

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT XOẺN KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT TRƯỢT CHO ĐỘNG CƠ CẢM ỨNG TUYẾN TÍNH

DESIGN OF A TWISTING SLIDING MODE CONTROLLER COMBINED
WITH A SLIDING MODE OBSERVER FOR LINEAR INDUCTION MOTORS

Nguyễn Thị Thu Hiền^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.382>

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu về mô hình của động cơ cảm ứng tuyến tính LIM (linear induction motors) với các thành phần nhiễu bất định. Từ đó, thiết kế bộ điều khiển trượt xoẻn dựa trên bộ quan sát trượt bậc cao giúp hệ thống ổn định nhanh hơn, giảm thiểu hiện tượng chattering nhờ khử nhiễu chủ động, bảo đảm bám theo vận tốc và từ thông trong thời gian hữu hạn. Chất lượng của bộ điều khiển được kiểm chứng bằng mô phỏng bởi phần mềm MATLAB/Simulink. Các kết quả đã chứng minh bộ điều khiển đề xuất cho chất lượng tốt hơn cả về dòng điện và đáp ứng chuyển động đối với hệ động cơ LIM.

Từ khóa: Động cơ cảm ứng tuyến tính, điều khiển trượt xoẻn, bộ quan sát trượt bậc cao.

ABSTRACT

The paper presents a model of a linear induction motor (LIM) with uncertain disturbances. Based on this model, a twisting sliding mode controller is designed using a high-order sliding mode observer, which enables faster system stabilization, reduces chattering through active disturbance rejection, and ensures finite-time tracking of velocity and flux. The performance of the controller is verified through simulations in MATLAB/Simulink. The results demonstrate that the proposed controller provides superior performance in both current regulation and motion response of the LIM system.

Keywords: Linear induction motors, twisting controller, high-order sliding mode observer.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: hienntt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/8/2025

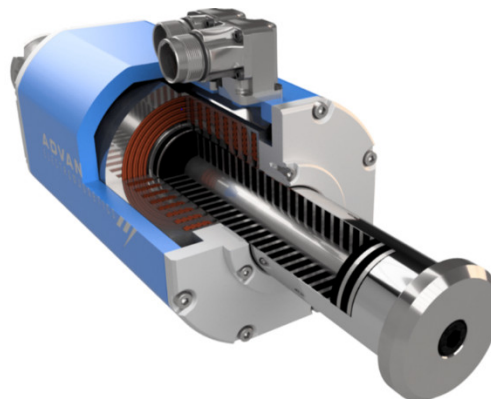
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/11/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, động cơ điện đã phát triển theo hướng có thiết kế đơn giản và hiệu suất cao hơn.

Trong đó, động cơ cảm ứng tuyến tính đã nhận được sự quan tâm rộng rãi cả trong nước và quốc tế do cấu trúc cơ học đơn giản và loại bỏ các bộ chuyển đổi trung gian [1]. So với động cơ cảm ứng quay, động cơ cảm ứng tuyến tính có tuổi thọ cao hơn, mômen động cơ lớn hơn, tính linh hoạt cao hơn trong thiết kế mạch [2, 3].



Hình 1. Động cơ cảm ứng tuyến tính

Tuy nhiên, hiệu ứng động lực học cuối cùng phát sinh khi phần chính (tương tự như stato trong động cơ cảm ứng quay) và phần thứ cấp (tương tự như rôto) chuyển động tương đối với nhau, làm tăng tính phi tuyến tính, khiến việc điều khiển động cơ cảm ứng tuyến tính có độ chính xác cao trở nên khó khăn hơn [4]. Để giải quyết hạn chế này, Pucci đã đề xuất một chiến lược điều khiển tuyến tính hóa (FL) phản hồi đầu vào-đầu ra để nâng cao hiệu suất phản ứng động [5]. Phương pháp FL này mở rộng các chiến lược điều khiển từ động cơ quay sang động cơ cảm ứng tuyến tính; tuy nhiên, việc triển khai bộ điều khiển cuối cùng cần nhiều phép biến đổi, dẫn đến sự gia tăng đáng kể về độ phức tạp tính toán. Trong các ứng dụng thực tế, các tham số LIM bị ảnh hưởng bởi các yếu tố vật lý như nhiệt độ và độ ẩm. Các bộ điều khiển dựa vào thông tin tham số chính xác của động cơ gặp khó khăn

trong việc duy trì tính ổn định vì có sự thay đổi tham số hoặc sự không chắc chắn của hệ thống. Khi tồn tại những bất định đáng kể trong các ứng dụng công nghiệp, lý thuyết điều khiển chế độ trượt là một giải pháp hiệu quả. Các bộ điều khiển trượt có thể bù chính xác cho các bất định phù hợp bằng cách duy trì các biến trượt được chọn phù hợp ở mức 0, mặc dù về mặt lý thuyết, điều này đòi hỏi tần số chuyển mạch vô hạn. Trong số các kỹ thuật chế độ trượt, thuật toán trượt xoắn (Twisting Sliding-Mode Controller - TC) đảm bảo rằng cả đầu ra kỳ vọng và đạo hàm bậc nhất của nó đều hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn, bất chấp nhiễu loạn bị giới hạn [6]. Tuy nhiên, việc áp dụng trực tiếp kỹ thuật TC trong các hệ thống LIM dẫn đến hiện tượng chattering. Để giảm chattering, nhiễu loạn tổng thể có thể được bù thông qua bộ quan sát, bài báo sử dụng bộ quan sát HOSMO (High-order Sliding-mode Observer) [7] ước lượng và bù tổng nhiễu, hình thành chiến lược TC-HOSMO.

2. MÔ HÌNH TOÁN CỦA LMI

Phương trình trạng thái theo [3] có dạng:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\gamma i_{ds} + \frac{n_p \pi}{h} g_{qs} + \alpha \frac{\hat{L}_m i_{qs}^2}{\psi_r} + \beta \alpha \psi_r + \frac{u_{ds}}{\hat{\sigma} \hat{L}_s} \quad (1)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\gamma i_{qs} - \frac{n_p \pi}{h} v(i_{ds} + \beta \psi_r) - \alpha \frac{\hat{L}_m i_{ds} i_{qs}}{\psi_r} + \frac{u_{qs}}{\hat{\sigma} \hat{L}_s} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -(\alpha - \eta) \psi_r + \alpha \hat{L}_m i_{ds} \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{n_p \pi}{h} v + \frac{\alpha \hat{L}_m i_{qs}}{|\psi_r|} \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = \mu(\psi_r i_{qs}) - \frac{F_{eb}}{M} - \frac{F_r}{M} \quad (5)$$

$$F_{eb} = u[\psi_r^2 + L_{\sigma}^2(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_{\sigma}(\psi_r i_{ds})] \quad (6)$$

Trong đó: u_{ds} , u_{qs} - điện áp phần stator; i_{ds} , i_{qs} - dòng điện stator; $\psi_r = \psi_{dr}$, $\psi_{qr} = 0$ từ thông thứ cấp; F_e , F_{eb} , F_r - lực điện từ, lực hãm, tải; L_s , L_r , L_m - điện cảm; R_s , R_r - điện trở; n_p - số đôi cực; σ - hệ số tản tổng.

Tham số hệ thống được tính theo công thức

$$\alpha = \frac{1}{\hat{T}_r} \left(1 - \frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_m} \right), \quad \beta = \frac{\hat{L}_m}{\hat{\sigma} \hat{L}_s \hat{L}_r}, \quad \eta = -\frac{\hat{R}_r}{\hat{L}_m};$$

$$\mu = \frac{3n_p \pi \tau_m \hat{L}_m}{2Mh\hat{L}_r v}, \quad g = \text{sign}(v) \frac{3}{2} \frac{L_f^2}{2n_p h} \frac{1 - e^{-Q}}{2n_p h};$$

$$\gamma = \frac{1}{\hat{\sigma} \hat{L}_s} \left[R_s + \hat{R}_r \left(1 - \frac{\hat{L}_m}{\hat{L}_r} \right) + \frac{\hat{L}_m}{\hat{L}_r} \left(\frac{\hat{L}_m}{\hat{T}_r} - \hat{R}_r \right) \right];$$

Với các biến phụ:

$$Q = \frac{\tau_m R_r}{(L_m + L_{\sigma})v}, \quad f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q};$$

$$\hat{L}_s = L_{\sigma s} + \hat{L}_m, \quad \hat{L}_r = L_{\sigma r} + \hat{L}_m; \quad \hat{T}_r = \frac{\hat{L}_r}{R_r + \hat{R}_r}, \quad \hat{\sigma} = 1 - \frac{\hat{L}_m^2}{\hat{L}_s \hat{L}_r}$$

3. THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT HOSMO

Đặt biến $x_{\psi 1} = \psi_r$; $x_{\psi 2} = \dot{\psi}_r$; $x_{\psi 3} = \dot{f}_1$ ta có mô hình mở rộng từ thông:

$$\begin{cases} \dot{x}_{\psi 1} = x_{\psi 2} \\ \dot{x}_{\psi 2} = f_1 + g_1 u_{ds} \\ \dot{x}_{\psi 3} = \dot{f}_1 \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó:

$$f_1 = -q_1 \psi_r + (\alpha - \eta)^2 \psi_r - \alpha \hat{L}_m (\alpha - \eta) i_{ds} + q_2 i_{ds} - \alpha \hat{L}_m \gamma i_{ds} + \alpha \hat{L}_m \frac{n_p \pi}{h} i_{qs} + \frac{\alpha^2 \hat{L}_m^2 i_{qs}^2}{|\psi_r|} + \hat{L}_m \beta \alpha \psi_r$$

$$q_1 = \frac{R_r \hat{L}_r + R_r L_m (1 + f(Q))}{\hat{L}_r^2} \cdot \frac{T_r a}{\tau_m} \left[1 - \left(1 + \frac{\tau_m}{T_r v} \right) e^{-\frac{\tau_m}{T_r v}} \right];$$

$$q_2 = R_r \left[\frac{L_m}{\hat{L}_r^2} (1 + f^2(Q)) + 1 - 2 \frac{L_m f(Q)}{\hat{L}_r} \right] \cdot \frac{T_r a}{\tau_m} \left[1 - \left(1 + \frac{\tau_m}{T_r v} \right) e^{-\frac{\tau_m}{T_r v}} \right]$$

Đặt biến $x_{v1} = v$; $x_{v2} = \dot{v}$; $x_{v3} = f_2$ ta có mô hình mở rộng về tốc độ:

$$\begin{cases} \dot{x}_{v1} = x_{v2} \\ \dot{x}_{v2} = x_{v3} + g_2 u_{qs} \\ \dot{x}_{v3} = \dot{f}_2 \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó:

$$f_2 = (q_3 - \mu(\alpha - \eta)) \psi_r i_{qs} + \mu \alpha \hat{L}_m i_{ds} i_{qs} - \gamma \mu \psi_r i_{qs} + (q_4 - 2 \frac{g}{M} (\alpha - \eta)) \psi_r^2 + \frac{\alpha g}{M} \hat{L}_m i_{ds} + L_{\sigma}^2 (q_2 - 2 \frac{\gamma g}{M}) i_{qs}^2 - (\mu \psi_r + 2 \frac{g}{M} L_{\sigma}^2) \left(\frac{n_p \pi}{h} v i_{ds} + \frac{\alpha^2 \hat{L}_m^2 i_{ds} i_{qs}}{|\psi_r|} + \beta \frac{n_p \pi}{h} v \psi_r - \frac{\dot{F}_r}{M} \right)$$

$$q_3 = \frac{3n_p \pi}{2hM} \left(-\frac{L_{\sigma} L_m}{\hat{L}_r^2} \frac{T_r a}{\tau_m} \left[1 - \left(1 + \frac{\tau_m}{T_r v} \right) e^{-\frac{\tau_m}{T_r v}} \right] \right);$$

$$q_4 = \frac{3L_r}{2\hat{L}_r^2 n_p h M v} \left[\frac{L_m}{\hat{L}_r^2} (1 - e^{-Q}) (f(Q) - e^{-Q}) \cdot (\hat{L}_r - L_m f(Q)) - Q e^{-Q} \right]$$

Phương trình bộ quan sát từ thông:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{\psi 1} &= \hat{x}_{\psi 2} + \lambda_{\psi 1} |\tilde{x}_{\psi 1}|^{2/3} \text{sign}(\tilde{x}_{\psi 1}) \\ \dot{\hat{x}}_{\psi 2} &= \hat{x}_{\psi 3} + \lambda_{\psi 2} |\tilde{x}_{\psi 1}|^{1/3} \text{sign}(\tilde{x}_{\psi 1}) + g_1 u_{ds} \\ \dot{\hat{x}}_{\psi 3} &= \lambda_{\psi 3} \text{sign}(\tilde{x}_{\psi 1})\end{aligned}\quad (9)$$

Phương trình bộ quan sát tốc độ:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{v1} &= \hat{x}_{v2} + \lambda_{v1} |\tilde{x}_{v1}|^{2/3} \text{sign}(\tilde{x}_{v1}) \\ \dot{\hat{x}}_{v2} &= \hat{x}_{v3} + \lambda_{v2} |\tilde{x}_{v1}|^{1/3} \text{sign}(\tilde{x}_{v1}) + g_2 u_{ds} \\ \dot{\hat{x}}_{v3} &= \lambda_{v3} \text{sign}(\tilde{x}_{v1})\end{aligned}\quad (10)$$

4. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT XOẪN TRÊN CƠ SỞ HOSMO

Đặt biến sai số điều khiển:

$$e_{\psi 1} = \psi_r - \psi_{r,ref} \quad (11)$$

$$e_{v1} = v - v_{ref} \quad (12)$$

Trong đó: $\psi_{r,ref}, v_{ref}$ là giá trị đặt từ thông và tốc độ.

Theo (7) và (8) có:

$$\begin{cases} \dot{e}_{\psi 1} = e_{\psi 2} \\ \dot{e}_{\psi 2} = f_1 + g_1 u_{ds} - \ddot{\psi}_{r,ref} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_{v1} = e_{v2} \\ \dot{e}_{v2} = f_2 + g_2 u_{qs} - \ddot{v}_{ref} \end{cases} \quad (14)$$

Luật điều khiển theo 2 kênh từ thông và tốc độ được chọn như sau:

$$u_{ds} = \frac{1}{g_1} (-\hat{x}_{\psi 3} + v_{ds}) \quad (15)$$

$$u_{qs} = \frac{1}{g_2} (-\hat{x}_{v3} + v_{qs}) \quad (16)$$

Trong đó, $\hat{x}_{\psi 3}, \hat{x}_{v3}$ là giá trị ước lượng của nhiễu kênh từ thông và kênh tốc độ; v_{ds}, v_{qs} là lượng giá trị điều khiển bù nhiễu; g_1, g_2 là các hệ số điều khiển.

Thuật toán điều khiển xoắn cho lượng bù nhiễu:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= -\gamma_{d1} \text{sign}(e_{\psi 1}) - \gamma_{d2} \text{sign}(e_{\psi 2}) \\ &= -\gamma_{d1} \text{sign}(x_{\psi 1} - x_{\psi 1,ref}) - \gamma_{d2} \text{sign}(\dot{x}_{\psi 1} - \dot{x}_{\psi 1,ref})\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}v_{qs} &= -\beta_{q1} \text{sign}(e_{v1}) - \beta_{q2} \text{sign}(e_{v2}) \\ &= -\beta_{q1} \text{sign}(x_{v1} - x_{v1,ref}) - \beta_{q2} \text{sign}(\dot{x}_{v1} - \dot{x}_{v1,ref})\end{aligned}\quad (18)$$

Trong đó: γ_d, β_q là các hệ số điều khiển.

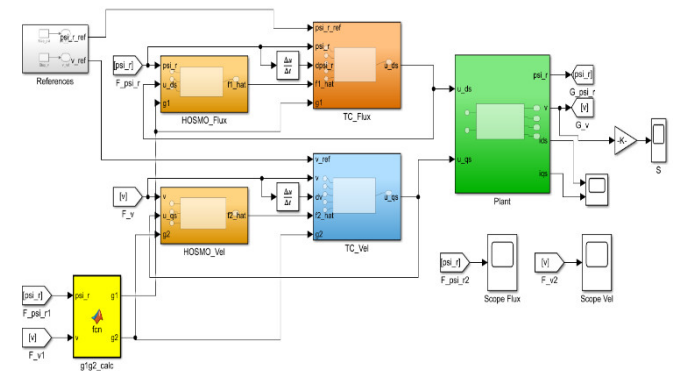
5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển TC trên cơ sở bộ quan sát HOSMO. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink. Kết quả của bộ điều khiển TC cho động cơ cảm ứng tuyến tính được so sánh với bộ điều khiển điều khiển trượt thông thường. Tác giả thực hiện việc mô phỏng với các thông số hệ thống như bảng 1.

Bảng 1. Thông số mô phỏng

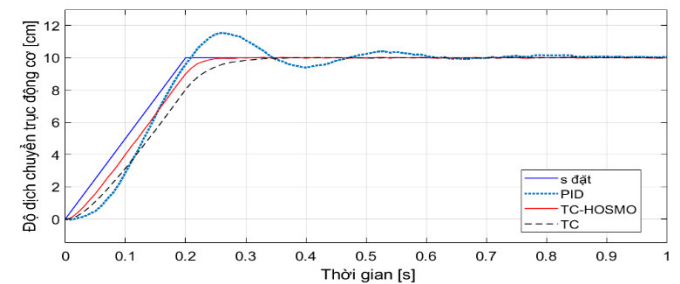
Ký hiệu	Tham số PMSM	Giá trị
R_s	Điện trở Stator	12Ω
R_r	Điện trở thứ cấp	42Ω
n_p	Số cặp cực	3
L_s	Cuộn cảm Stator	0,6235H
L_r	Cuộn cảm thứ cấp	0,763H
L_m	Độ tự cảm	0,532H
M	Khối lượng trục	20 kg
h	Chiều dài trục	0,1m

Sơ đồ cấu trúc mô phỏng hệ thống được thể hiện trên hình 2.



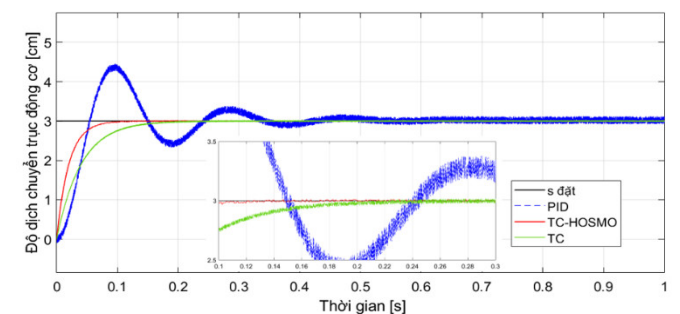
Hình 2. Sơ đồ mô phỏng điều khiển động cơ LIM

Khi cự ly chuyển động tịnh tiến của trục là 10cm, mômen tải 100Nm, không nhiễu, thời gian tăng theo hàm Ram là 0,2 giây (hình 3).



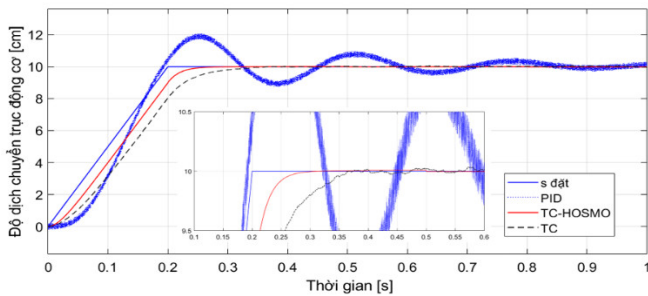
Hình 3. Đáp ứng vị trí của động cơ khi tín hiệu đặt là hàm Ram

Đặt cự ly chuyển động 3cm, tín hiệu đặt là hàm step, mômen tải 100Nm, có nhiễu f_1, f_2 tác động (hình 4).



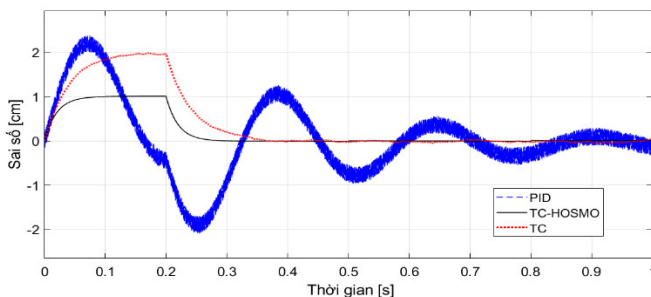
Hình 4. Đáp ứng vị trí của động cơ khi có nhiễu tác động

Đáp ứng vị trí của động cơ khi tín hiệu đặt là hàm Ram, mômen tải 100Nm, có nhiễu f_1, f_2 tác động (hình 5).



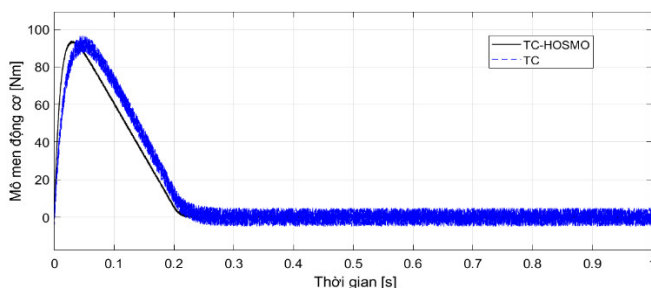
Hình 5. Đáp ứng vị trí của động cơ

Sai số trong trường hợp này được thể hiện trên hình 6.



Hình 6. Sai số đáp ứng khi tín hiệu đặt là hàm Ram và có nhiễu

Đáp ứng mômen động cơ với hai trường hợp sử dụng bộ điều khiển TC-HOSMO và TC khi có nhiễu f_1, f_2 tác động (hình 7).



Hình 7. Đáp ứng mômen của động cơ khi có nhiễu f_1, f_2

Nhân xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng:

Với bộ điều khiển PID dễ thiết kế, quen thuộc trong công nghiệp. Tuy nhiên với hệ LIM phi tuyến và chịu tác động nhiễu, PID cho đáp ứng chậm, sai số bám lớn hơn, đặc biệt khó duy trì độ ổn định khi tham số thay đổi. Quan sát mô phỏng (hình 3 ÷ 6), PID có độ vọt lố cao, thời gian quá độ dài, và độ bám kém trong môi trường có nhiễu.

Với bộ điều khiển trượt xoắn (TC) có khả năng khử nhiễu tốt hơn PID, đảm bảo hội tụ trong thời gian hữu hạn nhờ đặc tính trượt xoắn. Nhưng hạn chế là xuất hiện hiện tượng chattering khá rõ, làm giảm chất lượng tín hiệu điều khiển và có thể ảnh hưởng tới cơ cấu chấp hành. Quan sát mô phỏng thấy TC giúp giảm sai số đáng kể so

với PID, nhưng chattering vẫn tồn tại, dẫn đến mômen dao động.

Bộ điều khiển TC-HOSMO do có HOSMO ước lượng và bù nhiễu tích cực, giúp triệt tiêu tác động của nhiễu trong thời gian ngắn, giảm đáng kể hiện tượng chattering so với TC thuần, đảm bảo chất lượng bám tốt cả về tốc độ và từ thông. Hạn chế có thời gian quá độ có tăng nhẹ ($\sim 0,003s$ chậm hơn TC theo kết quả mô phỏng). Tuy nhiên, độ trễ này không ảnh hưởng tới yêu cầu điều khiển. TC-HOSMO cho đáp ứng mượt hơn, sai số nhỏ, mômen động cơ ổn định nhanh và ít dao động (hình 7).

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã kết hợp thuật toán trượt xoắn với bộ quan sát trượt bậc cao, đây là một hướng đi hợp lý nhằm giảm chattering - vấn đề vốn tồn tại lâu năm trong điều khiển trượt. Qua chứng minh bằng mô phỏng đã cho thấy phương pháp điều khiển TC-HOSMO đảm bảo khả năng khử nhiễu chủ động, độ ổn định cao, chất lượng bám tốt, thể hiện ưu thế vượt trội về sai số, mômen, và khả năng chống nhiễu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hamad S.A., Ghalib M.A., "Fuzzy MPPT Operation-Based Model Predictive Flux Control for Linear Induction Motors," *Int. J. Hydrogen Energy*, 50, 1035-1044, 2024.
- [2]. Zhang M., Luo S., Liu Y., Zhuang X., Ma W., "Analysis of the Traction Forces of Two Adjacent Linear Induction Motors," *Sci. Rep.*, 14, 26760, 2024.
- [3]. Gomes D.R., Chabu I.E., "A Novel Analytical Equivalent Circuit for Single-Sided Linear Induction Motors Considering Secondary Leakage Reactance," *Energies*, 16, 1261, 2023.
- [4]. Pucci M., "State Space-Vector Model of Linear Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 50, 195-207, 2014.
- [5]. Accetta A., Cirrincione M., D'Ippolito F., Pucci M., Sferlazza A., "Input-Output Feedback Linearization Control of a Linear Induction Motor Taking into Consideration Its Dynamic End-Effects and Iron Losses," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 58, 3664-3673, 2022.
- [6]. Hu Q., Han T., Xi, M., "Three-Dimensional Guidance for Various Target Motions with Terminal Angle Constraints Using Twisting Control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67, 1242-1253, 2019.
- [7]. Wang D., Liu X., "Sensorless Control of PMSM with Improved Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Observer and IST-QSG," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, 11, 721-731, 2024.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Thi Thu Hien

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam