

# TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN PHI MÔ HÌNH KHÁNG NHIỄU GÓC PITCH BẮM ĐIỂM VẬN HÀNH CÔNG SUẤT TỐI ƯU CHO TUA-BIN GIÓ DỰA TRÊN HỆ LOGIC MỜ

SYNTHESIS OF ANTI-DISTURBANCE MODEL-FREE CONTROLLER TO PITCH ANGLE FOR OPTIMAL POWER OPERATING POINT TRACKING FOR WIND TURBINE BASED ON FUZZY LOGIC SYSTEM

Nghiêm Xuân Thuốc<sup>1,\*</sup>,  
Đỗ Mạnh Dũng<sup>2</sup>, Phan Xuân Minh<sup>3</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.008>

## TÓM TẮT

Bài báo đề xuất cấu trúc điều khiển mới gồm một hệ logic mờ để xác định góc Pitch tối ưu công suất tua bin gió khi tốc độ gió thay đổi và một bộ điều khiển góc Pitch. Để góc Pitch bám theo góc Pitch tối ưu, một bộ điều khiển không biết trước mô hình và nhiễu được đề xuất dựa trên mạng nơ-ron và điều khiển mặt động. Chất lượng hệ thống điều khiển phi mô hình kháng nhiễu góc 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 phi mô hình, hệ logic mờ, điều khiển mặt động, mạng Nơ-ron.

## ABSTRACT

This article proposes a new control structure including a fuzzy logic system to determine the optimal pitch angle for wind turbine power when the wind speed changes and a pitch angle controller. To ensure the optimal pitch angle, a model- and disturbance-agnostic controller is proposed based on radial neural network and dynamic surface control. The quality of the pitch angle disturbance-resistant modelless control system combined with the fuzzy logic system is analyzed by numerical simulation with different scenarios.

**Keywords:** Wind Turbin, Pitch angle, model-free dynamic surface control, Fuzzy logic system, neural network.

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Đại học Phenikaa

<sup>3</sup>Trường Quốc tế, Đại học Quốc gia Hà Nội

\*Email: [xuanthuocdonghoa@gmail.com](mailto:xuanthuocdonghoa@gmail.com)

Ngày nhận bài: 19/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 09/12/2024

Ngày chấp nhận đăng: 26/01/2025

## 1. GIỚI THIỆU

Điều khiển không cần biết trước mô hình hệ thống đã được biết đến từ những năm 40 thế kỷ XX [1]. Thay thế cho việc phải xây dựng mô hình hệ thống thật đầy đủ trước khi thiết kế bộ điều khiển, lớp phương pháp này sử dụng thông tin của hệ thống thu thập từ thực nghiệm để tổng hợp bộ điều khiển, chủ yếu là bộ điều khiển PID [2]. Những phương pháp nổi tiếng hồi đó và cho đến tận bây giờ vẫn được sử dụng như phương pháp Ziegler - Nichols 1 và 2 (1940s) [2, 3], phương pháp tổng Kuhn (1960s) [2],... Những năm đầu thập kỷ này, nhờ sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật vi xử lý, điều khiển phi mô hình lại được các nhà khoa học quan tâm phát triển và thổi một luồng gió mới trong lĩnh vực điều khiển phi tuyến. Mặc dù tên gọi là điều khiển phi mô hình, nhưng có một điều chắc chắn là phải biết cấu trúc mô hình đó [8]. Bởi bộ điều khiển phi mô hình được thiết kế dựa trên một phương pháp điều khiển hoàn toàn thích hợp với hệ thống như điều khiển trượt [6], điều khiển backstepping [4, 5], điều khiển mặt động [7],... Trên cơ sở giả định mô hình hệ thống biết trước, một bộ điều khiển được thiết kế thỏa mãn các chất lượng đặt trước. Bộ điều khiển này chứa đựng những thành phần thông tin của mô hình, thường được gọi là những hàm bất định của hệ thống, Những hàm này sẽ được xấp xỉ bằng các hệ thông minh có khả năng học như hệ mờ hoặc mạng nơ-ron nhân tạo và được huấn luyện trực tuyến.

Đối với hệ thống điều hướng cánh quạt tua-bin gió, các phương pháp điều khiển phi mô hình cũng đã được các nhà khoa học quan tâm và nghiên cứu trong những thập kỷ gần đây [4-6, 9]. Trong đó, hai bài toán nổi bật

xoay quanh chủ đề nghiên cứu về đối tượng này bao gồm bài toán điều khiển góc nghiêng cánh quạt (góc Pitch, góc  $\beta$ ) và điều khiển tốc độ quay của tua-bin. Bài toán điều khiển góc Pitch được hiểu là bài toán thiết kế bộ điều khiển sao cho với bộ điều khiển đó, cánh quạt đạt được độ nghiêng phù hợp để đón được nhiều gió nhất, từ đó có thể phát huy tối đa công suất phát điện. Khi có gió ổn định, tài liệu [10] cho thấy việc xác định giá trị đặt cho góc Pitch là tương đối dễ dàng. Song trái lại, việc này sẽ gặp rất nhiều khó khăn trong trường hợp tốc độ gió không ổn định do thời tiết. Bởi xác định một quan hệ giải tích tường minh giữa công suất tua-bin, tốc độ gió và góc nghiêng cánh quạt không đơn giản. Đứng trước thách thức đó, cần cứ vào dữ liệu đã được công bố trong [10] và [11], một hệ logic mờ sẽ được thiết kế để ngay cả khi tốc độ gió không ổn định, luôn tạo ra được giá trị đặt phù hợp cho góc Pitch để công suất phát của tua-bin gió luôn đạt giá trị tối ưu.

Trong lớp các phương pháp điều khiển phi tuyến, điều khiển mặt động (DSC) được xem như một công cụ hữu hiệu trong việc điều khiển các hệ phi tuyến truyền ngược chập [11]. Lý do là DSC khắc phục được các nhược điểm của các kỹ thuật điều khiển đặc thù sẵn có. Trên cơ sở kế thừa và phát huy tư tưởng của kỹ thuật Backstepping, việc tích hợp các bộ lọc vào quy trình thiết kế giúp cho hệ thống tua-bin gió không chỉ giảm gánh nặng tính toán ở phần cứng mà còn loại bỏ các sóng hài bậc cao sinh ra do sự thay đổi liên tục của tín hiệu điều khiển [12]. Mặc dù vậy, DSC yêu cầu thông tin chính xác về mô hình đối tượng [11], trong khi hệ thống điều hướng góc nghiêng của tua-bin gió chứa đựng các tham số thủy lực không thể biết trước [13]. Vì vậy, để đảm bảo mục tiêu điều khiển đã đề ra khi mô hình hệ điều khiển góc Pitch không biết rõ, trong bài báo này, chúng tôi sử dụng DSC để tổng hợp bộ điều khiển phi mô hình góc Pitch của tua-bin gió với nhiễu và các thành phần bất định được xấp xỉ bằng hai mạng nơ-ron hướng tâm RBF. Tính ổn định của hệ thống được phân tích dựa trên hàm điều khiển Lyapunov. Cấu trúc điều khiển mới được phân tích thông qua mô phỏng và được so sánh với bộ điều khiển Backstepping mô hình biết trước.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày về mô hình hệ thống điều hướng góc Pitch, thiết kế bộ điều khiển phi mô hình, tổng hợp hệ mờ bộ điều khiển.

## 2. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN GÓC PITCH TUA-BIN GIÓ

### 2.1. Mô hình động học hệ truyền động góc Pitch

Mặc dù bộ điều khiển đề xuất là phi mô hình, nhưng điều quan trọng là cấu trúc mô hình cần phải biết rõ để làm căn cứ xây dựng mạng nơ-ron RBF xấp xỉ các thành

phần bất định. Trong [13], mô hình hệ thống điều hướng góc Pitch truyền ngược chập dạng chuẩn như sau:

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

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

$$f(x_i, \theta) = \left(1 + \frac{k_D}{J_m}\right)^{-1} \left[ \frac{4K(\theta D_m)^2}{J_m V_T} x_2 - \frac{4K(\theta C_m)}{J_m V_T} \left( J_m x_3 + k_D x_2 + \frac{\tau_s}{r} \right) - \frac{\dot{\tau}_s}{J_m r} \right] \quad (2)$$

$$g(x_i, \theta) = \frac{4K(\theta D_m) C_d W k_v}{J_m V_T r} \sqrt{\frac{p_s}{\rho} - \frac{\text{sgn}(x_v)}{\rho(\theta D_m)} \left( J_m x_3 r + k_D x_2 r + \tau_s \right)} \quad (3)$$

Trong đó,  $\varphi_m$  là độ dịch góc của động cơ thủy lực,  $\theta$  là các yếu tố bất định của mô hình hệ thống điều hướng góc Pitch,  $\tau_s = \tau_L + \tau_F$ ,  $\tau_L$  là momen phụ tải gió,  $\tau_F$  là momen ma sát.

**Giả thiết 1.** Các yếu tố nhiễu loạn  $d$  tồn tại trong mô hình phụ thuộc vào các trạng thái của hệ thống nhưng có biến đổi chậm theo thời gian. Thêm vào đó, các yếu tố nhiễu này cùng với đạo hàm theo thời gian của chúng bị chặn và đủ nhỏ.

**Giả thiết 2.**  $g(x_i, \theta) \neq 0, \forall t \geq 0$  và  $\forall \theta \in \mathbb{R}$ . Giả thiết này nhằm đảm bảo hệ (1) luôn điều khiển được tại mọi thời điểm.

### 2.2. Thiết kế bộ điều khiển phi mô hình

Quy trình thiết kế bộ điều khiển mặt động phi mô hình được trình bày theo từng bước, đồng thời tính ổn định của hệ kín, cũng như các hệ con được chứng minh ngay tại mỗi bước. Phương pháp đề xuất chỉ sử dụng đến cấu trúc mô hình hệ thống điều hướng góc Pitch, không cần dùng đến mô hình toán học chính xác của hàm  $f(x_i, \theta)$  và  $g(x_i, \theta)$ .

**Bước 1.** Xét hệ con thứ nhất, ta có.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4)$$

Trong đó,  $x_1 = \beta$  và  $x_2 = \dot{\beta}$ . Giá trị đặt của góc Pitch là  $\beta_d$  có được từ hệ mờ, kí hiệu sai lệch bám giữa giá trị thực

và giá trị đặt là  $e_1 = \beta_d - x_1$ . Lấy đạo hàm hai vế, kết hợp (4) suy ra:

$$\dot{e}_1 = \dot{\beta}_d - \dot{x}_1 = \dot{\beta}_d - x_2 \tag{5}$$

Để có được  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = \beta_d$  hay  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$ , sử dụng hàm điều khiển Lyapunov xác định dương có dạng toàn phương  $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$ . Đạo hàm hai vế của hàm điều khiển Lyapunov, kết hợp với phương trình (5). Chú ý rằng  $e_1 \text{sgn}(e_1) = \text{sgn}^2(e_1)|e_1|$  ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 = e_1(\dot{\beta}_d - x_2) = e_1(\dot{\beta}_d - \alpha_1 - \varphi_2) \\ &= e_1(\dot{\beta}_d - \alpha_1 + c_1 e_1 + b_1 \text{sgn}(e_1) - \varphi_2) - c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| \end{aligned} \tag{6}$$

Trong đó:  $c_1, b_1$  là hai hằng số dương chọn trước.  $\alpha_1$  là "tín hiệu điều khiển ảo" cho hệ con (4) được thiết kế nhằm đảm bảo  $e_1 \rightarrow 0$ .  $\varphi_2$  là một hàm phi tuyến, khả vi đến cấp 1 là sai số giữa  $x_2$  và "tín hiệu điều khiển ảo"  $\alpha_1$ , ta có:

$$\varphi_2 = x_2 - \alpha_1 \tag{7}$$

Từ phương trình (6), nếu "tín hiệu điều khiển ảo"  $\alpha_1$  cho hệ con (4) thỏa mãn:

$$\alpha_1 = \dot{\beta}_d + c_1 e_1 + b_1 \text{sgn}(e_1) \tag{8}$$

Sẽ làm cho đạo hàm của hàm điều khiển Lyapunov (6) thành  $\dot{V}_1 = -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| + e_1 \varphi_2$ . Vì vậy, theo lý thuyết về phương trình vi phân trong [14],  $\dot{V}_1 < 0$  chỉ khi quỹ đạo của sai lệch bám  $e_1$  bị hút bởi một đa tạp mở bao gốc  $\Delta_1 = \left\{ e_1 \in \mathbb{R} \mid |e_1| < \frac{|\varphi_2|}{c_1} \right\}$ . Tuy nhiên, do chưa có tính bị chặn của  $|\varphi_2|$  nên đa tạp này không thu về một hình cầu mở bao gốc  $B_1(\epsilon) = \{e_1 \in \mathbb{R} \mid |e_1 - 0| < \epsilon\}$  với bán kính  $\epsilon$  bé tùy ý, vì vậy hệ (4) chưa ổn định. Đa tạp  $\Delta_1$  chỉ suy biến về  $B_1(\epsilon)$  nếu  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_2 = 0$ . Đây là nhiệm vụ của bước tiếp theo của hệ con thứ 2.

**Bước 2.** Mục tiêu của bước này làm cho  $\Delta_1 \rightarrow B_1(\epsilon)$  khi  $t \rightarrow +\infty$  bằng cách làm cho  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_2 = 0$ . Để làm được điều đó, xét hệ con thứ 2.

$$\dot{x}_2 = x_3 \tag{9}$$

Trong đó:  $x_2 = \dot{\beta}$  và  $x_3 = \ddot{\beta}$ . Để có được  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_2 = 0$ , sử dụng hàm điều khiển Lyapunov thứ 2 xác định dương, cũng có dạng toàn phương  $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\varphi_2^2 = V_1 + \frac{1}{2}(x_2 - \alpha_1)^2$ .

Đạo hàm 2 vế của  $V_2$ , kết hợp với phương trình (7), (8), (9) thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \varphi_2(x_3 - \dot{\alpha}_1) \\ &= -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| \\ &\quad + \varphi_2(\varphi_3 + \alpha_2 - \dot{\alpha}_1 + e_1 + c_2 \varphi_2 + b_2 \text{sgn}(\varphi_2)) \end{aligned} \tag{10}$$

Trong đó:  $c_2, b_2$  là các hằng số dương chọn trước.  $\alpha_2$  là "tín hiệu điều khiển ảo" cho hệ con (9) nhằm đảm bảo  $\varphi_2 \rightarrow 0$ . Trong đó,  $\varphi_3$  là một hàm phi tuyến. Vì vậy  $\varphi_3$  được tính bởi:

$$\varphi_3 = x_3 - \alpha_2 \tag{11}$$

Do đó, từ phương trình (10) lựa chọn  $\alpha_2$  như sau.

$$\alpha_2 = \dot{\alpha}_1 - e_1 - c_2 \varphi_2 - b_2 \text{sgn}(\varphi_2) \tag{12}$$

$$\dot{\alpha}_1 = \ddot{\beta}_d + c_1(\dot{\beta}_d - x_2) + b_1 \delta(e_1) \tag{13}$$

Trong phương trình (13),  $\delta(e_1) = \frac{d(\text{sgn}(e_1))}{dt} = \begin{cases} +\infty, & e_1 = 0 \\ 0, & e_1 \neq 0 \end{cases}$

kí hiệu cho hàm xung Dirac. Do hàm xung Dirac không thể tạo ra được trong thực tế nên (13) không thực hiện được. Vì vậy để có được  $\dot{\alpha}_1$  mà không cần phép tính đạo hàm. Cho  $\alpha_1$  đi qua một bộ lọc thông thấp với hằng số thời gian  $T_1$ , Bộ lọc thông thấp để xuất được xem như một hệ LTI (Linear Time-Invariant) với biến trạng thái  $z_1$  thỏa mãn điều kiện đầu  $z_1(0) = 0$ , mô hình toán học như sau:

$$T_1 \dot{z}_1 = -z_1 + \alpha_1 \tag{14}$$

Theo tài liệu [15], nếu lựa chọn hằng số thời gian của bộ lọc  $T_1$  đủ nhỏ thì:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= T_1 \dot{z}_1 + z_1 \Rightarrow \alpha_1 \approx z_1 \\ \Rightarrow \dot{\alpha}_1 &= \dot{z}_1 + \xi(z_1) = T_1^{-1}(\alpha_1 - z_1) + \xi(z_1) \end{aligned} \tag{15}$$

Với  $\xi(z_1)$  là sai số của bộ lọc. Do có  $|e_1| < +\infty$  nên cũng có  $|\alpha_1| < +\infty$ . Hệ LTI (14) có đầu vào  $\alpha_1$  bị chặn nên (14) là ổn định BIBO. Vậy  $|z_1| < +\infty \Rightarrow |\xi(z_1)| = |\alpha_1 - z_1| < +\infty$ .

Thay (15) vào (12) ta thu được biểu thức cho "tín hiệu điều khiển ảo"  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = T_1^{-1}(\alpha_1 - z_1) - e_1 - c_2 \varphi_2 - b_2 \text{sgn}(\varphi_2) \tag{16}$$

Khi đó phương trình (10) trở thành  $\dot{V}_2 = -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| + \varphi_2(\varphi_3 + \xi(z_1))$ . Từ đây, có thể thấy quỹ đạo trạng thái của sai lệch  $\varphi_2$  bị hút về một đa tạp mở bao gốc [14] có dạng

$$\Delta_2 = \left\{ \varphi_2 \in \mathbb{R} \mid |\varphi_2| < \frac{|\varphi_3| + |\xi(z_1)|}{c_2} \right\}. \text{ Mặc dù đã có}$$

$|\xi(z_1)| < +\infty$  nhưng chưa có  $|\varphi_3| < +\infty$  nên  $\Delta_2$  không thu về một hình cầu mở bao gốc với bán kính  $\epsilon$  bé tùy ý  $B_2(\epsilon) = \{\varphi_2 \in \mathbb{R} \mid |\varphi_2 - 0| < \epsilon\}$ . Ngoài ra, chỉ có  $\Delta_2 \rightarrow B_2(\epsilon)$  nếu có  $\varphi_3 \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow +\infty$ . Vì vậy nhiệm vụ của bước 3 sẽ là làm cho  $\varphi_3 \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow +\infty$ .

**Bước 3.** Mục tiêu của bước này là làm cho  $\varphi_3 \rightarrow 0$  để có  $\Delta_2 \rightarrow B_2(\epsilon)$ . Đồng nghĩa với  $x_3 \rightarrow \alpha_2$ . Xét hệ động lực học điều hướng góc Pitch:

$$\dot{x}_3 = f(x_i, \theta) + g(x_i, \theta)u + d, i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

Sử dụng hàm điều khiển Lyapunov xác định dương có dạng  $V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\varphi_3^2$ . Đạo hàm hai vế của hàm Lyapunov  $V_3$  kết hợp với (11) và (17), chú ý rằng  $0 \leq \varphi_3 \tanh \varphi_3 \leq |\varphi_3|$ , thu được:

$$\dot{V}_3 \leq \begin{bmatrix} -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| \\ + \varphi_2 \xi(z_1) - c_3 \varphi_3^2 - b_3 |\varphi_3| \\ + \varphi_3 \begin{pmatrix} \varphi_2 + f(x_i, \theta) + d + g(x_i, \theta)u \\ -\dot{\alpha}_2 + c_3 \varphi_3 + b_3 \tanh \varphi_3 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Để tránh bùng nổ tổ hợp khi phải đạo hàm (16), cho  $\alpha_2$  đi qua bộ lọc thông thấp có hằng số thời gian  $T_2 < T_1$  và biến trạng thái  $z_2$ . Tương tự như ở Bước 2, nếu lựa chọn  $T_2$  đủ nhỏ thì:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= T_2 \dot{z}_2 + z_2 \Rightarrow \alpha_2 \approx z_2 \\ \Rightarrow \dot{\alpha}_2 &= \dot{z}_2 + \xi(z_2) = T_2^{-1}(\alpha_2 - z_2) + \xi(z_2) \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó,  $\xi(z_2)$  là sai số của bộ lọc, thoả mãn  $|\xi(z_2)| < +\infty$ . Thay (19) vào (18) ta có:

$$\dot{V}_3 \leq \begin{bmatrix} -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| + \varphi_2 \xi(z_1) \\ + \varphi_3 |\xi(z_2)| - c_3 \varphi_3^2 - b_3 |\varphi_3| \\ + \varphi_3 \begin{pmatrix} \varphi_2 + f(x_i, \theta) + d + g(x_i, \theta)u \\ -T_2^{-1}(\alpha_2 - z_2) + c_3 \varphi_3 + b_3 \tanh \varphi_3 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Trong đó,  $c_3, b_3 > 0$  tùy ý. Do Giả thiết 2 được thoả mãn, bộ điều khiển góc Pitch có dạng:

$$u = -\frac{\varphi_2 + [f(x_i, \theta) + d] - T_2^{-1}(\alpha_2 - z_2) + c_3 \varphi_3 + b_3 \tanh \varphi_3}{g(x_i, \theta)} \quad (21)$$

Khi đó, đạo hàm của hàm Lyapunov  $V_3$  trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| - b_3 |\varphi_3| \\ &\quad + \varphi_3 (|\xi(z_2)| + |\xi(z_1)| - c_3 \varphi_3) \end{aligned} \quad (22)$$

Từ (22) và tài liệu [14], có thể thấy  $\dot{V}_3 < 0$  khi và chỉ khi quỹ đạo của sai số  $\varphi_3$  luôn bị hút bởi một đa tạp bất biến bao gốc có biên hằng

$$\Delta_3 = \left\{ \varphi_3 \in \mathbb{R} \mid |\varphi_3| < \frac{|\xi(z_2)| + |\xi(z_1)|}{c_3} = \text{const} \right\}$$

làm cho  $\Delta_3$  thu về một lân cận rất nhỏ bao gốc bằng cách chọn hệ số  $c_3$  đủ lớn. Do đó, sẽ có được  $\Delta_2 \rightarrow B_2(\epsilon)$  và  $\Delta_1 \rightarrow B_1(\epsilon)$ . Từ đây, giá trị góc Pitch của cánh quạt tua-bin gió sẽ bám ổn định theo giá trị góc Pitch mong muốn.

**Bước 4.** Thiết kế mạng nơ-ron RBF, các hàm phi tuyến của mô hình tua-bin gió là  $f(x_i, \theta)$  và  $g(x_i, \theta)$  không thể biết chính xác do chứa đựng tham số bất định  $\theta$ . Để đảm bảo mục tiêu điều khiển, bài báo đề xuất sử dụng 2 mạng nơ-ron RBF để xấp xỉ sai lệch mô hình.

Véc tơ trọng số của mỗi mạng nơ-ron RBF là  $W_f \in \mathbb{R}^{N_f \times 1}$  và  $W_g \in \mathbb{R}^{N_g \times 1}$ ,  $N_f$  và  $N_g$  lần lượt là số nơ-ron lớp ẩn của mỗi mạng,  $\|W_f\|_F < +\infty$ ,  $\|W_g\|_F < +\infty$ . Theo [16], các hàm phi tuyến  $f(x_i, \theta)$  và  $g(x_i, \theta)$  có thể được tính bởi:

$$f(x_i, \theta) + d = W_f^T \phi(x_i) + \epsilon_f \quad (23)$$

$$g(x_i, \theta) = W_g^T \phi(x_i) + \epsilon_g \quad (24)$$

Với  $\epsilon_f$  và  $\epsilon_g$  là sai số ước lượng của hai mạng nơ-ron RBF, véc tơ hàm kích hoạt  $\phi(x_i) = \text{col}(\phi_j(x_i))$  của mạng nơ-ron RBF được tính theo công thức:

$$f_j(x_i) = \sum_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{|x_i - K_{ij}|^2}{\sigma_{ij}^2}\right), K_{ij}, \sigma_{ij} > 0; \quad (25)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_g(N_f)$$

Hai mạng có chung một đầu vào là  $x_i, i = 1, 2, 3$  và đầu ra của chúng lần lượt là các giá trị xấp xỉ  $\hat{f}(x_i, \theta)$  và  $\hat{g}(x_i, \theta)$  được tính bởi:

$$\hat{f}(x_i) + \hat{d} = \hat{W}_f^T \phi(x_i) \quad (26)$$

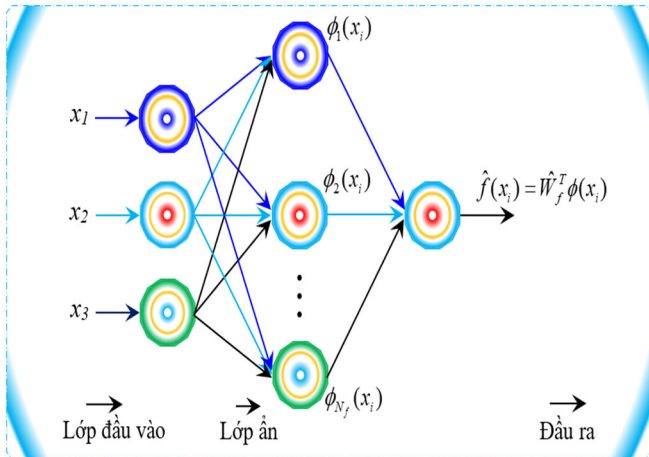
$$\hat{g}(x_i) = \hat{W}_g^T \phi(x_i) \quad (27)$$

Trong đó:  $\hat{W}_f, \hat{W}_g$  lần lượt là véc tơ trọng số ước lượng của  $W_f, W_g$ . Khi đó, bộ điều khiển mặt động thích nghi được đề xuất có dạng.

$$\hat{u} = \frac{\varphi_2 + \hat{W}_f^T f(x_i) - T_2^{-1}(\alpha_2 - z_2) + c_3 \varphi_3 + b_3 \tanh \varphi_3}{\hat{W}_g^T f(x_i)} \quad (28)$$

Bộ điều khiển (28) được gọi là bộ điều khiển phi mô hình do chỉ cần căn cứ vào cấu trúc mô hình mà không sử dụng bất cứ thông tin nào về mô hình hệ thống phi tuyến. Công việc của bước cuối cùng là tìm ra luật huấn luyện trọng số  $\hat{W}_f$  và  $\hat{W}_g$ .

**Bước 5.** Huấn luyện mạng nơ-ron xuyên tâm RBF.



Hình 1. Cấu trúc mạng nơ-ron xuyên tâm RBF

Mục tiêu của bước này là tìm ra luật cập nhập và huấn luyện online cho  $\hat{W}_f$  và  $\hat{W}_g$ . Để thực hiện, sử dụng hàm điều khiển Lyapunov có dạng:

$$V_4 = V_3 + \frac{\gamma_1}{2} \tilde{W}_f^T \tilde{W}_f + \frac{\gamma_2}{2} \tilde{W}_g^T \tilde{W}_g \quad (29)$$

Trong đó:  $\gamma_1, \gamma_2$  là hai hằng số dương tùy chọn,  $\tilde{W}_f = W_f - \hat{W}_f$  và  $\tilde{W}_g = W_g - \hat{W}_g$  là sai lệch trọng số của 2 mạng. Lấy đạo hàm 2 vế của phương trình Lyapunov (29) thu được:

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_3 - \gamma_1 \tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f - \gamma_2 \tilde{W}_g^T \dot{\tilde{W}}_g \quad (30)$$

Giả thiết  $\dot{W}_f = \dot{W}_g = 0$ . Thay  $\hat{u}$  trong (20) vào (28) và (30), được biểu thức (31):

$$\dot{V}_4 = \begin{bmatrix} \gamma(x_i) + \varphi_3 \begin{bmatrix} f(x_i, \theta) - \hat{f}(x_i) \\ +(g(x_i, \theta) - \hat{g}(x_i))u \end{bmatrix} \\ -\gamma_1 \tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f - \gamma_2 \tilde{W}_g^T \dot{\tilde{W}}_g \\ +\varphi_3 (|\xi(z_1)| + |\xi(z_2)| - c_3) \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_4 = \begin{bmatrix} \gamma(x_i) + \tilde{W}_g^T (\varphi_3 f(x_i) u - \gamma_2 \dot{\tilde{W}}_g - \mu_1 \varphi_3 \tilde{W}_g) \\ + \tilde{W}_f^T (f(x_i) \varphi_3 - \gamma_1 \dot{\tilde{W}}_f - \mu_2 \varphi_3 \tilde{W}_f) \\ + \mu_2 \varphi_3 \tilde{W}_g^T \dot{\tilde{W}}_g + \varphi_3 (|\xi(z_1)| + |\xi(z_2)|) \\ - c_3 + \epsilon_f + \epsilon_g \\ + \mu_1 \varphi_3 \tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f \end{bmatrix} \quad (32)$$

Trong đó, hàm  $\gamma(x_i) = -c_1 e_1^2 - b_1 |e_1| - c_2 \varphi_2^2 - b_2 |\varphi_2| - b_3 |\varphi_3| < 0$ . Sử dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwarz dạng ma trận như sau:

$$\tilde{W}_f^T \dot{\tilde{W}}_f = \tilde{W}_f^T (W_f - \tilde{W}_f) \leq \|W_f\|_F \|\tilde{W}_f\|_F - \|\tilde{W}_f\|_F^2 \quad (33)$$

$$\tilde{W}_g^T \dot{\tilde{W}}_g = \tilde{W}_g^T (W_g - \tilde{W}_g) \leq \|W_g\|_F \|\tilde{W}_g\|_F - \|\tilde{W}_g\|_F^2 \quad (34)$$

Từ đó, phương trình (32) sẽ trở thành:

$$\dot{V}_4 \leq \begin{bmatrix} \gamma(x_i) + \tilde{W}_g^T (\varphi_3 f(x_i) u - \gamma_2 \dot{\tilde{W}}_g - \mu_1 \tilde{W}_g) \\ -\mu_2 \|\tilde{W}_f\|_F^2 - \mu_1 \|\tilde{W}_f\|_F^2 \\ + \tilde{W}_f^T (f(x_i) \varphi_3 - \gamma_1 \dot{\tilde{W}}_f - \mu_2 \tilde{W}_f) \\ + \varphi_3 (\Phi(z_1, W_j) - c_3 \varphi_3) \end{bmatrix} \quad (35)$$

Với

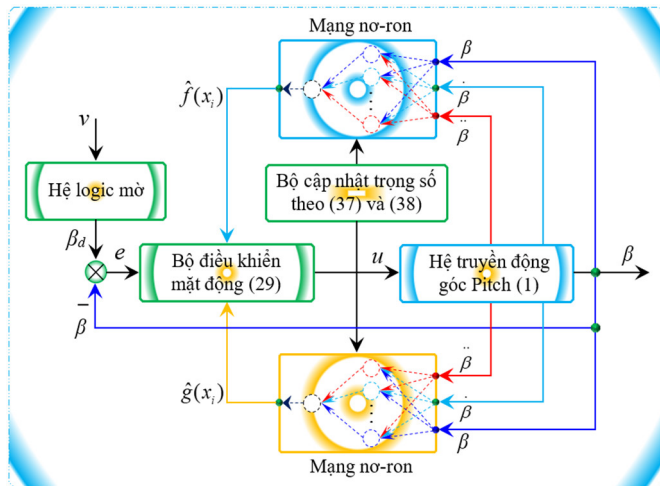
$$\Phi(z_1, W_j) = |\xi(z_1)| + |\xi(z_2)| + \epsilon_f + \epsilon_g + \mu_1 \|W_f\|_F \|\tilde{W}_f\|_F + \mu_2 \|W_f\|_F \|\tilde{W}_f\|_F = \text{const.}$$

Do đó, trọng số mạng nơ-ron RBF được huấn luyện theo luật:

$$\dot{\tilde{W}}_f = \gamma_1^{-1} \phi(x_i) \varphi_3 - \gamma_1^{-1} \mu_2 \tilde{W}_f \quad (36)$$

$$\dot{\tilde{W}}_g = \gamma_2^{-1} \varphi_3 \phi(x_i) u - \gamma_2^{-1} \mu_1 \tilde{W}_g \quad (37)$$

Thì ta có  $\dot{V}_4 \leq \gamma(x_i) - \mu_2 \|\tilde{W}_f\|_F^2 - \mu_1 \|\tilde{W}_f\|_F^2 + \varphi_3 (\Phi(z_1, W_j) - c_3 \varphi_3)$ . Do đó, quỹ đạo của sai lệch  $\varphi_3$  luôn bị hút bởi đa tạp bất biến  $\Delta_4 = \left\{ \varphi_3 \in \mathbb{R} \mid |\varphi_3| < \frac{\Phi(z_1, W_j) - \text{const}}{c_3} \right\}$ . Chỉ cần chọn giá trị  $c_3$  đủ lớn,  $\Delta_4$  sẽ thu về một hình cầu đóng bao gốc  $B_4(\epsilon)$  có bán kính  $\epsilon$  nhỏ tùy ý. Vì vậy  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_3 = 0$ . Chú ý rằng sẽ chỉ có  $\Delta_1 \rightarrow B_1(\epsilon)$  khi đã có  $\Delta_2 \rightarrow B_2(\epsilon)$ . Tiếp theo, cũng chỉ có  $\Delta_2 \rightarrow B_2(\epsilon)$  khi đã có  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_3 = 0$ . Vì vậy cần lựa chọn  $c_3 > c_2 > c_1 > 0$ .



Hình 2. Sơ đồ hệ kín bộ điều khiển phi mô hình

**Chú ý:** Tín hiệu điều khiển thích nghi (28) là khả dĩ khi và chỉ khi các thành phần trong véc tơ trọng số  $\hat{W}_g^T$  không đồng nhất bằng 0 với mọi  $t \geq 0$ . Tuy nhiên, dấu của  $\hat{W}_g$  phụ thuộc vào dấu của tích  $\varphi_3 u$ . Do đó cần chọn giá trị đầu  $\hat{W}_g(0) > 0$  và  $\hat{W}_g(0), \gamma_2$  đủ lớn.

### 3. TỔNG HỢP HỆ LOGIC MỜ

Căn cứ vào đồ thị công bố trong [10] và [18], một bảng số liệu đã được xây dựng để làm cơ sở thiết kế hệ logic mờ học tự động.

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

Ri: Nếu  $v$  là  $A_i$  Thì  $y_i = a_i \cos(i\omega_1 v) + b_i \sin(i\omega_1 v)$   
 với  $i = 1, 2, 3, 4$

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

Bảng 1. Các giá trị của góc Pitch (góc  $\beta$ ) và  $\lambda$  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
$\beta$	0b	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12
$\lambda$	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		
$\beta$	14	15	16	18	20	24	25	30	35		
$\lambda$	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		

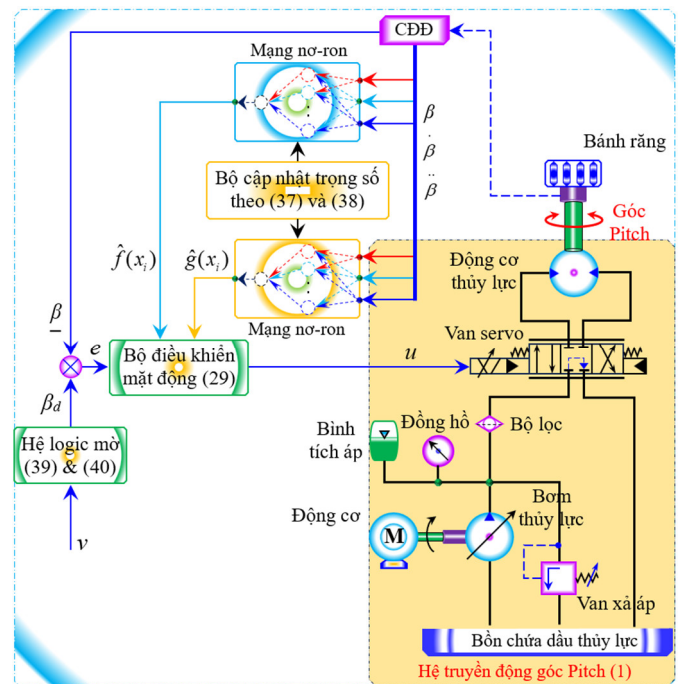
$$\mu_i(v, \gamma_i, c_i) = \frac{|\gamma_i|^4}{|\gamma_i|^4 + |v - c_i|^4}$$
. Giá trị rõ của góc Pitch tại khâu giải mờ được tính bởi:

$$\beta_d = a_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \tag{38}$$

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

$$J(\eta_i, \omega_i) = \frac{1}{2} (\beta_m - \beta_d(\eta_i, \omega_i))^2 \rightarrow \min \tag{39}$$

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



Hình 3. Sơ đồ điều khiển phi mô hình kháng nhiễu góc Pitch bám điểm vận hành công suất tối ưu cho tua-bin gió dựa trên hệ logic mờ

Hệ truyền động servo thủy lực hình 3, gồm có một khối chuyển đổi đo CĐĐ, một động cơ thủy lực, một van tỷ lệ điện - thủy lực gọi là van servo, một bình tích áp, một đồng hồ đo áp suất, một van xả áp, một bơm thủy lực và một động cơ servo. Trong đó, van servo thay đổi hướng dòng chảy của dầu tùy thuộc cực tính của tín hiệu điện đầu ra của bộ điều khiển góc Pitch để thực hiện quay chiều thuận hoặc quay chiều ngược của động cơ thủy lực, dòng chảy dầu thủy lực được điều khiển để điều chỉnh tốc độ xoay động cơ thủy lực theo biên độ của tín hiệu điều khiển u. Động cơ thủy lực truyền động bánh răng sẽ đẩy các vành răng gốc cánh tua-bin, làm thay đổi góc Pitch.

**4. MÔ PHỎNG KIỂM CHỨNG**

Mô phỏng Matlab/Simulink với tham số mô hình bảng 2, cấu trúc điều khiển hình 2.

Bảng 2. Tham số mô hình hệ thống điều hướng tua-bin gió [13]

$k_v$	200	$J_m$ (kg.m <sup>2</sup> )	4.10 <sup>3</sup>
$C_d$	0,63	$C_T$ (m <sup>5</sup> /N.s)	3,2.10 <sup>-12</sup>
K (Pa)	6,86.10 <sup>8</sup>	$k_0$ (N.s/m)	32
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	947	W (m)	0,01
$V_T$ (m <sup>3</sup> )	4.10 <sup>-4</sup>	$P_s$ (Pa)	20.10 <sup>6</sup>
$D_m$ (m <sup>3</sup> /rad)	1,2.10 <sup>-4</sup>		

Trong đó,  $k_v > 0$  là hệ số khuếch đại của van servo.  $C_d$ ,  $\rho$  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,  $k_0$  là hệ số giảm chấn nhớt, W là độ dốc thủy lực.

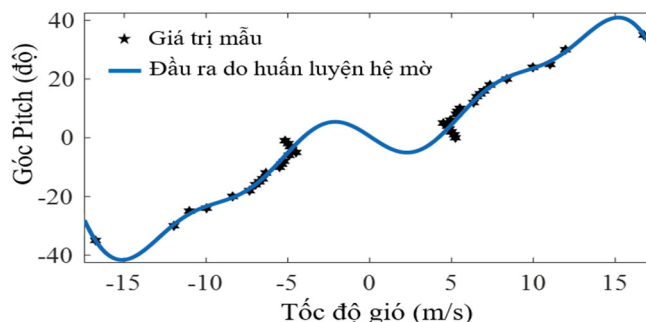
Các tham số bộ điều khiển được lựa chọn là  $c_3 = 160$ ;  $c_2 = 5$ ;  $c_1 = 3$ ;  $b_1 = 0,2$ ;  $b_2 = 0,1$ . Tham số hai bộ lọc được lựa chọn là  $T_1 = 0,1s$  và  $T_2 = 0,01s$ . Hệ số trong công thức huấn luyện mạng  $\mu_1 = \mu_2 = 0,001$ ;  $\gamma_1 = 100$  và  $\gamma_2 = 200$ . Trong các kịch bản mô phỏng, hệ thống tua-bin gió luôn chịu tác động nhiễu ngẫu nhiên có biên độ dao động trong khoảng [-50, 50]. Giá trị đầu của trọng số hai mạng nơ-ron RBF lần lượt là  $\hat{W}_f(0) = 1_{N_f \times 1}$ ,  $\hat{W}_g(0) = 100_{N_g \times 1}$ .

**4.1. Kiểm chứng kết quả huấn luyện hệ logic mờ**

Kiểm chứng kết quả huấn luyện hệ mờ để tìm ra tín hiệu đặt cho góc Pitch  $\beta_d$ , nhằm phục vụ các phần mô phỏng tiếp theo. Với hệ mờ được thiết kế trong phần 3, dựa vào giá trị tập mẫu trong bảng 1, kết quả huấn luyện hệ mờ được thể hiện trong hình 4.

Quan sát hình 4, dựa vào số liệu đã có trong bảng 1, hệ logic mờ cho đầu ra đường đặc tính đi qua hầu hết các điểm trong tập mẫu với sai số tương đối nhỏ. Do đó hệ

logic mờ đã có khả năng xấp xỉ chính xác sự phụ thuộc của góc Pitch vào tốc độ gió mà tại đó công suất phát của tua-bin gió luôn đạt giá trị tối ưu.



Hình 4. Kết quả huấn luyện hệ mờ

Ngoài ra, có thể 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 của hệ thống [17]. Kết quả đầu ra khi huấn luyện hệ logic mờ được thể hiện bằng phương trình sau:

$$\beta_d = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 \sin(\omega_1 v) + b_1 \sin(\omega_1 v) \\ + a_2 \cos(2\omega_1 v) + b_2 \sin(2\omega_1 v) \\ + a_3 \cos(3\omega_1 v) + b_3 \sin(3\omega_1 v) \\ + a_4 \cos(4\omega_1 v) + b_4 \sin(4\omega_1 v) \end{bmatrix} \quad (40)$$

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  $\omega = 0,1624$ .

**4.2. Kiểm chứng kết quả điều khiển góc Pitch và bám điểm công suất tối ưu**

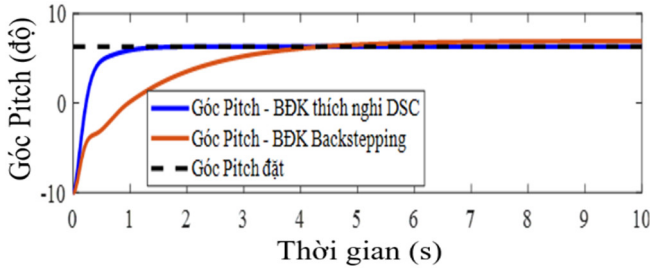
Trong phần này, hiệu quả bám giá trị đặt  $\beta_d$  của bộ điều khiển thích nghi kháng nhiễu (28), sẽ được kiểm chứng và so sánh với bộ điều khiển Backstepping truyền thống. Giá trị bất định  $\theta$  được giả thiết là thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian trong khoảng giá trị [-15, 15].

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

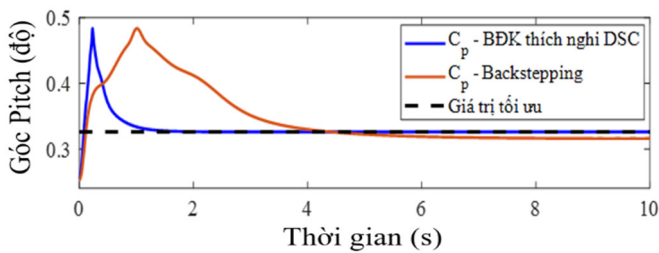
Tốc độ gió v lựa chọn  $v = 6,6m/s$ . Từ công thức (40), tính toán được  $\beta_d = 6,311$  (độ). Kết quả của phương pháp đề xuất trong bài báo thể hiện ở hình 5, khi so sánh phương pháp đề xuất với bộ điều khiển Backstepping truyền thống, phương pháp đề xuất cho chất lượng cao hơn và nổi trội hơn so với phương pháp Backstepping.

Quan sát hình 5, trong trường hợp mô hình hệ thống tua-bin bất định, góc Pitch bám theo giá trị đặt rất nhanh (khoảng 1s) đối với bộ điều khiển thích nghi mặt động đã đề xuất. Cùng với đó, hệ số công suất đối với bộ điều khiển thích nghi này cũng đạt đến giá trị tối ưu gần với

giá trị trong bảng 1. Điều này chứng tỏ hiệu quả trong việc giúp tua-bin gió bám theo điểm công suất cực đại. Ngược lại, đối với bộ điều khiển Backstepping truyền thống, hệ số công suất không đạt được giá trị tối ưu và góc Pitch không bám được vào giá trị đặt.



Hình 5. (a) Đáp ứng góc Pitch

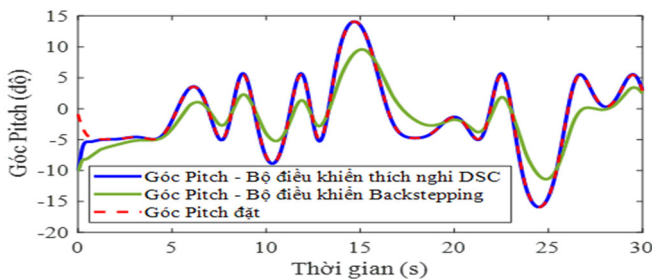


Hình 5. (b) Hệ số công suất của hệ truyền động góc Pitch tua-bin gió

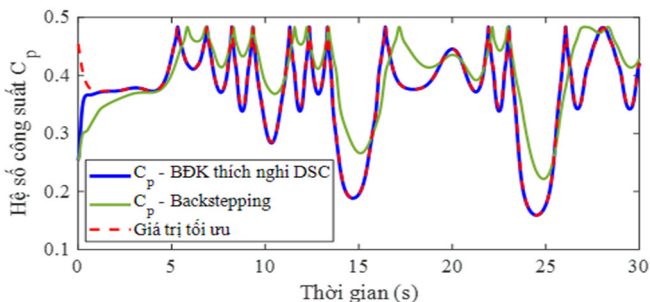
**Trường hợp 2:** Tốc độ gió  $v(t)$  thay đổi theo thời gian.

Trong trường hợp này, tốc độ gió  $v(t)$  được giả thiết thay đổi theo thời gian, có quy luật:

$$v(t) = 3 \begin{bmatrix} \sin(0,5t) + \sin(0,4t) \\ + \cos(0,9t) + \sin\left(0,2t - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (41)$$



(a) Đáp ứng góc Pitch



(b) Hệ số công suất tua-bin gió

Hình 6. Đáp ứng góc Pitch và hệ số công suất tua-bin gió

Giá trị đặt theo công thức (40) có được từ hệ logic mờ, thực hiện mô phỏng trong 30s với điều kiện đầu góc Pitch là  $\beta(0) = -10^\circ$ . Kết quả mô phỏng phương pháp đề xuất (*Đường màu xanh lá*) được so sánh với phương pháp Backstepping truyền thống (*Đường màu xanh nhạt*) thể hiện trong hình 6 (a) và 6 (b).

Quan sát hình 6, góc Pitch của tua-bin gió bám ổn định theo góc Pitch đặt trước sau một khoảng thời gian tương đối nhỏ (cả góc Pitch và hệ số công suất  $C_p$  đều bám sau khoảng 1s). Ngoài ra, có thể thấy hệ số công suất luôn bám theo giá trị cực đại theo tính toán từ bảng 1. Có thể lấy thời điểm  $t = 20s$  làm ví dụ, tại thời điểm 20s, góc Pitch thu được khoảng  $-2^\circ$ . Mặt khác trong hình 6 (b), thời điểm 20s, hệ số công suất đạt khoảng 0,43. Giá trị góc Pitch bám giá trị đặt hoàn toàn phù hợp khi so sánh giá trị  $C_p$  tại giá trị  $\beta = -2^\circ$  ở bảng 1. Trong khi đó, với bộ điều khiển Backstepping, góc Pitch không thể bám theo giá trị đặt, cũng như hệ số công suất không đạt tối ưu trong trường hợp hệ thống chứa đựng các tham số bất định.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất phương pháp điều khiển phi mô hình mới cho hệ thống điều khiển góc Pitch tua bin gió bám giá trị đặt và có khả năng kháng nhiễu do thông tin từ hệ thống được cập nhật trực tiếp sau mỗi chu kỳ trích mẫu. Góc Pitch đặt được xác định thông qua một hệ logic mờ đảm bảo tua-bin gió vận hành tại điểm công suất tối ưu, chất lượng cấu trúc điều khiển mới được phân tích thông qua mô phỏng kỹ thuật số. Các kết quả mô phỏng cho thấy góc Pitch bám giá trị đặt nhanh hơn so với bộ điều khiển Backstepping, nhất là khi sai lệch mô hình lớn và có nhiễu tác động.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là kết hợp hệ thống điều khiển góc Pitch với hệ thống điều khiển ổn định góc quay tua bin gió nhằm đảm bảo tua bin gió vận hành an toàn với hiệu suất cao.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Robbins H., "Some aspects of the sequential design of experiments," *Bulletin of the American Mathematical Society*, 58(5), 527-535, 1952.
- [2]. Hoàng Minh Sơn, *Cơ sở hệ thống điều khiển quá trình*, tái bản lần thứ 4. Nhà xuất bản Đại học Bách khoa Hà Nội, 2016.
- [3]. Šekara Tomislav B., Miroslav R. Mataušek, "Revisiting the Ziegler-Nichols process dynamics characterization," *Journal of process control*, 20.3, 360-363, 2010.
- [4]. Xiu-xing Yin, Yong-gang Lin, Wei Li, Hong-wei Liu, Ya-jing Gu (2015), "Adaptive sliding mode back-stepping pitch angle control of a variable-

displacement pump controlled pitch system for wind turbines," *ISA Transactions*, 58, 629-34, 2015. doi: 10.1016/j.isatra.2015.07.006.

[5]. X. X. Yin, Y. G. Lin, W. Li, Y. J. Gu, P. F. Lei, H. W. Liu, "Adaptive backstepping pitch angle control for wind turbine based on a new electro-hydraulic pitch system," *Int. J. Control*, 88, 11, 2316-2326, 2015. doi: 10.1080/00207179.2015.1041554.

[6]. Xiuxing Yin, Wencan Zhang, "Adaptive robust integral sliding mode pitch angle control of an electro-hydraulic servo pitch system for wind turbine," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 105704, 2019

[7]. Nghiêm Xuân Thuốc, Trần Đức Thuận, Nguyễn Việt Anh, Nguyễn Xuân Quỳnh, "Điều khiển mặt động cho hệ thống xy lanh servo thủy lực," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, 93, 19-29, 2024.

[8]. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A., *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. Springer-Verlag, 2011.

[9]. Hossein Dastres, Ali Mohammadi, "A Neural Network Based Adaptive Sliding Mode Controller for Pitch Angle Control of a Wind Turbine," in *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2020. doi: 10.1109/PEDSTC49159.2020.9088373.

[10]. Hayatdavudi Mahdi, Mojtaba Saeedimoghadam, "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, 863-871, 2013.

[11]. Bongsob Song, J. Karl Hedrick *Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear Systems: An LMI Approach*. Springer, 2011.

[12]. Cam T. V. T., Do Manh D., Le Xuan H., Duc K. N., Xuan M. P., "Dynamic Surface Control for the Switched Reluctance Motor," in *2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 199-205, IEEE, 2023.

[13]. H. Ren, G. Deng, B. Hou, S. Wang, G. Zhou, "Finite-Time Command Filtered Backstepping Algorithm-Based Pitch Angle Tracking Control for Wind Turbine Hydraulic Pitch Systems," *IEEE Access*, 7, 135514-135524, 2019.

[14]. Leonid Shaiket, *Lyapunov Functionals and Stability of Stochastic Difference Equations*. Springer, 2011.

[15]. J. C. Das, *Power system harmonics and passive filter design*. IEEE Press Series on Power Engineering, IEEE Press and Wiley, 2015.

[16]. Liu Q., Li D., Ge S. S., Ji R., Ouyang Z., Tee K. P., "Adaptive bias RBF neural network control for a robotic manipulator," *Neurocomputing*, 447, 213-223, 2021.

[17]. M. R. Patel, O. Beik *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. CRC press, 2021.

[18]. El-Ahmar, M. H., Abou-Hashema M. El-Sayed, A. M. Hemeida, "Evaluation of factors affecting wind turbine output power," in *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, IEEE, 2017.

---

#### AUTHORS INFORMATION

**Nghiem Xuan Thuoc<sup>1</sup>, Do Manh Dzung<sup>2</sup>, Phan Xuan Minh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>2</sup>Phenikaa University, Vietnam

<sup>3</sup>International School, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam