

Tổng hợp bộ điều khiển góc Pitch bám điểm công suất tối ưu cho tua-bin gió dựa trên hệ logic mờ và điều khiển mặt động

Nghiêm Xuân Thuớc^{1*}, Đào Hoa Việt², Đỗ Mạnh Dũng³,
Nguyễn Đăng Toàn¹, Hoàng Quốc Xuyên¹

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội, 298 Cầu Diễn, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

²Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

³Đại học Phenikaa, Yên Nghĩa, Hà Đông, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: xuanthuocstudonghoa@gmail.com

Nhận bài: 20/5/2024; Hoàn thiện: 28/8/2024; Chấp nhận đăng: 29/8/2024; Xuất bản: 25/10/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024.50-60>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về một phương pháp nâng cao hiệu suất làm việc của tua-bin gió bằng hệ logic mờ. Hệ logic mờ đóng vai trò một hệ chuyên gia nhằm xác định góc Pitch mong muốn từ tốc độ gió để đảm bảo công suất phát của tua-bin gió đạt giá trị tối ưu. Để đảm bảo góc Pitch bám góc Pitch mong muốn, một bộ điều khiển mặt động được đề xuất. Kết quả và chất lượng hệ thống điều khiển mặt động Pitch kết hợp với hệ logic mờ được phân tích bằng mô phỏng số với các kịch bản khác nhau.

Từ khóa: Tua-bin gió; Góc Pitch; Điều khiển mặt động; Hệ logic mờ; Điểm công suất tối ưu

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, năng lượng sạch dần thay thế các nguồn năng lượng truyền thống như than, dầu mỏ và khí đốt để sản xuất điện năng. Một trong những nguồn năng lượng sạch có nhiều tiềm năng khai thác là năng lượng điện gió, nguồn năng lượng điện gió thường biến động theo tốc độ gió nên điều khiển chuyển đổi năng lượng gió là thách thức lớn với các nhà khoa học [1, 2]. Thách thức đó là điều khiển góc Pitch tua-bin gió để đảm bảo hiệu suất chuyển đổi tối ưu.

Một trong những nhiệm vụ trọng tâm đối với hệ thống tua-bin gió là xác định được góc Pitch đảm bảo tua-bin gió làm việc với điểm công suất tối ưu. Trong [3, 4], các tác giả đã khảo sát sự phụ thuộc của hệ số công suất theo tốc độ gió. Theo đó, khi gió ổn định, xác định góc Pitch của tua-bin gió tương đối dễ dàng. Ngược lại, khi tốc độ gió thay đổi hoặc khi có biến động do thời tiết, việc tự động điều chỉnh góc Pitch của tua-bin gió sao cho duy trì được hệ số công suất cực đại là điều không hề dễ dàng. Đứng trước thách thức đó, hệ chuyên gia được xây dựng trên cơ sở mạng nơ-ron nhân tạo [5] hoặc hệ logic mờ, các hệ này không những có khả năng học rất cao mà quy trình thiết kế của chúng không phụ thuộc vào cấu trúc của tua-bin gió. Vì vậy, nội dung bài báo này, hệ logic mờ được đề xuất để tự động xác định góc Pitch mong muốn. Hệ logic mờ được huấn luyện trên cơ sở dữ liệu đã công bố trong các công trình [3, 4] và [18].

Để đảm bảo góc Pitch bám góc Pitch mong muốn, đã có nhiều công trình công bố trong một thập kỷ gần đây. Các nghiên cứu trải rộng từ bộ điều khiển PID truyền thống [5, 7] đến các phương pháp điều khiển đặc thù như điều khiển tối ưu toàn phương LQR (Linear quadratic Regulator) [6] hay điều khiển trượt [8-13]. Các phương pháp kể trên mặc dù đã chứng tỏ được công dụng trong điều hướng góc Pitch, song vẫn còn tồn tại những nhược điểm mang tính đặc thù. Khi thực thi bộ điều khiển PI trong [1] hay LQR trong [6] đối với tua-bin gió, yêu cầu bắt buộc phải tuyến tính hoá mô hình trong phạm vi góc nghiêng nhỏ. Trong trường hợp tốc độ gió vượt ra khỏi phạm vi cho phép, bộ điều khiển trong [5, 6] không thể điều hướng cánh quạt phù hợp, nên công suất phát của tua-bin gió không thể tối ưu. Để khắc phục nhược điểm này, bộ điều khiển trượt đã được đề xuất ở [8-10]. Mặc dù mang lại tính bền vững song hiện tượng chattering sinh ra làm cho bộ phận truyền động của tua-bin bị phát nóng cục bộ [5]. Trước hạn chế đó, bài báo này đề xuất sử dụng phương pháp điều khiển mặt động để thiết kế bộ điều khiển góc Pitch, dựa trên cơ sở kỹ thuật

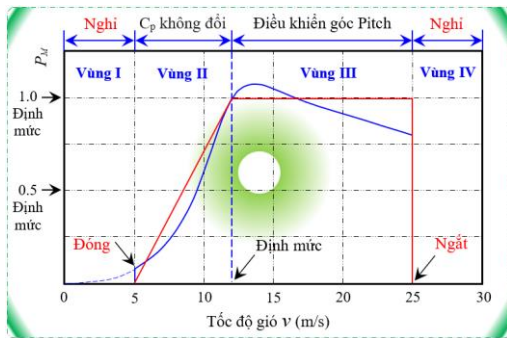
Backstepping, bộ điều khiển mặt động cho góc Pitch có khả năng loại trừ nhiễu cao tần và giảm bớt độ phức tạp trong quy trình thiết kế so với bộ điều khiển Backstepping truyền thống [14] do được tích hợp các bộ lọc thông thấp trong bộ điều khiển. Các bộ lọc tích hợp được thiết kế sao cho động học của hệ thống điều khiển góc Pitch không bị ảnh hưởng bằng cách lựa chọn thời gian lọc phù hợp. Các đề xuất mới trong bài báo được phân tích bằng mô phỏng số.

Nội dung bài báo gồm 4 phần: Phần 1 mở đầu, phần 2 là nội dung phương pháp huấn luyện hệ logic mờ để xác định góc Pitch mong muốn và thiết kế bộ điều khiển góc Pitch dựa trên phương pháp điều khiển mặt động, phần 3 mô phỏng số và phần 4 kết luận.

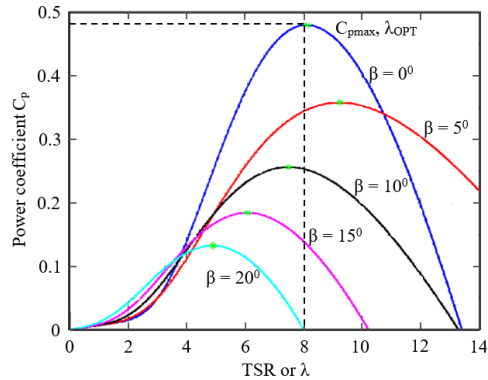
2. NỘI DUNG

2.1. Tổng hợp hệ logic mờ

Hình 1 (a) mô tả đặc tính công suất vào tốc độ gió. Tốc độ gió gồm 4 vùng. Tại vùng gió yếu (vùng I) và vùng gió mạnh (vùng IV), các thiết bị bảo vệ sẽ tự động ngắt hoạt động để đảm bảo an toàn khi vận hành. Tại vùng gió ổn định (vùng II và III), sự phụ thuộc công suất tua-bin gió vào tốc độ gió tại một giá trị góc Pitch cụ thể được thể hiện trong hình 1 (b). Hệ mờ được thiết kế nhằm đảm bảo tua-bin gió luôn vận hành tại điểm công suất cực đại.



Hình 1. (a) Đặc tính công suất của tua-bin vào tốc độ gió [19].



Hình 1. (b) Sự phụ thuộc hệ số công suất vào tốc độ gió [18] với các góc Pitch khác nhau.

Đồ thị hình 1 (b) thể hiện mối quan hệ giữa hệ số công suất của tua-bin vào λ (tỷ số giữa tốc độ đầu cánh và tốc độ gió tại những giá trị khác nhau của góc nghiêng cánh quạt). Theo [20], tỷ số λ và tốc độ gió v liên hệ với nhau bởi công thức.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\omega R}{\lambda} \quad (1)$$

Trong đó, ω là tốc độ góc của tua-bin, R là chiều dài cánh quạt. Khi tốc độ gió v thay đổi theo thời gian, xác định β để có $C_p \rightarrow C_{p_{max}}$ theo công thức giải tích tường minh là không hề dễ dàng. Căn cứ vào đồ thị hình 1 (b), cũng như dữ liệu công bố trong [3] và [4], một bảng số liệu và tính toán tốc độ gió theo công thức (1) để làm cơ sở thiết kế hệ mờ học tự động được xây dựng.

Bảng 1. Các giá trị của góc Pitch β và λ để hệ số công suất cực đại.

C_p	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.36	0.33	0.30	0.28	0.25	0.22
β	0b	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12
λ	8	8.1	8.4	8.6	8.8	9.3	8.5	7.9	7.8	7.6	6.6
v	5.235	5.170	4.985	4.869	4.759	4.503	4.927	5.301	5.358	5.510	6.345

C_p	0.19	0.18	0.17	0.15	0.14	0.10	0.08	0.06	0.02
β	14	15	16	18	20	24	25	30	35
λ	6.4	6.2	6	5.7	5	4.2	3.8	3.5	2.5
v	6.543	6,754	6.980	7.347	8.376	9.971	11.021	11.965	16.752

Thiết kế hệ mờ với đầu vào là tốc độ gió v , đầu ra là giá trị góc Pitch mong muốn β_d sao cho hệ số công suất C_p đạt cực đại theo bảng 1. Trong trường hợp gió đổi chiều, độ lớn góc Pitch không thay đổi nhưng trái dấu. Hệ mờ đề xuất với khâu mờ hoá đầu vào bao gồm 4 hàm liên thuộc dạng hình Gauss, các hàm ở đầu ra có dạng hình Sin. Luật hợp thành được luận giải như sau.

R1: Nếu v là A_1 Thì $y_1 = a_1 \cos(\omega_1 v) + b_1 \sin(\omega_1 v)$ Hoặc

R2: Nếu v là A_2 Thì $y_2 = a_2 \cos(2\omega_1 v) + b_2 \sin(2\omega_1 v)$ Hoặc

R3: Nếu v là A_3 Thì $y_3 = a_3 \cos(3\omega_1 v) + b_3 \sin(3\omega_1 v)$ Hoặc

R4: Nếu v là A_4 Thì $y_4 = a_4 \cos(4\omega_1 v) + b_4 \sin(4\omega_1 v)$

Trong đó, các hàm liên thuộc Bell tại khâu mờ hoá đầu vào của các tập mờ $A_i, i = 1, 2, 3, 4$ có

dạng $\mu_i(v, \gamma_i, c_i) = \frac{|\gamma_i|^4}{|\gamma_i|^4 + |v - c_i|^4}$. Giá trị rõ của góc Pitch tại khâu giải mờ được tính bởi.

$$\beta_d = a_o + \sum_{i=1}^4 y_i \tag{2}$$

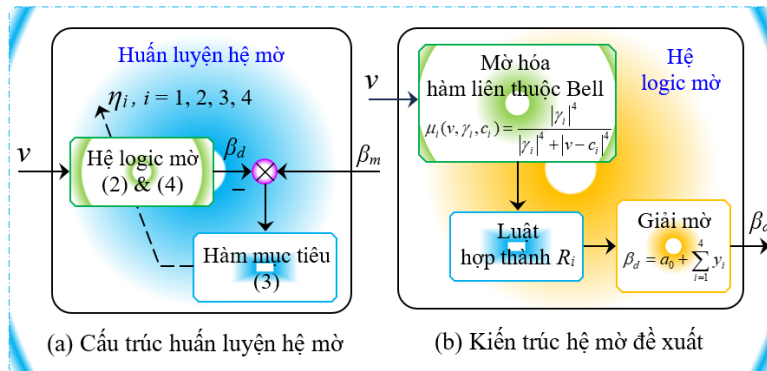
Việc huấn luyện các thông số của hệ mờ $a_i, b_i, c_i, \gamma_i, \omega_i, i = 1, 2, 3, 4$ luôn cần đảm bảo sai số giữa giá trị góc Pitch đầu ra β_d so với giá trị góc Pitch trong bảng 1, ký hiệu β_m , luôn nhỏ nhất. Vì vậy, sử dụng hàm mục tiêu của bình phương sai lệch như sau.

$$J(\eta_i, \omega_i) = \frac{1}{2} (\beta_m - \beta_d(\eta_i, \omega_i))^2 \rightarrow \min \tag{3}$$

Trong đó, $\eta_i = a_i, b_i, c_i, \gamma_i, \omega_i$. Sử dụng phương pháp hạ Gradient với hệ số học δ đủ nhỏ để cập nhật giá trị cho các tham số hệ mờ tại mỗi bước lặp theo công thức.

$$\eta_i^{k+1} = \eta_i^k + \delta (\beta_m - \beta_d(\eta_i^k, \omega_i)) \nabla_{\eta_i^k} \beta_d(\eta_i, \omega_i) \tag{4}$$

Cuối cùng, cấu trúc chi tiết hệ mờ được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Hệ logic mờ đề xuất.

2.2. Mô hình hệ động học truyền động góc Pitch

Trong [17], hệ động học truyền động góc Pitch có dạng chuẩn truyền ngược chặt như sau.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f(x_i) + g(x_i)u + d, \quad i=1,2,3 \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó, $x_1 = \beta$ là góc Pitch tua-bin gió; $x_2 = \dot{\beta}$ và $x_3 = \ddot{\beta}$ lần lượt là vận tốc và gia tốc góc Pitch. $f(x_i)$ và $g(x_i)$ là các hàm phi tuyến và d là thành phần nhiễu bên ngoài tác động vào hệ thống tua-bin gió. Hai hàm phi tuyến $f(x_i)$ và $g(x_i)$ được xác định bởi:

$$f(x_i) = \left(1 + \frac{k_D}{J_m}\right)^{-1} \left[-\frac{4KD^2}{J_m V_T} x_2 - \frac{4KC_T}{J_m V_T} \left(J_m x_3 + k_D x_2 + \frac{\tau_s}{r} \right) - \frac{\dot{\tau}_s}{J_m r} \right] \quad (6)$$

$$g(x_i) = \frac{4KD_m C_d W k_v}{J_m V_T r} \sqrt{\frac{P_s}{\rho} - \frac{\text{sgn}(x_v)}{\rho D_m} (r J_m x_3 + r k_D x_2 + \tau_s)} \quad (7)$$

Trong đó, $k_v > 0$ là hệ số khuếch đại của van servo. C_d, ρ lần lượt là hệ số xả của van và mật độ khối lượng của dòng thủy lực, P_s là áp suất bơm, D_m là độ dịch chuyển thể tích, C_T là hệ số rò rỉ, V_T là thể tích buồng chứa, K là mô đun khối chất lỏng. J_m là momen quán tính của trục động cơ thủy lực, k_D là hệ số giảm chấn nhớt. Trong đó, $\tau_s = \tau_L + \tau_F$, τ_L momen phụ tải gió, τ_F momen ma sát.

Giả thiết 1. Các yếu tố nhiễu loạn d phụ thuộc vào các trạng thái của hệ thống nhưng có biến đổi chậm theo thời gian, các yếu tố nhiễu cùng với đạo hàm theo thời gian bị chặn và đủ nhỏ.

Giả thiết 2. $g(x_i) \neq 0, \forall t \geq 0$. Giả thiết này nhằm đảm bảo hệ (1) là điều khiển được tại mọi thời điểm.

2.3. Tổng hợp bộ điều khiển mặt động

Trong phần này, nội dung sẽ trình bày quy trình thiết kế bộ điều khiển mặt động cho hệ thống tua-bin gió theo từng bước. Bộ điều khiển mặt động dựa trên cơ sở kỹ thuật Backstepping khi xét lần lượt theo từng hệ con tại mỗi bước.

Bước 1: Xét hệ con thứ nhất.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (8)$$

Trong đó, $x_1 = \beta$ và $x_2 = \dot{\beta}$. Giá trị đặt góc Pitch của tua-bin gió là β_d có được từ hệ mờ thiết kế trong phần 2, kí hiệu sai lệch bám giữa giá trị thực và giá trị đặt như sau.

$$e_1 = \beta_d - \beta = \beta_d - x_1 \quad (9)$$

Từ phương trình (9), lấy đạo hàm 2 vế thu được mô hình của hệ con thứ nhất theo sai lệch bám.

$$\dot{e}_1 = \dot{\beta}_d - \dot{x}_1 = \dot{\beta}_d - x_2 \quad (10)$$

Trong phương trình (10), x_2 là một “tín hiệu điều khiển ảo”. Do đó, nếu x_2 thoả mãn.

$$x_2 = \alpha_1 = c_1 e_1 + b_1 \text{sgn}(e_1) + \dot{\beta}_d \quad (11)$$

Mô hình hệ con (10) có dạng.

$$\dot{e}_1 = \dot{\beta}_d - \alpha_1 = -c_1 e_1 - b_1 \operatorname{sgn}(e_1) = \begin{cases} -c_1 e_1 - b_1, & e_1 \geq 0 \\ -c_1 e_1 + b_1, & e_1 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó: c_1, b_1 là hằng số dương. Phương trình (12), khi $e_1 \geq 0$ thì $\dot{e}_1 = -c_1 e_1 - b_1 < 0$. Do vậy, quỹ đạo của sai lệch bám e_1 sẽ luôn giảm về gốc toạ độ. Ngược lại trong trường hợp $e_1 < 0$ thì $\dot{e}_1 = -c_1 e_1 + b_1 > 0$. Quỹ đạo của sai lệch bám trong không gian trạng thái sẽ luôn tăng đến gốc toạ độ. Vậy trong cả hai trường hợp, luôn có $e_1 \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow +\infty$ và $|e_1| < +\infty$. Do đó, nhiệm vụ của bước tiếp theo phải làm cho $x_2 \rightarrow \alpha_1$ khi $t \rightarrow +\infty$.

Bước 2: Nhiệm vụ của bước này là làm cho $x_2 \rightarrow \alpha_1$ khi $t \rightarrow +\infty$. Để làm được điều đó, xét hệ con thứ hai trong mô hình điều khiển góc Pitch của tua-bin gió.

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (13)$$

Trong đó, $x_2 = \dot{\beta}$ và $x_3 = p_s$. Rõ ràng giá trị α_1 bây giờ đóng vai trò như tín hiệu đặt của x_2 . Do đó, định nghĩa sai lệch bám thứ hai là $e_2 = \alpha_1 - x_2$. Lấy đạo hàm 2 vế của e_2 kết hợp với các phương trình (9), (11), (13) ta có.

$$\dot{e}_2 = \dot{\alpha}_1 - x_3 = \left[c_1 (\dot{\beta}_d - x_2) + b_1 \delta(e_1) + \ddot{\beta}_d \right] - x_3 \quad (14)$$

Trong đó, $\delta(e_1) = \frac{d(\operatorname{sgn}(e_1))}{dt} = \begin{cases} +\infty, & e_1 = 0 \\ 0, & e_1 \neq 0 \end{cases}$ kí hiệu cho hàm xung Dirac. Do hàm xung Dirac

không thể tạo ra được trong thực tế nên (14) không thực hiện được. Vì vậy, cho α_1 đi qua bộ lọc thông thấp với hằng số thời gian T_1 . Bộ lọc thông thấp đề xuất là hệ LTI (Linear Time-Invariant) với biến trạng thái z_1 thoả mãn điều kiện đầu $z_1(0) = 0$, mô hình toán học như sau.

$$\dot{z}_1 = -\frac{1}{T_1} z_1 + \frac{1}{T_1} \alpha_1 \quad (15)$$

Ở **Bước 1**, do có $|e_1| < +\infty$ nên từ (11), cũng có $|\alpha_1| < +\infty$. Mặt khác do hệ (15) là LTI nên suy ra hệ (15) là ổn định BIBO (Bounded Input – Bounded Output). Từ đó, cũng sẽ có $|z_1| < +\infty$ và $|\dot{z}_1| < +\infty$. Theo [15], nếu chọn hằng số thời gian T_1 của bộ lọc rất bé, từ (15) ta có.

$$\alpha_1 = T_1 \dot{z}_1 + z_1 \Rightarrow \alpha_1 \approx z_1 \Rightarrow \dot{\alpha}_1 = \dot{z}_1 + \xi(z_1) = \frac{\alpha_1 - z_1}{T_1} + \xi(z_1) \quad (16)$$

Với $\xi(z_1)$ là sai số của bộ lọc thoả mãn $|\xi(z_1)| < +\infty$ và $\xi(0) = 0$. T_1 càng bé thì sai số $\xi(z_1)$ cũng càng bé [15]. Do vậy, (14) trở thành.

$$\dot{e}_2 = \dot{\alpha}_1 - x_3 = T_1^{-1} (\alpha_1 - z_1) - x_3 + \xi(z_1) \quad (17)$$

Tương tự như **Bước 1**, trong phương trình (17), x_3 cũng đóng vai trò như một “tín hiệu điều khiển ảo”. Vì vậy, nếu x_3 thoả mãn điều kiện.

$$x_3 = \alpha_2 = c_2 e_2 + b_2 \operatorname{sgn}(e_2) + T_1^{-1} (\alpha_1 - z_1) \quad (18)$$

Với c_2, b_2 là các hằng số dương. Thay phương trình (18) vào phương trình (17), ta có.

$$\dot{e}_2 = -c_2 e_2 - b_2 \operatorname{sgn}(e_2) + \xi(z_1) \quad (19)$$

Từ (19), quỹ đạo trạng thái của sai lệch e_2 luôn bị hút về một đa tạp bất biến bao góc $\Delta = \left\{ e_2 \in \mathbb{R} \mid |e_2| < \frac{|\xi(z_1)|}{b_2} \right\}$. Khi có $T_1 \ll$ và b_2 đủ lớn thì đa tạp Δ sẽ thu về một lân cận rất bé của gốc toạ độ. Do đó, hệ (19) là ISS theo [16]. Chú ý rằng, sẽ chỉ có $e_2 \rightarrow \Delta$ khi đã có $x_3 \rightarrow \alpha_2$. Từ đây, nhiệm vụ của bước cuối cùng sẽ phải làm cho $x_3 \rightarrow \alpha_2$ khi $t \rightarrow +\infty$.

Bước 3: Nhiệm vụ của bước này là làm cho $x_3 \rightarrow \alpha_2$ khi $t \rightarrow +\infty$. Để làm được điều đó, xét hệ động lực học trong mô hình điều khiển góc Pitch của tua-bin gió.

$$\dot{x}_3 = f(x_i) + g(x_i)u + d, \quad i=1,2,3 \quad (20)$$

Giá trị α_2 đóng vai trò như tín hiệu đặt của x_3 . Do đó, định nghĩa sai lệch bám thứ ba là $e_3 = \alpha_2 - x_3$. Lấy đạo hàm hai vế của e_3 kết hợp (20), ta có.

$$\dot{e}_3 = \dot{\alpha}_2 - f(x_i) - g(x_i)u - d \quad (21)$$

$$\dot{\alpha}_2 = -c_2 x_2 + b_2 \delta(e_2) - T_1^{-1} \dot{z}_1 + (c_2 + T_1^{-1}) (c_1 (\dot{\beta}_d - x_2) + b_1 \delta(e_1) + \ddot{\beta}_d) \quad (22)$$

Biểu thức tính $\dot{\alpha}_2$ trong (22) không thể thực hiện do hàm xung Delta $\delta(e_2)$ không thể tạo ra. Ngoài ra, đây là biểu thức khá cồng kềnh. Vì vậy, để tránh bùng nổ tổ hợp, tiến hành cho α_2 đi qua một bộ lọc thông thấp với cấu trúc giống với (15) và có hằng số thời gian $T_2 < T_1$, biến trạng thái z_2 . Từ đây suy ra.

$$\dot{\alpha}_2 = T_2^{-1} (\alpha_2 - z_2) + \xi(z_2) \quad (23)$$

Với $\xi(z_2)$ là sai số của bộ lọc thoả mãn $|\xi(z_2)| < +\infty$ và $\xi(0) = 0$. T_2 càng bé thì sai số $\xi(z_2)$ cũng càng bé. Từ (21) và (23) suy ra.

$$\dot{e}_3 = T_2^{-1} (\alpha_2 - z_2) - f(x_i) - g(x_i)u - d + \xi(z_2) \quad (24)$$

Từ phương trình (24), tín hiệu điều khiển tua-bin gió, thiết kế theo kỹ thuật DSC có dạng.

$$u = g^{-1}(x_i) [T_2^{-1} (\alpha_2 - z_2) - f(x_i) + c_3 e_3 + b_3 \tanh(e_3)] \quad (25)$$

Với c_3, b_3 là các hằng số dương. Thay phương trình (25) và phương trình (24) thu được:

$$\dot{e}_3 = -c_3 e_3 - b_3 \tanh(e_3) - d + \xi(z_2) \quad (26)$$

Từ phương trình (26), quỹ đạo trạng thái của sai lệch e_3 luôn bị hút về một đa tạp bất biến bao góc $\Delta^o = \left\{ e_3 \in \mathbb{R} \mid |e_3| < \frac{|\xi(z_1)|}{b_3} + \frac{|d|}{b_3} \right\}$. Khi có $T_2 \ll$ và b_3 đủ lớn thì đa tạp Δ^o sẽ thu về một lân cận rất bé của gốc toạ độ. Do đó, hệ (26) là ISS theo [16]. Kết hợp với hệ mờ, sơ đồ vòng kín được thể hiện trong hình dưới.

Định lý 1: Bộ điều khiển mặt động (25) cho hệ thống điều khiển góc Pitch của tua-bin gió sẽ đảm bảo góc Pitch của cánh quạt bám ổn định theo góc Pitch mong muốn khi các hằng số bộ điều khiển c_i, b_2, b_3 với $i=1,2,3$ thoả mãn: $c_3 > c_2 > c_1 > 0$, $|\xi(z_1)| < b_2$ và $|\xi(z_2)| + |d| < b_3$, trong đó, $\xi(z_1)$ và $\xi(z_2)$ là sai số của hai bộ lọc.

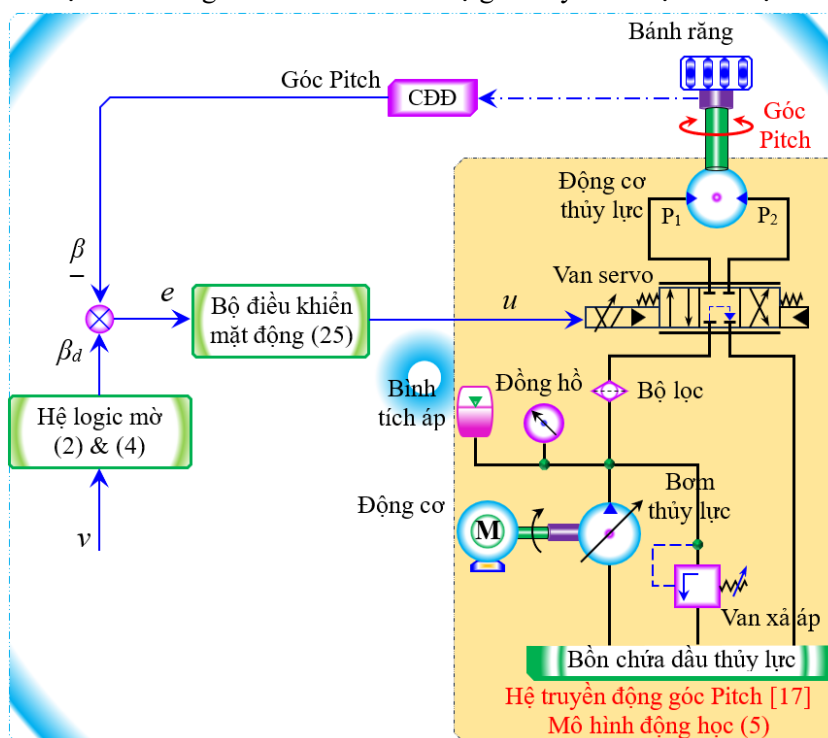
Chứng minh: Sử dụng hàm điều khiển Lyapunov có dạng $V = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2$. Đạo hàm hai vế hàm Lyapunov thu được $\dot{V} = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3$. Nếu sử dụng bộ điều khiển (25), kết hợp với (12), (19) và (26) thu được:

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} e_1(-c_1e_1 - b_1\text{sgn}(e_1)) + e_2(-c_2e_2 - b_2\text{sgn}(e_2) + \xi(z_1)) \\ +e_3(-c_3e_3 - b_3\tanh(e_3) - d + \xi(z_2)) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\Rightarrow \dot{V} < [-c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - c_3e_3^2 + |e_2|(|\xi(z_1)| - b_2) + (|\xi(z_2)| + |d| - b_3)|e_3|] \quad (28)$$

Do vậy, nếu chọn b_2 và b_3 dương và đủ lớn sao cho $|\xi(z_1)| < b_2$ và $|\xi(z_2)| + |d| < b_3$ sẽ luôn tồn tại 2 số dương λ_1 và λ_2 sao cho $\dot{V} < -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - c_3e_3^2 - \lambda_1|e_2| - \lambda_2|e_3| < 0$. Ngoài ra, chỉ có $e_1 \rightarrow 0$ khi đã có $e_2 \rightarrow \Delta$. Tiếp theo, cũng chỉ có được $e_2 \rightarrow \Delta$ khi đã có $e_3 \rightarrow \Delta^o$. Vì vậy, phải chọn $c_i, i=1,2,3$ sao cho $c_3 > c_2 > c_1 > 0$. Ta có điều phải chứng minh.

Sơ đồ điều khiển góc Pitch kết hợp giữa hệ mờ đề xuất và bộ điều khiển mặt động đảm bảo tua-bin gió vận hành tại điểm công suất tối ưu khi tốc độ gió thay đổi được thể hiện hình 3.



Hình 3. Sơ đồ điều khiển góc Pitch kết hợp hệ logic mờ.

3. MÔ PHỎNG

Thực hiện mô phỏng với tham số mô hình bảng 2, cấu trúc điều khiển trình bày hình 3.

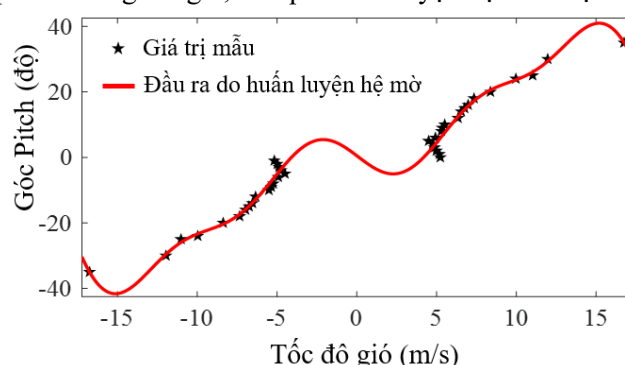
Các tham số bộ điều khiển được lựa chọn lần lượt là $c_3 = 8, c_2 = 5, c_1 = 3; b_1 = 0.2, b_2 = 0.1$. Tham số hai bộ lọc được lựa chọn là $T_1 = 0.1(s)$ và $T_2 = 0.01(s)$. Thực hiện mô phỏng, hệ thống tua-bin gió luôn chịu ảnh hưởng của nhiễu ngẫu nhiên, biên độ dao động trong khoảng $(-30,30)$.

Bảng 2. Tham số mô hình hệ thống điều hướng tua-bin gió [17].

k_v	200	$J_m (kg.m^2)$	4×10^3
C_d	0.63	$C_T (m^5 / N.s)$	3.2×10^{-12}
$K (Pa)$	6.86×10^8	$k_D (N.s.m)$	32
$\rho (kg / m^3)$	947	$W (m)$	0.01
$V_T (m^3)$	4×10^{-4}	$P_s (Pa)$	20×10^6
$D_m (m^3 / rad)$	1.2×10^{-4}		

3.1. Kiểm chứng kết quả huấn luyện hệ mờ

Dựa vào giá trị tập mẫu trong bảng 1, kết quả huấn luyện hệ mờ được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Kết quả huấn luyện hệ mờ.

Quan sát hình 4, dựa vào số liệu đã có trong bảng 1, hệ mờ đã xấp xỉ chính xác sự phụ thuộc của góc Pitch vào tốc độ gió mà tại đó công suất đạt tối ưu. Ngoài ra, thấy rằng trong khoảng tốc độ gió yếu $-5(m/s) \leq v \leq 5(m/s)$, mặc dù hệ mờ vẫn cho ra một đặc tính trơn, liên tục song không ảnh hưởng đến hệ thống tua-bin gió. Bởi vì khi gió yếu, hệ thống đóng ngắt tự động đã dừng toàn bộ hoạt động. Kết quả đầu ra khi huấn luyện hệ mờ được thể hiện bằng phương trình (29).

$$\beta_d = \left[\begin{array}{l} a_0 + a_1 \cos(\omega_1 v) + b_1 \sin(\omega_1 v) + a_2 \cos(2\omega_1 v) + b_2 \sin(2\omega_1 v) \\ + a_3 \cos(3\omega_1 v) + b_3 \sin(3\omega_1 v) + a_4 \cos(4\omega_1 v) + b_4 \sin(4\omega_1 v) \end{array} \right] \quad (29)$$

Trong đó: $a_0 = 0.009421$, $a_1 = 0.08501$, $a_2 = 0.1719$, $a_3 = -0.003714$, $a_4 = 0.3343$, $b_1 = 27.11$, $b_2 = -18.29$, $b_3 = 4.167$, $b_4 = -6.41$ và $\omega = 0.1624$.

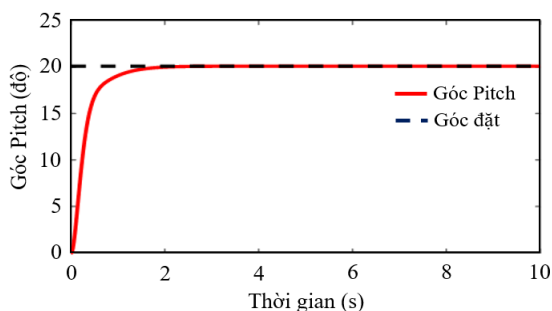
3.2. Kiểm chứng kết quả điều khiển góc Pitch và bám công suất tối ưu

Kết quả được thực hiện 2 trường hợp gồm: Khi tốc độ gió v là hằng số và khi tốc độ gió v thay đổi theo thời gian. Giá trị đặt góc Pitch được tính theo công thức (29).

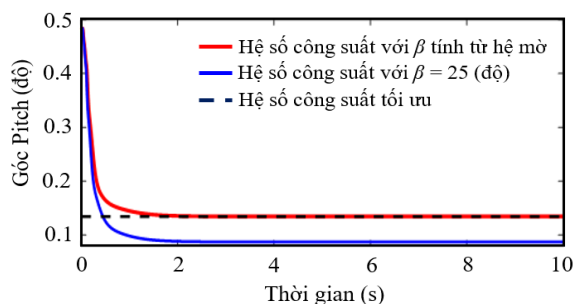
Trường hợp 1: Tốc độ gió v là hằng số.

Trong trường hợp này, tốc độ gió v được chọn bằng $v = 8.2(m/s)$. Từ công thức (29), tính toán được $\beta_d = 20.0914$ (độ). Kết quả được thể hiện trong hình 5 và hình 6, trường hợp góc Pitch cố định tại $\beta = 25^\circ$, giữ nguyên tốc độ gió.

Quan sát hình 5 và hình 6, với bộ điều khiển mặt động đề xuất, giá trị góc Pitch bám theo giá trị đặt rất nhanh (khoảng 2 s). Cùng với đó, hệ số công suất tương ứng với trường hợp sử dụng hệ mờ cũng đạt đến giá trị tối ưu gần với giá trị trong bảng 1. Chứng tỏ hiệu quả của phương pháp đề xuất trong việc giúp tua-bin gió bám điểm công suất tối ưu.



Hình 5. Gốc Pitch tua-bin gió và giá trị đặt.



Hình 6. Đồ thị hệ số công suất.

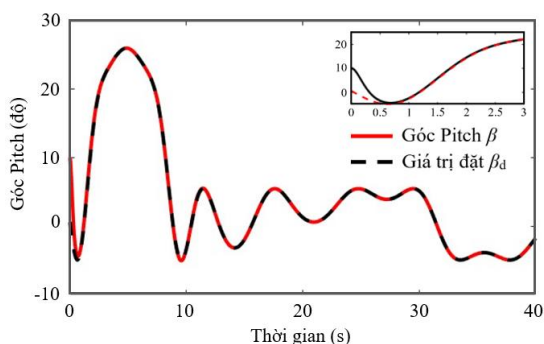
Trường hợp 2: Khi tốc độ gió v thay đổi theo thời gian.

Trong trường hợp này, tốc độ gió v được giả thiết thay đổi theo thời gian, có quy luật sau.

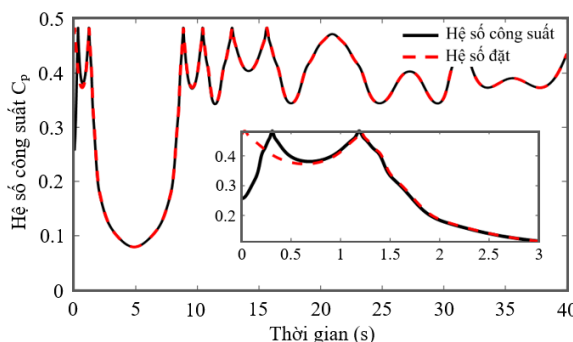
$$v(t) = 4[\sin(0.3t) + \sin(0.4t) + \sin(0.2t)] \quad (30)$$

Giá trị đặt theo công thức (29) có được từ hệ mờ. Kết quả mô phỏng thực hiện trong 40 s với điều kiện đầu góc Pitch $\beta(0) = 10^\circ$. Kết quả mô phỏng được thể hiện hình 7 và hình 8.

Quan sát hình 7 và hình 8, góc Pitch bám ổn định theo giá trị góc Pitch đặt trước sau một khoảng thời gian nhỏ (góc Pitch và hệ số công suất C_p đều bám sau khoảng 1 s). Ngoài ra, hệ số công suất bám giá trị cực đại đã tính được từ bảng 1. Khi lấy thời điểm $t = 30$ s làm ví dụ, tại thời điểm 30 s, góc Pitch thu được khoảng 5 độ. Mặt khác, trong hình 8, thời điểm 30 s, hệ số công suất đạt 0.37. Giá trị này, hoàn toàn phù hợp khi so sánh giá trị C_p tại giá trị $\beta = 5^\circ$ trong bảng 1.



Hình 7. Gốc Pitch tua-bin gió và giá trị đặt góc Pitch.



Hình 8. Đáp ứng của hệ số công suất C_p .

4. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã đề xuất được một cấu trúc điều khiển mới dựa trên hệ logic mờ kết hợp điều khiển mặt động để điều chỉnh góc Pitch trong điều kiện tốc độ gió thay đổi, đảm bảo tua-bin gió vận hành ở điểm công suất tối ưu. Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo góc Pitch bám góc Pitch mong muốn và có khả năng lọc nhiễu cao tần. Các kết quả mô phỏng cho thấy tính đúng đắn và hiệu quả của cấu trúc điều khiển mới được đề xuất trong bài báo.

Khả năng kháng nhiễu biên độ lớn và bù sai lệch mô hình sẽ được tiếp tục nghiên cứu để áp dụng cấu trúc điều khiển này cho các điều kiện làm việc phức tạp hơn của tua-bin gió.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn chân thành sâu sắc sự giúp đỡ về ý tưởng khoa học của GS.TS Phan Xuân Minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đinh Mạnh Cường, Mai Thị Trinh, “Nghiên cứu một số điều kiện phát triển điện gió tại Việt Nam trên cơ sở dự án Nhà máy Phong Điện I – Bình Thuận”, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQGHN, (2016).
- [2]. Minh Hà Dương, Ngô Thị Tố Nhiên, “Các kịch bản phát triển điện gió ở Việt Nam đến năm 2030”, Sáng kiến chuyên dịch Năng lượng Việt Nam (VIET SE), (2019).
- [3]. El-Ahmar, M. H., Abou-Hashema M. El-Sayed, and A. M. Hemeida. "Evaluation of factors affecting wind turbine output power." 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, (2017).
- [4]. Hayatdavudi, Mahdi, Mojtaba Saeedimoghadam, and Seyed MH Nabavi. "Adaptive control of pitch angle of wind turbine using a novel strategy for management of mechanical energy generated by turbine in different wind velocities." Journal of Electrical Engineering and Technology 8.4: tr. 863-871, (2013).
- [5]. Hosseini, Ehsan, and Ghazanfar Shahgholian. "Different types of pitch angle control strategies used in wind turbine system applications." Journal of Renewable Energy and Environment 4.1 (2017).
- [6]. Nhat-Minh Le Phan, Tung Thanh Nguyen, Duong Tung Nguyen, Nga Thi-Thuy Vu, “Output Feedback Adaptive Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbine”, JST: Smart Systems and Devices, Volume 33, Issue 3, 057-064, (2023).
- [7]. Apata, O., and D. T. O. Oyedokun. "An overview of control techniques for wind turbine systems." Scientific African 10: e00566, (2020).
- [8]. Chih-Ming Hong, Cong-Hui Huang, Fu-Sheng Cheng, “Sliding Mode Control for Variable-speed Wind Turbine Generation Systems Using Artificial Neural Network”, Volume 61, Pages 1626-1629, (2014).
- [9]. Farah Echiheb, Yasmine Ihedrane, Badre Bossoufi, Manale Bouderbala, Saad Motahhir, Mehedi Masud, Sultan Aljahdali & Madiha ElGhamrasni, “Robust sliding-Backstepping mode control of a wind system based on the DFIG generator”, Scientific Reports volume 12, Article number: 11782 (2022).
- [10]. Haijun Ren, Hao Zhang, Guang Deng and Bin Hou, “Feedforward Feedback Pitch Control for Wind Turbine Based on Feedback Linearization with Sliding Mode and Fuzzy PID Algorithm”, Volume 2018 | Article ID 4606780, (2018).
- [11]. L. Colombo, M.L. Corradini, G. Ippoliti, G. Orlando, “Pitch angle control of a wind turbine operating above the rated wind speed: A sliding mode control approach”, Volume 96, Pages 95-102, (2020).
- [12]. Paladugu Venkaiah, Bikash Kumar Sarkar, Amitava Chatterjee, View all authors and affiliations, “Pitch control of electrohydraulic semi-rotary-actuated wind turbine with actuator and valve fault using generalized power-based exponential rate reaching law sliding mode controller”, First published online February 17, 2023. Volume 237, Issue 8, (2023).
- [13]. Wang Xin, Zhu Wanli, Qin Bin, Li Pengcheng, “Sliding mode control of pitch angle for direct driven PM Wind turbine”, (2014). DOI: 10.1109/CCDC.2014.6852584.
- [14]. Kim, Duyen Ha Thi, et al. "Adaptive control for uncertain model of omni-directional mobile robot based on radial basis function neural network." International Journal of Control, Automation and Systems 19.4: tr. 1715-1727, (2021).
- [15]. J.C.Das. *Power system harmonics and passive filter design*. IEEE Press Series on Power Engineering, IEEE Press and Wiley, (2015).
- [16]. Nguyễn Doãn Phước, *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*, NXB Bách Khoa, (2021).
- [17]. H. Ren, G. Deng, B. Hou, S. Wang, and G. Zhou, “Finite-Time Command Filtered Backstepping Algorithm-Based Pitch Angle Tracking Control for Wind Turbine Hydraulic Pitch Systems”, IEEE Access, vol. 7, pp. 135514–135524, (2019).
- [18]. Slah, Hafsi, Dhaoui Mehdi, and Sbita Lassaad. "Advanced control of a PMSG wind turbine." International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application 5.1: 1-10, (2016).
- [19]. M. R. Patel and O. Beik, “Wind and solar power systems: design, analysis, and operation”, CRC press, (2021).
- [20]. Hamoodi, Safwan A., Farah I. Hameed, and Ali N. Hamoodi. "Pitch angle control of wind turbine using adaptive fuzzy-PID controller." EAI Endorsed Transactions on Energy Web 7.28 (2020).

ABSTRACT

Synthesis of optimal power tracking Pitch angle controller for wind turbines based on fuzzy logic system and dynamic surface control

This paper proposes a method to enhance the performance of wind turbine by a fuzzy logic system. The fuzzy logic system is carried out as an intelligent system in order to determine a desired Pitch angle for each value of wind speed such that the turbine's power is maximum. To ensure that the Pitch angle can track stably the desired angle, dynamic surface control is developed. The control quality of closed-loop system is analysed and simulated with different scenarios.

Keywords: Wind turbine; Pitch angle; Dynamic surface control; Fuzzy logic system; Optimal power point.