

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH PHI TUYẾN CHO HỆ BỒN ĐÔI LIÊN KẾT

DESIGN A NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR COUPLED-TANKS SYSTEMS

Nguyễn Minh Hòa

Trường Đại học Trà Vinh; hoatvu@tvu.edu.vn

Tóm tắt - Điều khiển dự báo mô hình là một phương pháp điều khiển được sử dụng khá phổ biến trong các quá trình công nghiệp. Tuy nhiên phần lớn các bộ điều khiển dự báo được thiết kế dựa trên mô hình tuyến tính của hệ thống nên chất lượng điều khiển bị hạn chế khi hệ thống hoạt động trên vùng rộng. Bài báo này nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển dự báo dựa vào mô hình phi tuyến của hệ thống. Mô hình phi tuyến được đề xuất trong nghiên cứu này là mô hình mờ Takagi-Sugeno được nhận dạng dựa vào dữ liệu đo lường vào-ra. Giải thuật tối ưu hóa phi tuyến Levenberg-Marquardt được sử dụng để tính toán các tín hiệu điều khiển tối ưu trong bộ điều khiển dự báo. Nghiên cứu được áp dụng trên đối tượng là hệ bồn đôi liên kết. Kết quả điều khiển từ mô phỏng và thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến có khả năng đáp ứng các yêu cầu điều khiển tốt hơn các phương pháp điều khiển dự báo tuyến tính và phi tuyến khác.

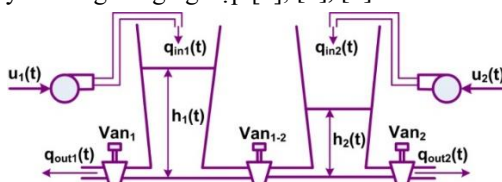
Từ khóa - điều khiển dự báo mô hình tuyến tính; điều khiển dự báo mô hình phi tuyến; mô hình mờ Takagi-Sugeno; giải thuật tối ưu hóa Levenberg-Marquardt; hệ bồn đôi liên kết.

Abstract - Model predictive control is a control approach that is commonly used in industrial processes. However, since the majority of predictive controllers have been designed based on linear models of systems, their control performances are limited when those systems are working over wide operating areas. This paper presents a study on the design of predictive controllers based on nonlinear models of systems. The proposed nonlinear models were Takagi-Sugeno fuzzy models, which could be identified with input-output measurement data. The Levenberg-Marquardt nonlinear optimization algorithm was employed to compute optimal control signals in the predictive controller. The design was applied to a coupled-tanks system. Simulation and real time control results showed the proposed nonlinear predictive controller was able to meet control requirements better than other linear and nonlinear predictive control methods.

Key words - linear model predictive control; nonlinear model predictive control; Takagi-Sugeno fuzzy model; Levenberg-Marquardt nonlinear optimization algorithm; coupled-tanks systems.

1. Đặt vấn đề

Điều khiển dự báo là một phương pháp điều khiển được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp vì nó có khả năng điều khiển các hệ thống đa biến với nhiều điều kiện ràng buộc khác nhau [1]. Tuy mới được đề xuất và phát triển gần đây nhưng điều khiển dự báo mô hình được quan tâm nghiên cứu và áp dụng cả trong lý thuyết lẫn thực tiễn [2], [3]. Mặc dù đã được áp dụng thành công trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong các quá trình công nghiệp, nhưng điều khiển dự báo mô hình vẫn còn nhiều hạn chế trong vận hành thực tế [4]. Một trong những nguyên nhân chính là các bộ điều khiển dự báo phần lớn được thiết kế dựa vào mô hình tuyến tính của hệ thống vốn chỉ có thể mô tả chính xác hệ thống trong “lân cận” một điểm hoạt động nhất định. Trong khi đó, các hệ thống trong thực tế đều là hệ thống phi tuyến, có vùng hoạt động rộng lớn nên việc sử dụng mô hình tuyến tính làm hạn chế khả năng vận hành của bộ điều khiển dự báo. Vì vậy, các nghiên cứu sau này có khuynh hướng tập trung vào điều khiển dự báo mô hình phi tuyến với mục tiêu là duy trì chất lượng điều khiển ổn định khi hệ thống hoạt động trên vùng làm việc rộng. Trong những năm gần đây, các mô hình phi tuyến mờ đã được nghiên cứu áp dụng thành công trong điều khiển dự báo mô hình các hệ thống phi tuyến trong công nghiệp [5], [6], [7].



Hình 1. Hệ bồn đôi liên kết

Hệ bồn đôi liên kết (Hình 1) là một hệ thống điển hình của các quá trình công nghiệp như xử lý nước, lò hơi, lò phản ứng, cột chưng cất, ... Đối với các hệ thống này thì điều khiển các mực chất lỏng trong các bồn là một bài toán điều khiển rất quan trọng. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu về thiết kế điều khiển đã được áp dụng thành công trên hệ bồn đôi liên kết như điều khiển dùng logic mờ [8], dùng mạng hydrocarbon nhân tạo [9], đặc biệt là các chiến lược điều khiển dự báo dựa vào mô hình [10]-[12]. Tuy nhiên, đa số là các nghiên cứu điều khiển dự báo dựa vào mô hình tuyến tính [10], [11] và có rất ít nghiên cứu về điều khiển dự báo sử dụng mô hình phi tuyến của hệ bồn đôi liên kết, chẳng hạn như mô hình mạng thần kinh nhân tạo [12] hay mô hình mờ.

Vì vậy, bài báo này đề xuất sử dụng mô hình phi tuyến mờ Takagi-Sugeno cho bộ điều khiển dự báo mô hình hệ thống bồn đôi liên kết. Do sử dụng mô hình phi tuyến nên bài toán tối ưu hóa các tín hiệu điều khiển dự báo là một thách thức trong quá trình thiết kế. Để giải quyết bài toán này, giải thuật tối ưu hóa phi tuyến Levenberg-Marquardt được nghiên cứu áp dụng.

2. Nhận dạng mô hình mờ Takagi-Sugeno của hệ bồn đôi liên kết

Hệ bồn đôi liên kết là một hệ thống đa biến phi tuyến hai đầu vào (u_1, u_2) và hai đầu ra (h_1, h_2). Để tìm mô hình phi tuyến của hệ, ta có thể dựa vào mô hình hóa sử dụng các định luật vật lý chi phối động học của hệ thống hoặc nhận dạng hệ thống dựa trên dữ liệu đo lường vào-ra. Các mô hình phi tuyến thường được sử dụng trong nhận dạng hệ thống là mô hình mạng thần kinh nhân tạo và mô hình mờ. Trong nghiên

cứ này, mô hình mờ Takagi-Sugeno dạng NARX được đề xuất để nhận dạng hệ thống bốn đôi liên kết. Cấu trúc mô hình và vec-tơ hồi quy có dạng như sau:

$$h_1(k) = f_1(x_1(k)) \quad (1)$$

$$h_2(k) = f_2(x_2(k)) \quad (2)$$

Trong đó, $x_1(k), x_2(k)$ là các vec-tơ hồi quy như sau:

$$x_1(k) = [h_1(k-1) \ h_2(k-1) \ u_1(k-1)] \quad (3)$$

$$x_2(k) = [h_2(k-1) \ h_1(k-1) \ u_2(k-1)] \quad (4)$$

và $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$ là các hàm phi tuyến được xấp xỉ bằng các mô hình MISO (Multi-Input, Single-Output) mờ Takagi-Sugeno. Thông tin chi tiết về phương pháp nhận dạng hệ bốn đôi liên kết dùng mô hình mờ Takagi-Sugeno được trình bày trong tài liệu tham khảo [13].

3. Điều khiển dự báo mô hình phi tuyến cho hệ bốn đôi liên kết

Để thiết kế bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến cho hệ bốn đôi liên kết, ta cần thực hiện ba khâu quan trọng sau: (i) Xây dựng mô hình phi tuyến của hệ bốn đôi liên kết; (ii) Xác định hàm mục tiêu dùng để tối ưu hóa dựa trên các yêu cầu điều khiển, đầu ra dự báo, và các ràng buộc; và (iii) Xây dựng bộ tính toán tối ưu hóa hàm mục tiêu điều khiển.

Hàm mục tiêu thay đổi tùy theo đối tượng và yêu cầu điều khiển. Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu được xác định như sau:

$$J(u) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{H_p} \|r(k+t) - \hat{y}(k+t)\|^2 + \rho \sum_{t=1}^{H_c} \|u(k+t) - u(k+t-1)\|^2. \quad (5)$$

Trong đó: $r(k) = [r_1(k) \ r_2(k)]$ là véc-tơ tín hiệu tham chiếu tại thời điểm thứ k ; $\hat{y}(k) = [\hat{y}_1(k) \ \hat{y}_2(k)]$ là véc-tơ đầu ra dự báo tại thời điểm thứ k ; $u(k) = [u_1(k) \ u_2(k)]$ là véc-tơ tín hiệu điều khiển tại thời điểm thứ k ; H_p là tầm dự báo; H_c là tầm điều khiển. Hàm mục tiêu trên gồm hai thành phần. Thành phần thứ nhất dùng để tối thiểu hóa sai số giữa tín hiệu tham chiếu và đầu ra dự báo. Thành phần thứ hai dùng để hạn chế sự biến thiên liên tục ở tần số cao của tín hiệu điều khiển. Các ràng buộc trong nghiên cứu này được xác định như sau:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (6)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} \quad (7)$$

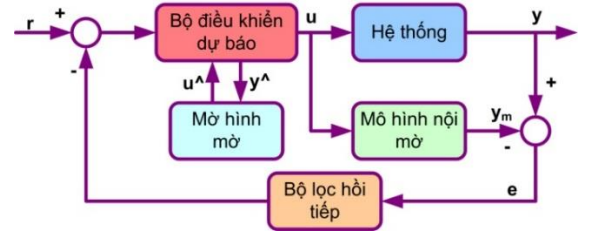
$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad (8)$$

$$\Delta y_{\min} \leq \Delta y \leq \Delta y_{\max} \quad (9)$$

Ngoài ra, để khắc phục sai số mô hình và bù nhiễu, bộ điều khiển dự báo mô hình mờ được kết hợp với cấu trúc mô hình nội như trong Hình 2. Trong đó, mô hình nội mờ được sử dụng để dự báo ảnh hưởng của tín hiệu điều khiển đến ngõ ra của hệ thống. Nếu không có sai số mô hình thì sai số e trong sơ đồ bằng 0 và sơ đồ điều khiển trở thành vòng hở. Tuy nhiên, trong thực tế luôn tồn tại sai số mô hình và nhiễu đo lường nên thông qua bộ lọc hồi tiếp và cấu trúc điều khiển dùng mô hình nội, sai số mô hình và nhiễu sẽ bị triệt tiêu đáng kể.

Do mô hình dự báo là mô hình mờ phi tuyến nên bài toán tối ưu hóa là phi tuyến và vì thế quá trình tính toán

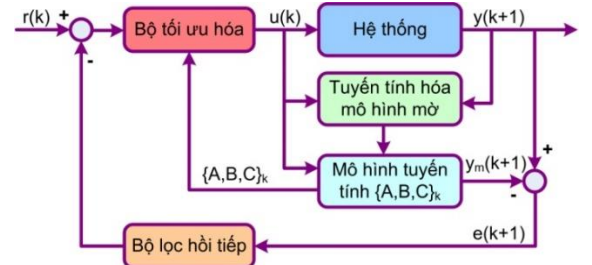
mất nhiều thời gian và không phải lúc nào cũng tìm được nghiệm tối ưu. Vì vậy khâu thứ (iii) đóng vai trò quan trọng quyết định đến thời gian đáp ứng và khả năng điều khiển thành công của bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến. Sau đây tác giả lần lượt giới thiệu ba phương pháp tối ưu hóa được sử dụng trong thiết kế bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến cho hệ bốn đôi liên kết.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển dự báo dùng mô hình nội mờ

3.1. Điều khiển dự báo sử dụng kỹ thuật tuyến tính hóa trực tuyến mô hình mờ Takagi-Sugeno

Mô hình mờ Takagi-Sugeno có cấu trúc đặc biệt là tập hợp của các mô hình tuyến tính cục bộ mô tả hệ thống tại các vùng làm việc khác nhau. Các tác giả trong công bố [14] đã dựa vào đặc điểm này để phát triển một phương pháp tuyến tính hóa mô hình mờ Takagi-Sugeno dọc theo các quỹ đạo đầu vào và đầu ra dự báo. Các mô hình được rút ra từ quá trình này là các mô hình không gian trạng thái tuyến tính, và vì vậy, các phương pháp điều khiển dự báo mô hình tuyến tính có thể được áp dụng dễ dàng. Sơ đồ điều khiển của phương pháp này được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ điều khiển dự báo tuyến tính hóa mô hình mờ

Vì vậy, thông qua phương pháp này, bài toán tối ưu hóa phi tuyến được chuyển đổi sang bài toán tối ưu hóa tuyến tính nên luôn giải được và ít tốn thời gian tính toán. Tuy nhiên, chất lượng điều khiển phụ thuộc vào sai số xấp xỉ của quá trình tuyến tính hóa.

3.2. Điều khiển dự báo sử dụng giải thuật quy hoạch toàn phương tuần tự (Sequential Quadratic Programming - SQP)

Giải thuật quy hoạch toàn phương tuần tự (SQP) là giải thuật được sử dụng phổ biến để giải các bài toán tối ưu hóa phi tuyến thông qua việc giải các bài toán tối ưu hóa dạng toàn phương ở mỗi bước lặp. Giải thuật SQP đã được nghiên cứu áp dụng thành công trong điều khiển dự báo mô hình phi tuyến [15]. Trong nghiên cứu này, giải thuật SQP được tham khảo và thực hiện để so sánh kết quả với giải thuật Levenberg-Marquardt.

3.3. Điều khiển dự báo sử dụng giải thuật Levenberg-Marquardt

Giải thuật Levenberg-Marquardt (LM) là giải thuật tối ưu hóa phi tuyến có khả năng hội tụ nhanh. Trong nghiên cứu này, thuật toán Levenberg-Marquardt được đề xuất để

tối thiểu hóa hàm mục tiêu (5) tại mỗi thời điểm lấy mẫu. Quá trình tối ưu hóa sẽ được thực hiện giữa hai lần lấy mẫu. Vì vậy, thuật toán phải hội tụ nhanh để có thể tìm được tín hiệu điều khiển tối ưu trước lần lấy mẫu kế tiếp. Luật cập nhật tín hiệu điều khiển theo thuật toán Levenberg-Marquardt được xác định như sau:

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} - [J''(u^{(i)})]^{-1} J'(u^{(i)}) \quad (10)$$

Trong đó:

$$J'(u^{(i)}) = \sum_{t=1}^{H_p} 2\varphi(k+t, u^{(i)})e^{(i)}(k+t) + 2diag(\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{H_c})u^{(i)} \quad (11)$$

$$e^{(i)}(k+t) = r(k+t) - \hat{y}^{(i)}(k+t) \quad (12)$$

$$\varphi(k+t, u^{(i)}) = \left[\frac{\partial \hat{y}(k+t)}{\partial u} \right]_{u=u^{(i)}} \quad (13)$$

$$diag(\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{H_c}) = \begin{bmatrix} \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \rho_{H_c} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$J''(u^{(i)}) = \sum_{t=1}^{H_p} 2 \left[\varphi(k+t, u^{(i)})\varphi^T(k+t, u^{(i)}) - \frac{\partial \varphi(k+t, u^{(i)})}{\partial u} e^{(i)}(k+t) \right] + 2diag(\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{H_c})u^{(i)} \quad (15)$$

Thuật toán Levenberg-Marquardt có đặc tính hội tụ xấp xỉ thuật toán Newton, nhưng thời gian thực hiện mỗi bước lặp nhanh hơn rất nhiều nhờ thay thế thành phần đạo hàm bậc hai $J''(u)$ bằng một đại lượng tương đương như sau:

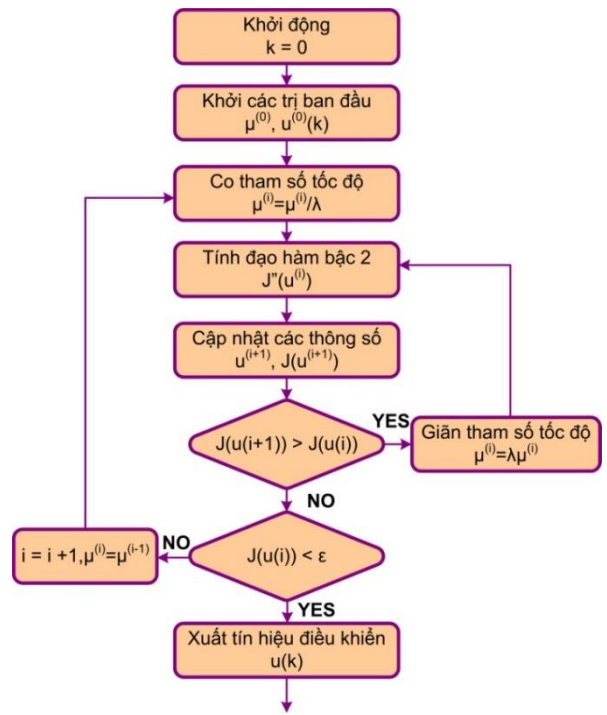
$$J''(u^{(i)}) = \sum_{t=1}^{H_p} 2 \left[\varphi(k+t, u^{(i)})\varphi^T(k+t, u^{(i)}) - \frac{\partial \varphi(k+t, u^{(i)})}{\partial u} e^{(i)}(k+t) \right] + 2diag(\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{H_c})u^{(i)} + \mu^{(i)}I \quad (16)$$

Trong đó, $\mu^{(i)}$ là tham số điều chỉnh tốc độ hội tụ của thuật toán tại mỗi bước lặp; I là ma trận đơn vị. Phương pháp thay đổi $\mu^{(i)}$ tại mỗi bước lặp được thực hiện theo phương pháp của Marquardt.

Đối với hệ bồn đôi liên kết có mô hình dự báo mờ $\hat{y}(k, u)$, trình tự thực hiện thuật toán Levenberg-Marquardt được trình bày như sau:

Bảng 1. Tiến trình thực hiện thuật toán Levenberg-Marquardt

Bước	Nội dung thực hiện
1	Khởi động $k = 0$
2	Lọc tín hiệu tham chiếu
3	Gán các giá trị ban đầu $\mu^{(0)}, u^{(0)}(k)$
4	Tính $\hat{y}^{(i)}(k+t, u^{(i)}), J(u^{(i)})$
5	Tính $e^{(i)}(k+t), \varphi(k+t, u^{(i)}), J'(u^{(i)})$
6	Tính $\mu^{(i)} = \frac{\mu^{(i-1)}}{\lambda}$
7	Tính $J''(u^{(i)})$
8	Tính $u^{(i+1)}, \hat{y}^{(i)}(k+t, u^{(i+1)}), J(u^{(i+1)})$
9	Nếu $J(u^{(i+1)}) > J(u^{(i)})$ thì $\mu^{(i)} = \lambda\mu^{(i)}$ và trở về Bước 7
10	Nếu hội tụ $J(u^{(i)}) < \varepsilon$ thì chuyển sang Bước 11. Nếu chưa hội tụ thì gán $i = i + 1, \mu^{(i)} = \mu^{(i-1)}$
11	Xuất tín hiệu điều khiển $u(k)$
12	Nếu chưa kết thúc điều khiển thì quay về Bước 2



Hình 4. Lưu đồ giải thuật tối ưu hóa Levenberg-Marquardt được thực thi tại mỗi thời điểm lấy mẫu

Toàn bộ tiến trình trong Bảng 1 được tóm tắt qua Hình 4.

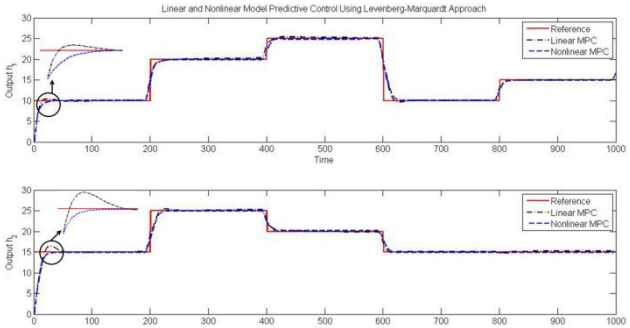
4. Kết quả mô phỏng điều khiển dự báo mô hình phi tuyến

Các giải thuật nhận dạng mô hình mờ Takagi-Sugeno và các bộ điều khiển dự báo được thực hiện và mô phỏng trên Matlab & Simulink với đối tượng điều khiển là hệ bồn đôi liên kết. Hệ bồn đôi liên kết trong nghiên cứu này gồm hai bồn có thể tích như nhau được nối tiếp với nhau như trong Hình 1. Hệ thống gồm hai bơm độc lập dùng để bơm chất lỏng (q_{in1}, q_{in2}) vào hai bồn. Mỗi bồn có một ống xả (q_{out1}, q_{out2}). Mục tiêu điều khiển là giữ ổn định hoặc thay đổi mức chất lỏng ($h_1(t), h_2(t)$) của hai bồn theo yêu cầu, bằng cách điều chỉnh điện áp ($u_1(t), u_2(t)$) của hai máy bơm độc lập. Thông số của hệ bồn đôi liên kết trong mô phỏng được xác định như sau:

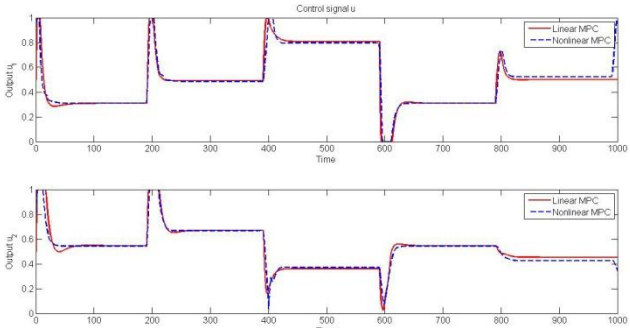
- Chiều rộng của bồn 1 và bồn 2: $w_1 = w_2 = 9 \text{ cm}$;
- Chiều dài nhỏ nhất của 2 bồn: $l_{1min} = l_{2min} = 9 \text{ cm}$;
- Chiều dài lớn nhất của 2 bồn: $l_{1max} = l_{2max} = 18 \text{ cm}$;
- Hệ số xả của các van: $[c_{12} \ c_2] = [0,8 \ 0,8 \ 0,8]$;
- Tiết diện van: $[a_1 \ a_{12} \ a_2] = [0,5 \ 0,2 \ 0,4] \text{ cm}^2$;
- Lưu lượng bơm cực đại:
 $Q_{1max} = Q_{2max} = 130 \text{ cm}^3/\text{phút}$;
- Điện áp bơm cực đại: $u_{1max} = u_{2max} = 1 \text{ V}$;
- Hệ số bơm: $K = 12$;
- Mức chất lỏng cực đại: $h_{1max} = h_{2max} = 40 \text{ cm}$.

Đối với các hệ đa biến như hệ bồn đôi liên kết, tầm dự báo và tầm điều khiển có ảnh hưởng nhất định đến chất lượng điều khiển. Nếu tầm dự báo và tầm điều khiển nhỏ thì hệ thống sẽ đáp ứng nhanh nhưng có độ vọt lố (Percent of Overshoot - POT) lớn. Nếu tầm dự báo và tầm điều khiển lớn thì đáp ứng của hệ thống sẽ chậm hơn nhưng không có

độ vọt lố. Trong bài báo này, tầm dự báo và tầm điều khiển được chọn thông qua phương pháp thử sai nhiều lần để tìm bộ thông số tối ưu. Thông số cài đặt cho bộ điều khiển dự báo được xác định như sau: tầm dự báo $H_p = 10$; tầm điều khiển $H_c = 1$; $\rho = 400$. Mô phỏng được thực hiện trong 1000 s với thời gian lấy mẫu là 1 s. Hai tín hiệu tham chiếu được thay đổi theo nhiều mức khác nhau để kiểm chứng khả năng đáp ứng của các bộ điều khiển trước sự thay đổi của các đầu vào. Kết quả mô phỏng điều khiển dự báo mô hình mờ phi tuyến dùng kỹ thuật tuyến tính hóa mô hình mờ trực tuyến và giải thuật Levenberg-Marquardt được thể hiện trên Hình 5 và Hình 6.

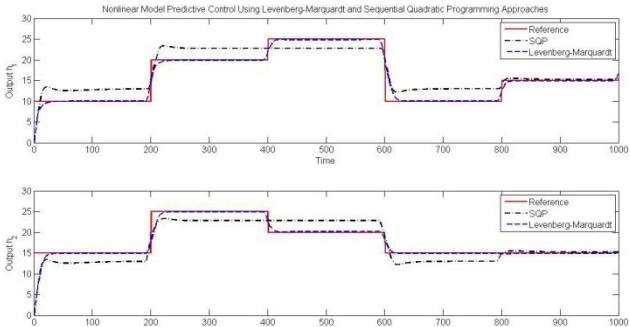


Hình 5. So sánh đáp ứng đầu ra giữa điều khiển dự báo tuyến tính và điều khiển dự báo phi tuyến

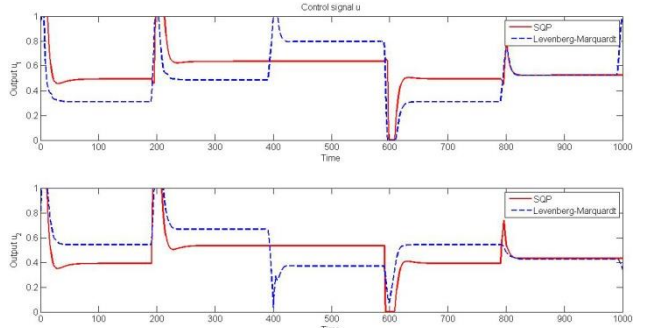


Hình 6. So sánh tín hiệu điều khiển giữa điều khiển dự báo tuyến tính và điều khiển dự báo phi tuyến

Kết quả mô phỏng điều khiển dự báo mô hình mờ phi tuyến dùng giải thuật quy hoạch toàn phương tuần tự (SQP) và điều khiển dự báo mô hình mờ phi tuyến dùng giải thuật Levenberg-Marquardt được trình bày trong Hình 7 và Hình 8.



Hình 7. So sánh đáp ứng đầu ra điều khiển dự báo giữa dùng giải thuật SQP và dùng giải thuật Levenberg-Marquardt



Hình 8. So sánh tín hiệu điều khiển dự báo giữa dùng giải thuật SQP và dùng giải thuật Levenberg-Marquardt

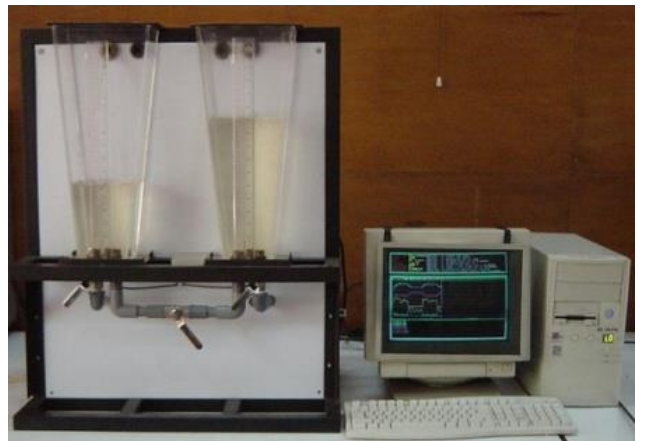
Thời gian chạy mô phỏng của từng bộ điều khiển dự báo được thu thập lại để so sánh hiệu quả về tính toán của các giải thuật tối ưu hóa. Ngoài ra, chất lượng điều khiển quá độ dưới dạng độ vọt lố của ba giải thuật tối ưu hóa cũng được đo lường. So sánh kết quả mô phỏng giữa ba giải thuật điều khiển dự báo được cho trong Bảng 2.

Bảng 2. So sánh chất lượng điều khiển của ba bộ điều khiển dự báo

Bộ điều khiển dự báo	Thời gian tính toán	POT(max)
Tuyến tính	74,16 s	43,5%
Levenberg-Marquardt	380,02 s	không có
SQP	935,81 s	35%

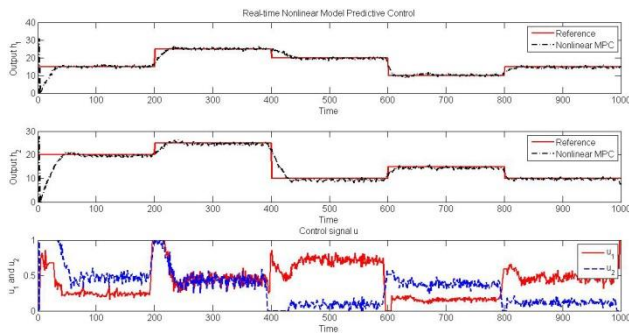
5. Kết quả thực nghiệm điều khiển dự báo mô hình phi tuyến

Để nghiên cứu khả năng áp dụng điều khiển dự báo mô hình mờ phi tuyến dùng giải thuật Levenberg-Marquardt trong thời gian thực, một mô hình thực nghiệm của hệ bồn đôi liên kết được thiết kế như trong Hình 8. Mô hình này được kết nối và điều khiển bởi máy tính thông qua công cụ xPC-Targets và Real-Time Workshop của phần mềm Matlab & Simulink. Card giao tiếp PCL-818L của hãng AdvanceTech được sử dụng để truyền tín hiệu điều khiển đến các máy bơm và nhận tín hiệu đo chiều cao mực chất lỏng của hai bồn từ các cảm biến áp suất.



Hình 9. Mô hình thực nghiệm hệ bồn đôi liên kết

Kết quả điều khiển thời gian thực của bộ điều khiển dự báo mô hình mờ phi tuyến dùng giải thuật Levenberg-Marquardt được trình bày trong Hình 10.



Hình 10. Kết quả điều khiển thời gian thực của bộ điều khiển dự báo phi tuyến dùng giải thuật Levenberg-Marquardt

6. Bàn luận

6.1. Kết quả mô phỏng

Từ kết quả mô phỏng được minh họa ở Hình 5 và Hình 6, có thể thấy bộ điều khiển dự báo tuyến tính hóa và bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có đáp ứng đầu ra và đáp ứng tín hiệu điều khiển tương đối tương đồng nhau. Tuy nhiên, khi phóng to thang đo thì ta thấy có sự khác biệt rõ rệt (Hình 5). Trong đó, với khoảng thời gian xác lập xấp xỉ nhau nhưng đáp ứng đầu ra của bộ điều khiển dự báo tuyến tính hóa có độ vọt lố còn đáp ứng đầu ra của bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt không có độ vọt lố.

Ngoài ra, mô phỏng so sánh bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt và bộ điều khiển dự báo phi tuyến SQP cũng được trình bày trong Hình 7 và Hình 8. Kết quả mô phỏng trên cho thấy bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có chất lượng điều khiển tốt. Ngược lại, bộ điều khiển dự báo phi tuyến SQP có sai số xác lập quá lớn (không chấp nhận được). Hơn nữa, bộ điều khiển dự báo phi tuyến SQP hoàn toàn không có đáp ứng với sự thay đổi của tín hiệu tham chiếu trong khoảng thời gian từ 400 – 600 s khi ta quan sát thấy tín hiệu điều khiển hoàn toàn không thay đổi so với trước đó, mặc dù tín hiệu tham chiếu đã thay đổi trong khoảng thời gian này (Hình 8).

Như vậy các kết quả mô phỏng cho thấy, chỉ có bộ điều khiển dự báo tuyến tính hóa và bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt cho chất lượng điều khiển ổn định, trong đó, bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có chất lượng điều khiển tốt nhất (Bảng 2).

6.2. Kết quả thực nghiệm

Từ kết quả mô phỏng trong Bảng 2 ta thấy bộ điều khiển dự báo tuyến tính hóa có thời gian tính toán nhanh nhất (74,16 s), trong khi đó bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có thời gian tính toán dài hơn (380,02 s). Như vậy, vấn đề đặt ra là bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có khả năng áp dụng điều khiển hệ bồn đôi liên kết trong thời gian thực hay không? Từ kết quả điều khiển thời gian thực trong Hình 10 cho thấy bộ điều khiển dự báo phi tuyến Levenberg-Marquardt có chất lượng điều khiển ổn định, không có độ vọt lố, mặc dù bị tác động bởi các tín hiệu nhiễu đo lường và sai lệch mô hình. Điều này cho thấy bộ điều khiển dự báo phi tuyến

Levenberg-Marquardt hoàn toàn có thể được áp dụng điều khiển hệ bồn đôi liên kết trong thực tế.

7. Kết luận

Nghiên cứu này đã khảo sát khả năng áp dụng điều khiển dự báo mô hình đối với hệ bồn đôi liên kết. Ba phương pháp điều khiển dự báo mô hình phi tuyến bao gồm tuyến tính hóa, Levenberg-Marquardt, và SQP đã lần lượt được áp dụng điều khiển hệ bồn đôi liên kết. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến Levenberg-Marquardt được đề xuất có chất lượng điều khiển tốt nhất. Ngoài ra, kết quả điều khiển thời gian thực cho thấy bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến Levenberg-Marquardt có thể được áp dụng điều khiển hệ bồn đôi liên kết trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E. F. Camacho, C. B. Alba, *Model Predictive Control*, Springer, 2007.
- [2] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Advances in Industrial Control, Springer, 2009.
- [3] D. Q. Mayne, "Model Predictive Control: Recent Developments and Future Promise", *Automatica*, Vol. 50, 2014, pp. 2967-2986.
- [4] M. G. Forbes, R. S. Patwardhan, H. Hamadah, R. B. Gopaluni, "Model Predictive Control in Industry: Challenges and Opportunities", *IFAC – Papers On Line*, 48-8, 2015, pp. 531-538.
- [5] I. Boulkaibet, K. Belarbi, S. Bououden, T. Marwala, M. Chadli, "A New T-S fuzzy Model Predictive Control for Nonlinear Processes", *Expert Systems With Applications*, Vol. 88, 2017, pp. 132-151.
- [6] J. Mendes, R. Araújo, F. Souza, "Adaptive Fuzzy Identification and Predictive Control for Industrial Processes", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, 2013, pp. 6964-6975.
- [7] M. H. Khooban, N. Vafamand, T. Niknam, "T-S Fuzzy Model Predictive Speed Control of Electrical Vehicles", *ISA Transactions*, Vol. 64, 2016, pp. 231-240.
- [8] S. Yordanova, "Fuzzy Logic Approach to Coupled Level Control", *Systems Science & Control Engineering*, Vol. 4, 2016, pp. 215-222.
- [9] H. Ponce, P. Ponce, H. Bastida, A. Molina, "A Novel Robust Liquid Level Controller for Coupled-Tanks Systems Using Artificial Hydrocarbon Networks", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, 2015, pp. 8858-8867.
- [10] M. U. Khalid, M. B. Kadri, "Liquid Level Control of Nonlinear Coupled Tanks System Using Linear Model Predictive Control", *Proceedings of the IEEE 2012 International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 8-9 Oct. 2012, Islamabad, Pakistan.
- [11] M. Awais, H. Alam, A. Muhammad, "Model Predictive Control Design for Coupled Tank System", *Proceedings of The International conference Quality Time'17*, April 26 - 27, 2017, Kyrgyzstan.
- [12] F. Zhou, H. Peng, Y. Qin, X. Zeng, W. Xie, J. Wu, "RBF-ARX Model-Based MPC Strategies with Application to A Watertank System", *Journal of Process Control*, Vol. 34, 2015, pp. 97-116.
- [13] Nguyễn Minh Hòa, "Identification of Coupled-Tanks Systems with Fuzzy Models based on Measurement Data from Simulation and Experimental Apparatus", *The University of Da Nang Journal of Science and Technology*, Vol. 124, 2018, pp. 28-32.
- [14] S. Molloy, R. Babuska, J. Abonyi, H. B. Verbruggen, "Effective Optimization for Fuzzy Model Predictive Control", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 12, 2004, pp. 661-675.
- [15] Qilun Zhu, Simona Onori, Robert Prucka, *Nonlinear Economic Model Predictive Control for SI Engines based on Sequential Quadratic Programming*, American Control Conference (ACC), Boston, MA, 2016, pp. 1802-1807.