

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO PHI TẬP TRUNG DỰA TRÊN MÔ HÌNH TUYẾN TÍNH HỆ NỒI HƠI - TUABIN

DECENTRALIZED LINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR BOILER-TURBINE UNIT

Phạm Văn Hùng*, Phạm Văn Minh

TÓM TẮT

Hệ nồi hơi - tuabin là một khâu quan trọng trong các nhà máy nhiệt điện. Để điều khiển ổn định hệ phi tuyến nhiều vào nhiều ra với tương tác giữa các đầu vào ra mạnh này có thể sử dụng bộ điều khiển dự báo phi tuyến với hàm mục tiêu sử dụng hàm phạt trạng thái cuối, tuy nhiên việc chọn tham số của hàm phạt là khó khăn và việc giải bài toán tối ưu phi tuyến đòi hỏi bộ điều khiển xử lý với khối lượng tính toán lớn ảnh hưởng tới tính năng thời gian thực của hệ thống. Bài báo đề xuất thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính cho hệ thống trên. Tương tác giữa các hệ con được coi là nhiễu và dự báo được sử dụng thông tin dự báo từ các bộ điều khiển cục bộ. Ngoài ra, tính ổn định của các hệ con và toàn hệ cũng được đảm bảo theo tiêu chuẩn ổn định ISS và tính khả thi của thuật toán được kiểm chứng thông qua các kết quả mô phỏng hệ nồi hơi - tuabin.

Từ khóa: Hệ nồi hơi - tuabin, điều khiển dự báo phi tuyến, điều khiển dự báo phi tập trung, ổn định vào trạng thái.

ABSTRACT

Boiler - turbine unit is an essential part in thermal power plants. To control and ensure stability of this nonlinear MIMO system, we can use a nonlinear model predictive controller (NMPC) with object function using penalty function, however it is difficult to select the parameter of penalty function and the solving online optimal problem affects real-time features of the system because of the volume of calculation. This paper proposes a decentralized model predictive control (DMPC) algorithm based on linear model boiler-turbine units. The interconnections between the subsystem are considered as perturbation terms and predicted by using the predictive information from local predictive controllers. Moreover, the input-to-state stability (ISS) of both subsystems and the overall closed-loop system is guaranteed and the performance of the proposed approach is demonstrated by the simulation results on the boiler-turbine system.

Keywords: Boiler - turbine unit, NMPC, DMPC, ISS.

Trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội

*Email: phamvanhung@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/10/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/02/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2019

KÝ HIỆU

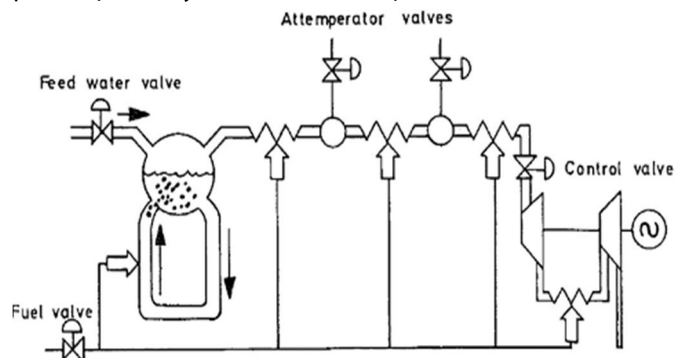
Ký hiệu	Ý nghĩa
$\ \mathbf{x}_k\ $	Chuẩn Euclid của vector \mathbf{x}_k
N	Tầm dự báo

CHỮ VIẾT TẮT

NMPC	Bộ điều khiển dự báo phi tuyến (Nonlinear Model Predictive Controller)
DMPC	Điều khiển dự báo phi tập trung (Decentralized model predictive control)
ISS	Ổn định vào - trạng thái (Input-to-state stability)

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nồi hơi - tuabin là một khâu rất quan trọng trong các nhà máy nhiệt điện. Một cấu trúc tiêu biểu cho hệ này được minh họa trên hình 1. Trong hệ thống này, hơi quá nhiệt được sinh ra từ nồi hơi sẽ được dẫn tới hệ thống tuabin để phát điện theo yêu cầu của lưới điện.



Hình 1. Sơ đồ hệ nồi hơi - tuabin [3, 4]

Mô hình phi tuyến của hệ nồi hơi - tuabin có dạng sau [1]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0,0018u_2x_1^{9/8} + 0,9u_1 - 0,15u_3 \\ \dot{x}_2 = (0,073u_2 - 0,016)x_1^{9/8} - 0,1x_2 \\ \dot{x}_3 = \frac{141u_3 - (1,1u_2 - 0,19)x_1}{85} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó:

- ba đầu vào u_1, u_2, u_3 lần lượt là độ mở van nguyên liệu, van điều khiển hơi cấp cho tuabin và van nước cấp.
- ba biến trạng thái x_1, x_2, x_3 lần lượt là áp suất bao hơi (kg/cm^2), công suất phát điện (MW) và khối lượng riêng của hơi nước (kg/cm^3)
- ba đầu ra

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1, y_2 = x_2, \\
 y_3 &= \frac{0,13073x_3 + 100a_{cs} + q_e}{20} / 9 - 67,975
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

lần lượt là áp suất bao hơi (kg/cm²), công suất phát điện (MW) và độ chênh lệch mức nước trong bao hơi (m), với

$$\begin{aligned}
 a_{cs} &= \frac{(1-0,001538x_3)(0,8x_1-25,6)}{x_3(1,0394-0,0012304x_1)} \\
 q_e &= (0,854u_2 - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096
 \end{aligned}$$

Có thể thấy mô hình nổi hơi - tuabin là mô hình phi tuyến nhiều vào nhiều ra, tương tác giữa các đầu vào ra mạnh. Rõ ràng, điều khiển dự báo là một trong những phương pháp thích hợp để điều khiển đối tượng đa biến trên. Hiện nay để điều khiển ổn định và điều khiển bám quá trình này giải pháp điều khiển dự báo với cấu trúc điều khiển tập trung, dựa trên mô hình tuyến tính hoặc phi tuyến thường được sử dụng. Trong tài liệu [2], các tác giả đã đề xuất phương pháp tuyến tính hóa hệ thống nổi hơi - tuabin quanh năm điểm làm việc, sau đó thiết kế các bộ điều khiển dự báo MPC phản hồi đầu ra riêng lẻ cho 5 hệ tuyến tính thu được. Kết quả mô phỏng cho thấy, càng sử dụng nhiều mô hình tuyến tính quanh điểm làm việc thì đáp ứng hệ thống càng tốt. Tuy nhiên, do sử dụng hàm mục tiêu có tầm dự báo vô hạn, phương pháp này sẽ gặp nhiều khó khăn khi giải quyết bài toán có ràng buộc. Phương pháp điều khiển dự báo phi tuyến phản hồi đầu ra sử dụng mô hình xấp xỉ tuyến tính từng đoạn để điều khiển hệ nổi hơi - tuabin được trình bày trong tài liệu [4]. Kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng bám và khả năng điều khiển bền vững của hệ đối với nhiễu tải và nhiễu đo tương đối tốt. Tuy nhiên, khả năng ổn định bộ điều khiển dự báo phi tuyến khi xét tới sai lệch mô hình chưa được đề cập đến. Ngoài ra, để điều khiển hệ phi tuyến trên có thể sử dụng bộ điều khiển dự báo phi tuyến NMPC với các thuật toán được trình bày trong tài liệu [5], tuy nhiên việc chọn các hàm phạt thích hợp để đảm bảo ổn định hệ phi tuyến là khó khăn và việc giải bài toán tối ưu phi tuyến online với ràng buộc trạng thái cuối làm tăng khối lượng tính toán cho bộ điều khiển, ảnh hưởng đến tính năng thời gian thực của hệ thống.

Trong bài báo này, tác giả đề xuất sử dụng cấu trúc điều khiển dự báo phi tập trung cho các quá trình gồm nhiều hệ con có tương tác với nhau nhằm giảm khối lượng tính toán cho bộ điều khiển dự báo tập trung, trong đó mỗi bộ điều khiển dự báo cục bộ sử dụng mô hình tuyến tính hóa tại điểm làm việc để dự báo và tính toán giá trị điều khiển, cũng như áp dụng các kết quả về ổn định hệ tuyến tính để đảm bảo tính ổn định ISS của toàn hệ. Ngoài ra, tương tác đầu vào, đầu ra và trạng thái giữa các quá trình con được coi là nhiễu đo được và các bộ điều khiển cục bộ sử dụng các thông tin dự báo này từ các bộ điều khiển cục bộ khác có tương tác để dự báo nhiễu nhằm cải thiện chất lượng của bộ điều khiển dự báo phi tập trung. Sau đó thuật toán được áp dụng vào điều khiển hệ nổi hơi - tuabin.

2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

2.1. Thuật toán điều khiển

Xét hệ thống gồm M quá trình con được mô tả dưới dạng phương trình trạng thái tuyến tính có tương tác vào/ra và tương tác trạng thái với nhau:

$$\begin{cases}
 \mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{A}^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{B}^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{E}^i \boldsymbol{\psi}_k^i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M (\mathbf{A}^{ij} \mathbf{x}_k^j + \mathbf{B}^{ij} \mathbf{u}_k^j + \mathbf{C}^{ij} \mathbf{y}_k^j) \\
 \mathbf{y}_k^i = \mathbf{C}^i \mathbf{x}_k^i
 \end{cases}
 \tag{3}$$

Trong đó:

$$\mathbf{x}_k^i = (x_1^i(k), x_2^i(k), \dots, x_{n_i}^i(k))^T,$$

$$\mathbf{u}_k^i = (u_1^i(k), u_2^i(k), \dots, u_{m_i}^i(k))^T$$

$$\mathbf{y}_k^i = (y_1^i(k), y_2^i(k), \dots, y_{q_i}^i(k))^T,$$

$$\boldsymbol{\psi}_k^i = (\psi_1^i[k], \dots, \psi_{p_i}^i[k])^T$$

tương ứng là vector các biến trạng thái, biến đầu vào, biến đầu ra và biến nhiễu của hệ i thỏa mãn các điều kiện ràng buộc

$$\mathbf{x}_k^i \in X^i \subset \mathbb{R}^{n_i}, \mathbf{u}_k^i \in U^i \subset \mathbb{R}^{m_i}, \boldsymbol{\psi}_k^i \in \Psi^i \subset \mathbb{R}^{p_i}$$

Thành phần $\mathbf{A}^{ij}, \mathbf{B}^{ij}, \mathbf{C}^{ij}, \mathbf{y}_k^j$ lần lượt biểu diễn tương tác trạng thái, đầu vào và tương tác đầu ra của hệ j lên hệ i . Với giả thiết các thành phần tương tác này là nhiễu đo được và các ma trận $\mathbf{A}^{ij}, \mathbf{B}^{ij}, \mathbf{C}^{ij}$ đã biết trước thì hệ (3) có thể biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{cases}
 \mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{A}^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{B}^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{E}^i \mathbf{d}_k^i \\
 \mathbf{y}_k^i = \mathbf{C}^i \mathbf{x}_k^i
 \end{cases}
 \tag{4}$$

Với thành phần nhiễu của hệ có dạng:

$$\mathbf{E}^i \mathbf{d}_k^i = \mathbf{E}^i \boldsymbol{\eta}_k^i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M (\mathbf{A}^{ij} \mathbf{x}_k^j + \mathbf{B}^{ij} \mathbf{u}_k^j + \mathbf{C}^{ij} \mathbf{y}_k^j)$$

$$\mathbf{d}_k^i = \text{col}(\eta_k^i, \mathbf{x}_k^j, \mathbf{u}_k^j, \mathbf{y}_k^j)$$

$$\mathbf{x}_k^j = \text{col}(x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^{i-1}, x_k^{i+1}, \dots, x_k^M)$$

$$\mathbf{u}_k^j = \text{col}(u_k^1, u_k^2, \dots, u_k^{i-1}, u_k^{i+1}, \dots, u_k^M)$$

$$\mathbf{y}_k^j = \text{col}(y_k^1, y_k^2, \dots, y_k^{i-1}, y_k^{i+1}, \dots, y_k^M)$$

và $\mathbf{x}_k^j, \mathbf{u}_k^j, \mathbf{y}_k^j$ là vector các biến trạng thái, đầu vào và đầu ra của hệ j có tương tác với hệ i .

Hàm mục tiêu

Để thuận tiện cho việc xét tính ổn định của hệ thống, ta chọn hàm mục tiêu với hàm phạt trạng thái cuối có dạng sau:

$$J_N^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}^i) = \sum_{j=0}^{N-1} [l^i(\mathbf{x}_{k+j}^i, \mathbf{u}_{k+j}^i)] + V_f^i(\mathbf{x}_{k+N}^i)
 \tag{5}$$

trong đó hàm chi phí và hàm phạt trạng thái cuối là các hàm toàn phương:

$$\begin{aligned} \mathbf{l}^i(\mathbf{x}_{k+j}^i, \mathbf{u}_{k+j}^i) &= (\mathbf{x}_{k+j}^i)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{k+j}^i + (\mathbf{u}_{k+j}^i)^T \mathbf{R} \mathbf{u}_{k+j}^i, \\ \mathbf{V}_f^i(\mathbf{x}_{k+j}^i) &= (\mathbf{x}_{k+j}^i)^T \mathbf{P}_f \mathbf{x}_{k+j}^i \end{aligned} \quad (6)$$

với $\mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{P}_f$ là các ma trận đối xứng xác định dương và ràng buộc trạng thái cuối $\mathbf{x}_{k+N}^i \in X_f^i \subset X^i$. Các giá trị trạng thái $\mathbf{x}_{k+k_N}^i, k_N = 1, \dots, N$ được tính toán từ (4) như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+k_N}^i &= \mathbf{A}^i \left(\mathbf{A}^i \mathbf{x}_{k+k_N-2}^i + \mathbf{B}^i \mathbf{u}_{k+k_N-2}^i + \mathbf{E}^i \mathbf{d}_{k+k_N-2}^i \right) \\ &\quad + \mathbf{B}^i \mathbf{u}_{k+k_N-1}^i + \mathbf{E}^i \mathbf{d}_{k+k_N-1}^i \\ \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{k+1}^i \\ \mathbf{x}_{k+2}^i \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k+N}^i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{A}^i \\ (\mathbf{A}^i)^2 \\ \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^N \end{pmatrix} \mathbf{x}_k^i + \begin{pmatrix} \mathbf{B}^i & \mathbf{0}_{n \times m} & \dots & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \mathbf{A}^i \mathbf{B}^i & \mathbf{B}^i & \dots & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^{N-1} \mathbf{B}^i & (\mathbf{A}^i)^{N-2} \mathbf{B}^i & \dots & \mathbf{B}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_k^i \\ \mathbf{u}_{k+1}^i \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{k+N-1}^i \end{pmatrix} \\ &\quad + \begin{pmatrix} \mathbf{E}^i & \mathbf{0}_{n \times p} & \dots & \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{A}^i \mathbf{E}^i & \mathbf{E}^i & \ddots & \mathbf{0}_{n \times p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^{N-1} \mathbf{E}^i & (\mathbf{A}^i)^{N-2} \mathbf{E}^i & \dots & \mathbf{E}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{d}_k^i \\ \mathbf{d}_{k+1}^i \\ \vdots \\ \mathbf{d}_{k+N-1}^i \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Hay $\mathbf{x}^i = \mathbf{P}_x^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{H}_x^i \mathbf{u}^i + \mathbf{F}_x^i \mathbf{d}^i$ (7)

với $\mathbf{x}^i \triangleq \text{col}(\mathbf{x}_{k+1}^i, \mathbf{x}_{k+2}^i, \dots, \mathbf{x}_{k+N}^i), \mathbf{u}^i \triangleq \text{col}(\mathbf{u}_k^i, \mathbf{u}_{k+1}^i, \dots, \mathbf{u}_{k+N-1}^i),$
 $\mathbf{d}^i \triangleq \text{col}(\mathbf{d}_k^i, \mathbf{d}_{k+1}^i, \dots, \mathbf{d}_{k+N-1}^i)$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_x^i &= \begin{pmatrix} \mathbf{A}^i \\ (\mathbf{A}^i)^2 \\ \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^N \end{pmatrix}, \mathbf{H}_x^i = \begin{pmatrix} \mathbf{B}^i & \mathbf{0}_{n \times m} & \dots & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \mathbf{A}^i \mathbf{B}^i & \mathbf{B}^i & \dots & \mathbf{0}_{n \times m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^{N-1} \mathbf{B}^i & (\mathbf{A}^i)^{N-2} \mathbf{B}^i & \dots & \mathbf{B}^i \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}_x^i &= \begin{pmatrix} \mathbf{E}^i & \mathbf{0}_{n \times p} & \dots & \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{A}^i \mathbf{E}^i & \mathbf{E}^i & \ddots & \mathbf{0}_{n \times p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mathbf{A}^i)^{N-1} \mathbf{E}^i & (\mathbf{A}^i)^{N-2} \mathbf{E}^i & \dots & \mathbf{E}^i \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Dự báo nhiễu

Giả sử thành phần nhiễu của hệ i là: $\mathbf{d}_k^i = \text{col}(\boldsymbol{\psi}_k^i, \mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{y}_k^i)$ gồm nhiễu đo được của bản thân quá trình thứ i là $\boldsymbol{\psi}_k^i$ và nhiễu do tương tác từ các quá trình thứ j là $\text{col}(\mathbf{x}_k^j, \mathbf{u}_k^j, \mathbf{y}_k^j)$. Để tính toán dự báo nhiễu $\mathbf{d}_{k+k_N}^i$ ta giả sử thành phần nhiễu riêng của hệ biến đổi chậm và không đổi trong tầm dự báo: $\boldsymbol{\psi}_{k+k_N}^i = \boldsymbol{\psi}_{k+k_N-1}^i = \dots = \boldsymbol{\psi}_k^i$. Từ các giá trị dự báo $\text{col}(\mathbf{x}_{k+k_N}^j, \mathbf{u}_{k+k_N}^j, \mathbf{y}_{k+k_N}^j)$ nhận được từ các bộ điều khiển cục bộ ta xác định được thành phần \mathbf{d}^i như sau:

$$\mathbf{d}^i = \text{col} \begin{pmatrix} \text{col}(\boldsymbol{\psi}_{k-k_d}^i, \mathbf{x}_{k-k_d}^j, \mathbf{u}_{k-k_d}^j, \mathbf{y}_{k-k_d}^j), \\ \text{col}(\boldsymbol{\psi}_{k-k_d}^i, \mathbf{x}_{k-k_d+1}^j, \mathbf{u}_{k-k_d+1}^j, \mathbf{y}_{k-k_d+1}^j), \dots, \\ \text{col}(\boldsymbol{\psi}_{k-k_d}^i, \mathbf{x}_{k-k_d+N-1}^j, \mathbf{u}_{k-k_d+N-1}^j, \mathbf{y}_{k-k_d+N-1}^j) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Thuật toán 2.1: Điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính (DLMPC).

- Tại thời điểm trích mẫu k các bộ điều khiển cục bộ MPC^{*i*} nhận giá trị phản hồi trạng thái $\mathbf{x}_k^i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, M$).

- Các bộ điều khiển MPC^{*i*} thực hiện nhận giá trị dự báo cần thiết từ các bộ điều khiển MPC^{*k*} khác có tương tác với hệ con i để tính toán giá trị dự báo nhiễu \mathbf{d}^i theo (8), tính toán giá trị tối ưu \mathbf{u}^i từ hàm mục tiêu (5) sử dụng thuật toán SQP (*Sequential quadratic programming*). Lấy phần tử đầu tiên \mathbf{u}_k^i của dãy giá trị tối ưu \mathbf{u}^{*i} để điều khiển và gửi toàn bộ giá trị dự báo cần thiết tới các bộ điều khiển MPC^{*i*} mà hệ i tương tác.

- Đặt $k := k + 1$ và quay lại bước 1.

2.2. Tính ổn định của hệ thống

Theo [7] bộ điều khiển MPC^{*i*} cho quá trình con (4) trong trường hợp không có nhiễu $\mathbf{d}_k^i = 0$, với hàm mục tiêu (5) và hàm phạt trạng thái cuối dạng toàn phương (6) sẽ ổn định tiệm cận tại gốc với bộ điều khiển dự báo MPC^{*i*} $\triangleq \mathbf{u}_k^i(\mathbf{x}_k^i)$ nếu $\forall \mathbf{x} \in X_f^i$ tồn tại $\mu \in U^i$ sao cho $\mathbf{f}^i(\mathbf{x}, \mu) \in X_f^i$ và $\mathbf{V}_f^i(\mathbf{f}^i(\mathbf{x}, \mu)) - \mathbf{V}_f^i(\mathbf{x}) + \mathbf{l}^i(\mathbf{x}, \mu) \leq 0$ (9)

với hàm Lyapunov: $V_N^i(\mathbf{x}_k^i) = J_N^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i(\mathbf{x}_k^i))$

Nếu \mathbf{A}^i là ma trận bền hay ma trận Schur (ma trận có các trị riêng nằm trong đường tròn đơn vị) thì với mọi ma trận xác định dương $\mathbf{Q}^i > 0$ tồn tại ma trận $\mathbf{P}_f^i > 0$ thỏa mãn phương trình Lyapunov:

$$(\mathbf{A}^i)^T \mathbf{P}_f^i \mathbf{A}^i - \mathbf{P}_f^i = -\mathbf{Q}^i \quad (10)$$

Và (9) sẽ thỏa mãn với $\mu = 0$ bởi

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_f^i(\mathbf{f}^i(\mathbf{x}, \mu)) - \mathbf{V}_f^i(\mathbf{x}) + \mathbf{l}^i(\mathbf{x}, \mu) &= \mathbf{V}_f^i(\mathbf{A}^i \mathbf{x}) - \mathbf{V}_f^i(\mathbf{x}) + \mathbf{l}^i(\mathbf{x}, 0) \\ &= (\mathbf{A}^i \mathbf{x})^T \mathbf{P}_f^i (\mathbf{A}^i \mathbf{x}) - (\mathbf{x})^T \mathbf{P}_f^i (\mathbf{x}) + (\mathbf{x})^T \mathbf{Q}^i (\mathbf{x}) \\ &= (\mathbf{x}_k^i)^T \left((\mathbf{A}^i)^T \mathbf{P}_f^i \mathbf{A}^i + \mathbf{Q}^i - \mathbf{P}_f^i \right) \mathbf{x}_k^i = 0 \end{aligned}$$

Khi đó, theo [7] hệ con (4) trong trường hợp có nhiễu bị chặn sẽ ổn định ISS theo nghĩa tồn tại hàm Lyapunov $V_N^i(\mathbf{x}_k^i)$ liên tục Lipschitz và các hàm $\alpha_1^i, \alpha_2^i, \alpha_3^i \in \mathcal{K}$ và hàm $\sigma^i \in \mathcal{K}_\infty$ sao cho $\forall \mathbf{x}_k^i \in X^i, \mathbf{d}_k^i \in W^i$ ta có:

$$\alpha_1^i \left(\|\mathbf{x}_k^i\| \right) \leq V_N^i(\mathbf{x}_k^i) \leq \alpha_2^i \left(\|\mathbf{x}_k^i\| \right) \quad (11)$$

$$V_N^i(\mathbf{x}_{k+1}^i) - V_N^i(\mathbf{x}_k^i) \leq -\alpha_3^i \left(\|\mathbf{x}_k^i\| \right) + \sigma^i \left(\|\mathbf{d}_k^i\| \right) \quad (12)$$

Tiếp theo ta đi xét tính ổn định của hệ tổng thể:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{E}\mathbf{d}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k \end{cases} \quad (13)$$

với

$$\mathbf{x}_k \triangleq \text{col}(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{x}_k^2, \dots, \mathbf{x}_k^M), \mathbf{u}_k \triangleq \text{col}(\mathbf{u}_k^1, \mathbf{u}_k^2, \dots, \mathbf{u}_k^M)$$

$$\mathbf{y}_k \triangleq \text{col}(\mathbf{y}_k^1, \mathbf{y}_k^2, \dots, \mathbf{y}_k^M), \mathbf{d}_k \triangleq \text{col}(\mathbf{d}_k^1, \mathbf{d}_k^2, \dots, \mathbf{d}_k^M)$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{A}^1, \mathbf{A}^2, \dots, \mathbf{A}^M), \mathbf{B} = \text{diag}(\mathbf{B}^1, \mathbf{B}^2, \dots, \mathbf{B}^M)$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}^1, \mathbf{C}^2, \dots, \mathbf{C}^M), \mathbf{E} = \text{diag}(\mathbf{E}^1, \mathbf{E}^2, \dots, \mathbf{E}^M)$$

$$\text{Xét hàm: } V_N(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^M V_N^i(\mathbf{x}_k^i) \quad (14)$$

Từ (11) và do tổng các hàm thuộc lớp \mathcal{K} cũng là một hàm thuộc lớp \mathcal{K} nên:

$$V_N(\mathbf{x}_k) \leq \sum_{i=1}^M \alpha_2^i(|\mathbf{x}_k^i|) \leq \sum_{i=1}^M \alpha_2^i(|\mathbf{x}_k|) \triangleq \alpha_2(|\mathbf{x}_k|)$$

Xét hàm $\alpha_1^i \triangleq \min_{s \in \{1,2,\dots,M\}} \alpha_1^i(s), \forall s \geq 0$ thì α_1^i cũng là một hàm thuộc lớp \mathcal{K} .

$$\text{Từ (11) và (14) ta có: } V_N(\mathbf{x}_k) \geq \sum_{i=1}^M \alpha_1^i(|\mathbf{x}_k^i|) \geq \sum_{i=1}^M \alpha_1^i(|\mathbf{x}_k|)$$

Theo Sontag [8]:

$$\alpha(a+b) \leq \alpha(2a) + \alpha(2b) \quad \forall a \geq 0, b \geq 0, \alpha \in \mathcal{K}$$

Do vậy tồn tại $c \geq 0$ để:

$$\sum_{i=1}^M \alpha(b_i) \geq \alpha\left(\frac{\sum_{i=1}^M b_i}{c}\right)$$

$$\Rightarrow V_N(\mathbf{x}_k) \geq \sum_{i=1}^M \alpha_1^i(|\mathbf{x}_k^i|) \geq \alpha_1^i\left(\frac{\sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i|}{c}\right)$$

mà $|\mathbf{x}_k^i| \geq 0$ và $\mathbf{x}_k = \text{col}(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{x}_k^2, \dots, \mathbf{x}_k^M)$ nên

$$\left(\sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i|\right)^2 \geq \sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i|^2 = |\mathbf{x}_k|^2 \Rightarrow \sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i| \geq |\mathbf{x}_k|$$

$$\Rightarrow V_N(\mathbf{x}_k) \geq \alpha_1^i\left(\frac{\sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i|}{2^M}\right) \geq \alpha_1^i\left(\frac{|\mathbf{x}_k|}{2^M}\right) \triangleq \alpha_1(|\mathbf{x}_k|) \quad \text{do vậy}$$

tồn tại hàm $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathcal{K}$ để:

$$\alpha_1(|\mathbf{x}_k|) \leq V_N(\mathbf{x}_k) \leq \alpha_2(|\mathbf{x}_k|) \quad (15)$$

Từ (14) và (12) ta có

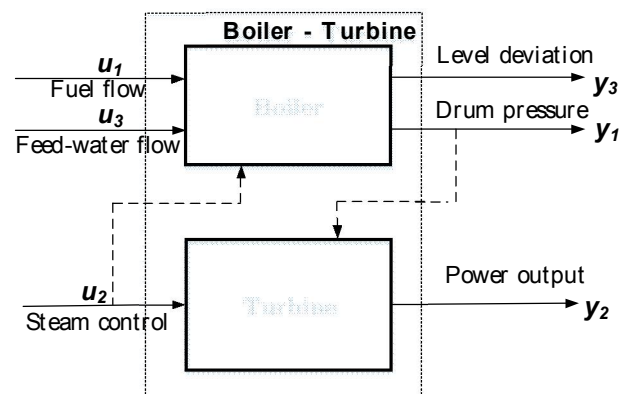
$$V_N(\mathbf{x}_{k+1}) - V_N(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^M V_N^i(\mathbf{x}_{k+1}^i) - V_N^i(\mathbf{x}_k^i) \quad (16)$$

$$\leq \sum_{i=1}^M -\alpha_3^i(|\mathbf{x}_k^i|) + \sigma^i(|\mathbf{d}_{k-k_d}^i|)$$

Từ (15) và (16) ta có hệ tổng thể (13) ổn định ISS với hàm Lyapunov (14).

3. ÁP DỤNG ĐIỀU KHIỂN HỆ NỔ HƠI - TUABIN

Mô hình nổ hơi và mô hình tuabin



Hình 2. Các biến vào/ra của mô hình nổ hơi - tuabin

Có thể thấy với các biến vào/ra như ở hình 2, nếu tách hệ nổ hơi - tuabin làm hai hệ con là hệ nổ hơi và hệ tua bin, thì u_1, u_2 đóng vai trò là tín hiệu điều khiển, u_2 đóng vai trò là nhiễu của nổ hơi, trong khi y_1, y_2 là 2 đầu ra. Như vậy có thể viết lại mô hình nổ hơi như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{x}^1, \mathbf{u}^1, \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{y}^1 = \mathbf{g}^1(\mathbf{x}^1, \mathbf{u}^1, \mathbf{d}^1) \end{cases} \quad (17)$$

Với

$$\mathbf{x}^1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \end{pmatrix}, \mathbf{u}^1 = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_3 \end{pmatrix}, \mathbf{y}^1 = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_3 \end{pmatrix}, \mathbf{d}^1 = u_2,$$

$$\mathbf{f}^1 = \begin{pmatrix} -0,0018d^1(x_1^1)^{9/8} + 0,1u_1^1 - 0,015u_2^1 \\ \frac{141u_2^1 - (1,1d^1 - 0,19)x_1^1}{85} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g}^1 = \begin{pmatrix} x_1^1 \\ 0,05(0,13073x_2^1 + 100a_{cs} + q_e / 9 - 67,975) \end{pmatrix}$$

Thông tin quỹ đạo trạng thái tối ưu u_2 sẽ được sử dụng để dự báo nhiễu cho hệ nổ hơi.

Bảng 1. Điểm làm việc của hệ thống nổ hơi - tuabin [2]

	70%	80%	90%	100%	110%	120%	140%
x_{1s}	75,6	86,4	97,2	108	118,8	129,6	140,4
x_{2s}	15,27	36,65	50,52	66,65	85,06	105,8	128,9
x_{3s}	299,6	324,4	385,2	428	470,8	513,6	556,4
u_{1s}	0,156	0,209	0,271	0,34	0,418	0,505	0,6
u_{2s}	0,483	0,552	0,621	0,69	0,759	0,828	0,897

u_{3s}	0,183	0,256	0,34	0,435	0,543	0,663	0,793
y_{3s}	-0,97	-0,65	-0,32	0	0,32	0,64	0,98

Tiến hành tuyến tính hóa (17) quanh 7 điểm làm việc cho ở bảng 1, sau đó gián đoạn hóa với chu kỳ lấy mẫu T ta thu được các mô hình tuyến tính như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_j^1(k+1) = \mathbf{A}_j^1 \mathbf{x}_j^1(k) + \mathbf{B}_j^1 \mathbf{u}^1(k) + \mathbf{E}_j^1 \mathbf{d}^1(k) \\ \mathbf{y}_j^1(k) = \mathbf{C}_j^1 \mathbf{x}_j^1(k) + \mathbf{D}_j^1 \mathbf{u}^1(k) + \mathbf{F}_j^1 \mathbf{d}^1(k) \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó các ma trận

$$\mathbf{A}_j^1 = \begin{bmatrix} 1 - 0,002025T u_{2s}^j (x_{1s}^j)^{1/8} & 0 \\ -\frac{1,1u_{2s}^j - 0,19}{85}T & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_j^1 = \begin{bmatrix} 0,9T & -0,15T \\ 0 & 1,6588T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_j^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}; \mathbf{D}_j^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,25328 & -0,013967 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_j^1 = \begin{bmatrix} -0,0018T(x_{1s}^j)^{9/8} \\ -0,012941T x_{1s}^j \end{bmatrix}, \mathbf{F}_j^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,0047444x_{1s}^j \end{bmatrix}$$

$$c_{21} = \frac{4(1 - 0,001538x_{3s}^j) + 0,854u_{2s}^j - 0,147}{x_{3s}^j(1,0394 - 0,0012304x_{1s}^j)} + \frac{180}{180}$$

$$c_{22} = 0,05 \left[0,13073 - \frac{100(0,8x_{1s}^j - 25,6)}{(x_{3s}^j)^2(1,0394 - 0,0012304x_{1s}^j)} \right]$$

thu được từ việc thực hiện phép khai triển Taylor tại các điểm làm việc tương ứng.

Tương tự mô hình tuabin có u_2, y_2, x_1 lần lượt đóng vai trò là tín hiệu điều khiển, đầu ra và nhiễu của mô hình tuabin

$$\begin{cases} \dot{x}^2 = f^2(x^2, u^2, d^2) \\ y^2 = g^2(x^2, u^2) \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{với } x^2 = x_2, u^2 = u_2, y^2 = y_2, d^2 = x_1, g^2(x^2, u^2) = x^2$$

$$f^2(x^2, u^2, d^2) = (0,73u^2 - 0,016)(d^2)^{9/8} - 0,1x^2$$

Thông tin dự báo đầu ra y_1 của hệ nổi hơi sẽ được sử dụng để dự báo nhiễu cho hệ tuabin. Sau tuyến tính hóa quanh điểm làm việc và gián đoạn hóa ta thu được các mô hình tuyến tính cục bộ của tuabin.

$$\begin{cases} \mathbf{x}_j^2(k+1) = \mathbf{A}_j^2 \mathbf{x}_j^2(k) + \mathbf{B}_j^2 \mathbf{u}^2(k) + \mathbf{E}_j^2 \mathbf{d}^2(k) \\ \mathbf{y}_j^2(k) = \mathbf{C}_j^2 \mathbf{x}_j^2(k) + \mathbf{D}_j^2 \mathbf{u}^2(k) + \mathbf{F}_j^2 \mathbf{d}^2(k) \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{với } \mathbf{A}_j^2 = 1 - 0,1T, \mathbf{B}_j^2 = 0,073T x_{1s}^j, \mathbf{C}_j^2 = 1, \mathbf{D}_j^2 = 0,$$

$$\mathbf{E}_j^2 = \frac{9}{8}T(0,073 - x_{2s}^j)(x_{1s}^j)^{1/8}, \mathbf{F}_j^2 = 0$$

Áp dụng thuật toán 2.1 vào điều khiển dự báo phi tập trung hệ nổi hơi - tuabin dựa trên mô hình tuyến tính của hệ nổi hơi và tuabin tại điểm làm việc 90% công suất với các ràng buộc về tín hiệu điều khiển:

$$(0,0)^T \leq \mathbf{u}^1 \leq (1,1)^T, 0 \leq u^2 \leq 1, -2 \leq \Delta u^2 \leq 0,02$$

$$(-0,007 \quad -0,005)^T \leq \Delta \mathbf{u}^1 \leq (0,007 \quad 0,005)^T$$

Các ma trận trọng số của hàm mục tiêu:

$$\mathbf{Q}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}^2 = 1, \mathbf{R}^1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix}, \mathbf{R}^2 = 80$$

Tại điểm làm việc 90% công suất thì ma trận hệ thống và ma trận đầu vào của mô hình không liên tục hệ nổi hơi và tuabin với chu kỳ lấy mẫu $T = 1s$ lần lượt là:

$$\mathbf{A}_2^1 = \begin{bmatrix} 0,9972 & 0 \\ -0,0058 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2^1 = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,15 \\ 0 & 1,6588 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2^2 = 0,9, \mathbf{B}_2^2 = 7,0956$$

Vì \mathbf{A}_2^2 là ma trận Schur nên có thể chọn ma trận trọng số của hàm phạt $\mathbf{P}_f^2 = 5,2632$ ma trận \mathbf{A}_2^1 có một giá trị riêng nằm trên đường tròn đơn vị nên để đảm bảo ổn định hệ này ta có thể bổ sung thêm một bộ điều khiển phản

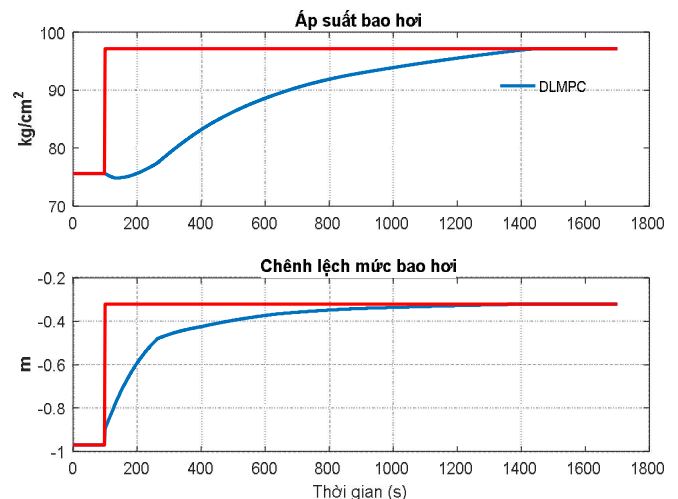
hồi trạng thái $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ Với $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,005 \end{bmatrix}$ thì

$$\mathbf{A}_2^1 = \mathbf{A}_2^1 - \mathbf{B}_2^1 \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0,9972 & 0 \\ -0,0058 & 0,9889 \end{bmatrix} \text{ là Hurwitz, khi đó có thể}$$

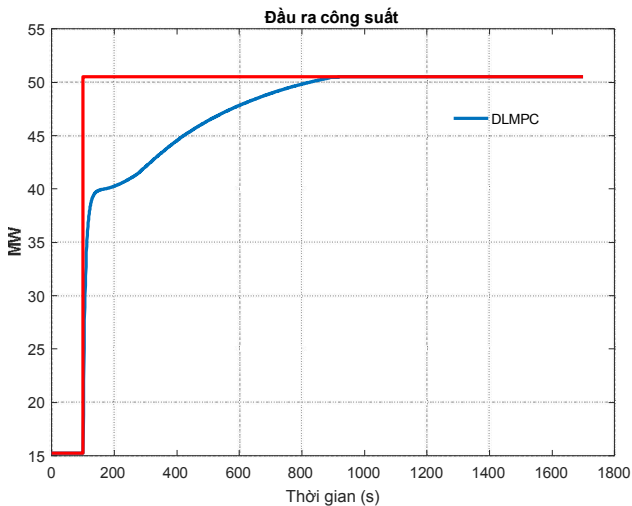
chọn ma trận trọng số của hàm phạt thỏa mãn phương trình Lyapunov (10).

$$\mathbf{P}_f^1 = \begin{bmatrix} 569,0384 & -187,3276 \\ -187,3276 & 452,9644 \end{bmatrix}$$

Thành phần nhiễu của hệ nổi hơi $d^1 = u_2$ là biến điều khiển của hệ tuabin nên có thể sử dụng thông tin dự báo biến điều khiển u_2 của hệ tuabin để dự báo nhiễu cho hệ nổi hơi. Thành phần nhiễu của hệ tuabin $d^2 = x_1$ là biến trạng thái (cũng chính là đầu ra thứ nhất) của hệ nổi hơi nên có thể sử dụng thông tin dự báo của biến này để dự báo nhiễu cho hệ tuabin.

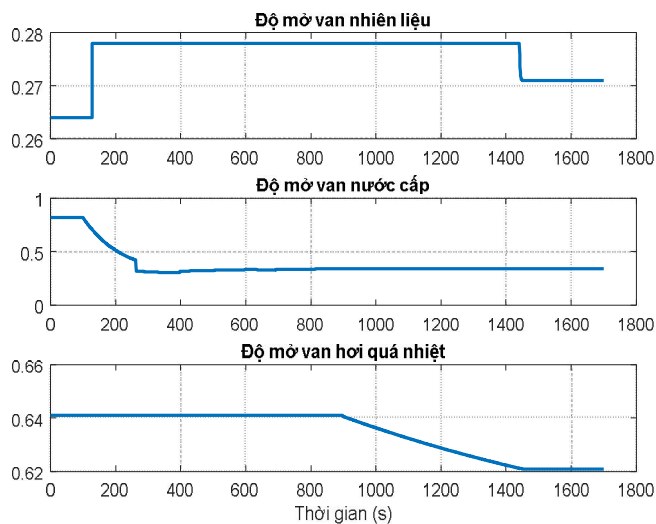


Hình 3. Đáp ứng hệ thống nổi hơi với thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung dự trên mô hình tuyến tính tại điểm làm việc 90%



Hình 4. Đáp ứng hệ thống tuabin với thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính tại điểm làm việc 90%

Mô phỏng trong trường hợp hệ thống chuyển từ điểm làm việc 70% đến điểm làm việc 90% với tầm dự báo $N = 20$ ta thu được đáp ứng của hệ thống như Hình 3 ÷ 5. Kết quả mô phỏng cho thấy khi chuyển điểm làm việc từ 70% sang 90% bộ điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính đề xuất đã làm ổn định hệ nồi hơi - tuabin với chất lượng bám tốt. Khi so sánh với bộ điều khiển dự báo phi tuyến [6] (bảng 2) thì độ quá điều chỉnh của bộ điều khiển đề xuất nhỏ hơn nhưng thời gian quá độ lâu hơn.



Hình 5. Tín hiệu điều khiển hệ nồi hơi - tuabin với thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính tại điểm làm việc 90%

Tuy nhiên thời gian tính toán trung bình khi thực hiện một vòng lặp điều khiển của thuật toán NMPC là lớn hơn nhiều lần so với thời gian tính toán của thuật toán đề xuất (4,176s so với 0,561s). Như vậy với chu kỳ điều khiển $T = 1s$ thì thuật toán NMPC không thể đảm bảo yêu cầu bởi để giải bài toán tối ưu phi tuyến thì bộ điều khiển cần đến hơn 4s. (Thuật toán trên được cài đặt và thử nghiệm trên Laptop Dell Latitude E7470: CPU core i7-6600U 2.6GHz, RAM 16GB).

Bảng 2. So sánh một số chỉ tiêu kỹ thuật sử thuật toán DL MPC và NMPC điều khiển hệ nồi hơi - tuabin

Chỉ tiêu kỹ thuật	DL MPC	NMPC
Thời gian trung bình thực hiện 1 vòng lặp điều khiển hệ nồi hơi (s)	0,352	4,176/2
Thời gian quá độ áp suất bao hơi (s)	1185,5	50,85
Độ quá điều chỉnh áp suất bao hơi (%)	0	0,9
Thời gian quá độ mức nước bao hơi (s)	658	30
Độ quá điều chỉnh mức nước bao hơi (%)	0	36
Thời gian trung bình thực hiện 1 vòng lặp điều khiển hệ tuabin (s)	0,209	4,176/2
Thời gian quá độ công suất điện (s)	581	45
Độ quá điều chỉnh công suất điện (%)	0	0

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng phương pháp điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính cho hệ thống nồi hơi - tuabin. Trong đó tương tác giữa các hệ con được coi là nhiễu và dự báo được dựa trên các thông tin dự báo của các bộ điều khiển dự báo cục bộ. Kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng điều khiển là tốt và khối lượng tính toán, thời gian tính toán trung bình khi thực hiện một vòng lặp điều khiển nhỏ hơn rất nhiều so với trường hợp sử dụng bộ điều khiển dự báo tập trung phi tuyến. Ngoài ra tính ổn định của các hệ con và toàn hệ thống cũng được đảm bảo theo tiêu chuẩn ISS.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R.D.Bell, K.J. Åström 1987. *Dynamic Models for Boiler Turbine Alternator Units: Data Logs and Parameter Estimation for 160MW Unit*. Lund Institute of Technology, 1987, TRFT-3192.
- [2]. Xiao Wu, Jiong Shen, Yiguo Li, 2010. *Control of Boiler-turbine Coordinated System Using Multiple-model Predictive Approach*. 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation Xiamen, China, June 9-11.
- [3]. Astrom, K. J.; Eklund, K, 1972. *A simplified non-linear model of a drum-boiler-turbine unit*. Int. J. Control 1972, 16, 146.
- [4]. P.V. Hùng, N.D. Anh, V.T. Thành, 2016. *Điều khiển bền vững lò hơi-tuabin phi tuyến nhờ bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái với mô hình dự báo tuyến tính và bộ quan sát UKF*, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số 44, 08-2016.
- [5]. LarsGrüne, JürgenPannek, 2011. *Nonlinear predictive control: Theory and Algorithms*. Springer-Verlag, London.
- [6]. Phạm Văn Hùng, Phạm Văn Minh, 2017, *Điều khiển ổn định hệ nồi hơi-tuabin sử dụng bộ điều khiển dự báo dựa trên mô hình phi tuyến*. Tạp chí KH-CN - ĐH CNHN (38), pp. 117-120.
- [7]. J.B. Rawlings, A.Q. Mayne, 2013. *Model predictive control: Theory and design*. Nob Hill Publishing.
- [8]. Sontag E. D, 1989. *Smooth stabilization implies coprime factorization*. IEEE transactions on automatic control 34(4), pp. 435-443.