

ĐIỀU KHIỂN TỰA TỪ THÔNG ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU NUÔI BỞI NGHỊCH LƯU 3 BẬC NPC

FIELD ORIENTED CONTROL FOR THE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR USING NPC 3-LEVEL INVERTER

LÊ TRUNG HIẾU^{1,a}, BÙI THANH HIẾU^{2,b}, NGUYỄN VĂN NHỎ^{3,c}

^{1,2} Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

³ Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM

Email: ^aletrunghieu090997@gmail.com, ^bhieubt@vlute.edu.vn, ^cnvnho@hcmut.edu.vn

Nhận bài (received): 07/3/2022; Phản biện (revised): 30/3/2022; Chấp nhận (accepted): 12/4/2022

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kỹ thuật điều khiển tựa từ thông (FOC) cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) sử dụng nguồn nuôi là bộ nghịch lưu ba bậc: (1) Ứng dụng kỹ thuật điều khiển tựa từ thông vào điều khiển động cơ PMSM mang lại chất lượng điều khiển tốt, đáp ứng nhanh; (2) Sử dụng nghịch lưu ba bậc diode kẹp làm nguồn nuôi mang lại ưu điểm đáng kể như hiệu suất cao hơn, sử dụng điện áp cao hơn, và tần số đóng cắt ở mức tối thiểu. Mô hình toán động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, kỹ thuật điều khiển tựa từ thông, bộ nghịch lưu ba bậc được trình bày cụ thể trên bài báo. Mô phỏng và khảo sát kết quả bằng phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Điều khiển tựa từ thông (FOC); Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM); Điều chế độ rộng xung vector không gian (SVPWM).

ABSTRACT

This paper presents the field oriented control (FOC) technique for the permanent magnet synchronous motor (PMSM) using NPC 3-level inverter: (1) Application of the technique of field oriented control into PMSM motor control delivers good control quality, quick response; (2) Using NPC 3-level diode-clamped inverter as a source of culture offers significant advantages such as higher performance, higher voltage usage, and minimal switching frequency. Permanent magnet synchronous motor math model, field oriented control technique, NPC 3-level inverter are specifically presented in the article. Simulation and survey results are performed using Matlab/Simulink software.

Keywords: Field Oriented Control (FOC), Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM).

1. GIỚI THIỆU

Truyền động điện đóng vai trò quan trọng trong mọi ngành công nghiệp. Trong

mỗi lĩnh vực công nghiệp có những yêu cầu và điều kiện hoạt động khác nhau [1]. Người thiết kế hệ thống truyền động phải

lựa chọn loại động cơ và chiến lược điều khiển một cách thích hợp sao cho thỏa mãn tất cả các yêu cầu, đồng thời phải giữ chi phí thấp nhất [1][2]. Một trong số các động cơ được các kỹ sư ưu tiên sử dụng hiện nay là động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Với mục đích khắc phục nhiều nhược điểm của động cơ DC thông thường do bản chất tự nhiên của loại động cơ này tạo ra [3][4][5]. Cụ thể như không có gợn sóng mô-men xoắn, hiệu suất hoạt động cao, hiệu quả hơn, tạo ra tiếng ồn thấp, tạo mô-men lớn, quán tính thấp, đáp ứng điều khiển nhanh hơn. Động cơ sử dụng kỹ thuật điều khiển tựa từ thông (FOC), thông thường FOC được dùng để điều khiển tốc độ động cơ xoay chiều đồng bộ và không đồng bộ hiệu suất cao, yêu cầu hoạt động trơn tru với tốc độ tối đa, tạo ra mô-men quay cực đại và có hiệu suất động năng cao, tăng và giảm tốc nhanh [6]. Bộ nghịch lưu ba bậc NPC được sử dụng làm nguồn nuôi cho động cơ PMSM mang lại ưu điểm đáng kể như hiệu suất cao hơn, sử dụng điện áp cao hơn, và tần số đóng cắt ở mức tối thiểu. Biến tần ba bậc NPC được điều chế bằng giải thuật vector không gian (SVPWM) với cấu trúc này mang lại các ưu điểm là sóng hài thấp và công suất cao.

Trong bài báo này, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu được điều khiển bằng kỹ thuật điều khiển tựa từ thông, sử dụng bộ nghịch lưu ba bậc NPC mô phỏng và khảo sát kết quả dựa trên phần mềm Matlab/Simulink.

Bài báo được tổ chức gồm 3 phần: Phần 1 là giới thiệu; Phần 2 là nội dung chính gồm có mô hình toán động cơ PMSM, bộ nghịch lưu ba bậc NPC, mô hình hóa mô phỏng kỹ thuật FOC động cơ PMSM và kết quả mô phỏng; Phần 3 là kết luận.

2. NỘI DUNG

2.1. Mô hình toán của PMSM

Phương trình điện cơ của động cơ PMSM trong hệ qui chiếu dq rotor [3] như sau:

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q I_q \omega_e \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \lambda_{af} - L_d I_d \omega_e \quad (2)$$

Bằng cách sắp xếp lại các toán hạng trong (1), (2) và rút gọn chúng, có thể thu được các phương trình cho dòng điện trên hệ trục dq như sau:

$$i_d = \frac{1}{L_d} \int (V_d + L_q I_q \omega_e - R_s i_d) dt \quad (3)$$

$$i_q = \frac{1}{L_q} \int (V_q - L_q I_d \omega_e - R_s i_q - \omega_e \lambda_{af} - R_s i_q) dt \quad (4)$$

Phương trình đặc tính cơ được viết như sau [7]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left\{ \lambda_{af} I_q + (L_d - L_q) (I_d I_q) \right\} \quad (5)$$

$$\omega_e = \frac{p}{2J} \int \left(T_e - T_L - \frac{2B\omega_e}{p} \right) dt \quad (6)$$

Trong đó:

I_d : Dòng điện toạ độ d (A)

I_q : Dòng điện toạ độ q (A)

R_s : Điện trở stator (Ω)

L_d : Điện kháng toạ độ d (H)

L_q : Điện kháng toạ độ q (H)

J: Mô-men quán tính Kg m^2

B: Hệ số ma sát (Nm/rad/sec)

P: Số cực

λ_{af} : Hằng số từ thông rotor (V/rad/sec)

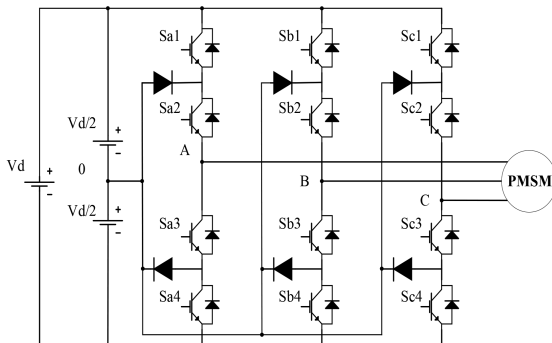
ω_e : Tốc độ góc rotor

TL: Mô-men tải (Nm^2)

Te: Mô-men điện (Nm)

2.2. Bộ nghịch lưu ba bậc NPC

Cấu trúc bộ nghịch lưu

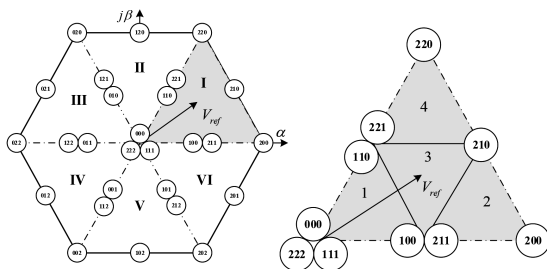


Hình 1. Bộ nghịch lưu ba pha ba bậc diode kẹp (NPC)

Bộ nghịch lưu áp đa bậc diode kẹp cải tiến dạng sóng điện áp tải và tăng tuổi thọ trên linh kiện. Với bộ nghịch lưu ba bậc, tần số đóng cắt giảm đi một nửa. Tuy nhiên với số nguồn mắc nối tiếp lớn hơn 3, mức độ chịu gai điện áp trên các diode sẽ khác nhau. Ngoài ra, cân bằng điện áp giữa các nguồn DC (áp trên tụ) trở nên khó khăn, đặc biệt khi số bậc lớn.

Giải thuật điều chế

Trên cơ sở nền tảng điều chế vector không gian (SVPWM) cho biến tần ba pha hai bậc, các kỹ sư, nhà khoa học đã phát triển thêm một loạt các biến tần với cấu trúc và giải thuật điều chế SVPWM đa bậc (số bậc > 2) có sóng hài thấp và công suất lớn.

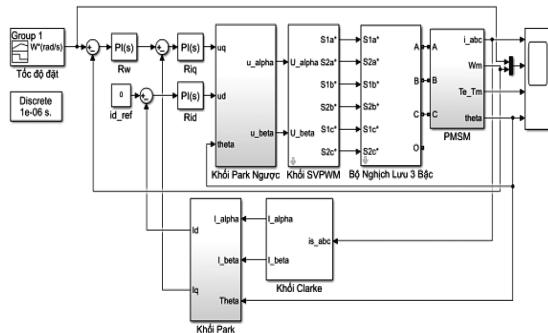


Hình 2. Sơ đồ vector không gian trên bộ nghịch lưu NPC 3 bậc

Bộ nghịch lưu tạo ra điện áp ba bậc đầu ra mỗi pha, do đó điện áp dây năm bậc. Tất cả 27 trạng thái chuyển mạch và 19 vector điện áp và điện áp đầu ra được tạo ra được thể hiện trong hình 2.

2.3. Mô hình hoá mô phỏng kỹ thuật FOC động cơ PMSM

Mô hình mô phỏng kỹ thuật điều khiển FOC điều chỉnh tốc độ động cơ PMSM xây dựng trên phần mềm Matlab/Simulink 2021 được thể hiện như hình 3:



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng FOC động cơ PMSM

Chức năng các khối được mô tả như sau: Khối Tốc độ đặt có chức năng đặt tốc độ cho hệ điều khiển, thường sử dụng đơn vị rad/s. Khối PI là khối tích phân tỉ lệ. Khối Clarke chuyển dòng điện từ tọa độ abc sang tọa độ $\alpha\beta$. Khối Park chuyển dòng điện từ hệ trục tọa độ $\alpha\beta$ và theta sang tọa độ dq. Khối Park ngược chuyển điện áp điều khiển từ hệ trục dq và Theta sang tọa độ $\alpha\beta$. Khối SVPWM thực hiện kỹ thuật điều chế vector không gian tạo xung kích cho bộ nghịch lưu. Khối nghịch lưu 3 bậc là khối công suất với cấu hình nghịch lưu NPC 3 bậc. Khối PMSM là động cơ PMSM. Khối Scope dùng để hiển thị các tín hiệu đo được so với các tín hiệu tham chiếu.

Bảng 1. Bảng tham số mô phỏng

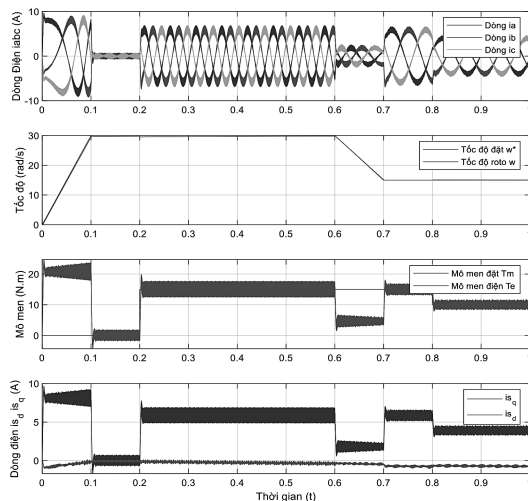
Tham số	Giá trị
Điện cảm phản ứng (L)	0.00395 (H)
Điện trở Stato (Rs)	4.47 (Ω)
Mô-men quán tính (J)	0.07 (kg.m^2)
Số cực (p)	8
Mô-men không đổi	2.56 ($\text{N.m/A}_{\text{peak}}$)
Điện áp nguồn DC (Vd)	300 (V)
Tần số chuyển mạch (f)	5000 (Hz)

2.4. Kết quả mô phỏng

Thực hiện mô phỏng điều khiển động cơ PMSM bằng kỹ thuật điều khiển FOC trên phần mềm Matlab/Simulink trong một giây với các tham số được liệt kê trong bảng 3:

Trường hợp không đảo chiều động cơ

Với tốc độ đặt thay đổi trong khoảng (0-30) rad/s, mô-men đặt trong khoảng (0-15) N.m:



Hình 4. Kết quả mô phỏng FOC động cơ PMSM không đảo chiều

Trong thời gian quá độ từ (0 - 0.1) giây: Tốc độ động cơ tăng từ 0 lên 29.53 (rad/s), độ vọt lố 0%. Mô-men điện T_e cao hơn mô-men đặt T_m cụ thể là thay đổi từ 0 lên 20.76 (N.m) gia tốc cho động cơ, độ vọt lố là 18.45%. Biên độ đỉnh-đỉnh của dòng điện là 14.56 (A).

Trong thời gian (0.1 - 0.2) giây: Tốc độ động cơ xác lập 29.73 (rad/s). Mô-men T_e bám theo mô-men đặt về 0 (N.m), độ vọt lố 11.13%. biên độ đỉnh – đỉnh của dòng điện 0.65 (A).

Trong thời gian (0.2 - 0.6) giây: Mô-men đặt thay đổi từ 0-15 (N.m), T_e 14.23 (N.m) độ vọt lố là 34.09%. Tốc độ động cơ

giảm từ 29.74 – 29.55 (rad/s) và ổn định ở tốc độ 29.75 (rad/s) sau 0.02 giây. Dòng điện ổn định với biên độ 4.87 (A), tần số là 19 (Hz).

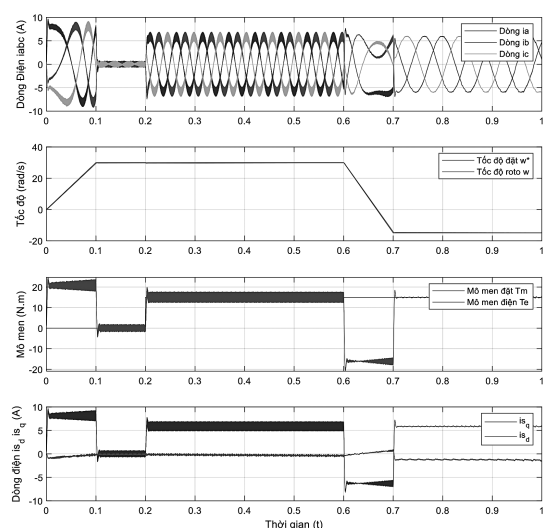
Trong thời gian (0.6 - 0.7) giây: Mô-men đặt T_m không đổi, mô-men T_e giảm từ 14.23-4.66 (N.m), độ vọt lố dưới là 39.66%. Tốc độ đặt w^* giảm 30-15 (rad/s), tốc độ động cơ bám theo tốc độ đặt. Biên độ dòng điện là 1.34 (A) với tần số giảm dần.

Trong thời gian (0.7 - 0.8) giây: Mô-men T_m không đổi, T_e tăng 4.66-15.02 (N.m), độ vọt lố 30.59%. Tốc độ đặt là 15 (rad/s), tốc độ động cơ 15.02 (rad/s). Dòng điện có biên độ 5.3 (A), tần số 10 (Hz).

Trong thời gian (0.8 - 1) giây: Mô-men đặt giảm 15-10 (N.m), mô-men động cơ giảm 15.02-10.06 (N.m), độ vọt lố dưới là 34.37% trong khoảng thời gian (0.8-0.81). Tốc độ động cơ ổn định ở mức 15.02 (rad/s). Biên độ dòng điện là 3.46 (A), tần số 10 (Hz).

Trường hợp đảo chiều động cơ

Với tốc độ đặt thay đổi trong khoảng (-30 đến 30) rad/s, mô-men đặt trong khoảng (0-15) N.m:



Hình 5. Kết quả mô phỏng FOC động cơ PMSM có đảo chiều

Trong thời gian quá độ từ (0-0.1) giây: Tốc độ động cơ tăng từ 0 lên 29.53 (rad/s), độ vọt lố 0%. Mô-men điện Te cao hơn mô-men đặt Tm cụ thể là thay đổi từ 0 lên 20.76 (N.m) gia tốc cho động cơ, độ vọt lố là 18.45%. Biên độ đỉnh-đỉnh của dòng điện là 14.56 (A).

Trong thời gian (0.1 - 0.2) giây: Tốc độ động cơ xác lập 29.73 (rad/s). Mô-men Te bám theo mô-men đặt về 0 (N.m), độ vọt lố 11.13%. biên độ đỉnh – đỉnh của dòng điện 0.65 (A).

Trong thời gian (0.2 - 0.6) giây: Mô-men đặt thay đổi từ 0-15 (N.m), Te 15.23 (N.m) độ vọt lố là 34.09%. Tốc độ động cơ giảm từ 29.74 – 29.55 (rad/s) và ổn định ở tốc độ 29.75 (rad/s) sau 0.02 giây. Dòng điện ổn định với biên độ 4.87 (A), tần số là 19 (Hz).

Trong thời gian (0.6 - 0.7) giây: Mô-men đặt Tm không đổi, mô-men Te giảm từ 15.23-(-16.1) (N.m) trong khoảng 0.01s, độ vọt lố dưới là 15.432%. Tốc độ đặt w^* giảm 30-(-15) (rad/s), tốc độ động cơ bám theo tốc độ đặt -14.71 (rad/s), vọt lố 0%. Dòng điện thay đổi thứ tự pha.

Trong thời gian (0.7 - 1) giây: Mô-men đặt không đổi 15 (N.m), mô-men động cơ tăng (-16.1 – 15.01) (N.m), độ vọt lố là 11.58% trong khoảng thời gian 0.01s. Tốc độ động cơ ổn định ở mức -14.81 (rad/s). Biên độ dòng điện là 5.95 (A), tần số 10 (Hz).

Kết quả được mô tả ở trên được lấy

từ khối scope trong phần mềm mô phỏng Matlab/Simulink. Trong cả hai trường hợp có đảo chiều và không có đảo chiều động cơ, tốc độ động cơ luôn bám sát tốc độ đặt, khi mô-men và tốc độ biến thiên thì dòng điện và điện áp cũng biến thiên đáp ứng yêu cầu điều khiển.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày cụ thể kỹ thuật điều khiển tựa từ thông cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Nguồn nuôi là nghịch lưu 3 bậc nên tần số đóng cắt được giảm đáng kể, dẫn đến tổn hao nhiệt trên linh kiện giảm, giúp tuổi thọ linh kiện tăng. Giải thuật điều chế SVPWM cho biến tần 3 bậc có thể giảm song hài, nâng cao công suất.

Sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để mô phỏng với các điều kiện thay đổi tốc độ khác nhau bao gồm thay đổi tốc độ và đảo chiều động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy tốc độ động cơ đáp ứng tốc theo tốc độ đặt, dòng điện có biên dạng sin, đáp ứng biên độ và tần số tốt theo tốc độ, độ vọt lố thấp.

Nghiên cứu cho thấy với kỹ thuật điều khiển FOC đặc tính đáp ứng tốt độ nhanh, bám sát giá trị đặt trước, dòng điện có độ vọt lố thấp. Tuy nhiên đề tài cũng có một số hạn chế như cân bằng điện áp DC (điện áp tụ) trên cấu hình nghịch lưu NPC 3 bậc, giải thuật điều chế vectơ không gian phức tạp. Kết quả trên bài báo này có thể làm tiền đề cho các thực nghiệm điều khiển động cơ PMSM về sau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Nhò, (2003), “*Cơ Sở Truyền Động Điện*”, NXB Đại học quốc gia.
- [2]. Remitha K Madhu and Anna Mathew, (2013), “*Matlab/Simulink Model Of Field Oriented Control Of PMSM Drive Using Space Vector*”, International Journal of Advances in Engineering & Technology.

- [3]. Yuanyuan Liu, 1Zhiguo Zhang, (2015), “*PMSM Control System Research Based on Vector Control*”, International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy.
- [4]. Pragasen P, Ramu Krishnan, (2007), “*Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives*”, IEEE Transactions on Industry applications.
- [5]. Yang Ping, Ma Rui-Qing, Zhang Yun-An, (2005), “*PMSM control system simulation method based on MATLAB*”, Journal of shenyang university of technology.
- [6]. Lewin, C. (2006). “New Developments in commutation and Motor Control Techniques”. DesignNews. com, April.
- [7]. Y. Liu, Z. Q. Zhu, and D. Howe, (2005), “Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple”, *IEEE Transactions on Industry Applications* 41(2):599–608. doi: 10.1109/TIA.2005.844853.

Thông tin phản biện: TS. Nguyễn Xuân Vinh; TS. Phạm Thanh Tùng