

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG BIẾN TẦN - ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU PMSM ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN SVPWM

A STUDY OF SIMULATION OF INVERTER - PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (PMSM) APPLYING SVPWM CONTROL METHOD

LƯU KIM THÀNH¹, ĐÀO QUANG KHANH^{2*}, HỨA XUÂN LONG²,
TỔNG LÂM TÙNG²

¹Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: khanhdq@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Trong bài báo này, trình bày cơ sở lý thuyết về phương pháp điều chế vector không gian SVPWM cho hệ truyền động điện biến tần gián tiếp - động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM với vòng điều khiển tốc độ động cơ. Từ đó, xây dựng mô phỏng chi tiết các thành phần của hệ thống bằng công cụ Matlab - Simulink. Kết quả mô phỏng, các đặc tính mô phỏng của hệ truyền động sử dụng phương pháp SVPWM đã chỉ rõ hệ thống hoạt động ổn định, đảm bảo tốc độ và mô-men quay của động cơ được ổn định trong suốt quá trình điều khiển. Ngoài ra, nội dung nghiên cứu của bài báo cũng cho thấy ưu điểm tuyệt đối khi áp dụng hệ biến tần - động cơ đồng bộ rotor là nam châm vĩnh cửu PMSM trong công nghiệp.

Từ khóa: Điều chế vector không gian (SVPWM), điều khiển dải trễ dòng điện (HCC), động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM).

Abstract

This paper, the theoretical basis of the spatial vector modulation method SVPWM for indirect inverter electric drive system - PMSM permanent magnet synchronous motor with motor speed control loop is presented. From there, build a detailed simulation of the system's components using Matlab - Simulink tools. The simulation results and simulation characteristics of the transmission system using the SVPWM method clearly show that the system operates stably, ensuring that the speed and torque of the engine are stable throughout the control process. In addition, the research content of the article also shows the absolute advantages of applying an electrodynamic drive system with a PMSM permanent magnet synchronous motor in industry.

Keywords: Space vector pulse width modulation (SVPWM), Hysteresis current controller (HCC), permanent magnet synchronous motor (PMSM).

1. Đặt vấn đề

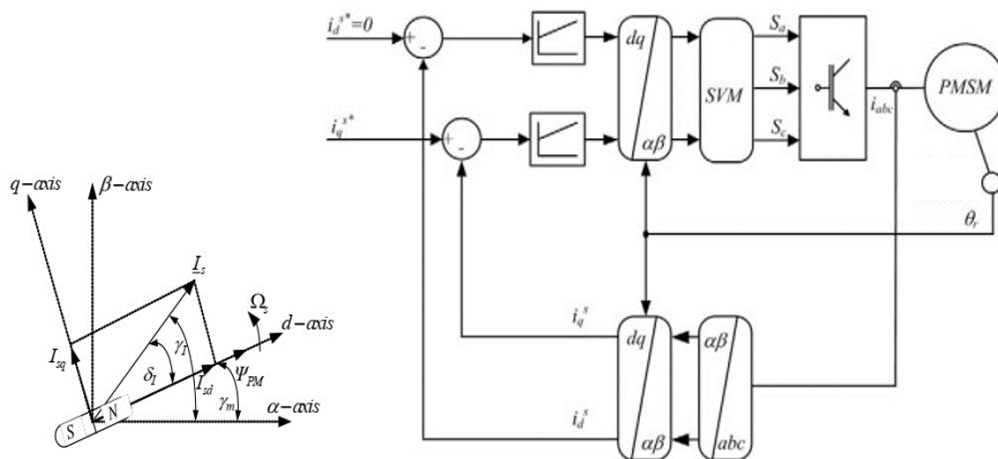
Ngày nay, điều khiển tự động truyền động điện động cơ đồng bộ PMSM hiện đại đã có những tiến bộ vượt bậc. Trong đó, phải kể đến các bộ DSP cho phép thực hiện thuật toán phức tạp của phương pháp điều khiển điều khiển tựa theo từ thông Rotor (Field Oriented Control - FOC) theo thời gian thực và đã trở thành tiêu chuẩn điều khiển trong công nghiệp. Có rất nhiều công trình nghiên cứu về truyền động điện cho biến tần động cơ PMSM [5 - 10], tuy nhiên việc mô phỏng chi tiết hệ điều khiển FOC_SVPWM cho động cơ PMSM trong các nghiên cứu đó chưa được rõ ràng. Bài báo này, trình bày về mô phỏng chi tiết biến tần gián tiếp - động cơ PMSM sử dụng phương pháp điều khiển SVPWM bằng công cụ Matlab - Simulink.

2. Cơ sở lý thuyết hệ truyền động biến tần - động cơ PMSM

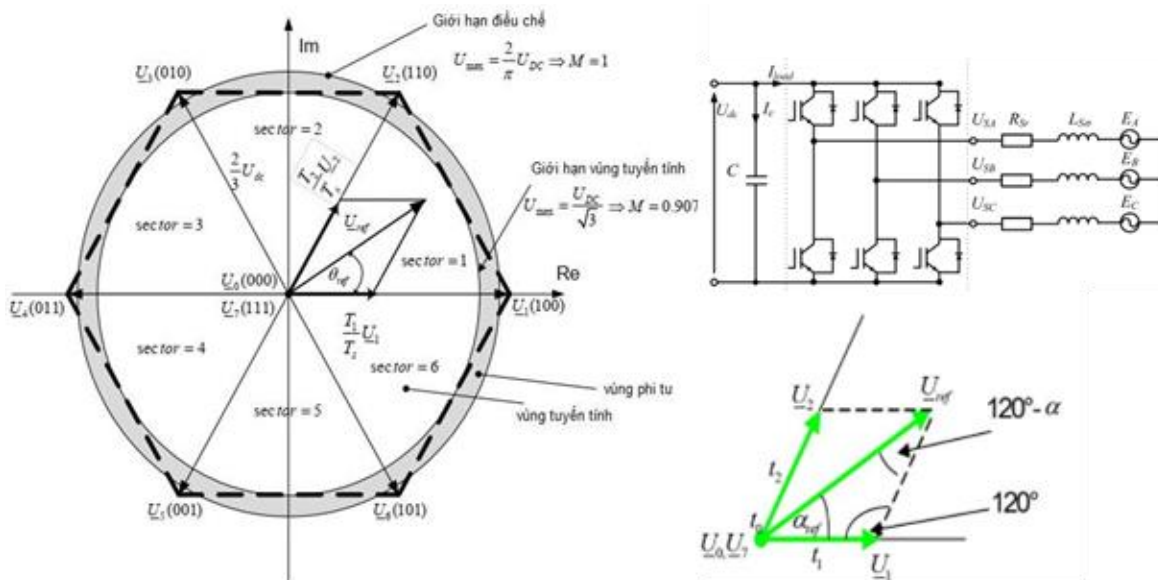
2.1. Cấu trúc hệ điều khiển tựa theo từ thông FOC động cơ đồng bộ ba pha PMSM

Trong điều khiển động cơ điện PMSM với phương pháp điều khiển vector tựa từ thông - FOC (Field Oriented Control) cho chất lượng điều khiển cao trong truyền động điện. Do đó, hệ truyền động điện này đã dần thay thế hệ truyền động điện một chiều hệ T-Đ trong những ứng dụng đòi hỏi chất lượng cho điều khiển tốc độ phải cao, phải trơn trong phạm vi rộng [2], [10]. Cấu trúc bộ điều khiển FOC được thể hiện trong Hình 1.

Với cấu trúc điều khiển vector tựa theo từ thông FOC như trong Hình 1, bao gồm: Một bộ PI cho điều khiển từ thông ψ và một bộ PI cho điều khiển mô-men



Hình 1. Cấu trúc điều khiển tự theo từ thông FOC cho động cơ PMSM



Hình 2. Phương pháp điều khiển SVPWM cung cấp cho động cơ PMSM

M_c và các bộ biến đổi vector dòng điện Clark thuận/nghịch, Park thuận/nghịch,...

Trong cấu trúc Hình 1, khối SVM điều khiển đóng cắt 6 van điện tử công suất IGBT của bộ biến tần dựa trên thuật toán điều chế độ vector không gian SVPWM, điều khiển các van công suất.

Điều khiển vector cho động cơ PMSM rất giống với việc điều khiển động cơ không đồng bộ IM chỉ khác ở một số điểm sau:

- Tần số trượt $s = 0$ vì PMSM chạy đồng bộ tốc độ
- Dòng điện Rotor là $i_d = 0$ vì từ thông rôto được cấu tạo bởi các nam châm vĩnh cửu;
- Từ trường trên Rotor trong động cơ PMSM là không đổi, chỉ thay đổi về hướng. Do đó góc từ thông Rotor là θ_r đo trực tiếp bằng cảm biến vị trí.

2.2. Các phép biến đổi cơ bản

Cấu trúc một hệ thống điều khiển tự theo từ thông FOC cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM như trong Hình 1, bao gồm các thành phần [2], [5]: Biến đổi Clark thuận/nghịch, Park thuận/nghịch, khâu ước lượng từ thông ψ , được mô tả trong các công thức (1)-(6):

Biến đổi Clark-thuận:

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

Biến đổi Clark-nghịch:

$$\begin{bmatrix} v_{ref1} \\ v_{ref2} \\ v_{ref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Biến đổi Park-thuận:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Biến đổi Park-nghịch:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ước lượng cho từ thông và mô-men:

$$\hat{M}_e = \frac{3p}{2} \psi_{PM} i_q^s \quad (5)$$

Trong đó: $\psi^s = \psi_m = \psi_{PM}$ từ trường nam châm.

Dòng điện trên stator: $i^s = i_q^s$ (6)

2.3. Bộ biến tần sử dụng phương pháp điều chế vector không gian SVPWM

Phương pháp điều chế vector không gian: Là phương pháp phổ biến ứng dụng trong việc đóng/ngắt các van điện tử như IGBT hoặc Mosfet. Trạng thái đóng ngắt của 6 van ($S_1 \sim S_6$) theo thuật toán SVPWM tạo thành từ tám vector điện áp cấp cho động cơ PMSM trong đó, $U_0 = 0$ và $U_7 = 0$.

Yếu tố quan trọng nhất trong điều chế độ rộng xung PWM là chỉ số điều chế được cho bởi:

$$k = \frac{|U_{ref}|}{\frac{2}{\pi} U_{DC}} \quad (7)$$

Chỉ số k được điều biến thay đổi trong khoảng 0-1 và được chia thành hai vùng: Vùng tuyến tính ($0 < k < 0,907$), vùng phi tuyến ($0,907 < k < 1$).

Các vector điện áp $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$ được sử dụng để điều chế và thay đổi vị trí vector điện áp chuẩn, các vector điện áp U_0, U_7 được sử dụng để thay đổi biên độ của vector điện áp chuẩn. Điện áp chuẩn U_{ref} xấp xỉ bằng thời gian duy trì các vector điện áp thành phần. Như thể hiện trong Hình 2, ta có tỷ số:

$$\frac{|U_{ref}|}{\sin 120^\circ} = \frac{|U_1|}{\sin(60^\circ - \alpha_{ref})} = \frac{|U_1|}{\sin \alpha_{ref}} \quad (8)$$

Từ đó ta có:

$$|U_1| = |U_{ref}| \frac{\sin(60^\circ - \alpha_{ref})}{\sin 120^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} |U_{ref}| \sin(60^\circ - \alpha_{ref}) \quad (9)$$

$$|U_2| = |U_{ref}| \frac{\sin \alpha_{ref}}{\sin 120^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} |U_{ref}| \sin \alpha_{ref} \quad (10)$$

Thời gian trung bình:

$$t_1 = \frac{|U_1|}{\frac{2}{3} U_{DC}} = \frac{\sqrt{3} |U_{ref}|}{U_{DC}} \sin(60^\circ - \alpha_{ref}) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} k \sin(60^\circ - \alpha_{ref}) \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{|U_2|}{\frac{2}{3} U_{DC}} = \frac{\sqrt{3} |U_{ref}|}{U_{DC}} \sin \alpha_{ref} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} k \sin \alpha_{ref} \quad (12)$$

Từ (11) và (12) ta có thể viết thành:

$$t_2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} k \sin \alpha_{ref} \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{3}{\pi} \cos \alpha_{ref} - \frac{1}{2} t_2 \quad (14)$$

Thời gian cho các vector điện áp U_0, U_7 :

$$t_{07} = t_0 + t_7 = 1 - (t_1 + t_2) \quad (15)$$

Với phương pháp SVPWM thời gian t_0 và t_7 được xác định:

$$t_0 = \frac{t_{07}}{2}, \quad t_7 = t_{07} - t_0 = \frac{t_{07}}{2} \quad (16)$$

$$d_a = t_1 + t_2 + \frac{t_7}{2}, \quad d_b = t_2 + \frac{t_7}{2}, \quad d_c = \frac{t_7}{2} \quad (17)$$

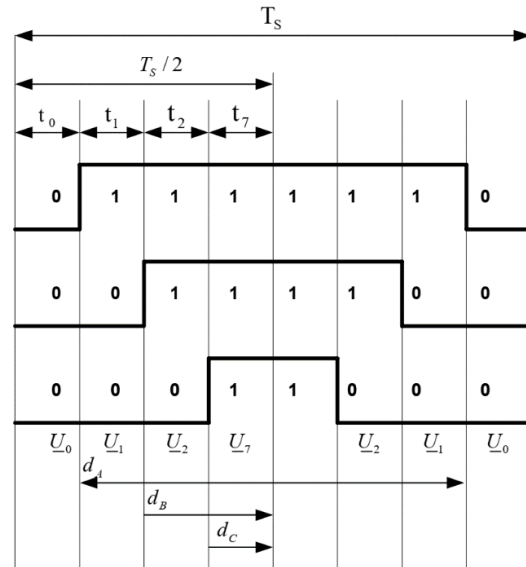
Việc điều chế vector điện áp tại các sector theo các vector điện áp thành phần (Bảng 1), cũng như thời gian đóng cắt của PWM trong cung 1/6 đầu tiên được chỉ ra trên Hình 3.

3. Mô phỏng biến tần - động cơ PMSM sử dụng phương pháp điều chế SVPWM

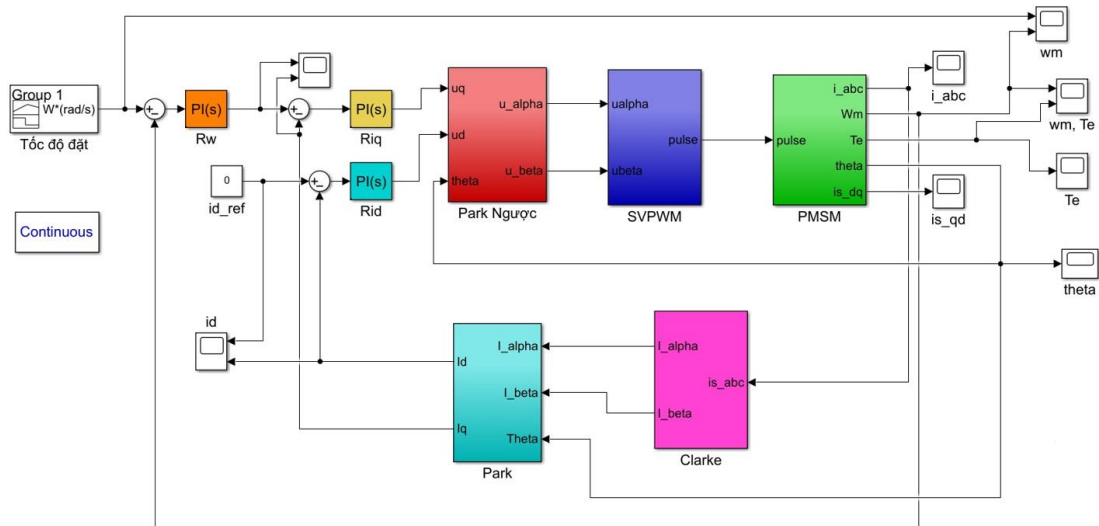
Thực hiện mô phỏng biến tần động cơ PMSM, ta khảo sát động cơ điện đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu có thông số như Bảng 2. Dựa trên cơ sở các phép biến đổi trong mục 2.2, và phương pháp điều chế không gian vector SVPWM, bằng công cụ Matlab - Simulink ta xây dựng sơ đồ mô phỏng cho hệ biến tần - động cơ đồng bộ PMSM bằng phương pháp SVPWM như thể hiện trong Hình 4 và Hình 5.

Bảng 1. Điều chế vector thành phần trong 6 Sector

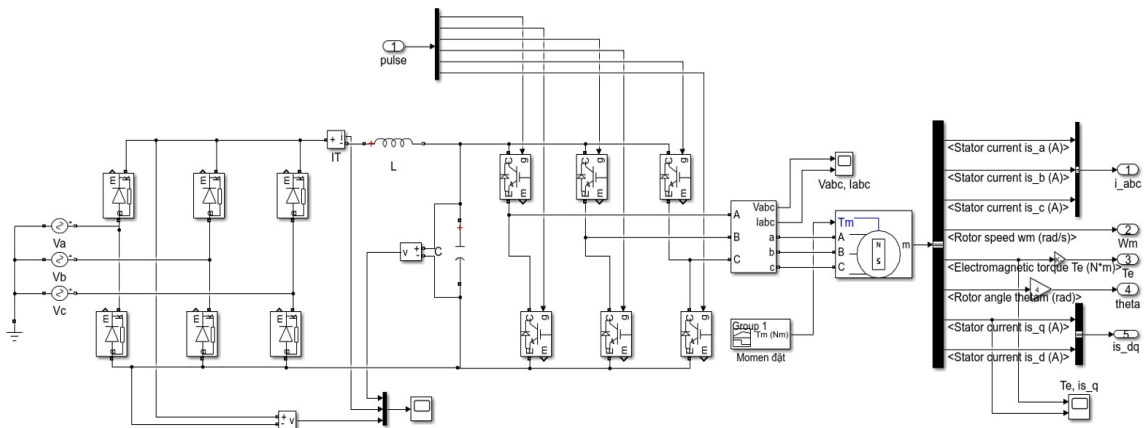
Các Sector	Các Module điện áp 3 pha
1	$U_0, U_1, U_2, U_7, U_2, U_1, U_0$
2	$U_0, U_3, U_2, U_7, U_2, U_3, U_0$
3	$U_0, U_3, U_4, U_7, U_4, U_3, U_0$
4	$U_0, U_5, U_4, U_7, U_4, U_5, U_0$
5	$U_0, U_5, U_6, U_7, U_6, U_5, U_0$
6	$U_0, U_1, U_6, U_7, U_6, U_1, U_0$



Hình 3. Thời gian đóng cắt của PWM trong cung 1/6 đầu tiên



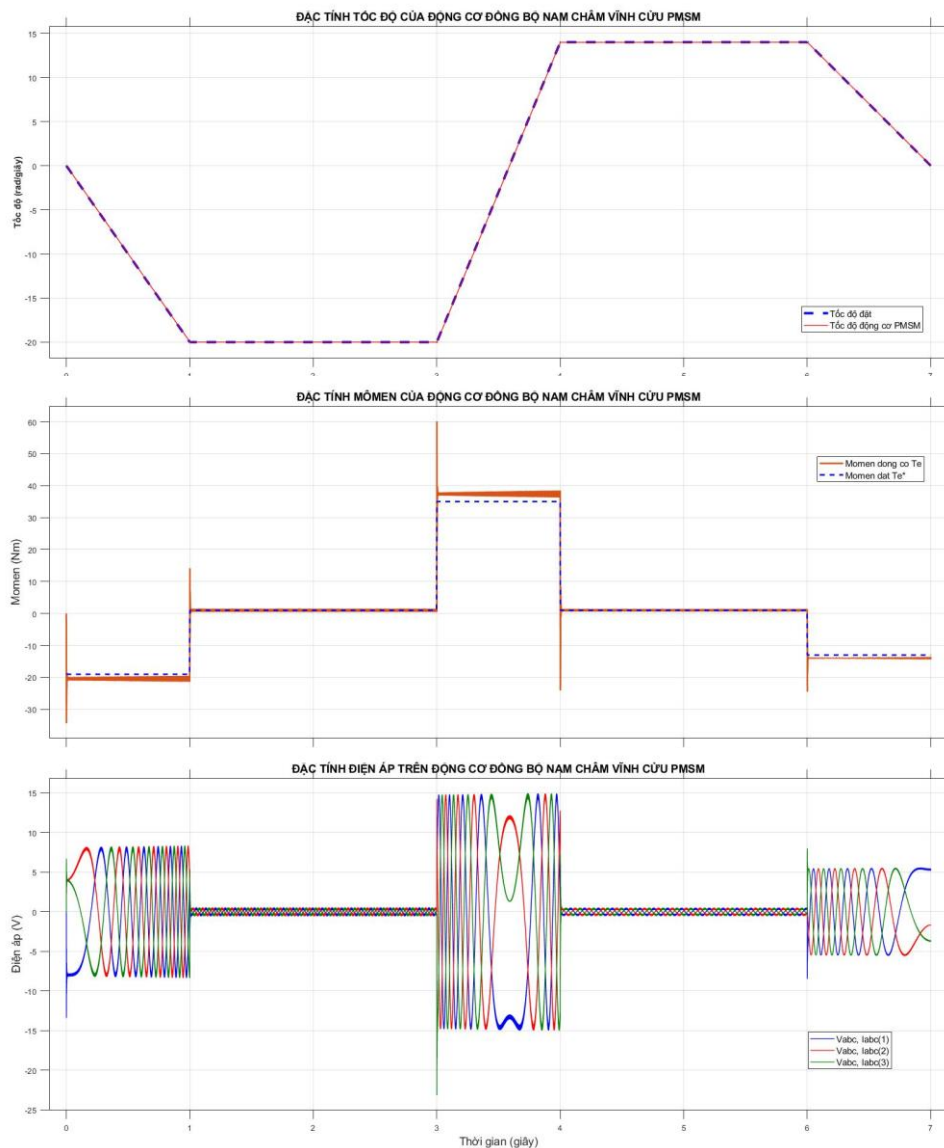
Hình 4. Bộ biến tần - động cơ PMSM sử dụng điều chế không gian vector SVPWM



Hình 5. Hệ thống chỉnh lưu và các van công suất nghịch lưu cho động cơ đồng bộ PMSM

Bảng 2. Bảng thông số động cơ PMSM

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Công suất	$P_{đm}$	KW	21
Tốc độ định mức	$n_{đm}$	v/p	3000
Tốc độ tối đa	n_{max}	v/p	5500
Dòng điện định mức	$I_{đm}$	A	44
Dòng điện cực đại	I_{max}	A	150
Mô-men quán tính	J	Kgm ²	0,0742
Điện cảm phản ứng	$L_{sd}=L_{sq}$	H	0,00395
Điện trở phản ứng	R_s	Ω	4,47
Số đôi cực	2p		2
Mô-men định mức	$M_{đm}$	Nm	65



Hình 6. Kết quả mô phỏng bộ biến tần - động cơ đồng bộ ba pha PMSM

thống lấy tín hiệu phản hồi tốc độ của động cơ đồng bộ PMSM. Khi đó, ta có thể cho động cơ đồng bộ PMSM bám theo tốc độ đặt trước như Hình 4, 5. Khi dòng điện các pha đo được từ động cơ PMSM và các tín hiệu tốc độ, từ thông, mô-men, được phản hồi về các khối Clark và Park [2], để đo được dòng điện i_d và i_q . Các tín hiệu dòng điện i_d và i_q này để so sánh với các giá trị đặt trước khi đưa vào bộ điều khiển PI dòng điện. Tín hiệu từ PI dòng điện được tính toán bằng bộ Park ngược sẽ được đưa đến bộ điều chế SVPWM để điều khiển các van công suất. Sơ đồ mô phỏng các khối trên bằng Simulink được thể hiện trong Hình 4 và Hình 5.

4. Kết quả và thảo luận

Dữ liệu của động cơ PMSM (Bảng 2) được thay vào khối động cơ PMSM, mô-men cần đặt cho động cơ tại các thời điểm như thể hiện trong Hình 6. Sơ đồ mô phỏng Hình 4, Hình 5 được chạy trong môi trường Simulink khi tại thời điểm là 1s với các giá trị tốc độ đặt lúc đầu là -20rad/s, tại thời điểm 2s cho động cơ tăng tốc độ lên 14,8rad/s và ổn định ở tốc độ đó trong 2s, rồi giảm xuống 0rad/s có kết quả mô phỏng trong Hình 6.

Nhận xét: Kết quả mô phỏng trong Hình 6 (với điện áp pha là 220V) cho thấy, Cả mô-men và vận tốc của động cơ PMSM bám chính xác theo giá trị đặt trước của mô-men và tốc độ. Với tốc độ đặt là -20rad/s, 14,8rad/s, lần lượt tại các thời điểm 1 - 3 (s) và từ 4 - 6 (s), trong khi tốc độ động cơ PMSM ổn định thì sai lệch của tốc độ là $\delta\% = 0$, tốc độ không bị dao động, độ quá điều chỉnh của tốc độ $\sigma\% = 0$, tốc độ của động cơ PMSM ổn định ở tốc độ yêu cầu. Trong vùng ω là hằng số các thành phần dòng I_q và I_d rất nhỏ.

Các đặc tính mô-men, điện áp, dòng điện trên động cơ phản ánh rõ ràng và chính xác trong quá trình quá độ khi thay đổi tốc độ của động cơ PMSM, tại các thời điểm tăng tốc và giảm tốc. Cụ thể khi gia tốc càng lớn thì dòng điện càng lớn.

Kết quả mô phỏng cùng tín hiệu đặt của tốc độ và mô-men cần như trên Hình 6, nhưng điện áp pha giảm 50% thì ta nhận được kết quả điều khiển bám chính xác của cả mô-men và tốc độ. Độ giảm điện áp pha cho phép (để có kết quả điều khiển bám chính xác) phụ thuộc vào độ lớn và gia tốc của các tín hiệu mô-men và tốc độ đặt.

5. Kết luận

Hệ biến tần - động cơ đồng bộ PMSM áp dụng phương pháp SVPWM được mô phỏng hoàn chỉnh. Trong kết quả mô phỏng hệ biến tần - động cơ PMSM cho thấy ưu điểm của phương pháp FOC_SVPWM đã

được trình bày rõ ràng trong các đồ thị đặc tính (Hình 6). Trong các đặc tính cho phép đánh giá hệ biến tần - động cơ PMSM bằng phương pháp FOC_SVPWM, là phương pháp điều khiển cho biến tần hiện đại và chính xác cho đối tượng là động cơ PMSM được sử dụng nhiều trong công nghiệp. Vấn đề nghiên cứu hệ biến tần - động cơ PMSM bằng phương pháp điều chế vector không gian SVPWM là hướng nghiên cứu quan trọng trong các hệ truyền động điện trong công nghiệp như: Cán thép, dệt sợi, bao bì, giấy,... với mục tiêu nâng cao tính hiệu quả trong hệ truyền động điện và tiết kiệm điện năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Phương Hà, Huỳnh Thái Hoàng (2005), *Lý thuyết điều khiển tự động*, NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
- [2] Abdel-Karim Daud, Basim Alsayid, Arafat Zaidan (2012), *DSP Based Simulator for Field Oriented Control of the Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*, International journal of circuits, systems and signal processing.
- [3] Abdel-Karim Daud (2010), *DSP Based Speed Control of the Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor with Hysteresis current controller*, Recent Researches in System Science.
- [3] Cheok Yong Seng, Zulkiflie Ibrahim (2012), *Vector control drive of permanent Magnet Synchronous Motor based dSPACE DS1103 implementation*, Conference: Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International.
- [4] Carlos Ortega (2008), *Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Machines using Matrix Converters*, Thesis submitted to the Universitat Politècnica de Catalunya.
- [5] Tingting Liu, Guojin Chen, Shigang Li (2014), *Application of Vector Control Technology for PMSM Used in Electric Vehicles*, The Open Automation and Control Systems Journal - Volume 6.
- [6] Yuanyuan Liu, Zhiguo Zhang (2015), *PMSM Control System Research Based on Vector Control*, International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy (ICISMME).

- [7] C.R.Harahap, R.Saito, H.Yamada, T.Hanamoto (2014), *Speed control of permanent magnet synchronous motor using fpga for high frequency sic Mosfet inverter*, Journal of Engineering Science and Technology - Special Issue on Applied Engineering and Sciences, Taylor's University.
- [8] Suroor M. Dawood, Samar H. Majeed, Habeeb J. Nekad (2015), *PID Controller Based Multiple (Master/Slaves) Permanent Magnet Synchronous Motors Speed Control*, Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering.
- [9] Viktor Petro, Karol Kyslan (2022), *Sensorless Control of PMSM in Low Speed Region Using HF Pulse Signal Injection Method*, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol.22, No.1.
- [10] Jingyao Peng and Ming Yao (2023), *Overview of Predictive Control Technology for Permanent Magnet Synchronous*, Motor Systems, Motor Systems - Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

Ngày nhận bài:	19/10/2023
Ngày nhận bản sửa:	31/10/2023
Ngày duyệt đăng:	04/11/2023