

ĐÁNH GIÁ THIẾT KẾ LUẬT TRƯỢT TRONG ĐIỀU KHIỂN SMC CHO PMSM: GIẢI PHÁP GIẢM CHATTERING VÀ XU HƯỚNG HIỆN NAY

Phạm Đức Cường^{1,*}, Đoàn Thị Bích Thủy¹,

Đoàn Thị Như Quỳnh¹, Nguyễn Thị Mến¹,

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: phamduccuong.qui@gmail.com

TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) ngày càng được ứng dụng rộng rãi, yêu cầu đặt ra là PMSM vẫn phải duy trì hiệu suất cao và độ tin cậy cao ngay cả trong môi trường phức tạp. Do đặc tính phi tuyến của PMSM và ảnh hưởng của các nhiễu bên ngoài, việc điều khiển chính xác đang là một thách thức đối với các nhà nghiên cứu. Điều khiển trượt (SMC) được đánh giá cao nhờ tính bền vững mạnh mẽ trước các thay đổi như tham số hệ thống và nhiễu tải trong ứng dụng điều khiển PMSM. Bài báo này cung cấp tổng quan về tình hình nghiên cứu hiện tại của điều khiển trượt dựa trên PMSM, tập trung giới thiệu thiết kế luật trượt trong điều khiển trượt với mục tiêu giảm thiểu hiện tượng rung (chattering) mà vẫn duy trì tính ổn định Lyapunov. Đồng thời cũng đưa ra xu hướng phát triển trong nghiên cứu thiết kế của công nghệ điều khiển trượt trong tương lai cho PMSM được đề xuất.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), điều khiển trượt (SMC), luật trượt, nguyên lý ổn định Lyapunov.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

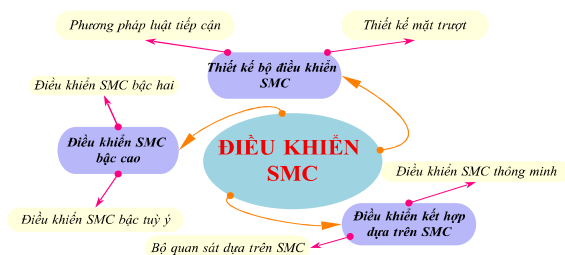
Nhờ cấu trúc đơn giản, mật độ công suất cao và hiệu suất cao, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) được ứng dụng rộng rãi trong các hệ truyền động hiệu suất cao như robot thông minh, phương tiện năng lượng mới, tàu thủy, hàng không vũ trụ và nhiều lĩnh vực khác. Động cơ PMSM đã dần thay thế động cơ không đồng bộ (KĐB) trong nhiều lĩnh vực ứng dụng và nhận được sự quan tâm, nghiên cứu rộng rãi [1]-[3]. Với sự phát triển của các phương tiện năng lượng mới, động cơ PMSM đã dần trở thành loại động cơ chủ đạo cho hệ thống điều khiển truyền động ô tô nhờ các ưu điểm như vận hành tin cậy và khả năng điều chỉnh tốc độ tốt [4]. Do điều kiện làm việc và yêu cầu phức tạp, các yêu cầu nghiêm ngặt được đặt ra đối với việc điều khiển động cơ.

Các kỹ thuật điều khiển thường được sử dụng trong hệ truyền động PMSM bao gồm điều khiển vector [5], [6] và điều khiển trực tiếp mô men xoắn (DTC) [7], [8]. Điều khiển trực tiếp mô men xoắn dựa trên điều khiển chuyển mạch, nên xuất hiện dao động mô men lớn. So với

DTC, điều khiển vector có độ gợn mô men và dòng điện thấp hơn. Tuy nhiên, trong điều khiển vector, vòng điều khiển tốc độ và vòng điều khiển dòng điện thường sử dụng bộ điều khiển PI cổ điển. Trong thực tế, khả năng điều chỉnh của bộ điều khiển này còn hạn chế và khó đáp ứng yêu cầu điều khiển hiệu suất cao.

Với sự phát triển của công nghệ và yêu cầu nâng cao hiệu suất điều khiển động cơ, các nhà nghiên cứu đã áp dụng lý thuyết điều khiển hiện đại và phát triển những phương pháp cải thiện hiệu quả điều khiển của hệ thống động cơ, chẳng hạn như điều khiển mô hình bên trong [9], điều khiển chịu lỗi [10], điều khiển dự đoán mô hình (MPC) [11], điều khiển trượt (SMC) [12], điều khiển khử nhiễu chủ động (ADRC) Các phương pháp điều khiển phi tuyến này cải thiện hiệu suất điều khiển của hệ truyền động PMSM ở các mức độ và khía cạnh khác nhau. Trong số đó, SMC có cấu trúc biến thiên nổi bật với khả năng bền vững cao và độ chính xác điều khiển lớn, nên đã thu hút nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực điều khiển động cơ.

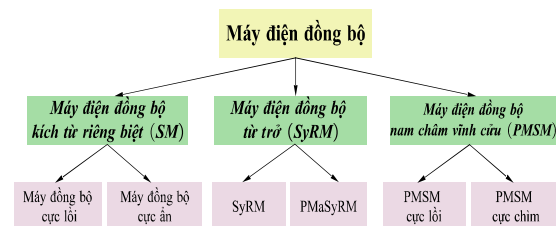
SMC ra đời vào những năm 1950s [13], phát triển từ phương pháp điều khiển cấu trúc biến thiên. Ý tưởng cốt lõi của SMC là sử dụng điều khiển chuyển mạch rời rạc để dẫn động hệ thống về một mặt trượt bậc thấp, sau đó hệ thống sẽ tiến dần về gốc theo phương trình mặt trượt [14]. Là một phương pháp điều khiển bền vững, SMC có thể đảm bảo khả năng bám tín hiệu tốt ngay cả khi các tham số bên trong hệ thống thay đổi hoặc có nhiễu bên ngoài, do đó trở thành một trong những giải pháp hiệu quả để nâng cao hiệu suất hệ thống điều khiển PMSM. SMC được áp dụng thành công trong nhiều lĩnh vực khác nhau như điều khiển động cơ KĐB [15], động cơ từ trở chuyển mạch (SRM) [16], và động cơ một chiều (DC) không chổi than (BLDC) [17] nhờ các đặc tính nổi bật về độ chính xác cao và tính dễ triển khai. Việc nâng cao hiệu suất điều khiển PMSM không chỉ đòi hỏi tối ưu hóa thiết kế động cơ mà còn cần cải tiến thuật toán điều khiển.



Hình 1. Hướng nghiên cứu và phát triển chính của SMC.

Sự phát triển của SMC và các thuật toán thích nghi tiên tiến được tích hợp với SMC đã nâng cao đáng kể hiệu suất của SMC truyền thống, khắc phục các hạn chế về tốc độ hội tụ và bậc tương đối. Những tiến bộ này đã trở thành những thành phần không thể thiếu trong lý thuyết SMC. Nghiên cứu hiện nay về thiết kế SMC chủ yếu tập trung vào việc giảm hiện tượng rung (chattering), cho phép điều khiển tự thích nghi đối với các hệ thống không chắc chắn và cải thiện hiệu suất động của hệ thống vòng kín [18]. Để giải quyết những thách thức này, nhiều phương pháp cải tiến và hướng nghiên cứu trong SMC đã được đề xuất, như minh họa ở Hình 1 [19]. Trong nội dung bài báo, nhóm tác giả chủ yếu đánh giá thiết kế bộ điều khiển SMC với các phương pháp luật tiếp cận (luật trượt).

Các phần tiếp theo của bài báo này được chia thành các mục sau: Mục 2 cung cấp nghiên cứu tổng quan về động cơ PMSM. Mục 3 trình bày về nguyên lý cơ bản của điều khiển SMC. Mục 4 đánh giá so sánh một số phương pháp luật tiếp cận được công bố gần đây. Mục 5 đưa ra xu hướng phát triển thiết kế phương pháp luật tiếp cận nói riêng và phương pháp SMC cho động cơ PMSM nói chung. Mục 6 với các kết luận và xu hướng trong tương lai.

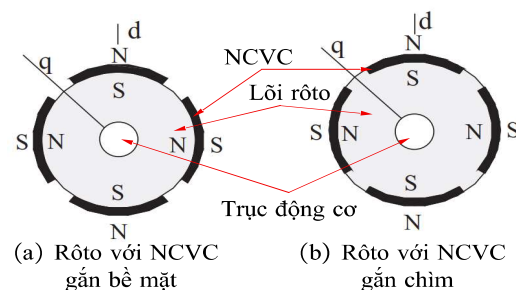


Hình 2. Phân loại các động cơ đồng bộ.

2. ĐỘNG CƠ PMSM

2.1. Cấu trúc của động cơ PMSM

Động cơ đồng bộ là động cơ điện xoay chiều (AC), trong đó stato có cuộn dây AC giống động cơ cảm ứng, còn rôto dùng cuộn dây kích từ DC hoặc nam châm vĩnh cửu (NCVC) gồm các loại như trong Hình 2 [20]. Nguồn điện ba pha cấp cho stato tạo ra từ trường quay với tốc độ đồng bộ, xác định bởi tần số nguồn và số cặp cực. Rôto quay cùng tốc độ với từ trường stato, không đổi dù tải cơ học thay đổi. Dòng kích từ DC hoặc NCVC trên rôto tạo từ thông cố định, tạo momen từ tương tác với từ trường stato. Ở máy đồng bộ truyền thống, stato đứng yên, rôto quay; trong bộ kích từ không chổi than, stato đứng yên còn phản ứng gắn trên rôto.



Hình 3. Cấu trúc rôto của động cơ PMSM [21].

Stato được làm từ các tấm thép điện ghép lại, có rãnh chứa cuộn dây ba pha phân bố tạo từ trường quay. Cuộn dây có thể tập trung hoặc phân bố; cuộn phân bố tiêu thụ nhiều đồng hơn

nhưng giảm sóng hài. Rôto dùng NCVC nhẹ, nhỏ gọn, tạo từ thông cố định. Động cơ đồng bộ có rôto NCVC (Hình 3), gồm rôto NCVC gắn chìm (IPMSM) và rôto NCVC gắn bề mặt (SPMSM). Ở động cơ SPMSM, từ thông phân bố đều trong khe hở, còn ở động cơ IPMSM, từ thông tập trung tại cực.

2.2. Mô hình động học động cơ PMSM

Các phương trình điện áp stato, biểu thức momen điện từ và phương trình chuyển động cơ học được trình bày như sau [6]:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - B_a \omega_m - T_L), \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \left\{ (L_d - L_q) i_d + \psi_f \right\}, \quad (4)$$

Trong đó, u_d , u_q , i_d và i_q lần lượt là điện áp và dòng điện stato theo trục d và trục q . L_d , L_q và R_s lần lượt là độ tự cảm trục d , độ tự cảm trục q và điện trở stato. Các tham số ω_e và ω_m là tốc độ góc điện và cơ, còn ψ_f là liên kết từ thông của nam châm vĩnh cửu. Ngoài ra, T_L và T_e lần lượt là mô men tải và mô men điện từ. Các tham số p , J và B_a lần lượt là số cặp cực, mô men quán tính và hệ số ma sát nhớt của tải.

3. NGUYÊN LÝ CƠ BẢN CỦA ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Trong thực tế, hệ thống luôn khác biệt so với mô hình do nhiễu, biến đổi tham số và động học chưa mô hình hóa. Đảm bảo hiệu suất dưới các điều kiện này là thách thức lớn, dẫn đến phát triển các chiến lược điều khiển chắc chắn, trong đó điều khiển SMC là phương pháp hiệu quả và phổ biến.

Xét một hệ thống phi tuyến như sau [22]:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (5)$$

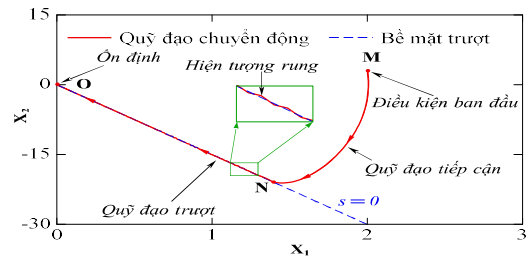
Trong đó $x \in R^n$, $u \in R^m$ lần lượt là vecto trạng thái và biến đầu vào của hệ thống. Biến $s(x, t)$ được định nghĩa là biến trượt, với bề mặt trượt được xác định:

$$s(x, t) = 0 \quad (6)$$

Và $u(t)$ là tín hiệu điều khiển không liên tục được biểu diễn dưới dạng [23]:

$$u(t) = \begin{cases} u^+(x, t) & s(x, t) > 0 \\ u^-(x, t) & s(x, t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Nếu biến điều khiển $u(t)$ thỏa mãn điều kiện $s(x, t)\dot{s}(x, t) < 0$ thì hệ thống được coi là đang ở chế độ trượt.



Hình 4. Quỹ đạo chuyển động của điều khiển SMC.

Chế độ của hệ thống điều khiển SMC có thể chia thành hai giai đoạn riêng biệt: giai đoạn tiếp cận và giai đoạn trượt và được minh họa ở Hình 4 [19]. Ban đầu, trạng thái hệ thống được dẫn từ vị trí ban đầu đến bề mặt trượt dưới tác động của luật tiếp cận. Khi đã đến bề mặt trượt, trạng thái di chuyển dọc theo bề mặt này và hội tụ về gốc tọa độ.

Thông thường, bề mặt trượt được định nghĩa bởi một phương trình hội tụ tuyến tính có bậc thấp hơn so với hệ thống gốc. Thiết kế này đảm bảo rằng, sau khi tiếp cận bề mặt, trạng thái hệ thống sẽ theo quỹ đạo được điều khiển bởi phương trình trượt và hội tụ theo cấp số nhân về gốc tọa độ. Chuyển động trong giai đoạn này bị ràng buộc bởi bề mặt trượt và không phụ thuộc vào động học bên trong của hệ thống.

Trong giai đoạn tiếp cận, hệ thống có thể cắt qua bề mặt trượt một số lần hạn chế, nhưng hành vi chế độ trượt và tính mạnh mẽ chưa được thiết lập. Hoạt động chế độ trượt thực sự chỉ bắt đầu khi hệ thống đã tiếp cận bề mặt. Từ thời điểm này, hiệu suất hệ thống hoàn toàn phụ thuộc vào tính chất của bề mặt trượt và trở nên không bị ảnh hưởng bởi nhiễu bên ngoài và sai số mô hình — với điều kiện các điều kiện phù hợp được thỏa mãn. Trạng thái hệ thống sau đó được duy trì trên bề mặt trượt thông qua điều khiển chuyển mạch liên tục, dẫn dắt hệ thống ổn định về gốc tọa độ. Cơ chế chuyển mạch này

chính là yếu tố then chốt giúp SMC có tính chắc chắn bám sinh trước biến đổi tham số và nhiễu bên ngoài.

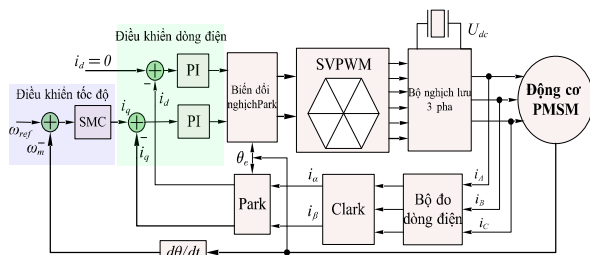
Phân tích ổn định Lyapunov là một phương pháp được sử dụng rộng rãi để đánh giá độ ổn định của các bộ điều khiển SMC [24], đặc biệt để chứng minh và đánh giá hành vi hội tụ ổn định. Hàm được sử dụng như sau:

$$V(s,t) = \frac{1}{2} s^2(t) \quad (8)$$

Điều kiện đạt tới được thỏa mãn khi tiêu chí sau được đáp ứng:

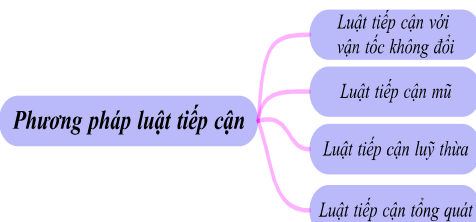
$$\dot{V}(s,t) = \dot{s}(t)s(t) < 0 \quad (9)$$

Điều kiện trong Công thức (9) đảm bảo rằng mặt trượt sẽ được đạt tới trong một khoảng thời gian hữu hạn.



Hình 5. Sơ đồ khối điều khiển của hệ thống truyền động PMSM với điều khiển SMC và biến tần nguồn điện áp điều khiển vectơ trường (VSI-FOC).

SMC thường được áp dụng trong vòng điều khiển tốc độ của hệ thống động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), như minh họa ở Hình 5, nhằm đạt được hiệu suất cao và điều chỉnh tốc độ chắc chắn. Trong vòng điều khiển tốc độ, SMC sử dụng bề mặt trượt thiết kế đặc biệt cùng với luật tiếp cận để đưa sai số tốc độ tiến về bề mặt trượt, giúp hội tụ nhanh về giá trị bằng 0. Nhờ phản hồi, SMC kiểm soát sai số tốc độ, đảm bảo việc theo dõi và điều chỉnh chính xác tốc độ quay của PMSM.



Hình 6. Hướng nghiên cứu của luật trượt trong thiết kế bộ điều khiển SMC.

Trong nội dung của bài báo, nhóm tác giả tập trung đến đánh giá luật điều khiển và mặt trượt của điều khiển SMC. Với hai thành phần này được phân loại như trong Hình 6.

4. PHƯƠNG PHÁP LUẬT TIẾP CẬN

Bốn luật tiếp cận chế độ trượt truyền thống được mô tả như sau [25]:

- Luật tiếp cận với vận tốc không đổi (Constant Velocity Reaching Law - CVRL):

$$\dot{s} = -k_1 \operatorname{sgn}(s), \quad k_1 > 0, \quad (10)$$

- Luật tiếp cận mũ (Exponential Reaching Law - ERL):

$$\dot{s} = -k_1 \operatorname{sgn}(s) - k_2 s, \quad k_1, k_2 > 0, \quad (11)$$

- Luật tiếp cận lũy thừa (Power Reaching Law - PRL):

$$\dot{s} = -k_1 |s|^\lambda \operatorname{sgn}(s), \quad k_1 > 0, 0 < \lambda < 1, \quad (12)$$

- Luật tiếp cận tổng quát (General Reaching Law - GRL):

$$\dot{s} = -k_1 s \operatorname{sgn}(s) - g(s, x), \quad k_1 > 0, \quad (13)$$

Trong hệ thống này, trạng thái tiếp cận bề mặt chế độ trượt thông qua hai loại luật tiếp cận: luật tiếp cận vận tốc biến đổi và luật tiếp cận bậc biến đổi. Cả ERL và GRL đều kết hợp các thành phần của hai loại này. Cụ thể, $k_1 \operatorname{sgn}(s)$ (ERL) và $k_1 s \operatorname{sgn}(s)$ (GRL) đại diện cho luật tiếp cận vận tốc biến đổi truyền thống, trong khi $g(s, x)$ (ERL) và $g(s, x)$ (GRL) tương ứng với luật tiếp cận bậc biến đổi. Ngược lại, CVRL và PRL chỉ bao gồm thành phần luật tiếp cận vận tốc biến đổi truyền thống.

Dựa trên Bảng 1 so sánh hiệu suất các luật tiếp cận. GRL và ERL kết hợp nhiều thành phần, tăng khả năng thích ứng với động học phức tạp, nhiễu đa dạng và yêu cầu hội tụ. PRL chỉ dùng cấu trúc biến bậc, CVRL dùng hàm dấu vận tốc cố định, nên ít linh hoạt. GRL và ERL giảm rung và tăng chính xác tốt hơn nhờ thành phần tỉ lệ và thiết kế tùy chỉnh, trong khi CVRL rung nhiều, PRL phụ thuộc nhiều vào tính chính xác tham số. GRL và ERL có khả năng chống nhiễu mạnh, xử lý tốt sai số mô hình và nhiễu lớn, còn PRL và CVRL kém hiệu quả với nhiễu đột ngột. Vì vậy, PRL và CVRL phù hợp hệ đơn giản, dễ

triển khai, còn GRL và ERL phù hợp ứng dụng phức tạp, yêu cầu độ chính xác và độ bền cao.

Bảng I. Phân tích và so sánh bốn luật tiếp cận truyền thống.

Luật tiếp cận	Ưu điểm	Nhược điểm	Độ chính xác	Khả năng chống nhiễu	Ứng dụng
CVRL	- Cấu trúc đơn giản, dễ hiểu và dễ triển khai; - Điều khiển trực tiếp trạng thái tiếp cận bề mặt chế độ trượt với vận tốc “không đổi” trong miền chế độ trượt.	- Rung mạnh do hàm dấu, ảnh hưởng hiệu suất và kích thích động học ẩn; - Thiếu thích ứng vì vận tốc tiếp cận cố định.	Có thể tiếp cận bề mặt trượt, nhưng rung làm giảm độ chính xác ổn định và gây dao động.	Chống nhiễu kém; nhiễu có thể bị khuếch đại khi rung, vận tốc cố định không giảm nhiễu được.	Phù hợp cho hệ thống đơn giản, độ chính xác thấp, ưu tiên dễ triển khai hơn là giảm rung và tăng thích ứng.
ERL	- Kết hợp $k_1 \text{sgn}(s)$ và $k_2 s$, giảm rung so với CVRL; - Tốc độ tiếp cận nhanh, thích ứng tốt hơn khi tham số phù hợp.	- Khó chỉnh k_1, k_2, dễ gây chậm hoặc rung; - Dạng hàm mũ có thể gây vọt lố.	Chính xác hơn CVRL, tiếp cận mượt hơn nhưng vẫn phụ thuộc chỉnh tham số và dễ vượt quá.	Chống nhiễu tốt hơn CVRL, nhưng còn phụ thuộc tham số.	Phổ biến trong điều khiển servo, như khớp tay robot, cần cân bằng giảm rung, tốc độ và chính xác.
PRL	- Luật tiếp cận bậc biến đổi, vận tốc thích nghi, giảm vượt và mượt; - Tiếp cận mượt, không đột ngột như CVRL.	- Khó chọn λ tối ưu, cần thử nghiệm nhiều; - Thích ứng với nhiễu phức tạp kém.	Đạt độ chính xác cao khi λ phù hợp, nhưng phụ thuộc λ.	Chống nhiễu tốt với nhiễu chậm, kém với nhiễu đột ngột lớn.	Phù hợp hệ thống cần tiếp cận mượt và môi trường nhiễu ổn định.
GRL	- Kết hợp $k_1 \text{sgn}(s)$ và $g(s, x)$ tùy chỉnh, thích ứng tốt hệ phức tạp; - Giảm rung và cải thiện hiệu suất trong môi trường nhiễu phức tạp.	- Thiết kế $g(s, x)$ phức tạp, cần hiểu sâu hệ thống; - Tính toán nặng, hạn chế thực thi thời gian thực.	Độ chính xác cao, tối ưu $g(s, x)$ giảm rung và hội tụ chính xác.	Chống nhiễu mạnh, $g(s, x)$ kìm hãm nhiễu và sai số mô hình.	Phù hợp hệ phức tạp như điều khiển hướng hàng không, cần chống nhiễu và chính xác cao.

Trong những năm gần đây, các nhà nghiên cứu đã nghiên cứu và cải tiến các luật tiếp cận truyền thống để khắc phục những nhược điểm tồn tại của chúng giúp hệ thống giảm được hiện tượng rung và vẫn giữ được ưu điểm của phương pháp SMC mang lại.

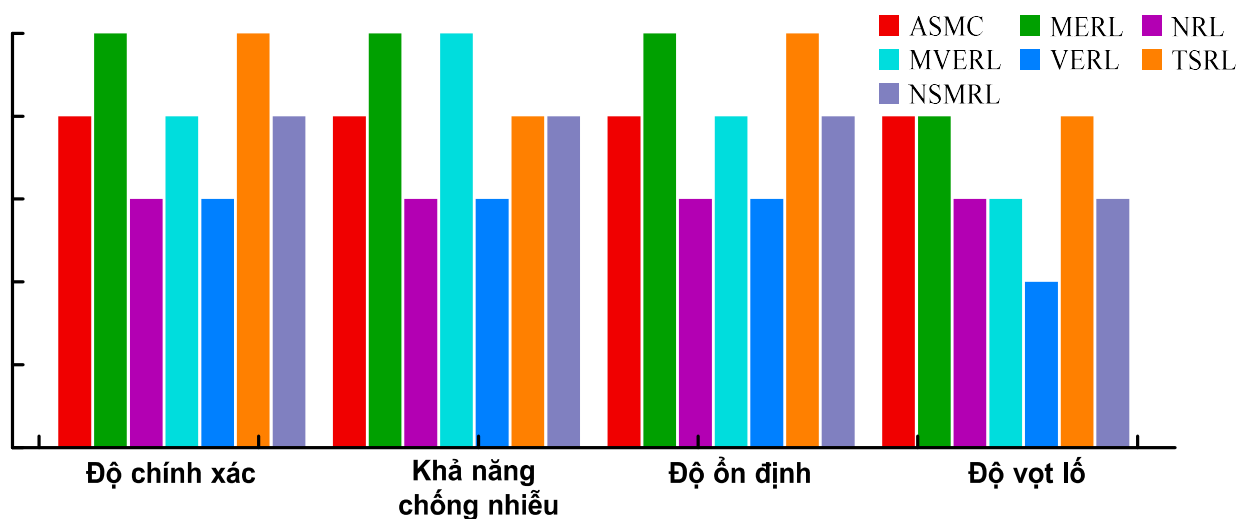
Bảng II. Bảng phân tích các luật điều khiển cải tiến từ luật tiếp cận truyền thống.

Luật tiếp cận	Năm	Cấu trúc	Ưu điểm	Nhược điểm	So sánh với tiếp cận truyền thống
ASMC [26]	2022	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \text{sgn}(s) \\ f(x, s) = x \frac{1 + \lambda - e^{-\eta s }}{\lambda} \\ k_1 > 0, 1 > \lambda > 0, \eta > 0 \end{cases}$	- Cải tiến luật trượt CVRL, giảm rung; - Tăng tốc đạt mặt trượt; - MRPOPIO (ASMC) ước lượng, bù nhiễu.	- Giảm bền vững gần mặt trượt; - Vượt giá trị quá độ; - Chưa xử lý mô men cogging.	- So với CVRL: giảm rung, tăng tốc đạt mặt trượt; - Hạn chế: kém bền vững, chưa xử lý mô men cogging.
MERL [27]	2024	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \text{sgn}(s) \\ k_1 > 0; 1 > \mu, \alpha > 0; \gamma, \lambda > 0, \chi < 0 \\ f(x, s) = \frac{1}{\mu + \left(\frac{ x ^\alpha + \lambda}{ x ^\alpha} - \mu \right) e^{-\gamma s } \cos(\chi \sigma_n)} \end{cases}$	- Tăng tốc độ hội tụ; - Giảm rung so với các luật hiện có; - Nhiều lần vượt qua điểm 0 để cải thiện hiệu suất.	- Đánh đổi giảm rung và bền vững; - Khuếch đại hàm sign cao gây rung; $k_1 \text{sgn}(s)$ vẫn gây rung; - Hạn chế tăng tốc hội tụ.	- Vượt CVRL về hội tụ và rung; - Nhưng gặp đánh đổi và hạn chế mà luật CVRL đơn giản tránh được.
NRL [28]	2021	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \text{sgn}(s) - k_2 g(x, s) s \\ f(x, s) = \arcsin h(\alpha x), g(x, s) = s ^{\beta \text{sgn}(s -1)} \\ k_1, k_2, \alpha > 0; 1 > \beta > 0 \end{cases}$	- Cải tiến dựa trên luật trượt ERL; - ATSMC (NRL + TSMC) vượt trội về ổn định, đáp ứng, kháng nhiễu.	- Phụ thuộc chính xác mô hình; - Biến đổi tham số ảnh hưởng hiệu suất; - Phương pháp mới tốn thời gian hơn chút.	Vượt trội về nhiều mặt nhưng hạn chế linh hoạt và phụ thuộc mô hình so với ERL.
MVERL [29]	2025	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \text{sgn}(s) - k_2 g(x, s) s \\ f(x, s) = x \left[1 + \alpha (1 - e^{-\beta s }) \right], g(x, s) = x ^\lambda \\ k_1, k_2, \alpha > 0; \beta > 1; 2 > \lambda > 0 \end{cases}$	- Cải tiến từ luật trượt ERL; - INFETSM kết hợp MVERL tự điều chỉnh hệ số, tăng tốc đạt mặt trượt và giảm rung.	- Ước lượng kém khi tải nặng do dao động; - Thử nghiệm hạn chế vì thiết bị và điều kiện.	Ưu thế kháng nhiễu và tốc độ phản hồi nhưng hạn chế ước lượng tải nặng so với ERL.

VERL [30]	2022	$\begin{cases} \dot{s} = -f(x, s) \text{sat}(s)/k_1 - k_1 s \\ f(x, s) = x ^2; k_1, \Delta > 0 \\ \text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ \frac{1}{\Delta} s, & -\Delta \leq s \leq \Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases} \end{cases}$	- Cải tiến từ luật trượt ERL; - Luật VERL cải thiện tốc độ phản hồi và giảm rung.	- Hiệu chỉnh thủ công, tốn thời gian; - Cần tự động điều chỉnh tham số.	- Tốt hơn về vị trí và giảm rung, nhưng khó hiệu chỉnh tham số so với ERL.
TSRL [31]	2021	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \text{sgn}(s) - g(x, s), \\ f(x, s) = s ^\alpha, g(x, s) = k_2 s \\ k_1, k_2, 1 > \alpha > 0 \end{cases}$	- Cải tiến từ luật trượt GRL; - Luật TSRL tăng tốc hội tụ và kháng nhiễu; - Cải thiện thời gian ổn định và giảm vọt lố.	- Phương pháp phi tuyến gây rung do hệ số chuyển mạch cao; - Gặp vấn đề bão hòa.	- Tốt hơn về hội tụ và kháng nhiễu nhưng gặp rung và vấn đề hệ số so với GRL.
NSMRL [32]	2025	$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 f(x, s) \tanh(s) - k_2 g(x, s) s \\ f(x, s) = \frac{1}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\beta s }}; g(x, s) = x ^2 \\ k_1, k_2, \beta > 0; 1 > \alpha > 0 \end{cases}$	- Cải tiến từ luật ERL; - Giảm dao động tốc độ, dòng điện, tăng độ bền; - Thời gian điều chỉnh ngắn, cải thiện tốc độ.	- SMC bền nhưng nhiều chattering; - Cải tiến điều khiển chỉ xử lý sai lệch quán tính, bỏ sót yếu tố khác.	- Cải thiện giảm dao động và tăng độ bền, nhưng vẫn gặp vấn đề về chattering và độ phức tạp bộ lọc so với ERL.

Dựa vào các tài liệu [26]-[32], nhóm tác giả tổng hợp ra Hình 7 đánh giá các chỉ số của các

luật cải tiến với nhau như sau (với thang điểm 5 điểm là cao nhất và 1 điểm là thấp nhất):



Hình 7. Biểu đồ đánh giá hiệu suất của các luật trượt cải tiến trong điều khiển tốc độ PMSM.

Phân tích so sánh trong Bảng II và Hình 7 cho thấy các phương pháp điều khiển tiên tiến như MERL [27] và TSRL [31] đạt hiệu suất cao nhất về độ chính xác, khả năng chống nhiễu và độ ổn định (5/5) nhờ hội tụ nhanh, điều chỉnh hệ số thích nghi và giảm dao động hiệu quả; MERL có vượt nhẹ nhưng hồi phục nhanh. ASMC [26], MVERL [29] và NSMRL [32] đạt mức tốt (4/5) ở hầu hết tiêu chí, với các kỹ thuật bù nhiễu, ước lượng nhiễu gộp và nhận dạng quán tính giúp giảm sai số. NRL [28] và VERL [30] chỉ đạt mức trung bình (3/5) về độ chính xác, chống nhiễu và ổn định, trong đó VERL có độ vượt cao nhất [2/5] do khả năng thích ứng kém trong quá trình

chuyển trạng thái động. Về độ vọt lố, ASMC và TSRL kiểm soát tốt nhất, MVERL, NSMRL và NRL ở mức trung bình.

5. XU THẾ THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN SMC CHO ĐỘNG CƠ PMSM

Xu hướng thiết kế luật trượt cho PMSM trong tương lai tập trung vào tích hợp các thuật toán trí tuệ nhân tạo như mạng nơ-ron và học tăng cường để điều chỉnh tham số luật trượt theo trạng thái hệ thống thời gian thực, giúp cải thiện đặc tính động, tĩnh, giảm chattering và nâng cao độ chính xác bám; kết hợp với các lý thuyết điều khiển tiên tiến trong Bảng III như điều khiển MPC, ADRC, bộ quan sát, điều khiển

thích nghi,... [32-34] nhằm tối ưu luật trượt để giải quyết đồng thời nhiều mục tiêu như giảm gọn mô men, tiết kiệm năng lượng và tăng tốc độ đáp ứng; đồng thời tiếp tục khai thác luật trượt bậc cao và phân số để tận dụng khả năng giảm chattering, tăng tính linh hoạt, độ bền vững và độ chính xác, đặc biệt hiệu quả trong các ứng dụng yêu cầu điều khiển tốc độ hoặc vị trí chính xác cao như hàng không vũ trụ và robot công nghiệp cao cấp.

Bảng III. Các phương pháp điều khiển kết hợp với SMC [19].

Phương pháp	Đặc điểm ứng dụng
Bộ quan sát + SMC	Chống nhiễu, giảm chattering
Điều khiển thích nghi + SMC	Nhận dạng tham số, bám dòng điện
MPC + SMC	Sai lệch tham số động cơ, bám vận tốc
ADRC + SMC	Bám vận tốc
Điều khiển không cảm biến + SMC	Giảm chi phí cảm biến cho hệ thống
Mạng nơ ron mờ + SMC	Điều chỉnh thời gian thực, giảm chattering, tính toán phức tạp

Với việc phát triển điều khiển SMC kết hợp với các thuật toán thông minh cho PMSM đang hướng tới khả năng chống nhiễu mạnh mẽ và tối ưu hóa thông minh. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc sử dụng các thuật toán tối ưu hoá thông minh (PSO, GA, DE) [35-37] và các biến thể cải tiến giúp nâng cao tốc độ hội tụ, giúp tối ưu hoá các tham số của bộ điều khiển SMC.

Bên cạnh đó, hướng nghiên cứu tương lai tập trung vào tích hợp chặt chẽ SMC với điều khiển không cảm biến dựa trên ước lượng EMF và mô hình trạng thái nhằm giảm chi phí, tăng độ tin cậy, đặc biệt cho ứng dụng xe điện; kết hợp tối ưu hóa mô hình hóa, nhận dạng tham số thời gian thực để thích ứng với biến thiên động cơ; đồng thời mở rộng liên ngành với điện tử công suất, cơ khí và khoa học máy tính để tối ưu biến tần, nâng cao hiệu quả thuật toán và kết nối IoT – Công nghiệp 4.0, cho phép giám sát, điều khiển thông minh và bảo trì dự đoán hiệu quả hơn.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra đánh giá tổng quan về nghiên cứu thiết kế luật trượt trong điều khiển SMC cho PMSM, giới thiệu các luật trượt truyền thống của bộ điều khiển SMC cùng với ứng dụng trong PMSM, đồng thời phân tích ưu nhược điểm của các luật điều khiển trượt. Tiếp đó, bài báo trình bày các luật trượt mới được cải tiến từ các luật trượt truyền thống nhằm hoàn thiện hơn thiết kế bộ điều khiển SMC trong việc giảm rung. Cuối cùng, nhóm tác giả đề xuất xu thế kết hợp SMC với các thuật toán điều khiển tiên tiến khác để nâng cao hiệu quả, giúp điều khiển SMC ngày càng tối ưu trong PMSM nói riêng và các hệ thống tự động nói chung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Xu, H., Song, Z., Xiao, X., Mo, Y., Zhou, W., & Wu, P. (2024). A Precise Modeling Method for PMSM Servo System of Spacecraft. *Applied Sciences*, 14(3), 1161.
- Özçiflikçi, O. E., Koç, M., Bahçeci, S., & Emiroğlu, S. (2024). Overview of PMSM control strategies in electric vehicles: a review. *International Journal of Dynamics and Control*, 12(6), 2093-2107.
- Serpi, A., Porru, M., Turno, A., Tinazzi, F., Pastura, M., & Zigliotto, M. (2024, October). Asymmetric Supply of a Dual Three-Phase PMSM through a Hybrid Energy Storage System in Marine Electric Propulsion Systems. In *2024 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Nair, S. V., Harikrishnan, P., & Hatua, K. (2021). Six-step operation of a symmetric dual three-phase PMSM with minimal circulating currents for extended speed range in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 7651-7662.
- Hu, Y., Li, Y., Ma, X., Li, X., & Huang, S. (2020). Flux-weakening control of dual three-phase PMSM based on vector space decomposition control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(7), 8428-8438.
- Tuyen, T. T., Yang, J., Liao, L., & Zhou, J. (2025). 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).
7. Lemma, B. D., & Pradabane, S. (2023). Control of PMSM drive using lookup table based compensated duty ratio optimized direct torque control (DTC). *IEEE Access*, 11, 19863-19875.
 8. Nasr, A., Gu, C., Wang, X., Buticchi, G., Bozhko, S., & Gerada, C. (2021). Torque-performance improvement for direct torque-controlled PMSM drives based on duty-ratio regulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1), 749-760.
 9. Liu, L., Liu, C., Che, C., Wu, Y., & Zhao, Q. (2025). Research on the coordinated control of mining multi-PMSM systems based on an improved active disturbance rejection controller. *Electronics*, 14(3), 477.
 10. Lu, Y., Tong, Z., Feng, G., & Ding, B. (2025). Performance Evaluation and Comparison for Fault Tolerant Control of Dual Three-phase PMSM Under Open-phase Fault. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
 11. Wang, S., Jiang, F., Guo, Y., & Cheng, S. (2025). Multi-Objective Model Predictive Control With Weighting Factor Elimination for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
 12. Muthusamy, M., Bobby, M., Aljehaini, A. M., Hendershot, J., & Pillay, P. (2025). Experimental Validation of a Spoke Type PMSM With SMC Stator Core for Traction Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
 13. Hung, J. Y., Gao, W., & Hung, J. C. (1993). Variable structure control: A survey. *IEEE transactions on industrial electronics*, 40(1), 2-22.
 14. Wang, S. (2022). Nonlinear uncertainty estimator-based robust control for PMSM servo mechanisms with prescribed performance. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2535-2543.
 15. Wang, B., Wang, T., Yu, Y., Luo, C., & Xu, D. (2021). Convergence trajectory optimization of supertwisting sliding-mode current control for induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 12292-12304.
 16. Feng, L., Sun, X., Guo, D., Yao, M., & Diao, K. (2023). Advanced torque sharing function strategy with sliding mode control for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10(1), 2302-2311.
 17. Joshi, D., Deb, D., Giri, A. K., & Elsis, M. (2025). Sensorless Active Disturbance Rejection Hybrid Control with Adaptive Sliding Mode Observer for BLDC Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
 18. Zhang, L., Chen, Z., Yu, X., Yang, J., & Li, S. (2022). Sliding-mode-based robust output regulation and its application in PMSM servo systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(2), 1852-1860.
 19. Tuyen, T. T., Yang, J., Liao, L., & Thao, N. G. M. (2025). Recent Advances in Sliding Mode Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *Electronics*.
 20. Gieras, J. F., & Shen, J. X. (2022). *Modern permanent magnet electric machines: theory and control*. CRC Press.
 21. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
 22. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation* (Vol. 10). New York: Springer New York.
 23. Tan, S. C., Lai, Y. M., & Tse, C. K. (2018). *Sliding mode control of switching power converters: techniques and implementation*. CRC press.
 24. Shevitz, D., & Paden, B. (2002). Lyapunov stability theory of nonsmooth systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 39(9), 1910-1914.
 25. Feng, L., Deng, M., Xu, S., & Huang, D. (2020). Speed regulation for PMSM drives based on a novel sliding mode controller. *IEEE Access*, 8, 63577-63584.

26. Nguyen, T. H., Nguyen, T. T., Nguyen, V. Q., Le, K. M., Tran, H. N., & Jeon, J. W. (2021). 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.
27. Hu, M., Ahn, H., Park, J., & You, K. (2024). A modified exponential reaching law for sliding mode control and its applications. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 34(14), 9783-9796.
28. Dang, C., Dou, M., Yan, S., Dang, M., Hua, Z., & Zhao, D. (2025). A Sliding Mode Prediction Error Compensation of Incremental Model Based Deadbeat Predictive Current Control for SPMSM Drives With a Sliding Mode Speed Controller. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
29. Xu, B., Wang, X., Ji, W., Ding, S., & Liu, T. (2025). A Composite Sliding Mode Control with the Modified Variable Exponential Reaching Law and Super-Twisting Extended State Observer for PMSM. *IEEE Sensors Journal*.
30. Tang, B., Lu, W., Yan, B., Lu, K., Feng, J., & Guo, L. (2021). A novel position speed integrated sliding mode variable structure controller for position control of PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 12621-12631.
31. Xu, W., Junejo, A. K., Tang, Y., Shahab, M., Habib, H. U. R., Liu, Y., & Huang, S. (2021). Composite speed control of PMSM drive system based on finite time sliding mode observer. *IEEE Access*, 9, 151803-151813.
32. Li, K., Ding, J., Sun, X., Lei, G., Dianov, A., Demidova, G., & Prakht, V. (2025). Compensation Control of PMSMs Based on a High-order Sliding Mode Observer with Inertia Identification. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
33. Mamashli, M., & Jamil, M. (2024, November). Model Predictive Current Control Combined Sliding Mode Control for Flux Switch Permanent Magnet Machine Drive System. In *IECON 2024-50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1-6). IEEE.
34. Su, Y., Gao, L., Lu, Y., Li, B., Huang, W., & Rao, X. (2024, October). ADRC Based Sliding Mode Control for PMSM Within High-Voltage Circuit Breaker. In *International Conference of Electrical, Electronic and Networked Energy Systems* (pp. 554-561). Singapore: Springer Nature Singapore.
35. Sun, C., & Zhu, H. (2023). Active disturbance rejection control of bearingless permanent magnet slice motor based on RPROP neural network optimized by improved differential evolution algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(3), 3064-3074.
36. Li, S., Li, H., Wang, H., Yang, C., Gui, J., & Fu, R. (2023, May). Sliding mode active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on improved genetic algorithm. In *Actuators* (Vol. 12, No. 5, p. 209). MDPI.
37. Shi, S., Wang, Y., & Mai, S. (2025). Research on speed control of PMSM based on a new sliding mode reaching law of fast integral terminal sliding mode control with iterative-based high-gain disturbance observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

Thông tin của tác giả:**ThS. Phạm Đức Cường**

Phòng Tổ chức - Hành chính, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84). 934 202 421- Email: phamduccuong.qui@gmail.com

ThS. Đoàn Thị Bích Thủy

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).1688 885 656- Email: doanthuy1085@gmail.com

ThS. Đoàn Thị Như Quỳnh

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84). 983.998.883 - Email: doanthinhquynh@qui.edu.vn

ThS. Nguyễn Thị Mến

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84). 385.702.968 - Email: nguyenthimen@qui.edu.vn

ANALYSIS OF REACHING LAWS IN SMC-BASED PMSM CONTROL: STRATEGIES FOR CHATTERING SUPPRESSION AND CONTEMPORARY TRENDS

Information about authors:**Pham Duc Cuong**, M.S., Organization and Administration Office, Quang Ninh University of Industry, email: phamduccuong.qui@gmail.com.**Doan Thi Bich Thuy**, M.S., Faculty of Electrical Engineering, Quang Ninh University of Industry.**Doan Thi Nhu Quynh**, M.S., Faculty of Electrical Engineering, Quang Ninh University of Industry.**Nguyen Thi Men**, M.S., Faculty of Electrical Engineering, Quang Ninh University of Industry.**ABSTRAC:**

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) have seen widespread adoption across industrial and commercial applications, with growing demands for maintaining high efficiency and reliability under complex operating conditions. The nonlinear dynamics of PMSMs, combined with the influence of external disturbances, pose significant challenges to achieving high-precision control. Sliding Mode Control (SMC) has gained considerable attention due to its strong robustness against system parameter variations and load disturbances in PMSM drive systems. This paper reviews the state-of-the-art research on SMC for PMSMs, emphasizing the design of sliding laws aimed at alleviating the chattering effect while ensuring Lyapunov stability. In addition, the paper outlines the future development trends in SMC design and application for PMSMs.

Keywords: *Permanent magnet synchronous motor (PMSM), sliding mode control (SMC), sliding law, lyapunov stability theory.*

REFERENCES

1. Xu, H., Song, Z., Xiao, X., Mo, Y., Zhou, W., & Wu, P. (2024). A Precise Modeling Method for PMSM Servo System of Spacecraft. *Applied Sciences*, 14(3), 1161.
2. Özçiflikçi, O. E., Koç, M., Bahçeci, S., & Emiroğlu, S. (2024). Overview of PMSM control strategies in electric vehicles: a review. *International Journal of Dynamics and Control*, 12(6), 2093-2107.
3. Serpi, A., Porru, M., Turno, A., Tinazzi, F., Pastura, M., & Zigliotto, M. (2024, October). Asymmetric Supply of a Dual Three-Phase PMSM through a Hybrid Energy Storage System in Marine Electric Propulsion Systems. In *2024 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-6). IEEE.
4. Nair, S. V., Harikrishnan, P., & Hatua, K. (2021). Six-step operation of a symmetric dual three-phase PMSM with minimal circulating currents for extended speed range in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 7651-7662.
5. Hu, Y., Li, Y., Ma, X., Li, X., & Huang, S. (2020). Flux-weakening control of dual three-phase PMSM based on vector space decomposition control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(7), 8428-8438.
6. Tuyen, T. T., Yang, J., Liao, L., & Zhou, J. (2025). 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).
7. Lemma, B. D., & Pradabane, S. (2023). Control of PMSM drive using lookup table based compensated

- duty ratio optimized direct torque control (DTC). *IEEE Access*, 11, 19863-19875.
8. Nasr, A., Gu, C., Wang, X., Buticchi, G., Bozhko, S., & Gerada, C. (2021). Torque-performance improvement for direct torque-controlled PMSM drives based on duty-ratio regulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1), 749-760.
 9. Liu, L., Liu, C., Che, C., Wu, Y., & Zhao, Q. (2025). Research on the coordinated control of mining multi-PMSM systems based on an improved active disturbance rejection controller. *Electronics*, 14(3), 477.
 10. Lu, Y., Tong, Z., Feng, G., & Ding, B. (2025). Performance Evaluation and Comparison for Fault Tolerant Control of Dual Three-phase PMSM Under Open-phase Fault. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
 11. Wang, S., Jiang, F., Guo, Y., & Cheng, S. (2025). Multi-Objective Model Predictive Control With Weighting Factor Elimination for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
 12. Muthusamy, M., Bobby, M., Aljehaini, A. M., Hendershot, J., & Pillay, P. (2025). Experimental Validation of a Spoke Type PMSM With SMC Stator Core for Traction Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
 13. Hung, J. Y., Gao, W., & Hung, J. C. (1993). Variable structure control: A survey. *IEEE transactions on industrial electronics*, 40(1), 2-22.
 14. Wang, S. (2022). Nonlinear uncertainty estimator-based robust control for PMSM servo mechanisms with prescribed performance. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2535-2543.
 15. Wang, B., Wang, T., Yu, Y., Luo, C., & Xu, D. (2021). Convergence trajectory optimization of supertwisting sliding-mode current control for induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 12292-12304.
 16. Feng, L., Sun, X., Guo, D., Yao, M., & Diao, K. (2023). Advanced torque sharing function strategy with sliding mode control for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10(1), 2302-2311.
 17. Joshi, D., Deb, D., Giri, A. K., & Elsis, M. (2025). Sensorless Active Disturbance Rejection Hybrid Control with Adaptive Sliding Mode Observer for BLDC Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
 18. Zhang, L., Chen, Z., Yu, X., Yang, J., & Li, S. (2022). Sliding-mode-based robust output regulation and its application in PMSM servo systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(2), 1852-1860.
 19. Tuyen, T. T., Yang, J., Liao, L., & Thao, N. G. M. (2025). Recent Advances in Sliding Mode Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *Electronics*.
 20. Gieras, J. F., & Shen, J. X. (2022). *Modern permanent magnet electric machines: theory and control*. CRC Press.
 21. Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
 22. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation* (Vol. 10). New York: Springer New York.
 23. Tan, S. C., Lai, Y. M., & Tse, C. K. (2018). *Sliding mode control of switching power converters: techniques and implementation*. CRC press.
 24. Shevitz, D., & Paden, B. (2002). Lyapunov stability theory of nonsmooth systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 39(9), 1910-1914.
 25. Feng, L., Deng, M., Xu, S., & Huang, D. (2020). Speed regulation for PMSM drives based on a novel sliding mode controller. *IEEE Access*, 8, 63577-63584.
 26. Nguyen, T. H., Nguyen, T. T., Nguyen, V. Q., Le, K. M., Tran, H. N., & Jeon, J. W. (2021). 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.
27. Hu, M., Ahn, H., Park, J., & You, K. (2024). A modified exponential reaching law for sliding mode control and its applications. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 34(14), 9783-9796.
28. Dang, C., Dou, M., Yan, S., Dang, M., Hua, Z., & Zhao, D. (2025). A Sliding Mode Prediction Error Compensation of Incremental Model Based Deadbeat Predictive Current Control for SPMSM Drives With a Sliding Mode Speed Controller. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
29. Xu, B., Wang, X., Ji, W., Ding, S., & Liu, T. (2025). A Composite Sliding Mode Control with the Modified Variable Exponential Reaching Law and Super-Twisting Extended State Observer for PMSM. *IEEE Sensors Journal*.
30. Tang, B., Lu, W., Yan, B., Lu, K., Feng, J., & Guo, L. (2021). A novel position speed integrated sliding mode variable structure controller for position control of PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 12621-12631.
31. Xu, W., Junejo, A. K., Tang, Y., Shahab, M., Habib, H. U. R., Liu, Y., & Huang, S. (2021). Composite speed control of PMSM drive system based on finite time sliding mode observer. *IEEE Access*, 9, 151803-151813.
32. Li, K., Ding, J., Sun, X., Lei, G., Dianov, A., Demidova, G., & Prakht, V. (2025). Compensation Control of PMSMs Based on a High-order Sliding Mode Observer with Inertia Identification. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
33. Mamashli, M., & Jamil, M. (2024, November). Model Predictive Current Control Combined Sliding Mode Control for Flux Switch Permanent Magnet Machine Drive System. In *IECON 2024-50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1-6). IEEE.
34. Su, Y., Gao, L., Lu, Y., Li, B., Huang, W., & Rao, X. (2024, October). ADRC Based Sliding Mode Control for PMSM Within High-Voltage Circuit Breaker. In *International Conference of Electrical, Electronic and Networked Energy Systems* (pp. 554-561). Singapore: Springer Nature Singapore.
35. Sun, C., & Zhu, H. (2023). Active disturbance rejection control of bearingless permanent magnet slice motor based on RPROP neural network optimized by improved differential evolution algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(3), 3064-3074.
36. Li, S., Li, H., Wang, H., Yang, C., Gui, J., & Fu, R. (2023, May). Sliding mode active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on improved genetic algorithm. In *Actuators* (Vol. 12, No. 5, p. 209). MDPI.
37. Shi, S., Wang, Y., & Mai, S. (2025). Research on speed control of PMSM based on a new sliding mode reaching law of fast integral terminal sliding mode control with iterative-based high-gain disturbance observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

Ngày nhận bài: 13/08/2025;

Ngày nhận bài sửa: 03/09/2025;

Ngày chấp nhận đăng: 12/09/2025.