

# ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO MẠCH VÒNG TỐC ĐỘ TRONG ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU CỰC CHÌM CHO Ô TÔ ĐIỆN

SLIDING MODE CONTROL FOR SPEED LOOP OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLES

Dương Minh Chiến<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Hòa<sup>1</sup>, Trần Trọng Hiếu<sup>1</sup>,  
Ngô Quốc Trường<sup>1</sup>, Cao Văn Hào<sup>1</sup>, An Thị Hoài Thu Anh<sup>1\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.299>

## TÓM TẮT

Bài báo này đề cập đến việc phát triển một hệ thống điều khiển bằng cách áp dụng phương pháp Sliding Mode Control cho mạch vòng tốc độ trong động cơ IPM, được sử dụng trong các loại ô tô điện. Điểm nổi bật là việc áp dụng một cách tiếp cận mới trong thiết kế điều khiển, tăng cường khả năng chống nhiễu và đảm bảo độ ổn định của động cơ trong mọi điều kiện vận hành. Bằng cách sử dụng phương trình toán học của động cơ IPM và lý thuyết điều khiển Lyapunov, chúng tôi đã phát triển một bộ điều khiển SMC có khả năng tự điều chỉnh để đạt được hiệu suất tối ưu trong điều kiện lái xe đa dạng. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều khiển SMC để xuất cải thiện đáng kể độ ổn định của ô tô điện trong các điều kiện khác nhau, mở ra hướng tiếp cận mới cho việc điều khiển trong ngành công nghiệp ô tô điện. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink đã xác nhận tính hiệu quả của bộ điều khiển mà chúng tôi đề xuất.

**Từ khóa:** Điều khiển trượt, IPMSM, xe điện, FOC.

## ABSTRACT

This paper discusses the development of a control system by applying the Sliding Mode Control method to the speed loop in IPM motors, which are used in electric vehicles. The highlight is the adoption of a new approach in control design, enhancing noise resistance and ensuring motor stability under all operating conditions. By utilizing the mathematical equations of the IPM motor and Lyapunov control theory, we have developed an SMC controller capable of self-adjusting to achieve optimal performance under diverse driving conditions. Simulation results demonstrate that the proposed SMC control method significantly improves the stability of electric vehicles in various conditions, introducing a new approach to control in the electric vehicle industry. The simulation results on Matlab Simulink software have confirmed the effectiveness of the controller we propose.

**Keywords:** Sliding mode control, IPMSM, EV, FOC.

<sup>1</sup>Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải

\*Email: [htanh.ktd@utc.edu.vn](mailto:htanh.ktd@utc.edu.vn)

Ngày nhận bài: 26/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 06/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

## KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$U_{sd}$	V	Điện áp stato trục d
$U_{sq}$	V	Điện áp stato trục q
$T_e$	Nm	Mômen xoắn
$F_w$	N	Lực cản không khí
$F_r$	N	Lực ma sát lăn

e Sai lệch

## CHỮ VIẾT TẮT

SMC	Sliding Mode Control
IPM	Interior Permanent Magnet
EV	Electric Vehicle
FOC	Field Oriented Control

**1. GIỚI THIỆU**

Các vấn đề về năng lượng và môi trường đang là vấn đề nghiêm trọng trong thời đại ngày nay. Trong tình huống này, xe điện đã trở nên quan trọng đối với cuộc cách mạng trong giao thông vận tải sạch [1, 2]. Với ưu điểm về hiệu suất và bảo vệ môi trường, xe điện đang dần thay thế các phương tiện chạy bằng động cơ đốt trong. Một yếu tố quan trọng trong xe điện là động cơ IPM (Interior Permanent Magnet), với khả năng cung cấp mật độ công suất cao, phạm vi tốc độ rộng và mômen lớn [3]. Ngoài ra, đi kèm với đó là các phương pháp được sử dụng rộng rãi trong động cơ IPM là điều khiển vectơ [4, 5], điều khiển trực tiếp mômen (DTC) [6, 7],...

Bên cạnh những lợi ích của IPM vẫn còn những hạn chế, việc điều khiển chính xác tốc độ và mô-men xoắn của IPMSM cần hệ thống với khả năng điều khiển linh hoạt và chính xác. Với các phương pháp điều khiển tiên tiến hiện nay: Backstepping [8-10], Sliding Mode Control [11, 12], điều khiển mờ [13, 14],... cũng đã có thể cải thiện được đáng kể hạn chế đó. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã điều khiển mạch vòng tốc độ của động cơ IPM trong ô tô điện bằng phương pháp Sliding Mode Control (SMC). Lựa chọn này dựa trên các ưu điểm vượt trội của SMC trong việc xử lý hiệu quả các không chắc chắn và nhiễu. Đối chiếu và so sánh với các phương pháp khác như Backstepping, mờ, SMC được đánh giá cao về khả năng đáp ứng nhanh và duy trì tính ổn định cao dưới điều kiện làm việc biến đổi và nhiễu lớn.

Trong [15], Hongzhi Wang và cộng sự đã dùng PID để kiểm soát tốc độ PMSM dựa trên tối ưu hóa thuật toán di truyền lượng tử nhằm tối ưu hệ số điều khiển tích phân và vi phân. Fuzhi Jin và cộng sự [16] dùng bộ điều khiển PID mờ để điều chỉnh tốc độ động cơ PMSM, từ đó so sánh với bộ PID về khả năng chống nhiễu và độ chính xác. Mohamed Assaad Hamida và cộng sự [17] đã thiết kế điều khiển Backstepping cho mạch vòng tốc độ không cảm biến cho IPMSM và đưa ra nhận xét về độ ổn định cũng như hiệu suất của hệ thống. Trong [18], Yong-Ho và cộng sự đã sử dụng bộ điều khiển phi tuyến dựa trên phương pháp Backstepping để cải thiện hiệu suất của động cơ IPMSM, bộ ước tính tham số sự biến đổi của mômen tải và phương pháp MTPA để nâng cao hiệu quả tiêu thụ điện năng của động cơ.

Bài báo này sẽ trình bày phương pháp thiết kế SMC cho mạch vòng tốc độ trong động cơ IPMSM cho ô tô điện, mục tiêu là cung cấp giải pháp điều khiển đáng tin cậy và chính xác cho ô tô điện. Chúng tôi sẽ khám phá cấu trúc của SMC, phân tích sự ổn định và cuối cùng là mô

phỏng và đánh giá kết quả trong phần mềm Matlab Simulink.

**2. PHƯƠNG TRÌNH BIỂU DIỄN ĐỘNG CƠ IPM VÀ CÁC LỰC TÁC DỤNG LÊN XE**

Để thiết kế SMC cho mạch vòng tốc độ, ta cần phải biểu diễn động cơ IPM dưới dạng các phương trình toán học, đồng thời xác định tải bằng các phân tích các lực tác dụng lên xe.

**2.1. Mô hình hóa động cơ IPM**

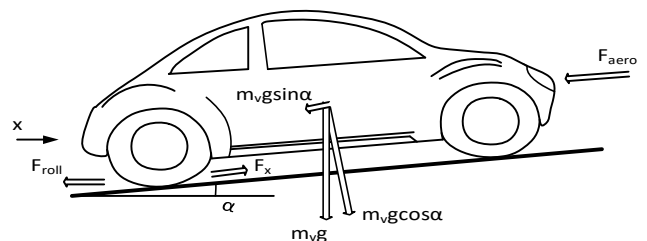
Động cơ IPM được mô tả bằng các phương trình toán học như phương trình cân bằng điện áp, mômen, chuyển động,... và một vài phương trình khác nữa. Các phương trình được biểu diễn trên hệ tọa độ dq như sau [19-21]:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_{sq} i_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_{sd} i_{sd} + \omega_s \psi_p \\ T_e = \frac{3}{2} p_p (\psi_p i_{sq} - i_{sd} i_{sq} (L_{sd} - L_{sq})) \\ T_e - T_L = \frac{J}{p_p} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó,  $i_{sd}$  và  $i_{sq}$  là dòng stato trục dq;  $R_s$  là điện trở stato;  $L_{sd}$  và  $L_{sq}$  là điện cảm stato trục d và q;  $\omega_s$  là tốc độ góc của động cơ;  $\psi_p$  là từ thông cực;  $p_p$  là số cặp cực của động cơ;  $\psi_{sd}$  là từ thông stato trên trục d và  $\psi_{sq}$  là từ thông stato trên trục q;  $T_L$  là mômen tải;  $J$  là mômen quán tính.

**2.2. Mô hình hóa các lực tác dụng lên xe**

Khi xe chuyển động trên đường, không tránh khỏi các yếu tố bên ngoài tác động lên xe, đó là các lực cản và các lực này làm cản trở chuyển động của xe. Một số lực cản đó là: lực cản không khí, lực cản (ma sát) lăn, trọng lực, lực cản do độ dốc,...



Hình 1. Các lực tác dụng lên ô tô [22]

Ta có thể tính toán lực cản của không khí và lực ma sát lăn như sau:

$$\begin{cases} F_w = \frac{1}{2} \rho C_d A (v_{veh} + v_w)^2 \\ F_r = f_r m g \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{100} + \frac{3,6}{10^4} v_{veh} \quad (3)$$

Trong đó:  $\rho$  là mật độ không khí;  $C_d$  (thông thường:  $0,2 < C_d < 0,4$ ) là hệ số cản của không khí;  $A$  là diện tích vỏ xe (diện tích mặt trước cản gió);  $v_w$  là tốc độ gió;  $m$  là tổng khối lượng xe và hành khách;  $g$  là gia tốc;  $\alpha$  là góc dốc;  $f_r$  là hệ số cản lăn;  $v_{veh}$  là tốc độ xe.

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO MẠCH VÒNG TỐC ĐỘ

Hình 2 biểu diễn cấu trúc FOC trên trục tọa độ dq cho động cơ IPM. Từ hình 2 có thể thấy mạch vòng tốc độ sử dụng bộ điều khiển SMC, còn đối với mạch vòng dòng sử dụng bộ PI. Đối với ô tô điện cần điều khiển ở vùng tốc độ cao nên bộ điều khiển SMC sẽ làm tăng độ ổn định của hệ thống khi có nhiễu và các thành phần bên ngoài.

Đặt  $\dot{s}=0$  ta thu được thành phần điều khiển bền vững:

$$T_e = \frac{J}{p_p} \left( \frac{p_p}{J} T_L + \dot{\omega}^* \right) \quad (6)$$

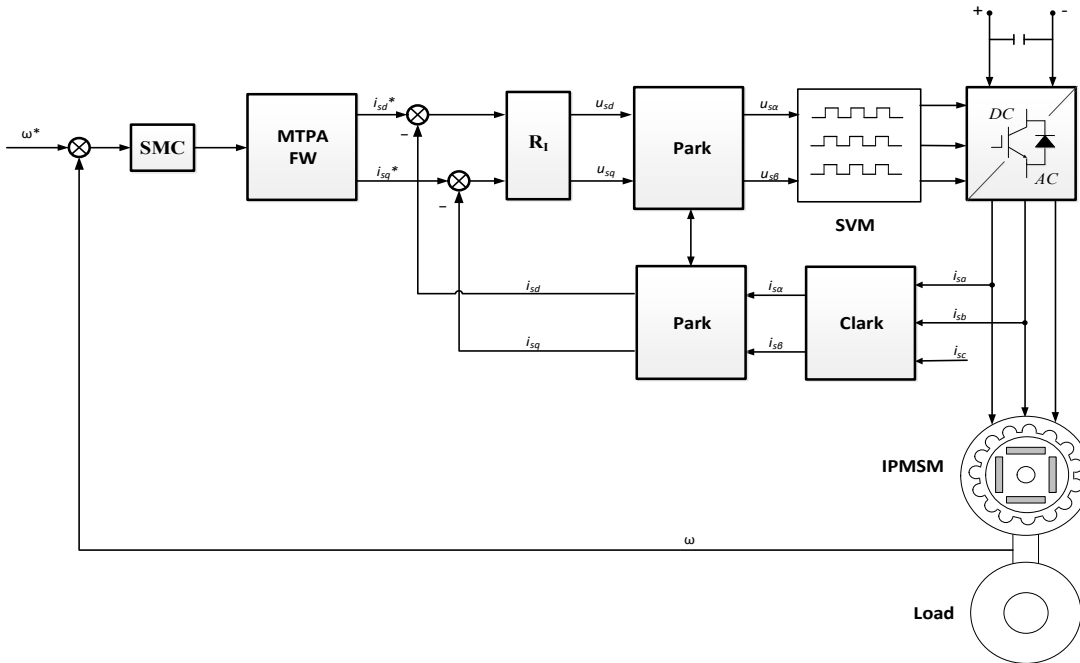
Theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, khi  $V$  xác định dương và đạo hàm riêng bậc một liên tục và xác định nửa âm thì hệ thống ổn định. Để đảm bảo  $s \cdot \dot{s} < 0$ , luật Exponential Reaching có dạng sau được chọn [23].

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \epsilon > 0, k > 0 \quad (7)$$

Với  $\operatorname{sgn}$  là hàm dấu [24]:

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Do đó, tín hiệu điều khiển trượt (SMC) được thiết kế theo dạng sau:



Hình 2. Cấu trúc FOC

Ta định nghĩa sai lệch giữa tốc độ mong muốn và tốc độ phản hồi là:  $e = \omega^* - \omega$  (4)

Trong đó  $\omega^*$  là giá trị mong muốn,  $\omega$ . Lấy đạo hàm sai lệch ta được:

$$\dot{e} = \dot{\omega}^* - \dot{\omega} = \dot{\omega}^* - \frac{p_p}{J} (T_e - T_L) \quad (5)$$

Trong đó,  $J$  là mômen quán tính,  $T_L$  là mômen tải,  $p_p$  là số đôi cực.

Để đảm bảo điều kiện ổn định  $\dot{V} < 0$  mặt trượt  $s$  được xác định như sau:  $s = e \Rightarrow \dot{s} = \dot{e}$

$$T_e = \frac{-J}{p_p} \left( ks - \frac{p_p}{J} T_L - \dot{\omega}^* + \epsilon \operatorname{sgn}(s) \right) \quad (9)$$

Chọn hàm Lyapunov  $V = \frac{1}{2} s^2$ . Đạo hàm  $V$  ta được:

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \cdot \dot{s} = \dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\omega}^* = s \left[ \frac{p_p}{J} (T_e - T_L) - \dot{\omega}^* \right] \\ &= s \left[ \frac{p_p}{J} \left( \frac{-J}{p_p} \left( ks - \frac{p_p}{J} T_L - \dot{\omega}^* + \epsilon \operatorname{sgn}(s) \right) - T_L \right) - \dot{\omega}^* \right] \\ &= s(-ks - \epsilon \operatorname{sgn}(s)) = -(\epsilon|s| + ks^2) \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

### 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Để kiểm chứng bộ điều khiển SMC, ta tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink với các thông số như thể hiện trong bảng 1, 2.

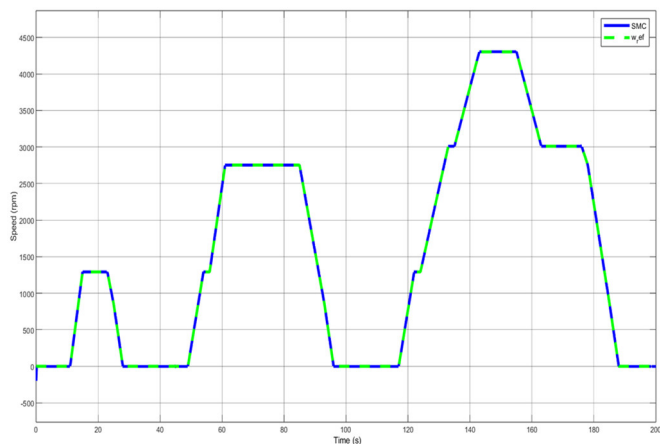
Bảng 1. Thông số động cơ IPM

Thông số	Giá trị
Điện trở stator, $R_s$	6,5e-3 Ohm
Điện cảm trực d, $L_{sd}$	1,597e-3 H
Điện cảm trực q, $L_{sq}$	2,057e-3 H
Mômen quán tính, J	0,09kg.m <sup>2</sup>
Số đôi cực, $p_p$	3
Điện áp 1 chiều, $V_{dc}$	550V

Bảng 2. Thông số xe và môi trường

Thông số	Giá trị
Khối lượng xe + tải	2018kg
Bán kính bánh xe	0,3m
Tỷ số hộp truyền	9,73
Tốc độ tối đa	130km/h
Diện tích tác dụng	2,3m <sup>2</sup>
Khối lượng riêng của không khí	1,25kg/m <sup>3</sup>
Độ dốc đường	0
Hệ số cản lăn	0,02

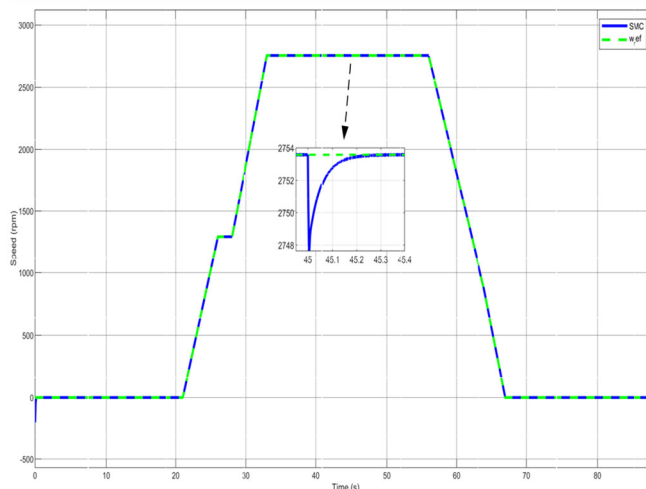
Ta chọn đường đặt tốc độ như chu trình chuẩn nội đô của châu Âu ECE. Hình 3 thể hiện đáp ứng tốc độ của động cơ IPM khi sử dụng bộ điều khiển SMC. Nhìn vào hình ta có thể thấy tốc độ phản hồi đã bám sát với tốc độ đặt, tuy nhiên ở các giai đoạn chuyển trạng thái vẫn còn chút giao động nhỏ nhưng không đáng kể.



Hình 3. Đáp ứng tốc độ xe

Để xác minh hệ thống có ổn định không nếu bị tác động bởi nhiễu và các thông số bên ngoài, tải sẽ được

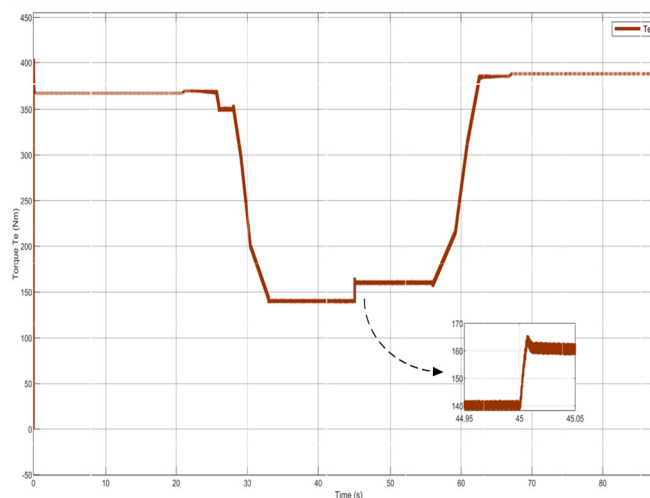
thay đổi đột ngột ở thời điểm  $t = 45s$ . Hình 4 là một phần của chu trình chạy hiển thị đáp ứng của tốc độ nếu ta cho tải thay đổi đột ngột.



Hình 4. Đáp ứng của tốc độ khi tải được thay đổi đột ngột

Ta thấy khi thay đổi tải, tốc độ đã bị dao động nhưng khá nhỏ và ngay sau đó lại bám sát với tốc độ đặt. Điều này chứng minh được với SMC, dù nhiều tác động đột ngột thì hệ thống vẫn có thể giữ được sự ổn định tốt.

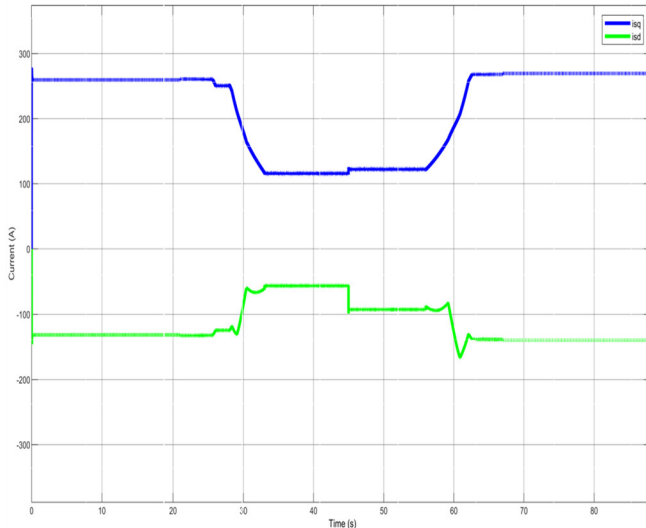
Đường mômen được biểu diễn như trên hình 5.



Hình 5. Kết quả đường moomen xoắn

Trong hình 5, khi động cơ hoạt động ở vùng dưới tốc độ định mức (cụ thể là 1200 vòng/phút) thì mômen không đổi. Nhưng khi động cơ hoạt động ở vùng tốc độ trên tốc độ định mức thì mômen suy giảm dần để có thể tăng tốc độ, do nguồn cho xe điện là nguồn hữu hạn nên ta không thể tăng điện áp mãi được, vì vậy để tăng tốc độ cao ta phải giảm từ thông, mà từ thông tỷ lệ thuận với mômen nên mômen sẽ giảm. Với khả năng hoạt động với tốc độ cao như vậy thì điều này đặc biệt phù hợp với ô tô điện.

Ngoài ra với đường dòng điện, để dễ dàng trong việc điều khiển, ta cần điều khiển tách kên hai dòng  $i_{sd}$  và  $i_{sq}$ . Hình 6 thể hiện đáp ứng dòng điện. Và để có thể huy động được một lượng mômen lớn, ta cần điều khiển dòng  $i_{sd}$  nhỏ hơn 0.



Hình 6. Kết quả đường dòng điện

## 5. KẾT LUẬN

Như vậy, việc áp dụng phương pháp điều khiển SMC vào mạch vòng tốc độ trong động cơ IPM cho ô tô điện đã được nghiên cứu trong bài báo này. Qua việc phân tích và thiết kế bộ điều khiển SMC, chúng tôi đã chứng minh được khả năng cải thiện tính ổn định và giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu. Tuy nhiên, phương pháp SMC gặp phải một số hạn chế như hiện tượng chattering, yêu cầu phần cứng mạnh mẽ để xử lý tín hiệu nhanh, và tiêu thụ năng lượng cao do sự chuyển đổi liên tục. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ hướng đến việc tối ưu hóa SMC để giảm thiểu các hạn chế này và nâng cao hiệu suất cũng như hiệu quả năng lượng. Kết quả này vừa nâng cao được hiệu quả của động cơ IPM mà còn thúc đẩy sự phát triển của các phương tiện điện, góp phần vào vận tải bền vững.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M., "A review on electric vehicles: Technologies and challenges," *Smart Cities*, 4/1, 372-404, 2021.

[2]. Garg A., Vijayaraghavan V., Zhang J., Lam J. S. L., "Robust model design for evaluation of power characteristics of the cleaner energy system," *Renewable Energy*, 112, 302-313, 2017.

[3]. Ou J., Liu Y., Doppelbauer M., "Comparison study of a surface-mounted PM rotor and an interior PM rotor made from amorphous metal of

high-speed motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68/10, 9148-9159, 2020.

[4]. Tang X., Zhang Z., Liu X., Liu C., Jiang M., Song Y., "A novel field-oriented control algorithm for permanent magnet synchronous motors in 60 coordinate systems," *In Actuators*, 12/2, 9, 2023.

[5]. Marufuzzaman M., Reaz M. B. I., Rahman L. F., Chang T. G., "High-speed current dq PI controller for vector controlled PMSM drive," *The Scientific World Journal*, 2014.

[6]. Zhang Z., Liu X., "A duty ratio control strategy to reduce both torque and flux ripples of DTC for permanent magnet synchronous machines," *IEEE Access*, 7, 11820-11828, 2019.

[7]. Abassi M., Khlaief A., Saadaoui O., Chaari A., Boussak M., "Performance analysis of FOC and DTC for PMSM drives using SVPWM technique," *In 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 228-233, 2015.

[8]. Iqbal M. A., Memon A. Y., "Robust backstepping sensorless speed control of PMSM using cascaded sliding mode and high gain observers," *In 2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE)*, 4, 1-6, 2019.

[9]. Trabelsi R., Kheder A., Mimouni M. F., M'sahli F., "Backstepping control for an induction motor with an adaptive Backstepping rotor flux observer," *In 18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10*, 5-10, 2010.

[10]. Rebouh S., Kaddouri A., Abdessemed R., Haddoun A., "Adaptive backstepping speed control for a permanent magnet synchronous motor," *In 2011 International Conference on Management and Service Science*, 1-4, 2011.

[11]. Zhao K., Yin T., Zhang C., Li X., Chen Y., Li T., He J., "Sliding mode-based velocity and torque controllers for permanent magnet synchronous motor drives system," *The Journal of Engineering*, 2019/23, 8604-8608, 2019.

[12]. Feng L., Deng M., Xu S., Huang D., "Speed regulation for PMSM drives based on a novel sliding mode controller," *IEEE Access*, 8, 63577-63584, 2020.

[13]. Mani P., Rajan R., Shanmugam L., Joo Y. H., "Adaptive fractional fuzzy integral sliding mode control for PMSM model," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 27/8, 1674-1686, 2018.

[14]. Asri A., Samat A., Fazli M. N., "Regular paper Speed Control Design of Permanent Magnet Synchronous Motor using Takagi-Sugeno Fuzzy Logic Control," *J. Electrical Systems*, 13/4, 689-695, 2017.

[15]. Wang H., Xu S., Hu H., "PID controller for PMSM speed control based on improved quantum genetic algorithm optimization," *IEEE Access*, 2023.

[16]. Jin F., Wan H., Huang Z., Gu M., "PMSM vector control based on fuzzy PID controller," *Journal of Physics: Conference Series*, 1617/1, p. 012016, 2020.

[17]. Hamida M. A., Glumineau A., De Leon J., "Robust integral backstepping control for sensorless IPM synchronous motor controller," *Journal of the Franklin Institute*, 349/5, 1734-1757, 2012.

[18]. Jeon Y. H., Jung S. H., Choy I., Cho W., "Nonlinear and adaptive backstepping speed control of IPMSM," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 18/1, 18-25, 2013.

[19]. Hou P., Wang X., Sheng Y., "Research on flux-weakening control system of interior permanent magnet synchronous motor based on fuzzy sliding mode control," *In 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 3151-3156, 2019.

[20]. Song Z., Mei X., Tao T., Xu M., "The sliding-mode control based on a novel reaching technique for permanent magnet synchronous motors," *Electric Power Components and Systems*, 47, 16-17, 1505-1513, 2019.

[21]. Xinghua Z., Qitai T., Ting W., "Direct torque control of interior permanent magnet synchronous motor with maximum torque per ampere," *In 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 1519-1524, 2016.

[22]. B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, 2002.

[23]. Jinkun Liu, Xinhua Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Springer, 2011.

[24]. Foo G., Rahman M. F., "Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57/4, 1270-1278, 2009.

---

#### AUTHORS INFORMATION

**Duong Minh Chien, Nguyen Van Hoa, Tran Trong Hieu,  
Ngo Quoc Truong, Cao Van Hao, An Thi Hoai Thu Anh**

Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Transport and Communications, Vietnam