  $\beta$ .

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta} = \frac{3p_e}{2} \left[ -\Psi_m I_s \sin\beta + (L_{sq} - L_{sd})I_s^2 \cos 2\beta \right] = 0 \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow 2(L_{sq} - L_{sd})I_s \sin^2 \beta + \Psi_m \sin\beta - (L_{sq} - L_{sd})I_s = 0 \quad (15)$$

$$\Rightarrow \beta = \sin^{-1} \left[ \frac{-\Psi_m + \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_{sq} - L_{sd})^2 I_s^2}}{4(L_{sq} - L_{sd})I_s} \right] \quad (16)$$

Phương trình trên cho phép tính  $\beta$  và từ đó tính được  $i_{sd} = -I_s \sin\beta$ .

$$i_{sd} = \frac{1}{4(L_{sq} - L_{sd})} \left( \Psi_m - \sqrt{\Psi_m^2 + 8(L_{sq} - L_{sd})^2 I_s^2} \right) \quad (17)$$

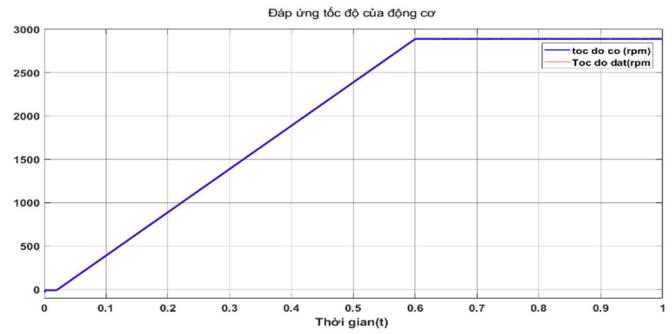
Phương pháp MTPA cho phép bộ điều khiển tìm được điểm có giá trị  $I_s$  nhỏ nhất với cùng giá trị mô-men yêu cầu, phương pháp này được áp dụng ở vùng tốc độ dưới tốc độ cơ bản của động cơ do giới hạn về điện áp.

### 3. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ MÔ-MEN ĐỘNG CƠ IPM

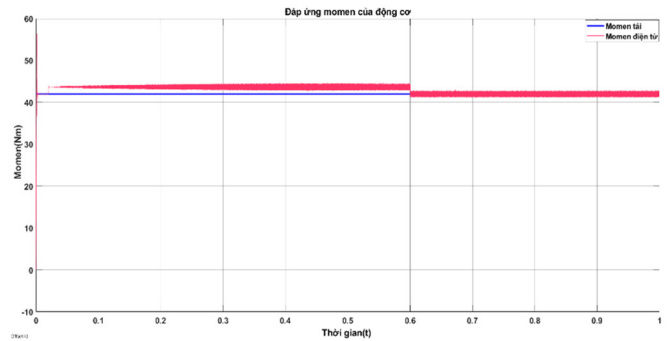
Bảng 1. Thông số động cơ sử dụng trong mô phỏng

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Công suất định mức	$P_{dm} = 13kW$	Điện trở stator	$R_s = 0,025W$
Tốc độ định mức	$\omega_{dm} = 2900rpm$	Điện cảm $L_{sd}$	$0,9209mH$
Điện áp dây định mức	$U_{dm} = 102V$	Điện cảm $L_{sq}$	$1,787mH$
Dòng điện định mức	$I_{dm} = 58A$	Điện cảm Stator L	$0,1048mH$
Tần số định mức	$f_{dm} = 250Hz$	Từ thông Stator	$0,109Wb$
Mô-men định mức	$M_{dm} = 42Nm$		

**Kịch bản mô phỏng 1:** Mô phỏng mô-men tải là 42Nm, tại tốc độ 2900rpm, kết quả được thể hiện trên hình 7, 8.

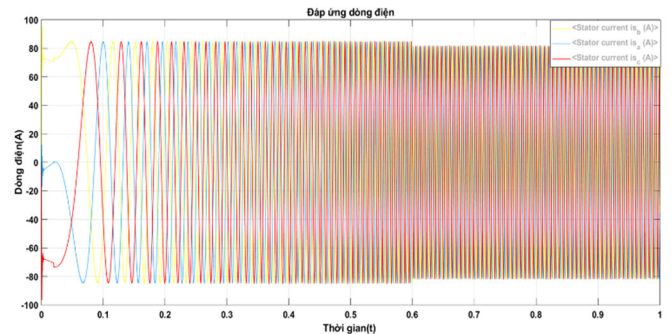


Hình 7. Đáp ứng tốc độ của động cơ, tại 0,6s tốc độ đạt 2900rpm



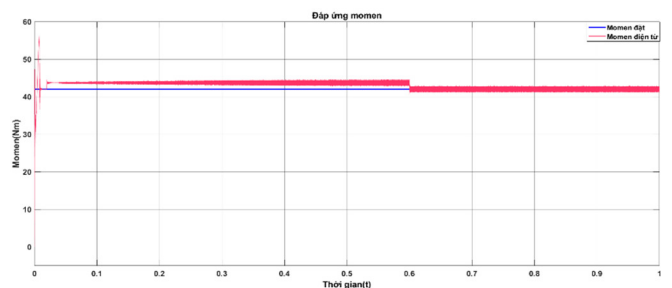
Hình 8. Đáp ứng mô-men động cơ tại tốc độ 2900rpm, mô-men tải là 42Nm

Khi tăng tốc, mô-men của động cơ lớn hơn mô-men đặt, sau đó cân bằng với mô-men tải như thể hiện trên hình 9.



Hình 9. Đáp ứng dòng điện pha động cơ với tốc độ đặt 2900rpm, mô-men tải là 42Nm

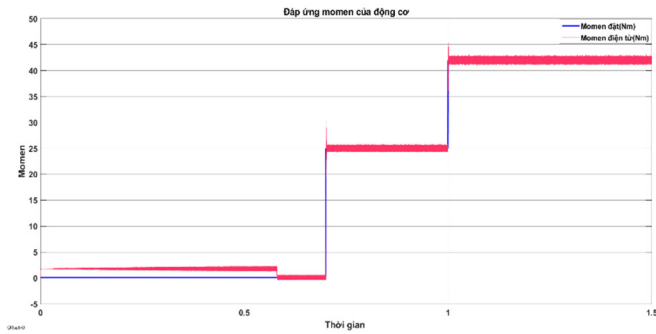
**Kịch bản mô phỏng 2:** Sử dụng thuật toán MTPA, tốc độ 2900rpm, mô-men tải 42Nm.



Hình 10. Đáp ứng mô-men động cơ tại tốc độ 2900rpm, mô-men tải là 42Nm MTPA

Hình 10 cho thấy, giai đoạn tăng tốc, mô-men điện từ của động cơ lớn hơn mô-men đặt. Đến thời điểm tốc độ động cơ đạt 2900rpm, mô-men điện từ cân bằng với mô-men tải.

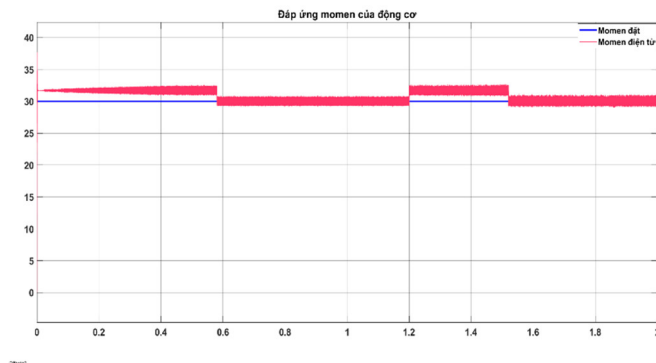
**Kịch bản mô phỏng 3:** Sử dụng thuật toán MTPA, tốc độ 2900rpm, mô-men tải là 25Nm sau 0,7s, và 42Nm sau 1s, kết quả như thể hiện trên hình 11.



Hình 11. Đáp ứng mô-men động cơ 25Nm sau 0,7s và 42Nm sau 1s

Tại thời điểm thay đổi mô-men đặt lên động cơ, mô-men điện từ có sự dao động, nhưng nhanh chóng cân bằng với mô-men tải.

**Kịch bản mô phỏng 4:** Mô phỏng MTPA với tốc độ đặt 2900rpm với tải 30Nm. Đến thời điểm 1,2s thì tiến hành tăng tốc độ động cơ đến 5000 rpm, tải 30Nm. Kết quả như thể hiện trên hình 12.



Hình 12. Đáp ứng mô-men động cơ khi tăng tốc từ 2900rpm lên 5000 rpm

Thời điểm động cơ tăng tốc, mô-men điện từ sinh ra lớn hơn mô-men đặt, khi tốc độ động cơ không đổi thì mô-men điện từ cân bằng với mô-men đặt.

#### 4. KẾT LUẬN

Qua các kết quả tính toán và mô phỏng, có thể khẳng định rằng, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu cực chìm IPM có đặc tính và khả năng điều khiển mô-men phù hợp với hệ truyền động xe điện trong các trạng thái làm việc khác nhau như: Chế độ khởi động, leo dốc, tăng tốc và đảm bảo mô-men ở vùng tốc độ cao. Đồng thời nghiên cứu cũng đánh giá được giải pháp điều khiển FOC, điều

khiến cực đại mô-men MTPA có những kết quả rất khả quan, đây là tiền đề quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo trên cơ sở kết quả của nghiên cứu này.

#### LỜI CẢM ƠN

Công trình này được Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam hỗ trợ theo đề tài mã số: 01.M03.2023

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Cheng, L. Sun, G. Buja, L. Song, "Advanced electrical machines and machine-based systems for electric and hybrid vehicles," *Energies*, 8, 9, 9541–9564, 2015. doi: 10.3390/en8099541.
- [2]. A. K. Adnanes, "Torque analysis of permanent magnet synchronous motors," in *PESC Record - IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 695-701, 1991. doi: 10.1109/pesc.1991.162751.
- [3]. F. Savi, et al., "High-speed electric drives: A step towards system design," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, 1, 1, 10-21, 2020. doi: 10.1109/OJIES.2020.2973883.
- [4]. "Sensorless\_FOC\_for\_PMSM\_and\_IPSM\_White\_Paper.pdf."
- [5]. Nguyen Phung Quang, *Intelligent electrodynamic transmission*. Science and Technics Publishing House, Hanoi, 2002. (in Vietnamese)
- [6]. I. Husain, et al., "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, 109, 6, 2021.
- [7]. E. Robles, A. Matallana, I. Aretxabaleta, J. Andreu, M. Fernández, J. L. Martín, "The role of power device technology in the electric vehicle powertrain," *International Journal of Energy Research*, 46, 15, 22222-22265, 2022. doi: 10.1002/er.8581.
- [8]. G. Wang, G. Zhang, D. Xu, "Position sensorless control techniques for permanent magnet synchronous machine drives," *Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives*, 1-298, 2019. doi: 10.1007/978-981-15-0050-3.
- [9]. A. K. Chakraborty, N. Sharma, "Control of permanent magnet synchronous motor (pmsm) using vector control approach," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2016. doi: 10.1109/TDC.2016.7519896.

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Duc Quang<sup>1,2</sup>, Giap Van Nam<sup>1</sup>, Bui Dang Quang<sup>1</sup>, Vu Hoang Phuong<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

<sup>2</sup>Hanoi University of Industry, Vietnam