

NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT LUẬT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT MỚI CẢI THIỆN TỐC ĐỘ CHO ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

A NOVEL SLIDING MODE CONTROL LAW FOR ENHANCED SPEED PERFORMANCE OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Trần Thanh Tuyên¹, Đặng Quốc Du^{2,*}, Nguyễn Thị Phúc¹,
Đỗ Thị Hoa¹, Nguyễn Thị Mến¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huieh5804.2026.044>

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một luật điều khiển trượt mới (NSMCL) được đề xuất nhằm nâng cao hiệu năng bám tốc độ và khả năng chống nhiễu của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). So với các luật điều khiển truyền thống, NSMCL cải thiện tốc độ hội tụ và giảm hiện tượng rung (chattering) nhờ sử dụng hàm tiếp tuyến hyperbolic thay cho hàm sign. Đồng thời, luật điều khiển NSMCL kết hợp với mặt phẳng tích phân (ISMS) giúp hạn chế ảnh hưởng của sai lệch quán tính đến hiệu năng điều khiển. Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink xác nhận hiệu quả của phương pháp, thể hiện sự suy giảm rõ rệt dao động tốc độ và dòng điện khi mô-men tải và quán tính biến đổi, đồng thời nâng cao độ ổn định của hệ thống.

Từ khóa: Luật điều khiển trượt mới, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, mặt trượt tích phân, điều chỉnh tốc độ.

ABSTRACT

In this paper, a novel sliding mode control law (NSMCL) is proposed to enhance the speed-tracking performance and disturbance rejection of permanent magnet synchronous motors (PMSMs). Compared with conventional control laws, NSMCL improves convergence speed and reduces chattering by employing a hyperbolic tangent function instead of the traditional sign function. Moreover, the NSMCL combined with an integral sliding surface (ISMS) mitigates the impact of inertia variations on control performance. Simulation results conducted in Matlab/Simulink validate the effectiveness of the proposed method, showing a significant reduction in speed and current oscillations under varying load torque and inertia, while also improving overall system stability.

Keywords: Novel sliding mode control law (NSMCL), permanent magnet synchronous motors (PMSM), integral sliding mode surface (ISMS), speed control.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

²Khoa Điện - Tự động hoá, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: dqdu@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 30/10/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Nhờ hiệu suất cao, tỷ số mô-men quán tính lớn và độ tin cậy tốt, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như máy CNC, robot, tàu vũ trụ và phương tiện tự hành [1, 2]. Hệ thống điều khiển định hướng từ trường (FOC) thường sử dụng sơ đồ hai vòng kín, trong đó vòng ngoài điều khiển tốc độ cung cấp tín hiệu tham chiếu cho vòng trong điều khiển dòng điện, trực tiếp ảnh hưởng hiệu năng toàn hệ thống.

Vòng ngoài điều khiển tốc độ cần đạt được khả năng bám tín hiệu tốt và khả năng chống nhiễu cao. Tuy nhiên, do PMSM có đặc tính đa biến, tương tác chéo, phi tuyến và nhạy cảm với biến thiên tham số, việc thiết kế vòng tốc độ là một thách thức quan trọng [3]. Nhiều phương pháp đã được phát triển nhằm cải thiện hiệu năng vòng tốc độ [4, 5]. Trong số đó, điều khiển trượt (SMC) được lựa chọn ưu tiên nhờ khả năng không nhạy cảm với biến thiên tham số và độ bền vững

cao trước các thay đổi bên trong và ảnh hưởng bởi các nhiễu bên ngoài [6, 7].

Tuy nhiên, SMC truyền thống cũng tồn tại hạn chế. Hiện tượng chattering là vấn đề cố hữu của SMC truyền thống, dẫn đến các tín hiệu làm việc gián đoạn. Do đó, nhiều phương pháp đã được phát triển để giảm hiện tượng rung (chattering), như điều khiển trượt mờ (FLC) [8], SMC bậc cao [9], phương pháp quan sát nhiễu (DOB) [10] và phương pháp tối ưu luật hội tụ [11].

Trong bối cảnh này, bài báo đưa ra một luật điều khiển trượt (NSMCL) [12] nhằm nâng cao hiệu quả điều khiển tốc độ cho PMSM. Luật NSMCL trong tài liệu [12] được nhóm tác giả kết hợp với mặt trượt cơ bản và đã cải thiện được tốc độ với kết quả thực nghiệm, trong bài báo này nhóm tác giả đề xuất thiết kế luật trượt NSMCL kết hợp mặt phẳng tích phân (ISMS) để giảm tối đa hiện tượng vọt lố và chattering, đồng thời cải thiện độ ổn định và khả năng bám sát tín hiệu tham chiếu trong mọi điều kiện vận hành. Các thử nghiệm mô phỏng được thực hiện với tín hiệu tốc độ dạng hình thang và các thay đổi tải, cũng như thay đổi mô men quán tính nhằm đánh giá toàn diện hiệu năng của luật NSMCL so với luật điều khiển thích nghi (ASMC) [13] và luật điều khiển truyền thống (TERL) [14].

Kết quả mô phỏng cho thấy luật NSMCL đạt đáp ứng nhanh, độ ổn định và chính xác cao, đồng thời thể hiện khả năng chống nhiễu tải tốt hơn so với các phương pháp điều khiển truyền thống. Những ưu điểm này không chỉ cải thiện hiệu suất hệ thống điều khiển động cơ PMSM mà còn mở ra hướng nghiên cứu mới trong việc phát triển các thuật toán điều khiển trượt tiên tiến, linh hoạt và khả thi cho các hệ thống khác.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ PMSM VỚI NAM CHÂM VĨNH CỬU GẮN BỀ MẶT

Mô hình toán học của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu gắn bề mặt (SPMSM) trong hệ quy chiếu quay đồng bộ $d-q$ được xác định như sau:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}(u_d - R_s i_d + \omega_e L i_q) \tag{1}$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}(u_q - R_s i_q - \omega_e L i_d - \omega_e \psi_f) \tag{2}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B\omega_m - T_L) \tag{3}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q = \eta i_q \tag{4}$$

Trong đó: $\eta = 1,5p\psi_f$; u_d, u_q, i_d và i_q tương ứng là điện áp, dòng điện dọc trục và ngang trục trên hệ trục tọa độ

$d-q$ (A); R_s là điện trở dây quấn stato (Ω), L là điện cảm đồng bộ của dây quấn stato (H), ω_e và ω_m tương ứng là tốc độ góc điện và cơ của rôto động cơ (rad/s), ψ_f là từ thông do nam châm vĩnh cửu (NCVC) sinh ra (Wb); J, B tương ứng là mô men quán tính của rôto (kg.m^2) và hệ số giảm chấn; T_L, T_e tương ứng là mô men tải (Nm) và mô men điện từ (Nm), p là số đôi cực của động cơ.

Kết hợp phương trình (3) và (4) ta có:

$$J\dot{\omega}_m = \eta i_q - B\omega_m - T_L \tag{5}$$

Từ phương trình (5) có thể thấy, động cơ SPMSM nhạy cảm với các tham số bên trong như mô-men quán tính và hệ số giảm chấn, đồng thời chịu tác động của yếu tố bên ngoài như mô-men tải. Điều này đặt ra thách thức trong việc cân bằng giữa tốc độ đáp ứng và độ ổn định khi áp dụng bộ điều khiển SMC cho động cơ. Bài báo đề xuất một luật điều khiển mới có khả năng ổn định và tốc độ hội tụ nhanh trong điều kiện bất định, đồng thời nâng cao đặc tính đáp ứng động và ổn định trạng thái của hệ thống PMSM trong quá trình vận hành.

3. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ MỘT BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT MỚI

Một bộ điều khiển SMC mới thường được chia thành hai phần: phần thứ nhất là luật điều khiển trượt (luật tiếp cận) và phần thứ hai là mặt phẳng trượt. Hiệu quả của hệ thống chủ yếu được quyết định bởi việc thiết kế phù hợp các thành phần này của bộ SMC.

3.1. Đề xuất luật điều khiển trượt mới giảm hiện tượng chattering

Xét luật tiếp cận hàm mũ truyền thống (TERL) [13] như sau:

$$\dot{s} = -k_1 \text{sign}(s) - k_2 s \tag{6}$$

Trong đó, $k_1, k_2 > 0$ là các hệ số tiếp cận. Khi hệ thống đạt đến bề mặt chế độ trượt, $s(t) = 0$ thì thời gian đạt được của luật TERL sẽ được xác định:

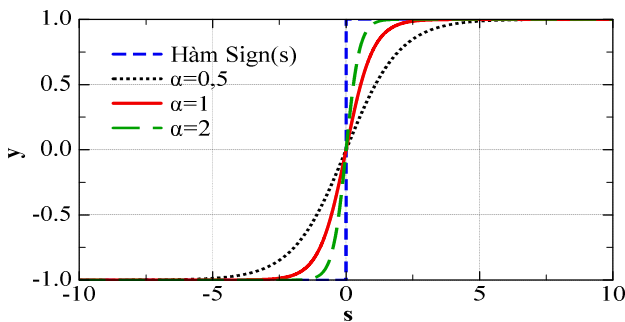
$$t_{TERL} = \frac{1}{k_2} \left\{ \ln \left[s(0) + \frac{k_1}{k_2} \right] - \ln \left(\frac{k_1}{k_2} \right) \right\} \tag{7}$$

Dựa vào phương trình (7) có thể thấy k_2 là hệ số tiếp cận quyết định tốc độ tiếp cận mặt phẳng trượt của hệ thống; khi giá trị của nó tăng lên thời gian t_{TERL} giảm dần về không có nghĩa tốc độ tiếp cận nhanh hơn. Tuy nhiên, giá trị k_2 càng lớn thì dẫn đến hiện tượng rung (chattering) gia tăng khi hệ thống đạt tới mặt trượt. Do đó, ta có một luật tiếp cận mới như sau:

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 F(x,t) \text{sign}(s) - k_2 G(s,t) s \\ F(x,t) = |x| / (1 + |x|) \quad k_1, k_2 > 0 \\ G(s,t) = |x| (e^{-\beta|s|} + 1) \quad 1 > \beta > 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Với, x biểu diễn biến trạng thái của hệ thống.

Luật tiếp cận trong phương trình (8) bao gồm một hàm lũy thừa $e^{-\beta|s|}$, từ đó thiết lập mối liên hệ giữa tốc độ tiếp cận và sự biến thiên của biến trạng thái x trong giai đoạn chuyển tiếp, khi hệ thống tiếp cận mặt trượt. Với quỹ đạo chạy của biến trạng thái hệ thống ở xa mặt trượt, thì biến này sẽ tiến tới mặt trượt với hai thành phần: thành phần biến đổi tốc độ $-k_1 F(x,t) \text{sign}(s)$ và thành phần biến đổi mũ $k_2 G(s,t) s$, giúp tăng tốc độ tiếp cận; khi hệ thống tiến gần mặt trượt, thành phần biến đổi tốc độ đóng vai trò chính, trong khi thành phần mũ tiệm cận về 0.



Hình 1. Phân tích và so sánh hàm chuyển mạch

Có thể thấy thành phần biến đổi tốc độ có chứa hàm sign, đây là hàm đơn giản để tính toán. Tuy nhiên, việc chuyển đổi trạng thái đột ngột của hàm này gây ra hiện tượng rung (chattering) trong bộ điều khiển. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều phương pháp đã được đề xuất nhằm giảm hoặc loại bỏ chattering trong các hệ thống SMC.

Hàm tiếp tuyến hyperbolic $\tanh(as)$ [15] làm mượt chuyển tiếp trạng thái và giảm chattering với công thức:

$$\tanh(as) = \frac{e^{as} - e^{-as}}{e^{as} + e^{-as}}, \quad a > 0 \quad (9)$$

Một số hàm chuyển mạch liên tục như hàm sigmoid, hàm bão hòa và hàm tiếp tuyến hyperbolic trên giúp cho hệ thống giảm được chattering đáng kể. Qua hình 1 có thể thấy được hàm tiếp tuyến hyperbolic có thể vừa giảm được hiện tượng chattering do chuyển mạch đột ngột đồng thời cũng tiến tới nhanh trong giai đoạn chuyển

tiếp. Do đó, trong nội dung bài báo, nhóm tác giả đề xuất luật tiếp cận trượt (NSMCL) được cải tiến như sau:

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 F(x,t) \tanh(as) - k_2 G(s,t) s \\ F(x,t) = |x| / (1 + |x|) \quad k_1, k_2, a > 0 \\ G(s,t) = |x| (e^{-\beta|s|} + 1) \quad 1 > \beta > 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x| = 0 \end{cases} \quad (10)$$

3.2. Phân tích giảm chattering và so sánh hiệu năng của luật NSMCL

Thiết lập một hệ phi tuyến bậc hai, như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2(t) = g(x,t) + bu(t) + d(t) \quad b > 0 \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó $x = [x_1, x_2]$ lần lượt là các biến trạng thái vị trí và tốc độ của động cơ, $g(x)$ là một hàm phi tuyến, $u(t)$ là tín hiệu điều khiển và $d(t)$ là nhiễu bên ngoài.

Hàm phi tuyến $g(x)$ dựa trên mô hình đơn giản hóa của động lực học hệ thống động cơ, có thể mô phỏng hiệu quả phần phi tuyến của hệ thống đồng thời giữ được tính đơn giản và khả thi trong thiết kế điều khiển. Hệ số b là hệ số khuếch đại của $u(t)$, ảnh hưởng trực tiếp đến biên độ của $u(t)$. Giá trị b lớn hơn đồng nghĩa với việc bộ điều khiển phản ứng nhạy hơn với trạng thái hệ thống, cho phép hệ thống phản ứng và điều chỉnh nhanh hơn. Với các hệ thống cơ khí, dẫn động động cơ hoặc các động lực khác, nhiễu bên ngoài thường có tính chất tuần hoàn, chẳng hạn như rung tuần hoàn, dao động tải ngoài,... Do đó, $d(t)$ được chọn là nhiễu tuần hoàn để đánh giá ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tuần hoàn mà hệ thống có thể gặp phải trong quá trình vận hành thực tế. Như vậy, các tham số chính của bộ điều khiển được thiết lập như sau: $g(x) = -25\dot{x}$, $b = 100$, $d(t) = 5\sin(\pi t)$.

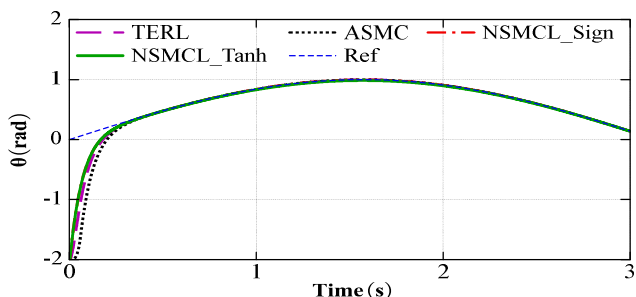
Giả sử x_d là tín hiệu tham chiếu, khi đó tín hiệu sai số $e(t) = x_d - x_1$ và chọn mặt trượt như sau:

$$s = ce(t) + \dot{e}(t), \quad c > 0 \quad (12)$$

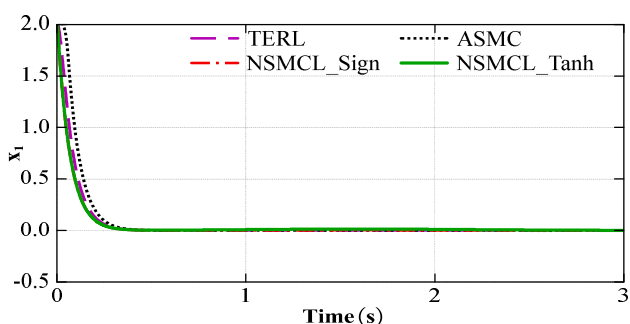
Từ phương trình (10), (11) và (12), ta có được tín hiệu điều khiển của hệ thống:

$$u(t) = \frac{1}{b} \begin{Bmatrix} k_1 \frac{|x_1|}{1+|x_1|} \tanh(as) \\ + k_2 |x_1| (e^{-\beta|s|} + 1) s \\ + c(\dot{x}_d - \dot{x}_1) + \ddot{x}_d \\ - g(x,t) - d(t) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

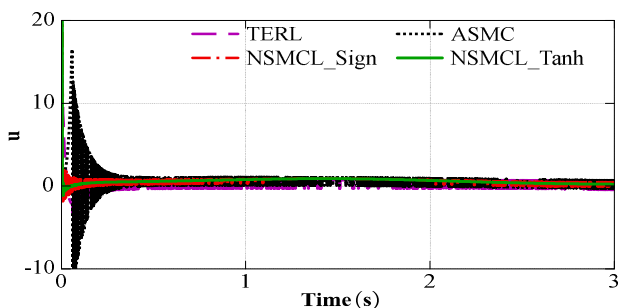
Để đánh giá khả năng giảm chattering và hiệu năng của luật NSMCL đề xuất, nhóm tác giả tiến hành mô phỏng trên phần mềm MATLAB với một số luật tiếp cận được nghiên cứu khác như luật điều khiển trượt thích nghi (ASMC) [13] và luật TERL cùng với luật NSMCL với hàm tiếp tuyến hyperbolic và hàm sign.



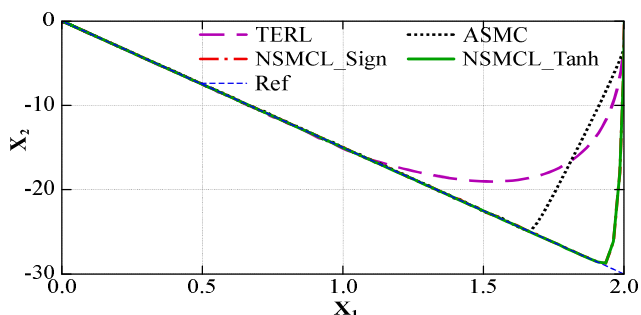
(a) Độ bám tham chiếu



(b) Sai số hội tụ



(c) Tín hiệu điều khiển



(d) Quỹ đạo pha

Hình 2. So sánh hiệu năng của luật ASMC, TERL và luật NSMCL với các hàm sign và hàm tiếp tuyến hyperbolic

Theo đó, luật trượt ASMC [12] có dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 F(x,t) \text{sign}(s), & k_1 > 0, \\ F(x,t) = |x| \left(1 + \beta - e^{-\alpha|s|} \right) / \beta, & \alpha > 0, 1 > \beta > 0, \end{cases} \quad (14)$$

Với các tham số đánh giá đồng nhất như sau: $k_1 = 50$, $k_2 = 50$, $c = 15$, $\alpha = 2$, $\beta = 0,5$ và $\sigma = 0,5$. Trạng thái ban đầu của đối tượng điều khiển được đặt là: $x(0) = [-2, -2]$, tín hiệu tham chiếu $x_d = \sin t$.

Dựa vào hình 2 có thể thấy luật NSMCL dùng hàm tiếp tuyến hyperbolic (NSMCL_Tanh) cho thấy ưu điểm nổi bật là loại bỏ hiện tượng chattering và duy trì tín hiệu điều khiển trơn tru và tốc độ hội tụ nhanh hơn mặc dù độ chính xác bám quỹ đạo kém hơn với TERL và ASMC. Kết quả cho thấy TERL có hiệu năng thấp nhất với sai số hội tụ chậm, tín hiệu điều khiển biên độ cao và quỹ đạo pha chậm nhất. Luật ASMC cũng có hiệu năng tốt hơn TERL nhưng vẫn tồn tại dao động ở trạng thái xác lập. Trong khi đó, NSMCL dùng hàm sign (NSMCL_Sign) thể hiện độ chính xác bám, sai số và quỹ đạo pha tốt hơn ASMC và TERL, tuy nhiên tín hiệu điều khiển tốt hơn ASMC và TERL tuy nhiên hiện tượng chattering và tốc độ hội tụ kém hơn NSMCL_Tanh. Như vậy, luật NSMCL_Tanh có thể được coi là phương án tốt nhất, giảm chattering và có tốc độ hội tụ tốt nhất.

3.3. Độ ổn định của luật NSMCL

Đối với luật NSMCL đề xuất Phần 3.1, các biến trạng thái s và \dot{s} hội tụ về điểm cân bằng $(0,0)$ trong thời gian hữu hạn.

Xét tính ổn định theo lý thuyết Lyapunov được định nghĩa như sau:

$$L = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

Kết hợp phương trình (12) và đạo hàm 2 vế của phương trình (15), ta được:

$$\begin{aligned} \dot{L} = s\dot{s} &= s \begin{pmatrix} -k_1 \frac{|x|}{1+|x|} \tanh(\alpha s) \\ -k_2 |x| (e^{-\beta|s|} + 1) s \end{pmatrix} \\ &= -k_1 s \frac{|x|}{1+|x|} \tanh(\alpha s) - k_2 |x| (e^{-\beta|s|} + 1) s^2 \\ &\leq -k_1 |x| |s| - k_2 |x| s^2 \leq -k_1 |x| |s| \leq 0 \quad k_1, k_2, \alpha, \beta > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Từ phương trình (17), ta có:

$$s = \sqrt{2L} \quad (17)$$

Do đó, thay phương trình (17) và phương trình (16):

$$\dot{L} \leq -k_1|x|\sqrt{2L} \tag{18}$$

Phương trình (2) là một bất phương trình vi phân phi tuyến bậc nhất. Với điều kiện ban đầu giả thiết $L(0) = L_0 > 0$, ta biến đổi và tích phân 2 vế như sau:

$$\int_{L_0}^0 \frac{dL}{\sqrt{L}} \leq -k_1|x|\sqrt{2} \int_0^T dt \tag{19}$$

Từ phương trình (19) ta có được thời gian hội tụ hữu hạn được xác định như sau:

$$T \leq \frac{\sqrt{2L_0}}{k_1|x|} = \frac{|s(0)|}{k_1|x|} \tag{20}$$

Như vậy có thể thấy thời gian hội tụ hữu hạn phụ thuộc vào các thông số như trong phương trình (20) và vị trí ban đầu của $s(0)$.

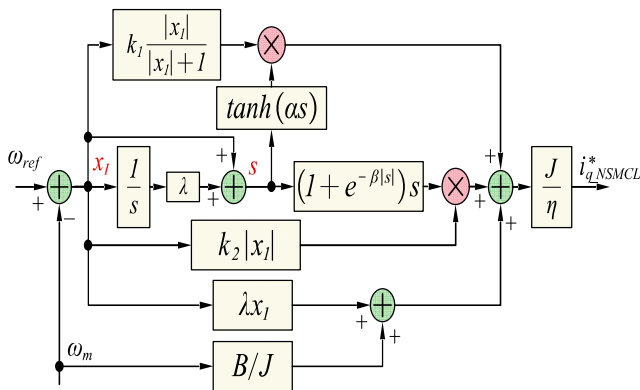
Qua lý thuyết ổn định Lyapunov trên có thể khẳng định rằng luật NSMCL đạt được ổn định trong thời gian hữu hạn.

3.4. Thiết kế bộ điều khiển tốc độ

Bộ điều khiển trượt tốc độ hoạt động bằng cách sử dụng luật điều khiển NSMCL đã thiết kế, dẫn trạng thái của hệ thống từ bất kỳ điều kiện ban đầu nào hội tụ về mặt trượt xác định. Đảm bảo tốc độ thực của động cơ bám sát tốc độ tham chiếu, sai số bám tốc độ được chọn làm biến trạng thái của hệ thống:

$$x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \tag{21}$$

Trong đó, ω_{ref} , ω_m lần lượt là tốc độ tham chiếu và tốc độ thực của hệ thống.



Hình 3. Cấu trúc điều khiển với luật trượt NSMCL để xuất dựa trên mặt trượt ISMS

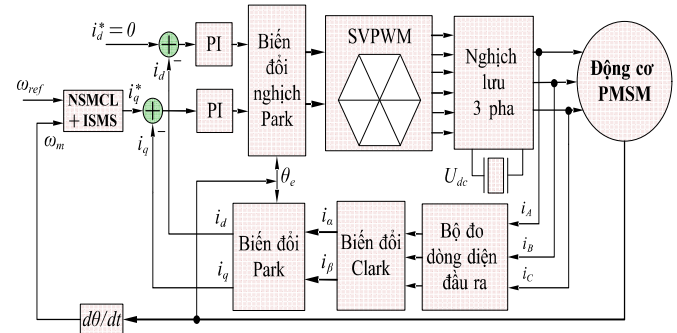
Hàm tích phân có thể giảm sai số trạng thái xác lập và tăng cường tính bền vững, do đó mặt trượt tích phân (ISMS) được lựa chọn là:

$$s = x_1 + \lambda \int_0^t x_1 dt \tag{22}$$

Trong đó, λ là hệ số tích phân. Từ phương trình (5) kết hợp với đạo hàm phương trình (21) và (22), ta có được dòng điện đầu ra $i_{q_NSMCL}^*$ được xác định:

$$i_{q_NSMCL}^* = \frac{J}{\eta} \left[\frac{B}{J} \omega_m + \lambda x_1 + k_1 \frac{|x_1|}{1+|x_1|} \tanh(as) + k_2 |x_1| (e^{-\beta|s|} + 1) s \right] \tag{23}$$

Như vậy, cấu trúc của bộ điều khiển tốc độ theo luật tiếp cận mới được trình bày trong hình 3.



Hình 4. Hệ thống PMSM sử dụng bộ điều khiển tốc độ NSMCL dựa trên mặt trượt ISMS

Như vậy, cấu trúc của hệ thống điều khiển động cơ PMSM với SMC dựa trên NSMCL+ISMS được trình bày trong hình 4.

4. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Thiết lập mô hình mô phỏng

Mô phỏng trên Matlab/Simulink tích hợp thuật toán NSMCL+ISMS với động cơ PMSM; các thông số động cơ được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số động cơ PMSM sử dụng trong mô phỏng

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Điện trở dây quấn stato R_s	2,875	Ω
Điện cảm trực $d-q L$	8,5	mH
Số đôi cực p	4	
Từ cảm của NCVC ψ_f	0,175	Wb
Điện áp một chiều U_{dc}	311	VDC
Tần số cắt PWM f_{pwm}	10	kHz
Mô men quán tính J	0,003	Kg.m ²
Hệ số ma sát nhớt B	0,008	Ns/m
Chu kỳ trích mẫu T_s	10	Ms

Mô hình mô phỏng hệ thống điều khiển NSMCL+ISMS cho động cơ PMSM được xây dựng trên Matlab/Simulink và so sánh với ASMC [13] và TERL, sử dụng các phương trình và thông số trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số mô phỏng hệ thống điều khiển của các phương pháp điều khiển

Phương pháp	Tham số	Phương pháp	Tham số		
TERL	k_1	5,0	PI (vòng dòng điện)	k_p	25,0
	k_2	7,2		k_i	1,0
NSMCL + ISMS	k_1	3500	ASMC [12]	k_1	280
	k_2	1,0		a	2,0
	α	2,0		β	0,5
	β	0,5		λ	200
	λ	0,01			

4.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

4.2.1. Động cơ PMSM trong chế độ thay đổi tốc độ

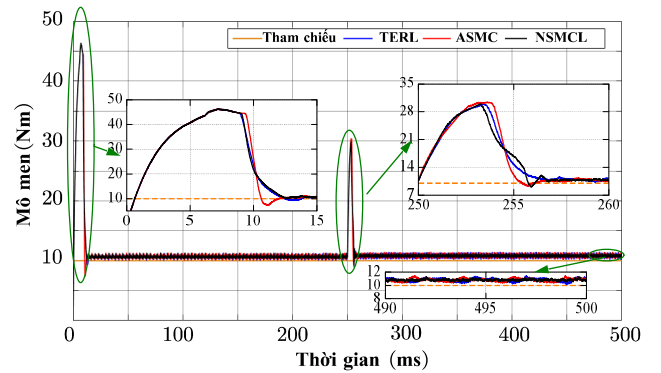
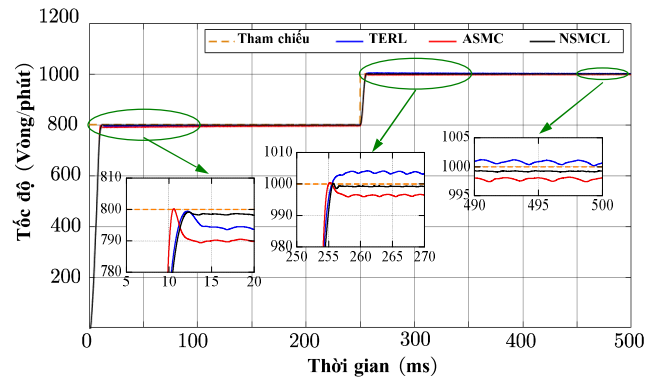
Giúp đánh giá độ ổn định và sai số của tốc độ và động cơ, nhóm tác giả sử dụng phương pháp sai số hiệu dụng trung bình RMS [16] như sau:

$$RMS_{\Omega} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\Omega_k - \Omega_{ref})^2} \quad (24)$$

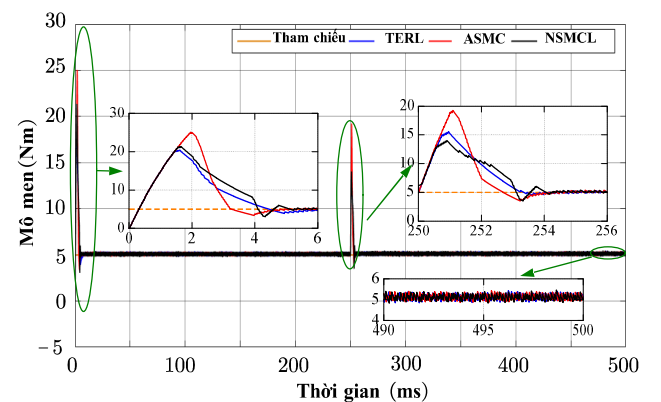
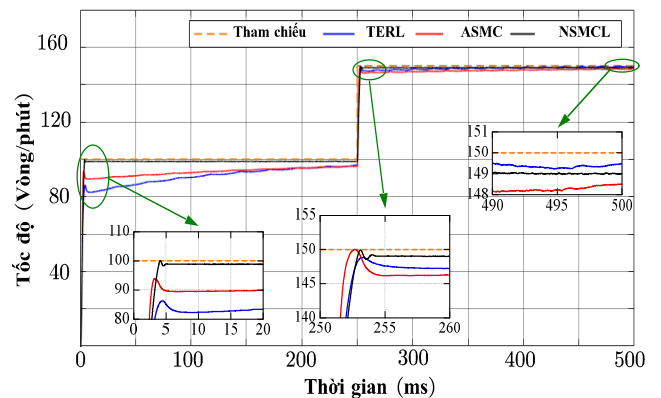
Trong đó, N là số lượng mẫu, Ω_k và Ω_{ref} tương ứng là các giá trị đo thực tế ở mẫu thứ k và tham chiếu. Kết quả mô phỏng hai trường hợp vận hành của động cơ PMSM ở tốc độ thấp và cao được trình bày trong hình 5 và các kết quả định lượng được thống kê trong bảng 3.

Có thể thấy ở bảng 3 và hình 5a với trường hợp thay đổi tốc độ từ 800 lên 1000v/p, luật TERL xuất hiện hiện tượng vọt lỗ tốc độ (1004v/p) với sai số tốc độ RMS đạt 0,94v/p, đồng thời độ vọt lỗ mô men lớn (29,95Nm), cho thấy đáp ứng nhanh nhưng còn tồn tại dao động đáng kể. Luật trượt ASMC loại bỏ được vọt lỗ tốc độ, tuy nhiên sai số tốc độ RMS cao nhất (2,23v/p) và độ vọt lỗ mô men lớn nhất (30,45Nm), phản ánh chất lượng bám tốc độ và độ mượt mô men chưa được cải thiện. Ngược lại, luật đề xuất NSMCL với mặt tích phân ISMS đạt sai số tốc độ RMS nhỏ nhất (0,78v/p) và sai số mô men RMS thấp nhất (0,14Nm), đồng thời duy trì đáp ứng ổn định, chứng tỏ khả năng bám tốc độ chính xác và giảm dao động mô men hiệu quả trong điều kiện tăng tốc lớn.

Với hình 5b và bảng 3 trong trường hợp thay đổi tốc độ từ 100 lên 150v/p, có thể thấy luật trượt TERL có xu hướng thiếu bám tốc độ (148,84v/p) mặc dù sai số tốc độ RMS tương đối nhỏ (0,73v/p), trong khi luật ASMC đạt giá trị tốc độ gần tham chiếu nhất (150,01v/p) nhưng lại đi kèm sai số tốc độ RMS cao (1,94v/p) và độ vọt lỗ mô men lớn nhất (19,24Nm), cho thấy đáp ứng thiếu mượt trong vùng tốc độ thấp. Trong cùng điều kiện, luật đề xuất NSMCL tiếp tục thể hiện đáp ứng cân bằng nhất, với sai số tốc độ RMS thấp (0,98v/p) và độ vọt lỗ mô men nhỏ nhất (14,04Nm), đảm bảo sự ổn định và giảm dao động mô men hiệu quả.



(a) Mô men $T_L = 10Nm$ và tốc độ thay đổi từ 800 lên 1000 vòng/phút



(b) Mô men $T_L = 5Nm$ và tốc độ thay đổi từ 100 lên 150 vòng/phút

Hình 5. Đồ thị mô phỏng tốc độ và mô men của động cơ với các phương pháp TERL, ASMC và NSMCL + ISMS dưới các chế độ thay đổi tốc độ

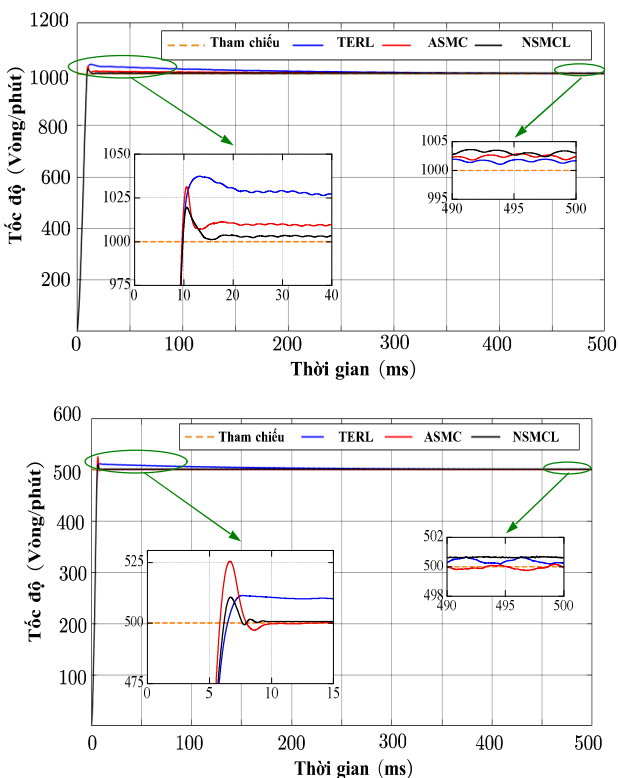
Tổng hợp hai trường hợp, phương pháp đề xuất mới NSMCL kết hợp với ISMS cho thấy hiệu năng cao hơn, thể hiện qua sai số RMS của tốc độ và mô men thấp, cùng với độ vọt lố mô men được cải thiện rõ rệt so với TERL và ASMC. Điều này khẳng định NSMCL là phương pháp phù hợp hơn cho các hệ truyền động yêu cầu độ chính xác cao, đáp ứng ổn định và hành vi mô men mượt trong cả các bước tăng tốc lớn và nhỏ.

Bảng 3. Đánh giá hiệu năng điều khiển tốc độ và mô men trong trường hợp thay đổi tốc độ

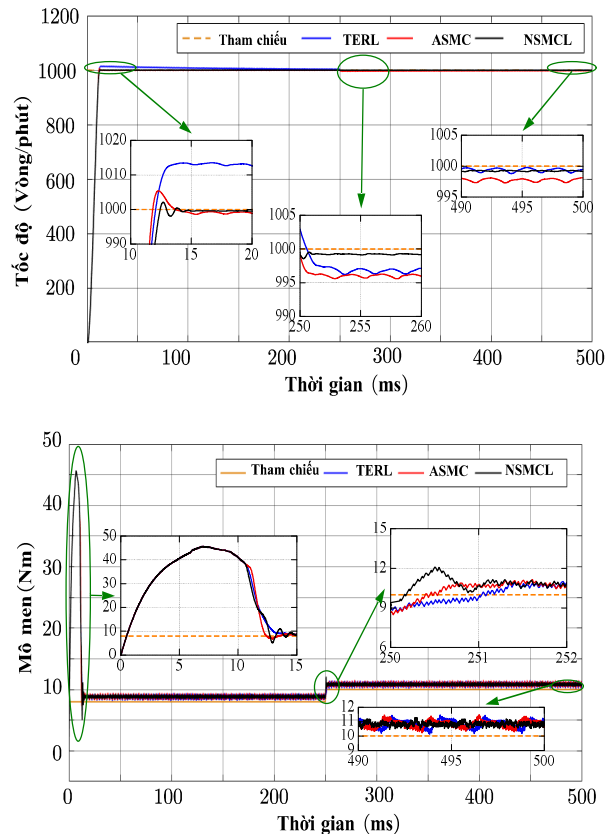
Tốc độ (v/p)	Phương pháp	Tốc độ vọt lố (v/p)	Sai số tốc độ RMS (v/p)	Mô men vọt lố (Nm)	Sai số mô men RMS (Nm)
800 → 1000	TERL	1004	0,94	29,95	0,24
	ASMC	1000	2,23	30,45	0,22
	NSMCL	1000	0,78	30,00	0,14
100 → 150	TERL	148,84	0,73	15,57	0,12
	ASMC	150,01	1,94	19,24	0,12
	NSMCL	149,93	0,98	14,04	0,12

4.2.2. Động cơ PMSM trong chế độ không tải và thay đổi tải

Tiếp theo, nhóm tác giả mô phỏng động cơ PMSM khởi động không tải với hai mức tốc độ khác nhau 500 và 1000 vòng/phút và trường hợp chạy tốc độ cao thay đổi mô men từ 8 đến 10Nm.



(a) Khởi động động cơ không tải với tốc độ ổn định 500 và 1000 vòng/phút



(b) Tốc độ 1000 vòng/phút và mô men thay đổi từ 8 lên 10Nm

Hình 6. Đồ thị mô phỏng tốc độ và mô men của động cơ với các phương pháp TERL, ASMC và NSMCL+ISMS dưới các chế độ không tải và thay đổi tải

Hình 6a cho thấy ưu điểm của luật NSMCL so với các luật TERL và ASMC trong quá trình khởi động không tải. Ở 500 vòng/phút, luật TERL có thời gian tăng tốc chậm, vọt lố lớn và dao động kéo dài, trong khi luật ASMC cải thiện hơn nhưng vẫn còn chattering và vọt lố cao. Ngược lại, luật NSMCL đạt tốc độ nhanh, bám sát tham chiếu chính xác với vọt lố thấp và thời gian ổn định ngắn. Với khởi động ở 1000 vòng/phút, cả ba phương pháp đều có thời gian tăng tốc ngắn, nhưng các luật TERL và ASMC vẫn xuất hiện vọt lố đáng kể. Luật NSMCL giữ ổn định, hầu như không dao động ở trạng thái xác lập. Nhìn chung, luật NSMCL thể hiện độ chính xác, ổn định và khả năng giảm chattering tốt hơn.

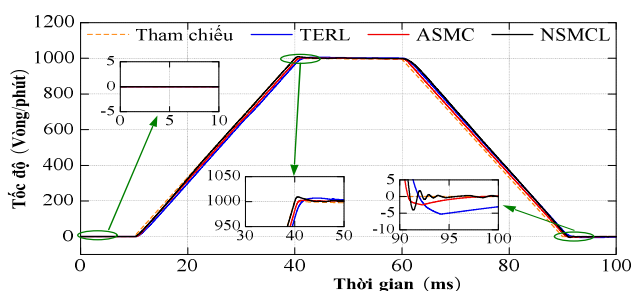
Kết quả mô phỏng hình 6b với các thông số được ghi chi tiết trong bảng 4, các phương pháp điều khiển cho thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng duy trì tốc độ và ổn định mô men. Cụ thể, luật điều khiển TERL xuất hiện vọt lố tốc độ lớn nhất khi khởi động (1013,52v/p) và độ sụt tốc đáng kể khi tải thay đổi (996,22v/p), mặc dù sai số tốc độ RMS ở mức tương đối thấp (0,81v/p). Điều này cho thấy TERL có khả năng hội tụ nhưng còn nhạy với nhiễu tải. Với luật ASMC cải thiện vọt lố tốc độ khi khởi động (1005,38v/p), tuy nhiên

lại có sai số tốc độ RMS lớn nhất (2,36v/p) và độ sụt tốc lớn (995,58v/p), phản ánh khả năng bám tốc độ và khử nhiễu tải chưa hiệu quả. Ngược lại, NSMCL thể hiện cải thiện hiệu năng và ổn định nhất, với vọt lố tốc độ nhỏ nhất khi khởi động (1002,09v/p), độ sụt tốc thấp nhất khi tải thay đổi (998,57v/p) và sai số tốc độ RMS nhỏ nhất (0,78v/p). Điều này chứng tỏ luật NSMCL kết hợp mặt trượt ISMS có khả năng duy trì tốc độ tốt hơn trước biến thiên mô men tải. Về mặt mô men, mặc dù mô men vọt lố khi khởi động của các luật trượt khác là tương đương (45,71Nm), NSMCL vẫn đạt sai số mô men RMS thấp nhất (0,85Nm), cho thấy khả năng giảm dao động mô men và cải thiện độ mượt trong quá trình vận hành.

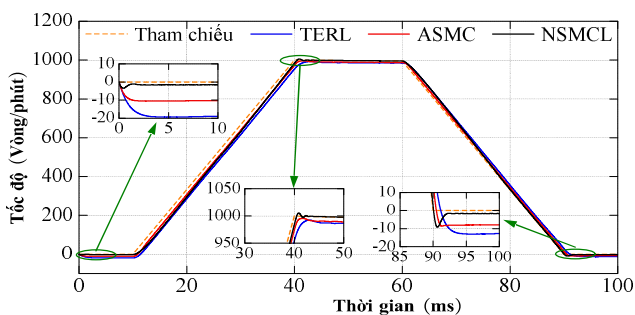
Bảng 4. Đánh giá hiệu năng điều khiển tốc độ trong trường hợp tải thay đổi từ 8 - 10Nm với tốc độ ổn định là 1000v/p

Phương pháp	Tốc độ vọt lố khi khởi động (v/p)	Tốc độ sụt giảm khi thay đổi mô men (v/p)	Sai số tốc độ RMS (v/p)	Mô men vọt lố khi khởi động (Nm)	Mô men cực đại khi thay đổi mô men (Nm)	Sai số mô men RMS (Nm)
TERL	1013,52	996,22	0,81	45,71	11,46	0,87
ASMC	1005,38	995,58	2,36	45,71	11,52	0,87
NSMCL	1002,09	998,57	0,78	45,71	12,08	0,85

4.2.3. Động cơ trong chế độ thay đổi tốc độ hình thang



(a) Không tải



(b) Tải 5Nm

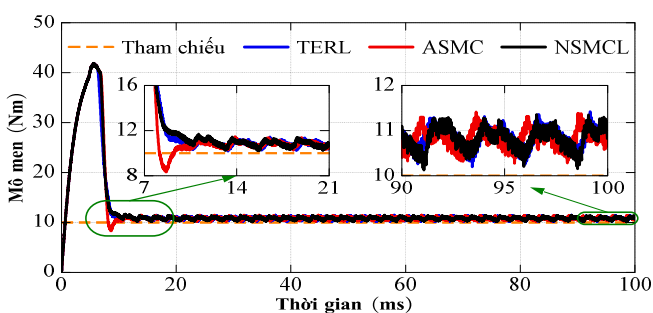
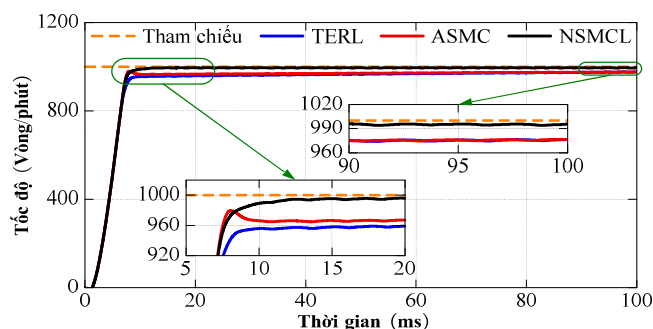
Hình 7. Kết quả mô phỏng tốc độ động cơ PMSM trường hợp chạy với tốc độ ở dạng hình thang với chế độ không tải và có tải 5Nm

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất, nhóm tác giả tiến hành mô phỏng với tín hiệu tốc độ dạng hình thang (hình 7) ở các mức tải khác nhau: không tải và có tải.

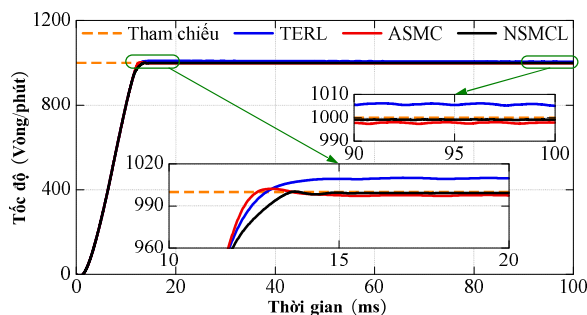
Đồ thị tốc độ hình 7 cho thấy, luật NSMCL bám sát tín hiệu hình thang tham chiếu, gần như không có vọt lố khi tăng/giảm tốc, duy trì tốc độ ổn định ngay cả khi tải 5Nm. Luật TERL thể hiện vọt lố lớn, dao động mạnh và đáp ứng chậm; luật ASMC cải thiện hơn nhưng vẫn còn chattering và sụt tốc nhẹ. Luật đề xuất NSMCL phản hồi gần tức thời và duy trì ổn định trước nhiễu tải, còn hai phương pháp khác phản ứng chậm và kém ổn định khi tải thay đổi.

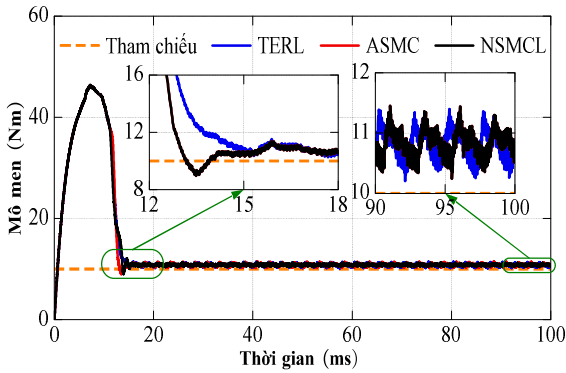
4.2.4. Đặc tính động cơ dưới các giá trị mô men quán tính J khác nhau

Trong trường hợp này, nhóm tác giả mô phỏng với các trường hợp mô men quán tính thay đổi để đánh giá ưu điểm của phương pháp đề xuất với các phương pháp khác. Trong này nhóm tác giả sẽ đánh giá các trường hợp thay đổi ở tải 10Nm với các mức mô men quán tính là 0,5J - J - 1,5J như trong hình 8.

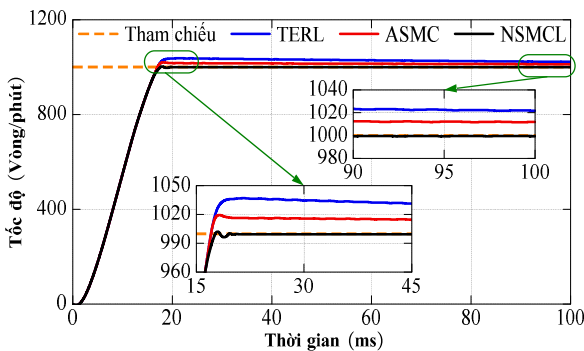


(a) Trường hợp tốc độ 1000 vòng/phút, tải 10Nm và mô men quán tính 0,5J





(b) Trường hợp tốc độ 1000 vòng/phút, tải 10Nm và mô men quán tính J



(c) Trường hợp tốc độ 1000 vòng/phút, tải 10Nm và mô men quán tính $1,5J$

Hình 8. Kết quả mô phỏng tốc độ và mô men động cơ PMSM trường hợp thay đổi giá trị mô men quán tính J

Các kết quả mô phỏng trong hình 8 với các thông số cụ thể được ghi chi tiết trong bảng 5. Trong trường hợp thay đổi mô men quán tính từ $0,5J$ đến $1,5J$, các phương pháp điều khiển cho thấy mức độ nhạy khác nhau đối với biến thiên tham số hệ. Ở $0,5J$, các luật trượt TERL và ASMC xuất hiện sai số tốc độ RMS rất lớn (trên $24v/p$) và hiện tượng thiếu bám tốc độ, trong khi NSMCL duy trì sai số tốc độ RMS thấp hơn đáng kể ($4,89v/p$) và đáp ứng gần giá trị tham chiếu. Với J danh định, NSMCL tiếp tục đạt sai số tốc độ RMS nhỏ nhất ($0,79v/p$), tốt hơn so với TERL và ASMC. Đáng chú ý, khi mô men quán tính tăng lên $1,5J$, NSMCL hầu như không bị ảnh hưởng, với sai số tốc độ RMS chỉ $0,49v/p$, trong khi các phương pháp còn lại suy

giảm rõ rệt. Mặc dù độ vọt lố mô men giữa các phương pháp là tương đương, NSMCL vẫn duy trì sai số mô men RMS thấp và ổn định trong toàn bộ dải mô men quán tính J thay đổi. Kết quả khẳng định NSMCL có tính bền vững tham số cao, đảm bảo độ chính xác và ổn định điều khiển ngay cả khi mô men quán tính của hệ thay đổi đáng kể.

Bảng 5. Đánh giá hiệu năng điều khiển tốc độ và mô men trong trường hợp thay đổi giá trị mô men quán tính J

Mô men quán tính	Phương pháp	Tốc độ vọt lố (v/p)	Sai số tốc độ RMS (v/p)	Mô men vọt lố (Nm)	Sai số mô men RMS (Nm)
$0,5J$	TERL	966,80	24,53	41,88	0,87
	ASMC	979,53	24,24	41,88	0,86
	NSMCL	996,10	4,89	41,88	0,86
J	TERL	1010,12	5,78	46,38	0,86
	ASMC	1002,23	2,17	46,38	0,86
	NSMCL	1000,30	0,79	46,38	0,85
$1,5J$	TERL	1037,06	22,51	47,11	0,82
	ASMC	1019,52	12,09	47,11	0,86
	NSMCL	1002,30	0,49	47,11	0,85

Từ các kết quả mô phỏng, bảng 6 trình bày so sánh các chỉ tiêu chất lượng giữa các phương pháp điều khiển trong thang đo cao nhất là 3 điểm đối với phương pháp có chất lượng tốt nhất.

Bảng 6. So sánh các thông số kỹ thuật giữa bộ điều khiển đề xuất và các phương pháp khác

Phương pháp	Độ bám tốc độ	Độ ổn định	Khả năng chống chattering	Khả năng chống nhiễu tải	Độ bền tham số
TERL	2	2	2	1	1
ASMC	1	1	1	2	2
NSMCL	3	3	3	3	3

Qua bảng 6, có thể nhận thấy NSMCL có chất lượng tốt hơn so với TERL và ASMC trên hầu hết các khía cạnh đánh giá. Cụ thể, NSMCL đạt điểm cao nhất ở tất cả các tiêu chí, bao gồm độ bám tốc độ, độ ổn định, khả năng chống nhiễu tải, khả năng chống chattering và độ bền tham số, cho thấy hiệu năng điều khiển nhất quán và bền vững. Trong khi đó, TERL và ASMC chỉ đạt mức trung bình hoặc thấp ở một số tiêu chí, đặc biệt là khi hệ thống chịu nhiễu tải hoặc thay đổi tham số.

5. KẾT LUẬN

Luật điều khiển trượt NSMCL được nghiên cứu và đề xuất để cải thiện hiệu năng điều khiển tốc độ động cơ PMSM. Thông qua các thử nghiệm mô phỏng với tín hiệu

tham chiếu hình thang và sự thay đổi tải cũng như thay đổi giá trị mô men quán tính, luật NSMCL thể hiện ưu thế rõ rệt so với các phương pháp truyền thống TERL và ASMC. Hệ thống điều khiển đề xuất NSMCL đáp ứng nhanh, thời gian quá độ ngắn, giảm vọt lố và chattering hiệu quả, mang lại tín hiệu tốc độ mượt mà, ổn định. Độ chính xác bám sát tín hiệu tham chiếu gần như tuyệt đối trong cả chế độ tốc độ cao và thấp, đồng thời duy trì độ ổn định cao khi có tải biến đổi. Khả năng chống nhiễu tải của luật NSMCL được đánh giá là xuất sắc, giúp hệ thống phục hồi gần tức thì sau các thay đổi mô men mà không gây dao động đáng kể. Những kết quả này chứng minh luật đề xuất NSMCL vừa cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của động cơ PMSM, vừa linh hoạt ứng dụng trong nhiều điều kiện vận hành và các dạng tín hiệu phức tạp.

Tuy nhiên, các kết quả trình bày trong bài báo hiện mới dừng lại ở mức đánh giá lý thuyết và mô phỏng, chưa có kết quả thực nghiệm để kiểm chứng. Đồng thời, có thể nhận thấy rằng khi mô men quán tính tăng, biên độ dao động mô men cũng tăng theo, đặc biệt trong khoảng thời gian từ 12ms đến 20ms. Điều này cho thấy phương pháp đề xuất vẫn còn những hạn chế và cần được tiếp tục cải thiện.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả dự kiến phát triển bộ điều khiển trượt NSMCL kết hợp với ISMS và bộ quan sát tải, nhằm khắc phục các nhược điểm còn tồn tại, đồng thời áp dụng trên mô hình thực nghiệm để kiểm chứng và đánh giá lại các kết quả mô phỏng đã đạt được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhao T., Wu S., Cui S., "Multiphase PMSM with asymmetric windings for more electric aircraft," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(4), 1592-1602, 2020.
- [2]. Zhang X., Wang Z., Zhao Z., Cheng M., "Model predictive voltage control for SPMSM drives with parameter robustness optimization," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(3), 3151-3163, 2022.
- [3]. Linares-Flores J., García-Rodríguez C., Sira-Ramirez H., Ramírez-Cárdenas O. D., "Robust backstepping tracking controller for low-speed PMSM positioning system: design, analysis, and implementation," *IEEE Transactions on industrial informatics*, 11(5), 1130-1141, 2015.
- [4]. Bai Y., Zhang G., Wang Q., Ding D., Li B., Wang G., Xu D., "High-gain nonlinear active disturbance rejection control strategy for traction permanent magnet motor drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(11), 13135-13146, 2022.
- [5]. Tuyen T. T., Yang J., Liao L., Zhou J., "Integrated Sliding Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Second-Order Disturbance Observer and Low-Pass Filter," *Electronics* (2079-9292), 14(7), 2025.

- [6]. Liang D., Li J., Qu R., Kong W., "Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8994-9004, 2017.
- [7]. Xu B., Wang X., Ji W., Ding S., Liu T., "A Composite Sliding Mode Control with the Modified Variable Exponential Reaching Law and Super-Twisting Extended State Observer for PMSM," *IEEE Sensors Journal*, 25(12), 21284 - 21294, 2025.
- [8]. Leu V. Q., Choi H. H., Jung J. W., "Fuzzy sliding mode speed controller for PM synchronous motors with a load torque observer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(3), 1530-1539, 2011.
- [9]. Zhang K., Wang L., Fang X., "High-order fast nonsingular terminal sliding mode control of permanent magnet linear motor based on double disturbance observer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(3), 3696-3705, 2022.
- [10]. Liu Y. C., Laghrouche S., Depernet D., Djerdir A., Cirrincione M., "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*, 9(5), 5416-5428, 2020.
- [11]. Zhang Y., Yin Z., Zhang Y., Liu J., Tong X., "A novel sliding mode observer with optimized constant rate reaching law for sensorless control of induction motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5867-5878, 2019.
- [12]. Tuyen T. T., Yang J., Liao L., Thao N. G. M., Ni D., Leng J., "Novel Anti-disturbance Speed Regulation System for PMSM Drives Based on Sliding Mode Control," in *2025 12th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2025)*, Japan, SE25-8402, 2025.
- [13]. Nguyen T. H., Nguyen T. T., Nguyen V. Q., Le K. M., Tran H. N., Jeon J. W., "An adaptive sliding-mode controller with a modified reduced-order proportional integral observer for speed regulation of a permanent magnet synchronous motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(7), 7181-7191, 2021.
- [14]. 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.
- [15]. Aghababa M. P., Akbari M. E., "A chattering-free robust adaptive sliding mode controller for synchronization of two different chaotic systems with unknown uncertainties and external disturbances," *Applied Mathematics and Computation*, 218(9), 5757-5768, 2012.
- [16]. Seryasat O. R., Honarvar F., Rahmani A., "Multi-fault diagnosis of ball bearing using FFT, wavelet energy entropy mean and root mean square (RMS)," in *2010 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, 4295-4299, 2010.

AUTHORS INFORMATION

Tran Thanh Tuyen¹, Dang Quoc Du², Nguyen Thi Phuc¹, Do Thi Hoa¹, Nguyen Thi Men¹

¹Faculty of Electrical, Quang Ninh University of Industry, Vietnam

²Faculty of Electrical and Automation, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam