

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TRÊN CƠ SỞ BỘ QUAN SÁT CHO HỆ THỐNG BIẾN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN PMSG THEO MỤC TIÊU CỰC ĐẠI CÔNG SUẤT ĐẦU RA

RESEARCH ON DESIGN OF SLIDING CONTROLLER BASED ON OBSERVER FOR WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM USING PMSG GENERATORS ACCORDING TO THE GOAL OF MAXIMIZING OUTPUT POWER

Đặng Quốc Du^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2025.276>

TÓM TẮT

Thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) dựa trên phương pháp tỉ số tốc độ đầu cánh (TSR) là bài toán cơ bản trong kỹ thuật điều khiển hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS). Do tính chất thay đổi ngẫu nhiên, tức thời của gió, nên cần phải xác định một giá trị tốc độ gió tại một thời điểm nhất định, từ đó xác định tốc độ góc tham chiếu tối ưu của rô to máy phát điện để đảm bảo thu được công suất tối đa, nên bài báo đề xuất một bộ quan sát để ước tính tốc độ gió mà không cần sử dụng cảm biến độ gió đưa vào tua-bin gió. Giá trị tốc độ gió ước tính này sẽ được làm thông tin đầu vào cho một bộ điều khiển trượt (SMC) được thiết kế cho WECS. Chất lượng của bộ điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát cho WECS sẽ được kiểm chứng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Điều khiển trượt, quan sát nhiễu loạn, hệ thống chuyển đổi năng lượng gió, máy phát điện đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu.

ABSTRACT

Maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on blade tip speed ratio (TSR) method is a fundamental problem in wind energy conversion system (WECS) control technique. Due to the random and instantaneous nature of wind, it is necessary to determine a wind speed value at a certain time, thereby determining the optimal reference angular speed of the generator rô-to to ensure maximum power generation, so this paper proposes an observer to estimate wind speed without using wind speed sensors inserted into the wind turbine. This estimated wind speed value will be used as input information for a sliding mode controller (SMC) designed for WECS. The quality of the observer-based sliding mode controller for WECS will be verified using Matlab/Simulink software.

Keywords: Sliding mode control, observer disturbance, wind energy conversion system, permanent magnet synchronous generator.

¹Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: dqdu@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 08/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 16/4/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống năng lượng gió đã thu hút được sự chú ý rất lớn trong thập kỷ qua như một trong những nguồn năng lượng tái tạo đầy hứa hẹn nhất do khả năng cạn kiệt, chi phí cao và tác động tiêu cực đến môi trường của các nguồn năng lượng thông thường. Năng lượng gió là

nguồn không gây ô nhiễm và vô tận. Do đó, hệ thống phát điện năng lượng gió có thể là một trong những nguồn năng lượng thay thế tiềm năng cho tương lai [1].

Hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) dựa trên máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) được đưa vào sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau

vì hiệu suất cao hơn, hoạt động ổn định, tin cậy và chi phí bảo dưỡng thấp [2]. Do đó, điều cần thiết là phải nghiên cứu các thành phần hệ thống tua-bin gió chứa máy phát điện và bộ điều khiển điện, đóng vai trò quan trọng trong việc tiết kiệm năng lượng. Tuy nhiên, từ góc độ lý thuyết điều khiển tự động WECS là một hệ thống có tính chất phi tuyến với số lượng nhiễu và độ không chắc chắn đáng kể. Do đó, cần có bộ điều khiển có chất lượng tốt để xử lý các vấn đề trên. Vì vậy, các WECS hiện tại đòi hỏi các phương pháp điều khiển hiệu suất cao. Nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung vào việc nghiên cứu hệ thống tua-bin gió dựa trên PMSG [3]. Như nghiên cứu [2], tác giả đã nghiên cứu vấn đề về tua-bin gió dựa trên PMSG thông qua điều khiển góc nghiêng, điều khiển tốc độ rô-to và điều khiển điện áp liên kết một chiều. Trong [4], bộ điều khiển sử dụng kỹ thuật tuyến tính hóa phản hồi đã được đề xuất cho WECS. Trong [5], Thakur và Jiang đã nghiên cứu vấn đề của hệ thống tua-bin gió được kết nối lưới với PMSG bao gồm các độ sụt điện áp không đối xứng ở phía lưới. Một bộ điều khiển thích nghi PID đã được đề xuất cho WECS trong [6]. Thuật toán Perturb and Observe (P&O) đã được đề xuất trong [7] cho MPPT trong WECS, tuy nhiên thuật toán có sự hội tụ chậm do kích thước bước nhỏ. Trong đó, lý thuyết về điều khiển trượt SMC, được giới thiệu trong [8], yêu cầu hai quy trình thiết yếu khi thiết kế bộ điều khiển SMC. Đầu tiên, xây dựng một mặt trượt như một hàm của các trạng thái hệ thống sao cho hệ thống giới hạn ở bề mặt trượt có các tính chất hấp dẫn như tính ổn định. Thứ hai, xây dựng một bộ điều khiển loại role thích hợp để tạo quỹ đạo trạng thái mô hình đến hàm mặt trượt chuyển mạch trượt và bảo toàn nó ở đó cho mọi thời gian tiếp theo. Bài báo thiết kế một bộ điều khiển trượt cho WECS dựa trên PMSG để cải thu được năng lượng tối đa trong nhiều chế độ tốc độ gió tập trung đồng thời vào nhiều tiêu chí mong muốn về hiệu suất theo dõi động, độ bền trước các yếu tố không chắc chắn và nhiễu loạn.

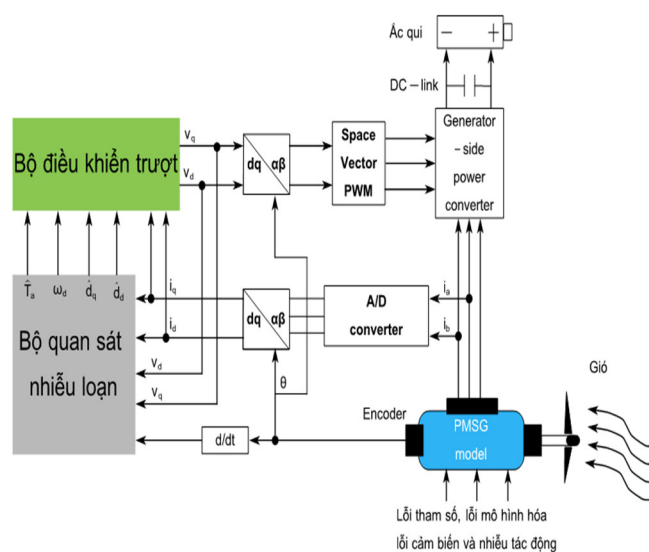
Hơn nữa, PMSG của WECS được cung cấp năng lượng bởi gió, một nguồn tài nguyên không ổn định và không thể dự đoán. Bản thân mô hình tốc độ gió rất phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố như đặc điểm khí hậu, vị trí địa lý, mực nước so với mặt đất và địa hình bề mặt [9]. Do đó, việc đo tốc độ gió thực tế bằng các thiết bị đo gió có thể không đạt được giá trị chính xác. Bài báo đề xuất một bộ quan sát nhiễu loạn để ước tính mô-men khí động học trên trục tua-bin gió, từ đó tính toán tốc độ gió để đưa vào bộ điều khiển. Chất lượng của bộ điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát được đề xuất, sẽ được mô

phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink và so sánh với bộ điều khiển trượt truyền thống và bộ điều khiển bậc hai tuyến tính.

Bài báo được chia làm các phần như sau: Phần 1 nêu vấn đề và đề xuất phương án giải quyết; Phần 2 xây dựng mô hình hóa của hệ thống nghiên cứu; Phần 3 thiết kế bộ điều khiển và chứng minh tính ổn định; Phần 4 kết quả mô phỏng chứng minh tính ưu việt của thuật toán và phần 5 thảo luận.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ

Bộ điều khiển có thể được thiết kế và mô tả bằng sơ đồ khối và thiết kế chung được chỉ ra đơn giản trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển SMC-DOB cho WECSs

2.1. Mô hình tua-bin gió

Công suất khí động học của gió thu được trên trục tua-
bin $P_t(W)$ được biểu diễn theo phương trình dưới đây [10]:

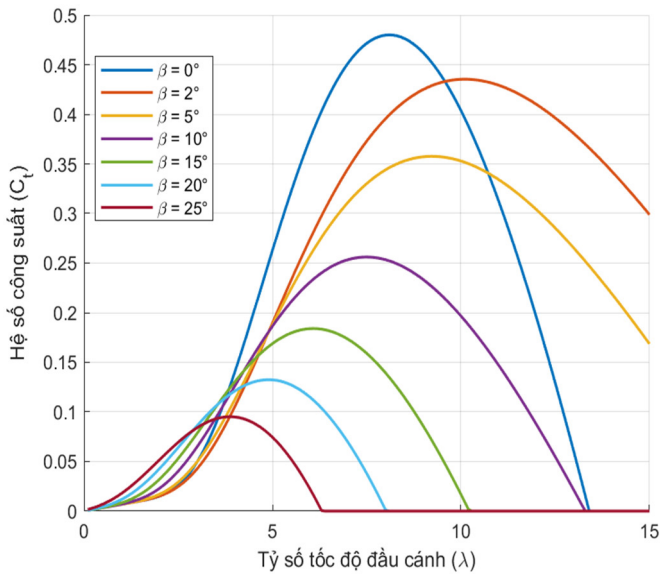
$$P_t(t) = 0,5 \nu A_t C_t(\lambda(t), \beta(t)) v_a^3(t) \quad (1)$$

Trong đó: ρ là mật độ không khí (kg/m^3); A_t là diện tích quét của cánh quạt tua-bin gió (m^2), diện tích này được xác định $A_t = \pi r_t^2$, với r_t là bán kính của tua-bin gió; v_g là tốc độ gió thực tế (m/s); $C_t(\lambda, \beta)$ là hệ số công suất của tua-bin gió, nó phụ thuộc vào tỉ số tốc độ đầu cánh λ và góc tấn tua-bin gió β , đường cong mối quan hệ giữa C_t với λ và β được thể hiện ở hình 2 [11]. Hệ số này được cung cấp bởi các nhà sản xuất tua-bin gió và là đặc trưng cho từng loại tua-bin.

Mặt khác, tỉ số tốc độ đầu cánh được biểu diễn theo phương trình sau [11]:

$$\lambda(t) = \frac{r_t \omega_t(t)}{v_a(t)} \quad (2)$$

Trong đó, ω_t là tốc độ góc của trục tua-bin gió, (rad/s).



Hình 2. Đường cong hệ số công suất $C_t(\lambda, \beta)$ của tua-bin gió [11]

Từ hình 2, ta thấy với mỗi góc cánh, chúng ta sẽ có một điểm hệ số công suất đạt cực đại $C_{t,max}$ ứng với một giá trị tỉ số tốc độ đầu cánh là tối ưu λ_{tu} , từ đó ta tính toán được tốc độ góc tham chiếu $\omega_{t,d}$ ứng với mỗi tốc độ gió thực tế theo phương trình sau:

$$\omega_{t,d} = \frac{\lambda_{tu}(t)v_g(t)}{r_t} \quad (3)$$

Tỉ số truyền τ_{tm} của hệ truyền động tua-bin và máy phát điện trong hệ chuyển đổi năng lượng gió được biểu diễn theo phương trình sau:

$$\tau_{tm} = \frac{M_t(t)}{M_{mf}(t)} = \frac{\omega_t(t)}{\omega_{mf}(t)} \quad (4)$$

Trong đó: M_t là mô-men xoắn khí động học trên trục của tua-bin gió (N.m); M_{mf} là mô-men xoắn khí động học trên trục máy phát điện (N.m); ω_{mf} là tốc độ góc của rô to máy phát điện (rad/s).

Mô-men xoắn khí động học trên trục của tua-bin gió được định nghĩa là: $M_t(t) = P_t(t) / \omega_t(t)$ có thể tính toán theo công thức thu được từ phương trình (1) và (3) là:

$$M_t(t) = \frac{1}{2} \rho \pi r_t^3 C_m(\lambda(t), \beta(t)) v_g^2(t) \quad (5)$$

Trong đó, $C_m(\lambda(t), \beta(t)) = C_t(\lambda(t), \beta(t)) / \lambda(t)$

2.2. Mô hình máy phát điện

Mô hình máy phát điện đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu được sử dụng trong hệ thống chuyển đổi năng lượng gió được biểu diễn bằng hệ phương trình động học sau [1]:

$$\begin{cases} J_m \frac{d\omega_{mf}(t)}{dt} = -b_m \omega_{mf}(t) - M_e(t) + M_{mf}(t) \\ \frac{di_q(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_q(t) - p_m \omega_{mf}(t) i_d(t) - \frac{\zeta_m p_m}{L_{ms}} \omega_{mf}(t) + \frac{1}{L_{ms}} V_{qm}(t) \\ \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_d(t) + p_m \omega_{mf}(t) i_q(t) + \frac{1}{L_{ms}} V_{dm}(t) \end{cases} \quad (6)$$

Ở đây, b_m là hệ số ma sát nhớt của máy phát ($\text{kg.m}^2/\text{s}$); J_m là mô-men quán tính của máy phát (kg.m^2); i_d và i_q lần lượt là dòng điện theo trục d và trục q của máy phát (A); R_{ms} là điện trở cuộn dây stator của máy phát điện (Ω); L_{ms} là điện cảm cuộn dây stator của máy phát điện (mH); p_m là số đôi cực từ của máy phát điện; ζ_m là từ thông liên kết của máy phát điện (V.s/rad); V_d và V_q lần lượt là điện áp theo trục d và trục q của máy phát (V).

Mặt khác, ta có mối quan hệ giữa mô-men xoắn điện từ M_e và dòng điện theo trục q, i_q của máy phát điện được biểu diễn theo biểu thức sau:

$$M_e(t) = K_{mf} i_q(t) \quad (7)$$

Trong đó: $K_{mf} = 3 / 2 \zeta_m p_m$.

Kết hợp phương trình (4), hệ phương trình (6) và phương trình (7), ta biểu diễn lại hệ phương trình động học (5) của máy phát điện như sau:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{mf}(t)}{dt} = -\frac{b_m}{J_m} \omega_{mf}(t) - \frac{1}{J_m} M_e(t) + \frac{1}{J_m \tau_{tm}} M_t(t) \\ \frac{dM_e(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} M_e(t) - p_m K_{mf} \omega_{mf}(t) i_d(t) - \frac{\zeta_m p_m K_{mf}}{L_{ms}} \omega_{mf}(t) + \Delta_q(t) + \frac{K_{mf}}{L_{ms}} V_{qm}(t) \\ \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_d(t) + \frac{p_m}{K_{mf}} \omega_{mf}(t) M_e(t) + \Delta_d(t) + \frac{1}{L_{ms}} V_{dm}(t) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó: $\Delta_q(t)$ và $\Delta_d(t)$ là các số hạng khi xét đến sự không đảm bảo và sự thay đổi các tham số trong phần điện, lỗi mô hình hóa và nhiễu trong các phép đo.

Trong bài báo này, một bộ điều khiển trượt (SMC) trên cơ sở bộ quan sát nhiễu loạn (DOB) cho hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) dựa trên máy phát điện kích từ nam châm vĩnh cửu (PMSG) được thiết kế với các giả thiết sau:

Giả thuyết 1: Tốc độ góc rô to máy phát $\omega_{mf}(t)$, dòng điện $i_d(t)$, $i_q(t)$ hay $M_e(t)$ có thể đo được.

Giả thuyết 2: Tốc độ gió $v_g(t)$, hay $M_t(t)$ không đo được và có biến đổi chậm.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC-DOB

3.1. Thiết kế bộ điều khiển SMC

Trước khi thiết kế sơ đồ điều khiển, chúng ta hãy chuyển đổi các phương trình động ở (8) sang dạng khác. Đầu tiên, ta đặt:

$$K_{mf} V_{qm}(t) = V_{qmf}(t) + V_{qmb}(t) \quad (9)$$

Khi đó phương trình số 2 của hệ số (8) biến đổi lại như sau:

$$\frac{dM_e}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} M_e + \frac{1}{L_{ms}} V_{qmf} \quad (10)$$

Trong đó, $V_{qmf}(t) = p_m K_{mf} \zeta_m \omega_{mf}(t) + p_{mf} K_{mf} \zeta_m L_{mf} \omega_{mf}(t) i_d(t)$ là điện áp bù điều khiển.

Tiếp theo, chúng ta đặt một biến mới:

$$\zeta(t) = -\frac{b_m}{J_m} \omega_{mf} - \frac{1}{J_m} M_e \quad (11)$$

Khi đó, phương trình thứ nhất của hệ phương trình (8) trở thành:

$$\frac{d\omega_{mf}(t)}{dt} = \zeta(t) + \chi(t) \quad (12)$$

$$\text{với } \chi(t) = \frac{1}{J_m \tau_m} M_t(t).$$

Từ phương trình (10) và (12), đạo hàm của $\zeta(t)$ biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta(t)}{dt} = & -\frac{b_m R_{ms}}{J_m L_{ms}} \omega_{mf} - \left(\frac{b_m}{J_m} + \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \right) \zeta(t) \\ & - \frac{b_m}{J_m} \chi(t) - \frac{1}{J_m L_{ms}} V_{qmf} \end{aligned} \quad (13)$$

Ở đây, ta đặt:

$$g_1 = -\frac{b_m R_{ms}}{J_m L_{ms}}; g_2 = -\left(\frac{b_m}{J_m} + \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \right); g_3 = -\frac{1}{J_m L_{ms}}$$

Khi đó, phương trình (13) biểu diễn dưới dạng:

$$\frac{d\zeta(t)}{dt} = g_1 \omega_{mf} + g_2 \zeta(t) - \frac{b_m}{J_m} \chi(t) + g_3 V_{qmf} \quad (14)$$

Từ hệ phương trình (8) và phương trình (14), ta biểu diễn lại hệ phương trình (8) như sau:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{mf}(t)}{dt} = \zeta(t) + \chi(t) \\ \frac{d\zeta(t)}{dt} = g_1 \omega_{mf} + g_2 \zeta(t) - \frac{b_m}{J_m} \chi(t) + g_3 V_{qmf}(t) \\ \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_d(t) + \frac{p_m}{K_{mf}} \omega_{mf}(t) M_e(t) + \frac{1}{L_{mf}} V_{dm}(t) \end{cases} \quad (15)$$

Ta định nghĩa các biến động học lỗi như sau:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{mf} = \omega_{mf} - \omega_{mf,ref} \\ \tilde{\zeta}(t) = \zeta(t) - \dot{\omega}_{mf,ref} \end{cases} \quad (16)$$

Chúng ta có hệ phương trình động học lỗi của hệ thống được biểu diễn dưới dạng như hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\omega}_{mf}}{dt} = \tilde{\zeta}(t) + \chi(t) \\ \frac{d\tilde{\zeta}(t)}{dt} = g_1 \tilde{\omega}_{mf} + g_2 \tilde{\zeta}(t) - \frac{b_m}{J_m} \chi(t) + g_3 V_{qmf} \\ \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_d(t) + \frac{p_m}{K_{mf}} \omega_{mf}(t) M_e(t) + \frac{1}{L_{mf}} V_{dm}(t) \end{cases} \quad (17)$$

Cần lưu ý rằng PMSG được xem xét trong bài báo này là loại cực từ gắn trên bề mặt. Đối với loại máy này, dòng điện trục d được đặt bằng 0 để tối ưu hóa các điều kiện vận hành. Do đó, tham chiếu dòng điện trục d cũng được chọn là 0.

3.2. Thiết kế bộ quan sát nhiễu loạn

Từ hệ phương trình (15), ta thấy hệ thống bao gồm một thành phần nhiễu $\chi(t)$. Để ước tính nhiễu loạn này, một bộ quan sát nhiễu phi tuyến (DOB) được giới thiệu trong [12] như sau:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = -L p_2(z(t) + Lx(t)) - L(f(t) + p_1 u(t)) \\ \hat{x}(t) = z + Lx(t) \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó:

$$x = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{mf} \\ \tilde{\zeta}(t) \end{bmatrix}; f(t) = \begin{bmatrix} \tilde{\zeta}(t) \\ g_1 \omega_{mf} + g_2 \zeta(t) - \frac{b_m}{J_m} \hat{x}(t) - \dot{\omega}_{mf,ref} \end{bmatrix};$$

$$u(t) = V_{qmf}; p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ g_3 \end{bmatrix}; p_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}^T.$$

Với $\hat{x}(t)$ là ước lượng nhiễu, z là biến phụ của bộ quan sát phi tuyến và $L = [l_1 \ l_2]$ là độ lợi không âm của bộ quan sát được thiết kế.

Với thông tin ước lượng $\hat{x}(t)$, theo (1), (2), (3) và (10), việc ước tính mômen cơ học M_t và tham chiếu tốc độ rô-tô máy phát có thể được tính trực tiếp bằng các mối quan hệ sau:

$$\begin{cases} \hat{M}_t = J_m \hat{x}(t) \\ \hat{\omega}_{mf,ref} = \sqrt{\frac{\hat{M}_t}{\delta_{tu}}} \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{Ở đây } \delta_{tu} = \frac{0,5\pi r_t^5 C_{t,max}}{\tau_m^2 \lambda_{tu}^3}$$

Mặt trượt dựa trên bộ quan sát nhiễu được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} \sigma_q(t) = \tilde{c}(t) + \hat{x}(t) + c\tilde{\omega}_{mf}(t) \\ \sigma_d(t) = i_d(t) \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó, $c > 0$ là hệ số chọn.

Khi đó, luật điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát phi tuyến như sau:

$$\begin{cases} V_{qmf}(t) = -\frac{1}{g_3} \left(g_1 \omega_{mf}(t) + g_2 \zeta(t) - \frac{b_m}{J_m} \hat{x}(t) - \ddot{\omega}_{mf,ref}(t) + c(\tilde{c}(t) + \hat{x}(t)) + u_{qms}(t) \right) \\ V_{dm}(t) = -L_{mf} \left(\frac{p_m}{K_{mf}} \omega_{mf}(t) M_e(t) + u_{dms}(t) \right) \end{cases} \quad (21)$$

Trong đó $u_{qms} = \kappa_q \operatorname{sgn}(\sigma_q)$, $u_{dms} = \kappa_d \operatorname{sgn}(\sigma_d)$ với κ_q và κ_d là các hệ số điều khiển được chọn, luôn dương.

Trước hết ta có các giả thiết:

Giả thiết 1: Sự nhiễu loạn $\chi(t)$ trong hệ thống thay đổi chậm.

Giả thiết 2: Sai lệch ước tính, $e_\chi = \chi(t) - \hat{\chi}(t)$, bị giới hạn bởi $e_\chi^* = \sup_{t>0} |e_\chi|$.

Xét hàm Lyapunov sau:

$$V = \frac{1}{2} (\sigma_q^2(t) + \sigma_d^2(t)) \quad (22)$$

Khi đó, từ hệ phương trình (20), đạo hàm của V :

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_q(t) = g_1 \omega_{mf}(t) + g_2 \zeta(t) - \frac{b_m}{J_m} \hat{x}(t) - \ddot{\omega}_{mf,ref} + g_3 V_{qmb} - \ddot{\omega}_{mf,ref} + \dot{\hat{x}}(t) + c(\tilde{c}(t) + \hat{x}(t)) \\ \dot{\sigma}_d(t) = -\frac{R_{ms}}{L_{ms}} i_d(t) + \frac{p_m}{K_{mf}} \omega_{mf}(t) M_e(t) + \frac{1}{L_{mf}} V_{dm}(t) \end{cases} \quad (23)$$

Thay giá trị u_{qbf} và v_d từ hệ phương trình (21) vào hệ (23), ta có:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_q(t) = -\kappa_q \operatorname{sgn}(\sigma_q(t)) + \left(c - \frac{b_m}{J_m} \right) (\chi(t) - \hat{\chi}(t)) + \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\sigma}_d(t) = -\kappa_q \operatorname{sgn}(\sigma_d(t)) - \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \sigma_d(t) \end{cases} \quad (24)$$

Từ phương trình (18), đạo hàm của nhiễu $\hat{x}(t)$ được tính như sau:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \kappa_e e_\chi \quad (25)$$

$$\text{Trong đó: } \kappa_e = L_{mf} \left(p_2 - \frac{b_m}{J_m g_3} p_1 \right)$$

Thay $\dot{\hat{x}}(t)$ từ phương trình (25) vào phương trình (24), ta có:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_q(t) = -\kappa_q \operatorname{sgn}(\sigma_q(t)) + \left(c + L_{mf} p_2 - \frac{b_m}{J_m} \right) e_\chi \\ \dot{\sigma}_d(t) = -\kappa_q \operatorname{sgn}(\sigma_d(t)) - \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \sigma_d(t) \end{cases} \quad (26)$$

Từ phương trình (22) và (26), ta có đạo hàm của hàm Lyapunov được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma_q(t) \dot{\sigma}_q(t) + \sigma_d(t) \dot{\sigma}_d(t) \\ &= -\kappa_q |\sigma_q(t)| + \left(c + \kappa_e - \frac{b_m}{J_m} \right) e_d \sigma_q(t) - \kappa_d |\sigma_d(t)| - \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \sigma_d^2(t) \\ &\leq -|\sigma_q(t)| \left[\kappa_q - \left(c + \kappa_e - \frac{b_m}{J_m} \right) e_d^* \right] - \kappa_d |\sigma_d(t)| - \frac{R_{ms}}{L_{ms}} \sigma_d^2(t) \end{aligned} \quad (27)$$

Với κ_q được chọn sao cho $\kappa_q > \left(c + \kappa_e - \frac{b_m}{J_m} \right) e_d^*(t)$, thì

$\dot{V} < 0$, hay trạng thái của hệ thống sẽ tiệm cận mặt trượt: $\sigma_q = \sigma_d = 0$.

4. KẾT QUẢ SỐ

Các tham số của mô hình hệ thống chuyển đổi năng lượng gió sử dụng máy phát điện đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu như sau: $P_{rated} = 5kW$; $p_m = 14$; $R_{ms} = 0,3676\Omega$; $L_{ms} = 3,55mH$; $\zeta_m = 0,2876V.rad/s$; $J_m = 7,856kg.m^2$; $b_m = 0,002kg.m^2/s$; $r_t = 1,84m$; $u = 1,25kg/m^3$ [13]. Nghiên cứu mô phỏng được thực hiện trên phần mềm MATLAB/Simulink.

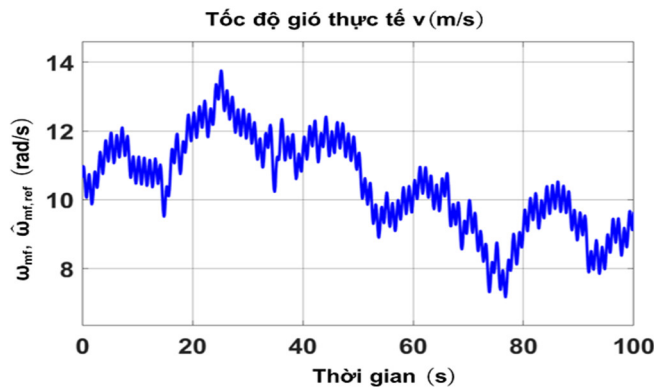
Các thông số về độ tự cảm của stato và điện trở của stato được đặt không đổi; tuy nhiên, để thực hiện các điều kiện gần với thực nghiệm, PMSG đã sử dụng các tham số rất khác nhau, sao cho điện trở thực tế của stato tăng 50% và độ tự cảm của stato giảm 20%: $R_{msa} = 1,5R_{ms}$, $L_{msa} = 0,8L_{ms}$ [14].

Nghiên cứu được thực hiện với tỷ số tốc độ đầu cánh tối ưu $\lambda_{tu} = 8,09$ và hệ số công suất của tua-bin gió là: $C_{t,max} = 0,3262$ [14]. Lỗi do cảm biến và mô hình hóa được giả thiết là: $\Delta_q = 10^5 \sin(t)$ và $\Delta_d = 10^3 \sin(t)$ [15]. Độ lợi cho việc xác định bề mặt trượt được đặt là $c = 1200$, $\kappa_q = 4.10^5$ và $\kappa_d = 10^5$.

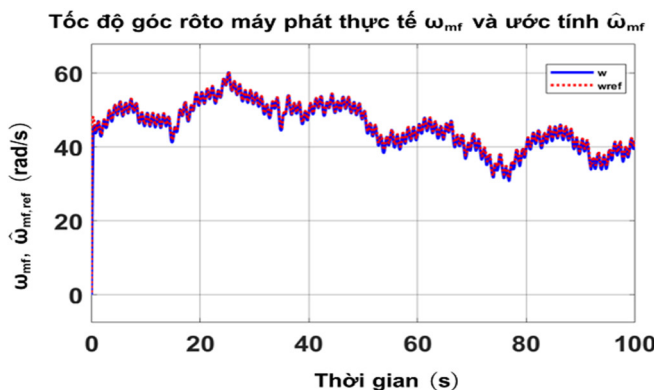
Phương pháp điều khiển SMC-DOB đề xuất cho WECS dựa trên PMSG sử dụng trong bài báo được xem xét mô

phỏng cùng với phương pháp trượt truyền thống [16] và phương pháp điều khiển bậc hai tuyến tính LQ [17]. Để đảm bảo tính công bằng trong so sánh các phương pháp điều khiển có cùng một bộ quan sát nhiễu loạn. Các phương pháp điều khiển đều đảm bảo yêu cầu loại bỏ nhiễu, đồng thời tạo ra điện áp điều khiển V_{qms} và V_{dms} trong phạm vi $\pm 500V$.

Biên dạng gió với giá trị trung bình là 10m/s, với cường độ nhiễu 15,23% [13] và được minh họa trên hình 3.



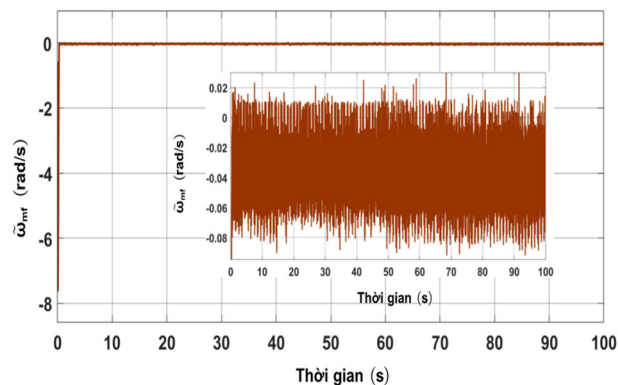
Hình 3. Biên dạng tốc độ gió thực tế



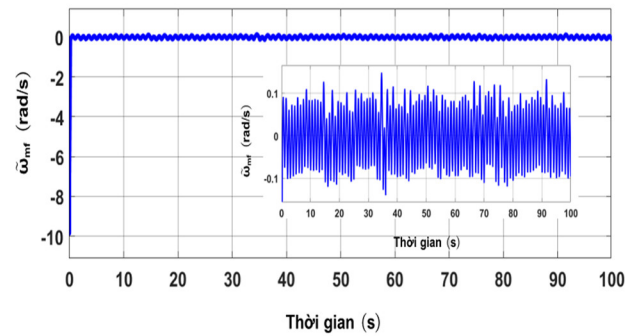
Hình 4. Tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và tốc độ góc tham chiếu $\omega_{mf,ref}$

Hình 4 minh họa kết quả mô phỏng tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và tốc độ góc tham chiếu $\omega_{mf,ref}$.

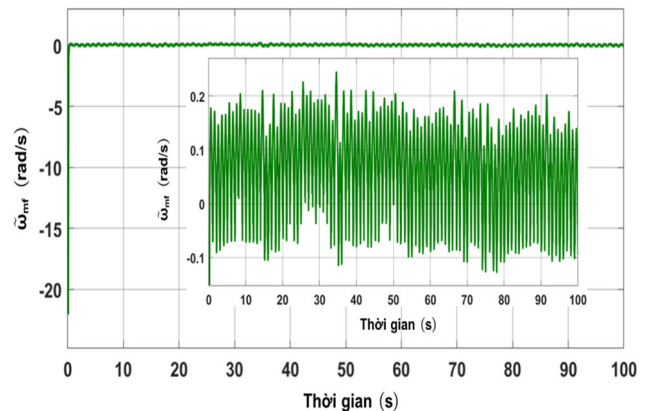
Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp NSMC



Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp LQ

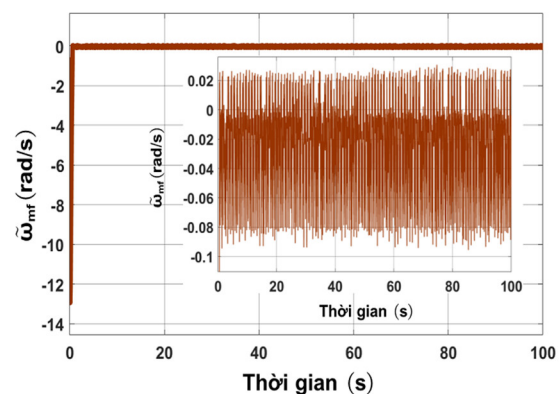


Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp SMC

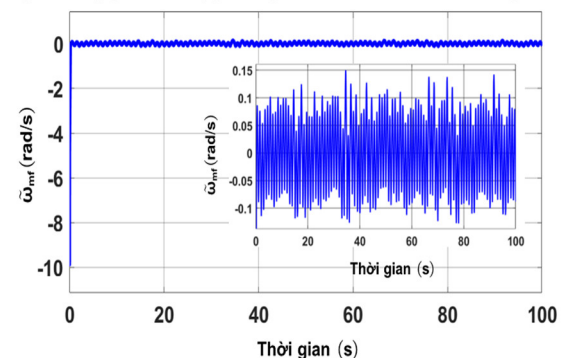


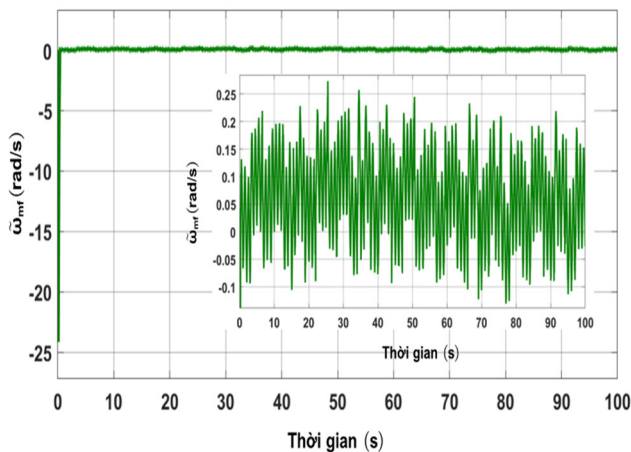
Hình 5. Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát $\hat{\omega}_{mf}$ (rad/s) theo cả ba phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc bình thường của hệ thống $R_{msa} = R_{msr}$, $L_{msa} = L_{msr}$, $\Delta_q = 0$, $\Delta_d = 0$

Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp NSMC



Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế ω_{mf} và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp LQ



Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát thực tế $\tilde{\omega}_{mf}$ và ước tính $\hat{\omega}_{mf}$ theo phương pháp SMC

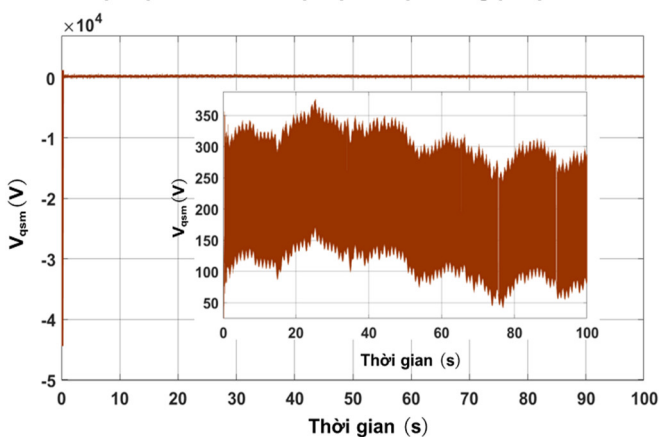
Hình 6. Sai lệch tốc độ góc rôto máy phát $\tilde{\omega}_{mf}$ (rad/s) theo cả ba phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc khi có xét đến ảnh hưởng của nhiễu loạn trong hệ thống $R_{msa} = 1,5R_{ms}$, $L_{msa} = 0,8L_{ms}$, $\Delta_q = 10^5 \sin t$, $\Delta_d = 10^3 \sin t$

Hình 5 thể hiện các đường đặc tính diễn biến theo thời gian của sai lệch tốc độ góc rôto máy phát $\tilde{\omega}_{mf}$ (rad/s) theo cả ba phương pháp NSMC, LQ và SMC ở chế độ làm việc bình thường, với ước tính sai số trạng thái ổn định được tính bằng giá trị bình phương trung bình gốc (RMSV) của $\tilde{\omega}_{mf}(t)$ trong khoảng thời gian xét, lần lượt là 0,03506; 0,06703 và 0,08807.

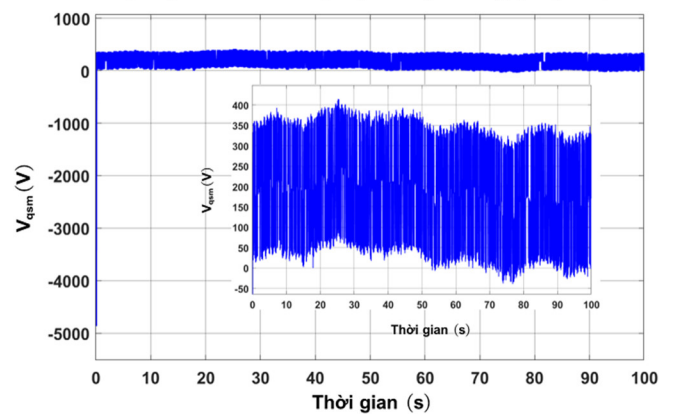
Hình 6 là các đường đặc tính diễn biến theo thời gian của sai lệch tốc độ góc rôto máy phát $\tilde{\omega}_{mf}$ (rad/s) theo cả ba phương pháp NSMC, LQ và SMC ở chế độ làm việc có ảnh hưởng của lỗi tham số, nhiễu loạn và lỗi mô hình hóa, sai số trạng thái ổn định được tính bằng giá trị bình phương trung bình gốc (RMSV) của $\tilde{\omega}_{mf}(t)$ trong khoảng thời gian xét, lần lượt là 0,04304; 0,08902 và 0,1903.

Từ hình 5 và 6 ta nhận thấy, biên độ sai lệch tốc độ góc rôto máy phát $\tilde{\omega}_{mf}$ (rad/s) tăng dần lần lượt theo ba phương pháp NSMC, LQ và SMC.

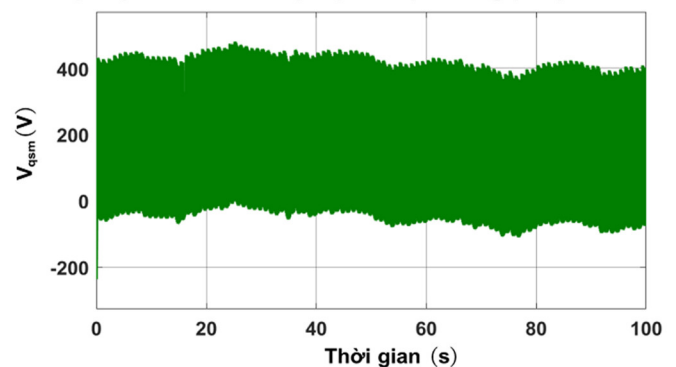
Điện áp điều khiển trục q theo phương pháp NSMC



Điện áp điều khiển trục q theo phương pháp LQ

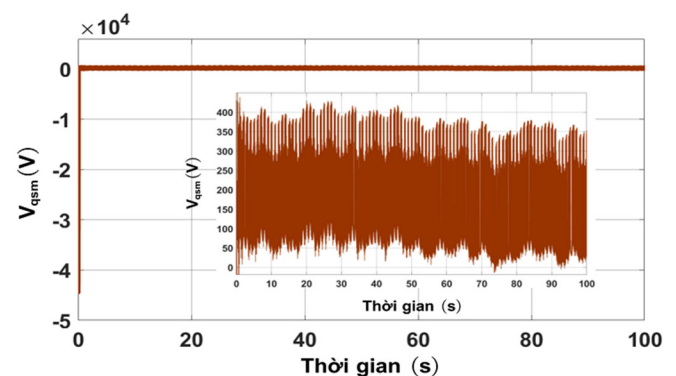


Điện áp điều khiển trục q theo phương pháp SMC

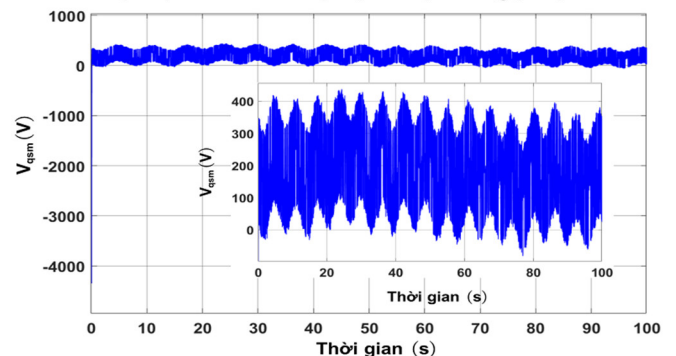


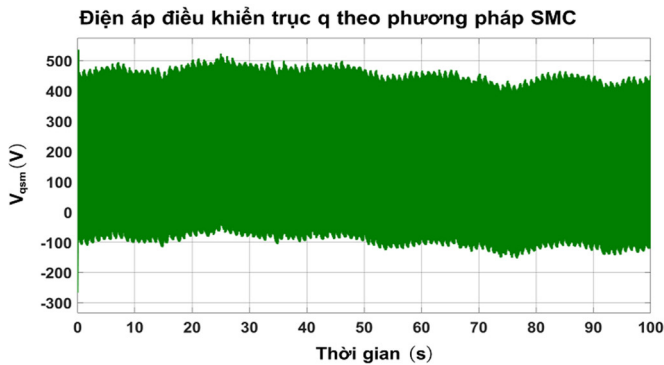
Hình 7. Điện áp điều khiển theo trục q theo cả ba phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc bình thường của hệ thống $R_{msa} = R_{ms}$, $L_{msa} = L_{ms}$, $\Delta_q = 0$, $\Delta_d = 0$

Điện áp điều khiển trục q theo phương pháp NSMC

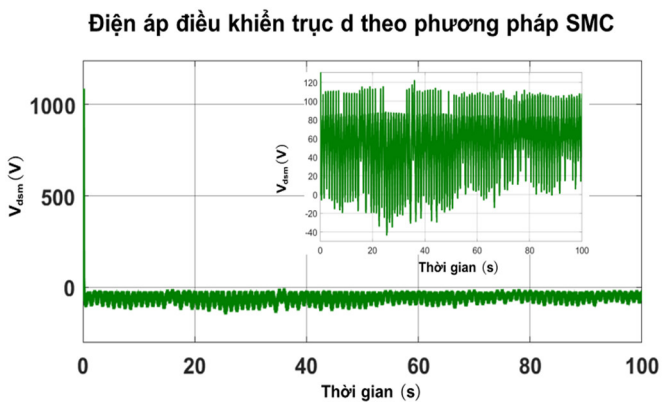
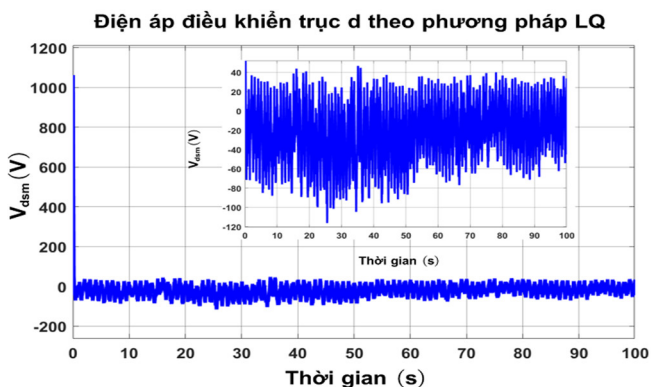
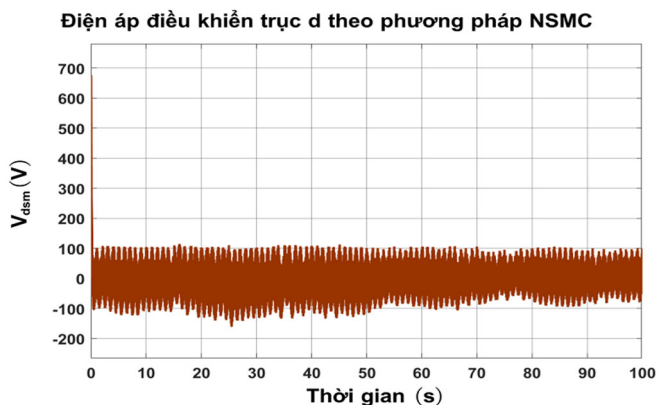


Điện áp điều khiển trục q theo phương pháp LQ

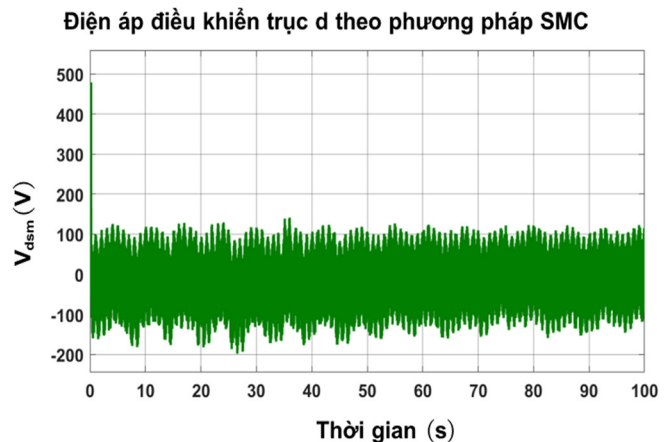
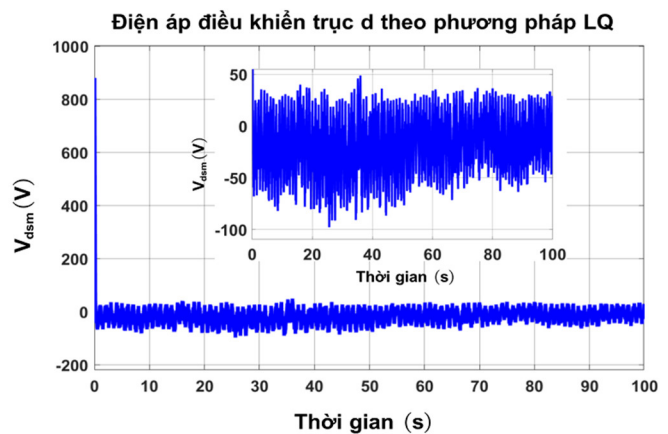
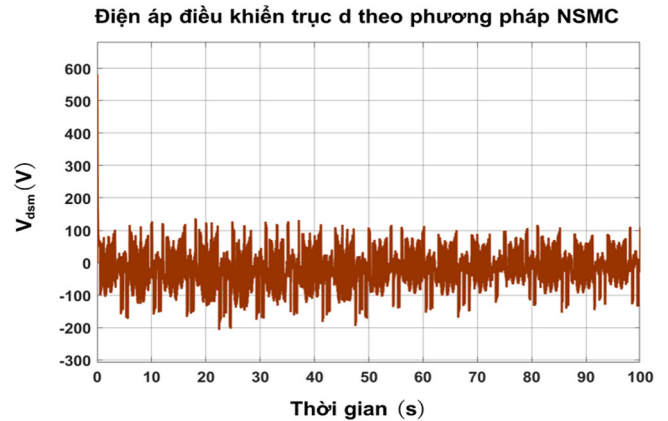




Hình 8. Điện áp điều khiển theo trục q theo cả ba phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc khi có ảnh hưởng nhiễu loạn $R_{msa} = 1,5R_{ms}$, $L_{msa} = 0,8L_{ms}$, $\Delta_q = 10^5 \sin t$, $\Delta_d = 10^3 \sin t$

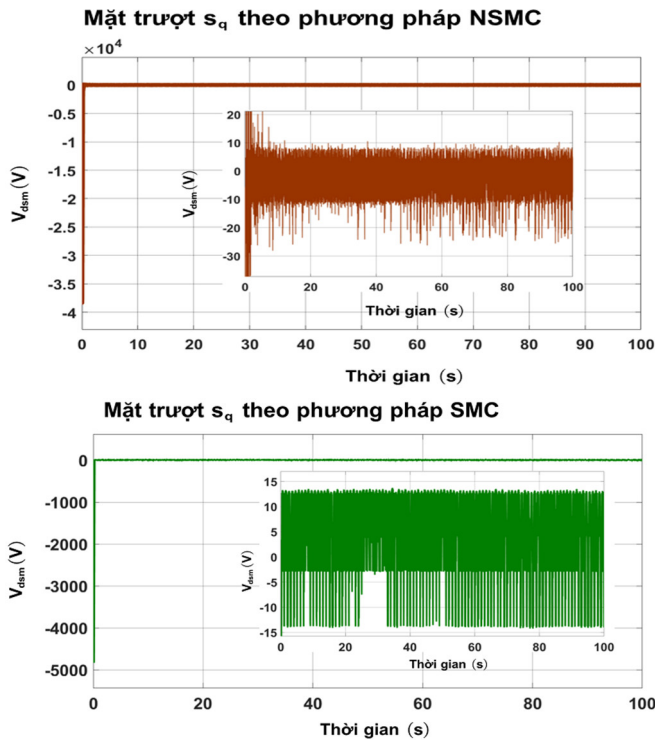


Hình 9. Điện áp điều khiển theo trục d theo cả ba phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc bình thường của hệ thống $R_{msa} = R_{ms}$, $L_{msa} = L_{ms}$, $\Delta_q = 0$, $\Delta_d = 0$

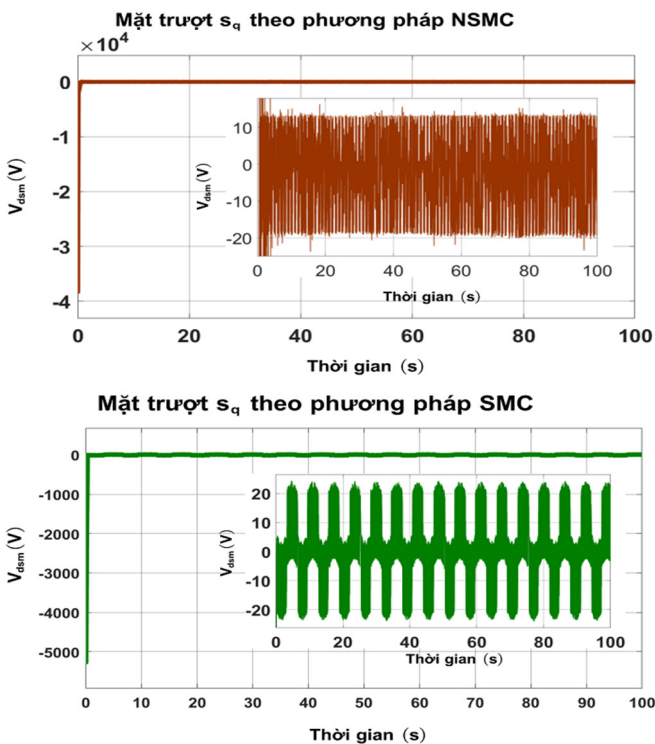


Hình 10. Điện áp điều khiển theo trục q theo cả 3 phương pháp NSMC, LQ, SMC ở chế độ làm việc khi có ảnh hưởng nhiễu loạn $R_{msa} = 1,5R_{ms}$, $L_{msa} = 0,8L_{ms}$, $\Delta_q = 10^5 \sin t$, $\Delta_d = 10^3 \sin t$

Hình 7 đến 10 thể hiện diễn biến điện áp điều khiển theo trục q và trục d của hệ thống khi xét ba phương pháp NSMC, LQ và SMC ở chế độ làm việc bình thường và chế độ làm việc có ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu loạn. Điện áp điều khiển theo trục d và trục q trong cả ba phương pháp đều có dao động tần số cao, đặc biệt là hai phương pháp điều khiển trượt, do tính không liên tục của chúng. Ta thấy điện áp theo trục q giảm dần từ phương pháp SMC đến LQ và NSMC, dẫn đến giảm dao động trong tốc độ PMSG.

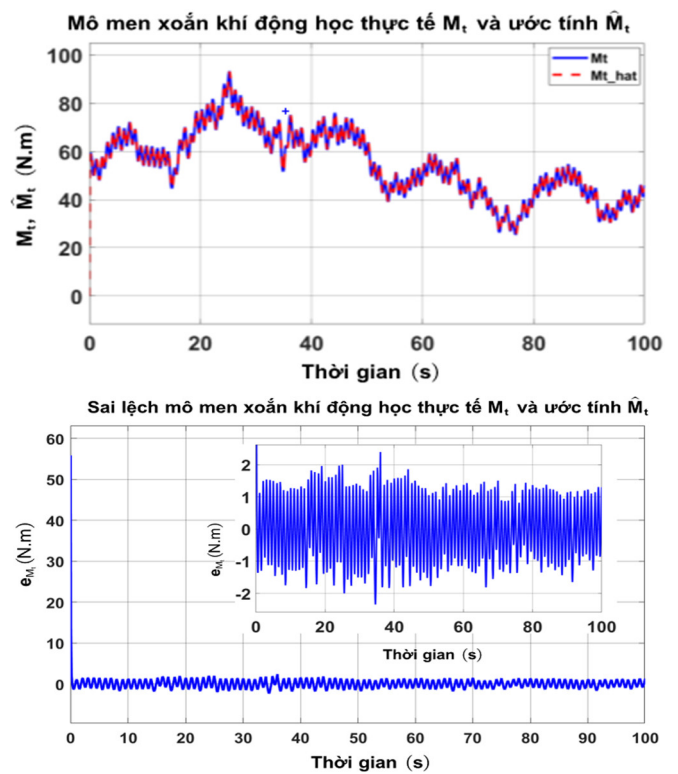


Hình 11. Biến trượt $s_q(t)$ theo cả hai phương pháp NSMC, SMC ở chế độ làm việc bình thường của hệ thống $R_{msa} = R_{msr}$, $L_{msa} = L_{msr}$, $\Delta_q = 0$, $\Delta_d = 0$

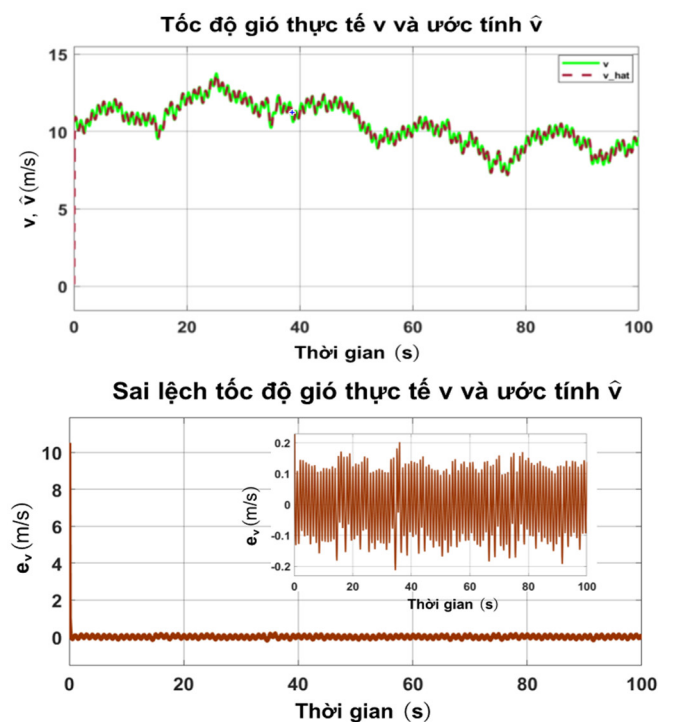


Hình 12. Biến trượt $s_q(t)$ theo cả hai phương pháp NSMC, SMC ở chế độ làm việc khi có ảnh hưởng nhiễu loạn $R_{msa} = 1,5R_{msr}$, $L_{msa} = 0,8L_{msr}$, $\Delta_q = 10^5 \sin t$, $\Delta_d = 10^3 \sin t$

Từ hình 11 và 12 ta thấy, biến trượt theo phương pháp NSMC giảm biên độ và độ rung hơn so với phương pháp SMC.



Hình 13. Đồ thị minh họa mô-men xoắn khí động học thực tế M_t , ước tính $\hat{M}_t$ và sai lệch mô-men xoắn khí động học $e_M = M_t - \hat{M}_t$



Hình 14. Đồ thị minh họa tốc độ gió thực tế v , ước tính tốc độ gió $\hat{v}$ và sai lệch tốc độ gió $e_v = v - \hat{v}$

Từ các kết quả mô phỏng ở hình 13 và 14 ta thấy, sai lệch ước tính mô-men xoắn là 2,84% và sai lệch ước tính tốc độ gió là 1,43%.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển trượt kết hợp bộ quan sát nhiễu loạn nhằm tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG). Phương pháp này được phát triển để điều chỉnh tối ưu công suất phát trong điều kiện tốc độ gió thay đổi, đảm bảo hệ thống duy trì trạng thái hoạt động ổn định. Quá trình nghiên cứu bao gồm phân tích lý thuyết và mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simulink. Cấu trúc điều khiển đề xuất dựa trên nguyên lý tỷ lệ tốc độ đầu cánh tối ưu, được xây dựng từ phương trình điều khiển góc rôto để tối đa hóa công suất khai thác của tua-bin gió. Ngoài ra, bộ quan sát nhiễu loạn được tích hợp để ước tính mô-men xoắn cơ học khí động, hỗ trợ nâng cao độ chính xác trong quá trình điều khiển. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều khiển trượt đề xuất mang lại hiệu suất theo dõi cao hơn so với điều khiển trượt truyền thống và điều khiển bậc hai tuyến tính (LQ). Đồng thời, hệ thống có khả năng thích ứng tốt với sự thay đổi của tốc độ gió, góp phần tối ưu hóa khai thác năng lượng từ tua-bin gió.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được thực hiện với sự hỗ trợ của Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp, thuộc nhiệm vụ Nghiên cứu khoa học cấp cơ sở năm học 2024-2025. Mã số: 855/QĐ-ĐHKTKTCN ngày 30 tháng 9 năm 2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. K. Y. Yazici, "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.

[2]. X. Lyu, J. Zhao, Y. Jia, Z. Xu, P. Wong, "Coordinated Control Strategies of PMSG-based Wind Turbine for Smoothing Power Fluctuations," *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 1, 391-401, 2018.

[3]. L. Le, "Review of the modern maximum power tracking algorithms for permanent magnet synchronous generator of wind power conversion systems," *Energies*, 16, 1, 402, 2022.

[4]. J. Mani, "Digital controller design via LMI for direct-driven surface mounted PMSG-based wind energy conversion system," *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50, 7, 3056-3067, 2019.

[5]. J. Thakur, "Control of a PMSG wind-turbine under asymmetrical voltage sags using sliding mode approach," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 5, 2, 47-55, 2018.

[6]. Yang B., Yu T., Shu H., Han Y., Cao P., Jiang L, "Adaptive fractional-order PID control of PMSG-based wind energy conversion system for MPPT using linear observers," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29, 1, e2697, 2019.

[7]. M. Karabacak, "A new perturb and observe based higher order sliding mode MPPT control of wind turbines eliminating the rotor inertial effect," *Renewable energy*, 133, 807-827, 2019.

[8]. V. I. Utkin, *Sliding modes in control and optimization*. Springer Science & Business Media, 2013.

[9]. J. Huang, "Maximum power point tracking strategy for large-scale wind generation systems considering wind turbine dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 4, 2530-2539, 2015.

[10]. S. Hannachi, "Optimal tuning of proportional-integral controller using particle swarm optimization algorithm for control of permanent magnet synchronous generator based wind turbine with tip speed ratio for maximum power point tracking," *Wind Engineering*, 45, 2021.

[11]. H. El-Ahmar, "Evaluation of factors affecting wind turbine output power," in *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 1471-1476, 2017. doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301377.

[12]. W.H. Chen, "Disturbance observer based control for nonlinear systems," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 9, 4, 706-710, 2004.

[13]. D. Le, "High-order observers-based LQ control scheme for wind speed and uncertainties estimation in WECSs," *Optimal Control Applications and Methods*, 39, 5, 1818-1832, 2018.

[14]. P. Valenciaga, "High-order sliding control for a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator," *IEEE transactions on energy conversion*, 23, 3, 860-867, 2008.

[15]. D. Le, "High-order observers-based LQ control scheme for wind speed and uncertainties estimation in WECSs," *Optimal Control Applications and Methods*, 39, 5, 1818-1832, 2018.

[16]. V. I. Utkin, *Sliding modes in control and optimization*. Springer Science & Business Media, 2013.

[17]. F. Lin, *Robust control design: an optimal control approach*. John Wiley & Sons, 2007.

[18]. D. Sumbekov, "Takagi-Sugeno fuzzy-based integral sliding mode control for wind energy conversion systems with disturbance observer," *Electrical Engineering*, 102, 1141-1151, 2020.

[19]. C. Li, *Disturbance observer-based control: Methods and applications*. CRC press, 2014.

[20]. C. Yang, "Adaptive fractional-order PID control of PMSG-based wind energy conversion system for MPPT using linear observers," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29, 1, 2697, 2019.

[21]. M. Mozayan SM, "Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 10, 6148-6159, 2016.

[22]. M. Dali, "A new robust control scheme: Application for MPP tracking of a PMSG-based variable-speed wind turbine," *Renewable Energy*, 172, 1021-1034, 2021.

AUTHOR INFORMATION

Dang Quoc Du

University of Economics and Industrial Technology, Vietnam