

Thiết kế bộ điều khiển mặt trượt động thích nghi cho hệ truyền động nhiều trục liên kết mềm

Adaptive dynamic surface control design for flexible-link multi-motor drives

Tổng Thị Lý¹, Đào Đức Thắng², Phạm Văn Hùng¹, Trịnh Thị Thu Hương¹, Nguyễn Bá Khả¹, Dương Minh Đức^{2*}

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Điện- Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Corresponding author E-mail: duc.duongminh@hust.edu.vn

Abstract

A multi-motor is known as a mechanism in which separate motors are used for operating different parts of the same machine in industrial plants. The complex operation of systems, such as steel mills, casting irons, paper production, solar cells, humanoid robots, large excavators, etc., depends on the performance of the multi-motor drive system. These materials are easily damaged if the process is poor. Therefore, the system requires high technology in mechanics and precise control techniques. In addition, because the system has many variable parameters, strong nonlinearity, and is affected by many external noises, there are many challenges in the design process. This paper proposes a sustainable control method that integrates the Dynamic Surface Control (DSC) algorithm combining an adaptive compensation algorithm using a Radial Basis Function (RBF) neural network, which makes the tension and velocity of the batches approximate to the set value, and helps the system to be stable with variable parameters. The stability of the system is guaranteed and the effectiveness of the proposed control approach is verified via simulations.

Keywords: Flexible-link multi-motor drives, dynamic surface control, radial basis function, nonlinear controller

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
F	N	Lực căng của vật liệu
ω_u	Rad/s	Vận tốc góc của lô tờ
ω_r	Rad/s	Vận tốc góc của lô cuộn
τ_u	Nm	Mô-men lực cản do ma sát giữa trục lô và ổ đỡ tác dụng lên trục lô
τ_r	Nm	Mô-men lực căng tác dụng lên lô tờ
r_u	m	Hàm bán kính theo thời gian lô tờ
R_{u0}	m	Bán kính ban đầu lô tờ
r_r	m	Hàm bán kính ban đầu lô cuộn lại
R_{r0}	m	Bán kính ban đầu lô cuộn
J_{u0}	$kg.m^2$	Mô-men quán tính ban đầu lô tờ
J_{r0}	$kg.m^2$	Mô-men quán tính ban đầu lô cuộn
b_{fu}	$Nm.s$	Hệ số cản giữa ổ đỡ và trục lô
b_{fr}	$Nm.s$	Hệ số cản giữa trục lô cuộn và ổ đỡ
E	N/m^2	Mô-đun đàn hồi của vật liệu
S	m^2	Diện tích toàn phần vật liệu
L	m	Chiều dài vật liệu sau khi biến dạng
a	m	Độ dày mỗi lớp vật liệu
ρ	kg/m^3	Khối lượng riêng của vật liệu
w	m	Độ rộng băng vật liệu

Chữ viết tắt

RBF	Radial Basic Function
DSC	Dynamic Surface Control

PET

Polyethylene terephthalate

DWRC

Drivers with resilient coupling

Tóm tắt

Hệ truyền động nhiều trục có điều khiển được biết đến như một cơ chế trong đó các động cơ riêng biệt được sử dụng để vận hành các bộ phận khác nhau của cùng một máy trong số lượng lớn các nhà máy công nghiệp. Sự vận hành phức tạp của các hệ thống lớn như nhà máy thép, gang, sản xuất giấy, pin mặt trời, robot hình người, máy đào lớn,... phụ thuộc vào hiệu suất của hệ truyền động nhiều trục. Những sản phẩm được tạo ra đóng vai trò rất quan trọng trong đời sống hằng ngày cũng như công cuộc xây dựng và phát triển thế giới hiện nay, tuy nhiên những vật liệu sản xuất rất dễ bị hư hỏng nếu quy trình xử lý kém. Vì vậy, hệ thống đòi hỏi kỹ thuật cao về cơ khí và kỹ thuật điều khiển chính xác. Ngoài ra, do hệ thống có nhiều tham số thay đổi, tính phi tuyến mạnh, chịu tác động của nhiễu nhiều bên ngoài nên trong quá trình thiết kế cũng gặp nhiều thách thức. Bài báo này đề xuất phương pháp điều khiển bền vững tích hợp thuật toán điều khiển DSC (Dynamic Surface Control) kết hợp thuật toán bù thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF (Radial Basis Function) làm cho lực căng và vận tốc của các quả lô xấp xỉ giá trị đặt, giúp hệ thống ổn định với các tham số thay đổi. Sự ổn định của hệ thống được đảm bảo và hiệu quả của thuật toán đề xuất được kiểm chứng qua mô phỏng.

1. Giới thiệu

Hệ truyền động điện là một tập hợp các thiết bị điện, thiết bị điện tử, thiết bị điện tử, phục vụ cho việc biến đổi năng lượng điện-cơ cũng như gia công, truyền tín hiệu thông tin để điều khiển quá trình biến đổi năng lượng. Dựa vào cách lắp đặt ta có thể phân loại như sau: truyền động đơn lẻ (một động cơ điện kết nối với một máy sản xuất), truyền động nhóm (một động cơ điện duy nhất được sử dụng để truyền động cho hai hoặc nhiều máy sản xuất) và truyền động đa trục (hai hoặc nhiều động cơ riêng biệt được dùng để truyền động cho các bộ phận của cùng một máy sản xuất) [1]. Với sự trợ giúp của hệ truyền động đa trục, một quy trình phức tạp có thể được tự động hóa cung cấp khả năng quản lý quá trình tốt hơn. Có thể thấy hệ truyền động đa trục được sử dụng rộng rãi trong những nhà máy công nghiệp với rất nhiều ứng dụng đóng vai trò quan trọng [2], [3]. Có những hệ thống đã có từ rất lâu và đã có những nghiên cứu áp dụng mang lại thành tựu to lớn [4], [5]. Tuy nhiên phụ thuộc vào đặc thù của từng lĩnh vực và sự phát triển đầu tư vào các hệ thống máy móc tại các cơ sở sản xuất, sẽ cần mức độ ưu tiên phát triển nghiên cứu cải tiến về năng suất, công suất và đặc biệt làm chủ công nghệ khác nhau.

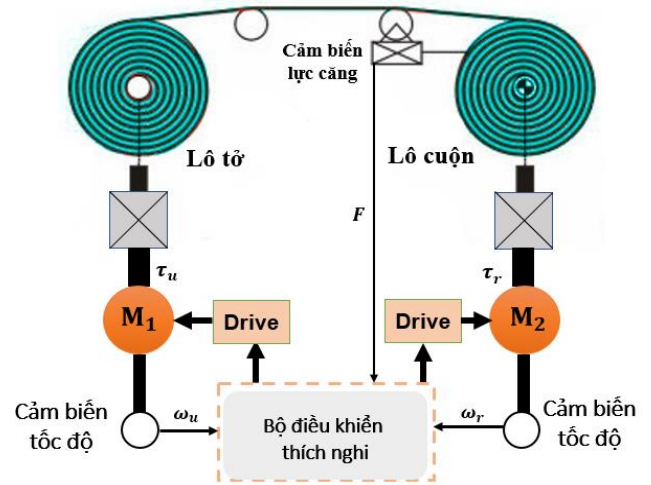
Bài báo sẽ tập trung nghiên cứu hệ truyền động đa trục có liên kết mềm. Ta có thể coi hệ truyền động nhiều trục có liên kết mềm là những phân đoạn vận chuyển vật liệu, các hệ truyền động được liên kết với nhau bằng chính các đoạn vật liệu. Một ví dụ về hệ truyền động nhiều trục có liên kết mềm được ứng dụng trong phân đoạn vận chuyển vật liệu dạng băng (Drivers With Resilient Coupling - DWRC), là mục tiêu để thiết kế điều khiển và mô phỏng kiểm chứng trong bài báo này. DWRC có các bộ phận cơ bản như sau: Lô tở (winder) là một trong hai thành phần quan trọng nhất của hệ thống. Ban đầu lô tở sẽ mang một khối lượng vật liệu nhất định, trong quá trình hoạt động của hệ truyền động, vật liệu sẽ được di chuyển dần sang lô cuộn thông qua hệ thống truyền động hoặc lô dẫn. Lô dẫn (guide) gồm hai loại lô dẫn là lô dẫn chủ động và lô dẫn bị động. Lô dẫn bị động chỉ có nhiệm vụ dẫn và đỡ vật liệu còn lô dẫn chủ động còn có thêm khả năng tham gia vào quá trình vận chuyển vật liệu. Lô cuộn (unwinder) có cấu tạo như lô tở nhưng chiều di chuyển của vật liệu là ngược lại. Ban đầu lô cuộn sẽ không có vật liệu, trong quá trình hoạt động vật liệu sẽ được di chuyển dần vào lô cuộn.

Trong những năm gần đây, các phương pháp điều khiển phi tuyến khác nhau như điều khiển trượt [6]-[10], điều khiển mờ [11]-[12], điều khiển cuộn chiếu [13]-[15], mặt trượt động (Dynamic Surface Control - DSC) [16], điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động (Active Disturbance Rejection Control - ADRC) [17],... đã được áp dụng để nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống DWRC. Các phương pháp điều khiển này chỉ có thể mang lại hiệu quả tốt khi các thông số của hệ thống được biết rõ ràng. Tuy nhiên, hệ thống DWRC là một hệ thống thay đổi theo thời gian và việc tính toán các thông số của hệ thống khá phức tạp và kém chính xác. Để cải thiện hơn nữa hiệu suất của hệ thống, cần phải có một cơ chế thích nghi theo sự thay đổi của các tham số hệ thống. Mạng nơ ron xuyến tâm (Radial Basis Function - RBF) là một lựa chọn phù hợp trong nhiều ứng dụng [18]-[20]. RBF đã được áp dụng cho hệ thống DWRC để điều chỉnh thành công hệ thống DWRC có trục không tròn hoàn hảo [21]. Tuy nhiên, trong hệ thống DWRC, có nhiều tham số hơn bán kính trục và nhiều thay đổi theo thời gian cần được điều chỉnh để cải thiện hiệu suất của hệ thống. Vì vậy, bài báo này đề xuất điều khiển Backstepping dựa trên mạng nơ ron RBF thích nghi cho hệ thống DWRC. Bộ điều

khiển được thiết kế bằng kỹ thuật cuốn chiếu (Backstepping) có chứa các thành phần thay đổi theo thời gian của hệ thống được xấp xỉ bằng mạng nơ ron RBF. Các quy tắc cập nhật trọng số mạng RBF được đề xuất để đảm bảo tính ổn định và chất lượng của hệ thống. Ngoài ra, để tăng tính bền vững của hệ thống và khắc phục tình trạng “explosion of terms” của bộ điều khiển Backstepping, DSC kết hợp với điều khiển RBF được đề xuất.

2. Mô hình toán học của hệ thống DWRC

Trong một số ứng dụng thực tế của DWRC, để thuận lợi trong việc nghiên cứu và xây dựng phần điều khiển cho hệ, người ta sẽ giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của các lô dẫn, coi các thành phần như động cơ, cảm biến, bộ biến đổi là lý tưởng và không xét đến các hiện tượng vật liệu bị nổi và trượt. Như vậy hệ chỉ còn lại lô tở và lô cuộn, lúc này lực căng sẽ đồng đều trên cả đoạn vật liệu từ lô dẫn và lô tở. Việc giới hạn như trên có thể giúp xác định mô hình toán học dễ dàng hơn.



Hình 1: Mô hình DWRC rút gọn

Hình 1 mô tả mô hình hệ thống DWRC rút gọn gồm lô tở và lô cuộn. Lô tở được điều khiển bằng động cơ M_1 , lô cuộn được điều khiển bằng động cơ M_2 . Mỗi động cơ đều có driver cho phép điều khiển mô men động cơ theo lượng đặt. Các cảm biến tốc độ được gắn với trục các động cơ để đo tốc độ các động cơ, cũng đồng thời là tốc độ góc của các lô. Cảm biến lực căng được sử dụng để đo lực căng vật liệu. Các tín hiệu đo được gửi về bộ điều khiển thích nghi để phục vụ tính toán tín hiệu điều khiển cho hai động cơ. Theo định luật Newton và bảo toàn khối lượng, phương trình động lực học phi tuyến của hệ truyền động DWRC có thể được viết như sau [22]:

$$\dot{F} = k_1 \omega_u + k_2 \omega_r F + k_3 \omega_r \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_u = k_4 \tau_u + k_5 F + k_6 \omega_u + k_7 \omega_u^2 \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_r = k_8 \tau_r + k_9 F + k_{10} \omega_r + k_{11} \omega_r^2 \quad (3)$$

Trong đó F là lực căng trên đoạn vật liệu; ω_u và ω_r là vận tốc góc của lô tở và lô cuộn; k_i là các tham số biến thiên theo thời gian được xác định như sau:

$$k_1 = \frac{r_u}{L} t_u - \frac{ESr_u}{L}; k_2 = -\frac{r_r}{L}; k_3 = \frac{ESr_r}{L}; k_4 = -\frac{1}{J_u};$$

$$k_5 = \frac{r_u}{J_u}; k_6 = -\frac{b_{fu}}{J_u}; k_7 = \frac{awpr_u^3}{J_u}; k_8 = \frac{1}{J_r}; k_9 = -\frac{r_r}{J_r};$$

$$k_{10} = -\frac{b_{fr}}{J_r}; k_{11} = -\frac{awpr_r^3}{J_r};$$

Trong định nghĩa k_i , mô-men quán tính J_u, J_r được tính như sau:

$$J_u(t) = J_{u0} + \frac{1}{2} \rho w \pi (r_u^4 - R_{u0}^4);$$

$$J_r(t) = J_{r0} + \frac{1}{2} \rho w \pi (r_r^4 - R_{r0}^4)$$

trong đó J_{u0} và J_{r0} tương ứng là mô men quán tính của trục lô tở và trục lô cuộn; R_{u0} và R_{r0} tương ứng là bán kính ban đầu của lô tở và lô cuộn.

Khi thêm các thành phần bất định, mô hình DWRC trở thành như sau:

$$\dot{F} = \hat{k}_1 \omega_u + \hat{k}_2 \omega_r F + \hat{k}_3 \omega_r + \Delta \xi_F \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_u = \hat{k}_4 \tau_u + \hat{k}_5 F + \hat{k}_6 \omega_u + \hat{k}_7 \omega_u^2 + \Delta \xi_u \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_r = \hat{k}_8 \tau_r + \hat{k}_9 F + \hat{k}_{10} \omega_r + \hat{k}_{11} \omega_r^2 + \Delta \xi_r \quad (6)$$

Trong đó:

$$\Delta \xi_F = \tilde{k}_1 \omega_u + \tilde{k}_2 \omega_r F + \tilde{k}_3 \omega_r \quad (7)$$

$$\Delta \xi_u = \tilde{k}_4 \tau_u + \tilde{k}_5 F + \tilde{k}_6 \omega_u + \tilde{k}_7 \omega_u^2 \quad (8)$$

$$\Delta \xi_r = \tilde{k}_8 \tau_r + \tilde{k}_9 F + \tilde{k}_{10} \omega_r + \tilde{k}_{11} \omega_r^2 \quad (9)$$

$$k_1 = \hat{k}_1 + \tilde{k}_1; k_2 = \hat{k}_2 + \tilde{k}_2; k_3 = \hat{k}_3 + \tilde{k}_3; k_4 = \hat{k}_4 + \tilde{k}_4;$$

$$k_5 = \hat{k}_5 + \tilde{k}_5; k_6 = \hat{k}_6 + \tilde{k}_6; k_7 = \hat{k}_7 + \tilde{k}_7; k_8 = \hat{k}_8 + \tilde{k}_8;$$

$$k_9 = \hat{k}_9 + \tilde{k}_9; k_{10} = \hat{k}_{10} + \tilde{k}_{10};$$

với $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4, \hat{k}_5, \hat{k}_6, \hat{k}_7, \hat{k}_8, \hat{k}_9, \hat{k}_{10}, \hat{k}_{11}$ là các tham số ban đầu để thiết kế mô hình, $\tilde{k}_1, \tilde{k}_2, \tilde{k}_3, \tilde{k}_4, \tilde{k}_5, \tilde{k}_6, \tilde{k}_7, \tilde{k}_8, \tilde{k}_9, \tilde{k}_{10}, \tilde{k}_{11}$ là sai lệch giữa thông số mô hình đã xác định theo tính toán và thông số thực tế, tức là thành phần bất định của tham số.

3. Thiết kế bộ điều khiển mặt trượt động DSC kết hợp bộ bù thích nghi RBF

Đầu tiên, định nghĩa các biến trung gian như sau:

$$f_u = \hat{k}_5 F + \hat{k}_6 \omega_u + \hat{k}_7 \omega_u^2; g_u = \hat{k}_4;$$

$$f_r = \hat{k}_9 F + \hat{k}_{10} \omega_r + \hat{k}_{11} \omega_r^2; g_r = \hat{k}_8;$$

Khi đó, mô hình động lực học (4)-(6) DWRC trở thành:

$$\dot{F} = \hat{k}_1 \omega_u + \hat{k}_2 \omega_r F + \hat{k}_3 \omega_r + \Delta \xi_F \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_u = f_u + g_u \tau_u + \Delta \xi_u \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_r = f_r + g_r \tau_r + \Delta \xi_r \quad (12)$$

Bước 1: Định nghĩa biến sai lệch lực căng $\Delta F = F - F_d$

$$\Delta \dot{F} = \dot{F} - \dot{F}_d = \hat{k}_1 \omega_u + \hat{k}_2 \omega_r F + \hat{k}_3 \omega_r + \Delta \xi_F - \dot{F}_d \quad (13)$$

Chọn hàm Lyapunov: $V_1 = \frac{1}{2} \Delta F^2$. Đạo hàm V_1 ta thu được:

$$\dot{V}_1 = \Delta F \Delta \dot{F} = \Delta F (\hat{k}_1 \omega_u + \hat{k}_2 \omega_r F + \hat{k}_3 \omega_r + \Delta \xi_F) \quad (14)$$

Để hệ thống con ổn định theo tiêu chuẩn Luapunov ta phải đảm bảo điều kiện $\dot{V}_1 \leq 0$. Vì vậy ta chọn luật điều khiển ảo như sau:

$$\bar{\omega}_{ud} = -\frac{1}{\hat{k}_1} \left(\hat{k}_2 \omega_r F + \hat{k}_3 \omega_r - \dot{F}_d + c_1 \Delta F + \frac{p_1^2 \Delta F}{2\epsilon} \right) \quad (15)$$

Trong đó: c_1 là một số thực dương, ϵ là một số thực dương nhỏ, $\frac{p_1^2 \Delta F}{2\epsilon}$ để đối phó với thành phần bất định $\Delta \xi_F$, $|\Delta \xi_F| \leq p_1$. Tín hiệu điều khiển này được thiết kế để F bám giá trị đặt F_d hay $\Delta F \rightarrow 0$.

Theo kỹ thuật Backstepping ta tìm được tín hiệu ảo ω_{ud} để $F \rightarrow F_d$, tuy nhiên trong kỹ thuật thiết kế này ta sẽ để hàm ω_{ud} ở dạng một bộ lọc thông thấp $\bar{\omega}_{ud}$, mục tiêu là lọc thành phần biến thiên đạo hàm do hiện tượng “explosion of term”.

$$\begin{cases} \sigma_1 \dot{\omega}_{ud} + \omega_{ud} = \bar{\omega}_{ud} \\ \bar{\omega}_{ud}(0) = \omega_{ud}(0) \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó σ_1 là hằng số thời gian của bộ lọc, $\bar{\omega}_{ud}$ là đầu vào của bộ lọc, ω_{ud} là đầu ra của bộ lọc.

Bước 2: Định nghĩa biến sai lệch vận tốc góc lô tở $\Delta \omega_u = \omega_u - \omega_{ud}$.

Chọn hàm Luapunov: $V_u = \frac{1}{2} \Delta \omega_u^2$. Đạo hàm V_u ta thu được:

$$\dot{V}_u = \Delta \omega_u \Delta \dot{\omega}_u = \Delta \omega_u (\dot{\omega}_u - \dot{\omega}_{ud}) \quad (17)$$

$$= \Delta \omega_u (f_u + g_u \tau_u + \Delta \xi_u - \dot{\omega}_{ud})$$

Để hệ thống con ổn định theo tiêu chuẩn Luapunov ta phải đảm bảo điều kiện $\dot{V}_u \leq 0$. Vì vậy hàm điều khiển τ_u như sau:

$$\tau_u = -\frac{1}{g_u} [f_u - \dot{\omega}_{ud} + c_2 \Delta \omega_u + c_4 \text{sgn}(\Delta \omega_u)] \quad (18)$$

Trong đó c_2 và c_4 là các số thực dương, $c_4 \text{sgn}(\Delta \omega_u)$ dùng để đối phó với thành phần bất định $\Delta \xi_u$, $|\Delta \xi_u| \leq p_1$, $\dot{\omega}_{ud}$ được tính từ bộ lọc thông thấp (16). Như vậy hàm điều khiển có thể được viết lại:

$$\tau_u = -\frac{1}{g_u} \left(f_u - \frac{\bar{\omega}_{ud} - \omega_{ud}}{\sigma} + c_2 \Delta \omega_u + c_4 \text{sgn}(\Delta \omega_{ud}) \right) \quad (19)$$

Tín hiệu điều khiển này được thiết kế để ω_u bám giá trị đặt ω_{ud} hay $\Delta \omega \rightarrow 0$.

Do sự biến thiên của các thông số trong các hàm f_u và g_u làm cho việc xác định chính xác các hàm này là rất khó khăn. Vì vậy ta sẽ xấp xỉ các hàm đó bằng các hàm $\hat{f}_u$ và $\hat{g}_u$. Hàm điều khiển τ_u có thể được viết lại:

$$\tau_u = -\frac{1}{\hat{g}_u} \left(\hat{f}_u - \frac{\bar{\omega}_{ud} - \omega_{ud}}{\sigma} + c_2 \Delta \omega_u + c_4 \text{sgn}(\Delta \omega_{ud}) \right) \quad (20)$$

Khi đó $\dot{V}_u$ trở thành:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_u &= \Delta\omega_u \left((f_u - \hat{f}_u) + \hat{f}_u + (g_u - \hat{g}_u)\tau_u + \hat{g}_u \right. \\
&\quad \left. - \dot{\omega}_{adv} + \Delta\xi_u \right) \\
&= \Delta\omega_u (f_u - \hat{f}_u) \\
&\quad + \Delta\omega_u (g_u - \hat{g}_u)\tau_u - c_2 \Delta\omega_u^2 \\
&\quad - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\xi_u \Delta\omega_u
\end{aligned} \quad (21)$$

Tiếp theo các luật xấp xỉ cho hàm f_u và g_u được đề xuất như sau. Giả sử hàm f_u có thể được tính bởi mạng nơ ron RBF lý tưởng như sau:

$$f_u = \bar{W}_u^T \bar{h}_u \quad (22)$$

Trong đó $\bar{W}_u = [W_{u1}^*, W_{u2}^*, \dots, W_{um}^*]^T$ là véc tơ trọng số lý tưởng của mạng nơ ron, m là số lớp của mạng neural, $\bar{h}_u = [h_{u1}, h_{u2}, \dots, h_{um}]^T$ là véc tơ hàm Gaussian. Hàm Gaussian h_{ui} ($i = 1, 2, \dots, m$), với đầu vào là vận tốc góc của lô tời và lô cuộn ω_u, ω_r được định nghĩa như sau:

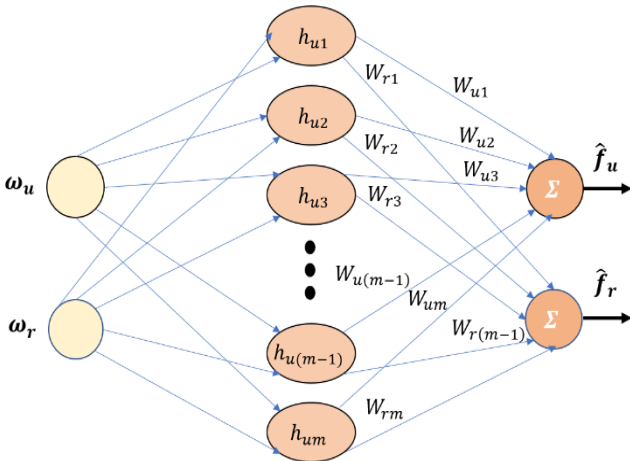
$$h_{ui} = \frac{\exp\left(\frac{\|\omega_u - q_{1i}\|^2 + \|\omega_r - q_{2i}\|^2}{b_{ui}^2}\right)}{\sum_{i=1}^m \exp\left(\frac{\|\omega_u - q_{1i}\|^2 + \|\omega_r - q_{2i}\|^2}{b_{ui}^2}\right)} \quad (23)$$

Trong đó q_{1i}, q_{2i} là tọa độ tâm của hàm RBF, b_{ui} là độ rộng của hàm RBF. Hàm xấp xỉ $\hat{f}_u$ được tính bởi mạng nơ-ron RBF (hình 2) như sau:

$$\hat{f}_u = \hat{W}_u^T \bar{h}_u \quad (24)$$

Trong đó $\hat{W}_u = [W_{u1}, W_{u2}, \dots, W_{um}]^T$ là véc-tơ trọng số. Chúng ta phải thiết lập luật cập nhật trọng số sao cho hệ thống ổn định.

Ngoài ra ta còn phải tìm luật xấp xỉ cho g_u . Cần chú ý rằng rằng $g_u = -\frac{1}{f_u}$ nên tồn tại giới hạn trên $g_u < g_{uM} < 0$



Hình 2: Sơ đồ mạng nơ-ron RBF để tính xấp xỉ $\hat{f}_u$ và $\hat{f}_r$

Giả sử rằng hàm g_u có thể được xấp xỉ bởi hàm $\hat{g}_u$. Ta định nghĩa các sai lệch $\tilde{W}_u = \bar{W}_u - \hat{W}_u$, $\tilde{g}_u = g_u - \hat{g}_u$. Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V_{2u} = V_u + \frac{1}{2} \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{W}_u + \frac{1}{2} \eta_u \tilde{g}_u^2 \quad (25)$$

$$= \frac{1}{2} \Delta\omega_u^2 + \frac{1}{2} \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{W}_u + \frac{1}{2} \eta_u \tilde{g}_u^2$$

Trong đó Γ_u là là một ma trận đường chéo xác định dương, η_u là một số thực dương. Đạo hàm V_{2u} ta thu được:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{2u} &= \dot{V}_u + \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \dot{\tilde{W}}_u + \eta_u \tilde{g}_u \dot{\tilde{g}}_u \\
&= \Delta\omega_u (f_u - \hat{f}_u) + \Delta\omega_u (g_u - \hat{g}_u)\tau_u - c_2 \Delta\omega_u^2 + \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \dot{\tilde{W}}_u \\
&\quad + \eta_u \tilde{g}_u \dot{\tilde{g}}_u - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\xi_u \Delta\omega_u \\
&= \Delta\omega_u \tilde{W}_u^T \bar{h}_u - c_2 \Delta\omega_u^2 + \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \dot{\tilde{W}}_u + \eta_u \tilde{g}_u \dot{\tilde{g}}_u \\
&\quad - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\xi_u \Delta\omega_u \\
&= \tilde{W}_u^T (\Delta\omega_u \bar{h}_u + \Gamma_u^{-1} \dot{\tilde{W}}_u) + \tilde{g}_u (\Delta\omega_u \tau_u + \eta_u \dot{\tilde{g}}_u) - c_2 \Delta\omega_u^2 \\
&\quad - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\xi_u \Delta\omega_u
\end{aligned} \quad (26)$$

Do $\dot{\tilde{W}}_u = -\dot{\hat{W}}_u$ và $\dot{\tilde{g}}_u = -\dot{\hat{g}}_u$ nên :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{2u} &= -c_2 \Delta\omega_u^2 - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\xi_u \Delta\omega_u \\
&\quad + \tilde{W}_u^T (\Delta\omega_u \bar{h}_u - \Gamma_u^{-1} \dot{\hat{W}}_u) + \tilde{g}_u (\Delta\omega_u \tau_u \\
&\quad - \eta_u \dot{\hat{g}}_u)
\end{aligned} \quad (27)$$

Để đảm bảo tính ổn định của hệ thống theo tiêu chuẩn Lyapunov, tức là $\dot{V}_{2u} \leq 0$, ta chọn các luật cập nhật:

$$\dot{\hat{g}}_u = \begin{cases} \eta_u^{-1} \Delta\omega_u \tau_u; & \text{nếu } \hat{g}_u < g_{uM} \\ \eta_u^{-1} \Delta\omega_u \tau_u; & \text{nếu } \hat{g}_u = g_{uM}, \Delta\omega_u M_u < 0 \\ 0; & \text{nếu } \hat{g}_u = g_{uM}, \Delta\omega_u M_u \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\dot{\hat{W}}_u = \Gamma_u \Delta\omega_u \bar{h}_u \quad (29)$$

Luật cập nhật cho $\hat{g}_u$ có thể được giải thích:

- Nếu $\hat{g}_u < g_{uM}$, tức là $\hat{g}_u$ nằm trong giới hạn cho phép, $\hat{g}_u$ có thể nhận bất kì giá trị nào và ta chọn $\dot{\hat{g}}_u = \eta_u^{-1} \Delta\omega_u M_u$ khi đó $\tilde{g}_u (\Delta\omega_u M_u - \eta_u \dot{\hat{g}}_u) = 0$.
- Nếu $\hat{g}_u = g_{uM}$, tức là $\hat{g}_u$ đạt giới hạn trên khi đó $\hat{g}_r$ không thể chọn một giá trị dương. Vì vậy nếu $\Delta\omega_u M_u < 0$ ta chọn $\dot{\hat{g}}_u = \eta_u^{-1} \Delta\omega_u M_u$
- Nếu $\hat{g}_u = g_{uM}$ và $\Delta\omega_u M_u \geq 0$, ta chọn $\dot{\hat{g}}_u = 0$. Khi đó $\hat{g}_u$ được giữ ở giới hạn trên và $\tilde{g}_u = g_u - \hat{g}_u = g_u - g_{uM} \leq 0$, vì thế $\tilde{g}_u (\Delta\omega_u M_u - \eta_u \dot{\hat{g}}_u) = \tilde{g}_u \Delta\omega_u M_u \leq 0$

Trong mọi trường hợp ta luôn có:

$$\tilde{g}_u (\Delta\omega_u M_u + \eta_u \dot{\hat{g}}_u) \leq 0 \text{ và } \tilde{W}_u^T (\Delta\omega_u \bar{h}_u - \Gamma_u^{-1} \dot{\hat{W}}_u) = 0$$

$$\text{Vì vậy } \dot{V}_{2u} \leq -k_{\omega u} \Delta\omega_u^2 - c_4 \text{sgn}(\Delta\omega_u) \Delta\omega_u + \Delta\omega_u \Delta\xi_u$$

Bước 3: Gọi $\bar{\omega}_{rd}$ là giá trị đặt vận tốc góc của lô tời.

Khi thiết kế Backstepping, hàm điều khiển sẽ có chứa thành phần đạo hàm $\dot{\bar{\omega}}_{rd}$, hơn nữa trong $\bar{\omega}_{ud}$ cũng có chứa ω_r do đó ta sẽ thêm một bộ lọc nữa ở đây để lọc giá trị đầu vào, vừa giúp giảm thành phần đạo hàm biến thiên cho hàm điều khiển, vừa giúp tăng hiệu quả cho bộ lọc thứ nhất.

$$\begin{cases} \sigma_2 \dot{\omega}_{rd} + \omega_{rd} = \bar{\omega}_{rd} \\ \bar{\omega}_{rd}(0) = \omega_{rd}(0) \end{cases} \quad (30)$$

Trong đó σ_2 là hằng số thời gian của bộ lọc, $\bar{\omega}_{rd}$ là đầu vào của bộ lọc, ω_{rd} là đầu ra của bộ lọc.

Định nghĩa biến sai lệch vận tốc góc lô cuộn $\Delta\omega_r = \omega_r - \omega_{rd}$. Chọn hàm Luapunov: $V_r = \frac{1}{2}\Delta\omega_r^2$. Đạo hàm $\dot{V}_r$ ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r &= \Delta\omega_r \Delta\dot{\omega}_r = \Delta\omega_r (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{rd}) \\ &= \Delta\omega_r (f_r + g_r \tau_r + \Delta\xi_r - \dot{\omega}_{rd}) \end{aligned} \quad (31)$$

Để hệ thống con ổn định theo tiêu chuẩn Luapunov ta phải đảm bảo điều kiện $\dot{V}_r \leq 0$. Vì vậy ta chọn hàm điều khiển τ_r như sau:

$$\tau_r = -\frac{1}{g_r} [f_r - \dot{\omega}_{rd} + c_3 \Delta\omega_r + c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r)] \quad (32)$$

Trong đó c_3 và c_5 là các số thực dương, $c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r)$ dùng để đối phó với thành phần bất định $\Delta\xi_r$, $|\Delta\xi_r| \leq p_3$, $\dot{\omega}_{rd}$ được tính từ bộ lọc thông thấp (30). Như vậy hàm điều khiển có thể được viết lại:

$$\tau_r = -\frac{1}{g_r} \left(f_r - \frac{\bar{\omega}_{rd} - \omega_{rd}}{\sigma_2} + c_3 \Delta\omega_r + c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_{rd}) \right) \quad (33)$$

Tín hiệu điều khiển này được thiết kế để ω_r bám giá trị đặt ω_{rd} hay $\Delta\omega \rightarrow 0$.

Do sự biến thiên của các thông số trong các hàm f_r và g_r làm cho việc xác định chính xác các hàm này là rất khó khăn. Vì vậy ta sẽ xấp xỉ các hàm đó bằng các hàm $\hat{f}_r$ và $\hat{g}_r$. Hàm điều khiển τ_r có thể được viết lại:

$$\tau_r = -\frac{1}{\hat{g}_r} \left(\hat{f}_r - \frac{\bar{\omega}_{rd} - \omega_{rd}}{\sigma} + c_3 \Delta\omega_r + c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_{rd}) \right) \quad (34)$$

Khi đó $\dot{V}_r$ trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r &= \Delta\omega_r ((f_r - \hat{f}_r) + \hat{f}_r + (g_r - \hat{g}_r)\tau_r + \hat{g}_r \tau_r \\ &\quad - \dot{\omega}_{rd} + \Delta\xi_r) \\ &= \Delta\omega_r (f_r - \hat{f}_r) + \Delta\omega_r (g_r - \hat{g}_r)\tau_r \\ &\quad - c_3 \Delta\omega_r^2 - c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r) \Delta\omega_r \\ &\quad + \Delta\xi_r \Delta\omega_r \end{aligned} \quad (35)$$

Tiếp theo các luật xấp xỉ cho hàm f_r và g_r được đề xuất. Giả sử hàm f_r có thể được tính bởi mạng nơ-ron RBF lý tưởng như sau:

$$f_r = \bar{W}_r^T \bar{h}_r \quad (36)$$

Trong đó $\bar{W}_r = [W_{r1}^*, W_{r2}^*, \dots, W_{rm}^*]^T$ là véc tơ trọng số lý tưởng của mạng nơ-ron, m là số lớp của mạng neural, $\bar{h}_r = [h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rm}]^T$ là véc tơ hàm Gaussian. Hàm xấp xỉ $\hat{f}_r$ được tính bởi mạng nơ-ron RBF (hình 2) như sau:

$$\hat{f}_r = \hat{W}_r^T \bar{h}_r \quad (37)$$

Trong đó $\hat{W}_r = [W_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rm}]^T$ là véc tơ trọng số. Chúng ta phải thiết lập luật cập nhật trọng số sao cho hệ thống ổn định. Ngoài ra ta còn phải tìm luật xấp xỉ cho g_r . Cần chú ý rằng rằng $g_r = \frac{1}{J_u}$ nên tồn tại giới hạn dưới $g_r \geq g_{rM} > 0$. Giả sử rằng hàm g_r có thể được xấp xỉ bởi hàm $\hat{g}_r$. Ta định nghĩa các sai lệch $\tilde{W}_r = \bar{W}_r - \hat{W}_r$, $\tilde{g}_r = g_r - \hat{g}_r$. Chọn hàm Lyapunov:

$$\begin{aligned} V_{2r} &= V_r + \frac{1}{2} \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{W}_r + \frac{1}{2} \eta_r \tilde{g}_r^2 \\ &= \frac{1}{2} \Delta\omega_r^2 + \frac{1}{2} \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{W}_r + \frac{1}{2} \eta_r \tilde{g}_r^2 \end{aligned} \quad (38)$$

Trong đó Γ_r là một ma trận đường chéo xác định dương, η_r là một số thực dương. Đạo hàm $\dot{V}_{2r}$ ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2r} &= \dot{V}_r + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \dot{\tilde{W}}_r + \eta_r \tilde{g}_r \dot{\tilde{g}}_r \\ &= \Delta\omega_r (f_r - \hat{f}_r) + \Delta\omega_r (g_r - \hat{g}_r) \tau_r - c_3 \Delta\omega_r^2 \\ &\quad + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \dot{\tilde{W}}_r + \eta_r \tilde{g}_r \dot{\tilde{g}}_r \\ &\quad - c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r) \Delta\omega_r + \Delta\xi_r \Delta\omega_r \\ &= \Delta\omega_r \tilde{W}_r^T \bar{h}_r - c_3 \Delta\omega_r^2 + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \dot{\tilde{W}}_r + \eta_r \tilde{g}_r \dot{\tilde{g}}_r \\ &\quad - c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r) \Delta\omega_r + \Delta\xi_r \Delta\omega_r \\ &= \tilde{W}_r^T (\Delta\omega_r \bar{h}_r + \Gamma_r^{-1} \dot{\tilde{W}}_r) + \tilde{g}_r (\Delta\omega_r \tau_r + \eta_r \dot{\tilde{g}}_r) \\ &\quad - c_3 \Delta\omega_r^2 - c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r) \Delta\omega_r \\ &\quad + \Delta\xi_r \Delta\omega_r \end{aligned} \quad (39)$$

Do $\dot{\tilde{W}}_r = -\dot{\hat{W}}_r$ và $\dot{\tilde{g}}_r = -\dot{\hat{g}}_r$ nên:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2r} &= -c_3 \Delta\omega_r^2 - c_5 \text{sgn}(\Delta\omega_r) \Delta\omega_r + \Delta\xi_r \Delta\omega_r \\ &\quad + \tilde{W}_r^T (\Delta\omega_r \bar{h}_r - \Gamma_r^{-1} \dot{\hat{W}}_r) + \tilde{g}_r (\Delta\omega_r \tau_r \\ &\quad - \eta_r \dot{\hat{g}}_r) \end{aligned} \quad (40)$$

Để đảm bảo tính ổn định của hệ thống theo tiêu chuẩn Lyapunov, tức là $\dot{V}_{2r} \leq 0$, ta chọn các luật cập nhật như sau:

$$\dot{\hat{g}}_r = \begin{cases} \eta_r^{-1} \Delta\omega_r \tau_r; & \text{nếu } \hat{g}_r > g_{rM} \\ \eta_r^{-1} \Delta\omega_r \tau_r; & \text{nếu } \hat{g}_r = g_{rM} \text{ và } \Delta\omega_r \tau_r > 0 \\ 0; & \text{nếu } \hat{g}_r = g_{rM} \text{ và } \Delta\omega_r \tau_r \leq 0 \end{cases} \quad (41)$$

$$\dot{\hat{W}}_r = \Gamma_r \Delta\omega_r \bar{h}_r \quad (42)$$

Luật cập nhật ở phương trình (41) có thể được giải thích:

- Nếu $\hat{g}_r > g_{rM}$, tức là $\hat{g}_r$ nằm trong giới hạn cho phép thì $\dot{\hat{g}}_r$ có thể nhận giá trị bất kỳ và ở đây ta chọn $\dot{\hat{g}}_r = \eta_r^{-1} \Delta\omega_r \tau_r$, khi đó $\tilde{g}_r (\Delta\omega_r \tau_r - \eta_r \dot{\hat{g}}_r) = 0$.
- Nếu $\hat{g}_r = g_{rM}$, tức là $\hat{g}_r$ đã đạt giá trị cận dưới, khi đó $\dot{\hat{g}}_r$ không thể chọn giá trị âm. Vì vậy nếu $\Delta\omega_r \tau_r > 0$ thì ta chọn $\dot{\hat{g}}_r = \eta_r^{-1} \Delta\omega_r \tau_r$, khi đó $\tilde{g}_r (\Delta\omega_r \tau_r - \eta_r \dot{\hat{g}}_r) = 0$.
- Nếu $\hat{g}_r = g_{rM}$ và $\Delta\omega_r \tau_r \leq 0$, ta chọn $\dot{\hat{g}}_r = 0$, nghĩa là giữ nguyên giá trị $\hat{g}_r$ bằng giá trị cận dưới. Khi đó $\tilde{g}_r = g_r - \hat{g}_r = g_r - g_{rM} \geq 0$. Suy ra $\tilde{g}_r (\Delta\omega_r \tau_r - \eta_r \dot{\hat{g}}_r) = \tilde{g}_r \Delta\omega_r \tau_r \leq 0$.

Như vậy trong mọi trường hợp, từ luật cập nhật (42) luôn có:

$$\tilde{g}_r(\Delta\omega_r\tau_r - \eta_r\hat{g}_r) \leq 0 \text{ và } \tilde{W}_r^T(\Delta\omega_r\bar{h}_r - \Gamma_r^{-1}\dot{\hat{W}}_r) = 0.$$

Vì vậy ta có:

$$\dot{V}_{2r} \leq -c_3\Delta\omega_r^2 - c_4\text{sgn}(\Delta\omega_r)\Delta\omega_r + \Delta\xi_r\Delta\omega_r \quad (43)$$

Bước 4: Định nghĩa sai lệch của bộ lọc thông thấp thứ nhất

$$\Delta\zeta_1 = \omega_{ud} - \bar{\omega}_{ud} \quad (44)$$

Đạo hàm hai vế và đặt $\gamma_1 = -\dot{\bar{\omega}}_{ud}(\gamma_1 \leq M_1, M_1 > 0)$ ta thu được:

$$\Delta\dot{\zeta}_1 = \dot{\omega}_{ud} - \dot{\bar{\omega}}_{ud} = -\frac{\Delta\zeta_1}{\sigma_1} + \gamma_1 \quad (45)$$

Chọn hàm Lyapunov $V_3 = \frac{1}{2}\Delta\zeta_1^2$, đạo hàm ta thu được:

$$\dot{V}_3 = \Delta\zeta_1\Delta\dot{\zeta}_1 = \Delta\zeta_1\left(-\frac{\Delta\zeta_1}{\sigma_1} + \gamma_1\right) = -\frac{\Delta\zeta_1^2}{\sigma_1} + \Delta\zeta_1\gamma_1 \quad (46)$$

Chọn σ_1 thỏa mãn điều kiện:

$$\frac{1}{\sigma_1} = \frac{M_1^2}{2\epsilon} + c_6; \forall c_6 \geq 0 \quad (47)$$

Bước 5: Định nghĩa sai lệch của bộ lọc thông thấp thứ hai

$$\Delta\zeta_2 = \omega_{rd} - \bar{\omega}_{rd} \quad (48)$$

Đạo hàm hai vế và đặt $\gamma_2 = -\dot{\bar{\omega}}_{rd}(\gamma_2 \leq M_2, M_2 > 0)$ ta thu được:

$$\Delta\dot{\zeta}_2 = \dot{\omega}_{rd} - \dot{\bar{\omega}}_{rd} = -\frac{\Delta\zeta_2}{\sigma_2} + \gamma_2 \quad (49)$$

Chọn hàm Lyapunov $V_4 = \frac{1}{2}\Delta\zeta_2^2$, đạo hàm ta thu được:

$$\dot{V}_4 = \Delta\zeta_2\Delta\dot{\zeta}_2 = \Delta\zeta_2\left(-\frac{\Delta\zeta_2}{\sigma_2} + \gamma_2\right) = -\frac{\Delta\zeta_2^2}{\sigma_2} + \Delta\zeta_2\gamma_2 \quad (50)$$

Chọn σ_2 thỏa mãn điều kiện:

$$\frac{1}{\sigma_2} = \frac{M_2^2}{2\epsilon} + c_7; \forall c_7 \geq 0 \quad (51)$$

Bước 6: Xét tính ổn định cho cả hệ thống

Do bộ lọc thứ nhất có sai lệch $\Delta\zeta_1$ nên đạo hàm sai lệch lực căng có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{F} &= \hat{k}_1\omega_u + \hat{k}_2\omega_r F + \hat{k}_3\omega_r + \Delta\xi_F - \dot{F}_d \\ &= \hat{k}_1((\omega_u - \omega_{ud}) + (\omega_{ud} - \bar{\omega}_{ud}) + \bar{\omega}_{ud}) \\ &\quad + \Delta\xi_F - \dot{F}_d \end{aligned} \quad (52)$$

Ta chọn hàm Lyapunov cho hệ:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_{2u} + V_{2r} + V_3 + V_4 \\ &= \frac{1}{2}\Delta F^2 + \frac{1}{2}\Delta\omega_u^2 + \frac{1}{2}\tilde{W}_u^T\Gamma_u^{-1}\tilde{W}_u \\ &\quad + \frac{1}{2}\eta_u\tilde{g}_u^2 + \frac{1}{2}\Delta\omega_r^2 + \frac{1}{2}\tilde{W}_r^T\Gamma_r^{-1}\tilde{W}_r \\ &\quad + \frac{1}{2}\eta_r\tilde{g}_r^2 + \frac{1}{2}\Delta\zeta_1^2 + \frac{1}{2}\Delta\zeta_2^2 \end{aligned} \quad (53)$$

Đạo hàm hai vế V ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_{2u} + \dot{V}_{2r} + \dot{V}_3 + \dot{V}_4 \\ &= \hat{k}_1(\Delta F\Delta\omega_u + \Delta F\Delta\zeta_1) - c_1\Delta F^2 - \frac{p_1^2\Delta F^2}{2\epsilon} \\ &\quad + \Delta\xi_F\Delta F - c_2\Delta\omega_u^2 - c_4\text{sgn}(\Delta\omega_u)\Delta\omega_u \\ &\quad + \Delta\xi_u\Delta\omega_u + \tilde{W}_u^T(\Delta\omega_u\bar{h}_u - \Gamma_u^{-1}\dot{\hat{W}}_u) \\ &\quad + \tilde{g}_u(\Delta\omega_u\tau_u - \eta_u\hat{g}_u) - c_3\Delta\omega_r^2 \\ &\quad - c_5\text{sgn}(\Delta\omega_r)\Delta\omega_r + \Delta\xi_r\Delta\omega_r \\ &\quad + \tilde{W}_r^T(\Delta\omega_r\bar{h}_r - \Gamma_r^{-1}\dot{\hat{W}}_r) \\ &\quad + \tilde{g}_r(\Delta\omega_r\tau_r - \eta_r\hat{g}_r) - \frac{\Delta\zeta_1^2}{\sigma_1} + \Delta\zeta_1\gamma_1 \\ &\quad - \frac{\Delta\zeta_2^2}{\sigma_2} + \Delta\zeta_2\gamma_2 \end{aligned} \quad (54)$$

Từ bất đẳng thức Young và điều kiện $|\Delta\xi_F| \leq p_1$ ta dễ dàng chứng minh được điều sau:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta F\Delta\omega_u \leq \frac{\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2}{2} \\ \Delta F\Delta\zeta_1 \leq \frac{\Delta F^2 + \Delta\zeta_1^2}{2} \\ \Delta F\Delta\xi_F \leq |\Delta F|p_1 \leq \frac{\Delta F^2 p_1^2}{2\epsilon} + \frac{\epsilon}{2} \\ \Delta\zeta_1\gamma_1 \leq \frac{\Delta\zeta_1^2 \gamma_1^2}{2\epsilon} + \frac{\epsilon}{2} \\ \Delta\zeta_2\gamma_2 \leq \frac{\Delta\zeta_2^2 \gamma_2^2}{2\epsilon} + \frac{\epsilon}{2} \end{array} \right. \quad (55)$$

Từ đó phương trình (54) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \hat{k}_1\left(\frac{\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2}{2} + \frac{\Delta F^2 + \Delta\zeta_1^2}{2}\right) + \frac{3}{2}\epsilon - \frac{\Delta\zeta_1^2}{\sigma_1} \\ &\quad - \frac{\Delta\zeta_2^2}{\sigma_2} + \frac{\Delta\zeta_1^2 \gamma_1^2}{2\epsilon} + \frac{\Delta\zeta_2^2 \gamma_2^2}{2\epsilon} + (-c_1\Delta F^2 \\ &\quad - c_2\Delta\omega_u^2 - c_3\Delta\omega_r^2 - c_4\text{sgn}(\Delta\omega_u)\Delta\omega_u \\ &\quad + \Delta\xi_u\Delta\omega_u - c_5\text{sgn}(\Delta\omega_r)\Delta\omega_r + \Delta\xi_r\Delta\omega_r) \end{aligned} \quad (56)$$

Từ các điều kiện $|\Delta\xi_u| \leq p_2$ và $|\Delta\xi_r| \leq p_3$, phương trình (56) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\Delta F^2(c_1 - \hat{k}_1) - \Delta\omega_u^2\left(c_2 - \frac{\hat{k}_1}{2}\right) \\ &\quad - \Delta\omega_r^2\left(c_3 - \frac{\hat{k}_1}{2}\right) - |\Delta\omega_u|(c_4 - p_1) \\ &\quad - |\Delta\omega_r|(c_5 - p_2) - \frac{\Delta\zeta_1^2}{\sigma_1} - \frac{\Delta\zeta_2^2}{\sigma_2} + \frac{\Delta\zeta_1^2 \gamma_1^2}{2\epsilon} \\ &\quad + \frac{\Delta\zeta_2^2 \gamma_2^2}{2\epsilon} + \frac{3}{2}\epsilon \end{aligned} \quad (57)$$

Chọn các tham số của bộ điều khiển như sau $c_1 = \hat{k}_1 + c_7$, $c_2 = \frac{\hat{k}_1}{2} + c_7$, $c_3 = \frac{\hat{k}_1}{2} + c_7$, $c_4 \geq p_2$, $c_5 \geq p_3$. Phương trình (57) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -c_7(\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2 + \Delta\omega_r^2) - \frac{\Delta\zeta_1^2}{\sigma_1} - \frac{\Delta\zeta_2^2}{\sigma_2} \\ & + \frac{\Delta\zeta_1^2\gamma_1^2}{2\epsilon} + \frac{\Delta\zeta_2^2\gamma_2^2}{2\epsilon} + \frac{3}{2}\epsilon \end{aligned} \quad (58)$$

Thay các hằng số thời gian σ_1 và σ_2 ở phương trình (47) và (51) vào phương trình (58).

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -c_7(\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2 + \Delta\omega_r^2) + \frac{3}{2}\epsilon - \frac{\Delta\zeta_1^2}{2\epsilon}(M_1^2 \\ & - \gamma_1^2) - c_6\Delta\zeta_1^2 - \frac{\Delta\zeta_2^2}{2\epsilon}(M_2^2 - \gamma_2^2) - c_7\Delta\zeta_2^2 \end{aligned} \quad (59)$$

Chọn $c_6 \geq c_7$. Từ điều kiện $\gamma_1 \leq M_1, \gamma_2 \leq M_2, M_1 > 0, M_2 > 0$ phương trình (59) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -c_7(\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2 + \Delta\omega_r^2 + \Delta\zeta_1^2 + \Delta\zeta_2^2) + \frac{3}{2}\epsilon \\ \leq & -c_7(\Delta F^2 + \Delta\omega_u^2 + \tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{W}_u + \eta_u \tilde{g}_u^2 \\ & + \Delta\omega_r^2 + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{W}_r + \eta_r \tilde{g}_r^2 + \Delta\zeta_1^2 + \Delta\zeta_2^2) \\ & + \frac{3}{2}\epsilon \\ & + c_7(\tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{W}_u + \eta_u \tilde{g}_u^2 \\ & + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{W}_r + \eta_r \tilde{g}_r^2) \leq -2c_7V + m \end{aligned} \quad (60)$$

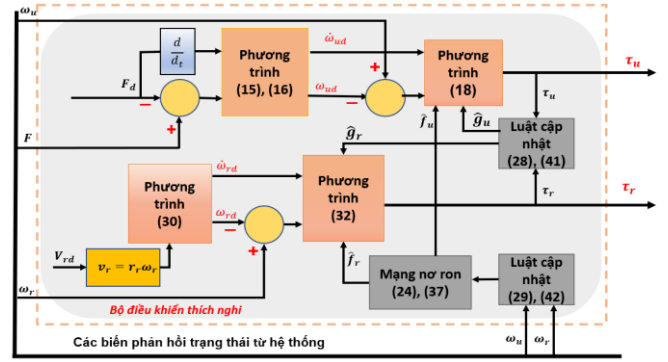
Trong đó: $m = \frac{3}{2}\epsilon + c_7(\tilde{W}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{W}_u + \eta_u \tilde{g}_u^2 + \tilde{W}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{W}_r + \eta_r \tilde{g}_r^2)$, $m > 0$.

Từ phương trình (60) ta có:

$$0 \leq V(t) \leq \left(V(0) - \frac{3\epsilon}{4c_7}\right)e^{-2c_7t} + \frac{3\epsilon}{4c_7} \quad (61)$$

Phương trình (61) chỉ ra rằng V bị chặn bởi giá trị $\frac{3\epsilon}{4c_7}$, suy ra các sai lệch có trong hàm $V(\Delta F, \Delta\omega_u, \dots)$ đều bị chặn tức là luôn luôn tồn tại sai lệch. Ta có thể điều chỉnh sai lệch nhỏ tùy ý bằng cách thay đổi các giá trị ϵ và c_7 .

Như vậy, ta đã thiết kế xong bộ điều khiển thích nghi bền vững dựa trên kỹ thuật Backstepping kết hợp mặt trượt động (DSC) và bộ bù thích nghi sử dụng thuật toán RBF. Sơ đồ khối của bộ điều khiển như hình 3:



Hình 3: Sơ đồ của bộ điều khiển cho DWRC

4. Kết quả mô phỏng

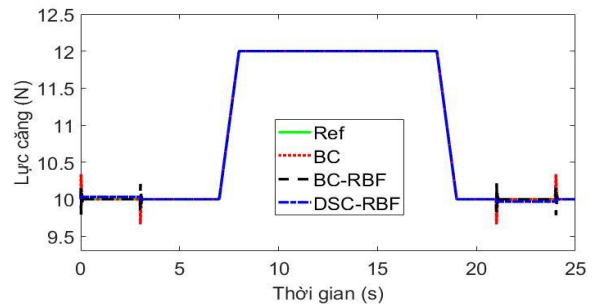
Để xác minh tính hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất, mô phỏng được tiến hành bằng Matlab-Simulink. Để đánh giá chất lượng bộ điều khiển, bài báo sẽ thực hiện so sánh giữa bộ điều khiển Backstepping (BC), Backstepping-RBF (BC-RBF) và bộ điều khiển được đề xuất DSC-RBF. Các tham số mô phỏng là: $R_{u0} = 0,1(m)$; $R_{r0} = 0,05(m)$; $b_{fu} = 25,33.10^{-6}(Nms)$; $b_{fr} = 25,33.10^{-6}(Nms)$; $J_{u0} = 1,5(kg.m^2)$; $J_{r0} = 0,5(kg.m^2)$; $a = 0,05.10^{-3}(m)$; $k_{\omega u} = 230$; $k_{\omega r} = 230$; $k_t = 500$. Trong đó cả ba bộ điều khiển đều có tham số bộ điều khiển $c_1 = 100, c_2 = 50, c_3 = 50$. Chọn thông số có thêm của bộ điều khiển DSC-RBF như sau $c_4 = 10, c_5 = 10, p_1 = 5, \epsilon = 0,01, \sigma_1 = \sigma_2 = 0,003$. Lực căng tham chiếu trong mô phỏng cho các bộ điều khiển là $5(N)$. Bài báo sẽ kiểm chứng tính ổn định, khả năng bám tín hiệu đặt trong trường hợp không và có tồn tại sai lệch mô hình hệ thống.

4.1. Trường hợp tham số mô hình xác định, không có thành phần bất định

Trong trường hợp với mô hình lý tưởng, đáp ứng lực căng và tốc độ ổn định, bám theo tín hiệu đặt. Điều đó cho thấy các bộ điều khiển phù hợp với mô hình hệ thống.

a. Đáp ứng lực căng

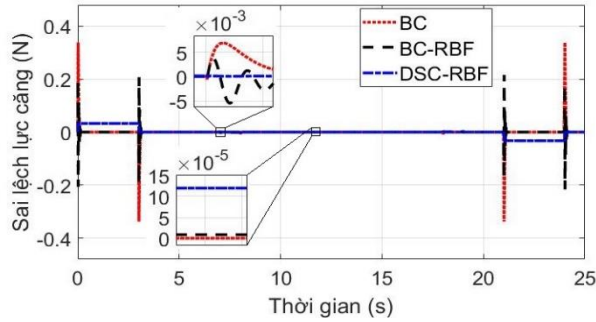
Kết quả mô phỏng ở hình 4 cho thấy lực căng ứng với trường hợp DSC-RBF đã bám với giá trị đặt, điều này thể hiện khả năng xấp xỉ của RBF mặc dù không biết các tham số của hệ thống.



Hình 4: Đáp ứng lực căng của các bộ điều khiển so với bộ điều khiển DSC-RBF.

Kết quả mô phỏng ở hình 5 cho thấy do hiện tượng “explosion of term” nên khi giá trị đặt tốc độ thay đổi ở các thời điểm 0 giây, 3 giây, 21 giây, 24 giây ở trường hợp bộ điều khiển BC và BC-RBF có độ quá điều chỉnh lớn (3.3% và 3%) trong khi

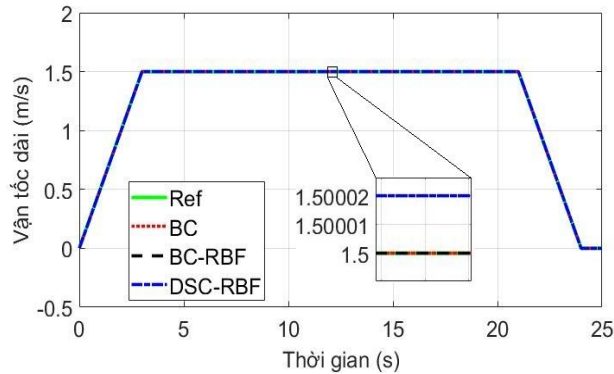
bộ điều khiển DSC-RBF có sai lệch lực căng nhỏ hơn nhiều (0.3%). Khi giá trị đặt lực căng thay đổi ở các thời điểm 7 giây, 8 giây, 17 giây, 18 giây, với các bộ điều khiển BC và BC-RBF xuất hiện độ quá điều chỉnh nhỏ (0.07% và 0.055%) trong khi DSC-RBF không xuất hiện độ quá điều chỉnh. Điều này đã chứng minh được hiệu quả của bộ lọc đối với các thành phần biến thiên đạo hàm lớn. Ở trạng thái xác lập thì DSC-RBF tồn tại sai lệch tĩnh 0.00125%, BC-RBF tồn tại sai lệch tĩnh rất nhỏ (≈ 0) và BC không có sai lệch tĩnh.



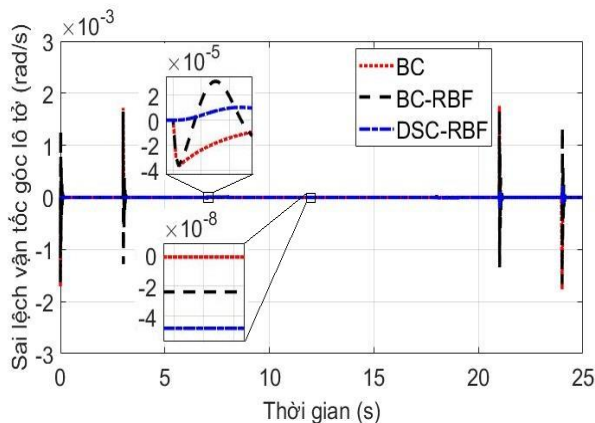
Hình 5: Sai lệch lực căng các bộ điều khiển so với bộ điều khiển DSC-RBF

b. Đáp ứng vận tốc dài bộ điều khiển DSC-RBF

Vận tốc dài của cả ba bộ điều khiển đều bám giá trị đặt (Hình 6). Ở trạng thái xác lập thì với bộ điều khiển DSC-RBF tồn tại sai lệch tĩnh 0.0013%, BC-RBF tồn tại sai lệch tĩnh rất nhỏ (≈ 0) và BC không có sai lệch tĩnh.



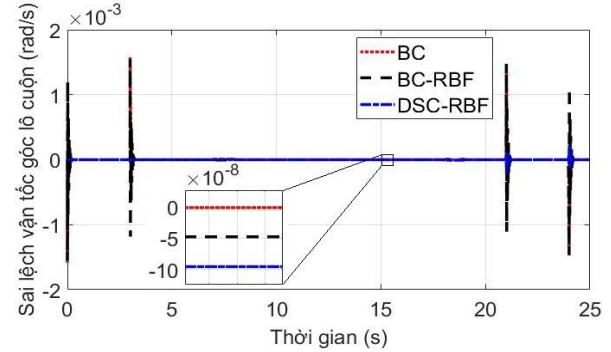
Hình 6: Đáp ứng vận tốc dài của các bộ điều khiển so với bộ điều khiển DSC-RBF



Hình 7: Sai lệch vận tốc góc lô tở các bộ điều khiển so với bộ điều khiển DSC-RBF

Hình 7 cho ta thấy tại các thời điểm 0 giây, 3 giây, 21 giây, 24 giây vận tốc góc lô tở ứng với điều khiển BC và BC-RBF có độ quá điều chỉnh lớn (0.12%) trong khi DSC-RBF có độ

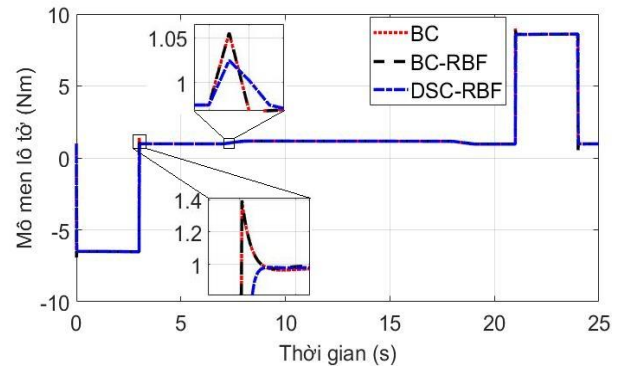
quá điều chỉnh nhỏ hơn rất nhiều (0.006 %), tại thời điểm 7 giây, 8 giây, 21 giây, 24 giây khi có sự thay đổi lượng đặt lực căng, với các bộ điều khiển BC và BC-RBF xuất hiện độ quá điều chỉnh (0.002%). Sai lệch tĩnh của BC-RBF và DSC-RBF rất nhỏ (≈ 0).



Hình 8: Sai lệch vận tốc góc lô cuộn các bộ điều khiển so với bộ điều khiển DSC-RBF.

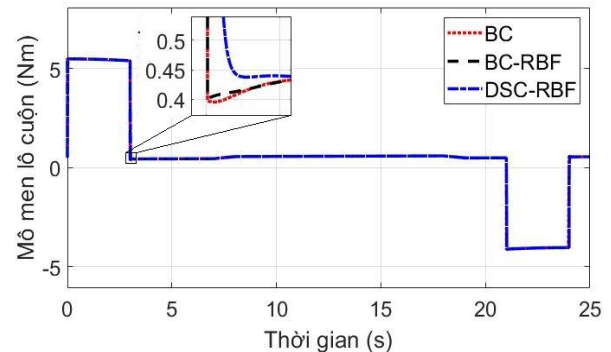
Tương tự như vận tốc góc lô cuộn (hình 8), BC và BC-RBF có độ quá điều chỉnh (0.12%), DSC-RBF (0.006%). Hai bộ điều khiển vận tốc góc lô tở và lô cuộn của DSC-RBF đều nằm sau bộ lọc và kết quả mô phỏng đã thể hiện được hiệu quả của bộ lọc với vận tốc góc hai lô.

c. Mô men điều khiển



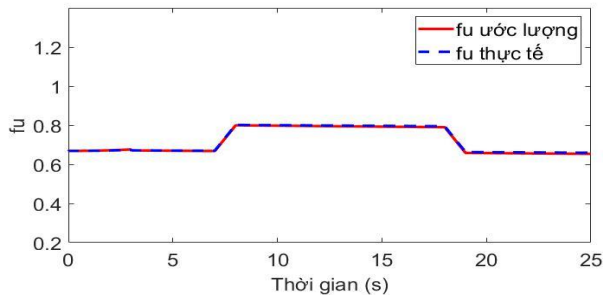
Hình 9: Mô men điều khiển lô tở

Kết quả mô phỏng ở hình 9 và hình 10 chỉ ra khi có sự thay đổi giá trị đặt lực căng hoặc vận tốc thì đặc tính mô men điều khiển của DSC-RBF sẽ thoải hơn so với hai bộ điều khiển còn lại, đặc tính này sẽ rất phù hợp trong trường hợp thực tế.

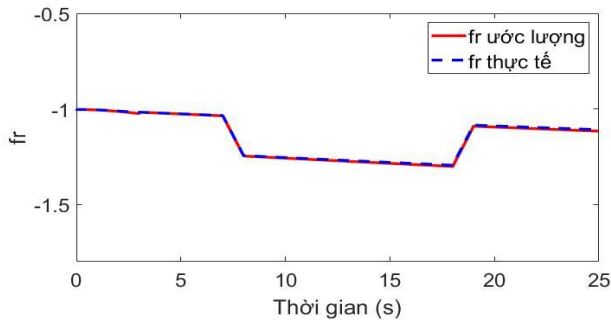


Hình 10: Mô men điều khiển lô cuộn

d. Mạng nơ ron RBF



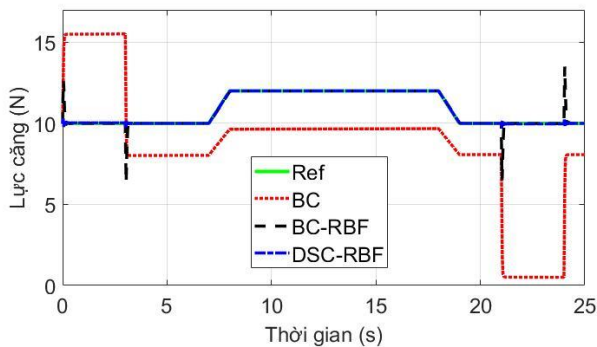
Hình 11: Ước lượng hàm f_u .



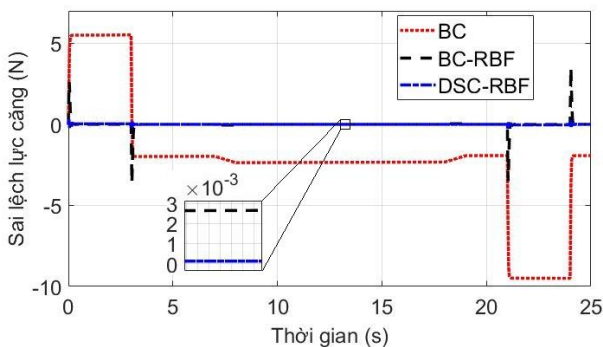
Hình 12: Ước lượng hàm f_r .

Hình 11 và hình 12 cho thấy mạng nơ ron RBF xấp xỉ hai hàm f_u , f_r rất nhanh chóng với sai lệch nhỏ.

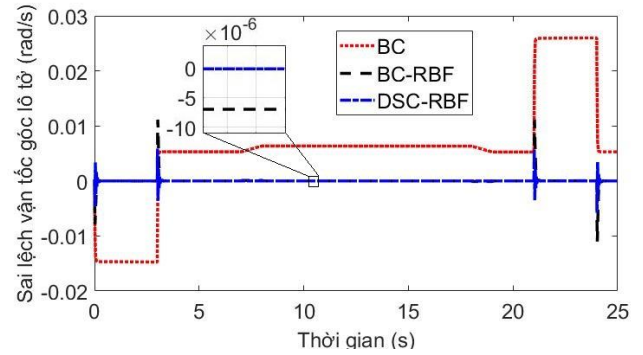
4.2. Trường hợp thông số mô hình sai lệch 20%



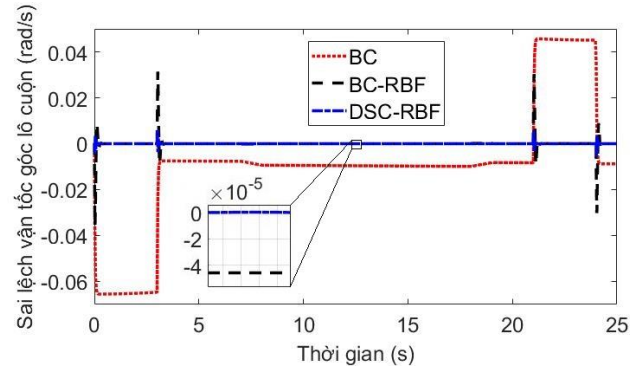
Hình 13: Lực căng ba bộ điều khiển khi tham số biến thiên 20%



Hình 14: Sai lệch lực căng ba bộ điều khiển khi tham số biến thiên 20%



Hình 15: Sai lệch vận tốc góc lô tở ba bộ điều khiển khi tham số biến thiên 20%



Hình 16: Sai lệch vận tốc góc lô cuộn ba bộ điều khiển khi tham số biến thiên 20%

Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong các hình 13-16. Có thể thấy rõ ràng tính hiệu quả của bộ điều khiển DSC-RBF so với bộ điều khiển Backstepping và Backstepping-RBF. Các quy tắc cập nhật trọng số của mạng nơ ron đã được phát triển để ổn định hệ thống và đảm bảo hiệu suất tốt. Khi thêm các bộ lọc thông thấp vào bộ điều khiển Backstepping RBF, ta thu được bộ điều khiển DSC-RBF giúp cải thiện hiệu suất của bộ điều khiển và khắc phục nhược điểm của bộ điều khiển Backstepping là biến thiên đạo hàm lớn “explosion of terms”.

5. Kết luận

Trong bài báo, bộ điều khiển bền vững tích hợp thuật toán DSC kết hợp thuật toán bù thích nghi sử dụng mạng nơ ron RBF đã được đề xuất cho hệ thống DWRC. Do bộ điều khiển backstepping phụ thuộc rất nhiều vào các tham số hệ thống. Vì vậy, RBF được đề xuất để cập nhật sự thay đổi của tham số hệ thống. Các quy tắc cập nhật trọng số của mạng nơ ron đã được phát triển để ổn định hệ thống và đảm bảo hiệu suất tốt. Khi thêm các bộ lọc thông thấp vào bộ điều khiển Backstepping RBF, ta thu được bộ điều khiển DSC-RBF giúp cải thiện hiệu suất của bộ điều khiển và khắc phục nhược điểm của bộ điều khiển Backstepping là biến thiên đạo hàm lớn “explosion of terms”. Kết quả mô phỏng chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển DSC-RBF so với bộ điều khiển Backstepping và Backstepping-RBF.

Khi thiết kế các bộ điều khiển cho hệ truyền động đa trục có liên kết mềm, để bài toán giảm độ phức tạp thì các cảm biến lực căng và vận tốc được coi là lý tưởng vì thế các giá trị lực căng và vận tốc được truyền thẳng đến bộ điều khiển mà không có sai lệch. Trong thực tế hệ thống cần rất nhiều cảm biến và chúng không lý tưởng, đặc biệt là cảm biến lực căng

rất đắt và khó lắp đặt. Hướng phát triển tiếp theo trong tương lai là phát triển các bộ quan sát lực căng giúp đưa ra lực căng của hệ thống một cách chính xác, giảm thiểu số lượng cảm biến cho hệ thống.

Lời cảm ơn

Bài báo này được hỗ trợ và tài trợ bởi trường Đại học Công nghiệp Hà Nội theo đề tài mã số 36-2022-RD/HĐ-ĐHCN.

Tài liệu tham khảo

- [1] Daniel Magura, Viliam Fedák, Karol Kyslan, "Modeling and Analysis of Multi-motor Drive Properties in a Web Processing Continuous Line," *Procedia Engineering*, Volume 96, 2014, pp. 281-288.
- [2] D. E. H. Hashimoto, "Theory and Application of Web Handling," *Converting Technical Institute*, 2014.
- [3] B. Lee, Y. Kim, J. Kim, et al., "Preview control of web position in roll-to-roll printing using alignment patterns," *Microsystem Technologies*, vol. 5, Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [4] B. B. Maskey, "Photonic Curing for Enhancing the Performance of Roll-to-Roll Printed Electronic Devices," International Conference on Web Handling 2019, pp. 1–13.
- [5] D. R. Roisum, G. Guzman, and S. Shams Es-haghi, "Web Handling and Winding," *Roll-to-Roll Manufacturing: Process Elements and Recent Advances*, 2018, pp. 147–170.
- [6] Chang, Kuo-Ming, and Yen-Yeu Lin. "Robust Sliding Mode Control for a Roll-to-Roll Machine." ICINCO, 2013.
- [7] Nian, Xiaohong, et al. "Disturbance observer-based distributed sliding mode control of multimotor web-winding systems." *IET Control Theory and Applications* 14.4: 614-625, 2020.
- [8] N. R. Abjadi, J. Soltani, J. Askari, G. R. A. Markadeh, "Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor", *IET Control Theory and Applications*, Vol. 3, No. 4, pp. 419–427, 2009.
- [9] Bouchiba, Bousmaha, et al. "Artificial neural network sliding mode control for multi-machine web winding system." *Advanced Materials Research*. Vol. 317, 2011.
- [10] Van Trong Dang, Dinh Bao Hung Nguyen, Thi Dieu Trinh Tran, Duc Thinh Le, Tung Lam Nguyen (2023), Model-free hierarchical control with fractional-order sliding surface for multisection web machines. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 37(2).
- [11] Okada, Kenji, and Tetsuzo Sakamoto. "An adaptive fuzzy control for web tension control system." *IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 98CH36200)*. Vol. 3. IEEE, 1998.
- [12] S. Lee and N. Hoang, "Lateral control of roll-to-roll system using fuzzy control logic and vision sensor." *Adv. Mater. Res.* vol.317–319, pp. 1541–1544, 2011.
- [13] Choi, Kyung-Hyun, Thanh T. Tran, and Dong-Soo Kim. "Backstepping controller based web tension control for roll-to-roll web printed electronics system." *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 5.1: 7-21, 2011.
- [14] Mokhtari, Fouad, and Pierre Sicard. "Decentralized control design using Integrator Backstepping for controlling web winding systems." *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2013.
- [15] Thi, Ly Tong, et al. "Tension regulation of roll-to-roll systems with flexible couplings." *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. IEEE, 2019.
- [16] Thi, L.T. et al. (2022). An Output Observer Integrated Dynamic Surface Control for a Web Handling Section. In: Nguyen, D.C., Vu, N.P., Long, B.T., Puta, H., Sattler, KU. (eds) *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 366. Springer, Cham.
- [17] S. Liu, X. Mei, F. Kong, K. He, "A decoupling control algorithm for unwinding tension system based on active disturbance rejection control", *Mathematical Problems in Packaging Engineering*, Vol. 2013, Article ID 439797, 2013
- [18] Irwin, George William, et al., eds. *Neural network applications in control*. No. 53. Iet, 1995.
- [19] Liu, Jinkun. *Radial Basis Function (RBF) neural network control for mechanical systems: design, analysis and Matlab simulation*. Springer Science and Business Media, 2013
- [20] G. S. Fesghandis, A. Pooya, M. Kazemi, and Z. N. Azimi, "Comparison of Multilayer Perceptron and Radial Basis Function Neural Networks in Predicting the Success of New Product Development", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1425–1428, Feb. 2017.
- [21] D. N. Duc, L. T. Thi, and T. L. Nguyen, "Imperfect Roll Arrangement Compensation Control based on Neural Network for Web Handling Systems ", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 5694–5699, Jun. 2020.
- [22] T. T. Ly, et. al. "Điều khiển lực căng kết hợp bù thành phần mô men quán tính bất định sử dụng neural RBF cho hệ cuộn lại nhiều phân đoạn," *Measurement, Control, and Automation*, vol. 2, pp. 1-9, 2021.