

# ĐIỀU KHIỂN VÉC TƠ ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU CỰC LỖI

## VECTOR CONTROL OF SURFACE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Phạm Văn Tuấn<sup>1,\*</sup>, Lê Anh Tuấn<sup>2</sup>, Thái Hữu Nguyên<sup>1</sup>,  
Nguyễn Văn Minh<sup>1</sup>, Hoàng Nghĩa Thắng<sup>1</sup>

### TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, đặc biệt là trong lĩnh vực ô tô điện. Vấn đề nghiên cứu điều khiển véctơ cho PMSM là một phần quan trọng trong truyền động động cơ đồng bộ. Bài báo trình bày mô hình hóa và mô phỏng hệ truyền động biến tần - SPMSM với phương pháp điều khiển véctơ. Phần mềm Matlab/Simulink đã được sử dụng để kiểm chứng các kết quả nghiên cứu.

**Từ khóa:** Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, động cơ đồng bộ nam châm cực lỗi, điều khiển véctơ.

### ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors are widely used in industry, especially in the field of electric cars. Research problem on vector control for PMSM is an important part of the synchronous motor drives. This paper presents modeling and simulation of the SPMSM inverter drive system with vector control method. Matlab/Simulink software was used to verify the research results.

**Keywords:** PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), SPMSM (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor), vector control.

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

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

\*Email: tuanvp.bk@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/9/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/12/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2022

### DANH MỤC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Giải thích ký hiệu
$u_{\alpha s}, u_{\beta s}$	Các thành phần điện áp stato trong khung tham chiếu tĩnh gắn với stato (V)
$u_{ds}, u_{qs}$	Các thành phần điện áp stato trong khung tham chiếu quay gắn với từ trường quay (V)
$\omega_r$	Tốc độ quay của rô to (Rad/s)
$p$	Số đôi cực
$\omega_e$	Tốc độ quay của từ trường (Rad/s)
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$	Các thành phần dòng điện stato trong khung tham chiếu tĩnh gắn với stato (A)

$i_{ds}, i_{qs}$	Các thành phần dòng điện stato trong khung tham chiếu quay gắn với từ trường quay (A)
$T_e$	Mô men điện từ của động cơ (Nm)
$T_L$	Mô men tải (Nm)
$\Psi_r$	Từ thông rô to (Wb)
$R_s$	Điện trở stato
$L_s$	Điện cảm stato

### 1. GIỚI THIỆU

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu - PMSM là một dạng đặc biệt của máy điện đồng bộ. Động cơ đồng bộ thông thường có cuộn dây quấn phần ứng và cuộn dây quấn kích từ ở rô to được cấp dòng điện một chiều qua chổi than và vành trượt. Điều đó gây tổn hao rô to, thường xuyên phải bảo dưỡng chổi than, làm giảm tuổi thọ máy. Nhằm khắc phục những nhược điểm của máy điện đồng bộ thông thường như đã trình bày ở trên, người ta thay cuộn kích từ, nguồn kích từ một chiều, chổi than vành trượt bằng một nam châm vĩnh cửu, vì thế rô to của PMSM không có tổn hao, tổn thất toàn phần giảm khoảng 30% so với động cơ không đồng bộ ba pha nên việc nghiên cứu và phát triển nó có ý nghĩa thực tiễn rất lớn [1-3].

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) có rất nhiều ưu điểm so với các loại động cơ khác cùng công suất đang sử dụng cho truyền động điện xoay chiều như: kích thước nhỏ, hiệu suất và hệ số công suất cao nên được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, ô tô điện. Dựa vào cấu tạo rô to, người ta phân loại động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu thành hai loại: động cơ đồng bộ nam châm bề mặt (SPMSM) và động cơ đồng bộ nam châm chìm (IPMSM).

Ngoài động cơ PMSM có cấu tạo như trên còn có một loại động cơ đồng bộ thuộc nhóm động cơ một chiều không có cổ góp (BLDC). Sự khác biệt giữa động cơ PMSM và động cơ BLDC ở chỗ: dạng của sức điện động cảm ứng trong cuộn dây stato của BLDC có dạng hình thang còn của PMSM có dạng hình sin [1-6]. Do vậy PMSM có mô men ít đập mạch hơn so với BLDC, rất thích hợp trong các ứng dụng cần ổn định mô men như trong lĩnh vực ô tô điện.

Với sự phát triển của các thiết bị điện tử công suất và các thuật toán điều khiển nghiên cứu điều khiển véc tơ PMSM thông qua bộ nghịch lưu là một vấn đề cấp thiết và có thời sự cao.

Bài báo trình bày về điều khiển véc tơ động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu cực lỗi (SPMSM). Cấu trúc của bài báo này gồm 4 phần: Phần 1 trình bày ưu điểm của PMSM, lý do nghiên cứu điều khiển véc tơ PMSM. Phần 2 trình bày mô hình hóa SPMSM. Trong phần 3 chỉ rõ việc xây dựng mô hình điều khiển véc tơ cho SPMSM. Phần còn lại sẽ trình bày các kết quả mô phỏng hệ truyền động biến tần - SPMSM với phương pháp điều khiển véc tơ bằng phần mềm Matlab/simulink.

**2. MÔ HÌNH HÓA SPMSM**

Mô hình động lực học tổng quát của SPMSM gồm các 4 mô hình như sau:

- Mô hình chuyển đổi điện áp ba pha thành hai pha;
- Mô hình tính toán dòng điện;
- Mô hình tính toán mô men điện từ;
- Mô hình tính toán tốc độ động cơ.

**2.1. Mô hình chuyển đổi điện áp**

Quá trình chuyển đổi điện áp nguồn cấp ba pha sang điện áp ở hệ tọa độ gắn với stato - hệ tọa độ tĩnh (αβ) được thực hiện bằng phương trình ma trận (2) dưới đây (gọi là biến đổi Clark thuận):

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \sin 0 & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} \tag{1}$$

Chuyển đổi điện áp ở hệ tọa độ tĩnh αβ sang hệ tọa độ quay dq được thực hiện bằng phương trình (3) như sau (gọi là biến đổi Park):

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix} \tag{2}$$

**2.2. Mô hình tính toán dòng điện abc**

Phương trình tính dòng điện stato ở hệ tọa độ quay dq như sau [3]:

$$\begin{cases} i_{ds} = \int (u_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_e L_s i_{qs}) \frac{1}{L_s} dt \\ i_{qs} = \int (u_{qs} - R_s i_{qs} - (\psi_r + L_s i_{ds}) \omega_e) \frac{1}{L_s} dt \end{cases} \tag{3}$$

Với:  $\omega_e$  là tốc độ quay của từ trường (Rad/s).

Chuyển đổi dòng điện ở hệ tọa độ quay dq sang hệ tọa độ tĩnh αβ (gọi là biến đổi Park ngược) như sau:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Chuyển đổi dòng điện ở hệ tọa độ tĩnh sang hệ tọa độ abc (gọi là biến đổi Clark ngược) như sau:

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \tag{5}$$

**2.3. Mô hình tính toán mô men**

Mô men điện từ của động cơ SPMSM được tính như sau [3]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_r i_{qs} \tag{6}$$

Với p là số đôi cực của động cơ;  $\psi_r$  là từ thông theo hướng dọc trục của rô to.

**2.4. Tốc độ động cơ**

Từ phương trình cân bằng mô men:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f_d \omega_r = T_e - T_L \tag{7}$$

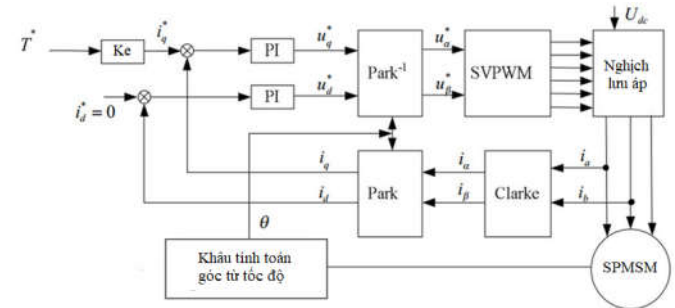
Ở đây J là mômen quán tính của rô to;  $f_d$  là hệ số ma sát nhớt (viscous friction) và  $T_L$  là mômen tải.

Từ phương trình cân bằng mô men (8) và bỏ qua ma sát nhớt, tốc độ rô to được tính như sau:

$$\omega_r = \int \frac{T_e - T_L}{J} dt \tag{8}$$

**3. ĐIỀU KHIỂN VÉC TƠ SPMSM**

Sơ đồ khối điều khiển ổn định mô men điện từ và tốc độ SPMSM được chỉ ra ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối điều khiển ổn định mô men và tốc độ SPMSM

$i_{sd}^* = 0$ ; vì kích từ sẽ được lấy từ rô to (nam châm vĩnh cửu).

Động cơ PMSM thường yêu cầu điều khiển ổn định mô men và tốc độ động cơ (yêu cầu của ô tô điện: dù tải thay đổi nhanh, nhưng tốc độ và mô men của động cơ ổn định).

Với một mô men động cơ đặt trước, từ phương trình (6) ta có được:

$$i_{qs}^* = \frac{T_e^*}{\frac{3}{2} p \psi_r} \tag{9}$$

Kế thừa [7] ta có được:

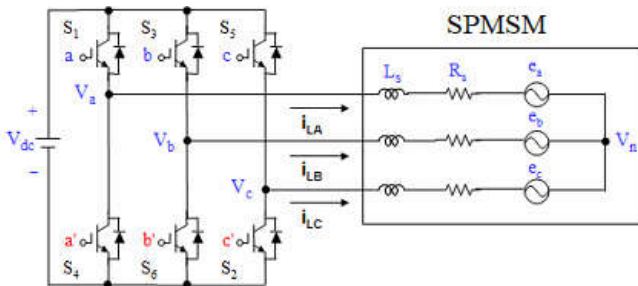
$$K_{pd} = L_s * w_{cc}; K_{id} = R_s * w_{cc};$$

$$K_{pq} = L_s * w_{cc}; K_{iq} = R_s * w_{cc}; \tag{10}$$

Với  $w_{cc}$  là dải tốc độ có thể điều khiển;  $L_s, R_s$  là điện cảm và điện trở stator của động cơ.

Các biến đổi Clark và Park thuận của dòng điện tương tự như điện áp, đã được trình bày ở phương trình (1) và (2). Biến đổi Park ngược của điện áp tương tự như dòng điện, đã được trình bày ở phương trình (4).

Bộ nghịch lưu áp được sử dụng trong hình 1 là nghịch lưu áp hai mức. Sơ đồ của bộ nghịch lưu áp hai mức cấp điện cho động cơ được chỉ ra ở hình 2.

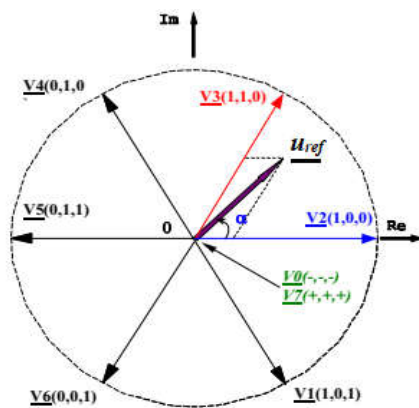


Hình 2. Sơ đồ nghịch lưu áp hai mức cấp điện cho SPMSM

Trong đó: S1, S3, S5: là các nhóm transistor nhóm trên; S2, S4, S6: là các nhóm transistor nhóm dưới;

- Khâu phát xung PWM điều khiển nghịch lưu áp hai mức:

Hình 3 đã chỉ ra tám véc tơ điện áp của bộ nghịch lưu:  $\underline{V}_1 \div \underline{V}_6$  gọi là các véc tơ tích cực;  $\underline{V}_0, \underline{V}_7$  là các véc tơ không.



Hình 3. Các véc tơ không gian điện áp stato

Tính toán thời gian phát xung của 2 véc tơ tích cực và hai véc tơ không như sau:

$\underline{u}_{ref}$  được tạo ra bằng cách kết hợp hai véc tơ tích cực và hai véc tơ không.

$$\int_0^{T_s} \underline{u}_{ref} dt = \int_0^{\frac{T_0}{2}} \underline{V}_0 dt + \int_{\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}+T_k} \underline{V}_k dt$$

$$+ \int_{\frac{T_0}{2}+T_k+T_{k+1}}^{\frac{T_0}{2}+T_k+T_{k+1}+T_s} \underline{V}_{k+1} dt + \int_{\frac{T_0}{2}+T_k+T_{k+1}}^{\frac{T_0}{2}+T_k+T_{k+1}+T_s} \underline{V}_7 dt \tag{11}$$

Với:  $T_0 + T_k + T_{k+1} = T_s$ ;  $\underline{u}_{ref} \cdot T_s = \underline{V}_k \cdot T_k + \underline{V}_{k+1} \cdot T_{k+1}$ .

Chiếu phương trình (11) lên hai trục  $\alpha\beta$ , ta có:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} T_s = \frac{2}{3} U_{dc} \left\{ T_k \begin{bmatrix} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \\ \sin \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} + T_{k+1} \begin{bmatrix} \cos \frac{k\pi}{3} \\ \sin \frac{k\pi}{3} \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \frac{2}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{k\pi}{3} \\ \sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \sin \frac{k\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Từ phương trình (12) suy ra:

$$\begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_s}{U_{dc}} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \tag{13}$$

$T_0$  là thời gian phát xung cho véc tơ không ( $1/2 \cdot T_0$  cho véc tơ  $\underline{V}_0$ ,  $1/2 \cdot T_0$  cho véc tơ  $\underline{V}_7$ ):

$$T_0 = T_s - (T_k + T_{k+1}) \tag{14}$$

Ở đây k là vùng séc tơ, được xác định qua góc của véc tơ không gian  $\underline{u}_{ref}$ :

$$\alpha = \text{actg} \left( \frac{u_\beta}{u_\alpha} \right), \text{ cụ thể: } \begin{cases} 0^\circ < \alpha < 60^\circ : k = 1 \\ 60^\circ < \alpha < 120^\circ : k = 2 \\ 120^\circ < \alpha < 180^\circ : k = 3 \\ -180^\circ < \alpha < -120^\circ : k = 4 \\ -120^\circ < \alpha < -60^\circ : k = 5 \\ -60^\circ < \alpha < 0^\circ : k = 6 \end{cases}$$

#### 4. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

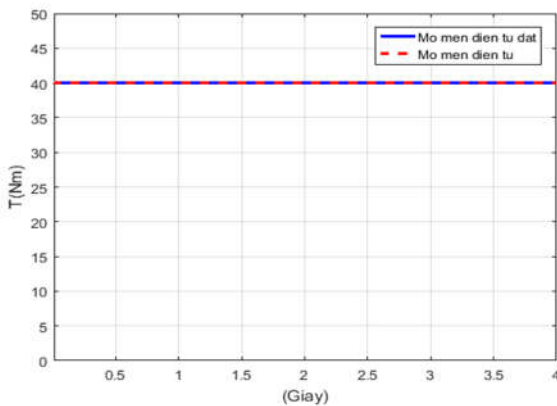
Phần mềm Matlab 2016a được sử dụng để mô phỏng điều khiển véc tơ cho SPMSM. Các thông số động cơ được sử dụng cho quá trình mô phỏng như bảng 1.

Bảng 1. Các thông số động cơ sử dụng cho quá trình mô phỏng

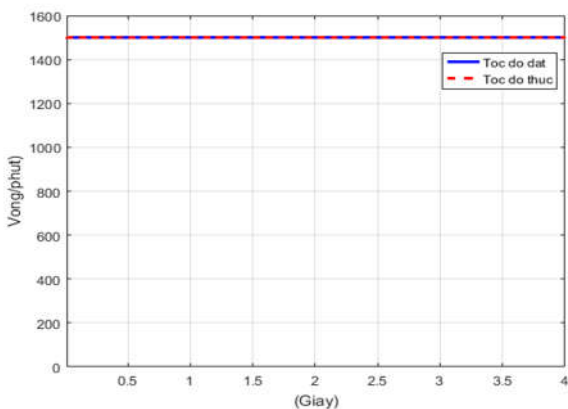
TT	Thông số	Giá trị
1	Công suất định mức	11kW
2	Điện áp định mức	180V
3	Dòng điện định mức	58,6A
3	Tần số định mức	50Hz
4	Số đôi cực	4
5	Tốc độ định mức	1500 vòng/phút
6	Điện trở stator	0,0217Ω
7	Tự cảm stator ( $L_s$ )	0,00049H
8	Điện cảm stator ( $L_s$ )	0,0007H
9	Từ thông rô to	0,1483Wb
10	Mômen quán tính	0,0281kgm <sup>2</sup>

Động cơ PMSM thường ứng dụng cho ô tô điện, với yêu cầu điều khiển ổn định mô men và tốc độ động cơ (yêu cầu

của ô tô điện: tải thay đổi nhanh, nhưng tốc độ và mô men của động cơ ổn định), do đó trong mô phỏng này, mô men điện từ đặt là:  $T_e^* = 40\text{Nm}$ ; tốc độ tải yêu cầu là: 1500 vòng/phút. Sau một số phép thử với các giá trị khác nhau của khoảng thời gian lấy mẫu, giá trị cuối cùng được chọn là 0,0001 giây. Các mô phỏng sẽ quan sát biên độ của điện áp cấp cho động cơ, biên độ của dòng điện stato, mô men điện từ và tốc độ động cơ. Kết quả mô phỏng mô men điện từ và tốc độ động cơ được thể hiện tương ứng trong hình 4 và 5.

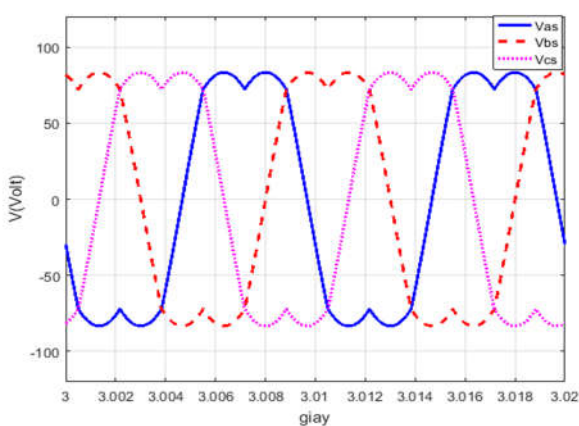


Hình 4. Mô men điện từ bao gồm: Mô men đặt và mô men thực của động cơ

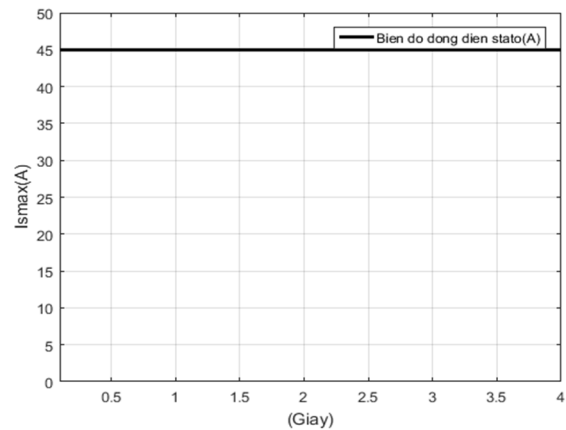


Hình 5. Tốc độ bao gồm: Tốc độ đặt và tốc độ đo lường của động cơ

Hình 4 và 5 đã chỉ ra: Mô men và tốc độ thực của động cơ bám với các giá trị đặt, với sai số rất bé.



Hình 6. Điện áp cấp cho động cơ khi tốc độ đã ổn định



Hình 7. Biên độ của dòng điện stato

Điện áp cấp cho động cơ khi tốc độ đã ổn định được chỉ ra ở hình 6; biên độ dòng điện stato được chỉ ra ở hình 7.

Từ hình 6 và 7 thấy được: Khi tốc độ và mô men đã ổn định, điện áp và dòng điện có giá trị không đổi.

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày mô hình điều khiển vòng kín tốc độ và mô men cho SPMSM với phương pháp điều khiển véc tơ. Các mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink đã kiểm chứng cho thuật toán điều khiển đã được đề xuất, tốc độ và mô men của SPMSM ổn định, với sai số rất bé.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là đánh giá chất lượng của hệ truyền động biến tần - SPMSM với phương pháp điều khiển véc tơ khi các tham số (điện trở stato, hãm, ...) của động cơ thay đổi.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Lu, W. Xie, L. Qu, Y. Zhang, 2011. *Dynamic Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Fed by Voltage Source Inverter*. 2011 Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Eng. Manag. Sci., vol. 2, pp. 284-287, doi: 10.1109/ICM.2011.328.
- [2]. Q. D. Khanh, 2016. *Tim hieu va mo phong dong co dong bo nam cham vinh cuu*. Graduation Project - Hai Phong University.
- [3]. K. H. Nam, 2017. *AC Motor Control and Electric Vehicle Applications*. CRC Press.
- [4]. Z. Haigang, Q. Weiguo, W. Yanxiang, G. Shihong, Y. Yuan, 2011. *Modeling and simulation of the permanent-magnet synchronous motor drive*. 2011 Int. Conf. Uncertain. Reason. Knowl. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 256-260, doi: 10.1109/URKE.2011.6007882.
- [5]. J. F. Gieras, 2010. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC Press.
- [6]. F. G. Jacek, M. Wing, 2002. *Permanent Magnet Technology: Design and Applications*. New York (N.Y.): Dekker.
- [7]. Seoul National University Power Electronics Center, 2011. *Electric motor drive system design and practice*.

### AUTHORS INFORMATION

Pham Van Tuan<sup>1</sup>, Le Anh Tuan<sup>2</sup>, Thai Huu Nguyen<sup>1</sup>,  
 Nguyen Van Minh<sup>1</sup>, Hoang Nghia Thang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Vinh University of Technology Education

<sup>2</sup>Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry