

ADJUSTABLE ANGLE FOR POSITION SLIDING CONTROL FOR THREE PHASE SYNC MOTORS

Le Thi Thu Phuong*, Dang Thi Loan Phuong

TNU – University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 17/02/2022 Revised: 20/4/2022 Published: 21/4/2022	Nowadays, three-phase permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in industry or robotics. There are a lot of methods to control permanent magnet synchronous motors such as using PID, inventors... Sliding mode control method (SMC) is one of the motor control methods. This is a control method with a variable structure in terms of control structure and algorithms. It is stable and responsive. To apply slip control to a synchronous motor, it is necessary to first determine the algorithm model of the motor. We apply the voltage source inverter method with a speed below the rated speed to determine the current control loop circuit power, speed and position. The position control method is applied to the permanent magnet three-phase synchronous motor with the controller parameters to be calculated and selected accordingly so that the motor's speed and position are close to the preset speed and position.
KEYWORDS Sliding mode control Synchronous motor Nonlinear system Automatic control Position control	

ĐIỀU CHỈNH GÓC QUAY CHO ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ BA PHA NAM CHÂM VĨNH CỬU ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VỊ TRÍ

Lê Thị Thu Phương*, Đặng Thị Loan Phương

Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông - ĐHTT Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 17/02/2022 Ngày hoàn thiện: 20/4/2022 Ngày đăng: 21/4/2022	Ngày nay, động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu (PMSM) được sử dụng nhiều trong công nghiệp hoặc chế tạo robot. Có rất nhiều phương pháp để điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu như sử dụng PID, biến tần... Phương pháp điều khiển chế độ trượt (SMC) là một trong những phương pháp điều khiển động cơ. Đây là phương pháp điều khiển có cấu trúc biến đổi về cấu trúc điều khiển và thuật toán. Nó có tính ổn định và đáp ứng yêu cầu. Để áp dụng điều khiển trượt cho động cơ đồng bộ, trước tiên cần xác định được mô hình thuật toán của động cơ. Tiếp theo, ta áp dụng phương pháp biến tần nguồn áp với tốc độ dưới tốc độ định mức để xác định mạch vòng điều khiển dòng điện, tốc độ và vị trí. Cuối cùng áp dụng phương pháp điều khiển vị trí cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu với các thông số của bộ điều khiển sẽ được tính toán và lựa chọn cho phù hợp để tốc độ và vị trí của động cơ được sát với tốc độ và vị trí đã đặt trước.
TỪ KHÓA Điều khiển trượt Động cơ đồng bộ Hệ thống phi tuyến Điều khiển tự động Điều khiển vị trí	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5551>

* Corresponding author. Email: ltphuong@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Ngày nay động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu ngày càng được ứng dụng cao trong công nghiệp và các ứng dụng về rôbốt bởi vì nó có hiệu quả cao, quán tính thấp và mômen lớn [1]. Các ứng dụng quan trọng của máy điện đồng bộ trong công nghiệp như bù công suất phản kháng, tạo ra điện năng trong các nhà máy điện [2], trong các hệ thống yêu cầu tốc độ không đổi như nhà máy cao su, nhà máy dệt, nhà máy xi măng, máy nén khí, máy bơm ly tâm,... Vì vậy, việc điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu là vô cùng quan trọng [3].

Điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu dưới ba vòng điều chỉnh: dòng điện, tốc độ và vị trí. Có rất nhiều phương pháp điều khiển đã được áp dụng như sử dụng PID để điều khiển, hoặc điều khiển bằng hệ biến tần động cơ...

Phương pháp điều khiển trượt là phương pháp điều khiển có cấu trúc biến thiên, trong đó cấu trúc của điều khiển được thay đổi với mục đích để ổn định hóa điều khiển và cho đáp ứng bền vững [4]. Lý thuyết điều khiển dùng điều khiển trượt để điều khiển trạng thái hệ thống phi tuyến trên bề mặt xác định (bề mặt này được gọi là bề mặt trượt hay bề mặt chuyển mạch) trong không gian trạng thái [5]. Ứng dụng phương pháp điều khiển trượt trong điều khiển vị trí của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu giúp động cơ đạt được vị trí mong muốn trong thời gian ngắn nhất.

Để áp dụng điều khiển trượt cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu bề mặt thì cần xây dựng mô hình toán học cho động cơ [6]. Đưa ra các bộ điều khiển dòng, tốc độ và vị trí qua các khâu tính toán [7], áp dụng Matlab Simulink mô phỏng hệ thống và quan sát đường đặc tính, đồng thời điều chỉnh các thông số của bộ điều khiển sao cho các đường đặc tính về tốc độ và vị trí của hệ thống bám sát với đường đặc tính đặt trước [8].

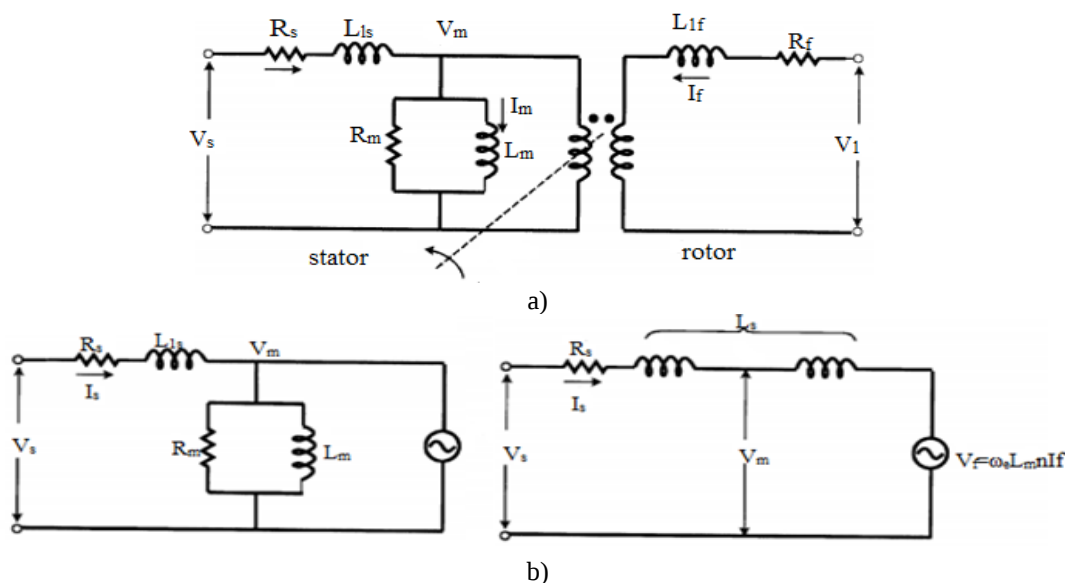
2. Mô hình toán học của động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu

Ngày nay sự phát triển của nền công nghiệp mạnh mẽ nên các loại động cơ đồng bộ được ứng dụng rất nhiều. Các loại động cơ được sử dụng có những loại có công suất từ vài trăm W đến hàng MW. Nguyên lý điều chỉnh tốc độ động cơ đồng bộ xuất phát từ biểu thức:

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p_p} \quad (1)$$

Với f_s là tần số tương ứng của nguồn, p_p là số đôi cực tương ứng của động cơ đồng bộ.

2.1. Sơ đồ thay thế của động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu



Hình 1. Sơ đồ thay thế một pha của động cơ đồng bộ

Điện áp stator V_s tạo ra dòng điện I_s và từ hóa lõi sắt. Từ thông của nam châm vĩnh cửu khi quay sẽ sinh ra sức điện động trong dây quấn stator V_f . Ta có thể dựng được sơ đồ thay thế cho một pha như hình 1(a). Mạch rotor có thể quy đổi về stator bằng dòng điện I_f' có tần số ω_e hình 1(b), trong đó n là tỷ số quy đổi giữa giá trị hiệu dụng của I_f' và biên độ của dòng một chiều I_f [2].

Công suất động cơ nhận từ lưới là công suất điện từ:

$$P_d = P_{dt} = 3V_s (I_{qs} \cos \delta - I_{ds} \sin \delta) \quad (2)$$

Các thành phần dòng điện chiếu lên các trục:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{V_s \cos \delta - V_f}{X_{ds}} \\ I_{qs} = \frac{V_s \sin \delta}{X_{qs}} \end{cases} \quad (3)$$

Thế các biểu thức (2) vào (3) ta được công suất điện từ và momen điện từ:

$$P_{dt} = 3 \frac{V_s V_f}{X_{ds}} \sin \delta + 3V_s^2 \frac{(X_{ds} - X_{qs})}{2X_{ds}X_{qs}} \sin 2\delta \quad (4)$$

$$M = \frac{3p_p}{2\omega_e} \left[\frac{V_s V_f}{X_{ds}} \sin \delta + V_s^2 \frac{(X_{ds} - X_{qs})}{2X_{ds}X_{qs}} \sin 2\delta \right] \quad (5)$$

$$= \frac{3p_p}{2\omega_e} \left[V_s \frac{\psi_f}{L_{ds}} \sin \delta + \psi_s^2 \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{2L_{ds}L_{qs}} \sin 2\delta \right] \quad (6)$$

Đối với động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu bề mặt có rotor được cấu tạo hình trụ tròn xoay với khe hở không khí đều nên $X_{ds} = X_{qs}$.

2.2. Mô hình toán học của động cơ đồng bộ

Áp dụng phép biến đổi tuyến tính để mô tả quá trình điện từ của động cơ trên hệ tọa độ d-q. Với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu có số đôi cực là một, $L_{ds} = L_{qs} = L_s$. Vì từ thông rotor ψ_{PM} được kích thích bằng nam châm vĩnh cửu nên ta coi v_{fr} là hằng số, ta viết ra được những phương trình sau đây (thay v_{qs} , v_{ds} bằng u_{qs} , u_{ds} và các điện cảm tản là L_σ).

Phương trình điện áp:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (7)$$

Phương trình từ thông:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} + \psi_{PM} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (8)$$

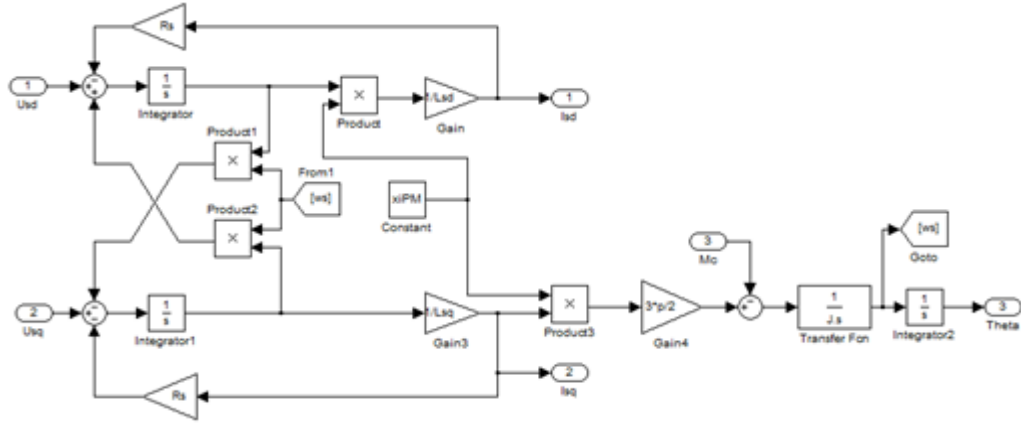
Giả sử ta điều chỉnh được tần số, có nghĩa là rotor luôn quay đồng bộ với tần số lưới. Như vậy dòng điện ở rotor không xuất hiện, phương trình (8) trở thành:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + \psi_{PM} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} \end{cases} \quad (9)$$

Phương trình momen:

$$M = \frac{3}{2} p_p \psi_{PM} i_{qs} \quad (10)$$

Từ (7) và (8), ta có sơ đồ cấu trúc động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu bề mặt trong hệ tọa độ d, q hình 2.

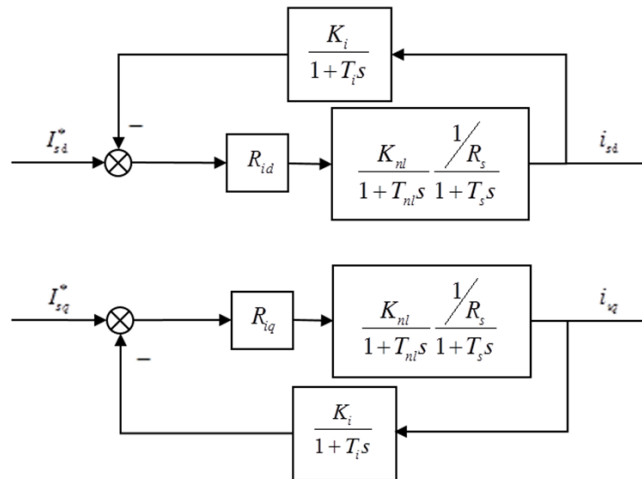


Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của PMSM trong hệ tọa độ d, q

3. Điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bề mặt dùng biến tần nguồn áp với tốc độ dưới tốc độ định mức

3.1. Mạch vòng điều chỉnh dòng điện của SPMSM

Trong hệ thống truyền động điện thì mạch vòng dòng điện là mạch vòng cơ bản có chức năng xác định momen xoắn của động cơ, điều chỉnh gia tốc [3]... Vì mô hình động cơ có xen kênh nên cần tách kênh như sơ đồ điều khiển dòng điện có tách kênh. Ta có 2 vòng điều khiển I_{ds} và I_{qs} riêng rẽ và độc lập không ảnh hưởng lẫn nhau trong quá trình điều khiển. Khi đó ta có 2 cấu trúc mạch vòng dòng riêng điều khiển I_{ds} và I_{qs} như hình 3. Trong đó, sensor đo dòng điện có hàm truyền là một khâu với hệ số truyền K_i và T_i là hằng số về thời gian.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc mạch vòng dòng điện sau khi tách kênh

Đối với động cơ trong công nghiệp, hằng số thời gian điện từ T_s thường lớn hơn nhiều lần hằng số thời gian điện từ T_{nl} và T_i . Ta đưa đối tượng điều khiển dòng điện xuống bậc hai như sau:

$$S_{oi}(s) \approx \frac{K_{nl} K_i}{(1 + T_s s)(1 + T_{si} s)} \quad \text{với } T_{si} = T_{nl} + T_i \quad (11)$$

Theo phương pháp chuẩn tối ưu ta xác định được:

$$\frac{R(s)S_o(s)}{1+R(s)S_o(s)} = F_{ch}(s) = \frac{1}{1+2\tau_\sigma+2\tau_\sigma^2s^2} \quad (12)$$

$$\Rightarrow R(s) = \frac{1}{S_o(s)2\tau_\sigma s(1+\tau_\sigma s)} \quad (13)$$

Đặt $\tau_\sigma = T_{si}$, thay (11) vào (14), ta tính được bộ điều khiển dòng điện theo chuẩn tối ưu môđun:

$$R_{id}(s) = R_{iq}(s) = \frac{1+T_s s}{K_{nl}K_i / R_s 2T_{si}s} = \frac{R_s T_s}{2K_{nl}K_i T_{si}} \left(1 + \frac{1}{T_s s}\right) \quad (14)$$

3.2. Tổng hợp mạch vòng điều chỉnh tốc độ

Trong kỹ thuật thường gặp các hệ thống điều chỉnh tốc độ. Ở đây ta sử dụng chuẩn tối ưu đối xứng để tổng hợp mạch vòng điều chỉnh tốc độ. Xét khi M_c là hằng số hay $M_c=0$, hằng số thời gian quán tính của mạch vòng điều chỉnh dòng điện $2T_{si}$ hay hằng số thời gian điện từ T_ω , đều nhỏ hơn nhiều lần hằng số thời gian cơ học J nên ta có hàm truyền của đối tượng điều chỉnh tốc độ là:

$$S_{\omega\omega}(s) \approx \frac{3p_p \psi_{PM} K_\omega}{2K_i} \frac{1}{Js(1+T_{s\omega}s)} \quad \text{với } T_{s\omega} = 2T_{si} + T_\omega \quad (15)$$

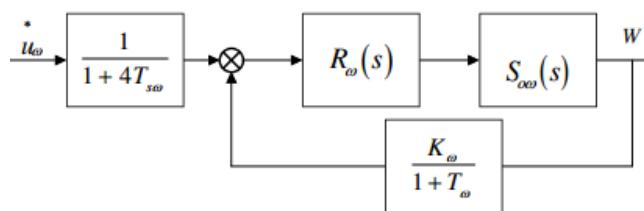
Áp dụng chuẩn tối ưu đối xứng ta xác định được bộ điều chỉnh tốc độ:

$$\frac{R(s)S_o(s)}{1+R(s)S_o(s)} = F_{ch}(s) = \frac{1+4\tau_\sigma}{1+4\tau_\sigma+4\tau_\sigma^2s^2+8\tau_\sigma^3s^3} \quad (16)$$

$$\Rightarrow R(s) = \frac{1+4\tau_\sigma}{S_o(s)8\tau_\sigma^2s^2(1+\tau_\sigma s)} \quad (17)$$

Đặt $\tau_\sigma = T_{s\omega}$ ta có:

$$R_\omega(s) = \frac{K_i J}{3p_p \psi_{PM} K_\omega T_{s\omega}} \left(1 + \frac{1}{4T_{s\omega}s}\right) \quad (18)$$



Hình 4. Sơ đồ giảm độ quá điều chỉnh mạch vòng điều chỉnh tốc độ

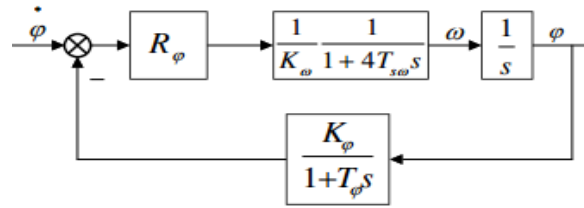
Hình 4 là sơ đồ mạch vòng điều chỉnh tốc độ cho động cơ áp dụng biến tần nguồn áp.

Hàm truyền tương ứng sẽ trở thành:

$$\frac{W(s)}{u_{\omega}^*(s)} = \frac{1}{K_{\omega}} \frac{1}{1+4T_{s\omega}s+8T_{s\omega}^2s^2+8T_{s\omega}^3s^3} \quad (19)$$

3.3. Xây dựng mạch vòng vị trí cho động cơ PMSM

Hình 5 là sơ đồ cấu trúc mạch vòng vị trí cho động cơ đồng bộ tương ứng khi hằng số thời gian là rất nhỏ.



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc mạch vòng điều chỉnh vị trí

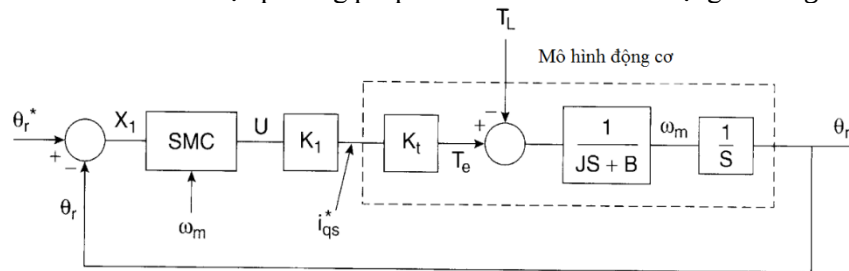
$$\frac{W(s)}{u_\omega(s)} \approx \frac{1}{K_\omega} \frac{1}{1+4T_{s\omega}s} \quad (20)$$

Bộ điều chỉnh vị trí theo chuẩn tối ưu môđun:

$$R_\varphi(s) = \frac{K_\omega}{2K_\varphi T_{s\varphi}} \quad (21)$$

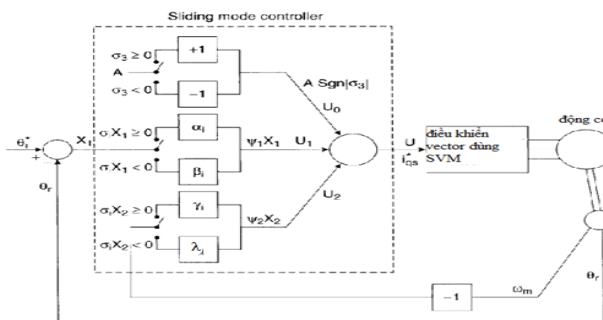
4. Áp dụng SMC cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu bề mặt

Áp dụng phương pháp SMC cho động cơ cảm ứng bằng cách điều khiển vector và thiết kế các tiêu chí cho các biến số điều khiển [4]. Tính toán và lựa chọn các thông số cho bộ điều khiển sao cho không ảnh hưởng tới các thông số khác của hệ thống như hằng số \$K_t\$, \$J\$, hệ số ma sát tắt dần \$B\$ và mômen của tải \$T_L\$. Hình 6 thể hiện phương pháp điều khiển vector cho động cơ bằng SMC.



Hình 6. Phương pháp điều khiển vector động cơ cảm ứng bằng SMC

Phương pháp điều khiển SMC một cách chi tiết ở hình 7 thể hiện đáp ứng điều khiển bám quỹ đạo đặt theo các đường tăng tốc, tốc độ hằng và giảm tốc. Điều khiển theo phương pháp SMC chúng ta cần 3 vòng điều khiển.



Hình 7. Mô hình điều khiển SMC của động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu bề mặt

Qua lựa chọn và tính toán ta xác định được thông số của bộ điều khiển SMC

Phần tăng tốc:

Vòng lặp đầu tiên ta chọn các thông số:

Vòng lặp thứ hai ta chọn các thông số:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \beta_1 = 0 \end{cases}$$

Phần tốc độ hằng:

Vòng lặp đầu tiên ta chọn các thông số:

$$\begin{cases} \alpha_2 X_1 = 10.2 \\ \beta_2 X_1 = 9.8 \end{cases}$$

Phần giảm tốc:

Vòng lặp đầu tiên ta chọn các thông số:

$$\begin{cases} \alpha_1 X_1 = 10.01 \text{ với } X_1 > 0 \\ \alpha_1 X_1 = 9.99 \text{ với } X_1 < 0 \\ \beta_1 X_1 = 9.99 \text{ với } X_1 > 0 \\ \beta_1 X_1 = 10.01 \text{ với } X_1 < 0 \end{cases}$$

Mô phỏng trên MATLAB – SIMULINK

Điện áp nguồn một chiều 330 [V]

Công suất đầu ra định mức 40 [kW]

Momen định mức 134 [Nm]

Tốc độ định mức 2600 [rpm]

Dòng pha định mức 216 [A]

$$\begin{cases} X_2 \gamma_1 = 16.6 \\ X_2 \beta_1 = 9.6 \end{cases}$$

Vòng lặp thứ hai ta chọn các thông số:

$$\begin{cases} \gamma_2 = 0 \\ \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

Vòng lặp thứ hai ta chọn các thông số:

$$\begin{cases} \gamma_3 = 0.021 \\ \lambda_3 = 0.019 \end{cases}$$

Số cực

6

Từ thông nam châm

0,07 [Wb]

Điện cảm dọc trục d

875 [μ H]

Điện cảm dọc trục q

875 [μ H]

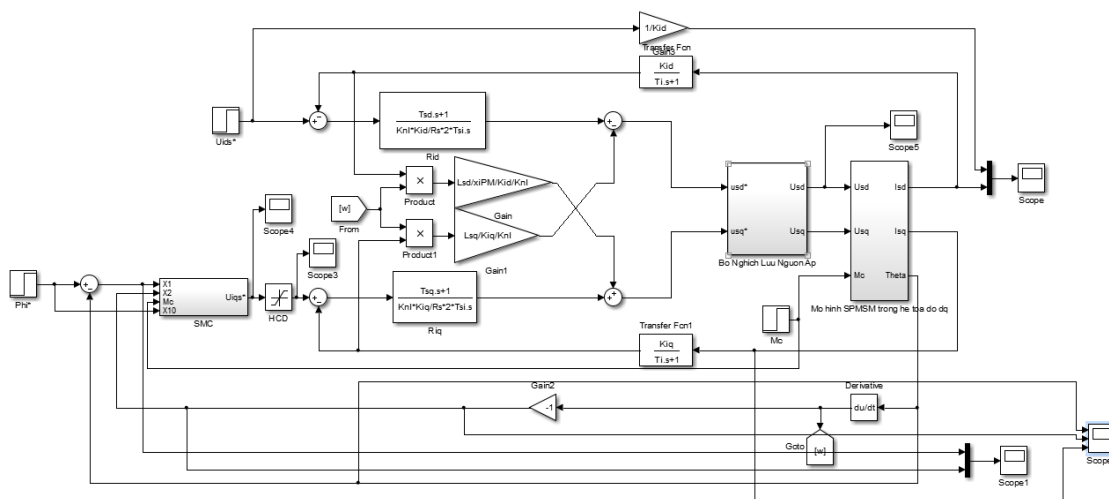
Điện trở stator

29,5

[m Ω]

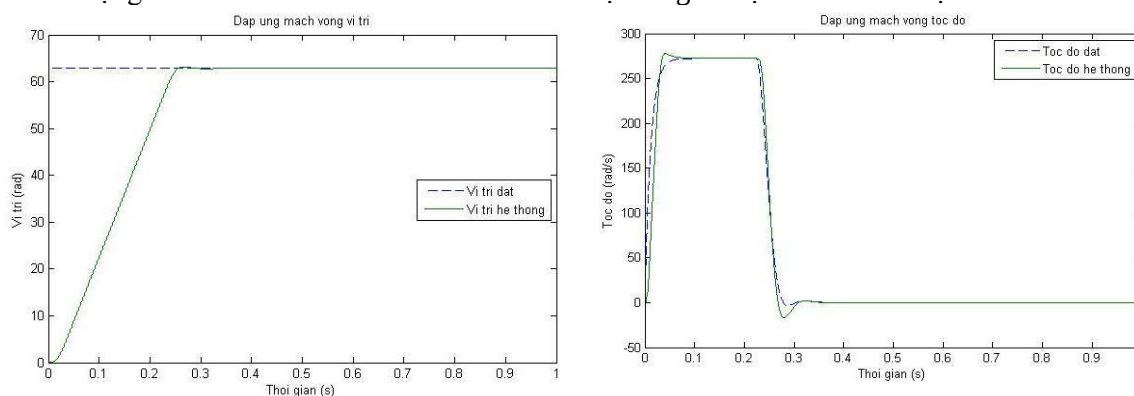
Momen quán tính

0,018 [kgm²]



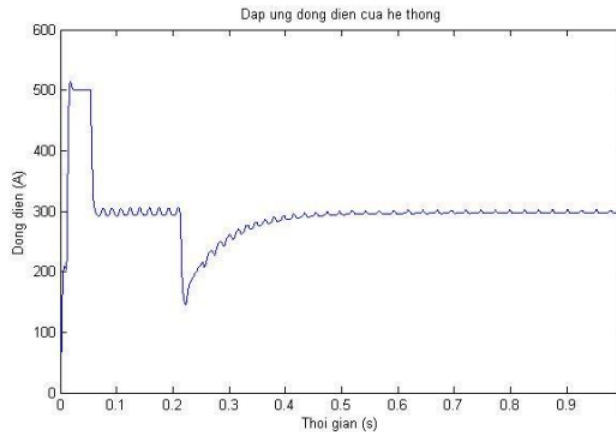
Hình 8. Điều khiển vị trí động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu sử dụng SMC mô phỏng trên MATLAB – SIMULINK

Sử dụng Matlab Simulink đưa ra mô hình của hệ thống có bộ điều khiển trượt ở hình 8.



Hình 9. Đáp ứng vị trí của hệ thống**Hình 10.** Đáp ứng tốc độ của hệ thống

Hình 9 ta thấy đáp ứng vị trí của hệ thống từ 0,25s đã bám sát với vị trí đặt ban đầu. Vậy là sau thời gian rất ngắn thì hệ thống đã đạt được vị trí mong muốn. Hình 10 là đáp ứng tốc độ của hệ thống. Ta có thể thấy tốc độ của hệ thống bám khá sát tốc độ đặt.

**Hình 11.** Đáp ứng dòng điện của hệ thống SMC

Với hình 11 đáp ứng dòng điện của hệ thống SMC vượt lên 500A trong thời gian từ 0-0,08s và đạt ổn định tại thời điểm 0,4s với dòng 300A. Tuy nhiên, đáp ứng về dòng điện có hiện tượng rung “chattering” đặc trưng của điều khiển SMC.

Nhận xét:

Qua đáp ứng nhận được ta thấy rằng khi động cơ được ứng dụng bộ điều khiển trượt đảm bảo độ bám giữa các thông số tốc độ và vị trí bám sát với đường đặc tính đặt ra. Tuy nhiên, đặc trưng của điều khiển trượt là hiện tượng rung vẫn thấy rõ rệt ở đáp ứng dòng điện của hệ thống.

5. Kết luận

Ta thấy việc ứng dụng bộ điều khiển trượt cho hệ thống làm cho hệ thống nhanh chóng đạt được vị trí mong muốn với tốc độ ổn định. Việc sử dụng SMC cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu là phương pháp điều khiển khá ổn định. Tuy nhiên, việc lựa chọn các thông số cho bộ điều khiển là khá khó khăn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] B. -J. Wang and J. -J. Wang, “Slide mode control of surface-mount permanent magnet synchronous motor based on error model with unknown load,” *Journal of software*, vol. 6, no. 5, pp. 819-825, May 2011.
- [2] N. T. Nguyen, T. T. Dang, X. T. Tran, and M. H. Phung, “sliding mode control law for uncertain nonlinear multi motor systems,” *HUI Journal of Science and Technology*, vol. 57, no. special, pp. 30-34, 2021.
- [3] T. T. U. Hoang, D. T. Kim, V. A. Pham, and X. M. Dinh, “Designing an adaptive controller for two-wheeled self-balancing mobile robot using hierarchical sliding control strategy and radial basis function neural network,” *HUI Journal of Science and Technology*, vol. 57, no. special, pp. 39-48, 2021.
- [4] V. H. Bui, “Sliding mode method of controlling the current loop for single-phase active rectifier,” *HUI Journal of Science and Technology*, no. 48, pp. 8-12, 2019.
- [5] M. H. Ngo, “Speed control of axial flux synchronous motor using sliding mode control,” *HUI Journal of Science and Technology*, vol. 52, no. special, pp. 22-27, 2019.
- [6] T. T. P. Le, “Application of field oriented control for induction motor,” *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 225, no. 06: Natural Sciences - Engineering - Technology, pp. 521-527, 2020.
- [7] A. T. Le, V. T. Pham, and T. M. H. Nguyen, “Modeling and simulating of line start permanent magnet synchronous motors,” *HUI Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 56, pp. 13-18, 2020.
- [8] Q. K. Bui and V. L. Nguyen, *Electric transmission facility*. Publishing scientific and technical, 2007.