

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐỘNG CƠ TỰ NÂNG KHÔNG LỖI THÉP TRÊN NỀN TẢNG CÔNG CỤ MÔ PHỎNG TYPHOON HIL

STUDY THE CONTROL MODEL FOR SELF - BEARING SLOTLESS MOTOR SYSTEM ON TYPHOON HIL SOFTWARE

Nguyễn Đức Dương

TÓM TẮT

Nghiên cứu về động cơ không lỗi thép là một vấn đề đang được quan tâm ở trong nước cũng như trên thế giới. Đã có rất nhiều các nghiên cứu cải thiện và nâng cao chất lượng điều khiển cho động cơ không lỗi thép. Tác giả tiếp thu theo một số hướng đi, đóng góp thêm những lý luận về động cơ không lỗi thép làm cơ sở cho những nghiên cứu tiếp theo. Thông qua việc mô tả mô hình toán học cho động cơ không lỗi thép, từ đó nghiên cứu xây dựng mô hình điều khiển cho hệ thống truyền động trên nền tảng công cụ mô phỏng Typhoon HIL. Với những nghiên cứu đó sẽ góp phần thúc đẩy sự phát triển của động cơ tự nâng không lỗi thép ở trong nước. Tiến dần tới việc ứng dụng động cơ tự nâng không lỗi thép trong các thiết bị máy móc và trong các lĩnh vực của khoa học kỹ thuật.

Từ khóa: Động cơ tự nâng không lỗi thép, phần mềm Typhoon HIL.

ABSTRACT

Study on Self-Bearing Slotless Motor is an issue that is of interest both domestically and internationally. There have been many studies to improve and improve the quality of control for Self-Bearing Slotless Motor. The author acquires a number of directions, contributing more theories about Self-Bearing Slotless Motor as a basis for further study. Through the description of the mathematical model for Self-Bearing Slotless Motor, then research to build a control model for magnetic drive system on Typhoon HIL software. With these studies, will contribute to promoting the development of Self-Bearing Slotless Motor in the country. Moving forward to the application of Self-Bearing Slotless Motor in machinery equipment and in the fields of science and technology

Keywords: Self-Bearing Slotless Motor, Typhoon HIL software.

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: ndduong.ddt@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/4/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 29/5/2019

Ngày chấp nhận đăng: 15/8/2019

1. MỞ ĐẦU

Động cơ tự nâng không lỗi thép là một trong những phát minh rất quan trọng với mục đích giảm thiểu tối đa lực ma sát giữa trục quay trong chi tiết máy, giúp các chuyển động dễ dàng hơn, cho hiệu suất cao hơn trong ứng dụng chuyển động của các ngành kỹ thuật. Trong lịch

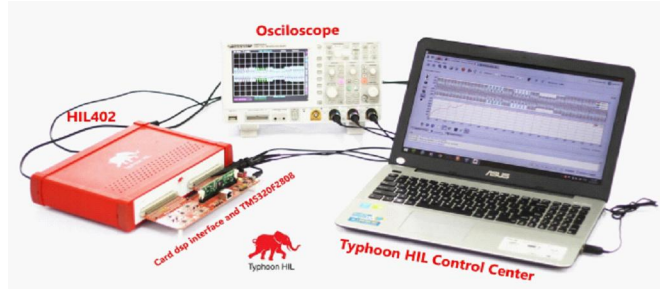
sử phát triển đã có rất nhiều nghiên cứu quan trọng về việc cải thiện chất lượng điều khiển, thay thế các động cơ ổ đỡ bi bằng động cơ tự nâng không lỗi thép. Tại phòng thí nghiệm Cơ điện tử, Trường Đại học Kentucky (Hoa Kỳ), các phân tích và đánh giá về động cơ tự nâng không lỗi thép cho thấy: mô men và lực nâng có thể thực hiện được với số lượng cực của nam châm lớn, độ lớn của mô men và lực nâng có thể được gia tăng theo chiều dày của nam châm, động cơ có thể hoạt động ổn định nếu sự sai lệch giữa dòng điện và từ trường nam châm nhỏ [1]. Nhóm tác giả S. Ueno đã chế tạo và thử nghiệm động cơ này với thông số: đường kính 152mm, chiều dài 25,4mm, lực đỉnh lên tới 213,6N và mô men đỉnh đạt 24Nm [2]. Tại phòng thí nghiệm điện tử công suất của Viện Công nghệ Liên bang Thụy sỹ, các nhà nghiên cứu đã thực hiện chế tạo động cơ loại này đạt được tốc độ 500.000 rpm [3] điều mà các động cơ thông thường chưa thực hiện được. Tại trường Đại học Ritsumeikan (Nhật Bản) một cấu trúc động cơ mới đã được nghiên cứu bằng cách thay đổi cách thức chế tạo đã đơn giản hóa được phương pháp điều khiển [4]. Ngoài ra còn một số nghiên cứu bổ sung hoàn thiện thiết kế đã được công bố [5, 6, 7]. Tại Việt Nam loại động cơ này còn tương đối mới nên các công trình nghiên cứu chủ yếu thực hiện trong phòng thí nghiệm, mặc dù các công bố cho thấy khả năng làm việc của chúng nhưng vẫn chưa được ứng dụng rộng rãi.



Hình 1. Động cơ tự nâng không lỗi thép

Đối tượng cụ thể của nghiên cứu là động cơ tự nâng không lỗi thép sử dụng 6 pha được miêu tả cụ thể trong

các phần sau. Mục đích của tác giả tìm hiểu về động cơ tự nâng không lõi thép, nghiên cứu phương pháp điều khiển ổn định vị trí đối với cấu trúc một động cơ cụ thể. Mô hình hóa động cơ tự nâng không lõi thép và kiểm chứng kết quả trên nền tảng công cụ mô phỏng Typhoon HIL [9] tạo tiền đề cho các nghiên cứu mở rộng sau này.

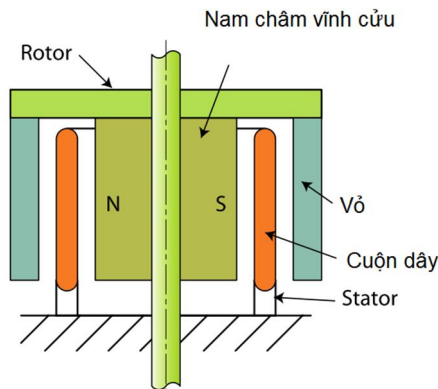


Hình 2. Thiết bị mô phỏng Typhoon HIL

2. CẤU TẠO VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA ĐỘNG CƠ TỰ NÂNG KHÔNG LỖI THÉP

2.1. Cấu tạo

Cấu tạo của động cơ tự nâng không lõi thép bao gồm rotor cố định theo phương z và stator mang cuộn dây không sử dụng lõi thép (hình 3).



Hình 3. Cấu tạo của động cơ

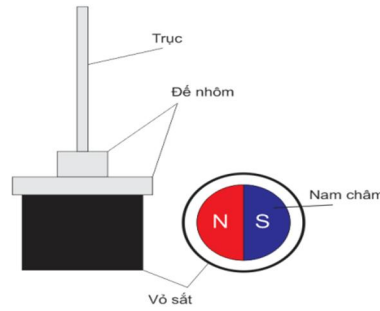
a) Cấu tạo rotor gồm:

- Nam châm hai cực hình trụ
- Vỏ sắt bao quanh
- Trục quay
- Đế nhôm kết nối các thành phần của động cơ

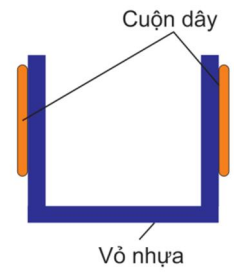
Khoảng cách của khe hở không khí giữa nam châm và vỏ sắt không đổi nhằm đảm bảo một từ trường ổn định của động cơ. Các đường sức từ đi ra khỏi bề mặt nam châm có xu hướng quay vòng về phía cực nam. Vì vậy vỏ sắt có vai trò định hướng khép mạch từ, hay nói cách khác các đường sức từ sẽ đi ra vuông góc với tiếp tuyến tại điểm đó, tạo sự phân bố đều cho từ trường nằm giữa rotor và stator (hình 4).

b) Stator

Stator (hình 5) bao gồm cuộn dây sáu pha được đặt trên khung nhựa, cuộn dây được thiết kế đặc biệt với dây quấn được trải theo hình lục giác sau đó được quấn quanh một lõi nhựa hình trụ.



Hình 4. Cấu tạo của Rotor



Hình 5. Cấu tạo của Stator

2.2. Mô hình toán học của động cơ tự nâng không lõi thép

Bài báo này là nghiên cứu phát triển dựa trên các kết quả đã công bố [1,2,3,4,5,6], do vậy, để tránh sự lặp lại, việc xây dựng từng bước mô hình đối tượng sẽ được lược bỏ. Trong bài báo này tác giả chỉ đưa ra mô hình đối tượng, chi tiết quá trình mô hình hóa tham khảo [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Ta có được phương trình dòng điện cho 6 pha của stator (1) và phương trình tổng quát mô tả động cơ tự nâng không lõi thép (2) như sau:

$$\begin{cases} i_{a,d} = i_d \cos(\psi) + i_q \sin(\psi) \pm A_m \cos(\phi) \\ i_{b,e} = i_d \cos(\psi - 2\pi/3) + i_q \sin(\psi - 2\pi/3) \pm A_m \cos(\phi - 4\pi/3) \\ i_{c,f} = i_d \cos(\psi - 4\pi/3) + i_q \sin(\psi - 4\pi/3) \pm A_m \cos(\phi - 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tau = k_{nm} k_m A_m \sin(\phi_m - \psi + \theta_0 + \pi/4) \\ f_x = -k_{nb} k_b \{i_d \sin(2\theta_0) - i_q \cos(2\theta_0)\} \\ f_y = k_{nb} k_b \{i_d \cos(2\theta_0) + i_q \sin(2\theta_0)\} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

- $i_{a,b,c,d,e,f}$ là các giá trị dòng điện trong các pha a, b, c, d, e, f;
- A_m là cường độ dòng điện trong stator;
- ϕ_m là góc pha tương ứng với A_m ;
- ψ là góc quay của roto;
- i_d là dòng điện hướng dọc trục;
- i_q là dòng điện hướng vuông góc với trục;
- A_m là cường độ dòng điện trong motor;
- τ là mô men động cơ;
- f_x là lực nâng theo phương x;
- f_y là lực nâng theo phương y.

Và
$$k_{nm} = 1 + 2\cos\left(\frac{\pi}{3n}\right) + 2\cos\left(\frac{2\pi}{3n}\right) + \dots + 2\cos\left(\frac{(n-1)\pi}{6n}\right) \quad (3)$$

Và
$$k_{nb} = 1 + 2\cos\left(\frac{2\pi}{3n}\right) + 2\cos\left(\frac{4\pi}{3n}\right) + \dots + 2\cos\left(\frac{(n-1)\pi}{3n}\right)$$

Từ các phương trình này, các giải pháp điều khiển động cơ sẽ được đề xuất cho phần tiếp theo.

3. CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN CHO ĐỘNG CƠ TỰ NÂNG KHÔNG LỖI THÉP

Theo phân tích mô hình toán học của động cơ tự nâng không lõi thép (2) ta có những đánh giá về phương pháp điều khiển:

- Lực nâng phụ thuộc vào hai thành phần có thể điều khiển được là dòng điện i_d và i_q . Nó hoàn toàn độc lập về mặt toán với mô men quay của động cơ. Do đó, các bộ điều khiển vị trí là các bộ điều khiển độc lập.

- Trong trường hợp thiết lập để đưa động cơ về vị trí lý tưởng góc $\theta = 0^\circ$ các phương trình lực ở trên trở thành:

$$\begin{cases} F_x = k_{nb} k_b i_q \\ F_y = k_{nb} k_b i_d \end{cases} \quad (4)$$

Dễ dàng điều khiển vị trí khi đối tượng của bộ điều khiển chỉ là một khâu tích phân bậc 2.

- Đối với phương trình mô men có thành phần ψ là vận tốc góc của từ thông rotor và ϕ_m là vận tốc góc của dòng điện. Để mô men sinh ra độc lập không phụ thuộc vào vị trí rotor thì tổng:

$$\left(\phi_m - \psi + \theta^0 + \frac{\pi}{4} \right) \quad (5)$$

phải là hằng số khác 0. Tuy nhiên, góc của rotor khi quay là một hàm phụ thuộc thời gian với tham số là vận tốc góc của động cơ. Do đó, góc pha ϕ_m cũng phải là hàm số của ψ . Ta có biểu thức sau:

$$\psi = \omega t \text{ và } \phi = \omega t + \Delta\theta \quad (6)$$

với ω là vận tốc góc của động cơ. Hay ta có thể phát biểu:

$$\phi = \psi + \Delta\theta \quad (7)$$

Nếu bộ điều khiển thỏa mãn biểu thức trên với $\Delta\theta \neq 0$ thì mô men động cơ không đổi và chỉ phụ thuộc vào biến điều khiển A_m . Từ đây tác giả đề xuất việc thiết kế bộ điều khiển vòng kín cho vị trí và tốc độ của động cơ

3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Như đã miêu tả trong công thức (7) bộ điều khiển vòng kín xác định góc dòng điện thông qua xác định giá trị thực của vị trí rotor từ đó có thể xác định giá trị dòng điện một cách chính xác. Để đơn giản ta giả sử góc ban đầu $\theta^0 = 0$ và các giá trị ϕ_m thỏa mãn biểu thức:

$$\phi_m = \frac{\pi}{4} + \psi \quad (8)$$

Thay vào (5) ta có:

$$\phi_m + \psi + \theta_0 + \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

Như vậy, phương trình mô tả động cơ lúc này có thể viết lại:

$$\begin{cases} \tau = k_{nm} k_m A_m \\ F_x = k_{nb} k_b i_q \\ F_y = k_{nb} k_b i_d \end{cases} \quad (10)$$

Do đó, mô men có thể được điều khiển bởi A_m , lực nâng có thể được điều khiển bằng i_d và i_q . Sơ đồ điều khiển được miêu tả như trong hình 6. Trong cấu trúc này các bộ điều khiển PID cho mạch vòng vị trí sẽ tạo luật điều khiển dòng điện i_d và i_q tương ứng với vị trí động cơ theo phương x và

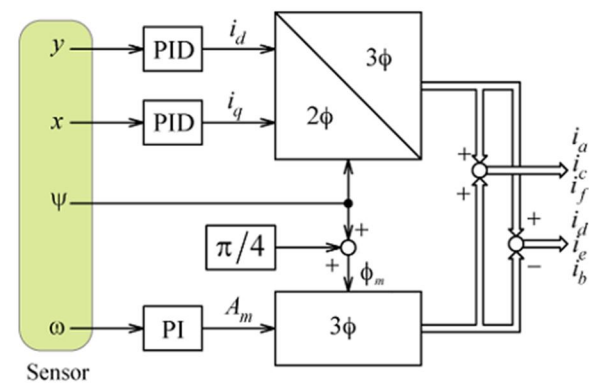
phương y, các giá trị dòng điện pha $abcdef$ được tính toán từ dq thông qua bộ 2/3 bằng cách sử dụng công thức:

$$\begin{cases} i_{a,d}^f = i_d \cos(\psi) + i_q \sin(\psi) \\ i_{b,e}^f = i_d \cos(\psi - 2\pi/3) + i_q \sin(\psi - 2\pi/3) \\ i_{c,f}^f = i_d \cos(\psi - 4\pi/3) + i_q \sin(\psi - 4\pi/3) \end{cases} \quad (11)$$

Với góc ψ được lấy từ bộ phản hồi vị trí. Bộ điều khiển PI cho mạch vòng tốc độ điều chỉnh sai lệch tốc độ bằng cách điều khiển biên độ thành phần dòng điện tạo mô men A_m . Kết hợp công thức (8) ta có thành phần dòng điện tạo mô men được tính toán dựa như công thức sau:

$$\begin{cases} i_{a,d}^t = \pm A_m \cos(\psi + \pi/4) \\ i_{b,e}^t = \pm A_m \cos(\psi - 13\pi/3) \\ i_{c,f}^t = \pm A_m \cos(\psi - 5\pi/3) \end{cases} \quad (12)$$

Hai thành phần dòng điện này được cộng lại với nhau tạo thành dòng điện stator:



Hình 6. Bộ điều khiển vòng kín

Các tín hiệu đo bao gồm các giá trị về vị trí của động cơ theo trục x và y, vận tốc góc của rotor ω và vị trí góc rotor ψ phương pháp này có được ưu điểm là độ chính xác rất cao.

3.2. Tính toán tham số bộ điều khiển PI và PID cho mạch vòng tốc độ và vị trí

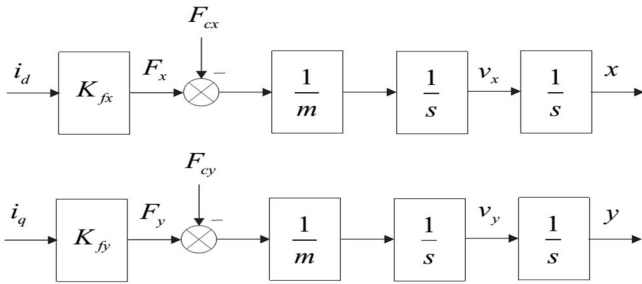
Đối tượng của hệ thống được mô tả trong phương trình (10). Nhận thấy với cấu trúc điều khiển đã trình bày, các bộ điều khiển hoạt động độc lập, bộ điều khiển vị trí phụ thuộc vào các giá trị x và y, bộ điều khiển tốc độ phụ thuộc vào tốc độ phản hồi và tốc độ đặt. Gọi các giá trị tham số trong mô hình đối tượng lần lượt là K_T, K_{fx}, K_{fy} ta có mô hình chung cho cả hai bộ điều khiển như sau:

$$\begin{cases} \tau = K_T A_m \\ F_x = K_{fx} i_q \\ F_y = K_{fy} i_d \end{cases} \quad (13)$$

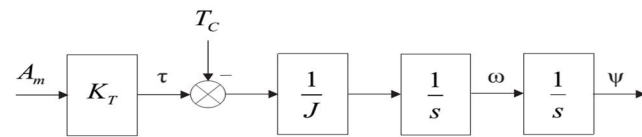
Trong đó:

- $K_T = k_{nm} k_m$
- $K_{fx} = k_{nb} k_b$
- $K_{fy} = k_{nb} k_b$

Nhận thấy mô hình đối tượng lúc này chỉ bao gồm các biến độc lập vào ra điều khiển đơn lẻ từng đại lượng nên ta có mô hình đối tượng được trình bày như trong hình 7, 8.



Hình 7. Mô hình đối tượng bộ điều khiển vị trí



Hình 8. Mô hình đối tượng cho bộ điều khiển mạch vòng tốc độ

Trong hai mô hình này, giá trị m là khối lượng của rotor, J là mô men quán tính của rotor. Để có thể xấp xỉ mô hình về dạng hàm truyền ở trên ta coi chuyển động xung quanh gốc tọa độ O là chuyển động tịnh tiến, ảnh hưởng của khớp nối động cơ là không đáng kể với góc dao động nhỏ:

Lúc này ta thu được hàm truyền của động cơ như sau:

- Hàm truyền giữa dòng điện i_d với vị trí x:

$$G_x(s) = \frac{x(s)}{i_d(s)} = \frac{K_{fx}}{ms^2} = \frac{K_f}{s^2} \quad (14)$$

- Hàm truyền giữa dòng điện i_q với vị trí y:

$$G_y(s) = \frac{y(s)}{i_q(s)} = \frac{K_{fy}}{ms^2} = \frac{K_f}{s^2} \quad (15)$$

- Hàm truyền giữa biên độ A_m và tốc độ ω :

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{A_m(s)} = \frac{K_T}{Js} = \frac{K_{T\omega}}{s} \quad (16)$$

Trong đó, hệ số K_f được ký hiệu chung cho hai trường hợp bộ điều khiển vị trí:

$$K_f = \frac{k_{nb}k_n}{m} \quad (17)$$

Các đối tượng hàm truyền vị trí là các khâu tích phân bậc hai cần sử dụng bộ điều khiển PID như đã lựa chọn ở trên. Bộ điều khiển tốc độ là khâu tích phân bậc 1 do đó chỉ cần bộ điều khiển PI là đủ.

Tham số lựa chọn cho bộ điều khiển vị trí PID:

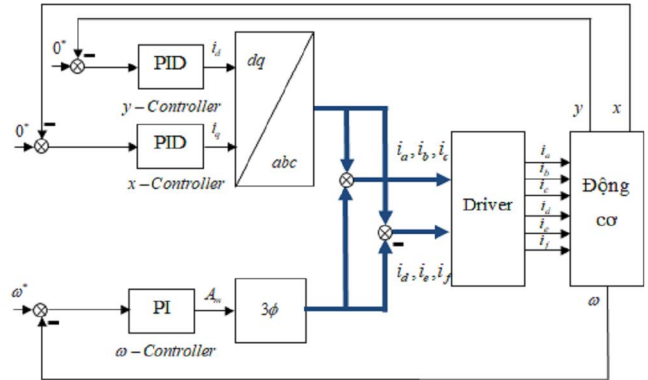
$$\begin{cases} K_f k_p T_D = 3s_0 \\ K_f k_p = 3s_0^2 \\ \frac{K_f k_p}{T_I} = s_0^3 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_p = \frac{3s_0^2}{K_f} \\ T_I = \frac{3}{s_0} \\ T_D = \frac{1}{s_0} \end{cases} \quad (18)$$

Tham số lựa chọn cho bộ điều khiển tốc độ PI:

$$\begin{cases} K_{T\omega} k_{p\omega} = 2s_0 \\ \frac{K_{T\omega} k_{p\omega}}{T_I} = s_0^2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_{p\omega} = \frac{2s_0}{K_{T\omega}} \\ T_I = \frac{2}{s_0} \end{cases} \quad (19)$$

4. MÔ PHỎNG BẰNG CÔNG CỤ TYPHOON HIL

Để thực hiện các nghiên cứu về mặt lý thuyết ta sử dụng công cụ mô phỏng mới trên nền tảng Typhoon HIL. Với các phân tích đã nêu ở trên có thể miêu tả hệ thống bằng sơ đồ khối như hình 9.



Hình 9. Cấu trúc điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép

Giá trị đặt cho bộ điều khiển vị trí x, y là 0 vì mục tiêu cho bộ điều khiển là giữ trục động cơ tại vị trí cân bằng. Thành phần dòng điện tạo lực nâng cân bằng về pha và độ lớn có nghĩa là:

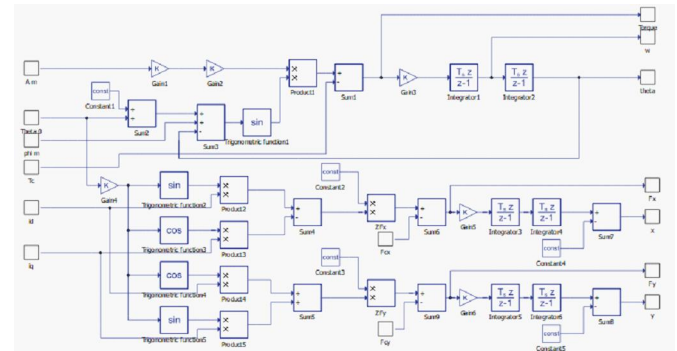
$$i_a = i_b = i_c = i_d = i_e = i_f \quad (20)$$

Thành phần dòng điện tạo mô men quay cân bằng về độ lớn nhưng ngược pha có nghĩa là:

$$i_a = i_b = i_c = -i_d = -i_e = -i_f \quad (21)$$

Do đó các dòng điện pha abc bằng tổng hai thành phần tạo lực nâng và mô men, còn các dòng điện def bằng hiệu hai thành phần đó. Bộ driver có nhiệm vụ điều chỉnh dòng điện một cách chính xác, ở trong mô hình này sử dụng bộ khuếch đại nguồn dòng. Do đặc tính động học của khâu driver tác động nhanh nên có thể bỏ qua trong quá trình xây dựng mô hình.

4.1. Xây dựng mô hình trên Typhoon HIL



Hình 10. Mô hình động cơ trên Typhoon HIL

Mô hình động cơ được xây dựng trên biểu thức (2) sử dụng công cụ Typhoon HIL ta xây dựng được cấu trúc động cơ như hình 10.

Tham số động cơ được đặt như bảng 1.

Bảng 1. Tham số động cơ

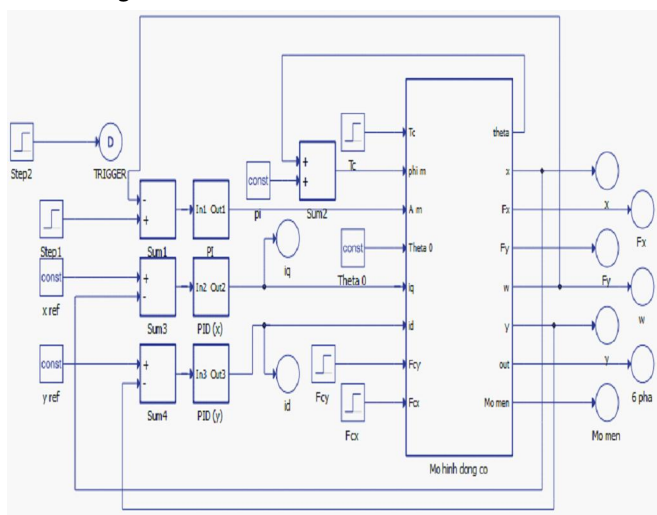
STT	Tham số	Ký hiệu	Giá trị
1	Khối lượng động cơ	m	0,5 [kg]
2	Bán kính rotor	r	0,019[m]
3	Góc pha ban đầu	Θ_0	0°
4	Từ trường cực đại rotor	B_0	0,59[T]
5	Chiều dài đoạn l_p	l_p	0,008[m]
6	Chiều dài đoạn l_t	l_t	0,006[m]

Tham số mô phỏng được tính toán bằng các công thức (3) các thông số bộ điều khiển vị trí và tốc độ vòng kín được tính theo công thức (18) và (19) như bảng 2.

Bảng 2. Tham số mô phỏng

STT	Tham số		Giá trị
1	Hệ số khuếch đại bộ điều khiển tốc độ	k_{ω}	0,1713
2	Hệ số tích phân bộ điều khiển tốc độ	$k_{I\omega}$	0,04
3	Hệ số khuếch đại bộ điều khiển vị trí	k_{pf}	2,546
4	Hệ số tích phân bộ điều khiển vị trí	k_{if}	0,0052
5	Hệ số vi phân bộ điều khiển vị trí	k_{df}	0,0174
6	Vị trí ban đầu của rotor theo phương x	x_0	$5e-4$
7	Vị trí ban đầu của rotor theo phương y	y_0	$-5e-4$
8	Hệ số mô men động cơ	k_m	$-5,7 \times 10^{-4}$
9	Hệ số mô men động cơ	k_{nm}	92,4
10	Hệ số lực nâng động cơ	k_b	-0,0277
11	Hệ số lực nâng động cơ	K_{nb}	45,979

Trong hình 11 động cơ được đóng gói trong một Subsystem ký hiệu "Mo hình dong co" các bộ điều khiển PI, PID tương ứng với mạch vòng vị trí và mạch vòng tốc độ bố trí ở bên ngoài.



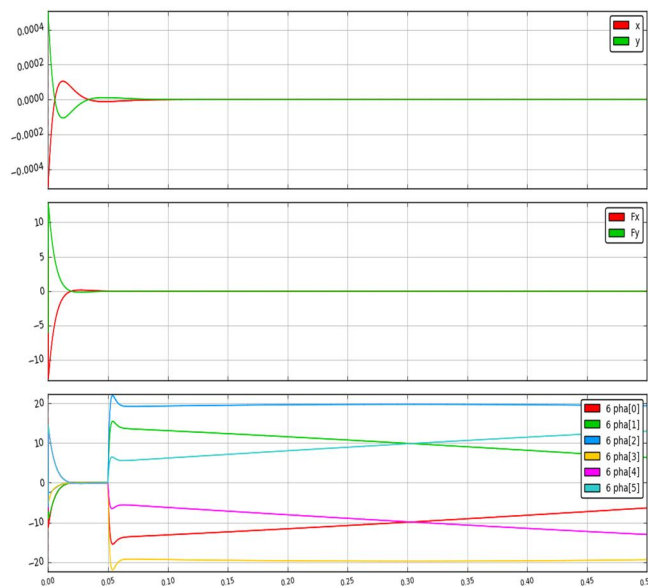
Hình 11. Mô hình mô phỏng mạch vòng kín trên Typhoon HIL

4.2. Kết quả mô phỏng

Ta mô phỏng kiểm chứng với 4 kịch bản để kiểm tra đáp ứng của bộ điều khiển vị trí và tốc độ:

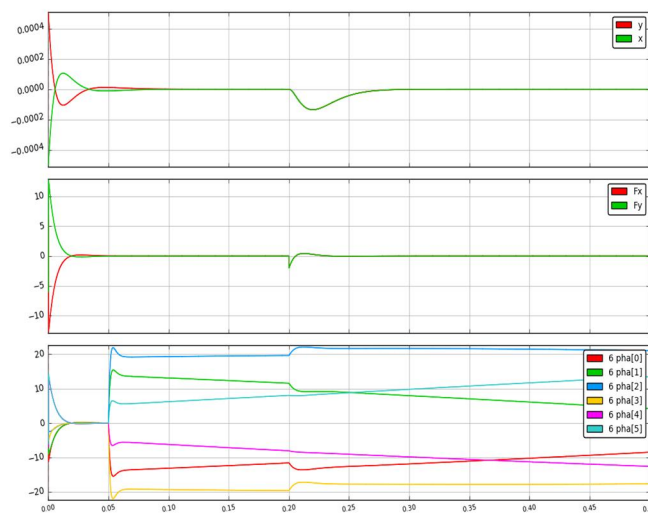
- Kịch bản 1: khi vị trí ban đầu của rotor tại điểm $x_0 = -0,5\text{mm}$ $y_0 = 0,5\text{mm}$.
- Kịch bản 2: khi có lực tác động vào rotor tại thời điểm $t = 0,2\text{s}$, tác dụng lực có độ lớn 1N.
- Kịch bản 3: khi mô men cân bằng 0Nm.
- Kịch bản 4: khi mô men cân bằng 1Nm tại thời điểm $t = 0,2\text{s}$.

* Kịch bản 1: Mô phỏng với vị trí ban đầu $x = -0,5\text{mm}$, $y = 0,5\text{mm}$ so với trục tọa độ Oxy được kết quả như hình 12.



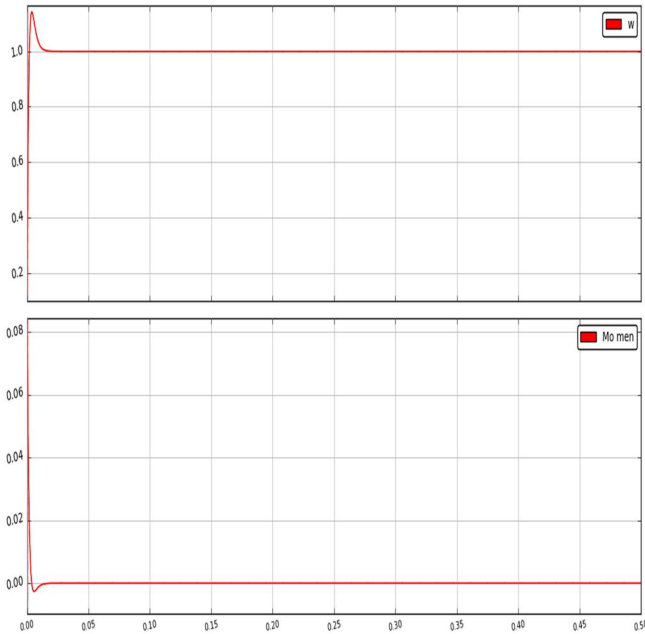
Hình 12. Kết quả mô phỏng trường hợp vị trí ban đầu $x = 0,5\text{mm}$, $y = -0,5\text{mm}$

* Kịch bản 2: Mô phỏng với vị trí ban đầu $x = -0,5\text{mm}$, $y = 0,5\text{mm}$ so với trục tọa độ Oxy. Tại thời điểm $t = 0,2\text{s}$, tác dụng lực theo phương x và phương y có độ lớn 1N được kết quả như hình 13.



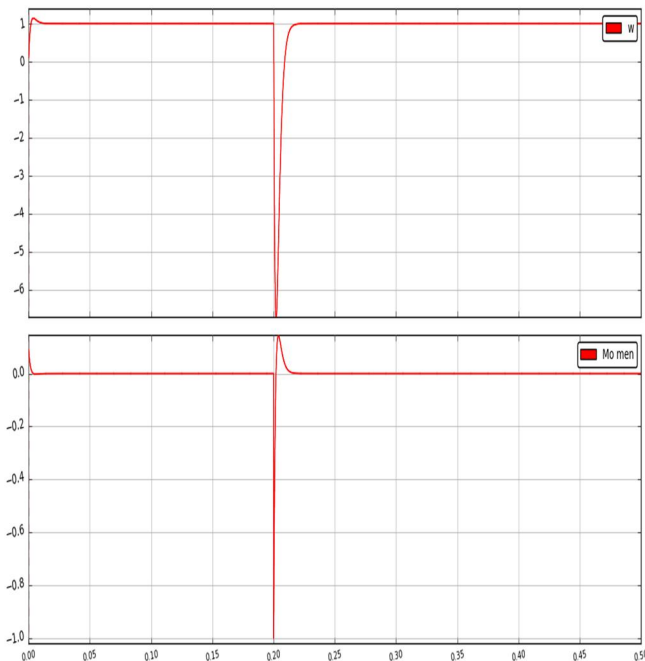
Hình 13. Kết quả mô phỏng trường hợp vị trí ban đầu $x = -0,5\text{mm}$, $y = 0,5\text{mm}$ và tác dụng lực 1N tại $t = 0,2\text{s}$

* *Kịch bản 3:* Mô phỏng với mô men cân bằng 0 được kết quả như hình 14.



Hình 14. Kết quả mô phỏng với momen cân bằng 0

* *Kịch bản 4:* Mô phỏng với vận tốc ban đầu bằng 0 tại thời điểm $t = 0,2s$ tác dụng một mô men cân có độ lớn 1Nm được kết quả như hình 15.



Hình 15. Kết quả mô phỏng với mô men cân bằng 1Nm tại thời điểm $t = 0,2s$

Kết quả mô phỏng cho thấy, khả năng điều khiển của bộ PID và PI là hoàn toàn thực hiện được đồng thời kiểm nghiệm phương pháp điều khiển bằng việc tách mô hình thành hai thành phần là khả thi. Các đặc tính động học của hệ thống cho phép việc chế tạo thử nghiệm.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu thành công về cấu tạo, đặc điểm của động cơ tự nâng không lõi thép. Bằng việc xây dựng mô hình toán học, cấu trúc điều khiển, mô hình điều khiển vị trí, mô men, tốc độ cho động cơ. Tác giả đã mô hình hóa và mô phỏng kiểm chứng trên nền tảng Typhoon HIL, kết quả cho thấy rằng bằng các phương pháp đã thực hiện và mô phỏng kiểm chứng cho kết quả hoàn toàn khả thi để chế tạo và điều khiển mô hình thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Y. Okada et al., 1995. *Magnetic Bearing - Fundamental Design and Applications (in Japanese)*. JSME Publication on New Technology Series, No. 1, Yokendo Ltd. Tokyo.

[2]. S. Ueno et al, 2004. *Development of the Miniature AMB with 6 Concentrated Wound Poles*. Proceedings of 9th International Symposium on Magnetic Bearings, CD-ROM.

[3]. T. Baumgartner, R. Burkart, J. W. Kolar, 2014. *Analysis and Design of a 300-W 500 000-r/min Slotless Self-Bearing Permanent-Magnet Motor*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 8, pp. 4326-4336.

[4]. L. Li et al, 2002. *A Simple an Miniaturized Magnetic Bearing for Cost-Sensitive Applications*. Proceedings of 9th International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 561-565.

[5]. S. Ueno et al, 2006. *Development of a Lorentz-force-type Slotless Active Magnetic Bearing*. Proceedings of 9th International Symposium on Magnetic Bearings, CD-ROM.

[6]. D. Q. Nguyen and S. Ueno, 2008. *A study on axial gap self bearing motor drives*. in Proc. Int. Symp. Micro/Nano System Technol., Hanoi, Veitnam, CD-ROM.

[7]. D. Q. Nguyen and S. Ueno, 2008. *Sensorless speed control of a permanent magnet type axial gap self bearing motor*. in Proc. 11th Int. Symp. Magn. Bearings, Nara, Japan, Aug, CD-Rom.

[8]. Nguyễn Phùng Quang, 1998. *Điều khiển tự động truyền động điện xoay chiều ba pha*. NXB Giáo dục.

[9]. <https://www.typhoon-hil.com>

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Duc Duong

University of Economics - Technology for Industries