

## RESEARCH ON SPEED REGULATION THROUGH IMPROVING THE SLIDE MODE LAW IN THE SLIDE MODE CONTROL OF THE PMSM MOTOR

Dang Quoc Du<sup>1\*</sup>, Tran Thanh Tuyen<sup>2</sup>, Bui Van Huy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Economics - Technology for Industries, <sup>2</sup>Quang Ninh University of Industry, <sup>3</sup>Hanoi University of Industry

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	06/5/2024	Industrial applications like automation systems, robots, and electric vehicles extensively utilize Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) for their exceptional benefits, including high motor efficiency, high power, and voltage-independent speed. The paper proposes a sliding controller (SMC)-based motor speed control method to enhance the speed and output torque performance of PMSM motors. Firstly, the authors introduced traditional sliding control laws and proposed a new one to ensure Lyapunov stability in the PMSM motor control system and this new control law can enhance anti-interference ability during load or speed changes, improve convergence speed, prevent overshoot, and effectively reduce vibration. Second, the paper presents results comparing the control quality of the new sliding control law with conventional sliding control laws and PI controllers in the case of load and speed changes to highlight the advantages of the proposed method. The above evaluation results are modeled and simulated on Matlab/Simulink software.
Revised:	17/6/2024	
Published:	18/6/2024	
<b>KEYWORDS</b>		
Permanent magnet synchronous motor		
Vector control		
Sliding mode control (SMC)		
Modeling		
Lyapunov stability		

## NGHIÊN CỨU ĐIỀU CHỈNH TỐC ĐỘ CHO BỘ ĐIỀU KHIỂN CHẾ ĐỘ TRƯỢT ĐỘNG CƠ PMSM QUA LUẬT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT MỚI

Đặng Quốc Du<sup>1\*</sup>, Trần Thanh Tuyền<sup>2</sup>, Bùi Văn Huy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật công nghiệp, <sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

<sup>3</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	06/5/2024	Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) được sử dụng rộng rãi trong ứng dụng công nghiệp như các hệ thống tự động hoá, rô bốt hay xe điện do có những ưu điểm nổi bật như hiệu suất động cơ cao, hệ số công suất cao và tốc độ không phụ thuộc vào điện áp. Trong bài báo, phương pháp điều khiển tốc độ động cơ dựa trên bộ điều khiển trượt (SMC) được đề xuất giúp nâng cao chất lượng tốc độ và mô men đầu ra cho động cơ PMSM. Thứ nhất, nhóm tác giả đã trình bày giới thiệu các luật điều khiển trượt truyền thống và đưa ra luật điều khiển mới đảm bảo tính ổn định Lyapunov của hệ thống điều khiển động cơ PMSM, có thể cải thiện được khả năng chống nhiễu khi tải hay tốc độ thay đổi, tốc độ hội tụ, độ vọt lố và giảm hiện tượng rung lắc hiệu quả. Thứ hai là đưa ra kết quả đánh giá so sánh chất lượng điều khiển của luật điều khiển trượt mới với các luật điều khiển trượt thông thường và bộ điều khiển PI trong trường hợp tải và tốc độ thay đổi nhằm nêu bật được ưu điểm của phương pháp mới. Các kết quả trên của bài báo được mô hình hoá và mô phỏng trên phần mềm Matlab/ Simulink.
Ngày hoàn thiện:	17/6/2024	
Ngày đăng:	18/6/2024	
<b>TỪ KHÓA</b>		
Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu		
Điều khiển véc tơ		
Điều khiển trượt (SMC)		
Mô hình hoá		
Ổn định Lyapunov		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10299>

\* Corresponding author. Email: [dqu@uneti.edu.vn](mailto:dqu@uneti.edu.vn)

## 1. Đặt vấn đề

Do sự phát triển của lĩnh vực điện tử công suất cũng như vật liệu có từ tính cao ngày càng phổ biến rộng rãi nên các động cơ PMSM đang gia tăng nhanh chóng trong sản xuất công nghiệp, thiết bị gia dụng, hàng không vũ trụ và các lĩnh vực khác [1], [2] nhờ hiệu suất cao, độ tin cậy cao, cấu trúc đơn giản và trọng lượng nhẹ. Khi sử dụng phương pháp điều khiển véc tơ, hiệu ứng thời gian chết, sóng hài từ thông và sự thay đổi tham số của vòng lặp dòng điện sẽ làm biến dạng dòng điện đầu ra, gây ra dao động tốc độ hơn nữa và ảnh hưởng đến hiệu suất động cơ PMSM [3]. Hiện tại, phương pháp điều khiển PI được sử dụng trong bộ điều khiển tốc độ của hệ thống động cơ PMSM là phổ biến nhất [4]. Phương pháp PI truyền thống là bộ điều khiển tuyến tính phụ thuộc nhiều vào thông số động cơ và không thể phản hồi nhanh khi hệ thống bị ảnh hưởng bởi nhiễu trong quá trình vận hành. Ngoài ra, động cơ PMSM là một hệ thống điều khiển phi tuyến đa biến và các biến này có quan hệ chặt chẽ với nhau. Do đó, hệ thống PMSM dựa trên phương pháp tuyến tính như PI dễ xuất hiện độ vọt lố và có khả năng chống nhiễu kém [5], [6].

Hiện nay, nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến tính đã được nghiên cứu và triển khai rộng rãi để nâng cao các đặc tính khác nhau của hiệu suất điều khiển trong hệ thống động cơ. Các phương pháp này bao gồm điều khiển dự báo thích nghi (MPC) [7], điều khiển logic mờ (FLC) [8], điều khiển chế độ trượt (SMC) [9], [10],... Trong số các kỹ thuật này, SMC nổi bật là một phương pháp hiệu quả với tính ổn định trước các nhiễu từ bên ngoài và không phụ thuộc nhiều vào các thông số bên trong của hệ thống. Tuy nhiên, SMC thông thường gặp phải một vấn đề được gọi là rung lắc, dẫn đến tín hiệu điều khiển bị gợn sóng [9]. Hay trong điều khiển SMC thông thường, tuy bộ điều khiển tốc độ có hiệu suất động tốt hơn, nhưng độ quá điều chỉnh và khả năng chống nhiễu kém [10]. Vì vậy, cần phải đề xuất một phương pháp SMC mới để khắc phục những nhược điểm này.

Giúp khắc phục và cải thiện các nhược điểm trên của hệ thống điều khiển SMC thông thường, bài viết này đề xuất một phương pháp SMC mới với luật điều khiển trượt được tối ưu từ luật tiếp cận lũy thừa với hàm bề mặt chế độ trượt cơ bản. Bộ điều khiển chế độ trượt mới có thể cải thiện tốc độ phản hồi và độ chính xác. Những đóng góp chính của bài báo là đề xuất ứng dụng một phương pháp điều khiển trượt mới. So với các luật điều khiển trượt thông thường, phương pháp đề xuất giúp giảm đáng kể độ vọt lố tốc độ khi PMSM mới khởi động và cải thiện chống nhiễu cho động cơ khi tải và tốc độ thay đổi, có tốc độ phản hồi cao.

Các phần tiếp theo của bài báo gồm 3 phần. Phần 2 trình bày mô hình toán học từ đó đưa ra mô hình trạng thái của động cơ PMSM và giới thiệu qua về các luật trượt cơ bản và đưa ra luật trượt mới đáp ứng ổn định Lyapunov, từ đó đưa ra mô hình điều khiển của phương pháp. Phần 3 đưa ra các kết quả mô phỏng và phân tích các kết quả đó. Cuối cùng là phần 4 đưa ra kết luận của bài báo.

## 2. Thiết kế bộ điều khiển với luật trượt mới

### 2.1. Mô hình trạng thái của động cơ PMSM

Để thuận tiện cho quá trình tính toán, mô hình toán học của động cơ PMSM với nam châm vĩnh cửu (NCVC) gắn trên bề mặt trong hệ quy chiếu quay trục  $d$ - $q$  được thiết lập như sau [11]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}(u_d - Ri_d + \omega_e Li_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}(u_q - Ri_q - \omega_e Li_d - \omega_e \psi_f) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - B_a \omega_m - T_L \right) \end{cases} \quad (1)$$

trong đó  $u_d$  và  $u_q$  lần lượt là điện áp stato của trục  $d$  và trục  $q$ ;  $i_d$  và  $i_q$  là dòng điện của trục  $d$  và  $q$ ;  $R$  và  $L$  lần lượt là điện trở của cuộn dây ba pha và độ tự cảm của stato;  $p_n$  là số cặp cực;  $\omega_m$  là vận tốc góc cơ học của động cơ;  $\psi_f$  là liên kết từ thông NCVC;  $J$ ,  $T_L$  và  $B_a$  lần lượt là mômen quán tính, mômen tải và hệ số giảm chấn.

Đối với động cơ PMSM có NCVC gắn trên bề mặt rôto, có thể đạt được hiệu suất điều khiển tốt hơn bằng cách đặt  $i_d = 0$ . Đặt biến trạng thái  $x_1 = \omega_{ref} - \omega_m$ ;  $x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m$  với  $\omega_{ref}$  là tốc độ đặt của động cơ. Do đó, mô hình toán học có thể được biểu diễn như (2).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left( T_L - \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = \frac{3}{2} p_n \psi_f \dot{i}_q \end{cases} \quad (2)$$

Đặt  $u = i_q$ ;  $D = \frac{3p_n\psi_f}{2J}$  phương trình (2) trở thành (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (3)$$

## 2.2. Phân tích tính ổn định của luật điều khiển trượt mới và bộ điều khiển SMC mới

Mặt trượt thông thường có thể được định nghĩa như sau:

$$s = cx_1 + x_2 \quad c > 0 \quad (4)$$

Có ba luật trượt phổ biến, luật trượt thứ nhất là Luật tiếp cận vận tốc không đổi (CVRL) như (5), Luật tiếp cận lũy thừa (ERL) như (6) và Luật tiếp cận công suất (PRL) như (7). Trong đó:  $\varepsilon, q > 0; 1 > \alpha > 0$ :

$$\dot{s}_1 = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (5)$$

$$\dot{s}_2 = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (6)$$

$$\dot{s}_3 = -q|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (7)$$

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất luật điều khiển mới (NSMRL), có thể thích ứng với các biến thể của trạng thái hệ thống và bề mặt chế độ trượt như (8).

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - qs \\ \varepsilon > 0; q > 0; 1 > \alpha > 0 \end{cases} \quad (8)$$

Bằng cách phân tích quy luật nêu ở (8), có thể thấy được nếu trạng thái hệ thống ở xa bề mặt chế độ trượt, tức là  $s > 0$  thì  $\operatorname{sgn}(s) = 1$  và trạng thái hệ thống đạt đến bề mặt chế độ trượt theo hai tốc độ đạt quy luật tốc độ thay đổi  $\varepsilon/s^\alpha$  và chỉ số biến đạt luật  $qs$ . Hơn nữa, nếu  $|s|$  giảm thì  $\varepsilon/s^\alpha$  đạt  $\varepsilon$  và  $qs$  hội tụ về  $q$ . Điều này có nghĩa là, trong khi trạng thái hệ thống đạt đến mặt trượt, các hệ số của quy luật sẽ giảm dần để hạn chế hiện tượng rung lắc.

Như vậy, trong toàn bộ quá trình từ trạng thái ban đầu đến mặt trượt, tốc độ đạt của NSMRL luôn nhanh hơn ERL, CVRL và PRL. Ngoài ra, việc đưa ra biến trạng thái hệ thống và số hạng bậc lũy thừa của hàm trượt sẽ hạn chế nhược điểm của hiện tượng rung lắc.

Hàm Lyapunov có thể được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (9)$$

Kết hợp với phương trình (8), ta đạo hàm phương trình (9) được (10):

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon s|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - qs^2 \leq -\varepsilon|s|^{\alpha+1} - qs^2 \leq -qs^2 \leq 0 \quad (10)$$

Khi lựa chọn tham số thỏa mãn  $\varepsilon > 0, q > 0$  và  $1 > \alpha > 0$  thì  $\dot{V} \leq 0$  được thiết lập. Định lý ổn định Lyapunov cho thấy bộ điều khiển trượt được thiết kế ổn định.

Đạo hàm phương trình (10), ta có được (11):

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (11)$$

Với luật điều khiển trượt CVRL, biểu thức tín hiệu  $u$  của bộ điều khiển như (12) và dòng điện tham chiếu của trục  $q$  có thể được tính như (13).

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s)] \quad (12)$$

$$i_{q\_CVRL}^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s)] d\tau \quad (13)$$

Tương tự với luật điều khiển trượt ERL, ta có dòng điện tham chiếu  $i_q$  như (14), với luật điều khiển trượt PRL, ta có dòng điện tham chiếu  $i_q$  như (15) và với luật điều khiển trượt mới đề xuất NSMRL, ta tính dòng tham chiếu  $i_q$  như (16).

$$i_{q\_ERL}^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon sgn(s) + qs] d\tau \tag{14}$$

$$i_{q\_PRL}^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + q|s|^\alpha sgn(s)] d\tau \tag{15}$$

$$i_{q\_NSMRL}^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon|s|^\alpha sgn(s) + qs] d\tau \tag{16}$$

Các phương trình (13), (14), (15) và (16) được mô hình hoá như hình 1.

### 3. Phân tích và đánh giá kết quả mô phỏng

#### 3.1. Thiết lập mô hình mô phỏng

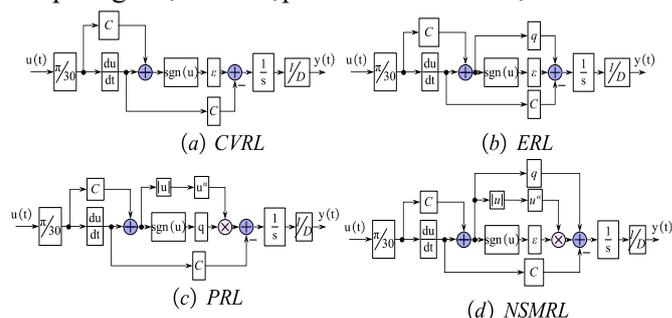
Mô hình mô phỏng thuật toán điều khiển của động cơ PMSM được xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink như hình 2. Trong số đó, các thông số động cơ trong mô phỏng dựa trên thông số trong tài liệu [12] và đưa ra như bảng 1.

**Bảng 1.** Thông số mô phỏng hệ thống điều khiển và động cơ PMSM

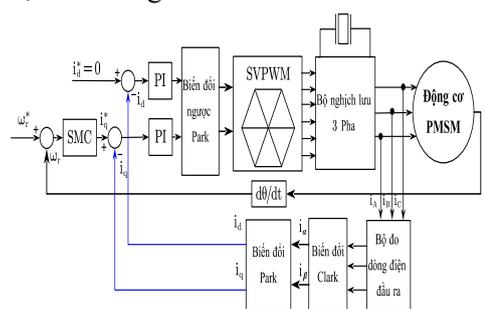
Thông số	Giá trị	Đơn vị	Thông số	Giá trị	Đơn vị
Điện trở stato $R$	2,875	$\Omega$	Điện áp một chiều $U_{dc}$	311	VDC
Điện cảm stato $L$	8,5	mH	Mô men quán tính $J$	0,003	$Kg.m^3$
Số đôi cực $p$	4		Hệ số giảm chấn $B$	0,008	Ns/m
Từ cảm của NCVC $\psi_f$	0,175	Wb	Chu kỳ trích mẫu $T_s$	10	$\mu s$
Hệ số $K_p$ của điều khiển dòng điện	23,8		Hệ số $K_I$ của điều khiển dòng điện	8050	
Hệ số $c$ của bộ SMC	19		Hệ số $q$ của bộ SMC	300	
Hệ số $\varepsilon$ của bộ SMC	500		Hệ số $\alpha$ của bộ SMC	0,5	

#### 3.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

Để kiểm tra tính đúng đắn của bộ điều khiển tốc độ chế độ trượt được thiết kế, các điều kiện mô phỏng được thiết lập các tham số của bộ điều khiển trượt như bảng 1.



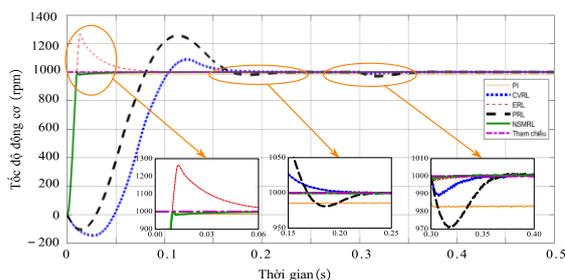
**Hình 1.** Mô hình mô phỏng bộ điều khiển trượt SMC với từng luật điều khiển



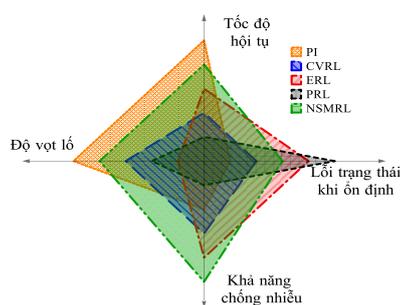
**Hình 2.** Mô hình điều khiển động cơ PMSM với bộ điều khiển SMC

##### 3.2.1. Trường hợp động cơ PMSM chạy các tải $T_L$ khác nhau với tốc độ $\Omega_m$ không đổi

Trong trường hợp này ta mô phỏng động cơ từ khi khởi động đến tốc độ  $\Omega_m = 1000$  vòng/phút với mô men tải  $T_L$  thay đổi từ 4 Nm lên 5 Nm tại thời điểm 0,3 s.



**Hình 3.** Kết quả mô phỏng tốc độ động cơ PMSM chạy tải thay đổi với tốc độ không đổi



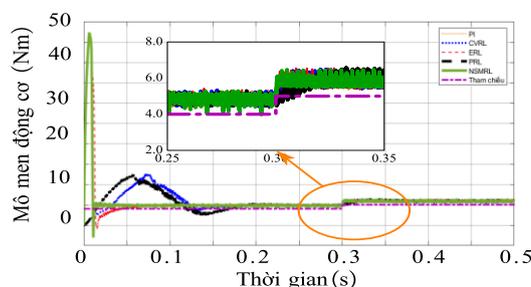
**Hình 4.** Radar đánh giá các luật điều khiển khác nhau khi mô men thay đổi

Kết quả trên hình 3 cho thấy đáp ứng của phương pháp CVRL và PRL là khá chậm và khả năng chống lại thay đổi mô men khi áp dụng các phương pháp đó tương đối kém. Bộ điều khiển theo luật ERL, NSMRL và PI có hiệu suất động học đáp ứng tốt hơn. Tuy nhiên, có thể thấy luật NSMRL cho kết quả hiệu quả tốt hơn các luật khác và cả bộ PI.

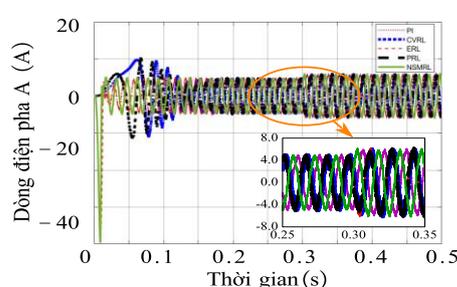
Qua bảng 2 và hình 4 có thể thấy PRL có độ dao động khi ổn định là nhỏ nhất với giá trị tốc độ RMSV sát với tham chiếu 1000 vòng/phút nhất, tuy nhiên PRL lại có nhược điểm tốc độ hội tụ cao (199,90 ms), độ vọt lố cao (vượt tốc độ tham chiếu 25,53%) và tốc độ thay đổi lớn khi tải thay đổi (giảm 28,8581%). Xét về độ vọt lố của hệ thống và tốc độ hội tụ, bộ PI là bộ điều khiển tương đối tốt hơn, sau đó là đến luật trượt đề xuất NSMRL. Xét về khả năng chống nhiễu của hệ thống, có hiệu suất tốt nhất là bộ điều khiển có luật trượt NSMRL. Như vậy, xét về tổng thể, bộ điều khiển với luật NSMRL có hiệu quả hoạt động tốt hơn và được biểu thị bằng khung màu xanh lá cây chiếm diện tích lớn nhất trong biểu đồ radar. Bộ PI đứng thứ hai, ERL đứng thứ ba, CVRL đứng thứ 4 và cuối cùng là luật PRL. Qua hình 5 cho thấy đặc tính của luật CVRL và PRL khi khởi động tốt hơn do mô men khởi động và biên độ dòng điện khi khởi động thấp, tuy nhiên khi mô men thay đổi thì 2 luật này bị trễ hơn so với các định luật khác. Thời gian hội tụ của NSMRL và PI tương tự nhau, nhanh hơn so với các luật điều khiển khác như ERL nhất là CVRL và PRL. Trong cả hình 5b cho thấy độ biến đổi của dòng điện pha A của động cơ đều có biên độ tương tự nhau và không xuất hiện độ vọt lố khi thay đổi mô men.

**Bảng 2.** Đánh giá bộ điều khiển các luật điều khiển khác nhau khi thay đổi mô men

Luật điều khiển và bộ điều khiển	Lỗi trạng thái khi ổn định (RMSE) (%)	Tốc độ hội tụ (ms)	Độ vọt lố (rpm)	Khả năng chống nhiễu
PI	1	5	5	2
CVRL	2	2	3	3
ERL	4	3	1	4
PRL	5	1	2	1
NSMRL	3	4	4	5



(a) Mô men điện từ của động cơ



(b) Dòng điện pha A của động cơ

**Hình 5.** Kết quả mô phỏng mô men và dòng điện pha của động cơ PMSM chạy tải thay đổi với tốc độ không đổi

3.2.2. Trường hợp động cơ PMSM chạy có tải  $T_L$  không đổi với tốc độ  $\Omega_m$  khác nhau

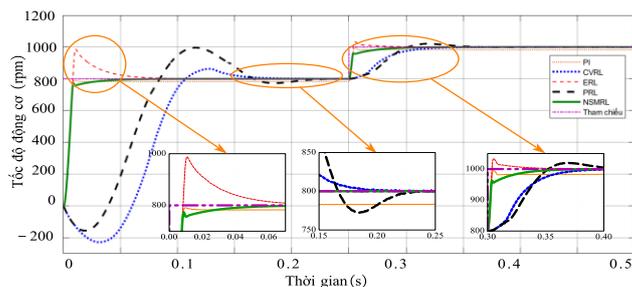
Dưới đây là các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink với tốc độ thay đổi từ 800 vòng/phút lên 1000 vòng/phút và Mô men không đổi 5Nm.

**Bảng 3.** Đánh giá bộ điều khiển các luật điều khiển khác nhau khi thay đổi tốc độ

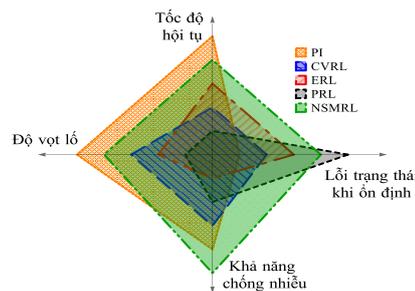
Luật điều khiển và bộ điều khiển	Lỗi trạng thái khi ổn định (RMSE) (%)	Tốc độ hội tụ (ms)	Độ vọt lố (rpm)	Khả năng chống nhiễu
PI	1	5	5	4
CVRL	2	2	3	3
ERL	3	3	2	1
PRL	5	1	1	2
NSMRL	4	4	4	5

Kết quả trên hình 6 cho thấy tốc độ hội tụ của hệ theo mặt trượt thông thường kết hợp với luật CVRL, ERL và PRL chậm và khả năng chống lại thay đổi tốc độ của các hệ này cũng kém. Và bộ điều khiển SMC kết hợp với luật NSMRL và PI có hiệu suất động học tương đối tốt hơn. Tuy nhiên, có thể thấy luật NSMRL cho kết quả hiệu quả tốt hơn các luật khác và cả bộ PI. Tương tự so sánh đầy đủ hiệu suất của các bộ điều khiển, phương pháp đánh giá toàn diện được áp dụng như phần thay đổi tốc độ. Trên cơ sở kết quả mô phỏng, sơ đồ đánh giá toàn diện các bộ điều khiển tốc độ với các luật trượt khác nhau được thể hiện trong bảng 3 và hình 7.

Qua bảng 3 và hình 7 có thể thấy các luật điều khiển PRL, ERL và CVRL có diện tích trên radar tương tự nhau, điều đó cho thấy hiệu suất làm việc như nhau và kém hơn so với hai bộ điều khiển còn lại. Xét về độ vọt lố của hệ thống và tốc độ hội tụ, bộ PI là bộ điều khiển vượt trội so với các bộ điều khiển SMC khi thay đổi tốc độ, với tốc độ hội tụ là 10,13 ms, sau đó là đến luật trượt đề xuất NSMRL. Tuy nhiên xét về khả năng chống nhiễu của hệ thống, thì có hiệu suất tốt nhất là bộ điều khiển có luật trượt NSMRL. Như vậy, bộ điều khiển với luật mới NSMRL có hiệu quả hoạt động tốt hơn và được biểu thị bằng khung màu xanh lá cây chiếm diện tích lớn nhất trong biểu đồ radar. Bộ PI đứng thứ hai, CVRL đứng thứ ba, và sau cùng là ERL và PRL. Do đó, qua việc đối sánh giữa các luật điều khiển truyền thống cũng như so với bộ PI ở các trường hợp thay đổi tốc độ và mô men, có thể thấy rằng, bộ điều khiển SMC với luật trượt mà nhóm tác giả đề xuất có ưu điểm vượt trội hơn hẳn. Điều này giúp cải thiện được tốc độ làm việc của động cơ PMSM trong trường hợp thay đổi mô men cũng như tốc độ của động cơ.

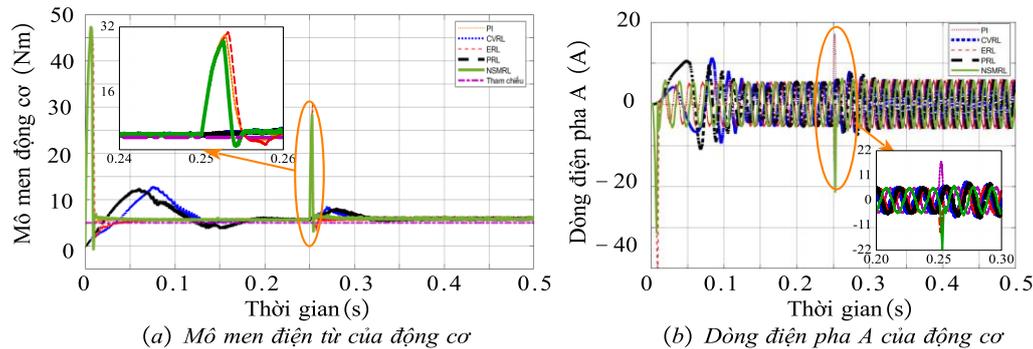


**Hình 6.** Kết quả mô phỏng tốc độ động cơ PMSM chạy tải không đổi với tốc độ thay đổi



**Hình 7.** Biểu đồ radar đánh giá các luật điều khiển khi tốc độ thay đổi

Qua hình 8 cho thấy đặc tính của luật CVRL và PRL khi khởi động tốt hơn do mô men khởi động và biên độ dòng điện khi khởi động thấp, tuy nhiên khi mô men thay đổi thì 2 luật này bị trễ hơn so với các định luật khác. Thời gian hội tụ của NSMRL và PI tương tự nhau, nhanh hơn so với các luật điều khiển khác như ERL nhất là CVRL và PRL. Hình 8b thì thấy mô hình đưa ra vẫn còn hạn chế do xung vọt lố dòng điện pha A lớn hơn so với các luật điều khiển khác.



**Hình 8.** Kết quả mô phỏng mô men và dòng điện pha của động cơ PMSM chạy tải không đổi với tốc độ thay đổi

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Nội dung bài báo đã trình bày mô hình toán học của động cơ PMSM trên hệ trục tọa độ dq, đưa ra các đánh giá về lý thuyết cũng như mô phỏng với các luật điều khiển trượt khác nhau và đề xuất luật điều khiển mới. Từ đó đưa ra mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển động cơ PMSM với bộ điều khiển SMC mới và so sánh kết quả với các bộ điều khiển SMC thông thường và với bộ điều khiển PI. Từ các kết quả mô phỏng và đánh giá có thể thấy bộ điều khiển trượt SMC được thiết kế có hiệu quả tốt có khả năng chống nhiễu và đáp ứng cho hệ điều khiển động cơ PMSM thực tế.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Wang, J. Kang, M. Degano, A. Galassini, and C. Gerada, "An Accurate Wide-Speed Range Control Method of IPMSM Considering Resistive Voltage Drop and Magnetic Saturation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2630-2641, 2020.
- [2] Z. Zhang, X. Ge, Z. Tian, X. Zhang, Q. Tang, and X. Feng, "A PWM for minimum current harmonic distortion in metro traction PMSM with saliency ratio and load angle constraints," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 4498–4511, May 2018.
- [3] V. M. Bida, D. V. Samokhvalov, and F. S. Al-Mahturi, "PMSM vector control techniques — A survey," *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 577-581.
- [4] C. E. Moucary, E. Mendes, and A. Razek, "Decoupled direct control for PWM inverter-fed induction motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1307-1315, Sept.-Oct. 2002.
- [5] J. Yang, W. H. Chen, S. Li, L. Guo, and Y. Yan, "Disturbance/uncertainty estimation and attenuation techniques in PMSM drives—A survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3273-3285, 2016.
- [6] X. H. Chang, Y. Liu, and M. Shen, "Resilient control design for lateral motion regulation of intelligent vehicle," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 2488-2497, 2019.
- [7] X. Li, X. Wang, P. Gao, and Y. Gu, "Model predictive current control algorithm based on joint modulation strategy for low-inductance PMSM," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 806-819, 2021.
- [8] H. Chaoui and P. Sicard, "Adaptive fuzzy logic control of permanent magnet synchronous machines with nonlinear friction," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 1123-1133, 2011.
- [9] Y. C. Liu, S. Laghrouche, D. Depernet, and A. Djerdir, "Disturbance-observer-based complementary sliding-mode speed control for PMSM drives: A super-twisting sliding-mode observer-based approach," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 5416-5428, 2020.
- [10] C. K. Lai and K. K. Shyu, "A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 499-507, 2005.
- [11] M. A. Rahman, D. M. Vilathgamuwa, M. N. Uddin, and Tseng, "Nonlinear control of interior permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 408-416, 2003.
- [12] S. Xu, X. Chen, W. Yang, F. Liu, and Y. Chai, "Current Sensor Incipient Fault Diagnosis in PMSM Drive Systems using Novel Interval Sliding Mode Observer," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-11, 2024.