

# Nghiên cứu mô phỏng điều khiển động cơ không chổi than BLDC bằng công cụ Matlab - Simulink

PGS. TS. ĐÀO MINH QUÂN; TS. ĐÀO QUANG KHANH

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

**TÓM TẮT:** Bài báo trình bày phương pháp điều khiển tốc độ động cơ không chổi than BLDC (Brushless DC Motor) bằng bộ điều khiển PID cho đối tượng là động cơ không chổi than có cảm biến Hall cấp nguồn bằng cầu nghịch lưu 3 pha cho động cơ. Hệ thống điều khiển động cơ BLDC được mô phỏng bằng công cụ Matlab - Simulink. Kết quả nghiên cứu mô phỏng hệ thống điều khiển tốc độ động cơ BLDC làm cơ sở cho việc khảo sát và thiết kế mô hình thử nghiệm, mô hình thực tế điều khiển động cơ không chổi than. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy khả năng áp dụng các thuật toán khác nhau cho hệ thống điều khiển động cơ không chổi than BLDC.

**TỪ KHÓA:** Điều khiển động cơ không chổi than, bộ PID, nghịch lưu 3 pha, cảm biến hall.

**ABSTRACT:** This paper introduced the control method for Brushless Direct Current Motor (BLDC) using PID controller. This motor includes a Hall sensor which was supplied by 3-phase inverter. The control system was simulated by Matlab - Simulink software. The findings was employed to investigate and create the test model. In addition, the results showed the ability of the differential algorithms for BLDC's control system.

**KEYWORDS:** BLDC control, PID, three phase Inverter, hall sensor.

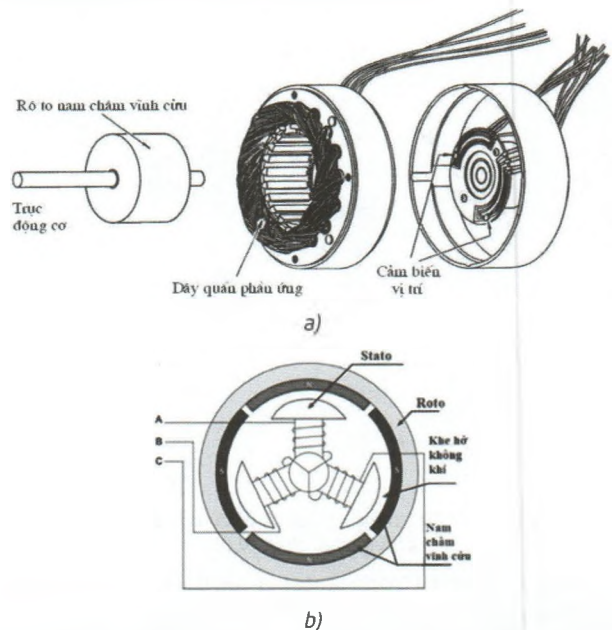
## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ điện DC không chổi than, hay còn gọi là động cơ BLDC (Brushless DC Motor) là động cơ điện được chuyển mạch bằng điện tử với các nam châm điện dòng DC di chuyển rotor xung quanh stator. Thay vì chổi than và cổ góp ở động cơ DC thông thường thì động cơ DC không chổi than sử dụng bộ điều khiển động cơ để tạo ra sự chuyển đổi năng lượng điện thành năng lượng cơ học. Vấn đề khảo sát các đặc tính làm việc của động cơ BLDC là nhiệm vụ cần thiết để thiết kế và chế tạo bộ điều khiển động cơ BLDC đã được nhiều nhà nghiên cứu thực hiện [1, 2]... Tuy nhiên, để khảo sát động cơ với mô hình đầy đủ thực hiện bằng công cụ Matlab - Simulink là công việc rất phức tạp cần được nghiên cứu sâu hơn về nguyên lý và các khối chức năng

của nó. Bài báo này trình bày phương pháp mô phỏng điều khiển động cơ BLDC bằng công cụ Matlab - Simulink.

## 2. ĐỘNG CƠ ĐIỆN KHÔNG CHỔI THAN BLDC

Cấu tạo của động cơ một chiều không chổi than giống loại động cơ xoay chiều, đó là động cơ xoay chiều đồng bộ kích thích bằng nam châm vĩnh cửu. Hình 2.1 minh họa cấu tạo, các thành phần điều khiển của động cơ một chiều không chổi than BLDC ba pha điển hình.



Hình 2.1: a - Các thành phần của động cơ không chổi than BLDC; b - nguyên lý động cơ BLDC rotor trong

Rotor bao gồm trục động cơ và các nam châm vĩnh cửu được bố trí xen kẽ giữa các cực bắc và nam. Để đạt được mô-men xoắn cực đại trong động cơ, mật độ từ thông của vật liệu phải cao. Cần có vật liệu từ tính thích hợp cho rotor để tạo ra mật độ từ trường yêu cầu.

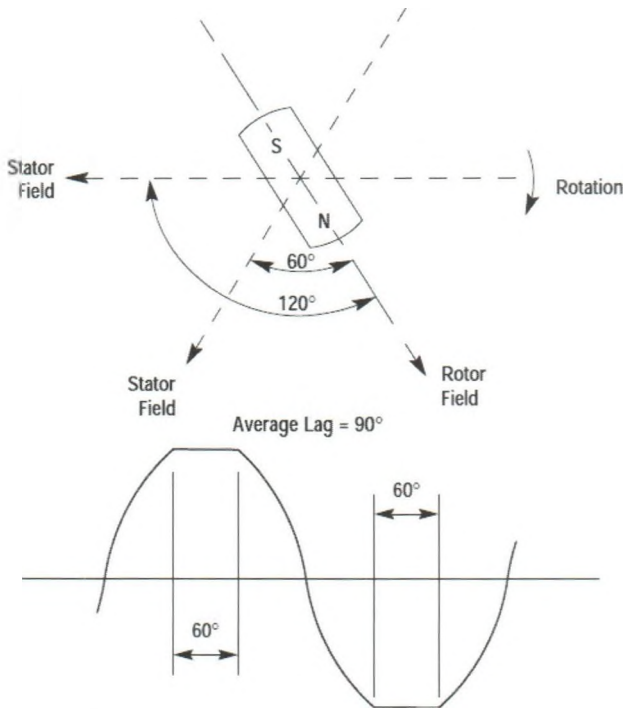
Dây quấn stator tương tự như dây quấn stator của động cơ xoay chiều nhiều pha và rotor bao gồm một hay nhiều nam châm vĩnh cửu. Điểm khác biệt cơ bản của động cơ một chiều không chổi than so với động cơ xoay chiều đồng bộ là nó kết hợp một vài phương tiện để xác định vị trí của rotor (hay vị trí của cực từ) nhằm tạo ra các tín hiệu điều khiển bộ chuyển mạch điện tử.

Động cơ BLDC sử dụng cảm biến vị trí hiệu ứng Hall (gọi tắt là cảm biến Hall). Cảm biến Hall được gắn trên stator của BLDC để phát hiện các nam châm vĩnh cửu trên rotor khi quét qua nó. Các cảm biến Hall có thể được gắn để tạo tín hiệu phản hồi lệch pha nhau  $60^\circ$  hay  $120^\circ$  điện.

**3. XÂY DỰNG MÔ PHỎNG ĐỘNG CƠ KHÔNG CHỐI THAN BẰNG SIMULINK**

**3.1. Nguyên tắc tạo mô-men quay trên động cơ không chổi than BLDC**

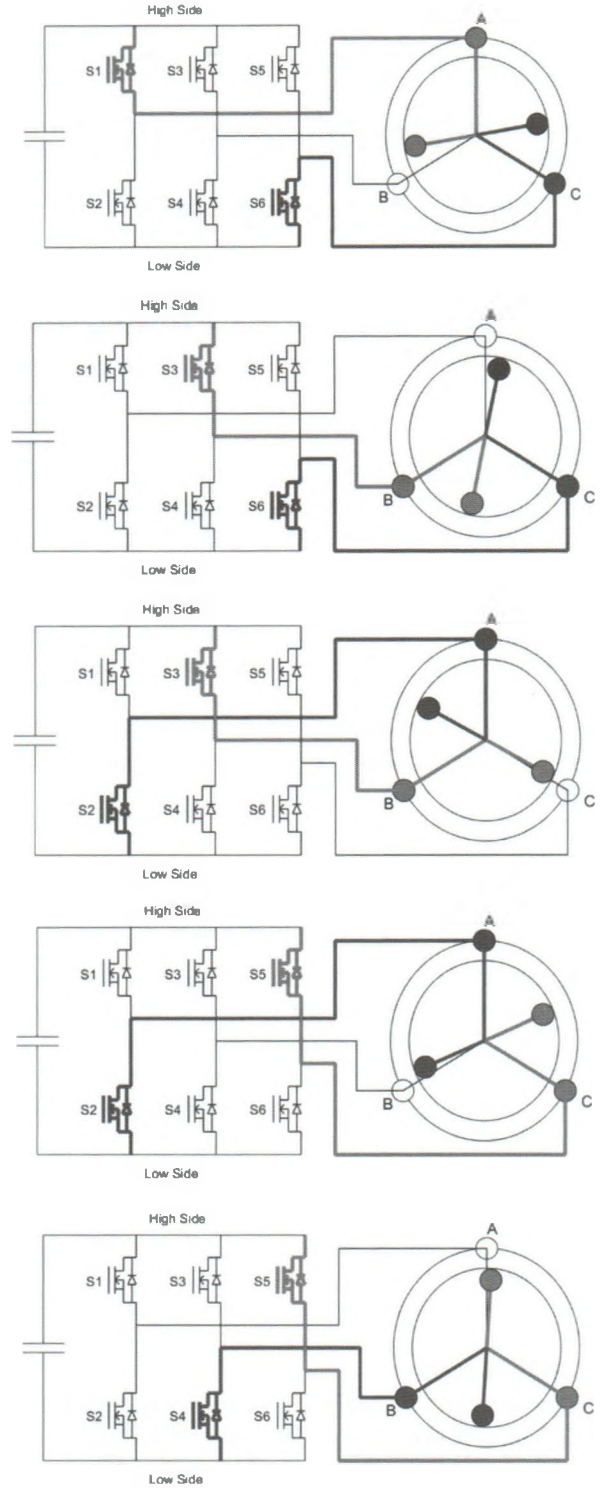
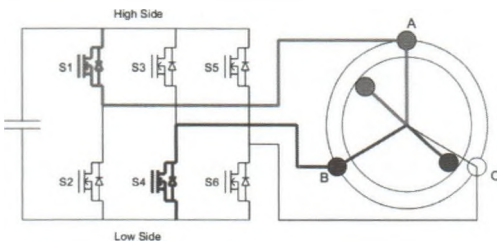
Mô-men được sinh ra do tương tác giữa từ trường tạo ra bởi những cuộn dây của stator với nam châm vĩnh cửu. Một cách lí tưởng, mô-men lớn nhất xảy ra khi hai từ trường lệch nhau  $90^\circ$  và giảm xuống khi chúng di chuyển. Để giữ động cơ quay, từ trường tạo ra bởi những cuộn dây stator phải quay "đồng bộ" với từ trường của rotor một góc  $\alpha$ .



Hình 3.1: Từ trường stator và rotor của động cơ không chổi than BLDC

Mô-men điện từ trong stator là cực đại khi góc giữa trục từ trường rotor và trục từ trường tổng trên 2 pha của stator là  $90^\circ$ . Vì động cơ được bố trí làm 3 pha nên ta phải điều khiển dòng của từng cuộn dây trong 2 pha sao cho từ cực đại trong suốt thời gian góc  $60^\circ$ .

Từ nguyên tắc điều khiển mô-men quay của rotor trong động cơ BLDC được phân tích như trên ta có nguyên tắc điều khiển như trong Hình 3.2.



Hình 3.2: Nguyên tắc điều khiển các để quay rotor mô-men lớn nhất

**3.2. Mô phỏng động cơ không chổi than**

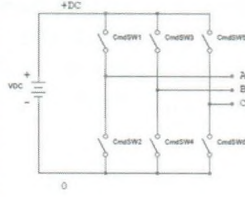
**3.2.1. Mô phỏng bộ nghịch lưu công suất**

Từ nguyên tắc điều khiển rotor quay có mô-men lớn nhất như phân tích trong mục 3.1, ta xây dựng được bộ chuyển mạch của các van dẫn như trong Hình 3.3, bộ điều khiển chuyển mạch điện tử sẽ thực hiện việc điều khiển quay rotor theo thứ tự các pha được thể hiện trong Bảng 3.1.

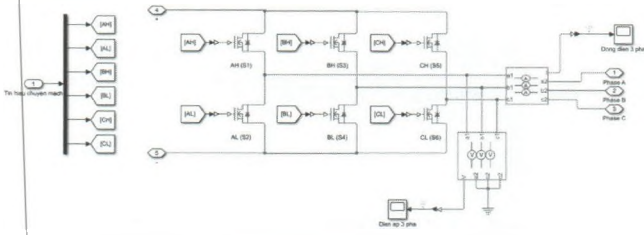


**Bảng 3.1. Thứ tự chuyển mạch các pha của động cơ BLDC**

Hall Sensors Value (Hall_CBA)	Phase	Switches
101	A-B	SW1 ; SW4
001	A-C	SW1 ; SW6
011	B-C	SW3 ; SW6
010	B-A	SW3 ; SW2
110	C-A	SW5 ; SW2
100	C-B	SW1 ; SW4



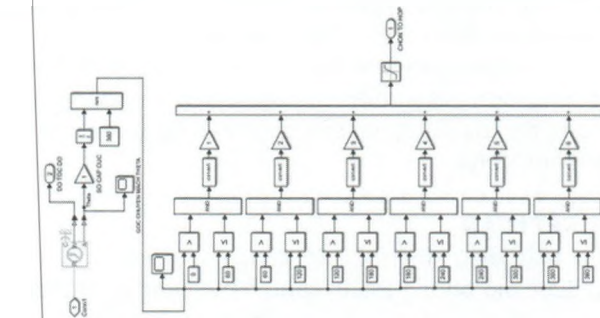
Bộ chuyển mạch hay bộ nghịch lưu công suất cho động cơ được mô phỏng bằng Simulink như thể hiện trong Hình 2.1. Trong đó: AH, BH, CH là các tín hiệu mở van SW1, SW3, SW5, các tín hiệu AL, BL, CL là các tín hiệu mở van SW2, SW4, SW6.



**Hình 3.3: Mô phỏng bộ nghịch lưu công suất cho động cơ BLDC**

**3.2.2. Mô phỏng khối cảm biến Hall**

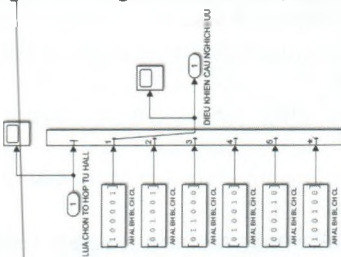
Từ Bảng 3.1, thứ tự chuyển mạch các pha của động cơ BLDC, sử dụng công cụ Simulink chúng ta xây dựng được khối mô phỏng cảm biến Hall như trong Hình 3.4.



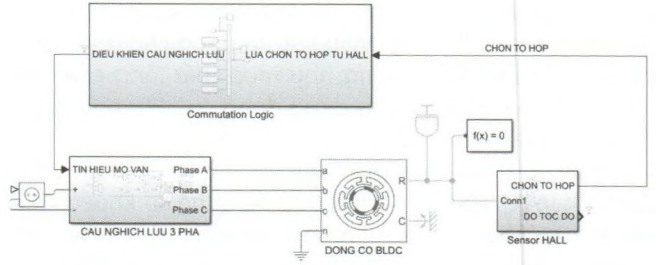
**Hình 3.4: Mô phỏng bộ cảm biến vị trí Hall ứng với các góc chuyển mạch khác nhau từ 0 - 360°**

**3.2.3. Mô phỏng bộ điều khiển chuyển mạch cho bộ nghịch lưu**

Từ Bảng 3.1, thứ tự chuyển mạch các pha của động cơ BLDC, sử dụng công cụ Simulink chúng ta xây dựng được logic chuyển mạch theo vị trí của rotor lấy từ bộ cảm biến Hall như trong Hình 3.5. Đầu ra của bộ mô phỏng chuyển mạch sẽ đưa đến bộ nghịch lưu để điều khiển tổ hợp van công suất tạo tín hiệu điều khiển động cơ không chổi than hoạt động. Cấu trúc hoàn chỉnh mô phỏng hoạt động của động cơ không chổi than được thể hiện trong Hình 3.6.



**Hình 3.5: Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển chuyển mạch cho bộ nghịch lưu**



**Hình 3.6: Sơ đồ mô phỏng Simulink động cơ không chổi than BLDC**

**4. MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ ĐỘNG CƠ KHÔNG CHỔI THAN BLDC**

**4.1. Bộ điều khiển PID số**

Bộ điều khiển số không thể lấy mẫu liên tục theo thời gian, nó cần được rời rạc ở một vài mức. Khi cho hệ số lấy mẫu ngắn bên trong thời gian vi phân có thể đạt được xấp xỉ một sai phân có giới hạn và tích phân qua việc tính tổng. Chúng ta sẽ quan tâm mỗi dạng ở một thời điểm và sai số được tính ở mỗi khoảng lấy mẫu:

$$e(n) = x(n) - y(n) \tag{1}$$

Bộ PID rời rạc đọc sai số, tính toán và xuất ngõ ra điều khiển theo một khoảng thời gian xác định (không liên tục) - thời gian lấy mẫu T. Thời gian lấy mẫu cần nhỏ hơn đơn vị thời gian của hệ thống. Bộ PID rời rạc đọc sai số, tính toán và xuất ngõ ra điều khiển theo một khoảng thời gian xác định (không liên tục) - thời gian lấy mẫu T. Thời gian lấy mẫu cần nhỏ hơn đơn vị thời gian của hệ thống. Không giống các thuật toán điều khiển đơn giản khác, bộ điều khiển PID có khả năng xuất tín hiệu ngõ ra dựa trên giá trị trước đó của sai số cũng như tốc độ thay đổi sai số. Điều này giúp cho quá trình điều khiển chính xác và ổn định hơn.

Hàm truyền của PID tương tự:

$$\frac{u}{e}(s) = H(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \tag{2}$$

Hàm chuyển đổi:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\sigma) d(\sigma) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{3}$$

Tính gần đúng theo công thức:

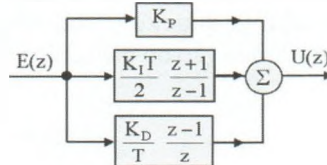
$$\int_0^t e(\sigma) d(\sigma) \approx T \sum_{k=0}^n e(k); \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(n) - e(n-1)}{T}; t = nT \tag{4}$$

n là bước rời rạc tại thời điểm t

Ta thu được:

$$u(n) = K_p e(n) + K_I \sum_{k=0}^n e(k) + K_D (e(n) - e(n-1)) \tag{5}$$

Với:  $K_I = \frac{K_p T}{T_i}; K_D = \frac{K_p T_D}{T}$

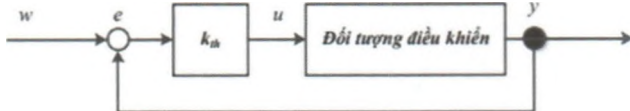


**Hình 4.1: Cấu trúc bộ điều khiển PID rời rạc**

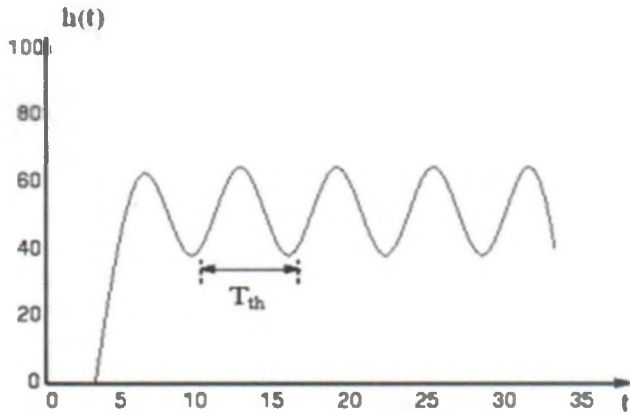
Ở Hình 4.1 mô tả cấu trúc bộ điều khiển PID rời rạc, có nhiều phương pháp để xác định các thông số của bộ điều

kiến PID, trong bài báo này sử dụng phương pháp Ziegler-Nichols thứ hai: Phương pháp này áp dụng cho đối tượng có khâu tích phân lý tưởng như mực chất lỏng của bồn chứa, vị trí hệ truyền động dùng động cơ... Phương pháp được thực hiện như sau:

Thay bộ điều khiển PID trong hệ kín bằng bộ khuếch đại tới hạn  $K_{th}$  như trong Hình 4.2. Tăng hệ số khuếch đại tới giá trị tới hạn để hệ kín ở biên giới ổn định, tức là hàm đầu ra có dạng dao động điều hòa, từ đó xác định được chu kỳ  $T_{th}$  của dao động, các hệ số trong bộ PID được xác định như trong Bảng 4.1.



Hình 4.2: Cấu trúc bộ điều khiển PID rời rạc



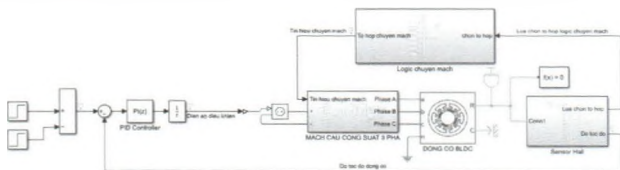
Hình 4.3: Đáp ứng nấc của hệ kín khi  $k = k_{th}$

Bảng 4.1. Hệ số PID theo phương pháp ZN thứ hai

Bộ điều khiển	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5k_{th}$	-	-
PI	$0.4k_{th}$	$0.85T_{th}$	-
PID	$0.6k_{th}$	$0.5T_{th}$	$0.125T_{th}$

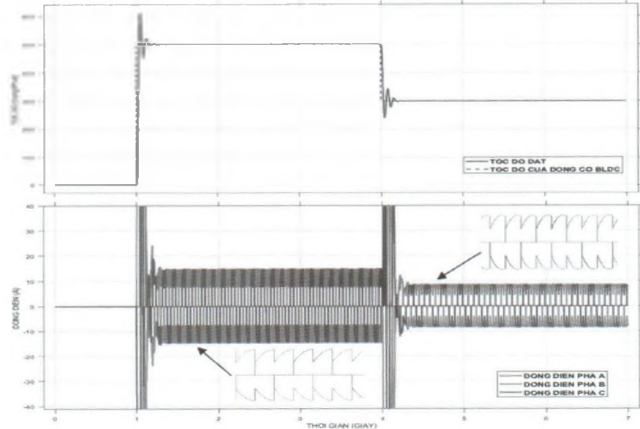
**4.2. Phương pháp điều khiển tốc độ cho động cơ BLDC bằng bộ PID**

Để điều khiển tốc độ động cơ BLDC, bài báo sử dụng bộ điều khiển PID theo nguyên tắc vòng kín điều chỉnh điện áp cấp cho động cơ (Hình 4.4). Hoạt động của hệ thống như sau: tốc độ động cơ được đo bằng cảm biến tốc độ hoặc vị trí, được đưa vào khâu xử lý. Tín hiệu ra của khâu xử lý gồm tốc độ và góc quay rotor. Tốc độ quay rotor được đưa về so sánh với tốc độ đặt, còn vị trí góc đưa vào biến áp. Sai số của tốc độ đặt và tốc độ thực được xử lý ở bộ điều khiển PID, tín hiệu ra của PID được đưa vào bộ điều chỉnh điện áp.



Hình 4.4: Sơ đồ mô phỏng điều khiển tốc độ động cơ BLDC

Cho chạy mô phỏng Hình 4.4 với tốc độ đặt là 500 vòng/phút tại thời điểm 1 giây đầu tiên, đến thời điểm giây thứ 6 giảm tốc độ đặt xuống 300 vòng/phút, hệ thống đưa ra đáp ứng tốc độ và dòng điện trên các pha của động cơ được thể hiện như trong Hình 4.5.



Hình 4.5: Đáp ứng tốc độ của động cơ BLDC khi sử dụng bộ điều khiển PID

Nhận xét: Kết quả mô phỏng trong Hình 4.5 cho thấy, tốc độ động cơ BLDC bám chính xác theo giá trị đặt với sai số sai lệch  $\Delta n = 0$ , sai lệch tính  $\delta\% = 0$ , thời gian quá độ từ 0,1 giây. Hệ thống hoạt động ổn định khi đạt đến vị trí tốc độ yêu cầu. Ngoài ra, trong kết quả mô phỏng cho thấy dạng sóng dòng điện trên các pha của động cơ ở 2 tốc độ khác nhau là 500 v/p và 300v/p là khác nhau, dạng sóng dòng điện trên các pha phản ánh đúng quá trình quá độ của đóng mở của các van điều khiển của bộ nghịch lưu 3 pha.

**5. KẾT LUẬN**

Bài toán điều khiển tốc độ động cơ không chổi than BLDC được mô phỏng thành công bằng công cụ Matlab - Simulink, đáp ứng được yêu cầu đặt ra là: bám chính xác tốc độ đặt, sai lệch tốc độ là bằng không, sai lệch tính bằng không. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống phản ứng nhanh và chính xác khi có lệnh đặt tốc độ. Việc mô phỏng một động cơ không chổi than bằng công cụ Matlab - Simulink được thực hiện chi tiết và chính xác như với mô hình động cơ thực. Kết quả bài báo là cơ sở để khảo sát và nghiên cứu thiết kế hệ thống điều khiển động cơ không chổi than BLDC thực.

**Tài liệu tham khảo**

- [1]. Nguyễn Hồng Thanh, Nguyễn Phúc Hải (1999), *Máy điện trong thiết bị tự động*, NXB. Giáo dục.
- [2]. Serda Uygur (2012), *An FPGA Based BLDC motor control system*, Master of Science in Electrical and Electronics Engineering Department.
- [3]. Md. Rifat Hazari, Effat Jahan (2014.), *Design of a Brushless DC (BLDC) Motor Controller*, International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT).
- [4]. Alireza Tashakori Abkenar, Mehran Ektesabi (2015),

*FPGA Based Controller Drive of BLDC Motor Using Digital PWM Technique*, IEEE PEDS.

[5]. Vinod KR Singh Patel, A.K.Pandey (2013), *Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor*, International Journal of Scientific and Research Publications.

[6]. Vishal Srivastava<sup>1</sup>, Ashish Chourasia<sup>2</sup> and Shaba Anjum (2014), *Performance Analysis of Brushless DC Motor Using Intelligent Controllers and Minimization of Torque Ripples*, International Journal of Electronic and Electrical Engineering.

[7]. Md. Rifat Hazari, Effat Jahan (2014), *Design of a Brushless DC (BLDC) Motor Controller*, International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT).

[8]. Rubi batham, Rameshwar singh (2017), *Speed Control of Brushless DC Motor Using Different Intelligence Schemes*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).

[9]. A. Tashakori, M. Hassanudeen and M. Ektesabi (2015), *FPGA Based Controller Drive of BLDC Motor Using Digital PWM Technique*, IEEE PEDS.

[10]. Faa-Jeng Lin, Chih-Kai Chang and Po-Kai Huang (2007), *FPGA-Based Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control for Linear Induction Motor Drive*, IEEE Transactions on Power Electronics.

[11]. K. Giridharan, Gautham.R (2013), *FPGA Based Digital Controllers for BLDC Motors*, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA).

[12]. Mohammed Zoheb, Vijeyta Sharma M, Mrs. ShaliniVashishtha, Mr. MohammedShahid (2013), *Implementation Of Brushless DC Motor Using FPGA Interface*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).

[13]. Jisha Kuruvilla<sup>1</sup>, Basil George<sup>2</sup>, Deepu K3, Gokul P.T<sup>4</sup>, Mathew Jose (2015), *Speed Control of BLDC Motor Using FPGA*, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering.

[14]. Uma Gupta (2012), *Research on Permanent Magnet BLDC for small electric vehicle*, Electrical and Electronic engineering, Amity University.

[15]. Krzysztof Krykowski, Janusz Hetmańczyk (2013), *Constant Current Models of Brushless DC Motor*, Electrical, Control and Communication Engineering.

**Ngày nhận bài: 28/12/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 19/01/2022**

**Người phản biện: PGS. TS. Trần Anh Dũng  
TS. Đồng Xuân Thìn**