

ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SỬ DỤNG HÀM TRƯỢT QUASI

SLIDING MODE CONTROL OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS USING A QUASI-SLIDING SURFACE

Trương Nam Hưng^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.112>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt sử dụng hàm trượt Quasi cho hệ thống tua bin điện gió sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Mục tiêu của bộ điều khiển trượt là điều khiển bám điểm công suất cực đại nhằm tối ưu công suất cho hệ thống điện gió. Ưu điểm của bộ điều khiển trượt là khả năng điều khiển các hệ phi tuyến dưới ảnh hưởng của nhiễu loạn. Tuy nhiên, lại có hiện tượng dao động với tần số cao quanh mặt trượt hay còn được gọi là hiện tượng chattering. Do đó, hàm trượt Quasi được thiết kế để khắc phục vấn đề này. Các kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink đã xác minh rằng bộ điều khiển được đề xuất có hiệu quả tốt hơn so với bộ điều khiển trượt truyền thống, đặc biệt là trong việc giảm thiểu hiện tượng chattering của tín hiệu điều khiển khi làm việc trong điều kiện tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên liên tục.

Từ khóa: Điều khiển trượt; tua bin gió; mặt trượt Quasi; máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu.

ABSTRACT

This paper presents the design of a sliding mode controller using a Quasi-sliding function for a wind turbine system equipped with a permanent magnet synchronous generator (PMSG). The objective of the sliding mode controller is to perform maximum power point tracking (MPPT) in order to optimize the output power of the wind energy system. One of the main advantages of sliding mode control lies in its robustness in controlling nonlinear systems under disturbances. However, it often suffers from high-frequency chattering around the sliding surface. To address this issue, a Quasi-sliding function is introduced to mitigate chattering. Simulation results in the Matlab/Simulink environment demonstrate that the proposed controller outperforms the conventional sliding mode controller, Particularly in reducing the chattering phenomenon of the control signal under continuously varying random wind speed conditions.

Keywords: Sliding mode control; wind turbine; quasi sliding surface; permanent magnet synchronous generator.

¹Trường Đại học Điện lực

*Email: hungtn@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

CHỮ VIẾT TẮT

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

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

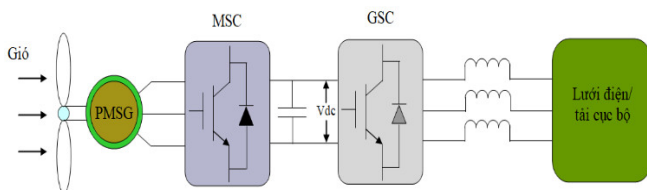
Các vấn đề về môi trường, ô nhiễm không khí và những biến đổi khí hậu nghiêm trọng đang dần được giải

quyết thông qua việc sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo, trong đó năng lượng gió đóng vai trò chủ đạo. Đặc biệt ở Châu Âu, điều này trở nên rõ rệt hơn do khó khăn trong việc nhập khẩu các nguồn năng lượng truyền thống như dầu mỏ và khí đốt tự nhiên do tình hình địa chính trị phức tạp trong khu vực [1, 2]. Thách thức chính trong việc điều khiển hệ thống chuyển đổi năng lượng gió WECS (Wind energy conversion system) là đối phó với nguồn năng lượng luôn biến động và không thể kiểm soát được. Cụ thể hơn, mục tiêu của việc điều khiển là đạt

được hiệu suất tối đa trong việc khai thác công suất có sẵn từ gió, được gọi là bám điểm công suất cực đại. Việc sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) ngày càng trở nên phổ biến trong các hệ thống tua bin điện gió nhờ vào những đặc điểm hiệu suất được cải thiện như: độ tin cậy cao, hiệu suất lớn, hệ số công suất cao [3]. Đã có nhiều phương pháp điều khiển được nghiên cứu và phát triển cho các hệ thống chuyển đổi năng lượng gió sử dụng PMSG như: điều khiển cuộn chiếu thích nghi (Adaptive Backstepping Control) [4], điều khiển PID logic mờ [5] điều khiển dựa trên cơ sở mạng nơ ron nhân tạo [6], điều khiển dự báo mô hình [7]. Các bộ điều khiển nói trên đều có thể điều khiển hệ thống WECS trong điều kiện tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên liên tục, tuy nhiên gặp phải hạn chế là khối lượng tính toán lớn và đôi khi gây trễ về mặt tín hiệu điều khiển. Vì vậy, thiết kế một bộ điều khiển có cấu trúc đơn giản mà vẫn đáp ứng được yêu cầu đặt ra về điều khiển hệ thống WECS là mục tiêu của nghiên cứu này. Bố cục phần còn lại của bài báo được trình bày như sau: Phần hai là mô hình hoá hệ thống chuyển đổi năng lượng gió bao gồm mô hình hoá tua bin gió và mô hình máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Phần thứ ba trình bày việc thiết kế bộ điều khiển trượt sử dụng hàm trượt mới Quasi. Tiếp theo, các kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink và so sánh với phương pháp điều khiển trượt truyền thống để xác minh hiệu quả của phương pháp đề xuất được trình bày trong mục bốn. Cuối cùng là kết luận và đánh giá.

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

Cấu trúc của hệ thống WECS sử dụng PMSG được minh hoạ như trong hình 1. Năng lượng điện được tạo ra bởi PMSG được truyền đến lưới điện thông qua cấu trúc nối tiếp back-to-back (BTB), bao gồm bộ biến đổi phía máy (MSC) và bộ biến đổi phía lưới (GSC). Bài báo này tập trung vào việc điều khiển (MSC) nhằm bám điểm công suất cực đại (MPPT).



Hình 1. Cấu trúc của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió

2.1. Mô hình hoá tua bin gió

Mục tiêu được đặt ra trong phần này là mô hình hoá các khía cạnh khí động học của WECS. Việc mô hình hoá vẫn giữ ở mức đơn giản, cả về mô hình gió lẫn mô hình

tua bin gió. Việc chuyển đổi năng lượng động học của gió thành năng lượng cơ học được thực hiện bởi tua bin gió.

Công suất gió được biểu diễn bởi:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (1)$$

Khi xét đến khí động học của cánh tua bin, công suất của tua bin gió chỉ là một phần của tổng công suất của luồng gió. Công suất của tua bin được cho bởi:

$$P_m = C_p(\beta, \lambda) \cdot P_w = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (2)$$

Trong đó: $C_p(\beta, \lambda)$ là hệ số công suất hay còn được gọi là giới hạn Betz phụ thuộc vào góc điều chỉnh cánh β và tỷ số tốc độ đầu cánh λ , ρ là mật độ không khí, V_w là vận tốc gió, R là bán kính của cánh tua bin.

Theo [8], hệ số công suất $C_p(\beta, \lambda)$ được xác định bởi:

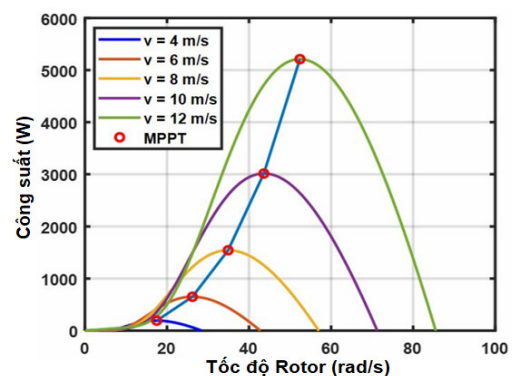
$$C_p(\beta, \lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_t} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_t}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

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

$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$ với $c_i (i=1,2,...,6)$ là các hằng số phụ thuộc vào hình dạng hình học của tua bin và được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Hệ số của tua bin gió [8]

Hệ số	Giá trị
c_1	0,5176
c_2	116
c_3	0,4
c_4	5
c_5	21
c_6	0,0068



Hình 2. Đường đặc tính công suất - tốc độ rotor ứng với các tốc độ gió khác nhau [9]

Hình 2 minh họa các đường đặc tính công suất - tốc độ quay của rô to tua bin gió ứng với các tốc độ gió khác nhau. Tại mỗi giá trị tốc độ gió, công suất cơ khai thác được tối đa hoá bằng cách điều chỉnh tốc độ quay của máy phát đến giá trị tối ưu.

Công suất cơ khai thác được tối ưu hoá bằng cách điều chỉnh tốc độ quay của máy phát về giá trị tối ưu, và được xác định bởi:

$$\omega_{opt} = \frac{V_w}{R} \lambda_{opt} \quad (4)$$

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

Các phương trình động lực học mô tả hoạt động của PMSG được trình bày trong hệ quy chiếu quay đồng bộ (d-q) như sau [10]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_s} i_d + p_n \omega_r i_q + \frac{v_d}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_s} i_q - p_n \omega_r i_d - \frac{\psi_m p_n}{L_s} \omega_r + \frac{v_q}{L_s} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - B\omega_r - T_e) \end{cases} \quad (5)$$

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, 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, ψ_m là từ thông của nam châm, J là mô men quán tính tương đương của rotor, B là hệ số nhớt.

Mô men điện từ được tính bởi:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_m i_q \quad (6)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VỚI HÀM TRƯỢT QUASI CHO WECS

Coi dòng điện stator và tốc độ rotor là các biến trạng thái, điện áp stator được xem là các biến điều khiển, khi này: $[x] = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T$ và $[u] = [v_d \ v_q]^T$.

Mặt trượt được lựa chọn như sau:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d - i_{d*} \\ i_q - i_{q*} \\ \omega_r - \omega_{r*} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Với $\omega_{r*} = \omega_{opt}$, i_{q*} và i_{d*} là các giá trị tham chiếu.

Điều kiện trượt được cho bởi:

$$\begin{cases} S_1 \dot{S}_1 < 0 \\ S_2 \dot{S}_2 < 0 \\ S_3 \dot{S}_3 < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Các bất phương trình này đảm bảo rằng trạng thái của hệ sẽ được điều khiển để tiếp cận các mặt trượt tương ứng của chúng.

Từ điều kiện trượt (8), xét mặt trượt S_1 ta có:

$$S_1 \dot{S}_1 = S_1 \left(\frac{-R_s}{L_s} i_d + p_n \omega_r i_q + \frac{v_d}{L_s} - \dot{i}_{d*} \right) < 0 \quad (9)$$

Để thu được mô men xoắn điện từ lớn nhất, cần điều khiển dòng điện stator trục d về bằng 0. Vì vậy giá trị điều khiển tham chiếu $i_{d*} = 0$. Khi đó:

$$S_1 \dot{S}_1 = S_1 \left(\frac{-R_s}{L_s} i_d + p_n \omega_r i_q + \frac{v_d}{L_s} \right) \quad (10)$$

Tín hiệu điều khiển trượt được cho bởi:

$$v_d = v_{deq} + v_{dN} \quad (11)$$

Trong đó, v_{deq} là tín hiệu điều khiển tương đương thu được từ điều kiện $\dot{S}_1 = 0$ là tín hiệu điều khiển giữ trạng thái của hệ nằm trên mặt trượt, trong khi đó v_{dN} là thành phần tín hiệu điều khiển đưa trạng thái của hệ tiến về mặt trượt.

Khi này tín hiệu điều khiển được cho bởi:

$$\begin{cases} v_{deq} = R_s i_d - L_s p_n \omega_r i_q \\ v_{dN} = -k_1 \text{sgn}(S_1) \end{cases} \quad (12)$$

Với k_1 xác định dương là hệ số của bộ điều khiển.

$$\text{và } \text{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$$

Bằng phương pháp triển khai tương tự, tín hiệu điều khiển dòng điện trục q được xác định bởi:

$$v_q = R_s i_q + L_s p_n \omega_r i_d + \psi_m p_n \omega_r + L_s \dot{i}_{q*} - k_2 \text{sign}(S_2) \quad (13)$$

Với hệ số k_2 xác định dương.

Điều khiển tốc độ quay rotor:

$$i_{q*} = \frac{2}{3p_n \psi_m} (T_m - B\omega_r - J\dot{\omega}_{r*}) - k_3 \text{sign}(S_3) \quad (14)$$

Với hệ số k_3 xác định dương.

Do hàm signum xuất hiện trong tín hiệu điều khiển (12), (13) và (14) là không liên tục, do đó có thể gây ra hiện tượng chattering. Một giải pháp để làm cho tín hiệu điều khiển trở nên liên tục là thay thế hàm signum bởi hàm tanh, với hàm tanh được định nghĩa bởi:

$$\tanh\left(\frac{s}{\epsilon}\right) = \frac{e^{\frac{s}{\epsilon}} - e^{-\frac{s}{\epsilon}}}{e^{\frac{s}{\epsilon}} + e^{-\frac{s}{\epsilon}}} \quad (15)$$

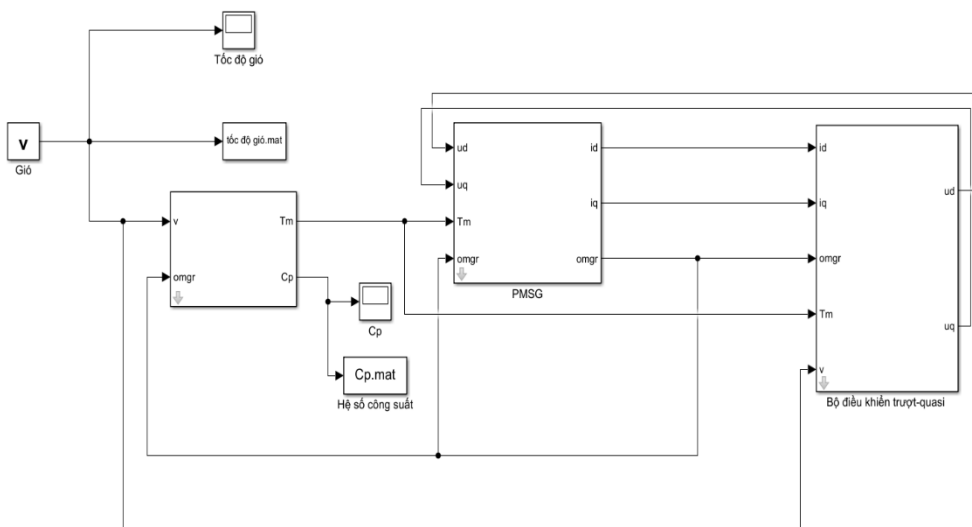
Trong đó, ε là độ dốc của hàm tanh.

Khi này luật điều khiển trượt sử dụng hàm trượt Quasi được cho bởi:

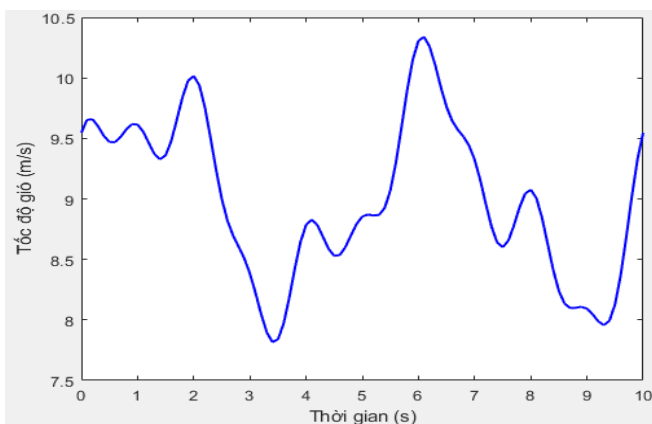
$$\begin{cases} v_d = R_s i_d - L_s p_n \omega_r i_q - k_1 \tanh(S_1 / \varepsilon) \\ v_q = R_s i_q + L_s p_n \omega_r i_d + \psi_m p_n \omega_r + L_s \dot{i}_q - k_2 \tanh(S_2 / \varepsilon) \\ i_{q*} = \frac{2}{3 p_n \psi_m} (T_m - B \omega_r - J \dot{\omega}_{r*}) - k_3 \tanh(S_3 / \varepsilon) \end{cases} \quad (16)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Các thông số danh định của tuabin gió và PMSG được cho bởi [10]: $R_s = 0,3676(\Omega)$; $L_s = 3,55(\text{mH})$; $\psi_m = 0,2867(\text{Wb})$; $J = 7,856(\text{kg.m}^2)$; $B = 0,002(\text{kg.m}^2 / \text{s})$; $p_n = 14$; $R = 1,84(\text{m})$; $p = 1,25(\text{kg/m}^3)$; $\lambda = 8,1$. Các hệ số của bộ điều khiển trượt được xác định bằng phương pháp thử sai, cụ thể: $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,06$ và $k_3 = 0,05$; $\varepsilon = 1,2$. Sơ đồ mô phỏng trên Matlab/Simulink được thể hiện trên hình 3.

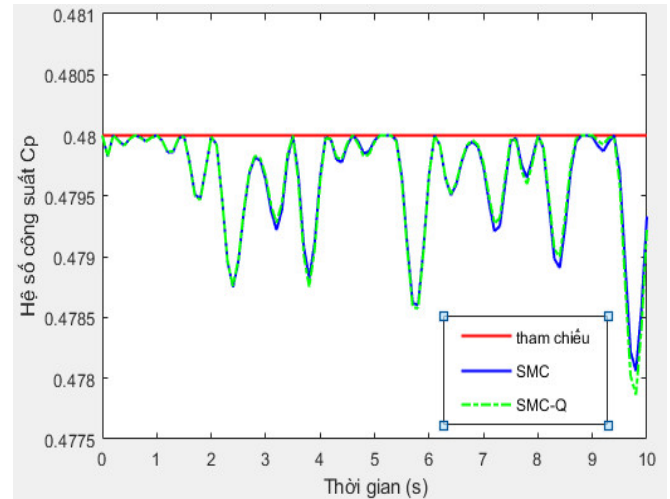


Hình 3. Sơ đồ mô phỏng trên Matlab/Simulink



Hình 4. tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên

Để xác minh được tính hiệu quả của bộ điều khiển, thực hiện khảo sát mô phỏng với tốc độ gió thay đổi một cách ngẫu nhiên liên tục. Hình 4 thể hiện tín hiệu gió được sử dụng làm tín hiệu đầu vào, tốc độ của gió thay đổi trong khoảng 7,5 (m/s) đến 10,5 (m/s).

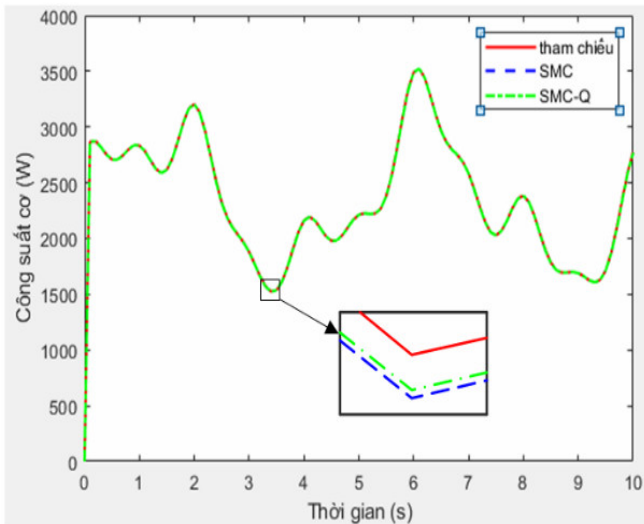


Hình 5. kết quả so sánh hệ số công suất

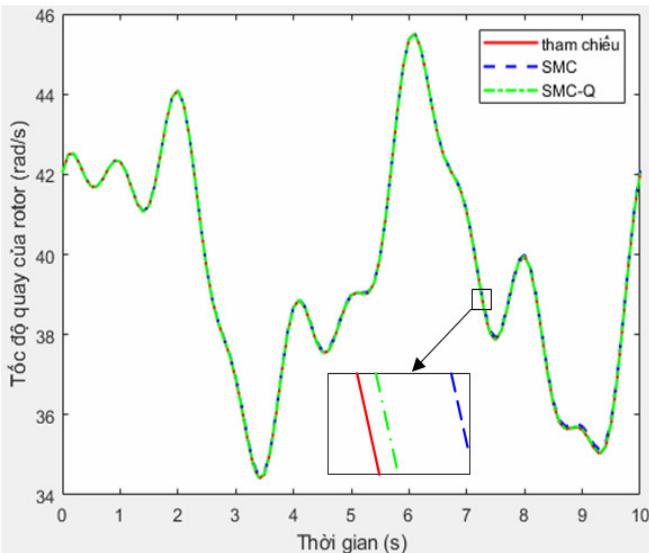
Các kết quả mô phỏng được trình bày trong hình 5, 6 và 7. Với hình 5 là hệ số công suất, hình 6 là công suất thu được và hình 7 là tốc độ của rotor. Với đường nét liền là đường tham chiếu, đường nét gạch và đường nét gạch chấm lần lượt là dữ liệu từ bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển trượt Quasi.

Các kết quả mô phỏng trên hình 5, 6 và 7 đã xác minh được tính hiệu quả của bộ điều khiển trượt và bộ

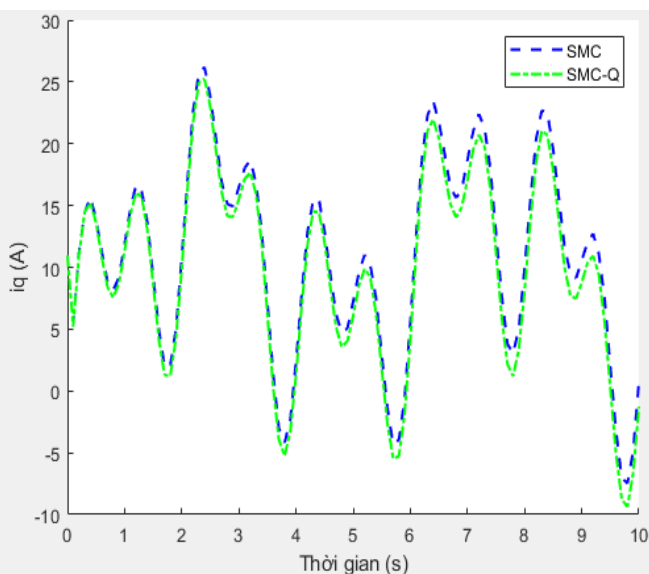
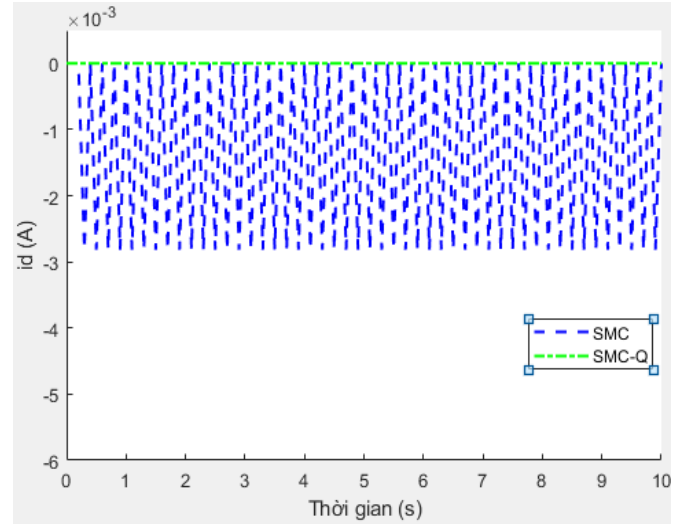
điều khiển trượt sử dụng hàm trượt Quasi trong việc điều khiển tối ưu công suất của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió. Khi tốc độ gió thay đổi một cách ngẫu nhiên, bộ điều khiển trượt vẫn duy trì tốc độ phản hồi tốt với sai lệch nhỏ và đáp ứng nhanh, không có hiện tượng quá điều chỉnh và mất ổn định. Hiện tượng chattering trong điều khiển trượt xảy ra chủ yếu ở pha trượt khi mà trạng thái của điều khiển nằm trên hoặc lân cận với mặt trượt, do tín hiệu chuyển mạch có dạng hàm dấu. Tín hiệu dòng điện i_q và i_d của stator được thể hiện trong hình 8 và 9 cho thấy bộ điều khiển trượt sử dụng hàm trượt Quasi đã giảm dao động chattering khi so sánh với bộ điều khiển trượt truyền thống.



Hình 6. Kết quả so sánh công suất cơ



Hình 7. Kết quả so sánh tốc độ của rotor

Hình 8. Cường độ dòng điện i_d Hình 9. Cường độ dòng điện i_d

5. KẾT LUẬN

Từ mô hình hệ thống chuyển đổi năng lượng gió sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu, bài báo đã tiến hành xây dựng được bộ điều khiển trượt và cải tiến bộ điều khiển trượt sử dụng hàm trượt Quasi để giảm dao động xung quanh bề mặt trượt. Kết quả mô phỏng cho thấy khi tốc độ gió thay đổi một cách ngẫu nhiên, bộ điều khiển trượt vẫn đáp ứng được yêu cầu bám điểm công suất cực đại đồng thời đảm bảo độ ổn định của hệ thống. Các kết quả này cho thấy được tính hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất trong việc áp dụng lên các hệ thống tua bin điện gió trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nejad A. R., Keller J., Guo Y., Sheng S., Polinder H., Watson S., Dong J., Qin Z., Ebrahimi A., Schelenz R., Gutiérrez Guzmán F., Cornel D., Golafshan R., Jacobs G., Blockmans B., Bosmans J., Pluymers B., Carroll J., Koukoura S., Hart E., McDonald A., Natarajan A., Torsvik J., Moghadam F. K., Daem, P. J., Verstraeten T., Peeters C., Helsen J., "Wind turbine drivetrains: state-of-the-art technologies and future development trends," *Wind Energy Science*, 7(1), 387-411, 2022.
- [2]. Guo Y., Wang H., Lian J., "Review of integrated installation technologies for offshore wind turbine: Current progress and future development trends," *Energy Conversion and Management*, 126, 115319, 2022.
- [3]. Palanimuthu K., Mayilsamy G., Lee S. R., Jung S. Y., Joo Y. H., "Comparative analysis of maximum power extraction and control methods between PMSG and PMVG-based wind turbine systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 143, 108475, 2022.
- [4]. 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 intelligent engineering & systems*, 14(6), 2021.

[5]. Oussama M., Abdelghani C., Lakhdar C., "Efficiency and robustness of type-2 fractional fuzzy PID design using salps swarm algorithm for a wind turbine control under uncertainty," *ISA transactions*, 125, 72-84, 2022.

[6]. Muñoz-Palomeque E., Sierra-García J. E., Santos M., "Wind turbine maximum power point tracking control based on unsupervised neural networks," *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(1), 108-121, 2023.

[7]. Prince M. K. K., Arif M. T., Haque M. E., Gargoom A., Oo A. M. T., "Design and implementation of finite control set MPC with an LCL filter for grid-tied PMSG based wind turbine," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 152, 109197, 2023.

[8]. 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.

[9]. 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, 2023.

[10]. 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.

AUTHOR INFORMATION

Truong Nam Hung

Electric Power University, Vietnam