

ĐIỀU KHIỂN BẮM ĐIỂM CÔNG SUẤT CỰC ĐẠI CHO HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SIÊU XOẮN

SUPER-TWISTING SLIDING MODE CONTROL FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF A WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

Trương Nam Hưng^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.039>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt siêu xoắn để điều khiển bám điểm công suất cực đại trong hệ thống chuyển đổi năng lượng gió. Bộ điều khiển đề xuất đã làm tăng tính bền vững cho hệ thống chuyển đổi năng lượng gió trong điều kiện tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên. Các kết quả so sánh cho thấy phương pháp đề xuất đạt khả năng bám điểm công suất cực đại vượt trội so với bộ điều khiển trượt truyền thống, đặc biệt là giảm đáng kể hiện tượng chattering. Cụ thể, chỉ số sai số căn phương trung bình của tốc độ rotor khi sử dụng bộ điều khiển trượt siêu xoắn đạt 0,4063rad/s, thấp hơn đáng kể so với 0,6115rad/s của bộ điều khiển SMC-Q, tương ứng mức cải thiện 33,6%, cho thấy khả năng bám quỹ đạo chính xác và ổn định hơn. Những kết quả này khẳng định hiệu quả và tiềm năng ứng dụng của bộ điều khiển đề xuất trong các hệ thống phát điện gió thực tế.

Từ khóa: Điều khiển trượt siêu xoắn, điều khiển bám công suất cực đại, hệ thống chuyển đổi năng lượng gió.

ABSTRACT

This paper presents a design method for a super-twisting sliding mode controller to achieve maximum power point tracking in wind energy conversion systems. The proposed controller enhances the robustness of the wind energy conversion system under random wind speed variations. Comparative results demonstrate that the proposed approach achieves superior maximum power point tracking performance compared to conventional sliding mode controllers, particularly by significantly reducing the chattering phenomenon. Specifically, the root mean square error of the rotor speed using the super-twisting sliding mode controller is 0.4063rad/s, which is considerably lower than 0.6115rad/s obtained with the SMC-Q controller, corresponding to an improvement of 33.6%, indicating more accurate and stable trajectory tracking. These results confirm the effectiveness and practical application potential of the proposed controller in real wind power generation systems.

Keywords: Super-twisting sliding mode control, maximum power point tracking, wind energy conversion system.

¹Trường Đại học Điện lực

*Email: hungtn@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/01/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/2/2026

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

CHỮ VIẾT TẮT

WECS Hệ thống chuyển đổi năng lượng gió
PMSG Máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu
MPPT Bám điểm công suất cực đại
SMC Bộ điều khiển trượt truyền thống

SMC-Q Bộ điều khiển trượt sử dụng hàm trượt quasi
STSMC Bộ điều khiển trượt siêu xoắn
MSC Bộ biến đổi phía máy phát
GSC Bộ biến đổi phía lưới
RMSE sai số căn phương trung bình

1. GIỚI THIỆU

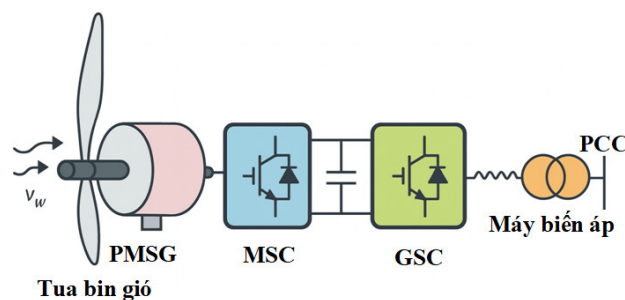
Nhu cầu năng lượng ngày càng gia tăng đã thúc đẩy việc khai thác quá mức các nguồn năng lượng truyền thống, dẫn đến suy giảm tài nguyên thiên nhiên và gây ra những tác động tiêu cực đối với môi trường [1, 2]. Trong bối cảnh đó, năng lượng tái tạo, đặc biệt là năng lượng gió được xem là một giải pháp đầy triển vọng nhằm đáp ứng nhu cầu năng lượng theo hướng bền vững. Trong các cấu trúc hệ thống phát điện gió, kiến trúc sử dụng tuabin kết hợp PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ hiệu suất cao, kết cấu gọn nhẹ, độ tin cậy lớn và chi phí bảo trì thấp [3]. Tuy nhiên, do chịu tác động nhiều từ môi trường như sự biến thiên liên tục của vận tốc gió, các bất định mô hình của hệ thống dẫn đến hiệu suất khai thác năng lượng gió vẫn chưa đạt mức tối ưu. Vì vậy, nghiên cứu và thiết kế các chiến lược điều khiển hiệu quả nhằm bảo đảm khả năng bám điểm công suất cực đại MPPT (Maximum Power Point Tracking) cho hệ thống phát điện gió đã và đang trở thành một hướng nghiên cứu có nhiều tiềm năng [4].

Trong những năm gần đây, nhiều phương pháp điều khiển đã được đề xuất cho hệ thống phát điện gió sử dụng tuabin, tiêu biểu như bộ điều khiển H_∞ kết hợp với luật mờ Takagi-Sugeno được trình bày trong nghiên cứu [5] đã được đề xuất nhằm hạn chế hiện tượng vọt lố của hệ thống. Nhưng phương pháp này thường dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa mô hình nhằm giảm độ phức tạp tính toán và nâng cao hiệu quả xử lý thời gian thực. Tuy nhiên, hệ thống chuyển đổi năng lượng gió có đặc tính phi tuyến mạnh và tồn tại sự liên kết động lực học chặt chẽ giữa các biến trạng thái. Do đó, mô hình tuyến tính hóa chỉ có độ chính xác trong lân cận điểm làm việc, khiến chất lượng điều khiển suy giảm khi hệ thống vận hành trong dải điều kiện rộng hoặc chịu biến thiên lớn của vận tốc gió. Bên cạnh đó, nghiên cứu [6] đề xuất bộ điều khiển thích nghi dựa vào mô hình mạng nơ ron quasi-ARX nhằm nhận dạng các bất định của hệ thống qua đó nâng cao hiệu quả và độ chính xác của bộ điều khiển. Tuy nhiên, phương pháp này thường đòi hỏi khối lượng tính toán lớn, làm giảm tốc độ đáp ứng của tín hiệu điều khiển và yêu cầu phần cứng có năng lực xử lý cũng như bộ nhớ cao, từ đó làm gia tăng chi phí triển khai thực tế. Trong bối cảnh đó, điều khiển SMC (Sliding Mode Control) được xem là một giải pháp hiệu quả nhờ cấu trúc tương đối đơn giản, khả năng chống nhiễu tốt và tính bền vững cao trước các bất định của hệ thống. Mặc dù vậy, nhược điểm đáng kể của SMC là hiện tượng dao động tần số cao

(chattering), có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến các phần tử cơ điện và làm suy giảm tuổi thọ thiết bị. Để khắc phục hạn chế này, nhiều biến thể của bộ điều khiển trượt đã được đề xuất, tiêu biểu như bộ điều khiển trượt sử dụng mặt trượt quasi SMC-Q [7] và bộ điều khiển trượt đầu cuối (nonsingular terminal sliding mode control). Mặc dù cải thiện phần nào hiện tượng chattering và nâng cao tốc độ hội tụ, tín hiệu điều khiển của hai phương pháp này vẫn dựa trên cấu trúc trượt bậc nhất, do đó chưa loại bỏ triệt để hiện tượng chattering, đặc biệt trong điều kiện hệ thống chịu tác động của nhiễu ngoài và bất định phi tuyến mạnh. Để khắc phục những hạn chế trên, bài báo đề xuất bộ điều khiển STSMC (Super-Twisting Sliding Mode Control) để giảm thiểu hiện tượng chattering và nâng cao độ chính xác bám, cũng như cải thiện hiệu suất bám điểm công suất cực đại của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió.

Phần còn lại của bài báo được bố cục như sau: Phần 2 trình bày mô hình của hệ thống phát điện tua bin gió; Phần 3 trình bày về bộ điều khiển trượt siêu xoắn và chứng minh tính ổn định của hệ thống dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Trên cơ sở đó, phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng trong môi trường MATLAB/Simulink nhằm đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Cuối cùng, phần 5 đưa ra các kết luận chính và đề xuất định hướng nghiên cứu trong tương lai.

2. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ



Hình 1. Cấu trúc của WECS

Sơ đồ nguyên lý của hệ thống WECS (Wind Energy Conversion System) được trình bày trong hình 1. Tại đây, tua bin gió chuyển đổi động năng gió thành mô men cơ học tác dụng lên rotor của máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Công suất điện tạo ra từ PMSG được điều tiết thông qua MSC (Machine Side Converter), sau đó được truyền đến bộ biến đổi phía lưới GSC (Grid-Side Converter) nhằm duy trì điện áp DC ổn định đồng thời điều khiển công suất phản kháng trước khi truyền vào lưới điện. Nghiên cứu này thiết kế bộ điều khiển cho MSC

nhằm duy trì hiệu suất hoạt động của tua bin luôn ở mức cao nhất.

2.1. Mô hình hoá tua bin gió

Tua bin gió hoạt động dựa trên nguyên lý chuyển đổi động năng của gió thành cơ năng để quay rotor. Công suất khí động học của tua bin thu được từ vận tốc gió được biểu diễn như sau [9]:

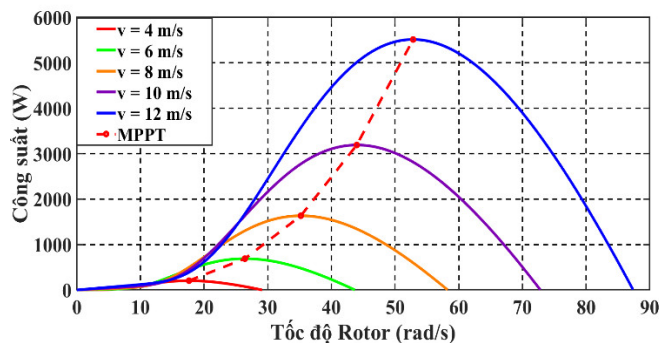
$$P_{mech} = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V_w^3 \tag{1}$$

Trong đó: $C_p(\beta, \lambda)$ là hệ số công suất, ρ là mật độ không khí, V_w là vận tốc gió, R là bán kính của cánh tua bin. Theo [9], hệ số công suất $C_p(\beta, \lambda)$ là hàm phi tuyến của β , λ và được xác định như sau:

$$C_p(\beta, \lambda) = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda_t} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_t}} + 0,0068\lambda \tag{2}$$

Với $\lambda = \frac{R\omega_t}{V_w}$ với ω_t là vận tốc của rotor;

$$\lambda_t = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$



Hình 2. Đường cong công suất ứng với các vận tốc gió khác nhau

Hình 2 mô tả mối quan hệ giữa công suất khí động của tua bin và tốc độ rotor của tua bin ở các vận tốc gió khác nhau. Công suất khí động đạt được giá trị cực đại khi tốc độ rotor tiến đến giá trị tối ưu. Giá trị tốc độ tối ưu này được sử dụng làm điểm tham chiếu cho luật điều khiển nhằm bảo đảm tua bin vận hành tại công suất cực đại và được xác định theo biểu thức sau:

$$\omega_{opt} = \frac{V_w}{R} \lambda_{opt} \tag{3}$$

Trong đó, λ_{opt} là hệ số phụ thuộc vào tua bin do nhà sản xuất đặt.

2.2. Mô hình máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu

Nhằm phục vụ cho việc phân tích và thiết kế bộ điều khiển trong hệ thống phát điện tuabin gió, mô hình toán

học của máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu trong hệ tọa độ $d-q$ bao gồm các phương trình điện áp và phương trình mô-men điện từ. Trong đó, các phương trình điện áp của PMSG được cho bởi [10]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_s} i_d + p_n \omega_r i_q + \frac{V_d}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_s} i_q - p_n \omega_r i_d - \frac{\Psi_m p_n}{L_s} \omega_r + \frac{V_q}{L_s} \end{cases} \tag{4}$$

Với i_d và i_q là dòng điện của trục d và trục q , L_s và R_s lần lượt là điện cảm stator và điện trở stator, p_n là số cặp cực.

Biểu thức mô-men được mô tả bởi [10]:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p_n \Psi_m i_q \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - B\omega_r - T_e) \end{cases} \tag{5}$$

Trong đó, $\omega_r = \omega_t$ là tốc độ rotor của PMSG, T_m là mô-men xoắn cơ học của tua-bin gió. T_e là mô-men xoắn điện từ của PMSG, Ψ_m là từ thông, J là mô-men quán tính tương đương của rotor, B là hệ số nhớt.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SIÊU XOẼN CHO WECS

Mục tiêu của bộ điều khiển trượt siêu xoắn là thiết kế các tín hiệu điều khiển $[u] = [v_d \ v_q]^T$ phù hợp nhằm đảm bảo hệ thống chuyển đổi năng lượng gió vận hành tại điểm công suất cực đại. Điều này được thực hiện thông qua việc điều chỉnh các biến trạng thái $[q] = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T$ của hệ thống sao cho chúng bám theo các giá trị tham chiếu tối ưu tương ứng với chiến lược MPPT. Đồng thời, bộ điều khiển được thiết kế để đảm bảo rằng véc tơ sai số giữa đáp ứng thực tế của hệ thống và tín hiệu tham chiếu MPPT hội tụ tiệm cận về điểm cân bằng, qua đó đảm bảo tính ổn định và chất lượng bám của hệ thống. Trên cơ sở đó, mặt trượt được xây dựng cho các tín hiệu điều khiển như sau:

$$\begin{cases} S_1 = i_d - i_{d^*} \\ S_2 = i_q - i_{q^*} \\ S_3 = \omega_r - \omega_r^* \end{cases} \tag{6}$$

Trong đó: $\omega_r^* = \omega_{opt}$, $i_{d^*} = 0$ để giảm thiểu tổn thất đồng của cuộn dây cũng như khử từ cho nam châm vĩnh cửu.

Xét trong trục d ta có đạo hàm mặt trượt có dạng:

$$\dot{S}_1 = \dot{i}_d - \dot{i}_{d^*} = \frac{-R_s}{L_s} i_d + p_n \omega_r i_q + \frac{V_d}{L_s} - \dot{i}_{d^*} \tag{7}$$

Với v_d sẽ là tổng hợp của hai thành phần bao gồm thành phần điều khiển tương đương u_{deq} và tín hiệu điều khiển chuyển mạch u_{dsw} . Mục tiêu của cấu trúc điều khiển này là đảm bảo sai số $e_d = i_d - i_d^* \rightarrow 0$. Trong đó, thành phần điều khiển tương đương u_{deq} duy trì quỹ đạo hệ thống trên mặt trượt tức là $\dot{S}_1 = 0$ trong khi thành phần điều khiển chuyển mạch u_{dsw} có nhiệm vụ cưỡng bức trạng thái hệ thống trên mặt trượt trong thời gian hữu hạn khi trạng thái có xu hướng rời khỏi mặt trượt, tín hiệu điều khiển u_{deq} và u_{dsw} được xác định như sau:

$$\begin{cases} u_{deq} = \frac{R_s}{L_s} i_d - p_n \omega_r i_q + \dot{i}_d^* \\ u_{dsw} = -k_{d1} |S_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_1) - k_{d2} \int \text{sign}(S_1) dt \end{cases} \quad (8)$$

Tín hiệu điều khiển trượt v_d được xác định như sau:

$$\begin{aligned} v_d = & R_s i_d - L_s p_n \omega_r i_q + L_s \dot{i}_d^* \\ & - L_s (k_{d1} |S_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_1) + k_{d2} \int \text{sign}(S_1) dt) \end{aligned} \quad (9)$$

Để chứng minh tính ổn định của hệ kín dưới tác động của bộ điều khiển trượt siêu xoắn, ta chọn hàm ứng viên Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} x_2^2 + c |x_1| x_2 + \frac{d}{2} x_1^2 \quad (10)$$

Trong đó: $x_1 = k_{d1} |S_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_1), x_2 = k_{d2} \int \text{sign}(S_1) dt$;
 $c, d > 0; d > c^2$

Đạo hàm phương trình (10) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_{d2} \dot{x}_2 \text{sign}(x_1) - \frac{ck_1}{2} x_2 - ck_2 |x_1| \\ & - \frac{dk_1}{2} x_1 + \frac{d}{2} x_2 \end{aligned} \quad (11)$$

Khi các tham số thỏa mãn điều kiện: $d < ck_{d1}, k_{d2} > \frac{d}{2}$ thì $\dot{V} \leq 0$. Điều này làm V không tăng và các biến x_1, x_2 hội tụ về gốc dẫn đến $e_d \rightarrow 0$.

Với phương pháp tương tự ta có v_q được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} v_q = & R_s i_q + L_s p_n \omega_r i_d + \Psi_m p_n \omega_r + L_s \dot{i}_q^* \\ & - L_s (k_{q1} |S_2|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_2) + k_{q2} \int \text{sign}(S_2) dt) \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó, dòng điện tham chiếu theo trục q được xác định như một biến điều khiển ảo được thiết kế từ tốc độ rotor như sau:

$$i_q^* = \frac{2}{3 p_n \Psi_m} \left(\begin{aligned} & T_m - B \omega_r - J \dot{\omega}_r^* \\ & + (k_{\omega_1} |S_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_3) \\ & + k_{\omega_2} \int \text{sign}(S_3) dt) \end{aligned} \right) \quad (13)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Các thông số danh định của tuabin gió và PMSG được cho bởi [11] như thể hiện trong bảng 1, 2.

Bảng 1. Thông số danh định của tua bin gió

Thông số	ρ (kg.m ³)	λ	R (m)
Giá trị	1,25	8,1	1,84

Bảng 2. Thông số danh định của PMSG

Thông số	R_s (Ω)	L_s (mH)	Ψ_m (Wb)	J (kg.m ²)	B (kg.m ² /s)	p_n
Giá trị	0,37	3,55	0,29	7,86	2×10^{-3}	14

Các tham số của bộ điều khiển trượt siêu xoắn được xác định bằng phương pháp thử sai và được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Hệ tham số của bộ điều khiển

Hệ số	k_{d1}	k_{d2}	k_{q1}	k_{q2}	k_{ω_1}	k_{ω_2}
Giá trị	0,3	0,4	0,5	0,6	2	2,2

Nhằm minh họa rõ hơn cấu trúc và nguyên lý hoạt động của bộ điều khiển trượt siêu xoắn, hình 3 mô tả sơ đồ khối bộ điều khiển để xuất được thiết kế trên Simulink-Matlab.

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất trong điều kiện gần với thực tế, một kịch bản mô phỏng với vận tốc gió biến thiên ngẫu nhiên được xây dựng. Trong kịch bản này, tín hiệu vận tốc gió được xây dựng bằng một hàm ngẫu nhiên cho bởi:

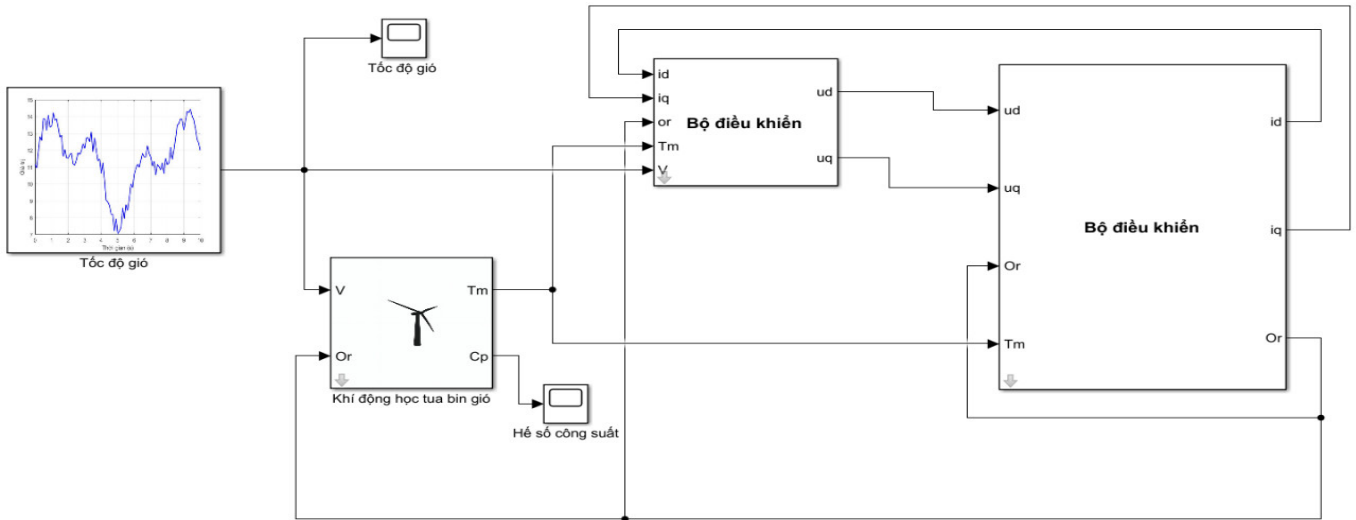
$$V_w = 11 + 2 \sin(0,9t) + 1,5 \sin(2,2t) + 0,3 \text{randn}(t) \quad (14)$$

Trong đó, $0,3 \text{randn}(t)$ là thành phần nhiễu trắng để mô tả tính ngẫu nhiên của vận tốc gió. Giá trị vận tốc gió V_w thay đổi trong khoảng từ 6m/s đến 16m/s, như được minh họa trong hình 4.

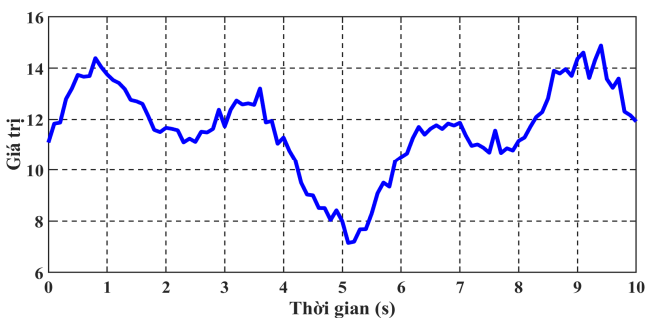
Hình 5 minh họa sự biến thiên của hệ số công suất C_p của tua bin dưới tác động của các luật điều khiển khác nhau. Khi vận tốc gió thay đổi, hệ số công suất thu được từ bộ điều khiển SMC-Q biến thiên liên tục và không duy trì quanh giá trị cực đại, cho thấy khả năng bám điểm công suất cực đại còn hạn chế. Ngược lại, bộ điều khiển trượt siêu xoắn được đề xuất vẫn duy trì hệ số công suất xấp xỉ giá trị cực đại trong suốt quá trình vận hành. Đặc

biệt, trong khoảng thời gian từ 4s đến 7s, khi vận tốc gió thay đổi đột ngột, hệ số công suất của hệ thống sử dụng bộ điều khiển SMC-Q giảm xuống dưới 0,478. Trong khi đó, với bộ điều khiển đề xuất, hệ số công suất vẫn được duy trì trên 0,4785. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển trượt siêu xoắn đề xuất có khả năng bám điểm công suất cực đại tốt hơn và bền vững hơn so với bộ điều khiển trượt truyền thống.

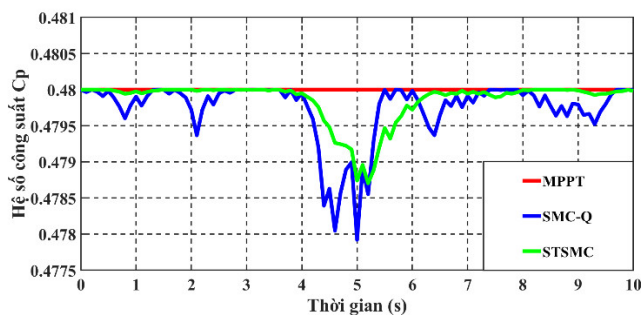
của bộ điều khiển để xuất bám sát quỹ đạo tham chiếu với độ chính xác cao và đáp ứng ổn định hơn. Kết quả này được củng cố thông qua chỉ số RMSE của tốc độ rotor như bảng 4, với giá trị 0,4063rad/s cho bộ điều khiển đề xuất, thấp hơn đáng kể so với 0,6115rad/s của SMC-Q, tương ứng với mức cải thiện 33,6%, cho thấy sai số bám trung bình đã được giảm đáng kể.



Hình 3. Sơ đồ khối bộ điều khiển trượt siêu xoắn

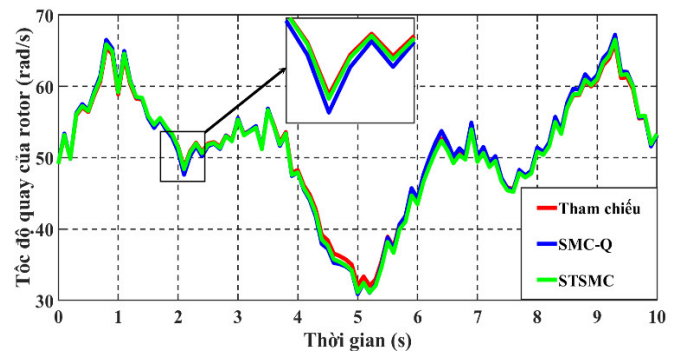


Hình 4. Vận tốc gió

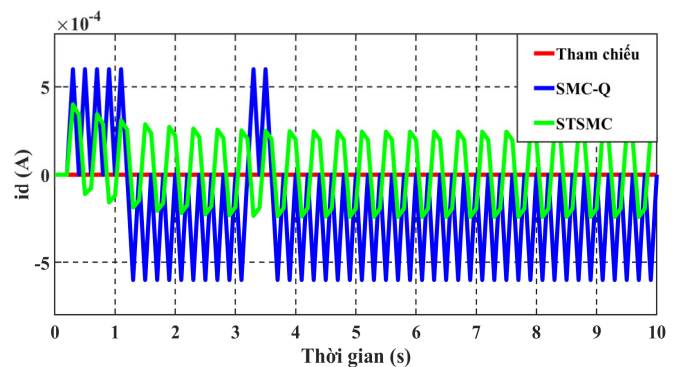


Hình 5. Kết quả so sánh hệ số công suất

Các kết quả mô phỏng từ hình 6 ÷ 8 cho thấy đáp ứng của các biến trạng thái chính của hệ thống dưới các chiến lược điều khiển khác nhau, trong đó bộ điều khiển đề xuất đạt chất lượng điều khiển vượt trội so với SMC-Q. Cụ thể, như minh họa trong hình 6, tốc độ rotor dưới tác động



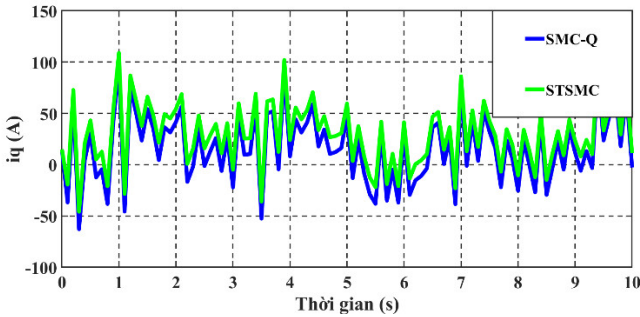
Hình 6. Kết quả so sánh tốc độ quay của rotor



Hình 7. Kết quả so sánh dòng điện theo trục d

Bên cạnh đó, như thể hiện trong hình 7 và 8, bộ điều khiển đề xuất còn cho thấy khả năng suy giảm chattering rõ rệt so với SMC-Q. Bởi vì trong khi SMC-Q sử dụng hàm tanh để làm trơn quá trình chuyển mạch nhưng vẫn còn

tồn tại chattering ở một mức nhất định, bộ điều khiển trượt siêu xoắn áp dụng luật điều khiển liên tục, qua đó hạn chế hiệu quả các thành phần chuyển mạch không liên tục và cải thiện chất lượng đáp ứng tổng thể của hệ thống.



Hình 8. Kết quả so sánh dòng điện theo trục q

Bảng 4. Kết quả so sánh RMSE (Root Mean Square Error) của tốc độ quay rotor

Chỉ số đánh giá	Bộ điều khiển đề xuất	SMC-Q [7]	Mức cải thiện RMSE (%)
RMSE của tốc độ quay rotor (rad/s)	0,4063	0,6115	33,6

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất một chiến lược điều khiển trượt siêu xoắn cho động cơ điện trong hệ thống chuyển đổi năng lượng gió. Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo khả năng bám chính xác các tín hiệu tham chiếu, đồng thời làm suy giảm đáng kể hiện tượng dao động tần số cao so với bộ điều khiển trượt truyền thống. Kết quả mô phỏng xác minh rằng hiệu suất bám được cải thiện, độ bền vững cao trước sự biến thiên tham số và dao động dòng điện được giảm rõ rệt mặc dù trong điều kiện gió biến đổi ngẫu nhiên.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng phát triển sẽ tập trung vào việc kết hợp các phương pháp điều chỉnh thích nghi hoặc tối ưu để nâng cao hơn hiệu suất và tính ổn định của hệ thống trong điều kiện tồn tại nhiễu ngoài cũng như tham số bất định của mô hình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Chetouani E., Errami Y., Obbadi A., Sahnoun S., "Design of optimal backstepping control for a wind power plant system using the adaptive weighted particle swarm optimization," *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, 14(6), 2021.

[2]. Yazici İ., Yaylaci E. K., "Maximum power point tracking for the permanent magnet synchronous generator-based WECS by using the discrete-

time integral sliding mode controller with a chattering-free reaching law," *IET Power Electronics*, 10(13), 1751-1758, 2017.

[3]. Tran D., Linh V.T.T., "Optimal control of wind energy conversion system output based on adaptive dynamic programming," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 58(4), 805, 2025.

[4]. Ali A., Khan Q., Ullah S., Waqar A., Hua L.G., Bouazzi I., Jun L.J., "High gain differentiator based neuro-adaptive arbitrary order sliding mode control design for MPE of standalone wind power system," *PLoS ONE*, 19(1), e0293878, 2024.

[5]. Qin S., Ngu S. S., Zhang C., Cai H., Chen Y., Chen R., Liu T., "H-infinity variable-pitch control for wind turbines based on Takagi-Sugeno fuzzy theory," *Tehnički vjesnik*, 30(5), 1387-1396, 2023.

[6]. Jamiin M. A., "Nonlinear adaptive control for wind energy conversion systems based on quasi-ARX neural networks model" in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014*, 2014.

[7]. Trung Nam Hung, "Sliding mode control of wind energy conversion systems using a quasi-sliding surface," *Journal of Science & Technology, Hanoi University of Industry*, 61, 5A, 2025.

[8]. Mousavi Y., Bevan G., Küçükdemiral I. B., Fekih A., "Maximum power extraction from wind turbines using a fault-tolerant fractional-order nonsingular terminal sliding mode controller," *Energies*, 14(18), 5887, 2021.

[9]. Cai E., Yan Y., Dong L., Liao X., "A control scheme with the variable speed pitch system for wind turbines during a zero-voltage ride through," *Energies*, 13 (13), 3344, 2020.

[10]. Aziz D., Jamal B., Othmane Z., Khalid M., Bossoufi B., "Implementation and validation of backstepping control for PMSG wind turbine using dSPACE controller board," *Energy Reports*, 5, 807-821, 2019.

[11]. Vu N.T.T., Nguyen H.D., Nguyen A.T., "Reinforcement learning-based adaptive optimal fuzzy MPPT control for variable speed wind turbine," *IEEE Access*, 10, 95771-95780, 2022.

AUTHOR INFORMATION

Trung Nam Hung

Electric Power University, Vietnam