

XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN VEC TƠ CHO ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU 6 PHA TRÊN PHẦN MỀM MATLAB/SIMULINK

ThS. Vũ Hữu Quảng, ThS. Trần Thanh Tuyền – Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Tóm tắt: So với động cơ 3 pha, hệ thống điều khiển tốc độ động cơ nhiều pha có nhiều ưu điểm khiến chúng có triển vọng tốt trong các lĩnh vực, chẳng hạn như hệ thống điều khiển thiết bị điện của xe điện. Trong các hệ thống điều khiển này, động cơ cần có dải tốc độ rộng hơn. Bài báo này giới thiệu và phân tích kết quả của mô hình mô phỏng điều khiển vec tơ dựa trên phép biến đổi tọa độ VSD và phương pháp biến đổi tọa độ d-q kép, giới thiệu nguyên lý cơ bản của điều khiển vectơ động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) 6 pha trong hệ tọa độ tĩnh và mô hình hệ động cơ trên phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu 6 pha, động cơ nhiều pha, hệ thống điều khiển tốc độ động cơ, mô hình mô phỏng.

1 Đặt vấn đề

Động cơ PMSM được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền động điều khiển tốc độ vì hiệu suất lớn, hệ số công suất cao và dải tốc độ làm việc rộng [1]. Với sự gia tăng tốc độ của PMSM, sức điện động phản ứng (EMF) của cuộn dây stato động cơ chắc chắn sẽ tăng lên. Khi EMF phía sau đạt đến điện áp định mức của động cơ hoặc điện áp phía DC của bộ biến đổi, dòng điện đầu vào của động cơ sẽ không thể khống chế được dòng điện đầu ra đã cho của bộ điều khiển và bộ điều chỉnh dòng điện sẽ ở trạng thái bão hòa. Tại thời điểm này, cần sử dụng điều khiển từ trường yếu để giảm EMF của PMSM nhằm tăng khả năng tạo mô men xoắn của động cơ ở tốc độ cao [2].

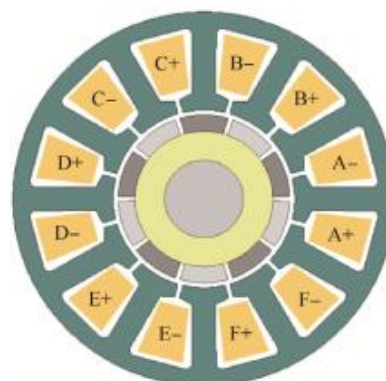
Nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước đã thực hiện nghiên cứu về các phương pháp điều khiển động cơ. Khái niệm mô hình hóa động cơ nhiều pha lần đầu được giới thiệu trong giai đoạn phát triển ban đầu của truyền động xoay chiều với nguồn bộ biến đổi điều chỉnh điện áp và dòng điện [3]. Kể từ đó, nhiều công trình nghiên cứu ứng dụng khác nhau đã được thực hiện trong các lĩnh vực như động lực tàu thủy, máy bay, tàu điện và xe điện [3-4]. Zhao và Lipo [5] đã trình diễn một kỹ thuật mô hình hóa động cơ cảm ứng 6 pha trong ba không gian con trực giao hai chiều (2D) và gọi là phân tách không gian vectơ (VSD).

Trong nội dung bài báo, nhóm tác giả dựa trên lý thuyết để xây dựng mô hình động cơ PMSM 6 pha trên phần mềm Matlab/Simulink.

2 Cơ sở lý thuyết

2.1 Cấu trúc của động cơ PMSM 6 pha

Động cơ PMSM 6 pha có hai cuộn dây stato giả định giống hệt nhau, cân bằng, nối hình sao (hình 1) [6-7].



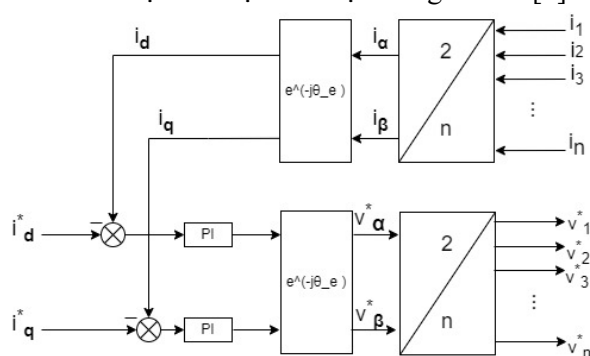
Hình 1: Cấu trúc của stato và roto động cơ PMSM 6 pha 5 đôi cực

Thông thường, các bộ cuộn dây này có thể có sự lệch pha 0, 30 và 60 độ. Lệch pha 0 độ tương tự như hệ thống 3 pha. Lệch pha 60 độ tạo thành sự sắp xếp đối xứng và có thể rút gọn thành hệ 3 pha vì hai pha của các ngôi sao khác nhau luôn thẳng hàng. Lệch pha 30 độ tạo thành sự sắp xếp không đối xứng, không thể đơn giản hóa hơn nữa. Bố trí lệch pha 30 độ là thuận lợi nhất đối với méo hài điện áp và xung mô men xoắn. Do

đó, sự dịch chuyển pha 30 độ giữa các kết nối sao là sự sắp xếp thích hợp hơn cả trong bài báo này.

2.2 Điều khiển véc tơ động cơ nhiều pha

Đối với động cơ n pha, phương pháp điều khiển véc tơ tương tự như động cơ 3 pha cũng có thể được sử dụng. Khi động cơ n pha áp dụng phương pháp lập mô hình VSD, chỉ dòng điện trong không gian con α - β (hoặc d - q sau khi biến đổi xoay) liên quan đến chuyển đổi năng lượng cơ điện được điều khiển theo vòng kín và cách triển khai cụ thể được thể hiện trong hình 2 [8].

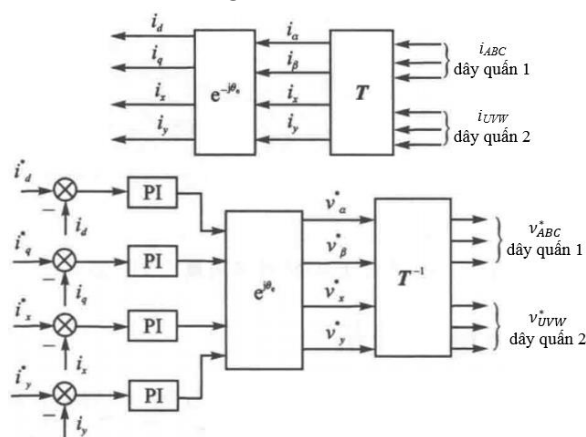


Hình 2: Khung điều khiển vector truyền thống cho động cơ n pha

Phương pháp thực hiện này giống như điều khiển véc tơ của động cơ 3 pha và kết hợp với hai bộ điều chỉnh dòng điện, thuận tiện cho việc cài đặt các thông số của bộ điều khiển ở giai đoạn sau [9]. Tuy nhiên, đối với động cơ n pha, do sự khác biệt không thể tránh khỏi giữa các cuộn dây của mỗi pha hoặc khi nguồn điện một chiều độc lập được sử dụng để cung cấp điện cho các cuộn dây khác nhau, việc sử dụng điều khiển véc tơ như trong hình 2 sẽ dẫn đến mất cân bằng dòng điện cuộn dây stato. Khi đó, sử dụng thuật toán PWM không phù hợp, bộ biến đổi sẽ tạo ra một số lượng lớn các thành phần hài điện áp bậc thấp. Lấy động cơ 6 pha làm ví dụ, so với động cơ 3 pha truyền thống, động cơ 6 pha có nhiều khả năng tạo ra một số lượng lớn các thành phần sóng hài dưới dòng điện và các thành phần sóng hài này chỉ phụ thuộc vào điện cảm tản của động cơ. Trên thực tế, điện cảm tản của động cơ 6 pha thường tương đối nhỏ. Tuy nhiên, ngay cả một

điện áp sóng hài nhỏ cũng có thể tạo ra một lượng lớn dòng điện hài, do đó làm tăng tổn thất của động cơ. Đặc biệt, đối với PMSM 6 pha, nó tạo ra một lượng lớn $6k \pm 1$ ($k = 1, 3, 5, \dots$) các thành phần sóng hài dòng điện phụ. Một nguyên nhân quan trọng khác là thân động cơ PMSM bị ảnh hưởng bởi một số yếu tố không lý tưởng, chẳng hạn như từ trường không hình sin sự phân bố được tạo ra bởi chính nam châm vĩnh cửu, cũng như hiệu ứng ăn mòn và hiệu ứng bão hòa cực từ v.v... Những yếu tố không lý tưởng này sẽ tạo ra một số lượng lớn các thành phần sóng hài dòng điện [10].

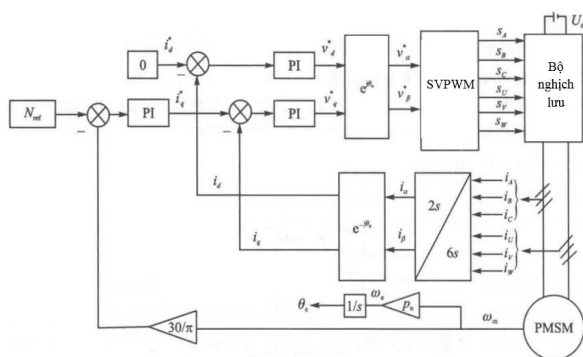
Để loại bỏ hiện tượng mất cân bằng dòng điện stato của động cơ, tác giả lấy động cơ 6 pha cách ly điểm trung tính nghiên cứu và tiến hành phân tích chi tiết, chủ yếu bao gồm hai phương pháp: Công nghệ điều khiển véc tơ dựa trên tọa độ d - q kép chuyển đổi [11]; và công nghệ điều khiển véc tơ chuyển đổi tọa độ VSD [10]. Đối với công nghệ điều khiển véc tơ dựa trên phép biến đổi tọa độ d - q kép, nguyên tắc cơ bản là coi từng bộ cuộn dây 3 pha là một đơn vị cơ bản, sau đó sử dụng thuật toán điều khiển véc tơ tương tự như động cơ 3 pha cho từng bộ cuộn dây, do đó thiết lập một hệ điều khiển véc tơ sử dụng 4 bộ điều chỉnh dòng điện, sơ đồ khối triển khai cụ thể được thể hiện trong hình 3.



Hình 3: Sơ đồ khối điều khiển véc tơ VSD cho động cơ 6 pha

2.3 Điều khiển động cơ PMSM 6 pha

Giống như điều khiển vector PMSM 3 pha, công nghệ điều khiển vector PMSM 6 pha cũng có thể áp dụng thuật toán điều khiển tương tự và sơ đồ khối điều khiển của nó được thể hiện trong hình 4. Dưới phép biến đổi tọa độ VSD, chỉ có không gian con d-q tham gia chuyển đổi năng lượng và không gian con x-y không tham gia chuyển đổi năng lượng cơ điện. Ngoài ra, nó cũng có thể được nhìn thấy từ sơ đồ khối thực hiện điều khiển véc tơ VSD của động cơ 6 pha được thể hiện trong hình 3, miễn là điện áp cho trước $v_x = v_y = 0$, không gian con x-y sẽ không tạo ra dòng điện. Vì vậy, dòng điện trong không gian con x-y có thể được điều khiển hoàn toàn trong một vòng lặp hở, miễn là điện áp đã cho của nó được đặt thành 0, do đó chỉ có hai bộ điều chỉnh vòng lặp dòng điện trong hệ thống, giúp đơn giản hóa cấu trúc của hệ thống điều khiển. Có thể thấy từ hình 4 rằng, hệ thống điều khiển của nó chủ yếu bao gồm bộ điều chỉnh vòng lặp tốc độ, bộ điều chỉnh vòng lặp dòng điện và thuật toán SVPWM...



Hình 4: Sơ đồ khối điều khiển véc tơ động cơ PMSM 6 pha

3 Mô phỏng và kết quả

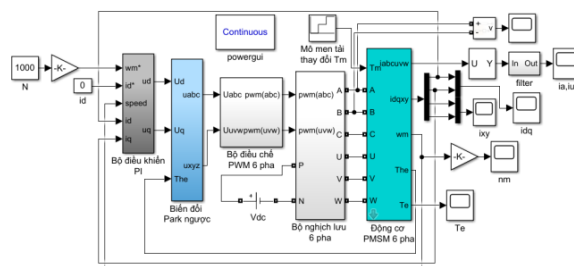
3.1 Mô hình mô phỏng

Mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển động cơ PMSM 6 pha trên phần mềm Matlab/Simulink dựa trên hình 4 với thông số thực nghiệm cho như trong bảng 1. Dựa vào sơ đồ khối điều khiển (hình 4) ta xây dựng được mô hình mô phỏng hệ

thống điều khiển véc tơ cho động cơ như hình 5.

Bảng 1: Thông số mô phỏng của động cơ PMSM

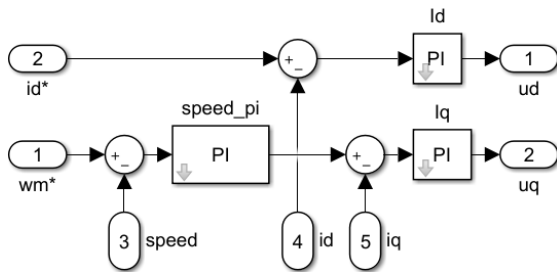
Thông số	Giá trị	Đơn vị
Thời gian lấy mẫu T_s	50	μs
Tần số cắt f_{pwm}	10	kHz
Điện áp 1 chiều U_{dc}	300	VDC
Điện cảm dây quấn phần ứng dọc trục L_d	8,8	mH
Điện cảm dây quấn phần ứng ngang trục L_q	8,8	mH
Số đôi cực p_n	2	-
Điện trở stato R	2	Ω
Từ thông hồ cảm ψ_f	0,68	Wb
Mô men quán tính J	0,015	Kg.m ²
Tốc độ đặt N	1.000	v/ph



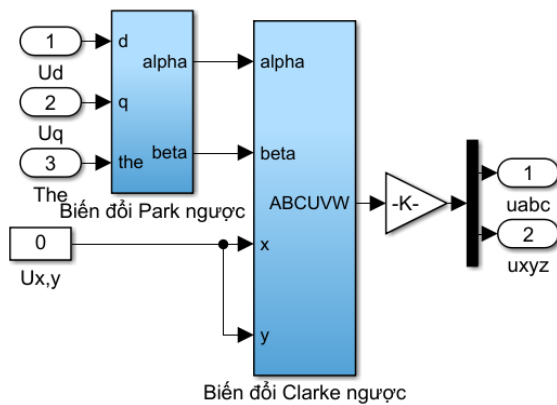
Hình 5: Mô hình mô phỏng bộ điều khiển động cơ SVPWM 6 pha

Trong hình 5 được chia làm 5 phần mô phỏng chính, đó là: Bộ điều chỉnh PI (hình 6); bộ biến đổi Park và Clarke ngược (hình 7); bộ điều chế SVPWM 6 (hình 8); bộ nghịch lưu 6 pha (hình 9) được mô phỏng đơn giản hoá bằng cách sử dụng 2 bộ nghịch lưu 3 pha; và động cơ PMSM 6 pha (hình 10).

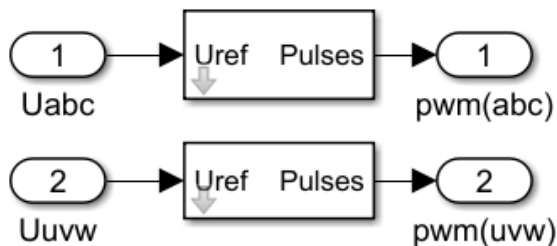
Phương pháp tính toán các tham số của bộ điều khiển đề cập đến phương pháp cài đặt tham số bộ điều chỉnh PI của hệ thống điều khiển véc tơ PMSM 3 pha. Trong đó, tần số cắt của bộ lọc thông thấp dòng điện pha đầu ra được đặt thành 160 Hz; tham số của bộ điều chỉnh PI vòng lặp tốc độ $K_{pw} = 1$, $K_{iw} = 80$; tham số của trục d bộ điều chỉnh PI vòng lặp dòng điện $K_{pd} = L_d \times 1200$, $K_{id} = R \times 1200$; các tham số của bộ điều chỉnh PI vòng lặp dòng điện trục q là $K_{pq} = L_d \times 1200$, $K_{iq} = R \times 1200$.



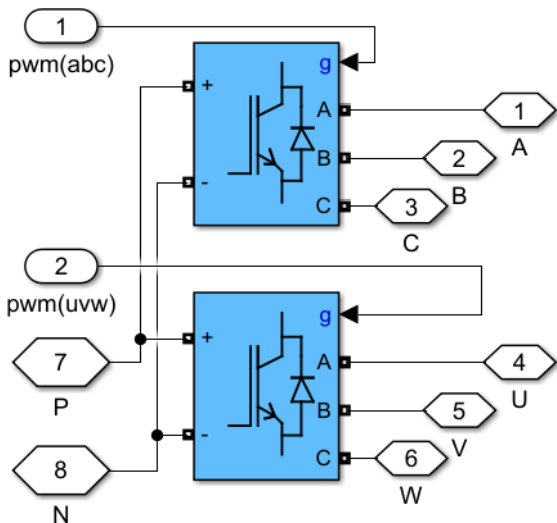
Hình 6: Vòng lặp tốc độ và bộ điều chỉnh PI vòng lặp dòng điện



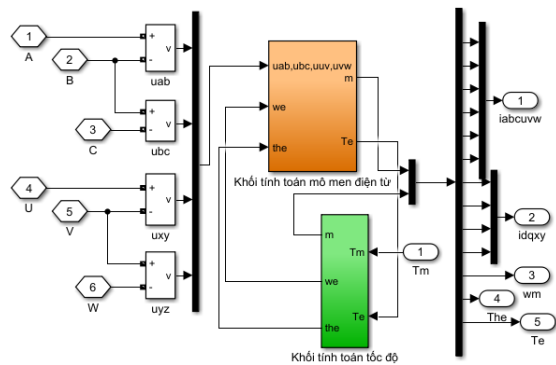
Hình 7: Bộ biến đổi Park và Clarke ngược



Hình 8: Bộ điều chế PWM 6 pha



Hình 9: Bộ điều chế PWM 6 pha



Hình 10: Khối mô phỏng động cơ PMSM

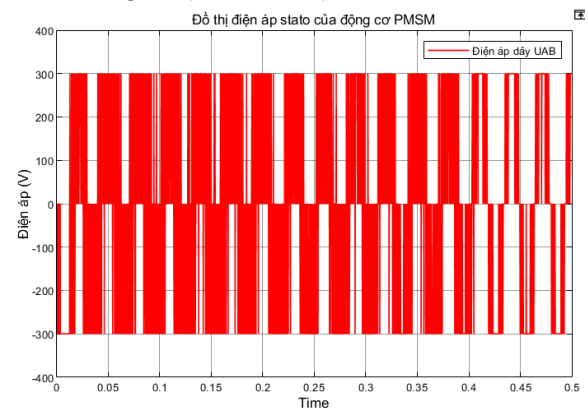
3.2 Kết quả mô phỏng và phân tích

Để đánh giá tính chính xác và tối ưu của các tham số bộ điều khiển PI đã tính toán, nhóm tác giả đặt các điều kiện mô phỏng cho bài toán như sau: Tốc độ đặt 1.000 v/ph, mô men tải thay đổi theo bảng sau:

Bảng 2: Bảng thay đổi tải theo thời gian khi mô phỏng

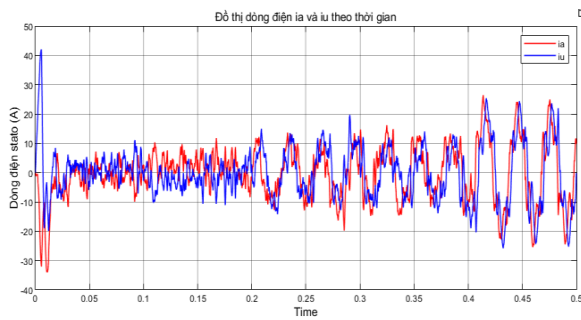
Thời gian đặt t (s)	Mô men tải T_m (Nm)
0,0	0
0,2	40
0,4	80

Dưới đây là các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink với sự thay đổi phụ tải theo thời gian (hình 11-16).

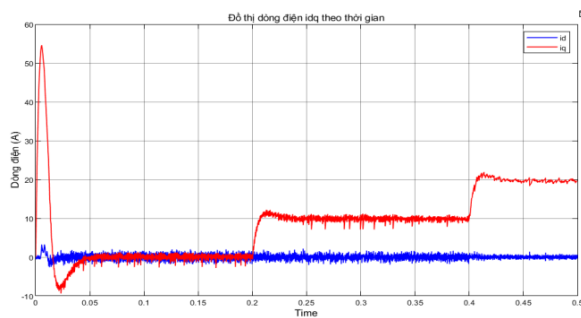


Hình 11: Điện áp U_{AB} của động cơ PMSM 6 pha khi tải thay đổi

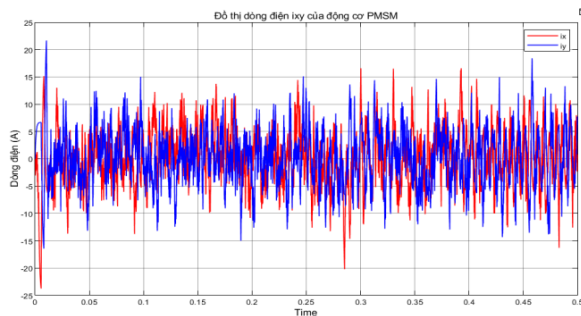
Điện áp đầu ra các pha phù hợp với lý thuyết đặt ra (hình 11). Khi tải thay đổi thì điện áp và dòng điện của động cơ ổn định hơn, nhất là khi tải 80 Nm.



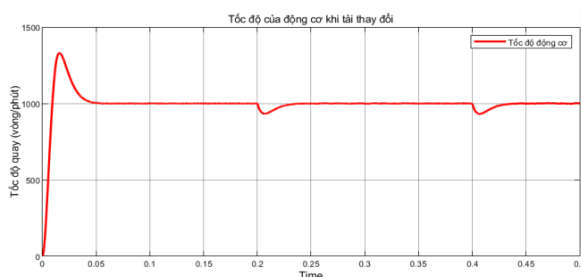
Hình 12: Dòng điện pha A và U của động cơ PMSM khi tải thay đổi



Hình 13: Đồ thị dòng điện i_{dq} theo thời gian của động cơ PMSM 6 pha khi tải thay đổi



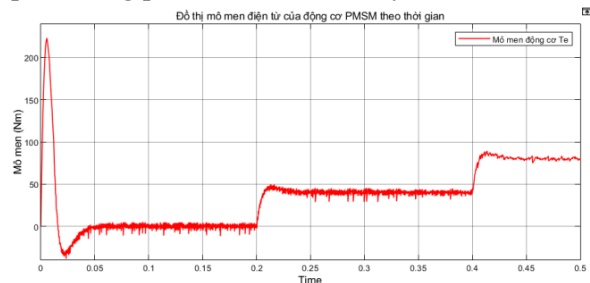
Hình 14: Dòng điện pha A và U của động cơ PMSM khi tải thay đổi



Hình 15: Tốc độ đầu ra của động cơ PMSM 6 pha khi tải thay đổi

Dòng điện đầu ra của động cơ PMSM cho ra đặc tính phù hợp với lý thuyết (hình 12-14). Đồng thời có thể thấy trong hình 13, khi tải thấp thì độ dao động của dòng điện lớn, nhưng càng về sau khi tăng tải lên thì dòng điện i_{dq} dần ổn định hơn, phù hợp với kết quả điện áp (hình 11) và kết quả dòng điện (hình 12).

Tốc độ đầu ra của động cơ PMSM cho ra đặc tính phù hợp với lý thuyết đã đưa ra (hình 15). Đồng thời, có thể thấy trong hình 15, khi khởi động thì độ dao động lớn, nhưng sau đó ổn định ngay. Khi tải thay đổi thì tốc độ cũng dao động nhẹ, nhưng sau đó về tốc độ ổn định. Điều này cho thấy sự ổn định của tốc độ động cơ PMSM 6 pha không phụ thuộc vào sự thay đổi tải.



Hình 16. Đồ thị mô men điện từ của động cơ PMSM 6 pha khi tải thay đổi

Mô men đầu ra của động cơ PMSM cho ra đặc tính phù hợp với lý thuyết (hình 16). Khi động cơ có tải tăng dần, độ dao động của mô men giảm cho thấy động cơ PMSM 6 pha có thể làm việc ổn định trong trường hợp tải nặng. Khi thay đổi tải thì mô men động cơ có sự dao động nhẹ và sau đó trở về vị trí ổn định ban đầu.

4 Kết luận

Hiện nay, khi các động cơ PMSM nhiều pha được sử dụng rộng rãi, nhất là động cơ PMSM 6 pha thì việc nghiên cứu các bộ nguồn điều chế nhiều pha càng trở nên cấp bách. Việc xây dựng mô hình điều khiển động cơ PMSM 6 pha với bộ điều chế PWM 6 pha giúp nhóm tác giả có thể nghiên cứu sâu hơn về động cơ PMSM 6 pha và khắc phục những nhược điểm của động cơ này trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. **Ma Y., Li Y.** Active Disturbance Compensation Based Robust Control for Speed Regulation System of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Appl. Sci*, 2020 (10): 709.
2. **Xu W., Ismail M.M., Liu Y.** Parameter Optimization of Adaptive Flux-Weakening Strategy for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on Particle Swarm Algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, PP. 12128-12140.
3. **Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A., Williamson S.** Multiphase Induction Motor Drives – A Technology Status review. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 1, no. 4, Dec. 2007, PP. 489-516.
4. **Levi E.** Multiphase Electric Machines for Variable Speed Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, May 2008, PP. 1893-1909.
5. **Zhao Y., Lipo T.A.** Space Vector PWM Control of Dual Three-Phase Induction Machine Using Vector Space Decomposition. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, Sep./Oct. 1995, PP. 1100-1109.
6. **Jin Fuli, et al.** Analysis of a Six-Phase Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Motor with Novel Toroidal Windings. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2019.
7. **Kuang Xiaolin, et al.** Research on a Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor System at Dual-Redundant and Fault Tolerant Modes in Aviation Application. *Chinese Journal of Aeronautics* 30.4 (2017), PP. 1548-1560.
8. **Hatua K., Ranganathan V.T.** Direct Torque Control Schemes for Split-Phase Induction Machine. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting*, vol. 1.
9. **Iqbal A., et al.** Generalised Sinusoidal PWM with Harmonic Injection for Multi-Phase VSIs. *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006.
10. **Siala S., Guette E., Pouliquen J. L.** Multi-inverter PWM Control: A New Generation Drives for Cruise Ship Electric Propulsion. *Proc. of EPE 2003, Toulouse (France)*.
11. **Prieto J., et al.** A Modified Continuous PWM Technique for Asymmetrical Six-Phase Induction Machines. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010.