

Điều khiển dự báo phi tập trung hệ phi tuyến sử dụng mô hình tuyến tính xấp xỉ từng đoạn

Decentralized Model Predictive Control of Nonlinear System Using Piecewise LTI Model

Phạm Văn Hùng, Hoàng Minh Sơn*

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Tóm tắt

Bài báo đề xuất thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung (DMPC) cho hệ phi tuyến gồm nhiều các quá trình con có tương tác với nhau. Mỗi hệ con được điều khiển bởi một bộ điều khiển dự báo, bộ điều khiển này sử dụng mô hình tuyến tính từng đoạn (LTI) xấp xỉ từng đoạn và thông tin dự báo từ các bộ điều khiển dự báo khác để dự báo nhiễu và tính toán tín hiệu điều khiển tối ưu bằng cách xem các tương tác tới hệ thống cục bộ như là nhiễu. Bên cạnh đó, tính ổn định ISS của các hệ con và toàn hệ thống được đảm bảo dựa trên một số giả thiết. Kết quả mô phỏng trên hệ nồi hơi – tuabin cho thấy khả năng thực thi của thuật toán.

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

Abstract

This paper proposes a Decentralized Model Predictive Control (DMPC) schema for nonlinear systems consisting of a number of interconnected nonlinear subsystems. Each subsystem is controlled by a model predictive controller using piecewise Linear Time Invariant (LTI) predictive model and the predictive information from other model predictive controllers to predict disturbance and to calculate the optimal control signals with considering the effect of interconnections as perturbation term. Besides, the input-to-state stability (ISS) property of the local subsystems and the global system is guaranteed by some predetermined assumptions. The simulation results on the boiler-turbine system have demonstrated the performance of the proposed approach.

Keywords: Boiler-turbine system, Decentralized model predictive control, Input-to-state stability

1. Mở đầu

Điều khiển dự báo với cấu trúc điều khiển tập trung, với khả năng giải quyết các bài toán nhiều vào/nhiều ra có ràng buộc và có động học phức tạp, cho đến nay đã có rất nhiều công trình được công bố và được ứng dụng thành công vào nhiều lĩnh vực trong công nghiệp [1-3]. Tuy nhiên, khi số lượng các biến vào/ra tăng lên, kéo theo những khó khăn trong giải bài toán tối ưu và ảnh hưởng tới tính năng thời gian thực của hệ thống. Hơn nữa các hệ thống lớn thường gồm nhiều quá trình con tương tác với nhau (các quá trình hóa học, hệ thống phân phối điện năng, hệ thống giao thông đa phương tiện) nên khó điều khiển bằng cấu trúc điều khiển tập trung bởi khối lượng tính toán lớn, vấn đề điều khiển tin cậy và bền vững, cũng như giới hạn về truyền thông [4-7].

Một hướng giải pháp được sử dụng là điều khiển hệ thống này bởi bộ điều khiển dự báo phi tập trung, trong đó mỗi quá trình con được điều khiển bởi một bộ điều khiển dự báo và các bộ điều khiển dự báo cục bộ này có thể điều khiển độc lập hoặc có sự trao đổi

thông tin với nhau. Điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính được đề cập trong [6, 8, 9]. Richard and How [6] đã thiết kế DMPC cho hệ gồm nhiều hệ con có các đầu ra tương tác với nhau dưới dạng ràng buộc chung của hệ. Trong mỗi chu kỳ trích mẫu, các bộ điều khiển MPC cục bộ lần lượt nhận giá trị dự báo đầu ra từ các bộ điều khiển khác để tìm tín hiệu điều khiển tối ưu. Thuật toán DMPC cho hệ gồm nhiều hệ con tương tác với nhau qua biến trạng thái và có ảnh hưởng bởi nhiễu ngẫu nhiên được nghiên cứu trong tài liệu [8]. Cũng trong tài liệu này các điều kiện về ma trận trọng số của hàm phạt trạng thái cuối, ràng buộc trạng thái cuối và điều kiện đầu cho việc giải bài toán tối ưu được đưa ra để đảm bảo tính hội tụ của thuật toán. Tuy nhiên tài liệu này chưa đề cập tới tính ổn định của các hệ con cũng như toàn hệ. Hệ gồm các hệ con tương tác vào/ra, trong đó giả sử đầu ra của hệ này là đầu vào của hệ kia như trong các hệ nối tiếp và hồi tiếp được nghiên cứu trong tài liệu [9]. Các tác giả coi các tương tác vào/ra tới từ các hệ con khác là nhiễu của hệ con hiện tại, tính ổn định ISS của các hệ kín cục bộ và toàn hệ kín được đảm bảo nhờ giả thiết các hệ hở cục bộ là ổn định.

Song song với các công trình nghiên cứu về cấu trúc và giải thuật điều khiển dự báo phi tập trung dựa

* Liên hệ tác giả: Tel.: 024.3868.4878
Email: son.hoangminh@hust.edu.vn

trên mô hình tuyến tính, cũng có nhiều công trình nghiên cứu cho hệ phi tuyến không liên tục và tính ổn định của hệ [7, 10, 11]. Trong [7], các tác giả tiến hành so sánh các thuật toán điều khiển dự báo tập trung, điều khiển dự báo phi tập trung với các bộ điều khiển cục bộ có và không có trao đổi thông tin với nhau cho hệ thống xe kéo. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán điều khiển tập trung cho chất lượng điều khiển với sai lệch nhỏ nhất, trong khi thuật toán điều khiển phi tập trung có thời gian tính toán nhanh nhất. Tính ổn định ISS cho hệ DMPC được đảm bảo khi các bộ điều khiển MPC cục bộ làm ổn định ISS các hệ con được đề cập ở tài liệu [10], trong đó trạng thái giữa các hệ con đóng vai trò là nhiễu. Cũng sử dụng hàm ISS-Lyapunov để đảm bảo tính ổn định của hệ phi tuyến không liên tục, tài liệu [11] đề cập đến thiết kế bộ DMPC cho hệ gồm nhiều hệ con tương tác trạng thái và xét đến trường hợp động học hệ thống bị thay đổi bởi các lỗi xảy ra ở các thời điểm không biết trước. Tuy nhiên, các tài liệu này chưa đề cập tới việc trao đổi thông tin giữa các bộ điều khiển cục bộ để điều khiển. Cũng như việc cài đặt thuật toán và giải bài toán tối ưu phi tuyến online, với các ràng buộc của hệ và các ràng buộc được đưa thêm vào nhằm đảm bảo tính ổn định của hệ, là khó khăn bởi công thức dự báo đầu ra có dạng hàm hợp của nhiều hàm phi tuyến lồng vào nhau. Đồng thời, điều này có thể ảnh hưởng đến tính năng thời gian thực của hệ thống.

Bài báo đề xuất sử dụng phương pháp DMPC cho hệ phi tuyến gồm nhiều quá trình con tương tác, trong đó các tương tác về biến trạng thái hay tương tác vào/ra được xem như là thành phần nhiễu đo được, đồng thời xét cả ảnh hưởng của thành phần nhiễu này đến đầu ra của các hệ con. Mô hình phi tuyến ban đầu được xấp xỉ từng đoạn thành mô hình tính LTI và các bộ điều khiển cục bộ sử dụng thông tin cần thiết từ các bộ điều khiển cục bộ khác để dự báo nhiễu. Bài báo cũng đưa ra chứng minh tính ổn định ISS của các hệ con và toàn hệ ban đầu và áp dụng thuật toán điều khiển hệ nòng hời – tuabin.

2. Bộ điều khiển dự báo phi tập trung

Xét hệ thống phi tuyến không liên tục gồm M quá trình con có tương tác trạng thái hoặc tương tác vào/ra với nhau đóng vai trò là thành phần nhiễu đo được như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{f}^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i) \\ \mathbf{y}_k^i = \mathbf{g}^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

với $\mathbf{x}_k^i = (x_1^i[k], \dots, x_n^i[k])^T$ là vector các biến trạng thái, $\mathbf{u}_k^i = (u_1^i[k], \dots, u_m^i[k])^T$ là vector các biến đầu vào, $\mathbf{y}_k^i = (y_1^i[k], \dots, y_q^i[k])^T$ là vector các biến đầu ra,

$\mathbf{d}_k^i = (d_1^i[k], \dots, d_p^i[k])^T$ là vector các biến nhiễu thỏa mãn các điều kiện ràng buộc

$$\mathbf{x}_k^i \in X^i \subset \mathbb{R}^n, \mathbf{u}_k^i \in U^i \subset \mathbb{R}^m, \mathbf{d}_k^i \in W^i \subset \mathbb{R}^p$$

Và $\mathbf{f}^i, \mathbf{g}^i$ là các vector hàm phi tuyến trơn theo $(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i)$. Nếu định nghĩa

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \left((\mathbf{x}_k^1)^T, \dots, (\mathbf{x}_k^M)^T \right)^T \triangleq \text{col}(\mathbf{x}_k^1, \dots, \mathbf{x}_k^M) \\ \mathbf{u}_k &\triangleq \text{col}(\mathbf{u}_k^1, \dots, \mathbf{u}_k^M), \mathbf{d}_k \triangleq \text{col}(\mathbf{d}_k^1, \dots, \mathbf{d}_k^M) \\ \mathbf{f} &\triangleq \text{col}(\mathbf{f}^1, \dots, \mathbf{f}^M), \mathbf{g} \triangleq \text{col}(\mathbf{g}^1, \dots, \mathbf{g}^M) \end{aligned}$$

thì hệ thống tổng thể có thể được biểu diễn dưới dạng

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{d}_k) \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{d}_k) \end{cases} \quad (2)$$

Bài toán đặt ra là thiết kế bộ điều khiển phi tập trung gồm M bộ điều khiển dự báo MPC^i , trong đó mỗi MPC^i có nhiệm vụ điều khiển đầu ra \mathbf{y}_k^i của hệ thứ i bám theo giá trị đặt \mathbf{r}^i tương ứng, đồng thời đảm bảo tính ổn định cho từng hệ con và toàn hệ thống.

2.1 Mô hình trạng thái tuyến tính xấp xỉ từng đoạn

Với giả thiết $\mathbf{f}^i, \mathbf{g}^i$ trơn ta có thể xấp xỉ tuyến tính chúng trên cơ sở phân tích chuỗi Taylor như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i) &\approx \mathbf{A}_k^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{B}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{E}_k^i \mathbf{d}_k^i + \mathbf{v}_k^i \\ \mathbf{g}^i(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i) &\approx \mathbf{C}_k^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{D}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{F}_k^i \mathbf{d}_k^i + \boldsymbol{\eta}_k^i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k^i &= \mathbf{x}_k^i - \mathbf{A}_k^i \mathbf{x}_{k-1}^i - \mathbf{B}_k^i \mathbf{u}_{k-1}^i - \mathbf{E}_k^i \mathbf{d}_{k-1}^i \\ \boldsymbol{\eta}_k^i &= \mathbf{y}_k^i - \mathbf{C}_k^i \mathbf{x}_{k-1}^i - \mathbf{D}_k^i \mathbf{u}_{k-1}^i - \mathbf{F}_k^i \mathbf{d}_{k-1}^i \end{aligned} \quad \text{Với}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k^i &= \left. \frac{\partial \mathbf{f}^i}{\partial \mathbf{x}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i}, \mathbf{B}_k^i = \left. \frac{\partial \mathbf{f}^i}{\partial \mathbf{u}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i} \\ \mathbf{C}_k^i &= \left. \frac{\partial \mathbf{g}^i}{\partial \mathbf{x}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i}, \mathbf{D}_k^i = \left. \frac{\partial \mathbf{g}^i}{\partial \mathbf{u}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i} \\ \mathbf{E}_k^i &= \left. \frac{\partial \mathbf{f}^i}{\partial \mathbf{d}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i}, \mathbf{F}_k^i = \left. \frac{\partial \mathbf{g}^i}{\partial \mathbf{d}^i} \right|_{\mathbf{x}_{k-1}^i, \mathbf{u}_{k-1}^i, \mathbf{d}_{k-1}^i} \end{aligned} \quad (3)$$

Do đó các hệ con phi tuyến ban đầu (1) có thể xấp xỉ trong $kT \leq t < (k+1)T$ bởi

$$\begin{cases} \widehat{\mathbf{x}}_{k+1}^i = \mathbf{A}_k^i \widehat{\mathbf{x}}_k^i + \mathbf{B}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{E}_k^i \mathbf{d}_k^i + \mathbf{v}_k^i \\ \mathbf{y}_k^i = \mathbf{C}_k^i \widehat{\mathbf{x}}_k^i + \mathbf{D}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{F}_k^i \mathbf{d}_k^i + \boldsymbol{\eta}_k^i \end{cases} \quad (4)$$

Sai lệch giữa mô hình phi tuyến ban đầu (1) và mô hình tuyến tính xấp xỉ từng đoạn (4) với cùng giá trị ban đầu $(\mathbf{x}_k^i, \mathbf{u}_k^i, \mathbf{d}_k^i)$ là

$$\mathbf{e}_k^i = \mathbf{x}_{k+1}^i - \widehat{\mathbf{x}}_{k+1}^i \quad (5)$$

trong đó \mathbf{e}_k^i phụ thuộc vào \mathbf{v}_k^i và hàm \mathbf{f}^i của (1).

Khi đó mô hình (1) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1}^i = \mathbf{A}_k^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{B}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{E}_k^i \mathbf{d}_k^i + \mathbf{e}_k^i \\ \mathbf{y}_k^i = \mathbf{C}_k^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{D}_k^i \mathbf{u}_k^i + \mathbf{F}_k^i \mathbf{d}_k^i \end{cases} \quad (6)$$

2.2 Thiết kế bộ điều khiển

Để tăng khả năng bám giá trị đặt của hệ ta thực hiện bổ sung thành phần tích phân vào hệ thống nhờ phép đổi biến sau:

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{\mathbf{x}}_k^i &= \widehat{\mathbf{x}}_k^i - \widehat{\mathbf{x}}_{k-1}^i, \Delta \mathbf{u}_k^i = \mathbf{u}_k^i - \mathbf{u}_{k-1}^i \\ \Delta \mathbf{d}_k^i &= \mathbf{d}_k^i - \mathbf{d}_{k-1}^i, \mathbf{z}_k^i = \text{col}(\Delta \widehat{\mathbf{x}}_k^i, \mathbf{y}_{k-1}^i) \end{aligned} \quad (7)$$

Giả thiết $\mathbf{A}_k^i, \mathbf{B}_k^i, \mathbf{C}_k^i, \mathbf{D}_k^i, \mathbf{F}_k^i, \mathbf{v}_k^i, \boldsymbol{\eta}_k^i$ không thay đổi trong suốt cửa sổ dự báo hiện tại, khi đó mô hình dự báo (4) trở thành

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{k+1}^i = \widehat{\mathbf{A}}_k^i \mathbf{z}_k^i + \widehat{\mathbf{B}}_k^i \Delta \mathbf{u}_k^i + \widehat{\mathbf{E}}_k^i \Delta \mathbf{d}_k^i \\ \mathbf{y}_k^i = \widehat{\mathbf{C}}_k^i \mathbf{z}_k^i + \widehat{\mathbf{D}}_k^i \Delta \mathbf{u}_k^i + \widehat{\mathbf{F}}_k^i \Delta \mathbf{d}_k^i \end{cases} \quad (8)$$

$$\widehat{\mathbf{A}}_k^i = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_k^i & \mathbf{0}_{n \times q} \\ \mathbf{C}_k^i & \mathbf{I}_{q \times q} \end{pmatrix}, \widehat{\mathbf{B}}_k^i = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_k^i \\ \mathbf{D}_k^i \end{pmatrix}, \widehat{\mathbf{E}}_k^i = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_k^i \\ \mathbf{F}_k^i \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\widehat{\mathbf{C}}_k^i = (\mathbf{C}_k^i, \mathbf{I}_{q \times q}), \widehat{\mathbf{D}}_k^i = \mathbf{D}_k^i, \widehat{\mathbf{F}}_k^i = \mathbf{F}_k^i$$

Tương tự [12], sử dụng mô hình (8) để tính toán các giá trị trạng thái tương lai \mathbf{z}_{k+j}^i và đầu ra dự báo \mathbf{y}_{k+j}^i với tầm dự báo N , sau đó biểu diễn các giá trị dự báo đầu ra dưới dạng ma trận ta có

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{G}_k^i \mathbf{z}_k^i + \mathbf{H}_k^i \Delta \mathbf{u}^i + \mathbf{K}_k^i \Delta \mathbf{d}^i \quad (10)$$

Với

$$\mathbf{y}^i = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_k^i \\ \mathbf{y}_{k+1}^i \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{k+N}^i \end{pmatrix}, \Delta \mathbf{u}^i = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{u}_k^i \\ \Delta \mathbf{u}_{k+1}^i \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}_{k+N}^i \end{pmatrix}, \Delta \mathbf{d}^i = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{d}_k^i \\ \Delta \mathbf{d}_{k+1}^i \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{d}_{k+N}^i \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{G}_k^i = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{C}}_k^i \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i \widehat{\mathbf{A}}_k^i \\ \vdots \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i (\widehat{\mathbf{A}}_k^i)^N \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k^i = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{D}}_k^i & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i \widehat{\mathbf{B}}_k^i & \widehat{\mathbf{D}}_k^i & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i (\widehat{\mathbf{A}}_k^i)^{N-1} \widehat{\mathbf{B}}_k^i & \widehat{\mathbf{C}}_k^i (\widehat{\mathbf{A}}_k^i)^{N-2} \widehat{\mathbf{B}}_k^i & \cdots & \widehat{\mathbf{D}}_k^i \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{K}_k^i = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{F}}_k^i & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i \widehat{\mathbf{E}}_k^i & \widehat{\mathbf{F}}_k^i & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{\mathbf{C}}_k^i (\widehat{\mathbf{A}}_k^i)^{N-1} \widehat{\mathbf{E}}_k^i & \widehat{\mathbf{C}}_k^i (\widehat{\mathbf{A}}_k^i)^{N-2} \widehat{\mathbf{E}}_k^i & \cdots & \widehat{\mathbf{F}}_k^i \end{pmatrix} \quad (12)$$

$\Delta \mathbf{d}^i$ là vector nhiễu dự báo có được nhờ các thông tin dự báo trạng thái, dự báo đầu ra hoặc quỹ đạo tín hiệu điều khiển tối ưu của các hệ con $j \neq i$ có tương tác với hệ i gửi tới. Còn trong trường hợp không sử dụng thông tin dự báo từ các hệ con khác để dự báo nhiễu thì có thể giả sử $\Delta \mathbf{d}_{k+N}^i = \Delta \mathbf{d}_{k+N-1}^i = \dots = \Delta \mathbf{d}_k^i$

Để đảm bảo các giá trị đầu ra của các hệ thống con \mathbf{y}_k^i bám theo giá trị đặt \mathbf{r}^i tương ứng ta sử dụng hàm mục tiêu dạng sau:

$$\mathbf{J}(\Delta \mathbf{u}^i) = \sum_{j=0}^N (\mathbf{r}^i - \mathbf{y}_{k+j}^i)^T \mathbf{Q}_k^i (\mathbf{r}^i - \mathbf{y}_{k+j}^i) + (\Delta \mathbf{u}_{k+j}^i)^T \mathbf{R}_k^i \Delta \mathbf{u}_{k+j}^i$$

với $\mathbf{Q}_k^i, \mathbf{R}_k^i$ là các ma trận đối xứng, xác định dương tùy ý, được chọn tùy theo điều kiện ràng buộc của $\Delta \mathbf{u}_{k+j}^i$. Từ nghiệm tối ưu $\Delta \mathbf{u}^{*i}$ thu được từ việc giải tối ưu hàm mục tiêu trên ta có thể tính giá trị điều khiển tối ưu của hệ ban đầu

$$\mathbf{u}_k^i = \mathbf{u}_{k-1}^i + \Delta \mathbf{u}_k^{*i} = \mathbf{u}_{k-1}^i + (\mathbf{I}_{m \times m}, 0, \dots, 0) \Delta \mathbf{u}^{*i} \quad (13)$$

Tín hiệu điều khiển này sẽ được sử dụng để điều khiển hệ con thứ i của hệ.

2.3. Thuật toán điều khiển

Từ quá trình tìm tín hiệu điều khiển tối ưu trên, thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung cho mô hình phi tuyến không liên tục được xây dựng như sau:

1. Tại $k=0$, chọn $\mathbf{u}_{-1}^i, \mathbf{x}_{-1}^i, N$ và các ma trận đối xứng xác định dương $\mathbf{Q}_k^i, \mathbf{R}_k^i$.
2. Các bộ điều khiển MPC^i tính $\widehat{\mathbf{A}}_k^i, \widehat{\mathbf{B}}_k^i, \widehat{\mathbf{C}}_k^i, \widehat{\mathbf{D}}_k^i, \widehat{\mathbf{E}}_k^i, \widehat{\mathbf{F}}_k^i$ theo (9) và (3). Tính $\mathbf{G}_k^i, \mathbf{H}_k^i, \mathbf{K}_k^i$ theo (12).
3. MPC^i nhận giá trị phản hồi trạng thái \mathbf{x}_k^i , phản hồi đầu ra \mathbf{y}_{k-1}^i để tính \mathbf{z}_k^i theo (7). Nhận các giá

trị dự báo từ các MPC^j khác ($j \neq i$) có tương tác tới hệ i để xác định $\Delta \mathbf{d}_k^i$ theo (11).

4. MPC^i xác định tín hiệu điều khiển \mathbf{u}_k^i theo (13).

Sử dụng \mathbf{u}_k^i để điều khiển hệ (1), đồng thời gửi các giá trị dự báo cần thiết, thu được qua quá trình giải bài toán tối ưu, cho các bộ MPC^j ($j \neq i$) mà hệ tương tác.

5. Gán $k := k+1$ và quay lại bước 2.

2.4. Tính ổn định của hệ DMPC

Như đã trình bày ở trên, thuật toán đề xuất thực hiện xấp xỉ liên tục mô hình phi tuyến (1) thành dãy các mô hình tuyến tính LTI (4) với sai lệch \mathbf{e}_k^i (5). Tại chu kỳ trích mẫu thứ k , ứng với mỗi mô hình xấp xỉ (4) ta có một bộ điều khiển dự báo $MPC_k^i := \mathbf{u}_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i)$. Giả sử bộ điều khiển này làm ổn định hệ (4) theo nghĩa ổn định ISS [3], thì câu hỏi đặt ra ở đây là các bộ điều khiển này có làm ổn định hệ (6) hay không. Giả sử bộ điều khiển $MPC_k^i := \mathbf{u}_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i)$ làm ổn định ISS hệ (4) theo nghĩa tồn tại hàm ISS-Lyapunov V_k^i và hàm $\varrho^i \in \mathcal{K}_\infty$, $\alpha_1^i, \alpha_2^i, \alpha_3^i \in \mathcal{K}$ thỏa mãn điều kiện sau $\forall \hat{\mathbf{x}}_k^i \in X^i$

$$\alpha_1^i(|\hat{\mathbf{x}}_k^i|) \leq V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i) \leq \alpha_2^i(|\hat{\mathbf{x}}_k^i|) \quad (14)$$

$$V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i) \leq -\alpha_3^i(|\hat{\mathbf{x}}_k^i|) + \varrho^i(|\mathbf{d}_k^i|) \quad (15)$$

Xét hàm

$$V^i(\mathbf{x}_k^i) = V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i) \quad \text{với } kT \leq t < (k+1)T \quad (16)$$

Tại $kT \leq t < (k+1)T$ thì $\hat{\mathbf{x}}_k^i = \mathbf{x}_k^i$ là giá trị trạng thái của hệ thống nên từ (16) và (14) ta cũng có

$$\alpha_1^i(|\mathbf{x}_k^i|) \leq V^i(\mathbf{x}_k^i) \leq \alpha_2^i(|\mathbf{x}_k^i|) \quad (17)$$

Hơn nữa từ (16) và (5) ta có

$$\begin{aligned} V^i(\mathbf{x}_{k+1}^i) - V^i(\mathbf{x}_k^i) &= V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i + \mathbf{e}_k^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i) \\ &= V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i + \mathbf{e}_k^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i) + V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_k^i) \end{aligned} \quad (18)$$

Giả thiết $V_k^i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ là hàm Lipschitz thì tồn tại $L_1 > 0$ sao cho

$$\begin{aligned} &V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i + \mathbf{e}_k^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i) \\ &\leq |V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i + \mathbf{e}_k^i) - V_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^i)| \leq L_1 |\mathbf{e}_k^i| \end{aligned} \quad (19)$$

Thay (15) và (19) vào (18) ta có

$$V^i(\mathbf{x}_{k+1}^i) - V^i(\mathbf{x}_k^i) \leq -\alpha_3^i(|\mathbf{x}_k^i|) + \varrho^i(|\mathbf{d}_k^i|) + L_1 |\mathbf{e}_k^i| \quad (20)$$

Do $L_1 > 0$ nên $L_1 |\mathbf{e}_k^i|$ cũng là một hàm thuộc lớp \mathcal{K}_∞ và \mathbf{e}_k^i đóng vai trò như là thành phần nhiễu của hệ (6) nên với giả thiết nhiễu \mathbf{e}_k^i bị chặn, thì từ (17) và (20) ta có $V^i(\mathbf{x}_k^i)$ chính là hàm ISS-Lyapunov của hệ (6) hay tính ổn định ISS của các hệ con được bảo đảm.

Để xét tính ổn định ISS của hệ tổng thể (2) ta xét hàm

$$V(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^M V^i(\mathbf{x}_k^i) \quad (21)$$

Từ (17) và do tổng các hàm thuộc lớp \mathcal{K} cũng là một hàm thuộc lớp \mathcal{K} nên

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

Xét $\alpha_1 = \min\{\alpha_1^1, \alpha_1^2, \dots, \alpha_1^M\} \in \mathcal{K}$, tồn tại $c > 0$ để

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}_k) &\geq \sum_{i=1}^M \alpha_1^i(|\mathbf{x}_k^i|) \geq \sum_{i=1}^M \alpha_1^i(|\mathbf{x}_k|) \\ &\geq \alpha_1 \left(\frac{\sum_{i=1}^M |\mathbf{x}_k^i|}{c} \right) \geq \alpha_1 \left(\frac{|\mathbf{x}_k|}{c} \right) \triangleq \alpha_1(|\mathbf{x}_k|) \end{aligned}$$

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

$$\alpha_1(|\mathbf{x}_k|) \leq V(\mathbf{x}_k) \leq \alpha_2(|\mathbf{x}_k|) \quad (22)$$

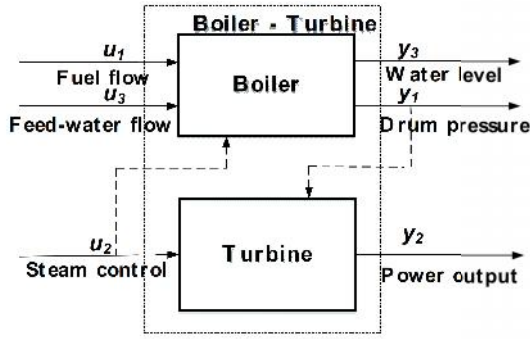
Từ (20) và (21) ta có

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}_{k+1}) - V(\mathbf{x}_k) &= \sum_{i=1}^M V^i(\mathbf{x}_{k+1}^i) - V^i(\mathbf{x}_k^i) \\ &\leq \sum_{i=1}^M -\alpha_3^i(|\mathbf{x}_k^i|) + \varrho^i(|\mathbf{d}_k^i|) + \varrho^i(|\mathbf{e}_k^i|) \end{aligned} \quad (23)$$

Từ (22) và (23) ta có hệ tổng thể (2) ổn định ISS với hàm ISS-Lyapunov (21).

3. Điều khiển dự báo phi tập trung hệ nôi hơi – tuabin

Nôi hơi-tuabin là một khâu rất quan trọng trong các nhà máy nhiệt điện, gồm nôi hơi để tạo hơi quá nhiệt và tuabin để phát điện theo yêu cầu của lưới điện. Một mô hình hệ nôi hơi-tuabin phi tuyến bậc 3 đơn giản được miêu tả ở tài liệu [13] với các biến quá trình như ở Hình 1.



Hình 1. Các biến quá trình của mô hình nồi hơi-tuabin [14]

3.1 Mô hình nồi hơi và mô hình tuabin

Có thể thấy, mô hình nồi hơi – tuabin là một hệ đa biến gồm 2 quá trình con có tương tác với nhau là nồi hơi và tuabin. Biến đầu vào u_2 của tuabin đóng vai trò là nhiễu tương tác của nồi hơi và biến đầu ra (cũng là biến trạng thái) của nồi hơi y_1 đóng vai trò là nhiễu tương tác của tuabin. Dựa trên phương trình và thông số của nồi hơi – tuabin [13] ta có thể viết lại mô hình nồi hơi như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{x}^1, \mathbf{u}^1, d^1) \\ \mathbf{y}^1 = \mathbf{g}^1(\mathbf{x}^1, \mathbf{u}^1, d^1) \end{cases} \quad (24)$$

Với

$$\mathbf{f}^1 = \begin{pmatrix} -0.0018d^1(x_1^1)^{9/8} + 0.1u_1^1 - 0.015u_2^1 \\ \frac{141u_2^1 - (1.1d^1 - 0.19)x_1^1}{85} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g}^1 = \begin{pmatrix} x_1^1 \\ 0.05(0.13073x_2^1 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \end{pmatrix}$$

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

Để thu được mô hình nồi hơi phi tuyến không liên tục ta tiến hành rời rạc hóa (24) với chi kỳ trích mẫu T :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}^1 &= \mathbf{x}_k^1 + T\mathbf{f}^1(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{u}_k^1, d_k^1) \triangleq \mathbf{f}^1(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{u}_k^1, d_k^1) \\ \mathbf{y}_k^1 &= \mathbf{g}^1(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{u}_k^1, d_k^1) \triangleq \mathbf{g}^1(\mathbf{x}_k^1, \mathbf{u}_k^1, d_k^1) \end{aligned} \quad (25)$$

Tương tự mô hình tuabin có dạng

$$\begin{aligned} \dot{x}^2 &= f'^2(x^2, u^2, d^2) \\ y^2 &= g'^2(x^2, u^2) \end{aligned} \quad (26)$$

với $f'^2(x^2, u^2, d^2) = (0.73u^2 - 0.016)(d^2)^{9/8} - 0.1x^2$

$$\begin{aligned} g'^2(x^2, u^2) &= x^2 \\ x^2 &\approx x_2, u^2 = u_2, y^2 = y_2, d^2 = x_1 \end{aligned}$$

Mô hình tuabin sau khi gián đoạn hóa

$$\begin{aligned} x_{k+1}^2 &= x_k^2 + Tf'^2(x_k^2, u_k^2, d_k^2) \triangleq f^2(x_k^2, u_k^2, d_k^2) \\ y_k^2 &= g'^2 \triangleq g^2(x_k^2, u_k^2) \end{aligned} \quad (27)$$

3.2 Kết quả mô phỏng

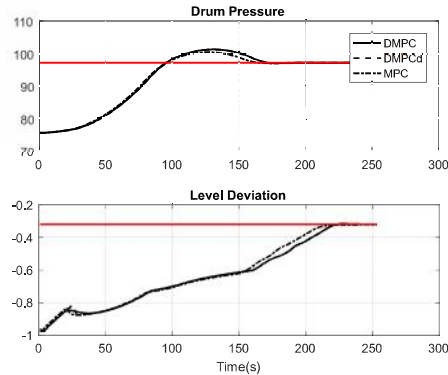
Áp dụng thuật toán đề xuất vào điều khiển phi tập trung hệ nồi hơi (25) và tuabin (27) với tham số giống tài liệu [12]: $N = 20, T = 1[s]$,

$$\mathbf{Q}_k^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_k^2 = 1, \mathbf{R}_k^1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_k^2 = 80$$

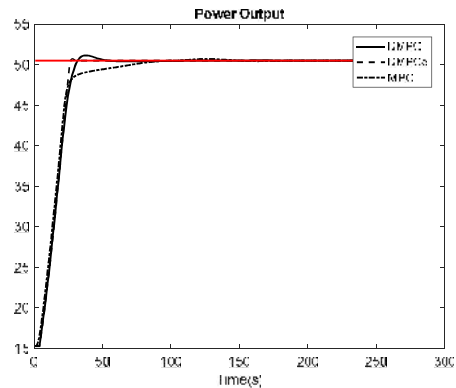
và các điều kiện ràng buộc cho các biến điều khiển:

$$\begin{aligned} (0,0)^T &\leq \mathbf{u}_k^1 \leq (1,1)^T, 0 \leq u_k^2 \leq 1, -2 \leq \Delta u_k^2 \leq 0.02 \\ (-0.007, -0.005)^T &\leq \Delta \mathbf{u}_k^1 \leq (-0.007, -0.005)^T \end{aligned}$$

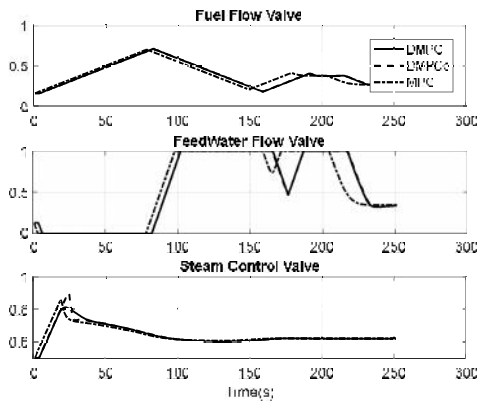
và giá trị đặt $\mathbf{r}^1 = (97.2, -0.32)^T, r^2 = 50.52$



Hình 2. Đáp ứng đầu ra của nồi hơi



Hình 3. Đáp ứng đầu ra của tuabin



Hình 4. Tín hiệu điều khiển hệ nồi hơi và tuabin (DMPC: đường nét liền, DMPCd: đường gạch đứt, MPC: đường chấm gạch)

trong trường hợp có dự báo nhiễu (DMPCd) và không dự báo nhiễu (DMPC), đồng thời so sánh với trường hợp áp dụng thuật toán điều khiển dự báo tập trung (MPC) [12] ta thu được các kết quả trình bày trên các Hình 2 đến Hình 4. Kết quả cho thấy không có sự khác biệt lớn về chất lượng điều khiển, mặc dù về đáp ứng đầu ra công suất của turbin thì phương pháp điều khiển dự báo tập trung có độ quá điều chỉnh nhỏ hơn nhưng xác lập chậm hơn phương pháp điều khiển dự báo phi tập trung. Đáp ứng đầu ra công suất cũng cho thấy phương pháp điều khiển dự báo phi tập trung đề xuất, có sử dụng thông tin từ các bộ điều khiển khác để dự báo nhiễu (DMPCd), cho đáp ứng nhanh hơn và độ quá điều chỉnh nhỏ hơn trường hợp không dự báo nhiễu (DMPC).

4. Kết luận

Một thuật toán điều khiển dự báo phi tập trung hệ phi tuyến gồm các quá trình con, mà tương tác trạng thái và tương tác vào/ra giữa chúng được xem là nhiễu đo được, được đề xuất ở bài báo này. Bộ điều khiển này gồm nhiều bộ điều khiển dự báo được thiết kế cho mỗi hệ con, đồng thời giữa các bộ điều khiển này có trao đổi thông tin dự báo với nhau. Tính ổn định ISS của các hệ con và toàn hệ được đảm bảo nếu bộ điều khiển dự báo làm ổn định ISS hệ tuyến tính dùng LTI xấp xỉ từng đoạn theo nghĩa tồn tại hàm ISS-Lyapunov thỏa mãn tính Lipschitz. Kết quả mô phỏng khi áp dụng thuật toán vào điều khiển hệ nồi hơi – tuabin, cũng như khi so sánh với trường hợp sử dụng bộ điều khiển dự báo phi tập trung không dự báo nhiễu và điều khiển tập trung, cho thấy tính khả thi của thuật toán.

Tài liệu tham khảo

[1] Camacho E. F. & Bordons C., *Model predictive control in the process industry*, Springer Science & Business Media, (2012).

[2] Grne L. & Pannek J., *Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms*, Springer, (2013).

[3] Rawlings J. B. & Mayne D. Q., *Model predictive control: Theory and design*, Nob Hill Pub., (2015).

[4] Alessio A. & Bemporad A.; Stability conditions for decentralized model predictive control under packet drop communication; *American Control Conference, 2008*; IEEE(2008); pp. 3577-3582.

[5] Christofides P. D., et al., *Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions*. *Computers & Chemical Engineering* 51, (2013), pp. 21-41.

[6] Richards A. & How J.; Decentralized model predictive control of cooperating UAVs; *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*; IEEE(2004); pp. 4286-4291.

[7] Kayacan E. ; Peschel J. M. & Kayacan E.; Centralized, decentralized and distributed nonlinear model predictive control of a tractor-trailer system: A comparative study; *American Control Conference (ACC), 2016*; IEEE(2016); pp. 4403-4408.

[8] Farina M. ; Giulioni L. & Scattolini R.; Distributed Predictive Control of stochastic linear systems with chance constraints; *American Control Conference (ACC), 2016*; IEEE(2016); pp. 20-25.

[9] Phạm Văn Hùng ; Cao Thành Trung & Hoàng Minh Sơn, *Điều khiển dự báo phi tập trung dựa trên mô hình tuyến tính quá trình phản ứng/tách*. *Tạp chí KHCN các trường đại học*, 110(2016), pp. 7-11.

[10] Raimondo D. ; Magni L. & Scattolini R., *Decentralized MPC of nonlinear systems: An input-to-state stability approach*. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 17, 17(2007), pp. 1651-1667.

[11] Naghavi S. V. ; Safavi A. & Kazerooni M., *Decentralized fault tolerant model predictive control of discrete-time interconnected nonlinear systems*. *Journal of the Franklin Institute* 351, 3(2014), pp. 1644-1656.

[12] Phạm Văn Hùng ; Nguyễn Đức Anh & Vũ Tiến Thành, *Điều khiển bền vững hệ lò hơi - tuabin phi tuyến nhờ bộ điều khiển phản hồi trạng thái với mô hình dự báo tuyến tính và bộ quan sát UKF*. *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự*, 44(2016), pp. 33-43.

[13] Åström K. J. & Bell R., *Dynamic models for boiler-turbine alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit*, Technical Reports(1987).

[14] Balko P. & Rosinová D., *Nonlinear Boiler-Turbine Unit: Modelling and Robust Decentralized Control*. *IFAC-PapersOnLine* 49, 4(2016), pp. 49-54.