

Một cách tiếp cận mới trong xây dựng mô hình động học và điều khiển cho động cơ tự nâng không lõi thép

A new approach to establishing a dynamic and control model for Slotless Self - Bearing Motor

Võ Đức Nhân¹, Nguyễn Xuân Biên², Vũ Văn Học¹, 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

The content of the article analyzes the electromechanical process of the Lorentz electromagnetic force when we supply a slotless self-bearing motor with two types of current: alternating current and direct current. The alternating current generates motor torque and the direct current generates axial magnetic drive force. The slotless self-bearing motor model designed and fabricated in this study has a concentrated rotor magnetic field and scattered stator windings. This is different from previous research models where the rotor has a distributed magnetic field and the stator is 12 bars. The new type of motor in the study of this paper uses the vector control theory of electric machines to build the control model. In this motor, the magnetic drive force will be maintained continuously by a direct current large enough to hold the rotor against disturbances caused by centrifugal force when the motor rotates and disturbances due to rotor drag. The control structure for the slotless self-bearing motor is cascaded. The inner loop is a current loop that is designed in a “bang-bang” control structure. The outer loop circuit has two channels: the position control channel and the speed control channel. The position control channel uses a PD controller combined with feedforward noise compensation and the speed channel uses a PI controller. The simulation results show that the system works stably and is resistant to noise for the rotor position.

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

Symbols

Symbols	Units	Description
A, B, N, S		space state matrix
$G(s)$		transfer function
L_{sd}, L_{sq}	H	d and q stator r inductance

Abbreviations

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

Tóm tắt

Nội dung của bài báo phân tích quá trình sinh mô men quay và lực nâng ngang trục của động cơ tự nâng không dùng lõi thép theo nguyên lý lực Lorentz khi ta cung cấp cho cuộn dây stator động cơ hai loại dòng điện: dòng điện xoay chiều và dòng điện một chiều. Dòng điện xoay chiều tạo ra mô men quay và dòng điện một chiều tạo ra lực nâng ngang trục. Mô hình động cơ tự nâng không lõi thép được thiết kế và chế tạo trong nghiên cứu này có từ trường rotor tập trung và dây quấn stator phân tán. Đây là điểm khác biệt với các mô hình nghiên cứu trước đây trong đó rotor có từ trường phân bố và

stator có dạng 12 thanh dẫn. Loại động cơ mới trong nghiên cứu của bài báo này sử dụng lý thuyết điều khiển véc tơ của máy điện xoay chiều để xây dựng mô hình điều khiển. Ở động cơ này, lực nâng ngang trục sẽ được duy trì liên tục nhờ bổ sung dòng điện một chiều đủ lớn để giữ cho rotor chống lại các nhiễu do lực ly tâm gây ra khi động cơ quay và các nhiễu do lực cản của rotor. Cấu trúc điều khiển cho động cơ tự nâng không dùng lõi thép được thiết kế theo dạng mạch vòng, trong đó mạch vòng bên trong là vòng điều khiển dòng điện được thiết kế theo cấu trúc điều khiển “bang-bang”, còn mạch vòng ngoài có hai kênh: kênh điều khiển vị trí ngang trục và kênh điều khiển tốc độ. Kênh điều khiển vị trí sử dụng bộ điều khiển PD cấu trúc song song và kênh tốc độ sử dụng bộ điều khiển PI. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống hoạt động ổn định và có khả năng chống nhiễu gây sai lệch vị trí rotor.

1. Giới thiệu chung

Động cơ tự nâng nói chung và động cơ tự nâng không dùng lõi thép nói riêng hiện được quan tâm nghiên cứu nhiều trong thời gian gần đây [1]-[13]. Động cơ này có kích thước nhỏ, không sử dụng lõi thép và cho phép chạy ở tốc độ cao. Nó được sử dụng trong thiết bị ngoại vi máy tính, hệ thống lưu trữ dữ liệu, thiết bị y tế và phòng sạch,... Trong các nghiên

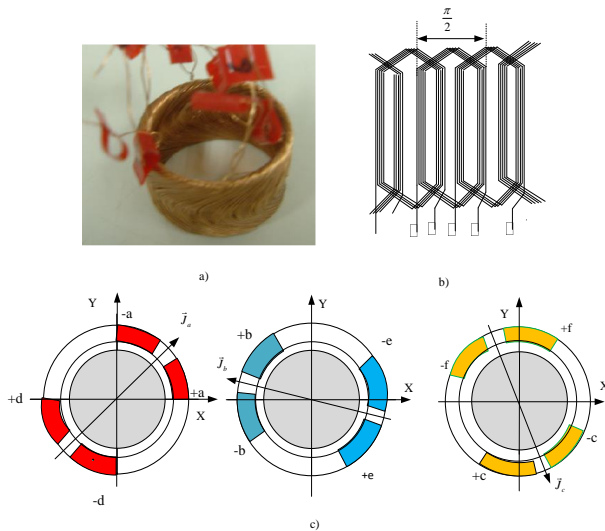
cứ [3-10], động cơ tự nâng không lõi thép có stator là thanh dẫn và rotor có từ trường phân bố rải. Do đó, khi muốn tăng công suất ta phải tăng tiết diện thanh dẫn, điều này làm tăng kích thước của động cơ. Khi vận hành động cơ ở tốc độ cao sẽ gặp khó khăn do lực ly tâm sẽ phá hỏng các mạch từ dán trên mặt rotor. Trong cấu trúc điều khiển, lực ô từ chỉ xuất hiện khi rotor có sai lệch vị trí và rất nhạy với nhiễu do rotor của động cơ được thả lỏng [3-6]. Khi rotor quay sẽ xuất hiện lực ly tâm lớn có tần số tỉ lệ với tốc độ quay và độ lớn tỉ lệ với bình phương tốc độ quay. Khi động cơ khởi động với lực ly tâm không lớn nhưng rotor đã bị lệch. Khi tốc độ càng 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 dùng sử dụng dòng điện lớn nên hiệu suất giảm đi.

Nội dung bài báo này đề xuất xây dựng mô hình động cơ tự nâng không lõi thép mới với stator không phải là 12 thanh dẫn như trong các nghiên cứu [3-6] mà là các cặp cuộn dây a-d, b-e, c-f cuốn rải theo chu vi của stator. Rotor là nam châm vĩnh cửu có từ trường phân bố tập trung. Về cấu trúc điều khiển, mạch vòng điều khiển vị trí sẽ thiết kế có thêm dòng điện giữ cho roto luôn ở trạng thái cân bằng. Khi động cơ gia tốc, lực từ sẽ giữ cho roto không bị đảo theo lực ly tâm.

2. Mô hình động cơ và động lực học quá trình

2.1. Đặc điểm, cấu tạo động cơ tự nâng không lõi thép (SSBM) được đề xuất

Động cơ tự nâng không lõi thép được đề xuất như trên hình 1. Trong đó, stator có cấu tạo dạng dây cuốn, gồm 6 bó dây, cuốn rải theo chu vi của stator r (hình 1a) với sơ đồ triển khai dây quấn như trên hình 1b. Stator không phải 12 thanh dẫn mà là ba cặp cuộn dây a-d, b-e, c-f lệch nhau 120° theo chu vi stator hình 1c. Rotor là một nam châm vĩnh cửu phân bố tập trung.



Hình 1. Mô hình động cơ (a) Sơ đồ dây dẫn (b), Mô tả cuộn dây (c)

Do stator của động cơ có cấu tạo là dây cuốn rải nên khi cấp dòng điện vào ba cặp cuộn dây sẽ xuất hiện sức từ động J . Ta đặt véc tơ sức từ động \vec{J}_a^f của cặp cuộn dây a-d, \vec{J}_b^f của cặp cuộn dây b-e và \vec{J}_c^f của cặp cuộn dây c-f. Để tạo nên lực của ô từ cũng như mô men quay ta dựa trên lực Lorentz:

$$F_k = B_\delta \ell J_k^f \sin \gamma \quad (2.1)$$

Trong đó:

- $F_k(N)$ là lực tác dụng lên dây dẫn thứ k tại điểm xét
- $B_\delta(T)$ từ trường ở khe hở không khí
- $J_k^f(A \text{ vòng})$ là cường độ véc tơ dòng điện đẳng trị chạy qua các cuộn dây thứ k
- $\gamma(\text{rad})$ là góc lệch giữa véc tơ từ trường và véc tơ dòng điện đẳng trị
- $\ell(m)$ là chiều cao của cuộn dây stator

Để tạo lực đẩy ô từ ta cấp cho stator động cơ dòng một chiều và dòng điện xoay chiều để tạo mô men. Sau đây ta lần lượt xét lực đẩy và mô men quay.

2.2. Lực đẩy ô từ ngang trục

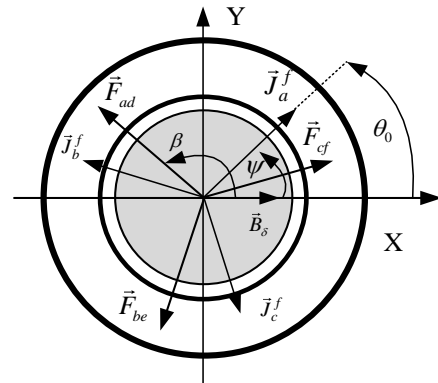
Lực nâng của động cơ tự nâng không lõi thép được tính theo lực Lorentz, là tích của véc tơ từ trường và véc tơ dòng điện đẳng trị, có hướng xác định theo quy tắc bàn tay trái. Như vậy, lực nâng sẽ vuông góc với véc tơ dòng điện đẳng trị, độ lớn được tính theo như biểu thức 2.2 dưới đây:

$$\begin{cases} F_{ad} = B_\delta \ell J_a^f \sin(\beta - \psi) \\ F_{be} = B_\delta \ell J_b^f \sin(\beta + \frac{2\pi}{3} - \psi) \\ F_{cf} = B_\delta \ell J_c^f \sin(\beta - \frac{2\pi}{3} - \psi) \end{cases} \quad (2.2)$$

Trong đó:

- $F_k(N)$ là lực tác dụng của từ trường Rotor lên cuộn dây k
- $B_\delta(T)$ từ trường ở khe hở không khí
- $J_k^f(A \text{ vòng})$ là cường độ véc tơ dòng điện đẳng trị chạy qua các cuộn dây. Cuộn dây thứ k ta có:

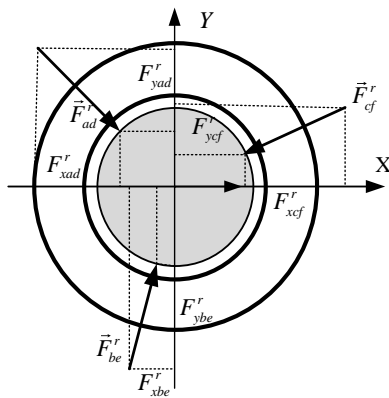
$$J_k^f = \frac{\sqrt{2}}{\pi} W \cdot k_{dq} i_k^f$$
- i_{ad}^f là dòng điện một chiều chạy trong cuộn a-d để sinh lực đẩy
- k_{dq} là hệ số quấn dây
- $\beta = \theta_0 + \frac{\pi}{2}$ (rad) là góc lệch giữa véc tơ lực F_{ad} và trục X
- $\psi(\text{rad})$ là góc quay của véc tơ từ trường Rotor



Hình 2. Đồ thị véc tơ dòng đẳng trị và véc tơ lực

Nếu chọn trục X trùng với +a ta có góc $\theta_0 = \pi/4$ và góc $\beta = \theta_0 + \frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{4}$. Véc tơ dòng điện đẳng trị, tạo lực ô từ, lệch pha nhau 120° và không thay đổi vị trí mặc dù rotor quay $\vec{J}_a^f, \vec{J}_b^f, \vec{J}_c^f$. Theo (2.2) ta có ba véc tơ lực từ $\vec{F}_{ad}^r, \vec{F}_{be}^r, \vec{F}_{cf}^r$ tác động của rotor lên ba cặp cuộn dây được trình bày trên hình 2:

Do các cuộn dây cố định nên ba lực $\vec{F}_{ad}^r, \vec{F}_{be}^r, \vec{F}_{cf}^r$ sẽ tạo phần lực tác động lên rotor ký hiệu là $\vec{F}_{xad}^r, \vec{F}_{yad}^r, \vec{F}_{xbe}^r, \vec{F}_{ybe}^r, \vec{F}_{xcf}^r, \vec{F}_{ycf}^r$. Ba lực đẩy này tác động lên rotor giữ cho rotor cân bằng tạo chức năng tương tự như ô từ giữ cho rotor đồng tâm. Đồ thị véc tơ phần lực tác động vào rotor được trình bày trên hình 3:



Hình 3. Véc tơ phần lực tác động lên rotor

Chiếu ba lực lên trục X-Y và tổng hợp lực trên trục X và Y ta được:

$$\begin{cases} F_x = [F_{xad} \cos(\beta + \omega t) + F_{xbe} \cos(\beta + \Delta + \omega t) + F_{xcf} \cos(\beta - \Delta + \omega t)] \\ F_y = [F_{yad} \sin(\beta + \omega t) + F_{ybe} \sin(\beta + \Delta + \omega t) + F_{ycf} \sin(\beta - \Delta + \omega t)] \end{cases} \quad (2.3)$$

Với $\Delta = 2\pi/3$ và quy ước như sau: F_x^+ có chiều theo (+) trục X, và F_x^- có chiều theo (-) trục X. Tương tự với lực trục Y: F_y^+ có chiều theo (+) trục Y, tức là đẩy Rotor theo +Y và F_y^- có chiều theo (-) trục Y.

Xét chế độ tĩnh, từ trạng thái ban đầu như trên hình 4, $\omega t = 0$ và roto đồng tâm các lực thành phần biểu diễn như trên hình 4 với $J_{ad}^f = J_{be}^f = J_{cf}^f = I_0^f$ ta có:

- Lực ô từ theo trục X

$$\begin{cases} F_x = F_x^+ + F_x^- \\ F_x^+ = F_{xad}^r + F_{xbe}^r \\ F_x^- = F_{xcf}^r \end{cases} \quad (2.4)$$

- Lực ô từ theo trục Y

$$\begin{cases} F_y = F_y^+ + F_y^- \\ F_y^+ = F_{ybe}^r \\ F_y^- = F_{yad}^r + F_{ycf}^r \end{cases} \quad (2.5)$$

Thay (2.4) và (2.5) vào (2.3) với $\beta = \frac{3\pi}{4}$ và $\omega t = 0$ ta có:

- Đối với trục X:

$$\begin{cases} F_{xo}^+ = F_{xad}^r + F_{xobe}^r = -k_f I_o \left[\cos \frac{3\pi}{4} + \cos \left(-\frac{7\pi}{12} \right) \right] \\ = -0,5k_f I_o [-0,707 - 0,258] = 0,5k_f I_o [0,965] \\ F_{xo}^- = F_{xocf}^r = -k_f I_o \left[\cos \frac{\pi}{12} \right] = -0,5k_f I_o [0,965] \end{cases} \quad (2.6)$$

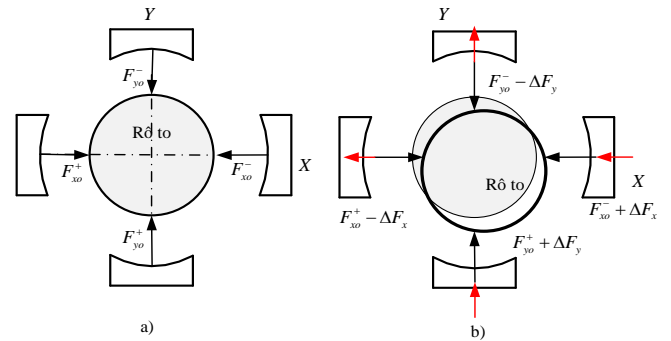
- Đối với trục Y:

$$\begin{cases} F_{yo}^- = F_{yoad}^r + F_{yocf}^r = -k_f I_o \left[\sin \frac{3\pi}{4} + \sin \frac{\pi}{12} \right] \\ = -k_f I_o [0,707 + 0,258] = -k_f I_o [-0,965] \\ F_{yo}^+ = -F_{yobe}^r = -k_f I_o \left[\sin \frac{7\pi}{12} \right] = k_f I_o [0,965] \end{cases} \quad (2.7)$$

Với $k_f = B_s \ell$ và $I_o = J_o^f$. Từ 2.6 và 2.7 ta thấy, khi rotor đồng tâm (sai lệch vị trí bằng 0), ta có:

$$|F_{xo}^+| = |F_{xo}^-|; |F_{yo}^+| = |F_{yo}^-| \quad (2.8)$$

Điều này cho thấy, động cơ đã sinh ra lực ô từ để giữ khe hở không khí đồng đều. Từ biểu thức 2.8, mô hình lực ô từ của động cơ tự nâng không lõi thép, biểu diễn trên trục X, Y như trên hình 4a



Hình 4. Đồ thị véc tơ lực ô từ trên trục X-Y
a. Khi đồng tâm b. Khi lệch tâm

Khi rotor lệch tâm (Hình 4b), hệ điều khiển sẽ tạo ra ΔF_x^+ và ΔF_x^- để khử sai lệch theo trục X ($\Delta x = 0$). Lực ΔF_y^+ và ΔF_y^- để khử sai lệch theo trục y ($\Delta y = 0$). Từ biểu thức (2.8) ta thấy lực ô từ khi Rotor cân bằng được giữ ổn định bởi hai cặp lực đối ngẫu bằng nhau (F_{x+} và F_{x-}), (F_{y+} và F_{y-}) tương tự như ô từ chủ động dùng lõi thép.

Khi rotor bị lệch tâm như trên Hình 4b xuất hiện sai lệch là $\Delta x > 0$ và $\Delta y < 0$. Để khử lệch tâm rotor đưa rotor về vị trí cân bằng ta dùng giải pháp điều khiển dòng điện tạo ra lực để kéo sai lệch $\Delta x = 0$ và $\Delta y = 0$. Trên Hình 4b mô tả điều khiển lực để khử lệch tâm Rotor. Lúc đó:

$$\begin{cases} F_x^+ = F_{xo} - \Delta F_x \\ F_x^- = F_{xo} + \Delta F_x \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} F_y^+ = F_{yo} + \Delta F_y \\ F_y^- = F_{yo} - \Delta F_y \end{cases} \quad (2.10)$$

Mô tả lực theo dòng điện trên trục X-Y ta có:

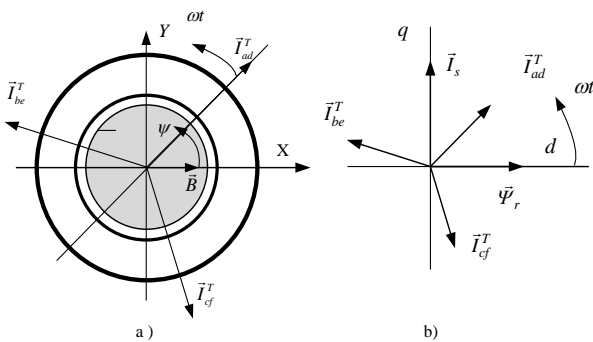
$$\begin{cases} F_x = k_{fx}(I_{x0} \pm \Delta i_x) \\ F_y = k_{fy}(I_{y0} \pm \Delta i_y) \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3. Mô men quay

Để tạo lực nâng ta sử dụng dòng điện một chiều cấp cho cuộn dây, nhưng để tạo mô men quay cho động cơ, ta sử dụng dòng điện xoay chiều. Xét đối với ba cặp cuộn dây a-d, b-e và c-f ta cấp cho dòng điện xoay chiều như trên phương trình 2.12 dưới đây:

$$\begin{cases} i_{ad}^T = I_m \cos \psi \\ i_{be}^T = I_m \cos(\psi + 2\pi/3) \\ i_{cf}^T = I_m \cos(\psi - 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.12)$$

Khi cấp dòng xoay chiều vào ba cuộn dây ta có ba véc tơ dòng điện đồng trị tạo mô men được biểu diễn trên hình 5a:



Hình 5. Đồ thị véc tơ dòng tạo mô men

Véc tơ từ thông động cơ Ψ_r trùng với véc tơ từ trường (trục

d) có giá trị $\Psi_r = \frac{1}{2} \pi r l B (Wb)$.

Ba véc tơ dòng điện $\vec{i}_{ad}^T, \vec{i}_{be}^T, \vec{i}_{cf}^T$ quay với tốc độ ωt , áp dụng phép biến đổi véc tơ ta được véc tơ dòng điện tổng:

$$\begin{cases} \vec{I}_s = \frac{2}{3} (\vec{i}_{ad}^T + a \vec{i}_{be}^T + a^2 \vec{i}_{cf}^T) \\ a = e^{j \frac{2\pi}{3}} \end{cases} \quad (2.13)$$

Chọn vị trí véc tơ tổng trùng với trục q, mô men động cơ được tính:

$$M = k_m \Psi_r I_s \quad (2.14)$$

Với $k_m = \frac{3}{2}$

Như vậy, về mặt vật lý hai thành phần dòng điện tạo lực ô từ và tạo mô men hoàn toàn độc lập và thỏa mãn tính xếp chồng vì cùng đại lượng thứ nguyên. Do đó, ta có dòng điện stator là tổng của hai thành phần dòng điện tạo ra lực ô từ và mô men quay và được biểu diễn thành:

$$\begin{cases} i_{a,d} = (I_0 + \Delta i_{a,d}^f) + i_{a,d}^T \\ i_{b,e} = (I_0 + \Delta i_{b,e}^f) + i_{b,e}^T \\ i_{c,f} = (I_0 + \Delta i_{c,f}^f) + i_{c,f}^T \end{cases} \quad (2.15)$$

Phương trình động lực học vị trí của hệ đối với trục X và trục Y:

$$\begin{cases} F_x - F_{cx} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \\ F_y - F_{cy} = m \frac{d^2 y}{dt^2} \end{cases} \quad (2.16)$$

Phương trình động lực học của truyền động điện:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.17)$$

Trong đó:

- x (m) và y (m) là khe hở không khí của động cơ tại trục X và Y
- m (kg) là khối lượng Rotor
- $F_{cx}(N), F_{cy}(N)$ là lực cản chuyển động trục X và trục Y
- M (Nm) là mô men cản
- J (kgm²) là mô men quán tính Rotor động cơ

3. Thiết kế điều khiển cho động cơ SSBM

3.1. Cấu trúc điều khiển

Sơ đồ cấu trúc điều khiển cho động cơ nâng không lõi thép được trình bày trên hình 6.

- Hệ thống điều khiển này gồm có hai đại lượng cần điều khiển là vị trí rotor (x và y) và tốc độ động cơ (ω), tương ứng với hai kênh điều khiển: Điều vị trí rotor và điều khiển tốc độ động cơ.

- Hai đại lượng điều khiển gồm: Dòng điện tạo lực nâng I_k^f

là dòng một chiều và dòng điện tạo mô men I_k^T để điều khiển tốc độ là dòng xoay chiều. Hai dòng điện này được điều khiển riêng rẽ sau đó tổng hợp đưa vào bộ khuếch đại nguồn dòng cấp cho các thanh dẫn của động cơ.

- Đại lượng tác động của điều khiển tốc độ động cơ là dòng sinh mô men I_{sm} , từ dòng I_{sm} quy đổi ra $I_{ad}^T, I_{be}^T, I_{cf}^T$ qua khâu biến đổi tọa độ.

- Đại lượng điều khiển vị trí: Lực ô từ luôn tồn tại ba dòng điện $I_{oad}^f, I_{obe}^f, I_{ocf}^f$ tạo ba lực đẩy F_{oad}, F_{obe} và F_{ocf} tác động liên tục lên rotor để cân bằng rotor trong cả lúc rotor đứng im và cả trong khi động cơ chạy. Xét trên trục X-Y khi trạng thái rotor cân bằng ta luôn duy trì lực từ F_{xo} và F_{yo} tác động do dòng điện I_{ox} và I_{oy} tạo nên. Khi có sai lệch $\Delta x \neq 0$ và $\Delta y \neq 0$, bộ điều khiển tạo nên dòng $(I_{x0} + \Delta i_x)$ và $(I_{y0} + \Delta i_y)$ để sinh ra lực:

$$F_x = F_{x0} + \Delta F_x; F_y = F_{y0} + \Delta F_y$$

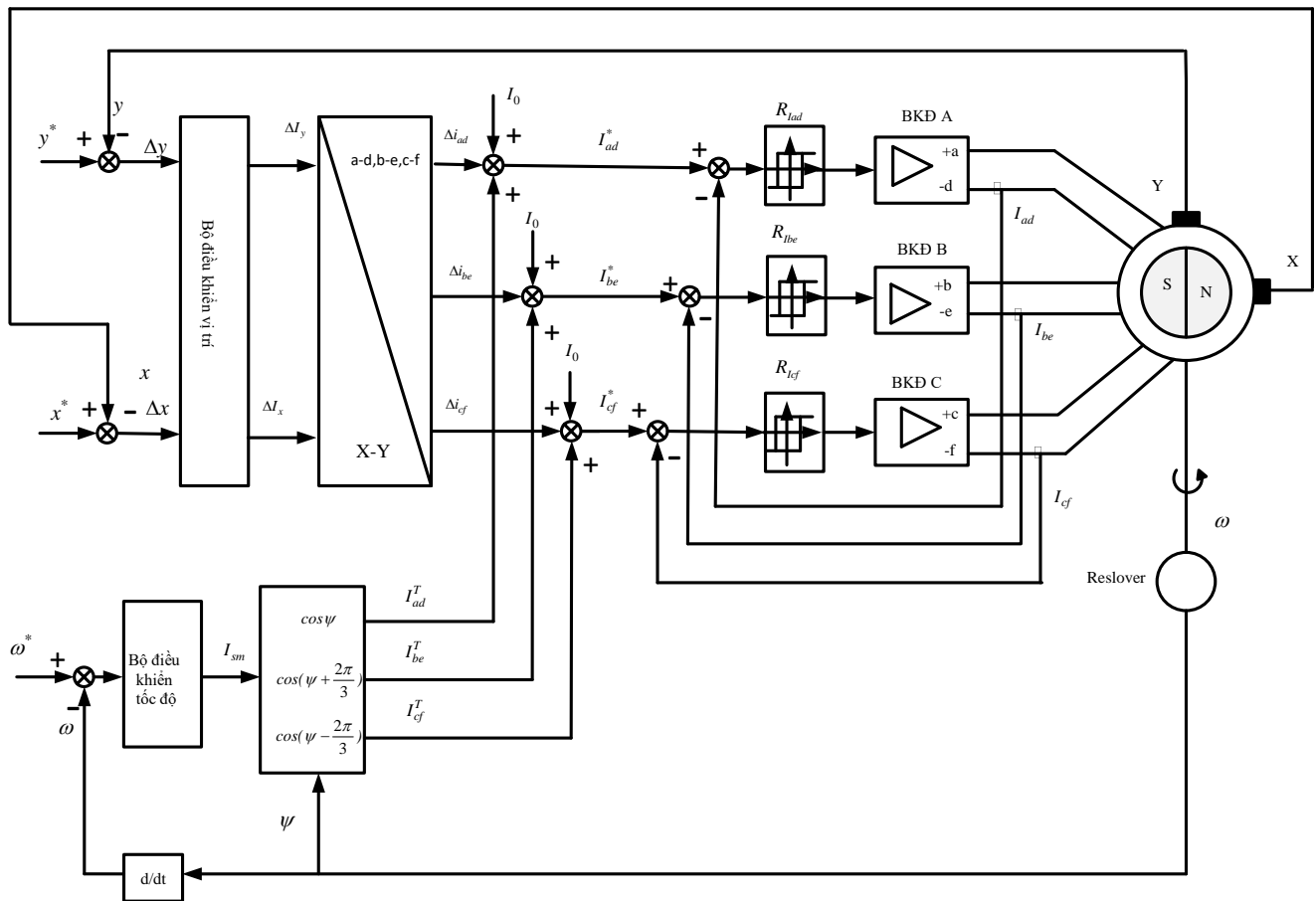
Các lực F_x và F_y để khử độ lệch tâm rotor. Dòng điện I_{ox} và I_{oy} trên trục X và Y được sinh ra từ dòng của ba cuộn dây $I_{ado}^f = I_{beo}^f = I_{cfo}^f = I_0^f$.

Dòng điện cấp cho động cơ bao gồm dòng một chiều tạo lực nâng và dòng xoay chiều sinh mô men được thể hiện như trên phương trình 3.1.

$$\begin{cases} i_{ad}^* = (I_0^f + \Delta i_{ad}^f) + i_{ad}^T \\ i_{be}^* = (I_0^f + \Delta i_{be}^f) + i_{be}^T \\ i_{cf}^* = (I_0^f + \Delta i_{cf}^f) + i_{cf}^T \end{cases} \quad (3.1)$$

Phản ứng của hệ điều khiển gồm: Ba bộ khuếch đại nguồn dòng, ba thiết bị đo dòng, hai thiết bị đo vị trí (khe hở) và thiết bị đo góc quay, tốc độ động cơ.

Cấu trúc điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép được thiết kế theo kiểu nối tầng (Hình 6):



Hình 6. Cấu trúc điều khiển động cơ tự nâng không lõi thép

- 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 (2.6) 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 tính toán thông qua (2.8). Tổng hợp hai tín hiệu dòng điện ta có dòng điện đặt cho mạch vòng dòng điện (2.9).

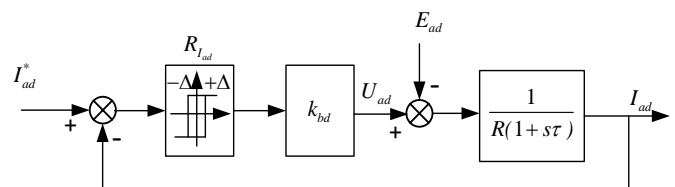
Phương pháp thiết kế điều khiển: Ta thiết kế mạch vòng trong sau đó thực hiện vòng ngoài. Thiết kế riêng rẽ từng kênh có mô phỏng kiểm chứng, sau đó tổng hợp thành hệ để mô phỏng đánh giá.

3.2. Tổng hợp hệ điều khiển cho động cơ SSBM

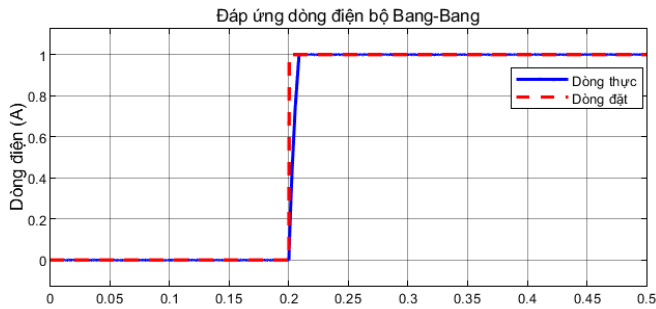
a. Tổng hợp mạch vòng dòng điện

Vì ba dòng điện i_{ad}, i_{be}, i_{cf} là dòng xoay chiều nên ta sẽ chọn bộ điều khiển được chọn là bộ điều khiển kiểu “bang-bang” với ba kênh cho ba dòng điện và chọn $\Delta = \pm 5\% I_m$. Mạch vòng dòng điện sẽ đáp ứng với hai đại lượng: Tần số và biên độ. Khi khởi động động cơ hai đại lượng này đều biến động. Tuy nhiên để đơn giản ta sẽ mô phỏng độc lập đại lượng biên độ để đánh giá đáp ứng của mạch vòng. Do điện cảm của mạch phản ứng động cơ rất nhỏ (do không có lõi thép) nên đáp ứng hệ rất nhanh.

Do ba bộ điều khiển có tính chất giống nhau nên trong nội dung bài báo này chỉ trình bày bộ điều khiển dòng cấp cho cặp cuộn dây a-d như trên hình 7:



Hình 7. Cấu trúc bộ điều khiển dòng cho cuộn a-d



Hình 8. Đáp ứng biên độ dòng điện ở tần số cố định

Trong đó:

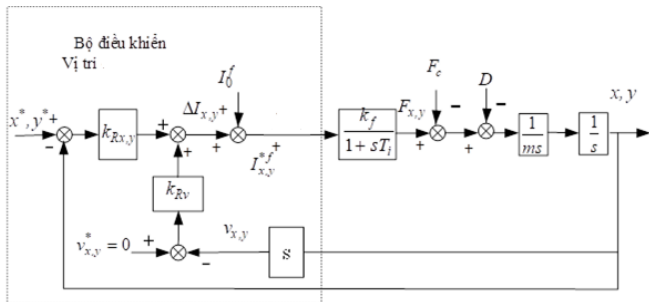
- U_{ad} (V) là điện áp
- E_{ad} (V) là sức điện động
- R (Ω) điện trở cuộn dây
- L là điện cảm cuộn dây
- I_{ad} (A) là dòng điện tổng đẳng trị

Đáp ứng biên độ dòng điện ở tần số cố định như trên hình 8:

Nhận xét: Điều khiển biên độ dòng điện theo kiểu “bang-bang” có tác động nhanh, thời gian đáp ứng là 5ms.

b. Tổng hợp mạch vòng điều khiển vị trí

Mạch vòng điều khiển vị trí Rotor gồm có các đại lượng sau: Vị trí (x,y), tốc độ chuyển dịch $v_y = \dot{y}; v_x = \dot{x}$; hằng số thời gian mạch vòng kín dòng điện T_i , hệ số tỷ lệ lực và dòng điện k_{fx}, k_{fy} . Phản đối tượng có dòng điện I_0 để tạo lực giữ rotor là F_0



Hình 9. Cấu trúc điều khiển vị trí PD có hai mạch vòng nối song song

Mạch vòng điều khiển vị trí rotor được thiết kế có cấu trúc dạng PD hai mạch vòng nối song song (vị trí và tốc độ chuyển dịch). Tổng hợp ta có tham số hai bộ điều khiển:

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

$$\begin{cases} k_{Rvx} = \frac{m}{2k_f.T_i} \\ k_{Rvy} = \frac{m}{2k_f.T_i} \end{cases} \quad (3.2)$$

- Điều khiển vị trí $R(x,y)$:

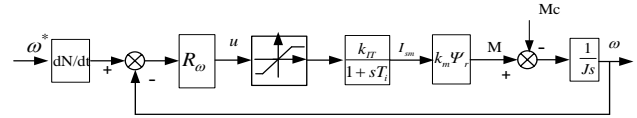
$$\begin{cases} k_{Rx} = \frac{1}{2\tau_{vx}}; \tau_{vx} = 2T_i \\ k_{Ry} = \frac{1}{2\tau_{vy}}; \tau_{vy} = 2T_i \end{cases} \quad (3.3)$$

c. Tổng hợp mạch vòng điều khiển tốc độ cho động cơ SSBM

Hàm truyền đối tượng mạch vòng điều khiển tốc độ quay của động cơ tự nâng không lõi thép:

$$\begin{cases} \frac{\omega}{(M - M_c)} = \frac{1}{Js} \\ \frac{M}{I_{sm}} = \frac{k_m \Psi_r}{1 + sT_i} \end{cases} \quad (3.4)$$

Trong đó: J (kgm²) mô men quán tính động cơ



Hình 10. Cấu trúc điều khiển mô men

Với giả thiết trên mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ SSBM là tuyến tính thông số không đổi, tương tự như các động cơ xoay chiều điều khiển véc tơ thông dụng. Ta có thể áp dụng tiêu chuẩn mô đun tối ưu để tổng hợp bộ điều khiển tốc độ.

Ta được hàm truyền bộ điều khiển tốc độ là PI cụ thể:

$$F_{R\omega}(s) = k_R \frac{1 + s\tau_R}{s\tau_R} \quad (3.5)$$

Với $k_R = \frac{J}{k_m k_{it}}; \tau_R = 4T_i$

4. Mô phỏng

4.1. Mô hình mô phỏng

Các thông số sử dụng để mô phỏng hoạt động của động cơ được đưa ra như trên bảng 1 như sau:

Bảng 1: Thông số động cơ SSBM

Ký hiệu	Giá trị	Ý nghĩa
B _s	0.49 T	Mật độ từ trường cực đại
m	0.04 kg	Khối lượng rotor động cơ
W	55 vòng	Số vòng dây quấn stator r
r	0.011 m	Bán kính rotor
δ	0.005 m	Khe hở không khí
ℓ	0.02 m	Chiều dài cuộn dây
R	3.2 Ω.	Điện trở cuộn dây
L	0.061mH	Điện cảm cuộn dây

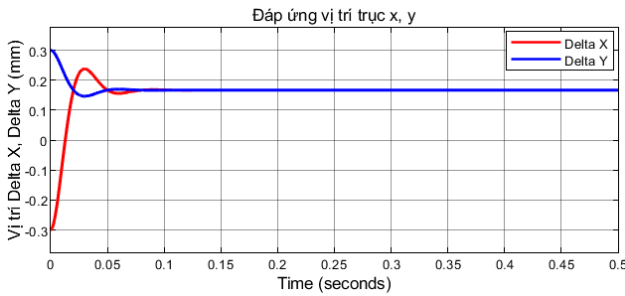
4.2. Kịch bản và kết quả mô phỏng

Để kiểm chứng về thiết kế mạch vòng điều khiển vị trí ta mô phỏng đánh giá, kiểm tra về tác động của lực để đưa rotor về vị trí cân bằng. Sau đó, kiểm tra đáp ứng về dòng điện sinh ra mô men quay của động cơ và đáp ứng tốc độ của động cơ.

a. Mô phỏng mạch vòng điều khiển vị trí

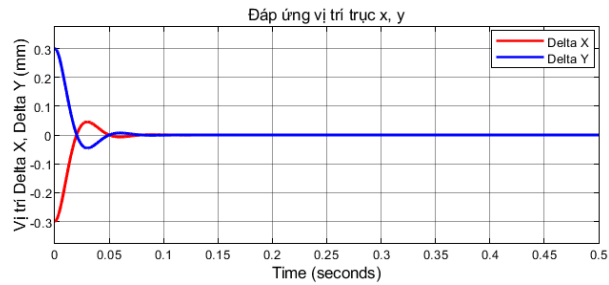
Để kiểm chứng về thiết kế mạch vòng vị trí ta đi mô phỏng kiểm tra đánh giá trong các trường hợp sau:

- Xét mạch vòng điều khiển vị trí khi động cơ đứng im, sai lệch ban đầu theo hai trục x, y được đặt lần lượt là $x = +0.3\text{mm}$, $y = -0.3\text{mm}$ và chưa có dòng điện tạo lực giữ $I_{0x} = 0$ và $I_{0y} = 0$ (Hình 11).



Hình 11. Đáp ứng vị trí khi $x = +0.3$ mm và $y = -0.5$ mm, và dòng tạo lực giữ Rotor $I_{ox}=0$ và $I_{oy}=0$

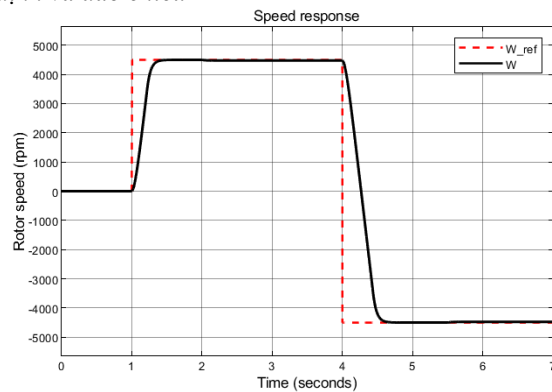
- Khi có dòng điện tạo lực giữ $I_{ox}=0.8A$ và $I_{oy}=0.8$ (Hình 12):



Hình 12. Đáp ứng vị trí khi $x = +0.3$ mm và $y = -0.5$ mm, và dòng tạo lực giữ Rotor $I_{ox}=0.8A$ và $I_{oy}=0.8A$

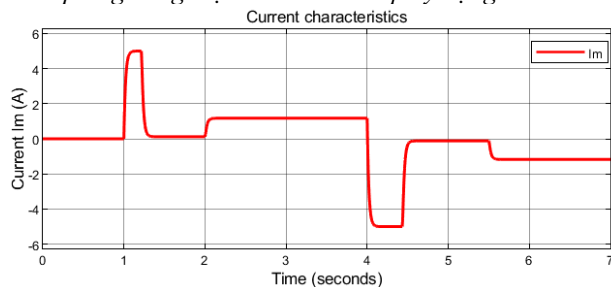
Nhận xét: Khi không có dòng tạo lực giữ I_0 , vị trí ổn định sau khoảng 0.08s và có sai lệch tĩnh $\Delta x=1.8$ mm và $\Delta y=1.8$ mm. Khi có dòng tạo lực giữ I_0 , vị trí ổn định sau khoảng 0.08s nhưng không có sai lệch tĩnh.

- b. *Đáp ứng tốc độ của động cơ khi khởi động, làm việc ổn định và đảo chiều*



Hình 13. Đáp ứng tốc độ quay của động cơ SSBM

- c. *Đáp ứng dòng điện sinh mô men quay động cơ*



Hình 14. Đáp ứng dòng điện của động cơ SSBM

Đáp ứng tốc độ và dòng điện sinh mô men quay là tốt phù hợp với động học của mạch vòng điều khiển tốc độ.

5. Kết luận

Nội dung bài báo đã phân tích quá trình động lực học các quá trình sinh mô men và lực nâng của mô hình mới cho động cơ tự nâng không lõi thép, với rotor có từ trường tập trung và stator có dây cuốn rải. Bài báo cũng đã giới thiệu một cách tiếp xây dựng mô hình toán học mới để từ đó đề xuất cấu trúc điều khiển mới với dòng duy trì tạo lực ổ từ liên tục. Việc thiết kế hệ điều khiển với cấu trúc mạch vòng trong điều khiển dòng điện kiểu “bang - bang”, mạch vòng ngoài hai kênh: Kênh điều khiển tốc độ với bộ điều khiển PI, kênh điều khiển vị trí với bộ điều khiển PD cấu trúc song song đã được kiểm chứng qua mô phỏng. Kết quả mô phỏng cho thấy: Điều khiển tốc độ khi khởi động và đảo chiều có đáp ứng tốt; Điều khiển vị trí cho kết quả đáp ứng yêu cầu hoạt động của động cơ.

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 Kluyskens, 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. Zwyssig 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] 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
- [13] 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.