

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BẬC HAI TUYẾN TÍNH DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT NHIỀU BẬC CAO ĐỂ ƯỚC LƯỢNG TỐC ĐỘ GIÓ TRONG HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ

DESIGN OF A LINEAR SECOND ORDER CONTROLLER BASED ON A HIGH-ORDER OBSERVER
TO ESTIMATE WIND SPEED IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

Đặng Quốc Du^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.254>

TÓM TẮT

Theo dõi điểm làm việc công suất cực đại là nhiệm vụ quan trọng trong hệ thống điều khiển bộ biến đổi năng lượng gió, được thực hiện thông qua việc điều chỉnh tốc độ tuabin gió. Việc này đòi hỏi yêu cầu về thông tin tốc độ gió thông qua bộ đo lường tốc độ gió và truyền dữ liệu tốc độ gió tới bộ điều khiển. Nghĩa là cần sử dụng nhiều cảm biến tốc độ gió để thực hiện, nhưng kết quả cũng chưa đảm bảo sự chắc chắn về độ tin cậy. Do đó, người ta hướng đến sử dụng các phương pháp khác nhau để ước lượng tốc độ gió. Việc ước lượng chính xác tốc độ gió sẽ dẫn đến một hệ thống điều khiển có hiệu quả cao. Đã có nhiều bộ quan sát trước đây được đề xuất để ước tính tốc độ gió tương ứng với các giả định coi mômen khí động học thay đổi chậm không áp dụng được cho hệ thống thực. Bài báo này đề xuất xây dựng một bộ quan sát nhiễu loạn bậc cao để ước lượng chính xác mô men khí động học của tuabin gió, từ đó ước lượng tốc độ gió tương ứng. Từ kết quả của bộ quan sát này, một bộ điều khiển tối ưu hiệu suất cao được phát triển giữ cho tốc độ tuabin luôn tối ưu.

Từ khóa: Bộ quan sát nhiễu loạn bậc cao; điều khiển tối ưu; độ bất định; hệ thống biến đổi năng lượng gió (WECS); ước lượng tốc độ gió.

ABSTRACT

In the wind energy converter control system, monitoring the maximum power operating point which is accomplished by varying the wind turbine speed is a crucial responsibility. This calls for the measurement of wind speed and the transfer of wind speed data to the controller. This implies that in order to do this, a large number of wind speed sensors must be used, but the outcomes do not ensure accuracy. As a result, individuals try to measure wind speed using various techniques. A highly efficient control system will result from an accurate estimation of wind speed. Many prior observation sets that are not applicable to real systems have been offered in order to estimate wind speeds matching to assumptions of slowly fluctuating aerodynamic moments. In order to precisely determine the aerodynamic moment of the wind turbine and, consequently, the appropriate wind speed, this article suggests building a high-order turbulence observer. Based on the findings of this observation, a high-performance optimum controller that maintains the ideal turbine speed is created.

Keywords: High-order disturbance observer; optimal control; uncertainty; wind energy conversion system (WECS); estimate wind speed.

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

*Email: dqdu@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 16/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

1. GIỚI THIỆU

Năng lượng tái tạo (như gió, mặt trời và sinh khối) là những nguồn năng lượng để giải quyết tình trạng nóng

lên của của toàn cầu và ô nhiễm liên quan đến nhiên liệu hóa thạch. Trong các nguồn năng lượng tái tạo thì năng lượng gió là một trong những nguồn năng lượng tốt

nhất, nó không tạo ra bất kỳ chất gây ô nhiễm hoặc khí thải nào trong quá trình vận hành, ngoài yêu cầu bảo trì. Hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) được sử dụng để tạo ra năng lượng điện từ năng lượng khí động học của gió. Trong WECS tốc độ thay đổi, máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) là một trong những loại máy phát được sử dụng rộng rãi nhất, vì nó có mật độ công suất cao, hệ số công suất cao và độ tin cậy cao. Tuy nhiên, từ góc độ lý thuyết điều khiển, WECS là một hệ thống phi tuyến cao với các biến số liên quan chặt chẽ đến tốc độ gió [1]. Trong WECS tốc độ thay đổi, vấn đề theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) là rất cần thiết ở mỗi tốc độ gió sẽ có một điểm vận hành tối ưu, tại đó tuabin sẽ quay với tốc độ tham chiếu tối ưu và hệ thống thu được công suất cực đại [2]. Giá trị tối ưu này có thể được giữ bằng cách điều chỉnh tốc độ tuabin ở các tốc độ gió khác nhau, điều này cho thấy sự cần thiết phải đo tốc độ gió [3]. Thông thường, các loại cảm biến đo gió dạng cốc được sử dụng để đo tốc độ gió, thật không may là máy đo gió dạng cốc thông thường không thể đo chính xác tốc độ gió nhằm mục đích phục vụ cho điều khiển, hoặc rất đắt để đo được chính xác tốc độ gió. Một giải pháp khả thi là ước tính tốc độ gió bằng bộ quan sát (DOs) [2]. Vì vậy, hệ thống điều khiển dựa trên DOs là giải pháp hiệu quả cho những vấn đề này. Một số phương pháp sử dụng bộ quan sát để ước tính thông tin gió như mô hình Gray và bộ lọc Kalman [4, 5]. Một phương pháp thuật toán di truyền cũng được áp dụng để ước tính chính xác tốc độ gió, tuy nhiên, thuật toán phức tạp với một số lượng lớn đầu vào [6]. Một giải pháp khác cho vấn đề này là quan sát mô-men xoắn khí động học thay vì ước tính tốc độ gió [7].

Trong các DOs tuyến tính và phi tuyến thông thường, sự hội tụ của sai số ước lượng được đảm bảo bằng cách xem xét rằng nhiễu có động học chậm so với động học của bộ quan sát (tức là đạo hàm theo thời gian bậc một của nhiễu bằng với số không). Loại giả định này là một loại giả định phổ biến và có tác dụng trong nhiều trường hợp thực tế. Tuy nhiên, đối với một số trường hợp cụ thể khi nhiễu có động học nhanh, giả định này không phù hợp và có thể dẫn đến hiệu quả ước lượng không được thỏa mãn. Trong WECS, mô-men xoắn khí động học có liên quan đến tốc độ gió ngẫu nhiên theo mối quan hệ hàm bậc ba, thuộc loại hệ thống như vậy. Xem xét các công trình nghiên cứu trước đây, bài viết này giới thiệu một bộ quan sát bậc cao (HODO) để ước lượng mô-men xoắn khí động học, từ đó giúp ước lượng tốc độ gió. Mặt khác, WECS hiện đại yêu cầu các phương pháp điều khiển hiệu

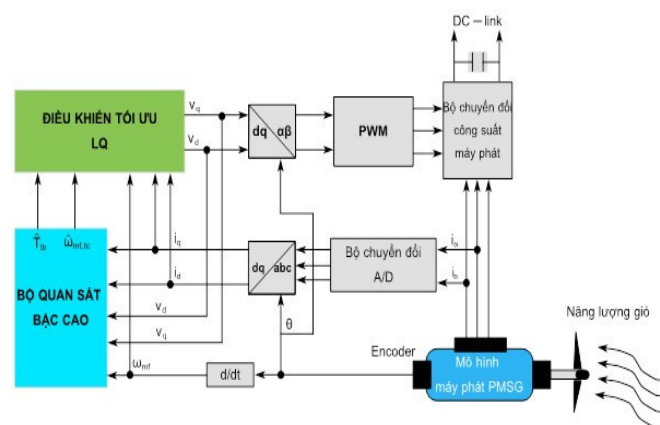
suất cao như điều khiển đạo hàm tỷ lệ-tích phân thứ tự phân số (PID) thích ứng [8], trong tài liệu [9], một bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi (FLC) đã được đề xuất để loại bỏ toàn bộ tất cả các tính chất phi tuyến của PMSG cho MPPT. Tuy nhiên, hầu hết các kỹ thuật điều khiển này đều phức tạp và không dễ thực hiện. Bài báo này sử dụng bộ điều chỉnh bậc hai tuyến tính (LQR), cho bài toán theo dõi tốc độ của máy phát. Hiệu quả của sơ đồ điều khiển tổng hợp tối ưu được trình bày được chứng minh bằng mô phỏng máy tính trong Matlab/Simulink. Đóng góp chính bài báo này là:

- Đã giới thiệu một bộ quan sát nhiễu bậc cao để ước tính mô-men xoắn khí động học của WECS một cách chính xác, từ đó ước tính vận tốc gió thực tế.
- Đề xuất bộ điều khiển tối ưu tuyến tính bậc hai và đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Cấu trúc bài báo gồm 5 phần, sau phần giới thiệu, phần 2 là mô hình hệ thống chuyển đổi năng lượng gió dùng để nghiên cứu, phần 3 thiết kế bộ điều khiển bậc hai tuyến tính, phần 4 thiết kế bộ quan sát bậc cao để ước tính mô-men xoắn khí động học trên trục tuabin, phần 5 là thiết kế bộ điều khiển dựa trên bộ quan sát bậc cao và chứng minh tính ổn định của hệ thống điều khiển vòng kín. Và cuối cùng là mô hình mô phỏng, kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink cùng một số thảo luận.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ

Hình 1 thể hiện sơ đồ khối của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió dựa trên máy phát điện kích từ nam châm vĩnh cửu sử dụng sơ đồ điều khiển tối ưu dựa trên bộ quan sát bậc cao.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển bậc hai tuyến tính (LQR) cho hệ thống chuyển đổi năng lượng gió sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) dựa trên bộ quan sát nhiễu bậc cao để ước tính tốc độ gió trong bộ biến đổi năng lượng gió

Trong phần này, chúng ta xem xét mô hình hệ thống chuyển đổi năng lượng gió dựa trên máy phát điện kích từ nam châm vĩnh cửu [2].

2.1. Mô hình tua bin gió

Công suất khí động học P_{tb} (kW), thu được từ tua bin gió được cho bởi công thức sau:

$$P_{tb} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{tb}^2 C_{P_{tb}}(\lambda, \beta) v^3 \tag{1}$$

Trong đó: ρ (kg/m³) - mật độ không khí; R_{tb} (m) - bán kính tua bin gió; v (m/s) - tốc độ gió, $C_{P_{tb}}(\lambda, \beta)$ - hệ số công suất, là một hàm phi tuyến phụ thuộc vào tỉ số tốc độ đầu cánh λ và góc tấn cánh quạt β . Từ hình 2 cho thấy, ở mỗi góc của β , tuabin hiệu quả nhất cho một giá trị cụ thể của β . Tỉ số tốc độ đầu cánh λ được xác định như sau:

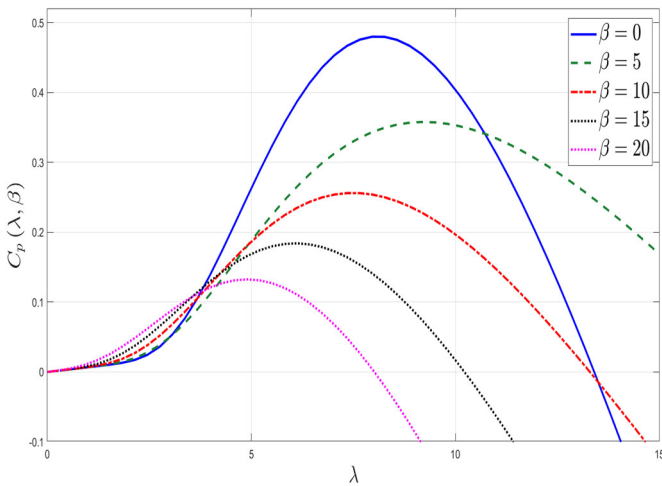
$$\lambda = \frac{\omega_{tb} R_{tb}}{v} \tag{2}$$

Trong đó: ω_{tb} - tốc độ góc của tuabin (rad/s).

Mô men xoắn khí động học T_{tb} (N.m) của tuabin được xác định bởi phương trình (3):

$$T_{tb} = \frac{P_{tb}}{\omega_{tb}} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{tb}^3 C_{T_{tb}}(\lambda, \beta) v^2 \tag{3}$$

Trong đó: $C_{T_{tb}}(\lambda, \beta) = C_{P_{tb}}(\lambda, \beta) / \lambda$ là hệ số mô-men xoắn khí động học.



Hình 2. Hệ số công suất điển hình $C_P(\lambda, \beta)$ cho các giá trị khác nhau của λ và β

Theo phương trình (1), công suất khí động học P_{tb} thu được được tỉ lệ với hệ số $C_{P_{tb}}(\lambda, \beta)$. Đối với một tuabin gió nhất định, với mỗi tốc độ gió và một góc cánh quạt nhất định, sẽ có một giá trị tỉ số tốc độ đầu tối ưu (λ_{tu}), là giá trị không đổi; do đó, theo phương trình (2), công suất thu được tối đa đạt được bằng cách theo dõi tốc độ tham

chiều tối ưu ($\omega_{tb,tu}$) của rô-to tuabin gió được xác định bởi công thức:

$$\omega_{tb,tu} = \frac{\lambda_{tu}}{R_{tb}} v \tag{4}$$

Ngoài ra, mối quan hệ giữa tốc độ của rô-to tuabin và tốc độ rô-to máy phát, mô-men xoắn khí động học trên trục rô-to tuabin và mô-men xoắn trên trục rô-to máy phát điện được xác định bởi:

$$n_{bm} = \frac{\omega_{mp}}{\omega_{tb}} = \frac{T_{tb}}{T_{mp}} \tag{5}$$

Trong đó: n_{bm} - tỉ số truyền của hộp số; ω_{mp} (rad/s) - tốc độ góc của rô-to máy phát điện, và T_{mp} (N.m) - mô-men xoắn khí động học trên trục rô-to máy phát điện.

2.2. Mô hình máy phát điện

Phương trình khí động học của máy phát điện kích từ nam châm vĩnh cửu được thể hiện dưới dạng:

$$J_{mp} \frac{d\omega_{mp}}{dt} = T_{tb} - B_{mp} \omega_{mp} - T_e \tag{6}$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_q - P \omega_{mp} i_d - \frac{\Psi_{mp} P}{L_s} \omega_{mp} + \frac{1}{L_s} V_{qs} \tag{7}$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_d + P \omega_{mp} i_q + \frac{1}{L_s} V_{ds} \tag{8}$$

Trong đó: i_d và i_q lần lượt là dòng điện stator trục d và trục q, (A); V_{ds} và V_{qs} lần lượt là điện áp stator trục d và trục q, (V); J_{mp} là mô-men quán tính rô-to máy phát điện, (kg.m²); P là số đôi cực từ; R_s là điện trở stator, (Ω); L_s là điện cảm stator, (mH); B_{mp} là hệ số ma sát nhớt (kg.m²/s); Ψ_{mp} là từ thông nam châm, (V.s/rad); và T_e là mô-men xoắn điện từ (N.m).

Mô men xoắn điện từ được tính như sau:

$$T_e = K_e i_q \tag{9}$$

Trong đó: $K_e = 3 / 2 \Psi_{mp} P$.

Từ phương trình số (6) đến (8), có thể viết lại phương trình động lực học của động cơ PMSG như sau:

$$\frac{d\omega_{mp}}{dt} = \frac{1}{J_{mp}} T_{tb} - \frac{B_{mp}}{J_{mp}} \omega_{mp} - \frac{1}{J_{mp}} T_e \tag{10}$$

$$\frac{dT_e}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} T_e - P K_e \omega_{mp} i_d - \frac{\Psi_{mp} P K_e}{L_s} \omega_{mp} + \frac{K_e}{L_s} V_{qs} \tag{11}$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_d + \frac{P}{K_e} \omega_{mp} T_e + \frac{1}{L_s} V_{ds} \tag{12}$$

Giả thuyết 1: (a) Tốc độ rô to máy phát điện ω_{mp} và dòng điện i_d, i_q có thể đo được. (b) Tốc độ gió v và mô men xoắn khí động học T_{tb} là không xác định.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BẬC HAI TUYẾN TÍNH

Để tạo thuận lợi cho việc thiết kế bộ điều khiển, các phương trình (10), (11) và (12) có thể được chuyển đổi thành phương trình động học lỗi như sau:

$$\frac{d\tilde{\omega}_{mp}}{dt} = -\frac{B_{mp}}{J_{mp}}\tilde{\omega}_{mp} - \frac{1}{J_{mp}}\tilde{T}_e \tag{13}$$

$$\frac{d\tilde{T}_e}{dt} = -\frac{R_s}{L}\tilde{T}_e - \frac{\Psi_m PK_e}{L}\tilde{\omega}_r + \frac{K}{L}(v_q - u_{qc}) \tag{14}$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + \frac{K}{L}(v_d - u_{dc}) \tag{15}$$

Trong đó: $\tilde{\omega}_{mp}$ là sai số theo dõi của tốc độ rô to, (rad/s); \tilde{T}_e là sai số theo dõi của mômen điện từ của máy phát (N.m); v_{q1} và v_{d1} lần lượt là các giá trị bù của đầu vào điều khiển. Chúng được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{mp} &= \omega_{mp} - \omega_{mp,tu}; \omega_{mp,tu} = \omega_{tb,tu} n_{bm} = \frac{\lambda_{tu}}{R_{tb}} v \cdot n_{bm} \\ \tilde{T}_e &= T_e - T_{e,tu}; T_{e,tu} = \frac{1}{n_{bm}} T_{tb} - B_{mp} \omega_{mp,tu} - J_{mp} \dot{\omega}_{mp,tu} \\ u_{q1} &= \frac{R_s}{K_e} T_{e,tu} + \frac{L_s}{K_e} \dot{T}_{e,tu} + \Psi_m P \omega_{mp,tu} + PL_s \omega_{mp} i_d \\ u_{d1} &= -\frac{PL_s}{K_e} \omega_{mp} T_e \end{aligned} \tag{16}$$

Trong đó: $\omega_{mp,tu}$ là tốc độ tham chiếu tối ưu của máy phát; $T_{e,tu}$ là tham chiếu của mô-men xoắn điện từ và (·) biểu thị đạo hàm lần đầu tiên của một biến.

Cần lưu ý rằng, vì tốc độ gió v và mô-men xoắn khí động học T_{tb} là không xác định, tham chiếu tốc độ rô to máy phát điện $\omega_{mp,tu}$ và tham chiếu mô-men xoắn điện từ $T_{e,tu}$ chưa biết.

Trong các phần tiếp theo, một bộ quan sát nhiễu bậc cao sẽ được thiết kế để ước lượng mômen khí động học T_{tb} và tốc độ gió v . Phương trình (13), (14) và (15) có thể viết lại dưới dạng phương trình không gian trạng thái như sau:

$$\dot{x} = Ax + B(u - u_1) \tag{17}$$

Trong đó:

$$x = [\tilde{\omega}_{mp} \quad \tilde{T}_e \quad i_d]^T; u = [v_{qs} \quad v_{ds}]^T; u_1 = [u_{q1} \quad u_{d1}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_{mp}}{J_{mp}} & -\frac{1}{J_{mp}} & 0 \\ \frac{\Psi_m PK_e}{L_s} & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_e}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}$$

Chúng ta hãy xem xét chỉ số hiệu suất LQ sau:

$$J(x, u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) \tag{18}$$

Trong đó: $Q \geq 0$ là ma trận 3x3 và $R > 0$ là ma trận 2x2. Trong các lý thuyết điều khiển tối ưu, bằng cách giảm thiểu chỉ số hiệu suất bậc hai này, luật điều khiển tối ưu được xác định. Luật điều khiển cho hệ thống được xác định như sau [10]:

$$u_{dk} = u_1 + K_{tu} x \tag{19}$$

Trong đó: $K_{tu} = -R^{-1} B^T P_{tu}$ là ma trận khuếch đại của bộ điều khiển, với P_{tu} là nghiệm xác định dương của phương trình Riccati đại số sau:

$$P_{tu} A + A^T P_{tu} - P_{tu} B T^{-1} B^T P_{tu} + Q = 0 \tag{20}$$

Ghi chú 1: Có thể suy ra từ (19) rằng độ lợi kiểm soát K_{tu} phụ thuộc vào ma trận trọng số Q và R . Đối với giá trị Q lớn, hiệu suất theo dõi sẽ được cải thiện; tuy nhiên, điều này sẽ đòi hỏi một nỗ lực kiểm soát lớn. Mặt khác, giá trị lớn của R sẽ gây ra lỗi theo dõi lớn với nỗ lực kiểm soát thấp. Xem xét những thực tế này, nên tính đến sự đánh đổi giữa hiệu suất điều khiển và mức tiêu thụ năng lượng khi lựa chọn các tham số này [11]. Sau đó, Q và R có thể được điều chỉnh thông qua các nghiên cứu mô phỏng mở rộng cho đến khi đạt được kết quả ưng ý.

Định lý 1. Với luật điều khiển trong (19), vectơ trạng thái x trong hệ (17) hội tụ theo cấp số nhân về không.

Chứng minh: Để phân tích độ ổn định, xác định hàm Lyapunov như sau:

$$V(x) = x^T P_{tu} x \tag{21}$$

Rõ ràng là $V(x)$ là xác định dương và không bị chặn. Từ (17), (19) và (20), đạo hàm theo thời gian của nó thỏa mãn:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{d}{dt} x^T P_{tu} x = 2x^T P_{tu} (A + BK_{tu}) x \\ &= 2x^T P_{tu} (A - BT^{-1} B^T P_{tu}) \\ &= x^T P_{tu} (P_{tu} A + A^T P_{tu} - BT^{-1} B^T P_{tu}) \end{aligned} \tag{22}$$

Phương trình (22) cho thấy đạo hàm theo thời gian của $V(x)$ âm đối với mọi giá trị khác 0 của x . Từ (21) và (22), có thể suy ra rằng x hội tụ theo cấp số nhân về không.

4. THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT BẬC CAO

Trong phần trước, chúng ta có thể thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho WECS, giả sử rằng tốc độ cánh quạt tối ưu tham chiếu $\omega_{mp,tu}$ và mô-men xoắn khí động học T_{tb} được biết từ phép đo tốc độ gió và mô hình động lực học tuabin là lý tưởng, tuy nhiên, trên thực tế, rất khó để đo chính xác tốc độ gió hiệu quả. Trong phần này, tác giả sẽ thiết kế các bộ quan sát để ước tính mômen khí động học T_{tb} . Có các phép đo T_{tb} và theo phương pháp đã công bố [12], chúng ta sẽ có thể xác định tốc độ rô-to tham chiếu $\omega_{mp,tu}$.

Trong quá trình phát triển bộ quan sát, người ta thường coi nhiều chưa biết là biến thay đổi chậm. Tuy nhiên, điều này có thể làm giảm hiệu suất của hệ thống điều khiển. Hơn nữa, trong một số trường hợp, tần số thay đổi của tốc độ gió cao, dẫn đến tốc độ tham chiếu tần số cao và mô men xoắn khí động học. Do đó, dường như không hợp lý khi coi chúng là các nhiễu loạn thay đổi chậm theo thời gian hoặc các hằng số chưa biết. Mặc dù các bằng chứng thực nghiệm và mô phỏng trong nhiều ấn phẩm cho thấy rằng, với giả định này, bộ quan sát vẫn có thể ước tính một số nhiễu thay đổi nhanh, không có lý do chặt chẽ nào để đảm bảo sự hội tụ của bộ quan sát. Bộ quan sát bậc cao có thể là một giải pháp cho vấn đề này, điều này có thể dẫn đến sự cải thiện trong quá trình ước tính và cả hiệu suất điều khiển. Xem xét thực tế này, trong phần này, bộ quan sát bậc cao được giới thiệu để ước tính mô men khí động học T_{tb} của tuabin.

Giả thiết 2: Mô men xoắn khí động học T_{tb} không nhất thiết phải là hằng số nhưng đủ trơn. Nói cách khác, tồn tại các số nguyên dương k sao cho $T_{tb} \in C_{k+1}$. Hơn nữa, các đạo hàm bậc $(k+1)$ của mômen khí động học là không thể biết được, tức là, $\frac{d^{k+1}T_{tb}}{dt^{k+1}} \neq 0$.

Để ước tính mô-men xoắn khí động học, phương trình (10) được sử dụng:

$$\frac{d\omega_{mp}}{dt} = \frac{1}{J_{mp}} T_{tb} - \frac{B_{mp}}{J_{mp}} \omega_{mp} - \frac{1}{J_{mp}} T_e \quad (23)$$

Sau đó, bộ quan sát mômen khí động học bậc cao tổng quát được thiết kế như [13]:

$$\begin{cases} \dot{z} = -n_{bm} (B_{mp} \omega_{mp} + T_e) + \frac{1}{J_{mp} n_{bm}} \hat{T}_{tb} \\ \hat{T}_{tb} = L_0 g_0 + L_1 g_1 + \dots + L_k g_k \\ g_0 = J_{mp} n_{bm} - z \\ \dot{g}_1 = g_0 \\ \dot{g}_2 = g_1 \\ \vdots \\ \dot{g}_k = g_{k-1} \end{cases} \quad (24)$$

Trong đó, $(\hat{\bullet})$ biểu thị ước tính của hàm đối số và L_0, L_1, \dots, L_k là độ lợi của bộ quan sát.

Định lý 2: Độ lợi của bộ quan sát L_0, L_1, \dots, L_k được chọn sao cho các đa thức sau:

$$s^{k+1} + L_0 s^k + L_1 s^{k-1} + \dots + L_k \quad (25)$$

theo định luật Hurwitz là ổn định. Sau đó, mô-men xoắn khí động học ước tính trong (24) tiệm cận hội tụ về giá trị thực của nó.

Chứng minh: Hãy xác định lỗi ước tính là:

$$e = T_{tb} - \hat{T}_{tb} \quad (26)$$

Khi đó, từ phương trình thứ nhất và thứ ba của hệ phương trình số (24), ta có:

$$e = -\dot{g}_0 \quad (27)$$

Dựa vào (27) và các đẳng thức khác ở (24), qua một số thao tác, suy ra:

$$e^{k+1} + L_0 e^k + L_1 e^{k-1} + \dots + L_k e = T_{tb}^{(k+1)} \quad (28)$$

Trong đó: $(\bullet)^{(i)}$ biểu thị đạo hàm thứ i của sai lệch ước lượng e . Bằng cách tham khảo **Giả thiết 3:** $T_{tb}^{(k+1)} = 0$, hàm y rằng sai số ước lượng trạng thái ổn định e bằng 0 theo điều kiện ổn định Hurwitz.

Với \hat{T}_{tb} , dựa trên phương trình số (3) và phương trình số (16), có thể trực tiếp ước lượng tham chiếu tốc độ bằng:

$$\hat{\omega}_{mp,tu} = \sqrt{\frac{\hat{T}_{tb}}{k_{tu}}} \quad (29)$$

Trong đó: $k_{tu} = \frac{\rho \pi R_{tb}^5 C_{p_{tb,max}}}{2 \lambda_{tu}^3 n_{bm}^2}$

5. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT BẬC CAO VÀ CHỨNG MINH TÍNH ỔN ĐỊNH CỦA VÒNG KÍN

5.1. Thiết kế bộ điều khiển LQR dựa trên bộ quan sát bậc cao

Với thông tin ước tính về tham chiếu tốc độ, mô-men xoắn khí động học các tín hiệu bù điều khiển được biểu thị bằng:

$$\begin{cases} \hat{\omega}_{mp} = \omega_{mp} - \hat{\omega}_{mp,tu}; \hat{\omega}_{mp,tu} = \sqrt{\frac{\hat{T}_{tb}}{k_{tu}}} \\ \hat{T}_e = T_e - \hat{T}_{e,tu}; \hat{T}_{e,tu} = \frac{1}{n_{bm}} \hat{T}_{tb} - B_{mp} \hat{\omega}_{mp,tu} - J_{mp} \dot{\omega}_{mp,tu} \\ \hat{U}_{q1} = \frac{R_s}{K_e} \hat{T}_{e,tu} + \frac{L_s}{K_e} \dot{\hat{T}}_{e,tu} + \psi_{mp} P \hat{\omega}_{mp,tu} + PL_s \omega_{mp} \dot{d} \\ \hat{U}_{d1} = -\frac{PL_s}{K_e} \omega_{mp} T_e \end{cases} \quad (30)$$

Khi đó luật điều khiển theo phương trình số (19) trở thành:

$$u = \hat{u}_1 + K_{tu} \hat{x} \tag{31}$$

Trong đó: $\hat{x} = [\hat{\omega}_{mp} \quad \hat{T}_e \quad i_d]^T$, $\hat{u}_1 = [\hat{u}_{q1} \quad \hat{u}_{d1}]^T$

Sau đó, từ (30), các phương trình sau đây đạt được:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= x + D x_e \\ \dot{\hat{u}}_1 &= u_1 + F x_e \end{aligned} \tag{32}$$

Trong đó: $x_e = [e \quad \dot{e} \quad \ddot{e}]$,

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ d_2 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$e = T_{tb} - \hat{T}_{tb}$$

$$d_1 = \frac{1}{\sqrt{k_{tu}} (\sqrt{T_{tb}} + \sqrt{\hat{T}_{tb}})}$$

$$d_2 = \frac{1}{n_{bm}} - \frac{B_{np}}{J_{mp}} d_1 + J_{mp} n_2, \quad d_3 = -J_{mp} n_1,$$

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{k_{tu} T_{tb}}}, \quad n_2 = \frac{\dot{\hat{T}}_{tb}}{2\sqrt{\hat{T}_{tb} T_{tb}}}, \quad n_3 = \frac{n_1}{2T_{tb}}$$

$$n_4 = \left(\frac{T_{tb} + \hat{T}_{tb} + \sqrt{\hat{T}_{tb} T_{tb}}}{2T_{tb} \hat{T}_{tb}} + \frac{\ddot{\hat{T}}_{tb}}{\hat{T}_{tb}} \right) n_2 d_1,$$

$$m_1 = \psi_{mp} P d_1 + \frac{L_s}{K_e} n_3 + \frac{R_s}{K_e} d_2, \quad m_2 = d_3 + \frac{L_s}{K_e} n_4, \quad m_3 = \frac{L_s}{K_e} n_1$$

5.2. Chứng minh tính ổn định của bộ điều khiển vòng kín

Để phân tích tính ổn định của bộ điều khiển vòng kín, chúng ta viết lại hai phương trình (31) và (32) dưới dạng:

$$u = u_1 + K_{tu} x + N x_e \tag{33}$$

Trong đó: $N = F + KD$

Thay thế tín hiệu điều khiển u từ (33) vào phương trình (17), khi đó phương trình trạng thái hệ thống có được viết lại như sau:

$$\dot{x} = (A + BK_{tu})x + BNx_e \tag{34}$$

Phương trình (34) cùng với (21) hình thành hệ thống vòng kín của hệ thống điều khiển dựa trên bộ quan sát.

Bổ đề 1: Xem xét hệ thống sau:

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z, y) \\ \dot{y} = s(y) \end{cases} \tag{35}$$

Trong đó: $\dot{y} = s(y)$ là ổn định tiệm cận tại $y = 0$. Nếu $z = f(z, y)$ ổn định tiệm cận tại $z = 0$, thì hệ thống (36) ổn định tiệm cận tại $(z, y) = (0, 0)$ [14].

Định lý 3: Với bộ điều khiển (17), bộ quan sát (24), và bộ quan sát thu được thỏa mãn Định lý 2 và 3, sai số theo dõi x và lỗi ước lượng x_e trong (32) thì hệ thống ổn định tại 0.

Chứng minh: Thứ nhất, theo Định lý 1, hệ thống:

$$\dot{x} = (A + BK_{tu})x \tag{36}$$

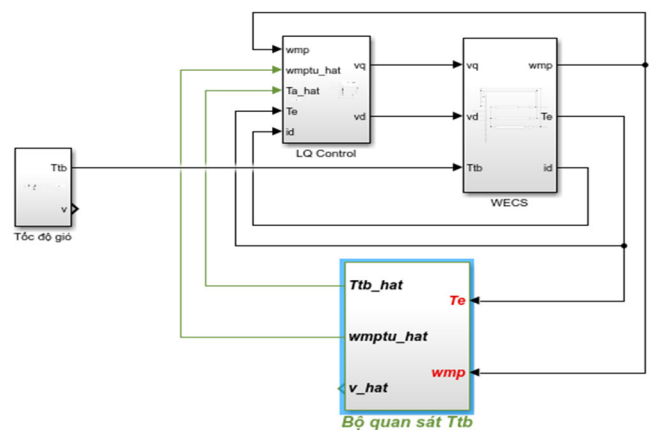
có trạng thái cân bằng ổn định tiệm cận ở mức 0.

Thứ hai, với các bộ quan sát cho trong (24), và bộ quan sát thu được thỏa mãn Định lý 2 và 3, chứng minh được hệ ổn định tiệm cận tại $e = 0$. Thật đơn giản để chứng minh rằng, vì $e = 0$ ổn định tiệm cận tại 0. Nó có nghĩa là, x_e ổn định tiệm cận ở 0.

Từ Bổ đề 1 cho ta biết rằng lỗi theo dõi x và lỗi ước lượng x_e , trong (34) ổn định tiệm cận ở mức 0.

6. MÔ PHỎNG

Trong phần này, nghiên cứu được mô phỏng được trình bày để chứng minh tính hiệu quả của sơ đồ điều khiển được đề xuất. Chúng ta hãy xem xét một WECS dựa trên PMSG với các tham số: Công suất phát điện định mức: $P_{rate} = 5kW$; Số đôi cực từ $p = 14$; Điện trở cuộn dây stator: $R_s = 0,3676\Omega$; Điện cảm cuộn dây stator: $L_s = 3,55mH$; Từ thông máy phát: $\psi_{mp} = 0,28667V.s/rad$; Mô men quán tính rô-tô máy phát: $J_{mp} = 7,856kg.m^2$; Hệ số ma sát nhớt trên ổ trục máy phát: $B_{mp} = 0,02kg/m^3$; Bán kính rô-tô tuabin gió: $R_{tb} = 1,84m$; Mật độ không khí: $\rho = 1,225kg/m^3$.



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Matlab/Simulink

Trong hình 3, sơ đồ mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Matlab/Simulink của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió dựa trên máy phát điện kích từ nam châm vĩnh cửu sử dụng sơ đồ điều khiển tối ưu dựa trên bộ quan sát bậc cao.

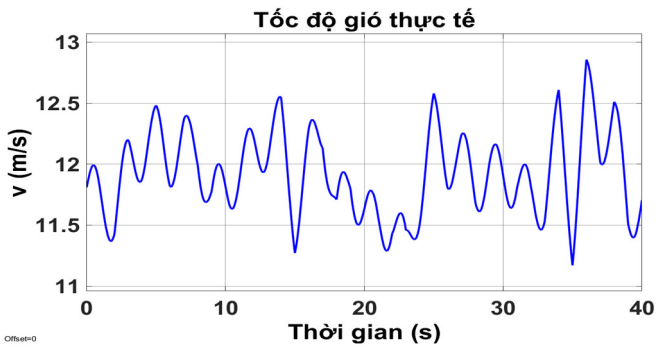
Tất cả các nghiên cứu mô phỏng đều được thực hiện thông qua Matlab/Simulink. Biên dạng gió được chọn với giá trị trung bình là 12,13m/s và cường độ nhiễu loạn là 15,23% [15], biên dạng này được minh họa trong hình 4. Hệ số công suất C_p được ước tính phân tích bằng một hàm [16] với $\lambda_{opt} = 8,09$ và $C_{pmax} = 0,326$. Các ma trận trọng số của LQR được chọn như sau: $Q = \text{diag}(1e8,1,1)$ và $R=1e-3\text{diag}(1,1)$ và hệ số bộ quan sát được chọn như sau: $L_0 = 50; L_1 = 250; L_2 = 500$.

Để chứng minh tính hiệu quả của phương pháp, tác giả so sánh với phương pháp điều khiển PID có sử dụng bộ quan sát bậc cao. Hiệu suất đánh giá bằng sai số trung bình (MAE) của việc theo dõi tốc độ góc tuyệt đối của rô to máy phát điện $|\hat{\omega}|$.

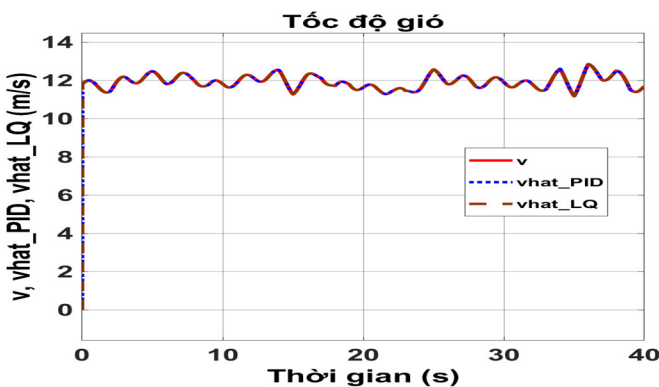
Bảng 1 tóm tắt các kết quả so sánh bằng số của các trường hợp và phương pháp được điều tra. Các kết quả so sánh cho thấy tính ưu việt của phương pháp đề xuất so với phương pháp điều khiển sử dụng bộ điều khiển PI thường và PI có sử dụng bộ quan sát.

Bảng 1. Kết quả so sánh giữa LQ_HOOD với PI và PI_HOOD

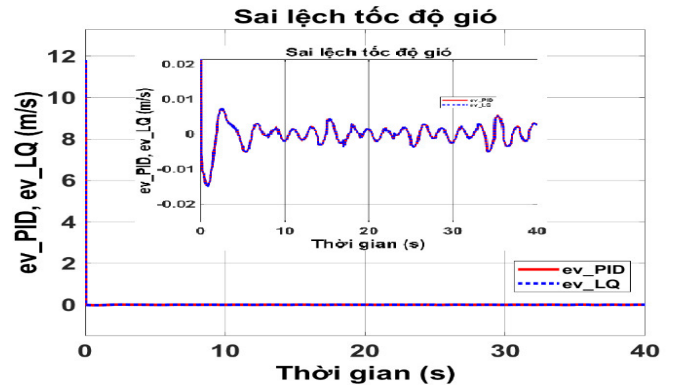
Bộ điều khiển	Sai số trung bình (MAE)
Bộ điều khiển LQ	0,0012
Bộ điều khiển PI sử dụng bộ quan sát bậc cao	0,0519
Bộ điều khiển PI thường	0,1642



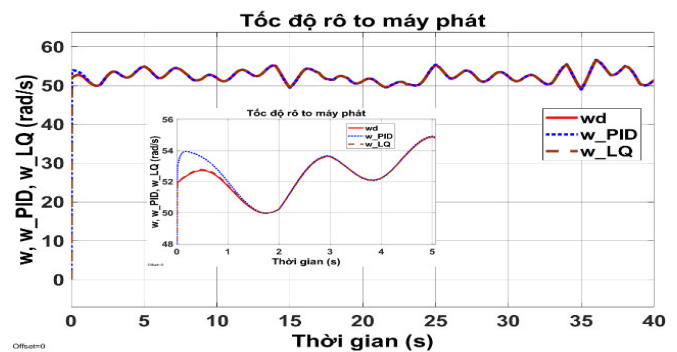
Hình 4. Biên dạng gió nghiên cứu (được lấy từ bộ đo tốc độ gió thực tế)



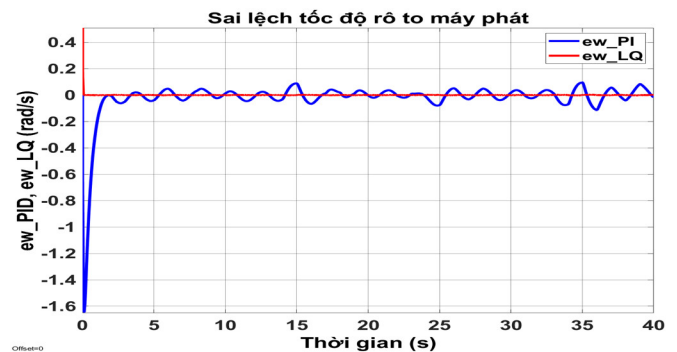
Hình 5. Tốc độ gió thực tế v và tốc độ gió ước tính vhat_PID, vhat_LQ thông qua bộ quan sát bậc cao



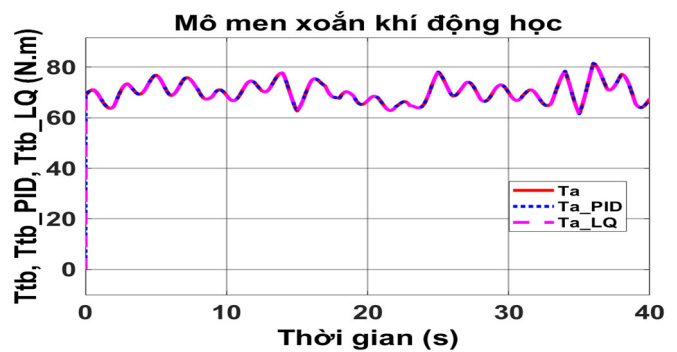
Hình 6. Sai lệch giữa tốc độ gió thực tế và tốc độ ước tính thông qua bộ quan sát bậc cao ($e_v = v - v_hat$ (m/s))



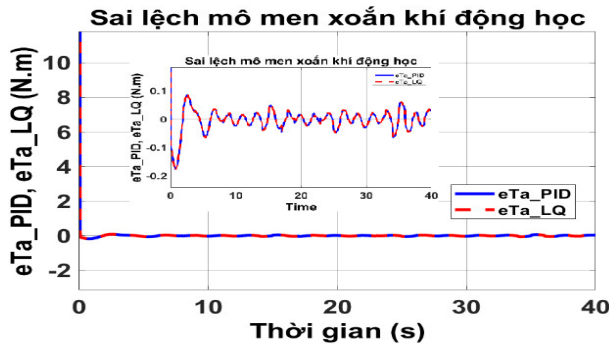
Hình 7. Tốc độ thực tế rô-to ω và tốc độ ước tính tham chiếu $\hat{\omega}_{mp,tu}$ của rô to máy phát



Hình 8. Sai lệch giữa tốc độ thực tế và tốc độ ước tính tham chiếu của rô to máy phát ($e_w = \omega - \hat{\omega}_{mp,tu}$ (rad/s))



Hình 9. Mô men xoắn khí động học từ thực tế T_{tb} và ước tính \hat{T}_{tb} trên trục của tuabin



Hình 10. Sai lệch giữa mô men xoắn khí điện từ thực tế và ước tính thông qua bộ quan sát bậc cao ($e_{T_b} = T_{tb} - \hat{T}_{tb}$ rad/s)

Nhận thấy rằng: bộ điều khiển LQ đáp ứng được yêu cầu điều khiển với tốc độ gió thay đổi. Với tốc độ gió thay đổi, bộ điều khiển vẫn đáp ứng yêu cầu điều khiển tốc độ rô to máy phát bám theo tốc độ rô to tham chiếu. Trong hình 5 hiển thị tốc độ gió thực tế (v), tốc độ ước tính (\hat{v}). Hình 6 hiển thị kết quả sai lệch tốc độ gió thực tế v và tốc độ gió ước tính \hat{v} . Hình 7 hiển thị tốc độ góc tham chiếu (ω_{tc_hat}), tốc độ góc thực tế (ω) của rô to máy phát. Hình 8 hiển thị kết quả lỗi theo dõi tốc độ góc của rô to máy phát điện ($e_{\omega} = \tilde{\omega} = \omega - \omega_{tc_hat}$).

Hình 9 hiển thị mô men xoắn khí động học thực tế (T_{tb}), mô men xoắn khí động học ước tính (T_{a_hat}). Hình 10 hiển thị kết quả lỗi mô men xoắn khí động học ($e_{T_b} = T_{tb} - T_{tb_hat}$), sử dụng phương pháp tính giá trị trung bình tuyệt đối của sai lệch (Mean absolute error performance - mae) ta có giá trị là: 0,0394.

7. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, bộ điều khiển bậc hai tuyến tính (LQR) dựa trên bộ quan sát nhiễu bậc cao (HOOD) đã được đề xuất cho bộ chuyển đổi năng lượng gió (WECS) sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) mà không cần đo tốc độ gió hoặc mô-men xoắn khí động học. Một bộ quan sát nhiễu phi tuyến bậc cao được sử dụng để ước tốc độ góc tối ưu của rô-to máy phát và mô men xoắn điện từ trong máy phát điện. Kết quả mô phỏng chứng minh hiệu suất vượt trội của hệ thống điều khiển LQR dựa trên bộ quan sát HOOD được đề xuất so với hệ thống điều khiển dựa trên PI quan sát, PI thông thường. Mặc dù, hệ thống điều khiển đề xuất đã được áp dụng cho WECS dựa trên PMSG, chúng tôi tin rằng có thể mở rộng bộ điều khiển sang các hệ thống khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. V. Yaramasu, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies," *IEEE*, 103.5, 740-788, 2015.

[2]. T. D. Do, "Disturbance observer-based fuzzy SMC of WECSs without wind speed measurement," *IEEE access*, 5, 147-155, 2016.

[3]. C. A. Evangelista, "Receding horizon adaptive second-order sliding mode control for doubly-fed induction generator based wind turbine," *IEEE Transactions on control systems technology*, 25, 1, 73-84, 2016.

[4]. Á. M. G. E. Zuluaga CD., "Short-term wind speed prediction based on robust Kalman filtering: an experimental comparison," *Appl Energy*, 156, 321-330, 2015.

[5]. T. L. C. Hodzic M., "Grey predictor reference model for assisting particle swarm optimization for wind turbine control," *Renew Energy*, 86, 251-256, 2016.

[6]. Li D. Y., "Neuro-adaptive variable speed control of wind turbine with wind speed estimation," *IEEE Trans Ind Electron*, 63, 12, 7754-7764, 2016.

[7]. O. J. Puleva T., "Wind turbine power control based on aero dynamical torque estimation," *Cybernetics & Informatics (K&I)*, *IEEE*, 1-6, 2016.

[8]. B. 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: e2697., 29, 1, e2697, 2019. <https://doi.org/10.1002/etep.2697>, 2018.

[9]. W. Jian Chen, "A feedback linearization control strategy for maximum power point tracking of a PMSG based wind turbine," *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Madrid, Spain, 79-84, 2013.

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

[11]. T. D. Do, "Optimal control designfor chaos suppression of PM synchronous motors," *International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, vol. 2nd, 88-92, 7, 2016.

[12]. G. O. Corradini, "Robust control of variable-speed wind turbines based on an aerodynamic torque observer," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21, 1199-1206, 2013.

[13]. T. N. Do, "A generalized observer for estimating fast-varying disturbances," *IEEE Access*, 6, 28054-28063, 2018.

[14]. A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*. Springer, 1995.

[15]. S. Rehman, N. M. Al-Abadi, "Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom, Saudi Arabia," *Renewable Energy*, 33.12, 2653-2660, 2008.

[16]. P. P. Valenciaga F., "High-order sliding control for a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous," *IEEE Trans Energy Convers*, 23, 3, 860-704, 2008.

[17]. F. 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, 860-867, 2008.

AUTHOR INFORMATION

Dang Quoc Du

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