

XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN PWM 6 PHA TRÊN PHẦN MỀM MATLAB/SIMULINK

Nguyễn Thu Hương^{1,*}, Trần Thanh Tuyền², Lưu Bình³

^{1,2,3}Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: thuhuong.qui@gmail.com

TÓM TẮT

So với động cơ ba pha, hệ thống điều khiển tốc độ động cơ nhiều pha có nhiều ưu điểm, khiến chúng có triển vọng tốt trong nhiều 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. Trong bài báo chủ yếu giới thiệu mô hình hóa mô phỏng thường được sử dụng của công nghệ biến đổi PWM sáu pha. Thứ nhất, nguyên lý làm việc cơ bản và phương pháp thực hiện của thuật toán SVPWM sáu pha truyền thống và thuật toán SVPWM bốn vector, mô hình mô phỏng xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink và đưa ra kết quả mô phỏng đồng thời phân tích kết quả.

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

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ PMSM đã 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 nghịch lưu, 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 phản ứng của PMSM, nhằm tăng khả năng tạo mô-men xoắn của PMSM ở tốc độ cao [2].

Hiện nay, có rất nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước đã thực hiện rất nhiều nghiên cứu về các phương pháp điều khiển động cơ. Khái niệm mô hình hóa động cơ nhiều pha lần đầu tiên 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, ứng dụng 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 sáu pha trong ba không gian con trục giao hai chiều (2-D) và gọi nó là phân tách không gian vector (VSD). Trong nội dung bài báo, nhóm tác giả dựa trên lý thuyết để xây dựng mô hình bộ điều khiển PWM 6 pha với tải R – L trên phần mềm Matlab/Simulink.

2. CƠ SỞ NGHIÊN CỨU

So với thuật toán PWM động cơ ba pha thông thường [3-4], động cơ nhiều pha có mức độ tự do cao trong thuật toán PWM. Hiện nay, thuật toán PWM thường được sử dụng cho bộ biến đổi nguồn điện áp hai cấp nhiều pha được chia đại khái thành thuật toán PWM loại sóng mang, thuật toán SVPWM và thuật toán PWM dòng điện trễ. Tuy nhiên, thuật toán PWM dòng điện trễ rất khó áp dụng cho các ứng dụng năng lượng, thuật toán PWM loại sóng mang và thuật toán SVPWM áp dụng cho hệ thống truyền động động cơ nhiều pha trong những năm gần đây đã được nghiên cứu rộng rãi [5].

Khác với hệ thống truyền động động cơ ba pha, mục đích chính của thuật toán PWM nhiều pha là loại bỏ càng nhiều càng tốt các thành phần sóng hài bậc thấp, điều này sẽ gây ra một số lượng lớn sóng hài stato trong không gian con x-

y thành phần hiện tại, do đó làm tăng tổn thất của động cơ. Để cải thiện tốc độ sử dụng điện áp DC, nó tương tự như thuật toán PWM loại sóng mang dựa trên việc đưa sóng hài thứ ba và phương pháp đưa tín hiệu thứ tự không vào bộ biến đổi ba pha, điều này yêu cầu hệ thống phải có nhiều cuộn dây ba pha. Do đó thuật toán PWM loại sóng mang nhiều pha có khả năng được mở rộng cho các bộ biến đổi nhiều pha [6]. Phương pháp này chủ yếu được sử dụng cho các hệ thống động cơ nhiều pha bao gồm một số cuộn dây ba pha. Đặc biệt, đối với động cơ sáu pha, vector điện áp tham chiếu có thể được phân tách thành hai bộ biến đổi điện áp ba pha với điện áp bus DC chung, sau đó thuật toán PWM loại sóng mang dựa trên phương pháp tiêm chuỗi không kép có thể được dùng [6]. Ngoài ra, do thuật toán SVPWM ba pha về cơ bản tương đương với thuật toán PWM kiểu sóng mang dựa trên phương pháp đưa sóng hài bậc ba nên kết quả nghiên cứu thuật toán SVPWM ba pha cũng có thể áp dụng cho phương pháp điều khiển này. Mặc dù phương pháp này có ưu điểm là thuận tiện cho việc thực hiện kỹ thuật số, nhưng nó không phải là thuật toán PWM tối ưu cho động cơ nhiều pha vì dòng stato chứa một số lượng lớn các thành phần hài bậc 5 và bậc 7 và phải được áp dụng ở điện áp DC chung trong bộ nghịch lưu nhiều pha.

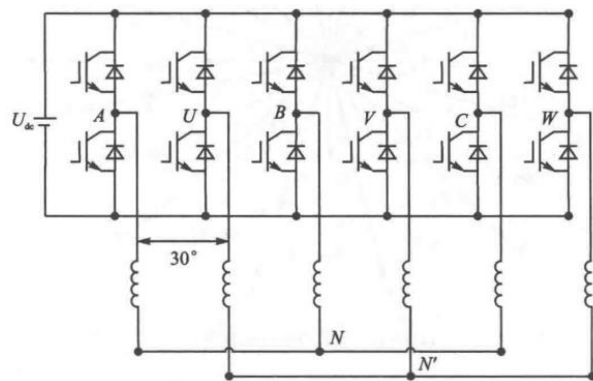
Với động cơ xoay chiều nhiều pha, thuật toán PWM của bộ nghịch lưu cũng phải được mở rộng từ thuật toán PWM ba pha sang thuật toán PWM nhiều pha. Mở rộng thuật toán SVPWM ba pha truyền thống sang bộ biến đổi điện áp nhiều pha, thuật toán SVPWM nhiều pha dựa trên hai vector cực đại liên kế chỉ đảm bảo rằng điện áp của không gian con α -3 là hình sin và không xem xét điện áp của không gian con x-y. Mặc dù đầu ra của nó chứa nhiều điện áp hài hơn, nhưng nó có thể có hệ số điều chế điện áp cơ bản lớn hơn.

Khi số lượng các giai đoạn tăng lên, độ phức tạp của thuật toán SVPWM tính toán trực tiếp này sẽ tăng lên rất nhiều và độ phức tạp của các vấn đề như phán đoán khu vực, tính toán thời lượng véc tơ, chuỗi hành động véc tơ và thời lượng véc tơ thành thời gian hành động chuyển đổi. Và khó khăn cũng sẽ là tăng lên rất nhiều, và các yêu cầu về hiệu suất cho bộ điều khiển chắc chắn sẽ

được cải thiện rất nhiều. Để giải quyết bài toán hiện thực hóa thuật toán này, tài liệu [7] đã phân tích chi tiết phương pháp tính toán thời gian tác động và chuỗi tác động của từng vectơ. Ngoài ra, tài liệu [8] đã áp dụng phương pháp tổng hợp trước các vectơ để thống nhất quy trình tính toán thời gian hoạt động của vectơ của từng khu vực, để tạo điều kiện thuận lợi cho việc thực hiện kỹ thuật số sau này.

2.1. Vectơ điện áp của bộ biến đổi sáu pha

Đối với bộ nghịch lưu sáu pha được hiển thị trong hình 1, do các thiết bị chuyển mạch trên và dưới của mỗi nhánh cầu hoạt động ở trạng thái dẫn bổ sung, mỗi nhánh cầu có hai trạng thái chuyển mạch và toàn bộ biến đổi có 26 công tắc trong tổng cộng, nghĩa là có 64 trạng thái chuyển mạch.



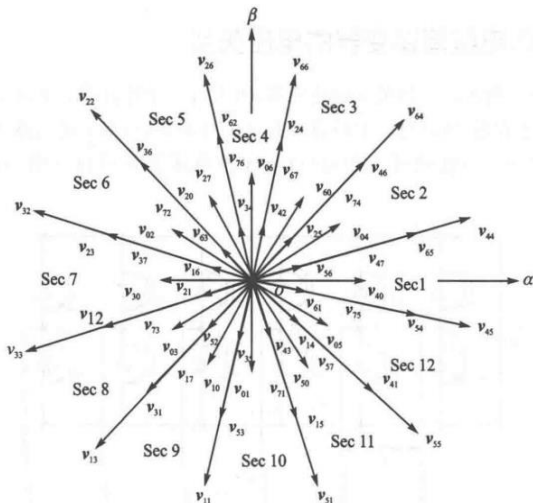
Hình 1. Sơ đồ bộ nghịch lưu 6 pha

64 loại vectơ điện áp tương ứng với công tắc có thể được xác định theo công thức (1) và công thức (2) tương ứng:

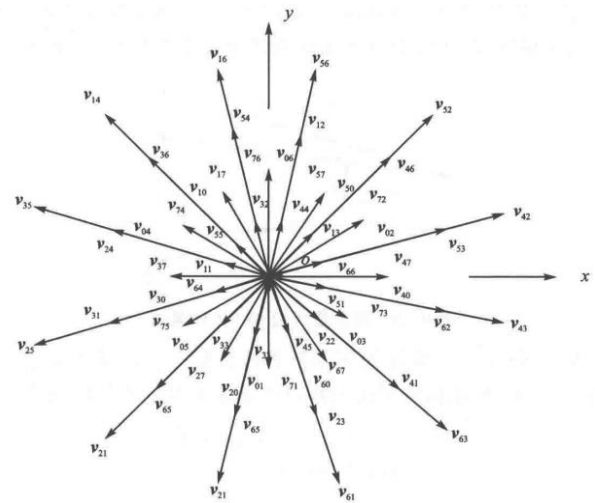
$$v_{\alpha\beta} = \frac{1}{3} U_{dc} (s_A + s_B a^4 + s_C a^8 + s_D a + s_E a^5 + s_F a^9) \quad (1)$$

$$v_{xy} = \frac{1}{3} U_{dc} (s_A + s_B a^4 + s_C a^8 + s_D a + s_E a^5 + s_F a^9) \quad (2)$$

Trong đó: $a = e^{j30^\circ}$; s biểu thị trạng thái chuyển đổi của từng nhánh cầu, $s_i = 1$ (A, B, C, D, E, F) cho thấy thiết bị chuyển mạch của nhánh cầu trên được bật và thiết bị chuyển mạch của nhánh cầu dưới bị ngắt kết nối, $s_i = 0$ (A, B, C, D, E, F) cho thấy thiết bị chuyển mạch của nhánh cầu trên bị tắt và thiết bị chuyển mạch của nhánh cầu dưới được bật. Theo cách này, có thể thu được giản đồ vectơ điện áp không gian của không gian con α - β và x-y, như trong hình 2 và hình 3.



Hình 2. Sơ đồ vectơ điện áp không gian bộ biến đổi sáu pha – hệ không gian con α - β



Hình 3. Sơ đồ vectơ điện áp không gian bộ biến đổi sáu pha – hệ không gian con x - y

2.2. Thuật toán SVPWM bốn véc tơ

Thuật toán SVPWM bốn vectơ là thêm hai vectơ điện áp cơ bản trên cơ sở của thuật toán SVPWM sáu pha hai vectơ và bù hiệu ứng điện áp hình thành trên không gian con x - y bằng các vectơ điện áp được thêm vào.

Để cải thiện việc sử dụng điện áp càng nhiều càng tốt, thường chọn 12 véc tơ có biên độ lớn nhất trong không gian con α - β và các véc tơ này tương ứng với véc tơ có biên độ nhỏ nhất trong không gian x - y . Khi đó không gian α - β và không gian x - y được chia làm 12 khu vực như hình 2 và hình 3. Quá trình tính toán thông số là giải một hệ phương trình tuyến tính năm biến [5], cụ thể là:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha^1 & v_\alpha^2 & v_\alpha^3 & v_\alpha^4 & v_\alpha^5 \\ v_\beta^1 & v_\beta^2 & v_\beta^3 & v_\beta^4 & v_\beta^5 \\ v_x^1 & v_x^2 & v_x^3 & v_x^4 & v_x^5 \\ v_y^1 & v_y^2 & v_y^3 & v_y^4 & v_y^5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_s \quad (3)$$

Trong đó, t_k là thời gian tác dụng của véc tơ điện áp thứ k , $k = 1, 2, 3, 4$; t_0 là thời gian hoạt động của véc tơ thứ 0; v_α^k, v_β^k là hình chiếu tương ứng của véc tơ điện áp trên các trục α và trục β tương ứng, $k = 1, 2, 3, 4, 5$; v_α^*, v_β^* là véc tơ điện áp tham chiếu trên các trục α và trục β tương ứng, $*$ = 1, 2, 3, 4, 5; T_s là khoảng thời gian lấy mẫu.

Khi bộ biến đổi 6 pha hoạt động trong vùng tuyến tính, $t_0 > 0$; lấy 1 khu vực làm ví dụ tính toán, ta có tổng thời gian của 4 véc tơ khác không sẽ là:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = \frac{v_\alpha^*}{U_{dc}} T_s \quad (4)$$

Tại thời điểm $t_0 = 0$, thì:

$$T_s = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 2\sqrt{3} \frac{T_s}{\pi} m \cos \theta \quad (5)$$

Theo công thức (5), tỉ lệ điều khiển có thể xác định như sau:

$$m = \frac{\pi}{2\sqrt{3} \cos \theta} \quad (6)$$

Lấy đạo hàm theo θ , ta có:

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{\pi \sin \theta}{2\sqrt{3} \cos^2 \theta} = 0 \quad (7)$$

Phương trình (7) có nghiệm $\theta = 0$, khi $\theta = 0$ bằng 0 thì m có giá trị lớn nhất.

$$m = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,907 \quad (8)$$

Ta có thể tổng hợp tổng cộng 12 vectơ điện áp và sự phân bố của các vectơ này giống như phân bố của thuật toán SVPWM sáu pha hai vectơ, nhưng biên độ thì khác. Giả sử 4 vectơ cơ sở v_1, v_2, v_3, v_4 và véc tơ không với thời gian hoạt động tương ứng là T_1, T_2, T_3, T_4 và T_0 , khi đó biểu thức tính toán là:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| T_s \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| T_s \left[\sin\theta + \sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \right] \\ T_3 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| T_s \left[\sqrt{3} \sin\theta + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \right] \\ T_4 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| T_s \sin\theta \\ T_0 = T_s - \frac{3 + \sqrt{3}}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| T_s \left[\sin\theta + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

Nếu như $T_1 + T_2 + T_3 + T_4 > T_s$, thì thời gian tương ứng như sau:

$$\begin{cases} T_1' = \frac{T_1}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} T_s \\ T_2' = \frac{T_2}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} T_s \\ T_3' = \frac{T_3}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} T_s \\ T_4' = \frac{T_4}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} T_s \end{cases} \quad (10)$$

Theo các cung nơi đặt vectơ điện áp tham chiếu v^* thì T_1, T_2, T_3 và T_4 tương ứng với các vectơ điện áp cơ bản khác nhau. Thời gian tương ứng với vectơ điện áp cơ bản trong các cung khác nhau được liệt kê trong Bảng 1.

Bảng 1. Thời gian hoạt động của vectơ điện áp

Thời gian	Vùng vị trí					
	Sec 1	Sec 2	Sec 3	Sec 4	Sec 5	Sec 6
T1	55	45	44	64	66	26
T2	45	44	64	66	26	22
T3	44	64	66	26	22	32
T4	64	66	26	22	32	33
Thời gian	Vùng vị trí					
	Sec 7	Sec 8	Sec 9	Sec 10	Sec 11	Sec 12
T1	22	32	33	13	11	51
T2	32	33	13	11	51	55
T3	33	13	11	51	55	45
T4	13	11	51	55	45	44

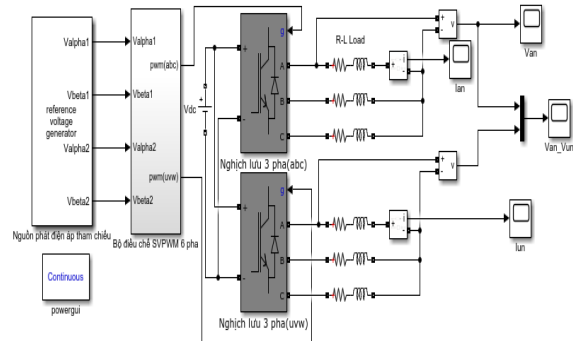
3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Mô hình mô phỏng

Trong phần thực nghiệm, nhóm tác giả sẽ xây dựng mô hình mô phỏng thuật toán SVPWM 4 véc tơ điện áp như hình 4 với thông số mô phỏng như bảng sau:

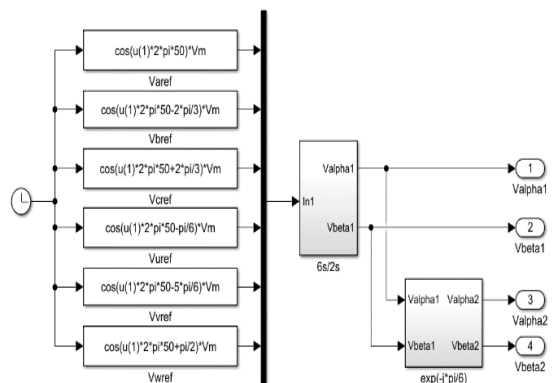
Bảng 2. Thông số mô phỏng của bộ nguồn và tải

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Biên độ điện áp 6 pha V_m	200	V
Tần số cắt f_{pwm}	5	kHz
Điện áp 1 chiều U_{dc}	300	VDC
Điện cảm của tải L	5	mH
Điện trở của tải R	5	Ω

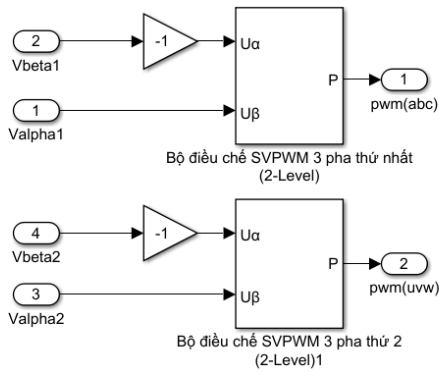


Hình 4. Mô hình mô phỏng bộ điều khiển SVPWM 6 pha

Trong hình 4 chia làm 4 phần mô phỏng chính đó là phần 1: nguồn phát điện tham chiếu với $V_m = 200VAC$ cấp nguồn điện 6 pha biến đổi sang 4 véc tơ điện áp (hình 5); tiếp theo bộ điều chế SVPWM 6 pha với thuật toán sử dụng đầu vào 4 véc tơ điện áp cấp tín hiệu điều khiển PWM cho bộ nghịch lưu 6 pha (hình 5); phần bộ nghịch lưu 6 pha được mô phỏng đơn giản hoá bằng cách sử dụng 2 bộ nghịch lưu 3 pha; động cơ 6 pha được mô tả dưới dạng tải R-L.

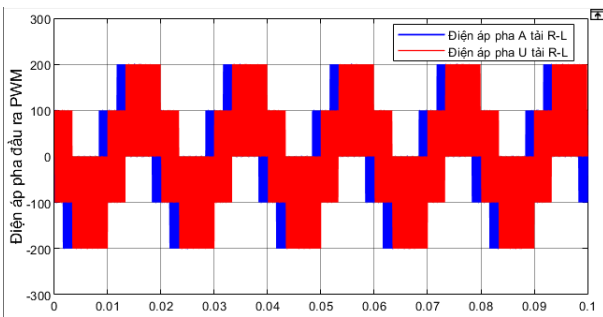


Hình 5. Mô hình mô phỏng tính toán vectơ điện áp tham chiếu

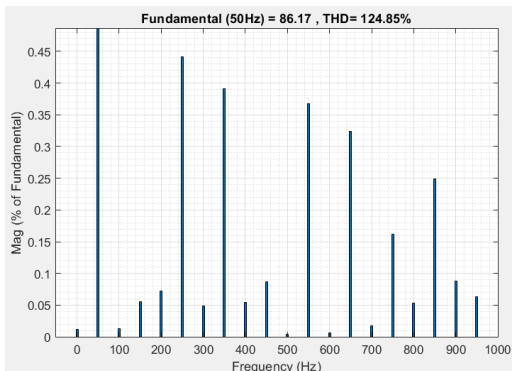


Hình 6. Mô hình mô phỏng thuật toán bộ điều chế PWM 6 pha

3.2. Đồ thị đặc tính đầu ra của bộ điều khiển SVPWM 6 pha

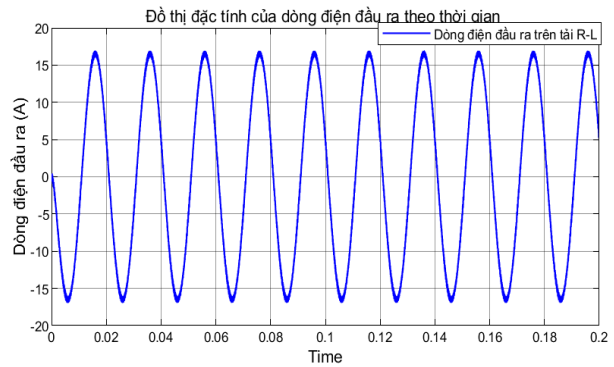


Hình 7. Kết quả điện áp pha đầu ra trên tải U_{an} và U_{un}



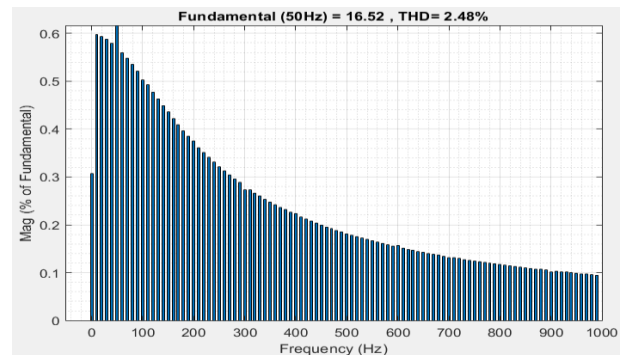
Hình 8. Phân tích dạng sóng FFT của điện áp đầu ra

Điện áp đầu ra các pha phù hợp với lý thuyết đặt ra (hình 7). Các điện áp đầu ra đều lệch pha tương ứng với nhau lần lượt là 30° . Góc điện luôn được sử dụng để xác minh tính đúng đắn của mô hình mô phỏng biến tần nguồn điện áp sáu pha. Ngoài ra qua hình 8 ta có thể thấy thành phần sóng hài trong điện áp đầu ra. Có thể thấy khi sử dụng bộ điều khiển trên thì thành phần sóng hài khi thông qua phân tích FFT là hiện vẫn rất cao đối với điện áp thì THD = 124.85% (hình 8).



Hình 9. Kết quả dòng điện pha đầu ra trên tải

Dòng điện đầu ra của bộ nguồn trên cho ra đặc tính phù hợp với lý thuyết đã đưa ra (hình 10). Đồng thời tương tự như điện áp thì góc điện của các pha cũng lệch nhau 1 góc là 30° . Chất lượng đầu ra khi phân tích FFT dòng điện thì có thể thấy rằng nằm trong khoảng cho phép (THD = 2,48%), như vậy đầu ra sóng hài dòng điện nằm trong giới hạn cho phép (hình 10).



Hình 10. Phân tích dạng sóng FFT của dòng điện đầu ra

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Hiện nay, khi các động cơ PMSM nhiều pha sử dụng rộng rãi nhất là động cơ PMSM 6 pha thì việc nghiên cứu các bộ nguồn điều chế nhiều pha càng trở lên cấp bách. Việc xây dựng được mô hình bộ điều chế 6 pha sẽ giúp nhóm tác giả tiến tới xây dựng mô hình điều khiển động cơ PMSM 6 pha với bộ điều chế PWM 6 pha trên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Ma Y., Li Y. (2020). Active Disturbance Compensation Based Robust Control for Speed Regulation System of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Appl. Sci.* 10, 709.

2. Xu W., Ismail M M., Liu Y. (2019). Parameter Optimization of Adaptive Flux-Weakening Strategy for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on Particle Swarm Algorithm, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 12128-12140.
3. E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson (2007). "Multiphase induction motor drives—A technology status review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 1, no. 4, pp. 489–516.
4. E. Levi (2008). "Multiphase electric machines for variable-speed applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909.
5. Y. Zhao and T. A. Lipo (1995). "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 1100–1109.
6. Siala, S., E. Guette, and J. L. Pouliquen (2003). "Multi-inverter PWM control: a new generation drives for cruise ship electric propulsion." *Proc. of EPE2003, Toulouse (France)*.
7. Prieto, J., et al (2010). "A modified continuous PWM technique for asymmetrical six-phase induction machines." *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*. IEEE.
8. Li, Shan, Huihui Xiao, and Hongyan Chen (2005). "The research of SVPWM control technique of double three-phase induction machine." *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Vol. 1. IEEE.

Thông tin của tác giả:

ThS. Nguyễn Thu Hương

Trung tâm đào tạo nghề, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).904 744 244 - Email: thuhuong.qui@gmail.com

ThS. Trần Thanh Tuyền

NCS. Trường Đại học Trung Nam, Hồ Nam, Trung Quốc
Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).977 386 134 - Email: tuyenttbk48@gmail.com

ThS. Lưu Bình

Trung tâm đào tạo nghề, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).973 393 268 - Email: noemail.350@qui.edu.vn

BUILDING A 6-PHASE PWM CONTROL MODEL ON MATLAB/SIMULINK

Information about authors:

Nguyen Thu Huong, M. Eng., Vocational Training Center, Quang Ninh University of Industry, email: thuhuong.qui@gmail.com

Tran Thanh Tuyen, M. Eng., Department of Electrical, Quang Ninh University of Industry.

Luu Binh, M. Eng., Vocational Training Center, Quang Ninh University of Industry.

ABSTRACT:

Compared with three-phase motors, multi-phase motor speed control systems have many advantages, which make them good prospects in many fields, such as electric vehicle electrical equipment control systems. In these control systems, the motor requires a wider speed range. In this paper, we mainly introduce commonly used simulation modeling of six-phase inverter PWM technology: the basic working principle and implementation method of the traditional six-phase SVPWM algorithm and the four-vector SVPWM algorithm are described. The simulation model is

built on MATLAB/Simulink software and gives simulations and analyzes the results.

Keywords: Multi-phase motor, Six-phase permanent magnet synchronous motors, Simulation, Motor speed control system.

REFERENCES

1. Ma Y., Li Y. (2020). Active Disturbance Compensation Based Robust Control for Speed Regulation System of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Appl. Sci.* 10, 709.
2. Xu W., Ismail M M., Liu Y. (2019). Parameter Optimization of Adaptive Flux-Weakening Strategy for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on Particle Swarm Algorithm, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 12128-12140.
3. E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, and S. Williamson (2007). "Multiphase induction motor drives—A technology status review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 1, no. 4, pp. 489–516.
4. E. Levi (2008). "Multiphase electric machines for variable-speed applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909.
5. Y. Zhao and T. A. Lipo (1995). "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 1100–1109.
6. Siala, S., E. Guette, and J. L. Pouliquen (2003). "Multi-inverter PWM control: a new generation drives for cruise ship electric propulsion." *Proc. of EPE2003, Toulouse (France)*.
7. Prieto, J., et al (2010). "A modified continuous PWM technique for asymmetrical six-phase induction machines." *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*. IEEE.
8. Li, Shan, Huihui Xiao, and Hongyan Chen (2005). "The research of SVPWM control technique of double three-phase induction machine." *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Vol. 1. IEEE.

Ngày nhận bài: 17/4/2023;

Ngày gửi phản biện: 18/4/2023;

Ngày nhận phản biện: 15/5/2023;

Ngày chấp nhận đăng: 19/5/2023.