

Nghiên cứu giải pháp khử nhiễu vị trí trong hệ điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép

Research on a solution to eliminating position noise in a Slotless Self-Bearing Motor control system

Võ Đức Nhân¹, Nguyễn Xuân Biên², Phạm Thị Lý^{3*}, Nguyễn Quang Địch¹

¹Viện Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Trường Đại học Thủy lợi

³Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Corresponding author E-mail: ptlydk@utc.edu.vn

Abstract

With the outstanding advantages of being unaffected by magnetic saturation, the relationship between levitation forces and rotational torque with current being linear and no pulsating torque, Slotless Self-Bearing Motor (SSBM) is being considered by many researchers. This paper introduces a solution to eliminate position noise in the SSBM control system, through analyzing the theoretical basis of the possibility of noise generation affecting the motor's working ability. The author has introduced a method of developing a DC current supply plan to maintain levitation of the rotor and the transformation of current from the (X, Y) axis system to the (ad, be and cf) system to avoid the phenomenon of generating reverse braking torque. In addition, the author also added a noise-compensating Feedforward control in the horizontal levitation position control system. To demonstrate this solution, the SSBM control system has been built based on Matlab/Simulink. Simulation results clearly show the ability to eliminate position noise to help the SSBM operate more stably.

Keywords: Slotless Self-Bearing Motor (SSBM), Magnetic drive force, Magnetic drive, PID controller

Symbols

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
F	N	Lực
F^f	N	Lực nâng
F^r	N	Lực tạo mô men quay
i	A	Dòng điện
i^f	N	Dòng điện tạo lực nâng
i^r	N	Dòng điện tạo mô men quay
x	mm	Vị trí dịch chuyển theo phương X
y	mm	Vị trí dịch chuyển theo phương Y

Abbreviations

SSBM	Slotless Self-Bearing Motor
------	-----------------------------

Tóm tắt

Nội dung bài báo trình bày một giải pháp loại bỏ nhiễu vị trí cho hệ điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép. Đầu tiên, bài báo phân tích cơ sở lý thuyết về khả năng sinh nhiễu ảnh

hưởng tới khả năng làm việc của động cơ. Sau đó, tác giả đã đưa ra phương án cấp dòng điện một chiều để duy trì lực nâng và phép chuyển đổi dòng điện từ hệ trục (X, Y) sang hệ (ad, be và cf) để tránh hiện tượng sinh mô men hãm ngược. Ngoài ra tác giả còn bổ sung thêm điều khiển Feedforward bù nhiễu trong hệ điều khiển vị trí nâng ngang trục. Để minh chứng cho giải pháp này thì hệ điều khiển động cơ tự nâng không dùng lõi thép đã được xây dựng dựa trên Matlab/Simulink. Kết quả mô phỏng đã thể hiện rõ khả năng loại bỏ nhiễu vị trí giúp cho hệ truyền động động cơ tự nâng không dùng lõi thép hoạt động ổn định hơn.

1. Giới thiệu

Với những ưu điểm nổi bật như không cần chất bôi trơn, không chịu mài mòn và vừa có khả năng sinh mô men lẫn lực nâng cũng như có khả năng chạy ở tốc độ rất cao nên động cơ tự nâng hay động cơ dùng ổ từ đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp, y tế, vũ trụ,...[1-2]. Thông thường các động cơ tự nâng thường dùng phương pháp điều khiển tần số để điều khiển cả lực nâng lẫn mô men quay, nên để chạy được ở tốc độ rất cao thì tần số cấp cho động cơ cũng thường rất lớn. Do đó để chạy được ở tần số cao thì các vật liệu sắt từ cần có các tính chất đặc biệt và giá thành thường rất cao. Để khắc phục nhược điểm này động cơ tự nâng không

dùng lõi thép đang được quan tâm nghiên cứu nhiều hiện nay [3-13]. Nổi bật là những nghiên cứu của Ueno và các cộng sự [3-5], trong đó loại động cơ tự nâng không dùng lõi thép theo nguyên lý lực Lorentz sử dụng dây quấn stator dạng thanh đã được phát triển. Để có thể điều khiển được cả mô men quay lẫn lực nâng ngang trục nhóm tác giả đã xây dựng cấu trúc điều khiển cho động cơ này theo kiểu nối tầng: mạch vòng trong điều khiển dòng điện, mạch vòng ngoài điều khiển vị trí và tốc độ. Các nghiên cứu [3-5] đã có những thành công bước đầu nhưng vẫn còn một số nhược điểm. Do nguyên tắc điều khiển vị trí được thiết kế theo hướng là lực từ chỉ xuất hiện khi có sai lệch vị trí được đề xuất [5]. Ưu điểm của phương pháp này là tiết kiệm điện năng khi vận hành.

Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là nhạy với nhiễu bởi vì rotor của động cơ có được thả lỏng. Trong khi đó, khi rotor động cơ quay sẽ xuất hiện lực ly tâm lớn, nó có tần số tỷ lệ với tốc độ quay và độ lớn tỷ lệ với bình phương tốc độ quay. Kể cả khi động cơ khởi động với lực ly tâm không lớn nhưng rotor đã bị lệch khi tốc độ lên cao lực ly tâm càng lớn do vậy sẽ gây dao động rotor với biên độ và tần số lớn. Để triệt tiêu dao động này bắt buộc phải thiết kế mạch bù nhiễu, tuy nhiên khi thiết kế bù nhiễu lại vẫn phải sử dụng dòng điện lớn phải tiêu tốn điện năng, nên ưu điểm của phương pháp này không còn. Hơn nữa việc tạo lực nâng F_{ad} , F_{be} , F_{cf} cố định bằng phép biến đổi tọa độ $(xy) \rightarrow (a-d, b-e, c-f)$ [5] còn có thể gây ra mô men hãm ngược làm giảm khả năng hoạt động của động cơ. Nội dung bài báo này đề xuất giải pháp loại bỏ nhiễu do lực ly tâm gây ra, trong đó mạch vòng điều khiển vị trí sẽ thiết kế có thêm dòng điện giữ cho roto luôn ở trạng thái cân bằng, đồng thời thiết kế điều khiển bù nhiễu cho động cơ. Khi động cơ gia tốc, lực từ sẽ giữ cho roto không bị đảo theo lực ly tâm và khi có nhiễu tác động (dạng nhiễu lực ly tâm) sẽ khử nhiễu để giữ cho động cơ làm việc ổn định.

2. Giải pháp loại bỏ ảnh hưởng nhiễu trong hệ điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép

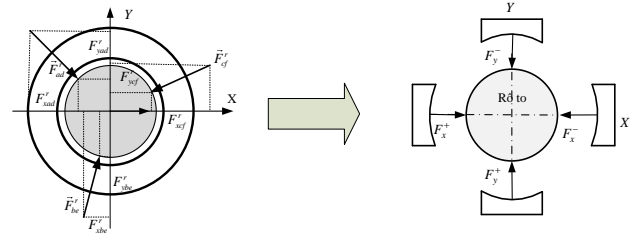
2.1. Cơ sở lý thuyết

Điều khiển lực nâng cho động cơ theo [5] như đã nêu ngoài khả năng chịu ảnh hưởng của nhiễu còn có thể tạo mô men hãm ngược. Do đó để khắc phục các nhược điểm này thì việc nghiên cứu lực nâng theo nguyên lý gồm hai vấn đề:

- Đặt dòng điện giữ liên tục rô to bằng luôn cấp cho ba cặp cuộn dây a-d, b-e, c-f dòng một chiều $I_{ad}^f = I_{be}^f = I_{cf}^f = I_o^f$ để tạo nên ba lực giữ rô to $F_{oad}^r, F_{obe}^r, F_{ocf}^r$ giống lực ô từ.

Điều này khắc phục được nhược điểm của [5], là rô to sẽ bền vững với nhiễu.

- Giữ nguyên bản chất lực F_{ad} , F_{be} và F_{cf} quay cùng chiều với tốc độ rô to, ta chiếu ba lực này lên tọa độ tĩnh X-Y sẽ có hai véc tơ lực $\vec{F}_x = \vec{F}_x^+ + \vec{F}_x^-$. Như vậy có thể nghiên cứu điều khiển lực trên tọa độ tĩnh X-Y phép biến đổi này được gọi là phép biến đổi thuận (a-d, b-e, c-f) sang (X-Y)



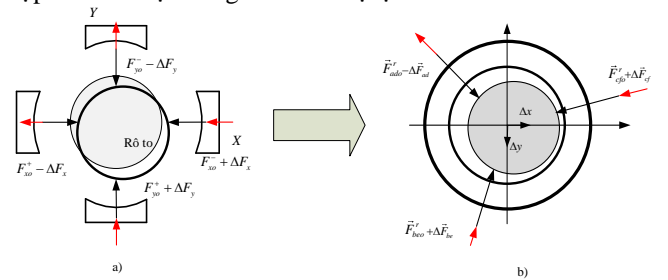
Hình 1. Sơ đồ biến đổi lực nâng (a-d, b-e, c-f) sang (X-Y)

Trên hình 1 cho thấy, khi rô to đồng tâm hệ luôn có dòng duy trì lực ô từ bằng nhau $I_{oad}^f = I_{obe}^f = I_{ocf}^f = I_o^f$ sinh ra ba lực có giá trị bằng nhau $F_{oad} = F_{obe} = F_{ocf} = F_o$ để giữ rô to cân bằng (đồng tâm). Tương ứng trên trục X-Y là $|F_{xo}^+| = |F_{xo}^-|$ và $|F_{yo}^+| = |F_{yo}^-|$. Lực F_o được tính sao cho có độ lớn vừa bằng lực ly tâm khi rô to quay ở tốc độ lớn nhất. Theo định luật 3 Newton, lực ly tâm là quán tính của lực hướng tâm có chiều ngược lại lực hướng tâm:

$$F_{LT} = mr\omega^2 \quad (2.1)$$

Trong đó: ω (rad/s) là tốc độ góc của rô to, m (kg) khối lượng rô to và r (m) là bán kính rô to.

Khi rô to bị lệch tâm hệ điều khiển sẽ điều chỉnh dòng điện trên hai trục X-Y để sinh ra dòng điện Δi_x và Δi_y tạo ra ba dòng $i_{ad} = I_o^f + \Delta i_{ad}$; $i_{be} = I_o^f + \Delta i_{be}$ và $i_{cf} = I_o^f + \Delta i_{cf}$ là dòng một chiều đưa vào cuộn dây stato động cơ để sinh ra ba lực $F_{ad} = F_o + \Delta F_{ad}$; $F_{be} = F_o + \Delta F_{be}$ và $F_{cf} = F_o + \Delta F_{cf}$. Tức là ta cần có biến đổi hai cặp tín hiệu Δi_x và Δi_y sang ba cặp tín hiệu ($\Delta i_{ad}, \Delta i_{be}, \Delta i_{cf}$) ta gọi phép biến đổi này là phép biến đổi ngược (X-Y) sang (a-d, b-e, c-f). Hình 2 mô tả một trường hợp biến đổi lực nâng khi rotor bị lệch.



Hình 2. Sơ đồ biến đổi lực nâng (X-Y) sang (a-d, b-e, c-f)

Xét ví dụ có sự lệch tâm trên Hình 2a với lực trên trục X-Y nên hệ điều khiển tạo ra dòng điện Δi_x và Δi_y để có biến đổi lực trên trục (X-Y):

$$\begin{cases} F_x^+ = F_{xo} - \Delta F_x; F_x^- = F_{xo} + \Delta F_x \\ F_y^+ = F_{yo} + \Delta F_y; F_y^- = F_{yo} - \Delta F_y \end{cases} \quad (2.2)$$

Do thay đổi dòng điện trên trục X-Y sẽ làm thay đổi dòng điện trên trục (a-d, b-e và c-f)

$$\begin{cases} i_{ad}^f = I_o^f + \Delta i_{ad} \\ i_{be}^f = I_o^f + \Delta i_{be} \\ i_{cf}^f = I_o^f + \Delta i_{cf} \end{cases} \quad (2.3)$$

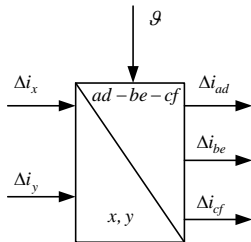
Dòng điện từ phương trình (2.3) được đưa vào rô to, tạo ra lực biến đổi trên các trục a-d, b-e, c-f, kết quả là lực F_{ad} giảm, lực F_{be} tăng và F_{cf} tăng (Hình 2b). Phương trình (2.4) biểu diễn sự tăng giảm của các lực trên các trục a-d, b-e, c-f.

$$\begin{cases} F_{ad} = F_{oad} - \Delta F_{ad} \\ F_{be} = F_{obe} + \Delta F_{be} \\ F_{cf} = F_{ocf} + \Delta F_{cf} \end{cases} \quad (2.4)$$

Khi điều khiển tác động đưa rô to về đồng tâm ta có $\Delta i_x=0$ và $\Delta i_y=0$, như vậy chỉ còn lại dòng điện I_0 để giữ rô to.

Xây dựng biến đổi $(\Delta i_x, \Delta i_y) \rightarrow (\Delta i_{ad}, \Delta i_{be}, \Delta i_{cf})$.

Khi hệ có sai lệch vị trí rô to, hệ điều khiển sẽ tạo ra hai dòng điện trên hệ tọa độ X-Y là $\Delta i_x \neq 0$ và $\Delta i_y \neq 0$, ta cần phải biến đổi hai tín hiệu dòng này sang dòng của hệ tọa độ (a-d, b-e, c-f) như trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ biến đổi dòng điện (X-Y) sang (a-d, b-e, c-f)

Phương pháp biến đổi dòng điện của ba cặp cuộn dây a-d, b-e và c-f từ biến thiên dòng trên trục X và Y là Δi_x và Δi_y như sau:

$$\begin{cases} \Delta i = \sqrt{\Delta i_x^2 + \Delta i_y^2} \\ \sin \vartheta = \frac{|\Delta i_y|}{\Delta i} \end{cases} \quad (2.5)$$

Chia hệ tọa độ X-Y ra làm bốn góc phần tư và tám phần đều nhau:

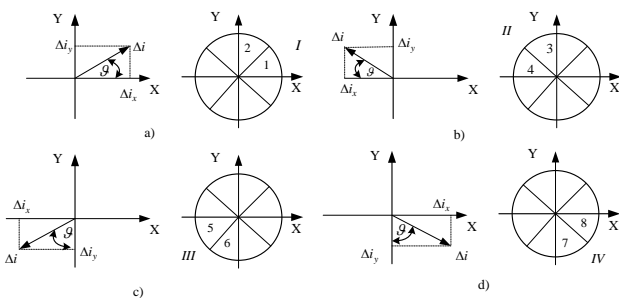
Vùng I (1 và 2): $\Delta i_x > 0, \Delta i_y > 0$

Vùng II (3 và 4): $\Delta i_x < 0, \Delta i_y > 0$

Vùng III (5 và 6) $\Delta i_x < 0, \Delta i_y < 0$

Vùng IV (7 và 8) $\Delta i_x > 0, \Delta i_y < 0$

Vị trí Δi được xác định bởi góc ϑ theo bốn góc phần tư. Sơ đồ tính toán biên độ và vị trí dòng điện để tính quy đổi được trình bày trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ tính toán biên độ và vị trí dòng điện để tính quy đổi

Do ba dòng điện $(\Delta i_{ad}, \Delta i_{be}, \Delta i_{cf})$ luôn cố định trên hệ trục X-Y như Hình 4, nên khi đã biết được giá trị dòng Δi và vị

trí của nó theo góc ϑ . Theo (2.5) ta dễ dàng tính được ba giá trị dòng điện $(\Delta i_{ad}, \Delta i_{be}, \Delta i_{cf})$. Kết quả tính quy đổi được trình bày trên bảng 1.

2.2. Cấu trúc điều khiển khử nhiễu cho động cơ tự nâng không lõi thép

Sơ đồ nguyên lý cấu trúc điều khiển động cơ không lõi thép có chức năng ô từ có khử nhiễu vị trí được trình bày trên hình 5. Về cơ bản có cấu trúc tương tự như được giới thiệu trong [5]. Điểm khác biệt chính là ở mạch vòng vị trí có thêm dòng điện sinh lực nâng cố định nên dòng điện đặt cho mạch vòng dòng điện sẽ là:

$$\begin{cases} I_{ad}^* = (I_0^f + \Delta i_{ad}) + i_{ad}^T \\ I_{be}^* = (I_0^f + \Delta i_{be}) + i_{be}^T \\ I_{cf}^* = (I_0^f + \Delta i_{cf}) + i_{cf}^T \end{cases} \quad (2.6)$$

Bảng 1. Bảng tính quy đổi tọa độ

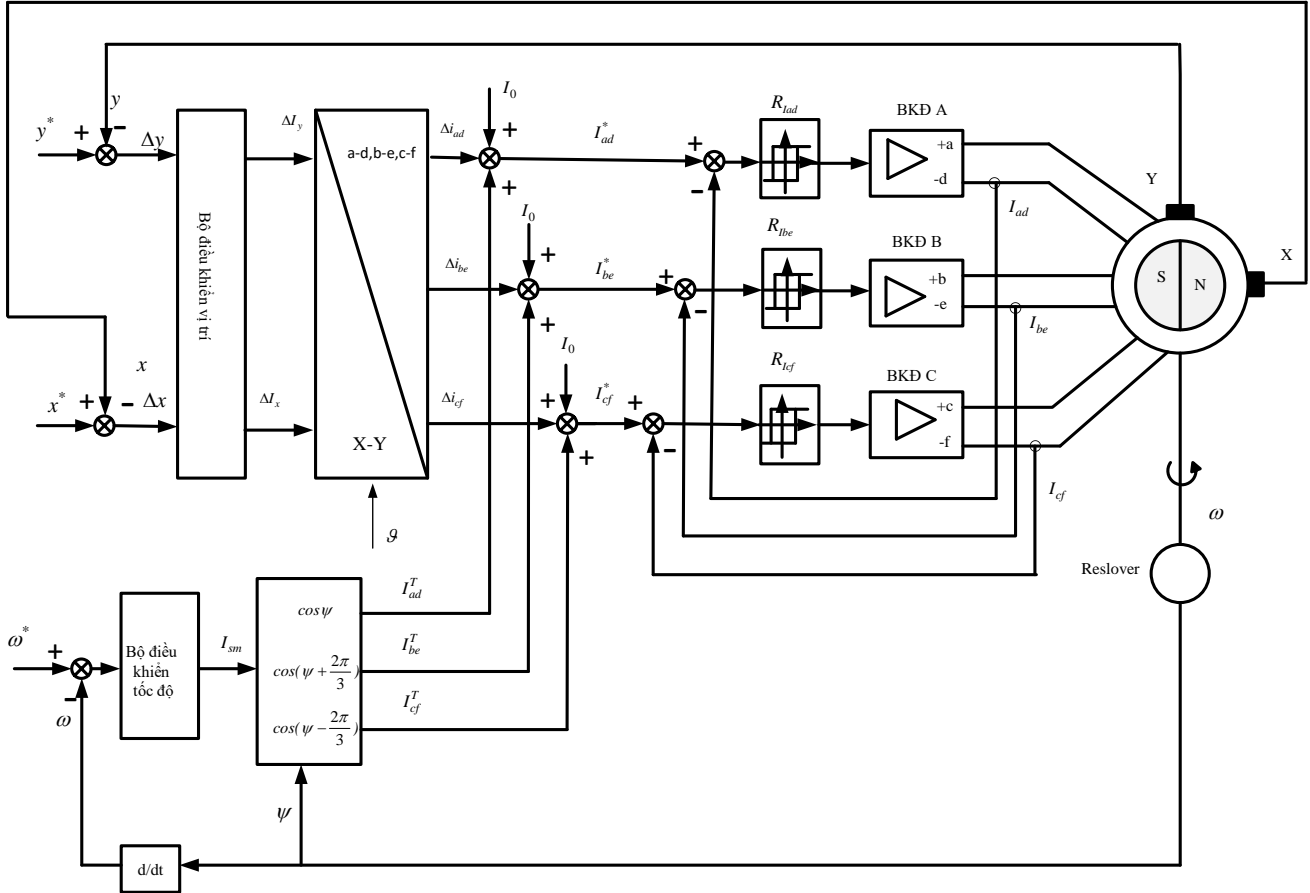
Vùng	Giá trị góc ϑ	Dòng Δi_{ad}	Dòng Δi_{be}	Dòng Δi_{cf}
I	1 $\vartheta=(0 \rightarrow \frac{\pi}{4})$	$\Delta i_{ad} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta)$	$\Delta i_{be} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
	2 $\vartheta=(\frac{\pi}{4} \rightarrow \frac{\pi}{2})$	$\Delta i_{ad} = \Delta i \cos(\vartheta - \frac{\pi}{4})$	$\Delta i_{be} = \Delta i \cos(\vartheta - \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = \Delta i \cos(\vartheta - \frac{\pi}{4} - \frac{2\pi}{3})$
II	3 $\vartheta=(\frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{3\pi}{4})$	$\Delta i_{ad} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta)$	$\Delta i_{be} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
	4 $\vartheta=(\frac{3\pi}{4} \rightarrow 0)$	$\Delta i_{ad} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta)$	$\Delta i_{be} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
III	5 $\vartheta=(0 \rightarrow \frac{\pi}{4})$	$\Delta i_{ad} = -\Delta i \cos(\vartheta - \frac{\pi}{4})$	$\Delta i_{be} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
	6 $\vartheta=(\frac{\pi}{4} \rightarrow \frac{\pi}{2})$	$\Delta i_{ad} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta)$	$\Delta i_{be} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{4} - \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
IV	7 $\vartheta=(\frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{3\pi}{4})$	$\Delta i_{ad} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta)$	$\Delta i_{be} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = -\Delta i \cos(\frac{\pi}{2} - \vartheta - \frac{2\pi}{3})$
	8 $\vartheta=(\frac{3\pi}{4} \rightarrow 0)$	$\Delta i_{ad} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta)$	$\Delta i_{be} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta + \frac{2\pi}{3})$	$\Delta i_{cf} = \Delta i \cos(\frac{\pi}{4} + \vartheta - \frac{2\pi}{3})$

Cấu trúc hệ điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép stator dây quấn có khả năng khử nhiễu được mô tả chi tiết như hình 5, trong đó:

- Mạch vòng trong điều khiển dòng điện cấp cho ba cặp cuộn dây. Do hai dòng này độc lập với nhau nhưng lại cùng cung cấp cho ba cặp cuộn dây stator, vì vậy ta thiết kế một mạch vòng trong chung cho cả hai dòng điện. Mặt khác, dòng điện tạo lực nâng là dòng một chiều và dòng sinh mô men là dòng xoay chiều nên để điều khiển hai dòng này ta thiết lập mạch vòng dòng điện chung thiết kế theo kiểu “bang-bang”. Lượng đặt dòng điện gồm hai thành phần là dòng điện tạo lực và dòng điện tạo mô men quay.
 - Mạch vòng ngoài gồm hai kênh: Kênh điều khiển vị trí Rotor với bộ điều khiển vị trí có đầu ra là dòng điện, qua biến đổi tọa độ ta được dòng đầu ra. Kênh điều khiển tốc độ $R\omega$ với đầu ra bộ điều khiển tốc độ là biên độ dòng điện của dòng điện tạo mô men, qua bộ biến đổi tọa độ ta có được dòng tính toán thông qua. Tổng hợp hai tín hiệu dòng điện ta có dòng điện đặt cho mạch vòng dòng điện.
- Về cơ bản phương pháp thiết kế mạch vòng dòng điện và mạch vòng tốc độ quay đã được trình bày chi tiết trong các tài

liệu [3-6], do đó trong phạm vi bài báo này tác giả chỉ tập trung vào việc thiết kế hệ điều khiển vị trí có khâu nhiễu. Hàm truyền đối tượng của mạch vòng điều khiển vị trí có hai khâu tích phân nối tiếp và hằng số thời gian lớn, trong khi đó đáp ứng dòng điện và lực tác động nhanh. Đối tượng mạch vòng vị trí là tuyến tính thông số không đổi. Lượng đặt x^*, y^* ban đầu thường không thay đổi, tuy nhiên để hạn chế ảnh hưởng thay đổi trong quá trình vận hành cần

phải đưa cả yêu cầu đặt tốc độ giá trị đặt về 0. Hệ chịu tác động của nhiễu loại nhiễu, cụ thể ta xét nhiễu tải F_c và nhiễu ngoại là lực ly tâm làm sai lệch vị trí ta đặt là D . Từ những đặc điểm trên, nhiệm vụ thiết kế điều khiển của mạch vòng vị trí là kháng nhiễu và bám lượng đặt.



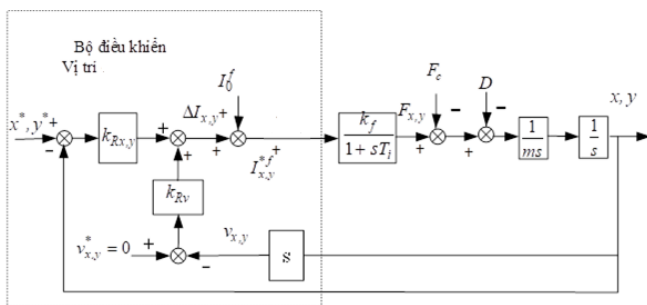
Hình 5. Cấu trúc điều khiển động cơ tự nâng không lỗi thép

Do việc tạo nguồn dòng lý tưởng là tương đối khó khăn nên trong thực tế ta thường bổ sung thêm hằng số thời gian trễ T_i của mạch vòng dòng điện trong quan hệ giữa dòng điện đặt và lực đặt ra. Ngoài ra với giả thiết chưa quan tâm tới các nhiễu ta có hệ điều khiển là tuyến tính (hình 6) nên có thể áp dụng tiêu chuẩn mô đun tối ưu để xác định thông số bộ điều khiển. Ta xác định được hai bộ tham số của điều khiển vị trí:

$$\begin{cases} k_{Rvx} = \frac{m}{2k_f \cdot T_i} \\ k_{Rvy} = \frac{m}{2k_f \cdot T_i} \end{cases} \quad (2.7)$$

- Điều khiển vị trí $R(x,y)$:

$$\begin{cases} k_{Rx} = \frac{1}{2\tau_{vx}}; \tau_{vx} = 2T_i \\ k_{Ry} = \frac{1}{2\tau_{vy}}; \tau_{vy} = 2T_i \end{cases} \quad (2.8)$$



Hình 6. Cấu trúc điều khiển vị trí PD có hai mạch vòng nối song song

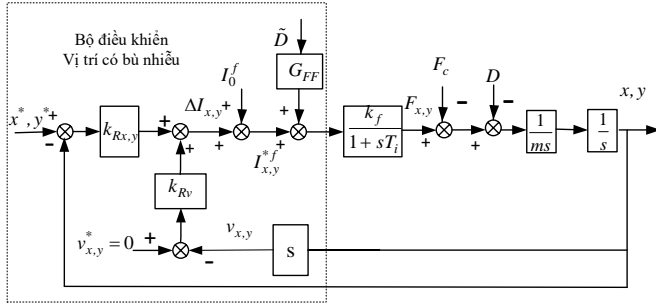
- Điều khiển tốc độ chuyển dịch vị trí $Rv(x,y)$:

Cấu trúc này có ưu điểm là đáp ứng nhanh, tuy nhiên lại không khử được sai lệch nhiễu tải và nhiễu ngoại nên thường phải thiết kế thêm điều khiển Feedforward bù nhiễu.

Để khắc phục được nhiễu D ta phải thiết kế bù nhiễu theo điều khiển feedforward. Thiết kế bù nhiễu có hai điều kiện: Phải đo hoặc ước lượng được nhiễu D và phải nhận dạng được hàm truyền trong mạch điều khiển bù.

Thực tế nhiễu ngoại xuất hiện là ngẫu nhiên nên cần phải dùng bộ quan sát nhiễu. Ta có hai mạch đo vị trí x và y và có biểu

thức tính toán lực ly tâm nên quan sát và ước lượng nhiễu có thể thực hiện được tuy nhiên trong giới hạn nội dung của bài



Hình 7. Cấu trúc điều khiển vị trí PD có hai mạch vòng nối song song có bù nhiễu

báo này là tập trung vào một giải pháp loại bỏ nhiễu, khi mô phỏng ta giả thiết đo được nhiễu theo nhiễu đưa vào hệ là $\tilde{D} = D$. Để thiết kế điều khiển bù nhiễu ta chọn nhiễu có dạng hàm điều hòa. Dạng nhiễu này phù hợp lực ly tâm khi động cơ quay. Chọn điểm tác động của tín hiệu bù nhiễu tại đầu ra bộ điều khiển vị trí. Cấu trúc bù nhiễu dùng điều khiển Feedforward được trình bày trên hình 7.

Từ cấu trúc điều khiển hình 7 có thể viết

$$\left[(I_{x,y}^{*f} + G_{FF}\tilde{D}) \frac{k_f}{1+sT_i} - F_c - D \right] \frac{1}{ms^2} = (x, y) \quad (2.9)$$

Biến đổi biểu thức (2.9):

$$\left[\left(I_{x,y}^{*f} \frac{k_f}{1+sT_i} - F_c \right) + \left(G_{FF} \frac{k_f}{1+sT_i} \tilde{D} - D \right) \right] \frac{1}{ms^2} = (x, y) \quad (2.10)$$

Thiết kế hàm Feedforward:

$$G_{FF(s)} = \frac{1+sT_i}{k_f} \quad (2.11)$$

Thay (2.11) và (2.10) ta được:

$$\left[\left(I_{x,y}^{*f} \frac{k_f}{1+sT_i} - F_c \right) + (\tilde{D} - D) \right] \frac{1}{ms^2} = (x, y) \quad (2.12)$$

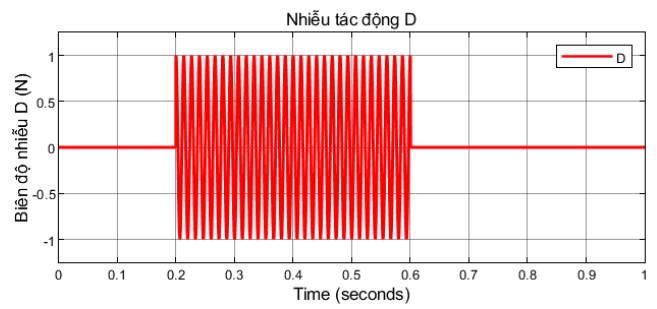
Về nguyên tắc phải thiết kế khâu ước lượng được nhiễu, như trên đã giả thiết trong phạm vi bài báo giả thiết đã ước lượng được nhiễu $\tilde{D} = D$. Thay vào (2.12) ta nhận được:

$$\left[I_{x,y}^{*f} \frac{k_f}{1+sT_i} - F_c \right] \frac{1}{ms^2} = (x, y) \quad (2.13)$$

Như vậy nhiễu D đã được khử.

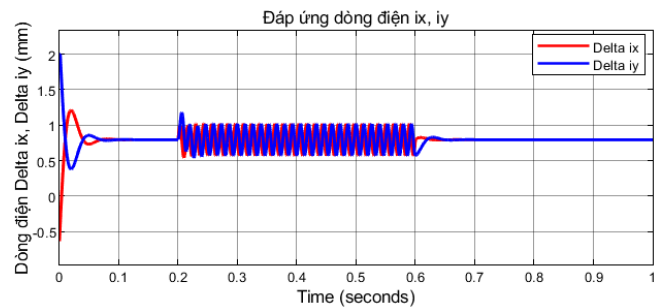
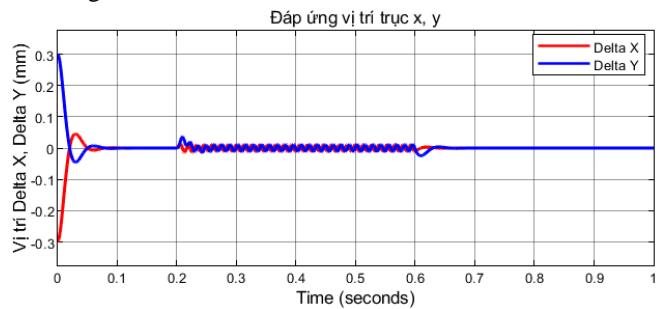
3. Kích bản và kết quả mô phỏng

Nhiễu ngoại tác động thường xảy ra khi động cơ khởi động hoặc thăng giáng tốc độ gây ra sự biến thiên lực ly tâm. Để thử nghiệm ta cho nhiễu D có dạng hàm điều hòa với tần số 75Hz (tương ứng tốc độ chạy động cơ 4500v/p) cụ thể $D_y = 1.\sin(2 * \pi * 75t)$ và $D_x = 1.\cos(2 * \pi * 75t)$ dạng nhiễu được trình bày trên hình 8



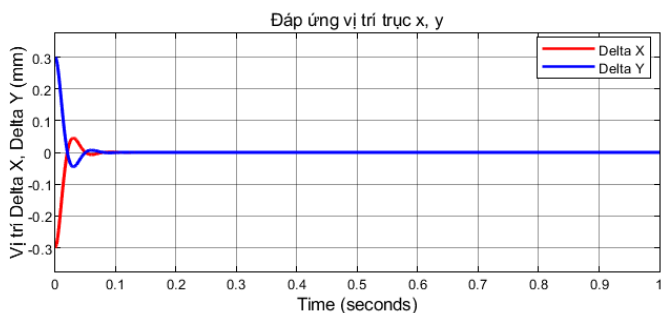
Hình 8. Dạng nhiễu ngoại D

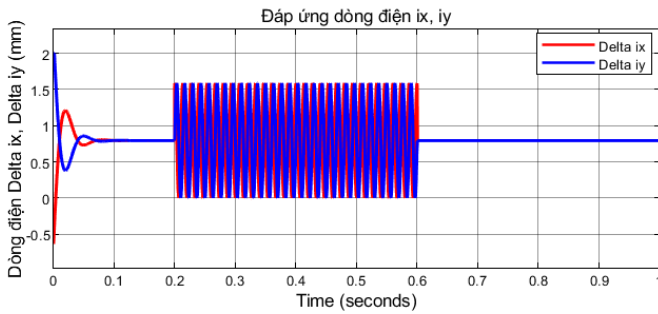
Trên hình 9 là đáp ứng của hệ khi có nhiễu ngoại tác động, hệ tác động làm suy giảm nhiễu ngoại giá trị x, y có sai lệch không lớn khoảng 2%, tuy nhiên rô to vẫn bị dao động theo nhiễu ngoại.



Hình 9. Đáp ứng điều khiển khi có nhiễu ngoại của mạch vòng vị trí

Đáp ứng vị trí khi bù nhiễu được trình bày trên hình 10 đã dập được hết nhiễu, vị trí đã ổn định. Nhiễu được dập là do: Tác động của mạch vòng dòng điện rất nhanh, mặt khác để lực nhiễu D tác động làm sai lệch vị trí lại chậm hơn (vì qua hai khâu tích phân. Nếu nhiễu tác động ngay đầu ra của mạch vòng vị trí điều khiển bù chắc chắn sẽ khó hơn (ví dụ nhiễu do x, y)





Hình 10. Đáp ứng của hệ khi có nhiễu ngoại khi có thiết kế bù nhiễu.

4. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu một giải pháp khử nhiễu vị trí trong hệ điều khiển động cơ tự nâng không dùng lõi thép theo nguyên lý lực Lorentz, trong đó ngoài việc đưa ra giải pháp cấp dòng điện một chiều để duy trì lực nâng và phép chuyển đổi dòng điện từ hệ trục (X, Y) sang hệ (ad, be và cf) để tránh hiện tượng sinh mô men hãm ngược thì tác giả còn bổ sung thêm điều khiển Feedforward bù nhiễu. Kết quả mô phỏng đã thể hiện rõ khả năng loại bỏ nhiễu vị trí giúp cho hệ truyền động động cơ tự nâng không dùng lõi thép hoạt động ổn định hơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Jiahao Chen, Jingwei Zhu, Eric L. Severson, "Review of Bearingless Motor Technology for Significant Power Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.56, no.2, pp.1377-1388, 2020
- [2] Virginie Kluykens, Corentin Dumont, Bruno Dehez, "Description of an Electrodynamical Self-Bearing Permanent Magnet Machine", IEEE Transactions on Magnetics, vol.53, no.1, pp.1-9, 2017
- [3] S. Ueno, S. Uematsu, and T. Kato, "Development of a Lorentz-Force-Type Slotless Self-Bearing Motor," Journal of System Design and Dynamics. 2009 Vol. 3, No. 4, pp. 462-470.
- [4] S. Ueno and T. Kato, "A Novel Design of a Lorentz-Force-Type Small Self Bearing Motor," in Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2009 pp. 926-931.
- [5] Nguyen HP, Nguyen XB, Bui TT, Ueno S, Nguyen QD "Analysis and Control of Slotless Self-Bearing Motor," Actuators, 2019; 8(3):57.
- [6] 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
- [7] Steele, B.A. and L.S. Stephens. *A Test Rig for Measuring Force and Torque Production in a Lorentz, Slotless Self-Bearing Motor*, in 7th International Symposium on Magnetic Bearings. 2000. Zurich, Switzerland: ETH Zurich, Switzerland
- [8] Stephens, L.S., and D.G. Kim. *Dynamic Modeling and Validation of a Lorentz, Self-Bearing Motor Test Rig*. in ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. 2001. New Orleans, LA., USA.
- [9] Salazar, A. O., Chiba, A., and Fukao, T., *A Review of Developments in Bearingless Motors*, Proc. 7th Int. Symp. Magn. Bearings, ETH, Zurich, Aug. pp. 335–339, 2000.
- [10] Stephens, L.S., and D.G. Kim, *Analysis and Simulation of a Lorentz-Type Slotless, Self Bearing Motor*. IFAC paper, 2000.
- [11] T. I. Baumgartner, A. Looser, C. Zwysig and J. W. Kolar, "Novel high-speed, Lorentz-type, slotless self-bearing motor," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 3971-3977, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617798.
- [12] 14. Stamenkovic, I.; Milivojevic, N.; Schofield, N.; Krishnamurthy, M.; Emadi, A. Design Analysis and Optimization of Ironless Stator Permanent Magnet Machines. IEEE Trans. Power Electron. 2013, 28, 2527–2538.
- [13] Thomas Baumgartner, Ralph M. Burkart, Johann W. Kolar, "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, 2014

- [14] Nguyễn Xuân Biên, "Nghiên cứu điều khiển trượt cho động cơ tự nâng không lõi thép", luận văn thạc sỹ ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 05/2020.