



NGHIÊN CỨU ỔN ĐỊNH TỐC ĐỘ VÀ GIẢM DAO ĐỘNG MÔ MEN CHO ĐỘNG CƠ BLDC BẰNG PHƯƠNG PHÁP NGHỊCH LƯU NGUỒN ÁP

Nguyễn Thị Thùy Dương, Đỗ Quang Huy, Đoàn Văn Điện
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 15/03/2017
 Ngày phân biên đánh giá và sửa chữa: 10/05/2017
 Ngày bài báo được duyệt đăng: 30/05/2017

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ổn định tốc độ động cơ BLDC nói chung bằng phương pháp nghịch lưu nguồn áp sử dụng bộ nghịch lưu cầu IGBT. Tín hiệu từ các cảm biến Hall gắn trong rotor động cơ được sử dụng để tạo tín hiệu điều khiển cho mạch nghịch lưu. Đầu ra của bộ nghịch lưu được nối tới các cuộn dây stator động cơ. Sức điện động của động cơ được điều khiển thông qua việc điều khiển các chế độ đóng cắt của cầu nghịch lưu. Tốc độ động cơ được ổn định thông qua việc tự động điều chỉnh điện áp nguồn cấp.

Từ khóa: nghịch lưu nguồn áp, điều khiển động cơ BLDC.

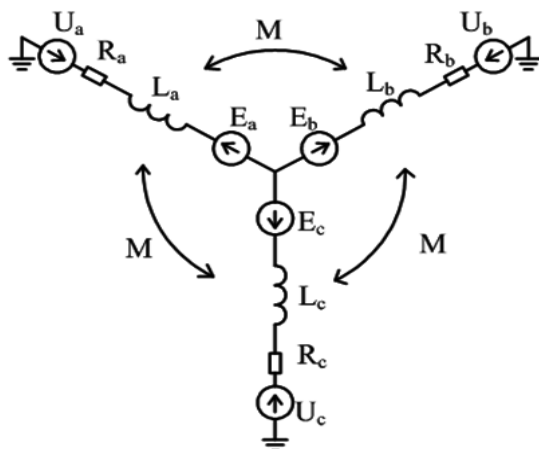
1. GIỚI THIỆU

Động cơ một chiều không chổi than-BLDC (Brushless Direct Current) là một dạng động cơ đồng bộ được kích từ bằng nam châm vĩnh cửu và dùng dòng điện một chiều cấp cho dây quấn phần ứng stator [1], [2]. Động cơ một chiều không chổi than BLDC có các ưu điểm như tỷ lệ mô men/quán tính lớn, tỷ lệ công suất trên khối lượng cao... nên được ứng dụng rất rộng rãi [3]. Với nhu cầu tìm hiểu kỹ thuật điều khiển, ứng dụng trong thực tế và đáp ứng các công việc nghiên cứu giảng dạy, học tập của giảng viên và sinh viên ngành điện - điện tử, nhóm nghiên cứu xây dựng và mô phỏng ổn định tốc độ và giảm dao động mô men cho động cơ BLDC bằng phương pháp nghịch lưu nguồn áp 6 bước sử dụng công cụ Matlab-Simulink [4].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương trình đặc tính cơ của động cơ BLDC

a. Mô tả toán học động cơ BLDC



Hình 1. Sơ đồ thay thế động cơ BLDC

Stator động cơ có ba cuộn dây được cấp nguồn bởi điện áp ba pha có độ lớn lần lượt là U_a , U_b , U_c . Khi được cấp nguồn, các cuộn dây stator sinh ra dòng điện, dòng điện này sinh ra từ trường quay quét qua từ trường của nam châm rotor. Sự tương tác giữa hai từ trường của stator và rotor động cơ sẽ làm cho rotor động cơ quay và làm xuất hiện trong cuộn dây stator các sức phản điện động tương ứng là E_a , E_b , E_c . Giả sử điện trở và điện cảm tương ứng của các pha là R_a , R_b , R_c và L_a , L_b , L_c . Như vậy ta sẽ có sơ đồ thay thế như trên Hình 1.

Phương trình tổng quát được trình bày theo công thức (1)

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó: L_{ba} , L_{ca} , L_{cb} là hồ cảm giữa các cuộn dây của các pha. Giả thiết các pha hoàn toàn đối xứng ta có: $R_a = R_b = R_c = R$; $L_a = L_b = L_c = L$; $L_{ba} = L_{ca} = L_{cb} = M$.

Sau khi Laplace hóa phương trình (1) và giả thiết các pha hoàn toàn đối xứng ta sẽ được phương trình mới như công thức (2):

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Theo định luật Kirchoff: $i_a + i_b + i_c = 0$ cho nên: $M \cdot i_b + M \cdot i_c = -M \cdot i_a$. Tương tự cho các pha khác, thay vào phương trình (2):

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} +$$

$$+s \cdot \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}$$

Đặt $L_s = L - M$ và sau khi biến đổi:

$$s \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_s & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Công thức (3) chính là công thức mô tả mô hình động cơ BLDC.

b. Mô men điện từ của động cơ BLDC

Công suất điện cấp cho động cơ:

$$P_d = E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c$$

Công suất cơ sinh ra ở đầu trục động cơ:

$$P_c = M \cdot \omega$$

Với M là mô men điện từ và ω là tốc độ của động cơ. Bỏ qua tổn thất trong động cơ, ta sẽ có phương trình cân bằng:

$$P_d = P_c$$

Do đó ta có mô men điện từ của động cơ là:

$$M = \frac{E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c}{\omega} \quad (4)$$

c. Phương trình động học của động cơ BLDC

Phương trình động học tổng quát của động cơ có dạng:

$$M = (J_m + J_c) \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_f + M_c \quad (5)$$

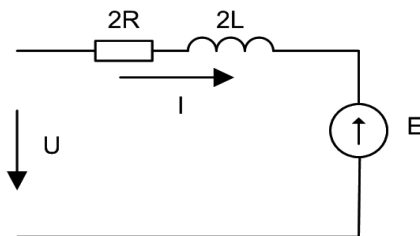
Trong đó:

- + M : mô men điện từ của động cơ;
- + J_m : mô men quán tính của động cơ;
- + J_c : mô men quán tính của tải;
- + $M_f = D \cdot \omega$: mô men ma sát với D là hệ số cản;
- + M_c : mô men tải.

Đặt $J = J_m + J_c$ và Laplace hóa phương trình

(5) ta có:
$$\omega = \frac{M - D \cdot \omega - M_c}{J \cdot s} \quad (6)$$

d. Phương trình đặc tính cơ của động cơ BLDC



Hình 2. Sơ đồ thay thế một pha động cơ BLDC

Do đặc điểm động cơ BLDC với các cuộn dây stator mắc hình sao là tại một thời điểm luôn có hai pha dẫn, nên công suất điện của động cơ là:

$$P_d = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c$$

Công suất cơ sinh ra ở đầu trục: $P_c = M \cdot \omega$

Coi tổn thất công suất trong động cơ là

không đáng kể $P_d = P_c$ nên:

$$M = \frac{2 \cdot E \cdot I}{\omega} \text{ suy ra: } \omega = \frac{2 \cdot E \cdot I}{M} \quad (7)$$

Phương trình cân bằng điện áp:

$$U = 2R \cdot I + 2E \quad (8)$$

Mặt khác: $M = K_t \cdot I$

$$(9)$$

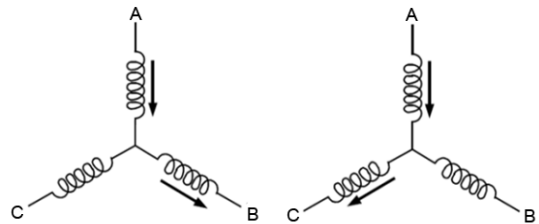
Thay (8) và (9) vào (7) ta thu được:

$$\omega = \frac{U}{K_t} - \frac{2R}{K_t^2} \cdot M \quad (10)$$

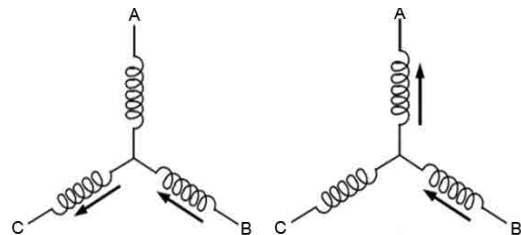
Phương trình (10) được gọi là phương trình đặc tính cơ của động cơ BLDC.

2.2. Phương pháp điều khiển bằng tín hiệu cảm biến Hall

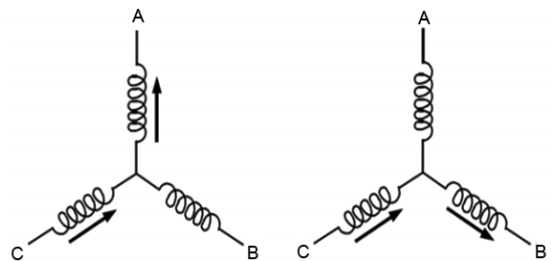
Động cơ BLDC thông thường được điều khiển bởi bộ nghịch lưu nguồn áp sử dụng IGBT cấp cho 3 pha của động cơ, tín hiệu điều khiển cho bộ nghịch lưu phụ thuộc vào cảm biến vị trí của rotor [5]. Các cảm biến vị trí này có thể là cảm biến Hall, hoặc cảm biến vị trí tuyệt đối được gắn trên rotor. Với 6 bước chuyển mạch, khoảng dẫn cho mỗi pha là 120° bằng góc độ điện tương ứng. Chuỗi chuyển mạch pha lần lượt như sau: AB-AC-BC-BA-CA-CB.



Hình 3. Khoảng dẫn của pha A



Hình 4. Khoảng dẫn của pha B



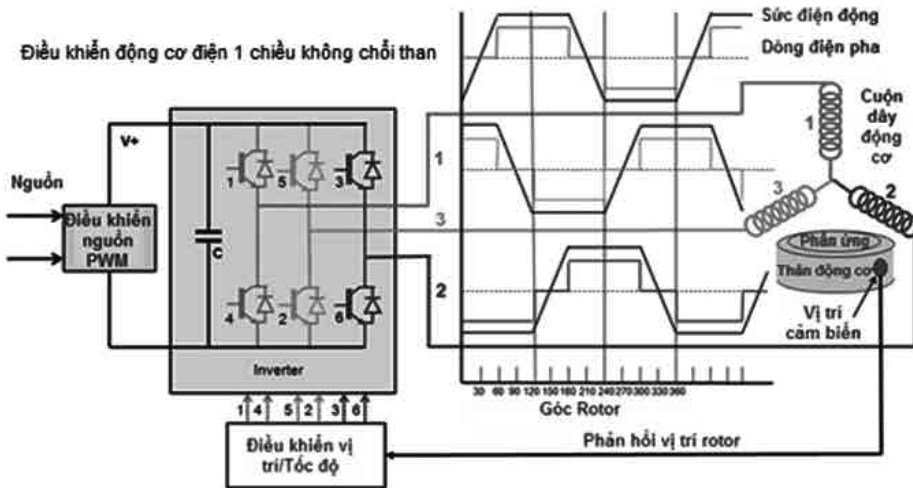
Hình 5. Khoảng dẫn của pha C

Mỗi đoạn dẫn được gọi là 1 bước. Vì vậy, tại mọi thời điểm chỉ có 2 pha cùng dẫn, pha thứ 3 không được nối với mạch nguồn. Để tạo ra mô men

xoắn cực đại, bộ chuyển mạch điện tử công suất cấp nguồn cho 3 pha động cơ phải được chuyển mạch liên tục sau mỗi 60° để cho dòng pha đồng bộ với sức phản điện động. Thời gian chuyển mạch được xác định bởi vị trí của rotor được dò bởi cảm biến

Hall hoặc được ước lượng từ những thông số của động cơ, nghĩa là từ sức phản điện của cuộn dây để trống trong động cơ khi hoạt động.

Một hệ thống điều khiển động cơ BLDC đặc trưng với cảm biến vị trí được biểu diễn ở Hình 6:



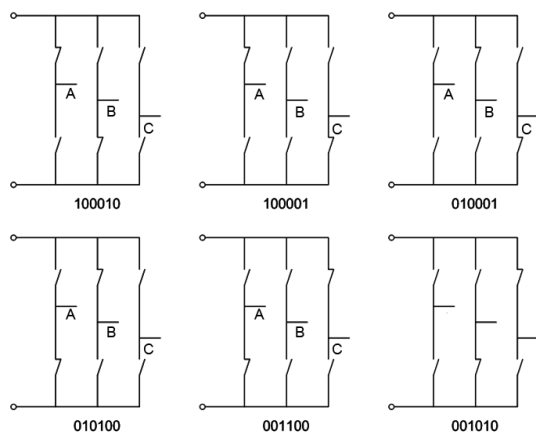
Hình 6. Hệ thống điều khiển động cơ BLDC

Phương pháp điều khiển bằng tín hiệu cảm biến Hall được dựa trên nguyên lý hoạt động cơ bản của động cơ BLDC, dùng tín hiệu đưa về từ cảm biến vị trí rotor để làm tín hiệu điều khiển các khóa

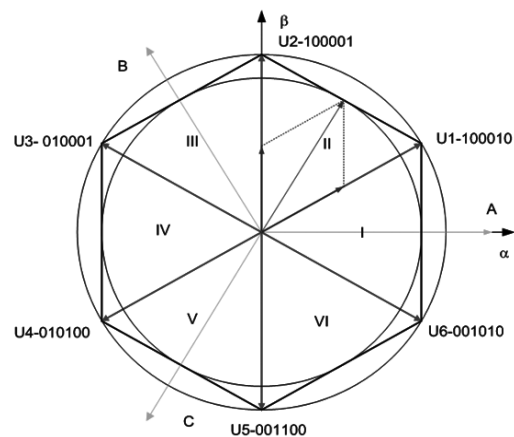
điện tử đóng hoặc ngắt dòng điện vào các cuộn dây tương ứng. Giảm độ xung kích và dòng điện đóng ngắt tương ứng thể hiện ở trong lưu đồ về tín hiệu cảm biến Hall và dòng điện tương ứng các pha.

Bảng 1. Thứ tự chuyển mạch 6 bước

Vị trí rotor (θ_r) (độ điện)	Trạng thái cảm biến Hall			Công tắc được đóng		Dòng điện các pha		
	H1	H2	H3			A	B	C
0-60	1	0	0	Q1	Q4	+	+	OFF
60-120	1	1	0	Q1	Q6	+	OFF	-
120-180	0	1	0	Q3	Q6	OFF	+	-
180-240	0	1	1	Q3	Q2	-	+	OFF
240-300	0	0	1	Q5	Q2	-	OFF	+
300-360	1	0	1	Q5	Q4	OFF	-	+



Hình 7. Trạng thái chuyển mạch của các khóa đóng cắt



Hình 8. Giảm độ chuyển mạch 6 bước

2.3. Sơ đồ mô phỏng

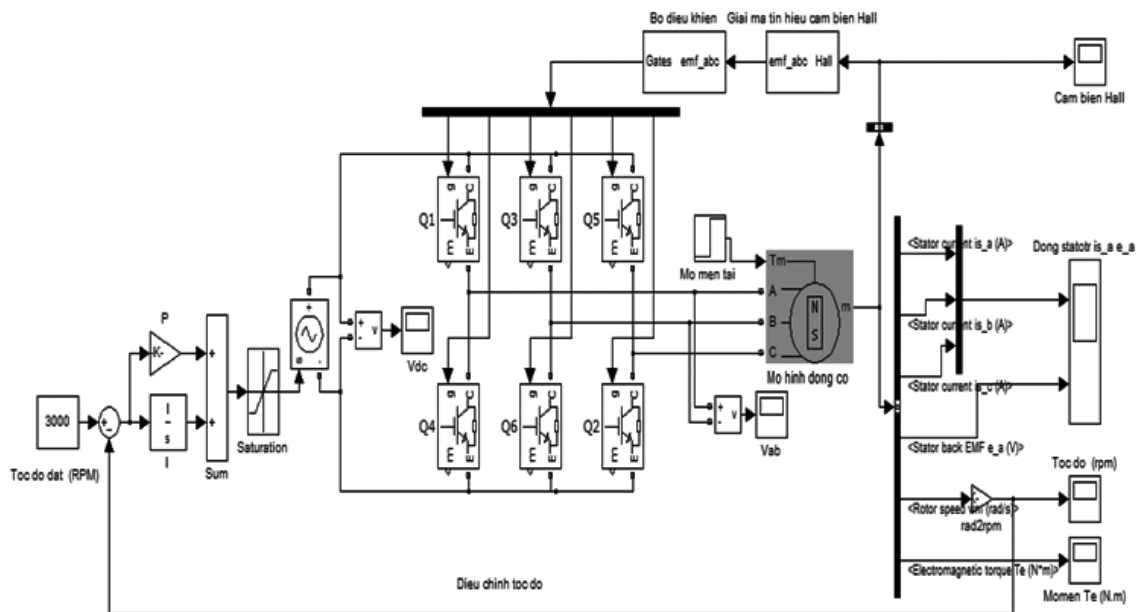
Sau khi xây dựng đủ các khối chức năng trên Simulink, tiến hành mô phỏng với động cơ BLDC có các thông số giả thiết như trong Bảng 2.

Đại lượng đặt tốc độ định mức 3000 vòng/phút và tải định mức $M_c = 3 \text{ Nm}$, thời điểm đóng tải sau thời gian khởi động 0,1 giây. Điện áp cấp bộ biến đổi công suất thông qua bộ nguồn phát 1 chiều điện áp 500V và có thể điều chỉnh được biên độ. Việc điều chỉnh điện áp nguồn phát được thực hiện bởi bộ điều khiển PI nhằm ổn định tốc độ cho động cơ thông qua điều chỉnh điện áp phản ứng cho động cơ. Việc ổn định mô men cho động cơ được thực hiện thông qua việc điều chế sức điện động theo dạng sóng hình thang hoặc hình sin bởi bộ biến đổi công suất mà đầu vào bộ tạo xung điều khiển là tín hiệu của các cảm biến Hall, sơ đồ mô phỏng của hệ

thống được trình bày như trong Hình 9.

Bảng 2. Bảng thông số động cơ

1	Công suất	1 kW
2	Điện áp	500 V
3	Dải tốc độ:	3000 vòng/phút
4	Số cực	4
5	Điện trở/pha (Ω)	2.8750 Ω
6	Điện cảm/pha (H)	8.5e-3 H
7	Mô men quán tính (kg/m^2)	2-4 kg/m^2
8	Hằng số điện áp ($V_định\ pha-pha/krpm$)	126.95
9	Hằng số mô men ($\text{Nm}/A_định$)	1.2124

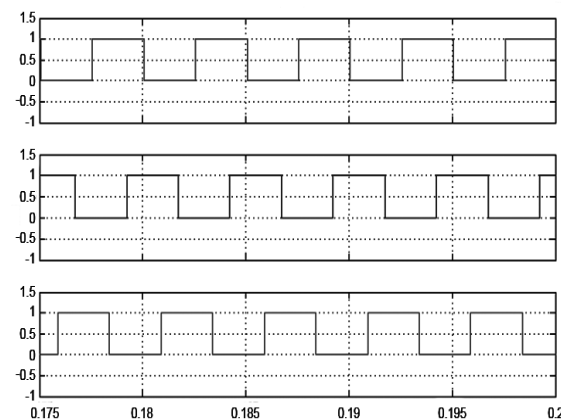


Hình 9. Sơ đồ mô phỏng hệ thống

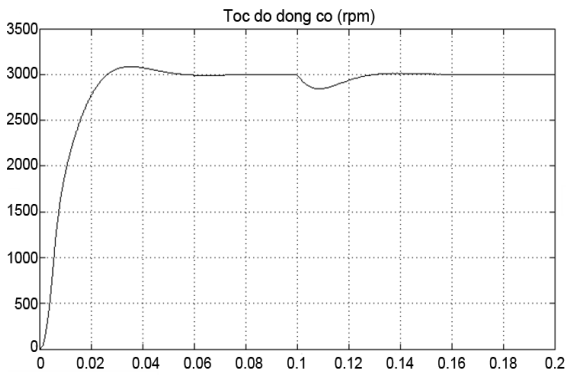
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Kết quả mô phỏng khi điều chế sức phản điện động (Back-EMF) có dạng hình thang

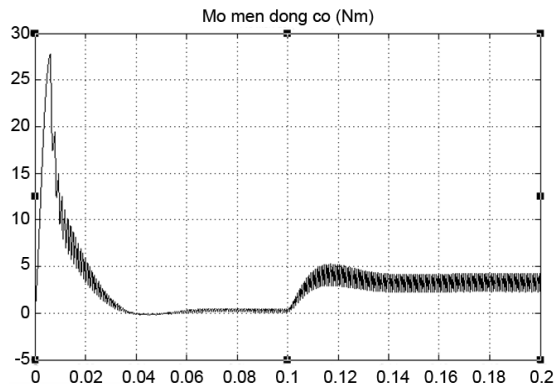
Điều chế sức phản điện động được sử dụng phổ biến để đề cập đến điện áp xảy ra trong động cơ điện khi có chuyển động tương đối giữa phần ứng của động cơ và từ trường của nam châm hoặc của các cuộn dây động cơ. Thông tin vị trí cảm nhận bởi cảm biến Hall được sử dụng để tạo các lệnh điều khiển chính xác cho bộ chuyển đổi công suất nhằm đảm bảo điều chỉnh ổn định tốc độ và mô men tải của động cơ. Hình 10 là giản đồ tín hiệu cảm biến Hall được sử dụng để tạo tín hiệu điều khiển. Mỗi tín hiệu của cảm biến Hall có độ rộng 180° điện, xung nọ cách xung kia một khoảng là 60° điện. Tạo ra 6 điểm chuyển mạch cho bộ điều khiển.



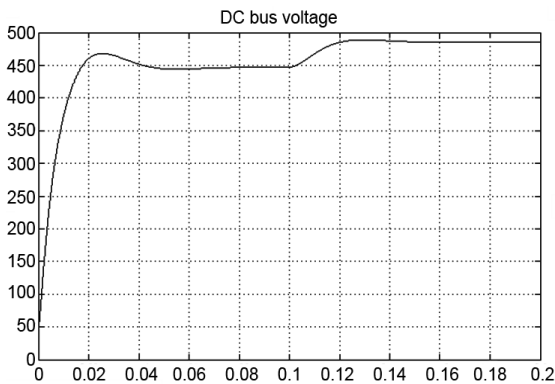
Hình 10. Giản đồ tín hiệu cảm biến Hall



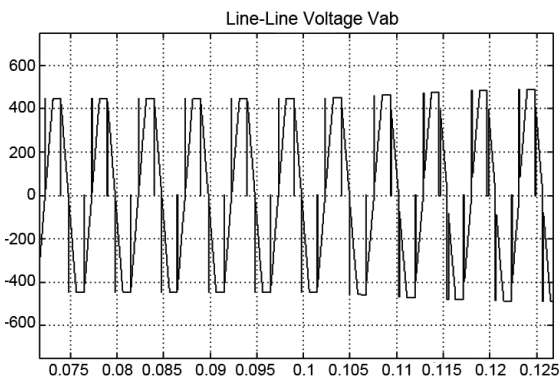
Hình 11. Đáp ứng tốc độ của động cơ khi tải được đóng sau 0,1s



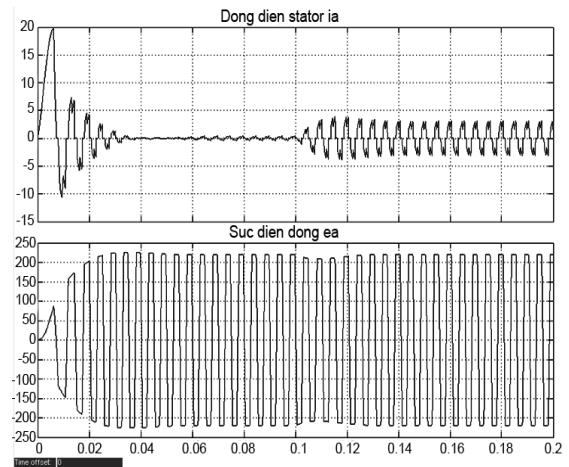
Hình 12. Đáp ứng mô men của động cơ



Hình 13. Điện áp 1 chiều đặt vào bộ biến đổi công suất



Hình 14. Điện áp dây U_{ab} của động cơ



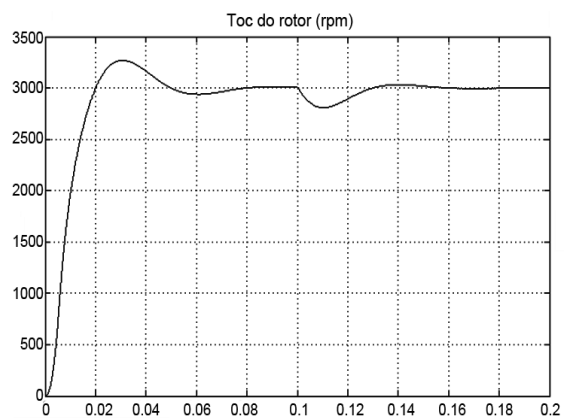
Hình 15. Đáp ứng dòng điện và sức điện động của pha A

Khi bắt đầu khởi động mô men động cơ tăng nhanh và đạt đỉnh ở giá trị xấp xỉ 28 Nm sau đó nhanh chóng ổn định và đạt đến giá trị đặt 3 Nm. Mô men tải được tác động tại thời điểm 0,1 giây, nhìn trên đồ thị ta thấy bộ điều khiển đã phản ứng nhanh chóng bằng cách tăng điện áp 1 chiều nguồn cấp để tăng mô men đáp ứng yêu cầu mô men của phụ tải.

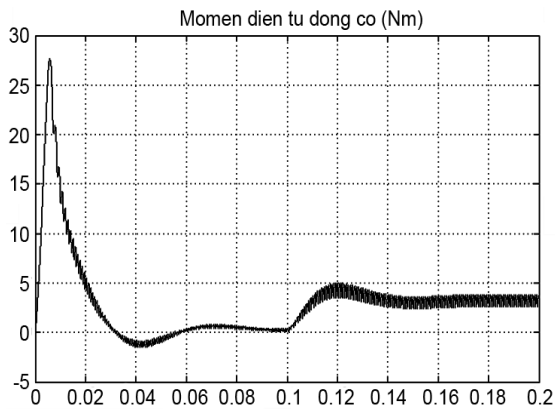
Dạng sóng dòng điện stator động cơ có dạng xung hình răng cưa như trên Hình 15. Do ảnh hưởng của bộ nghịch lưu nguồn áp. Dòng điện khởi động ban đầu tăng nhanh sau đó giảm dần theo thời gian khởi động của động cơ để đạt được tốc độ định mức. Khi mô men tải được áp dụng dòng điện stator tăng để duy trì tốc độ định mức. Mô men của động cơ cũng có dạng sóng răng cưa.

3.2. Kết quả mô phỏng khi điều chế sức phản điện động (Back-EMF) có dạng hình sin

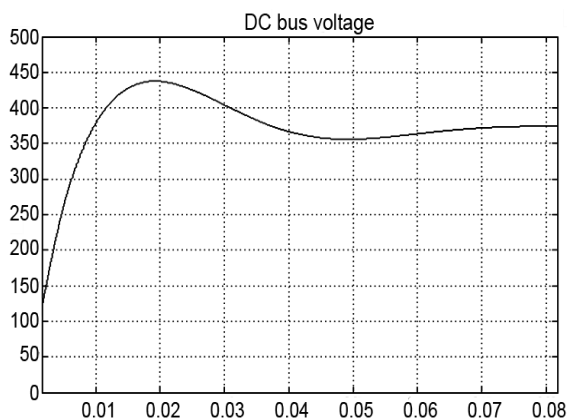
Các hình vẽ 16, 17 lần lượt miêu tả đáp ứng tốc độ và mô men của động cơ. So với



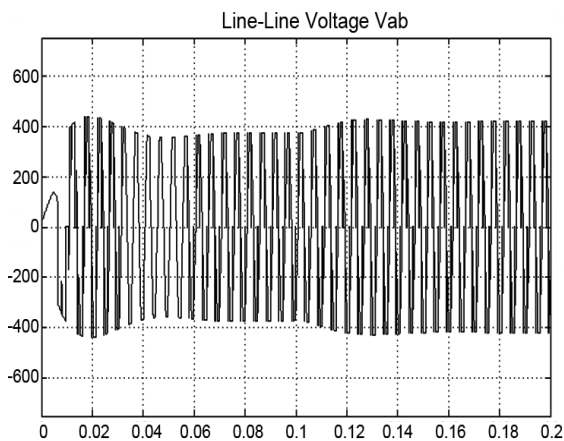
Hình 16. Đáp ứng tốc độ động cơ



Hình 17. Đáp ứng mô men



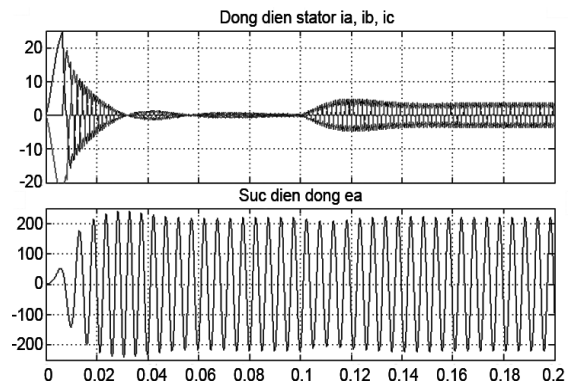
Hình 18. Điện áp nguồn 1 chiều đặt vào bộ biến đổi công suất



Hình 19. Điện áp dây đặt vào động cơ

Tài liệu tham khảo

- [1]. A. Kusko and S.M. Peeran, *Definition of Brushless Permanent Magnet Motor*, in Conf., Rec., IEEE-IAS Annual Meeting, 1 (1988), pp. 20-22.
- [2]. J. P. Johnson and M. Ehsani, *Review of Sensorless Methods for Brushless DC Motor*, in Conf., Rec., IEEE-IAS Annual Meeting, (1999), pp.143-150.

Hình 20. Đáp ứng dòng điện các pha i_a , i_b , i_c và sức điện động của pha A

Nhận xét:

Sức điện động đặt vào dây quấn động cơ có dạng gần với hình sin, biên độ dao động mô men đã nhỏ hơn so với trường hợp trước đó, tốc độ động cơ vẫn được duy trì xung quanh giá trị đặt. Dòng điện cung cấp cho động cơ cũng tăng cao nhằm duy trì mô men không đổi. Tốc độ của động cơ khi có tải đóng vào sẽ bị dao động xung quanh giá trị đặt, tuy nhiên vẫn bám tốt vào giá trị đặt. Dòng điện và sức phản điện động động cơ có dạng hình thang và hình sin, đúng với lý thuyết về động cơ một chiều không chổi than. Đặc tính dòng điện và mô men bị đập mạch lớn. Tuy nhiên, các dạng đặc tính đó vẫn bám vào các giá trị đặt và có thể chấp nhận được.

4. KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp nghịch lưu nguồn áp là có hiệu quả và phù hợp cho các loại tải biến đổi của động cơ điện một chiều không chổi than. Với những loại động cơ này thì việc tính chọn được mạch cầu IGBT thích hợp nhằm nâng cao được việc điều khiển tốc độ cũng như điều khiển mô men cho động cơ là một vấn đề quan trọng. Bên cạnh các kết quả đã đạt được, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục tìm hiểu và triển khai thiết kế chế tạo các mạch điều khiển và bộ chuyên mạch điện tử công suất sử dụng IGBT cho những động cơ có công suất lớn. Những nghiên cứu phát triển tiếp theo về điều khiển tốc độ và mô men cho động cơ BLDC thành công sẽ là một trong nhiều xu hướng giải quyết các sáng kiến xanh nhằm tiết kiệm tài nguyên quý giá mà không ảnh hưởng bất lợi đến cuộc sống của chúng ta.

- [3]. Lefley, P., L. Petkovska, and G. Cvetkovski, *Optimization of the Design Parameters of an Asymmetric Brushless DC Motor for Cogging Torque Minimization in Power Electronics and Applications*, EPE 2011, Proceeding of the 2011-14th European Conference on 2011.
- [4]. N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 2nd ed. New York: Wiley, (1995)
- [5]. Gamazo-Real, José Carlos, Ernesto Vázquez-Sánchez, and Jaime Gómez-Gil, *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*, Sensors (Basel, Switzerland) 10.7 (2010), pp. 6901–6947.

STUDY ON STABILITY SPEED AND REDUCING ELECTROMAGNETIC TORQUE RIPPLES FOR BLDC MOTOR FED BY VOLTAGE SOURCE INVERTER

Abstract:

This paper presents the study on stability speed BLDC motors in general by means of the voltage source inverter, the inverter is an IGBT full bridge. By taking the signal from the Hall sensors which mounted in the rotor to generate control signals for the inverter. The output of the inverter is connected to the stator windings of motor. Electromotive force of the motor is controlled via the control switching modes of inverter bridge. The motor speed is stable through the automatic voltage regulator power supply.

Keywords: *voltage source inverter; BLDC motor control.*