

Điều khiển công suất nhà máy nhiệt điện đốt than theo cấu trúc điều khiển phối hợp lò hơi-tuabin

Control the capacity of coal-fired thermal power plants based on the boiler-turbine coordinated structure

Phạm Thị Lý^{1,2}, Bùi Quốc Khánh¹, Phạm Văn Long¹, Trần Hải Long¹
¹ĐH Bách khoa Hà Nội, ²ĐH Giao thông vận tải
 Email: ptlydk@utc.edu.vn

Abstract

The paper focuses on designing and controlling the capacity of coal-fired thermal power plant according to the Coordinated Control structure. The goal of that structure is to build a control system that can follow the set point and save fuel. The solution suggested in the paper is that the fuel flow control system should have a setpoint of the total required heat with the fuel characteristic element. This system is combined with steam pressure control loop to regulate noises of process that occurs in the boiler. The power control loop gives a signal to control steam valve of the generator turbine cluster, which is designed to have a static non-linear feedforward to compensate the pressure. The results in comparison with the other two control structures show that the designed coordinated control system is more advantageous: higher quality, better in following the setpoint, and lower fuel consumption.

Keywords

Turbine following control, boiler following control, coordinated control, steam power, thermal power plant

Tóm tắt¹

Bài báo đề cập đến một phương pháp thiết kế điều khiển công suất nhà máy nhiệt điện đốt than theo cấu trúc điều khiển phối hợp với mục tiêu hệ bám lượng đặt và tiết kiệm nhiên liệu. Mục tiêu của cấu trúc như sau: Điều khiển lưu lượng nhiên liệu có lượng đặt là tổng nhiệt lượng yêu cầu có tính đến yếu tố đặc tính nhiên liệu và kết hợp với mạch vòng điều khiển áp suất hơi để hiệu chỉnh các nhiễu của các quá trình xảy ra trong lò. Việc điều khiển công suất phát ở cụm tuabin-máy phát được thiết kế có mạch bù áp suất dùng điều khiển Feedforward phi tuyến tính. Kết quả thu được đem đi so sánh, kiểm chứng với hai cấu trúc điều khiển đơn biến. Kết quả này cho thấy, hệ điều khiển phối hợp được thiết kế có ưu điểm hơn về chỉ tiêu chất lượng bám lượng đặt và tiêu thụ ít nhiên liệu hơn so với hai cấu trúc điều khiển đơn biến mang đi so sánh. Hệ thiết kế có cấu trúc đơn giản, dễ vận hành, chỉnh định.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
N^*, N_e	MW	Công suất đặt và thực
W_f^*, W_f	Kg/s	Lưu lượng liệu đặt, lưu lượng liệu thực, lưu lượng hơi
W_h		
V_f, V_h		Van cấp liệu, Van tuabin
μ_f, μ_h	%	Độ mở van cấp liệu, độ mở van tuabin
P_h, P_h^*	Mpa	Áp suất hơi thực, áp suất hơi đặt
G_{CN}, G_{CWf}, G_{CP}		Bộ điều khiển công suất, bộ điều khiển cấp liệu, bộ điều khiển, bộ điều khiển áp suất
$u_N, u_{\Delta P}$		Tín hiệu ra của bộ điều khiển công suất, tín hiệu bù áp suất

Chữ viết tắt

SIMC-PID Skogestad-Internal Model Control - Proportional Integral Derivative

1. Đặt vấn đề

Việc điều khiển công suất phát trong nhà máy nhiệt điện gồm hai phần gắn kết với nhau: Điều khiển công suất hơi và điều khiển công suất điện. Việc điều khiển công suất hơi trong hệ điều khiển lò hơi có các đại

¹ Ngày nhận bài: 12/03/2019; Ngày nhận bản sửa: 15/05/2019; Ngày chấp nhận: 20/05/2019; Phân biên: Phạm Hoàng Lương, Nguyễn Như Hiền.

lượng đầu vào là lưu lượng nhiên liệu, lưu lượng không khí, lưu lượng nước và đầu ra là công suất hơi gồm ba tham số: Áp suất hơi, nhiệt độ hơi, lưu lượng hơi. Điều khiển công suất điện là hệ điều khiển tổ hợp Tuabin – Máy phát, có đại lượng đầu vào là lưu lượng hơi và đại lượng đầu ra là công suất điện (MW). Như vậy hệ điều khiển công suất phát điện trong nhà máy nhiệt điện là hệ đa thông số, đa đối tượng (lò hơi và tuabin – máy phát) và chỉ có một đại lượng đầu ra là công suất phát (MW). Điều khiển công suất phát điện có ba cấu trúc điều khiển, trong đó có hai cấu trúc điều khiển đơn biến là: Điều khiển theo tuabin (Turbine Following Control) và điều khiển theo lò hơi (Boiler Following Control); Điều khiển phối hợp lò hơi - tuabin (Coordinated Control) là cấu trúc điều khiển đa biến. Cấu trúc điều khiển phối hợp có nhiều ưu điểm so với cấu trúc điều khiển theo lò hơi và theo tuabin [1][2][3][4].

Do tính chất phức tạp của hệ lò hơi- Tuabin- Máy phát, nên việc điều khiển công suất điện phát vào lưới vẫn còn nhiều vấn đề cần nghiên cứu và hoàn thiện, đặc biệt là vấn đề điều khiển phối hợp theo mục tiêu tiết kiệm nhiên liệu.

Nội dung bài báo này sẽ đi nghiên cứu hệ điều khiển công suất với cấu trúc điều khiển phối hợp theo một cấu trúc mới, dễ cài đặt, vận hành và có hiệu quả về tiết kiệm nhiên liệu. Nội dung bài báo được trình bày có ba phần:

- Phân tích ba cấu trúc điều khiển.
- Tổng hợp hệ điều khiển phối hợp
- Mô hình hóa mô phỏng và đánh giá chất lượng.

Mô hình điều khiển của lò hơi và tuabin- máy phát dựa trên mô hình điều khiển phụ tải nhiệt, tác giả đã nghiên cứu trong [10], số liệu nghiên cứu theo thực tế nhà máy [4].

2. Nội dung

2.1 Phân tích điều khiển công suất phát theo ba cấu trúc điều khiển

a) Điều khiển công suất phát theo lò hơi (Boiler Following Control)

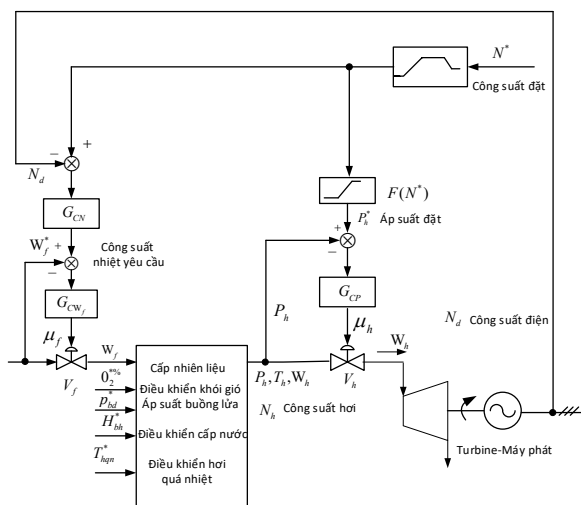
Trên H.1 là cấu trúc điều khiển theo lò hơi, trong đó hệ điều khiển công suất gồm hai bộ điều khiển kế tiếp nhau theo cấu trúc: Bộ điều khiển công suất được thiết lập điều khiển lò hơi và bộ điều khiển áp suất được bố trí điều khiển tại cụm tuabin-máy phát.

Trong đó:

- *Điều khiển công suất lò hơi:* Lượng đặt cho hệ là công suất phát $N^*(MW)$ qua khâu Ramp (MW/phút), đại lượng cần điều khiển là công suất điện N_e và bộ điều khiển công suất G_{CN} . Đại lượng tác động lên đối tượng lò hơi là lưu lượng nhiên

liệu W_f^* tương ứng với công suất nhiệt yêu cầu. Để ổn định lưu lượng nhiên liệu người ta bố trí mạch vòng điều khiển lưu lượng nhiên liệu với bộ điều khiển là G_{CWf} , cơ cấu chấp hành là van điều khiển liệu V_f , tín hiệu điều khiển là góc mở van cấp liệu μ_f . Điều khiển lò hơi, ngoài mạch vòng lưu lượng nhiên liệu, còn có bốn bộ điều khiển của lò hơi: Điều khiển mức nước bao hơi, điều khiển khói, gió và nhiệt độ hơi quá nhiệt. Đại lượng đầu ra của bộ điều khiển công suất lò hơi là công suất hơi N_h .

- *Điều khiển cụm tuabin - máy phát:* Đại lượng đầu vào là công suất hơi (nhiệt năng), đại lượng đầu ra là công suất điện (biến đổi nhiệt năng thành cơ năng- điện năng). Công suất hơi được tính thông qua áp suất hơi và lưu lượng hơi ($N_h=P_h.W_h$). Trong hệ này, đại lượng đặt là áp suất hơi, đại lượng tác động là lưu lượng hơi và thiết lập bộ điều khiển áp suất G_{CP} , cơ cấu chấp hành là van điều khiển V_h , tín hiệu điều khiển là góc mở van tuabin μ_h , đại lượng đầu ra của hệ là công suất điện N_d . Áp suất hơi đặt được xác định theo quan hệ với công suất phát $P_h^*=F(N^*)$ được gọi là đường áp suất trượt [2].



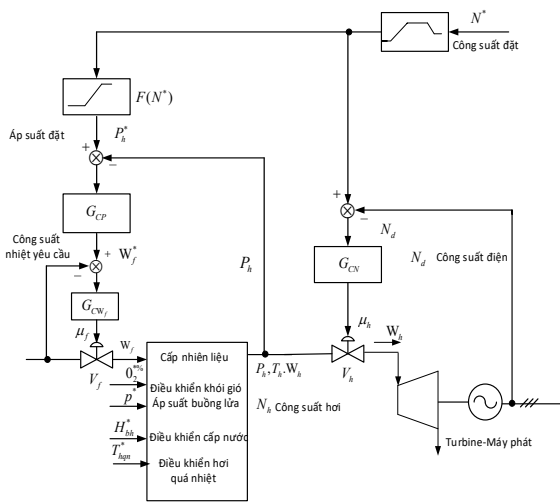
H.1 Cấu trúc điều khiển công suất theo lò hơi

Hệ điều khiển công suất phát theo lò hơi hoạt động như sau: Hệ đang làm việc tại điểm cân bằng, giả thiết ta tăng công suất đặt, bộ điều khiển công suất sẽ tác động tăng lượng nhiên liệu cấp cho lò dẫn đến công suất hơi tăng. Phía điều khiển tuabin, lượng đặt áp suất hơi được tăng theo công suất đặt, nên tín hiệu ra của bộ điều khiển áp suất G_{CP} tăng làm lưu lượng hơi tăng tác động vào tuabin tăng công suất phát. Tuy nhiên do quán tính lò lớn, nên áp suất hơi sẽ tăng chậm, tác động hạn chế lưu lượng hơi vào tuabin. Do lưu lượng hơi phụ thuộc vào góc điều khiển μ_h và áp

suất hơi đầu vào tuabin. Hiện tượng này là tác động xen kênh giữa hai hệ điều khiển tuabin và lò hơi. Nó sẽ gây ra dao động giai đoạn đầu khi tăng giảm công suất hoặc có nhiều tác động.

b) Điều khiển công suất phát theo tuabin (Turbine Following Control)

Trên H.2 là cấu trúc điều khiển theo tuabin, trong đó hệ điều khiển công suất gồm hai bộ điều khiển kế tiếp nhau với cấu trúc: Bộ điều khiển công suất được thiết lập điều khiển tại cụm tuabin-máy phát; Bộ điều khiển áp suất G_{CP} được bố trí điều khiển lò hơi. Bộ điều khiển công suất G_{CN} tác động vào van V_h , điều khiển lưu lượng hơi vào tuabin để điều khiển công suất điện N_e .



H. 2 Cấu trúc điều khiển công suất theo tuabin

• *Điều khiển lò hơi*

Áp suất hơi tại đầu ra bao hơi, liên quan trực tiếp tới nhiệt độ hơi. Nếu đảm bảo cân bằng giữa nước cấp và hơi, đảm bảo quá trình cháy của nhiên liệu là tốt thì đại lượng áp suất hơi sẽ tỷ lệ với lưu lượng nhiên liệu cấp cho lò. Do đó, người ta thiết kế bộ điều khiển áp suất G_{CP} ở phía lò hơi để điều khiển lưu lượng nhiên liệu.

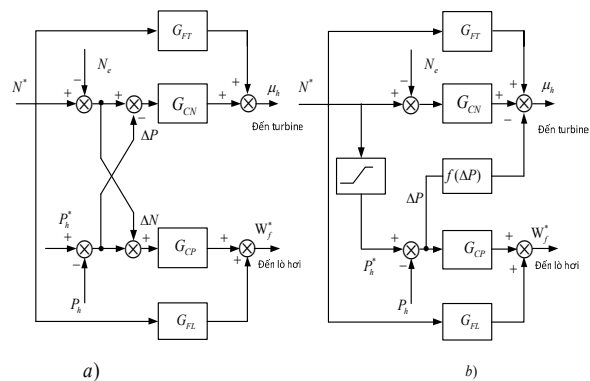
Hoạt động của hệ điều khiển như sau: Hệ đang làm việc tại điểm cân bằng, giả thiết tăng công suất đặt, tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển công suất G_{CN} tác động lên van điều khiển V_h , lưu lượng hơi vào tuabin tăng, công suất phát tăng. Về phía điều khiển lò hơi, khi tăng công suất đặt, áp suất đặt tăng theo bộ điều khiển áp suất G_{CP} , tác động làm tăng lượng nhiên liệu cấp cho lò để tăng công suất hơi. Tuy nhiên, do quán tính lò lớn nên công suất hơi tăng chậm hơn so với yêu cầu công suất ra của tuabin, vì vậy khi lưu lượng hơi vào tuabin tăng dẫn đến áp suất hơi giảm, tác động ngược lại làm giảm lưu lượng hơi vào

tuabin. Hiện tượng này là tác động xen kênh giữa hai hệ điều khiển lò hơi và tuabin. Nó gây ra dao động giai đoạn đầu khi tăng, giảm công suất hoặc có nhiều tác động.

c) Điều khiển công suất theo cấu trúc phối hợp (Coordinated Control)

Xuất phát từ điều khiển công suất gồm hai hệ điều khiển cho hai đối tượng là lò hơi và tuabin, có chung đại lượng đầu vào là công suất đặt (nhiên liệu, không khí, nước) và một đại lượng đầu ra là công suất điện. Hai hệ này lại tác động xen kênh thông qua biến áp suất và lưu lượng. Vì vậy người ta thiết lập điều khiển công suất theo cấu trúc đa biến và gọi là điều khiển phối hợp - Coordinated Control.

Về lý thuyết, ta có sơ đồ nguyên lý điều khiển phối hợp trên H.3a [5], trong đó bộ điều khiển công suất G_{CN} đặt ở điều khiển tuabin, kết hợp với feedforward lượng đặt (đảm bảo công suất bám lượng đặt) và có bù xen kênh của biến thiên áp suất ΔP ; Đối với hệ điều khiển lò hơi có bộ điều khiển G_{CP} kết hợp với feedforward công suất đặt (đảm bảo công suất hơi bám lượng đặt) và bù xen kênh của biến thiên áp suất ΔN . Cấu trúc này phức tạp, nên ít được triển khai ứng dụng vào thực tiễn. Thực tế các nhà máy nhiệt điện nước ta thường sử dụng cấu trúc có nguyên lý trên H.3b [2][3]: Trong đó, bộ điều khiển công suất G_{CN} đặt ở điều khiển tuabin, kết hợp với feedforward lượng đặt (đảm bảo công suất bám lượng đặt) và có bù xen kênh của biến thiên áp suất ΔP ở đầu ra. Đối với hệ điều khiển lò hơi có bộ điều khiển G_{CP} kết hợp với feedforward công suất đặt (đảm bảo công suất hơi bám lượng đặt). Hiện nay, có nhiều công trình nghiên cứu về điều khiển phối hợp [6][7][8][9], trong đó cấu trúc hợp lý đơn giản để triển khai [9] với đề xuất ý tưởng về cấu trúc điều khiển với một lượng đặt công suất phát N^* cho cả hai hệ và có điều khiển feedforward áp suất là hàm phi tuyến $g(\Delta P)$ để bù tác động xen kênh giữa lò hơi và tuabin.



H. 3 Điều khiển công suất theo cấu trúc phối hợp

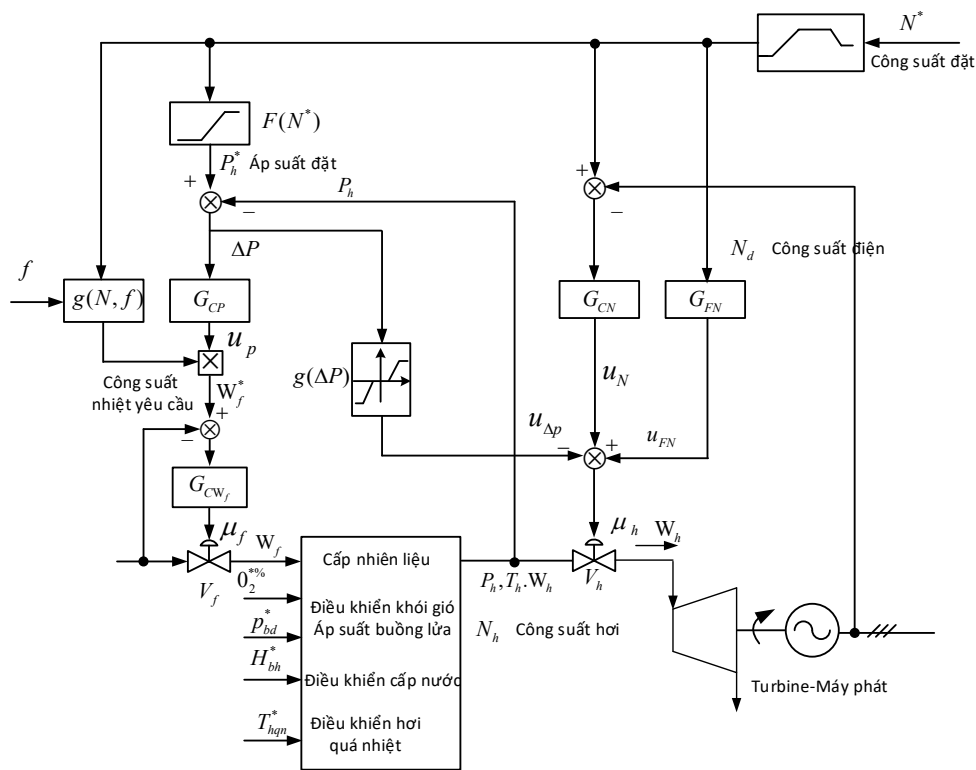
Trong nội dung bài báo này nhóm tác giả đề xuất một cấu trúc điều khiển mới, được phát triển dựa trên ý tưởng của [9], được trình bày trên H.4. Điều khiển phối hợp H.4 khác biệt so với các cấu trúc điều khiển phối hợp khác [5],[6],[7], [8], [9] là lượng đặt công suất phát sẽ tác động cả vào hai hệ điều khiển: điều khiển lò hơi và điều khiển tuabin. Điều này được lý giải như sau: Lượng đặt công suất phát tác động điều khiển lò hơi để có được đầu ra là công suất hơi và tác động điều khiển tuabin để có được công suất điện. Với cấu trúc điều khiển như vậy thỏa mãn tính chất của hệ là có chung một lượng đặt và một đại lượng cần điều khiển. Bộ điều khiển áp suất đóng vai trò hiệu chỉnh điều khiển nhiên liệu cấp cho lò và ổn định áp suất hơi chính.

• Điều khiển lò hơi

Như mục 2.1.a đã trình bày điều khiển lò hơi có đại lượng đầu vào là lưu lượng nhiên liệu, kết hợp với bốn bộ điều khiển của lò hơi (điều khiển mức nước bao hơi, điều khiển khói, gió và nhiệt độ hơi quá nhiệt), đại lượng đầu ra là công suất hơi có hai biến lưu lượng hơi và áp suất hơi. Lưu lượng hơi là đại lượng tác động cho hệ điều khiển tuabin, như vậy áp suất hơi là đại lượng phản ánh sự cân bằng giữa công suất hơi cấp cho tuabin và tổng nhiệt yêu cầu (tức là lưu lượng nhiên liệu) cấp cho lò W_f . Cấu trúc điều

khiển công suất hơi H.4 có lượng đặt là công suất phát N^* , tín hiệu tỷ lệ với tổng lượng nhiệt yêu cầu nhân với tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển áp suất $W_f^* = g(N, f) \cdot u_p$, trong đó: u_p là tín hiệu lấy từ đầu ra của bộ điều khiển áp suất; $g(N, f)$ là quan hệ giữa lượng nhiên liệu yêu cầu theo công suất đặt. Điều này được lý giải như sau:

- Tín hiệu tỷ lệ với công suất đặt N^* tức là tổng lượng nhiệt yêu cầu đảm bảo cân bằng công suất hơi và công suất nhiên liệu cấp cho lò hơi $g(N, f) = k \cdot N^*$
- Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển áp suất u_p có vai trò hiệu chỉnh lượng nhiên liệu theo nhiều tác động lên lò hơi, vì công suất hơi của lò phụ thuộc vào nhiều yếu tố: Đặc tính nhiên liệu; Điều khiển khói gió (quá trình cháy); Điều khiển cấp nước (cân bằng lưu lượng nước cấp với lưu lượng hơi tiêu thụ); Điều khiển hơi quá nhiệt (chất lượng hơi). Những yếu tố này không đảm bảo sẽ gây ra dao động áp suất, ví dụ quá trình cháy không tốt, thì lượng nhiên liệu đưa vào lò sẽ không đảm bảo công suất hơi theo yêu cầu, dẫn đến áp suất hơi giảm, tín hiệu u_p sẽ tăng tác động tăng nhiên liệu vào lò để ổn định áp suất hơi và đảm bảo cân bằng công suất.



H. 4 Cấu trúc điều khiển công suất với cấu trúc phối hợp

Xét $g(N,f)$ là quan hệ giữa lượng nhiên liệu yêu cầu theo công suất đặt. Quan hệ $g(N,f)$ được xây dựng khi thiết kế lò và căn cứ vào đặc tính của than sẽ cấp cho lò, theo phương trình cân bằng công suất nhiên liệu- công suất hơi và được đưa vào bảng tra để vận hành [2]. Trong cấu trúc điều khiển H.4 quan hệ $g(N,f)$ sẽ được tham gia trực tiếp vào hệ điều khiển, nó sẽ được cập nhật đặc tính than sau chu kỳ lấy mẫu thí nghiệm. Vì vậy $g(N,f)$ có hai đầu vào: Đầu vào thứ nhất là công suất đặt tương ứng với tổng lượng nhiệt yêu cầu của lò theo đặc tính cơ bản, lượng vào thứ hai là tùy theo đặc tính của than để hiệu chỉnh tổng nhiệt lượng yêu cầu.

• *Điều khiển tuabin:*

Trong cấu trúc điều khiển phối hợp có bộ điều khiển công suất G_{CN} kết hợp với feedforward lượng đặt G_{FN} (đảm bảo công suất bám lượng đặt), đồng thời thiết kế mạch bù feedforward phi tuyến tính $g(\Delta P)$ (H.6a) để bù tác động xen kênh của áp suất hơi lên điều khiển tuabin nhằm đảm bảo phát công suất đồng bộ với công suất lò hơi, giảm dao động công suất khi thay đổi công suất phát. Với tín hiệu bù $\mp u_{\Delta P}$ (dấu trừ - khi tăng tải và dấu + khi giảm tải), Ví dụ xét trong trường hợp tăng tải: Công suất hơi còn chưa phát huy đủ nên áp suất hơi chưa tăng, ΔP lớn sẽ tham gia hạn chế tín hiệu mở van cho đến khi áp suất tăng đủ sao cho $|\Delta P| \leq \delta$, trong đó δ là vùng chết lúc đó áp suất được xem là ổn định.

2.2 Tổng hợp các bộ điều khiển trong cấu trúc điều khiển phối hợp (Coordinated Control)

Trong bài báo này, ta dựa trên mô hình phụ tải nhiệt [10] và số liệu của nhà máy [4] để tổng hợp các bộ điều khiển trong hệ điều khiển trên H.4. Giả thiết: Tồn thất công suất trong lò giữ tỷ lệ không đổi, quá trình cháy được hệ điều khiển khói gió đảm bảo, quá trình cấp nước đảm bảo cân bằng hơi và nước, điều khiển hơi quá nhiệt ổn định.

Bài toán tổng hợp điều khiển công suất, cần giải quyết hai vấn đề: Tổng hợp hệ điều khiển công suất hơi ở phần lò hơi và tổng hợp hệ điều khiển công suất phát ở phần tuabin-máy phát. Trong đó, việc điều khiển công suất hơi ở phần lò hơi gồm có bốn mạch vòng điều khiển : Điều khiển áp suất buồng đốt, nồng độ ô xy dư, điều khiển mức nước bao hơi, điều khiển hơi quá nhiệt là một thành phần trong điều khiển công suất hơi. Các mạch vòng này đã được xây dựng trong [10], cụ thể như sau:

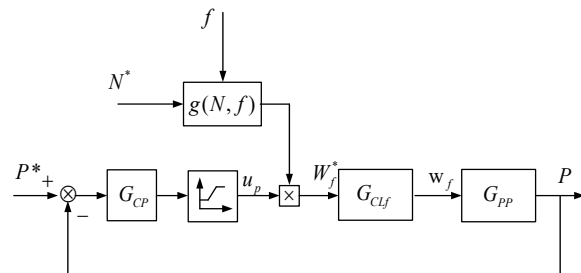
- Mạch vòng mức nước bao hơi đảm bảo cấp nước cân bằng với lưu lượng hơi. Hệ có hai mạch vòng nối cấp (mạch vòng ngoài điều khiển mức, mạch

vòng trong điều khiển lưu lượng nước cấp) và feedforward bù nhiễu lưu lượng hơi.

- Điều khiển gió đảm bảo cấp ô xy cho quá trình cháy và phân bố áp suất buồng lò, gồm hai mạch vòng: Mạch vòng điều khiển nồng độ ô xy dư kết hợp với feedforward bù nhiễu lưu lượng nhiên liệu. Mạch vòng điều khiển áp suất buồng đốt kết hợp với mạch feedforward bù nhiễu gió hai.
- Điều khiển hơi quá nhiệt thực tế gồm ba bộ quá nhiệt. Trong [10] được quy đổi khi nghiên cứu điều khiển phụ tải nhiệt thành một hệ gồm hai mạch vòng nối tầng (mạch vòng ngoài điều khiển nhiệt độ và mạch vòng trong điều khiển lưu lượng nước phun giảm ôn) kết hợp với mạch feedforward bù nhiễu công suất hơi.

a) *Tổng hợp bộ điều khiển áp suất hơi*

Mạch vòng điều khiển áp suất hơi được trình bày trên H.5:



H. 5 Cấu trúc mạch vòng điều khiển áp suất

Trong đó:

- + G_{CLF} là hàm truyền kín của mạch vòng điều khiển lưu lượng nhiên liệu.
- + G_{PP} là hàm truyền đặc trưng cho các quá trình truyền nhiệt sinh hơi [10].
- + Hàm $g(N,f)$ là đường đặc tính nhiên liệu tương ứng với nhiệt trị than (f), đặc trưng cho tổng nhiệt yêu cầu cho lò.
- + G_{CP} là hàm truyền bộ điều khiển áp suất, với vai trò ổn định áp suất hơi và hiệu chỉnh lượng nhiên liệu cấp cho lò nên khác bộ điều khiển áp suất trên H.2 và H.3.

Nếu xét về sự cân bằng công suất hơi và nhiên liệu, khi cân bằng đủ thì đầu ra bộ điều khiển $u_p=1$, khi cân bằng thiếu $u_p>1$, khi cân bằng thừa $u_p<1$, (thực tế vận hành điều chỉnh lượng hệ số nhiên liệu theo than khoảng 0,8 đến 1,2) [3]. Nếu xét thêm nhiều các quá trình trong lò (cháy, truyền nhiệt, cấp nước...) ta đặt giới hạn hiệu chỉnh nhiên liệu theo nhiều của than và các quá trình trong lò là $0,5 \div 1,5$.

Hàm truyền điều khiển áp suất hơi được xây dựng từ nhận dạng theo số liệu thực tế [4][10]:

$$G_{pL}(s) = \frac{\Delta P}{\Delta W_f^*} = G_{CLf} \cdot G_{PP} = \frac{0.2926e^{-20s}}{(1+13.86s)(1+83.1s)} \quad (1)$$

Tổng hợp bộ điều khiển G_{CP} theo phương pháp SIMC-PID [11]

$$k_p = \frac{1}{k} \frac{\tau_1}{\tau_c + \theta} = \frac{1}{0.2926} \frac{13.86}{20+20} = 1.18$$

$$\tau_i = \min \{ \tau_1, 4(\tau_c + \theta) \} = \min \{ 13.86, 80 \} = 13.86$$

$$k_i = \frac{k_p}{\tau_i} = \frac{1.18}{13.86} = 0.085$$

Đặc tính áp suất trượt được lấy từ thực tế vận hành của nhà máy [2]. Đặc tính $g(N,f)$ là một hàm phức tạp gồm nhiều yếu tố mang đặc tính của than như: Thành phần nhiệt trị, hóa học, vật lý,... của than, nhưng trong khuôn khổ nghiên cứu của bài báo này, nhóm tác giả mới chỉ khảo sát đến tham số thay đổi là nhiệt trị của than ảnh hưởng tới công suất, áp suất.

b) Điều khiển công suất phát ở phần tuabin-máy phát

Nhà máy nhiệt điện chạy than thường làm việc trong chế độ phát công suất đặt. Giả thiết công suất lưới là vô hạn (tần số ổn định), bộ điều khiển hơi tái nhiệt đảm bảo. Ta có nhiệm vụ tổng hợp bộ điều khiển công suất tuabin-máy phát gồm ba phần: Tổng hợp bộ điều khiển G_{CN} , tổng hợp bộ điều khiển feedforward bù tác động xen kênh của áp suất và tổng hợp bộ điều khiển feedforward lượng đặt.

• **Tổng hợp bộ điều khiển công suất G_{CN}**

Đối tượng của bộ điều khiển công suất G_{CN} là tổ hợp tuabin-máy phát, động học của nó đã được trình bày trong [10], với chế độ vận hành phát theo công suất đặt, bộ điều khiển công suất là PI được lấy theo số liệu [4].

• **Tổng hợp bộ điều khiển feedforward (truyền thẳng) công suất đặt**

Để công suất phát bám công suất đặt, điều khiển feedforward được tính theo [11] ta có: $G_{FN}=1/G_{PTF}$, trong đó G_{PTF} là hàm truyền của đối tượng tuabin-máy phát. Ta chọn G_{FN} là Feedforward tĩnh.

$$G_{FN} = k_{FN} = \frac{k_N}{k_{TF}}, \quad k_{TF} \text{ là hệ số khuếch đại của hệ}$$

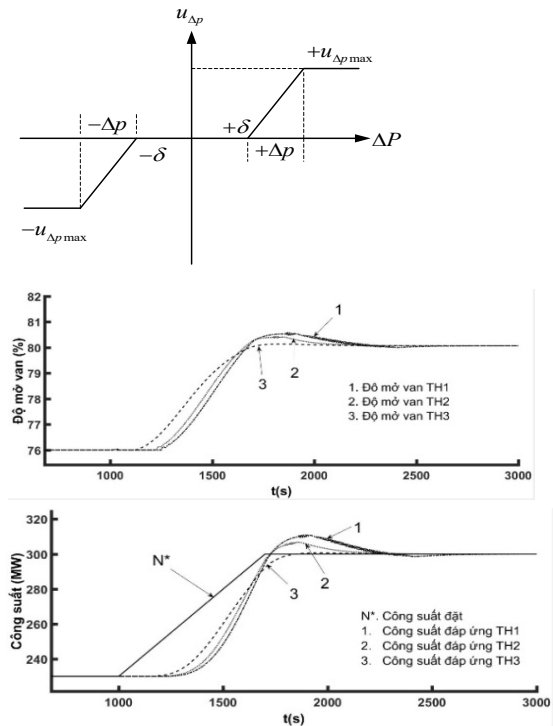
tuabin-máy phát [10], k_N là hệ số tỷ lệ.

• **Tổng hợp bộ điều khiển feedforward bù tác động xen kênh của áp suất**

Khâu bù áp suất có đặc tính trên H.6a, ta cần xác định ba tham số: δ vùng chết, Δu_{pmax} giới hạn điện áp cực đại và k_{bp} hệ số khuếch đại. Để tổng hợp khâu $g(\Delta P)$, ta sử dụng số liệu thực tế vận hành [4], mô hình phụ tải nhiệt [10] kết hợp với chỉnh định qua mô phỏng.

+ Vùng chết δ được lấy bằng 1% áp suất đặt; Giá trị lớn nhất của điện áp bù $|\Delta U_{Pmax}| \leq 10\%u_N$, ứng với áp suất khi tăng công suất từ 70% đến 100%

+ Hệ số khuếch đại $k_{bp} = \frac{\Delta u_{pmax}}{\Delta p}$ xác định bằng phương pháp chỉnh định và thử với hệ thống cho tới khi nào đạt được đáp ứng như mong muốn thì dừng lại. Việc này trong [9] tác giả mới chỉ đề xuất phương pháp còn chưa chỉ rõ được giá trị như thế nào là phù hợp, do đó nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát, chỉnh định và kết quả thu được như trong ba trường hợp trong H.6c dưới đây. H.6b là đáp ứng của tín hiệu điều khiển van hơi V_h , H.6c là đáp ứng công suất, tương ứng với ba trường hợp có: $k_{bp1} = 0.5$, $k_{bp2} = 2$, $k_{bp3} = 2.9$, trong đó, thông số $k_{bp3}=2,9$ cho đáp ứng tốt nhất.



H. 6 Thiết kế điều khiển Feedforward bù áp suất

Nhận xét:

- Đường số 1 (H.6c) sử dụng $g(\Delta P)$ có vùng chết $\pm\delta$ bằng 2% áp suất đặt và có hệ số khuếch đại bù $k_{bp1} = 0.5$. Ta thấy đáp ứng công suất bị quá điều chỉnh lớn, thời điểm có độ quá điều chỉnh lớn nhất là 3,6%, tương đương 11MW và độ mở van tuabin (đường 1, H.6b) bị dao động mạnh.
- Đường số 2 (H.6c) sử dụng $g(\Delta P)$ có vùng chết $\pm\delta$ bằng 2% áp suất đặt và có hệ số khuếch đại bù $k_{bp2} = 2$. Ta thấy đáp ứng công suất nhanh hơn đường số 1 nhưng vẫn bị có độ quá điều chỉnh lớn là

2,3%, tương ứng 7MW và độ mở van tuabin (đường 2, H.6b) vẫn bị dao động lớn.

- Đường số 3 (H.6c) sử dụng $g(\Delta P)$ có vùng chết $\pm \delta$ bằng 2% áp suất đặt và có hệ số khuếch đại bù $k_{bp3} = 2.9$. Ta thấy đáp ứng công suất đã bám tốt, độ quá điều chỉnh nhỏ, chỉ khoảng 0,2% tương ứng với 0,6MW và có thể coi như không có quá điều chỉnh và van tuabin cũng không bị dao động

2.3 Mô phỏng

Các số liệu mô phỏng lấy từ một tổ máy có công suất 300MW của nhà máy nhiệt điện Hải Phòng [4] theo mô hình phụ tải nhiệt [10].

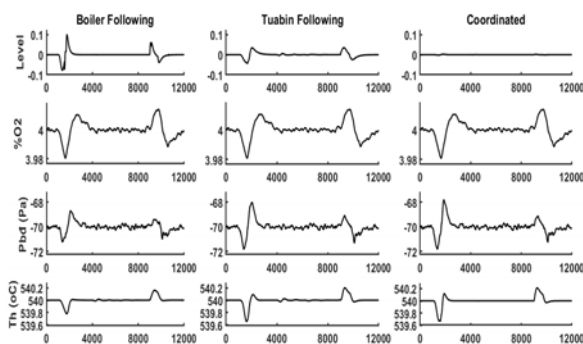
a) Kích bản mô phỏng

- Công suất đặt tăng từ 230 đến 300MW (ứng với 70% đến 100%) duy trì ổn định tại 100%, sau đó giảm về 70%.
- Tốc độ tăng và giảm lượng công suất đặt ± 6 MW/phút
- Áp suất hơi được xác định từ đặc tính áp suất trượt (theo công suất đặt): 14.2÷16.72Mpa (ứng với 70% ÷ 80% P_{max} [4])
- Lưu lượng nhiên liệu theo thiết kế loại than cấp cho lò là $W_{FN} = 36,5$ kg/s với nhiệt trị 21134 kJ/kg tương ứng 100% công suất vận hành. Khi vận hành cho tác động của nhiễu thay đổi nhiệt trị của than trong khoảng từ 20077 kJ/kg đến 23247 kJ/kg (ứng với 95÷110% W_{FN}) được trình bày trên H.10a. Thông số thay đổi của nhiệt trị của than được cập nhật qua hàm $g(N,f)$

b) Các đáp ứng mô phỏng

+ *Đáp ứng bốn mạch vòng điều khiển lò hơi*

Đáp ứng của mạch vòng điều khiển mức, mạch vòng điều khiển nồng độ ô xy dư, mạch vòng áp suất buồng đốt, mạch vòng nhiệt độ hơi quá nhiệt ứng với ba chế độ vận hành trên H.7.



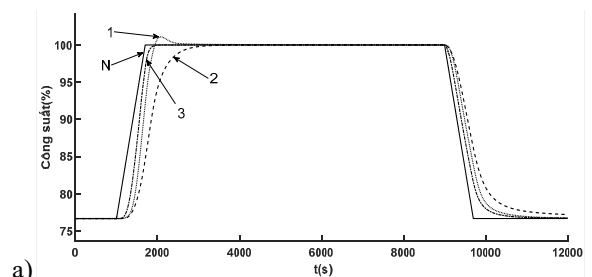
H. 7 Đáp ứng của bốn mạch vòng điều khiển lò hơi với ba chế độ vận hành

Nhận xét:

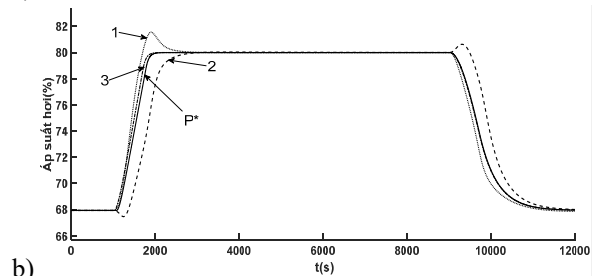
Bốn mạch vòng đều ổn định và có đáp ứng đúng theo yêu cầu điều chỉnh cho các mạch vòng ở cả ba cấu trúc điều khiển Boiler Following Control, Turbine Following Control, Coordinated Control.

+ *Đáp ứng “công suất - áp suất hơi - lưu lượng nhiên liệu - lưu lượng hơi” ứng với ba cấu trúc điều khiển*

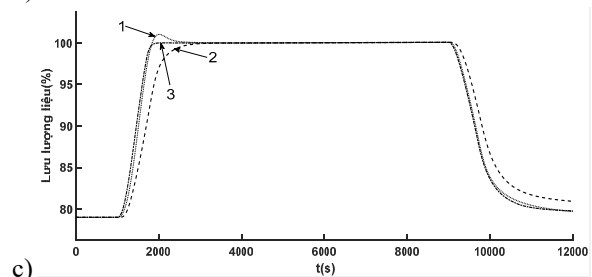
Trên H.8 là đáp ứng công suất ở tốc độ tăng tải 6MW/phút, trong đó H.8a là đáp ứng công suất, H.8b là đáp ứng áp suất, hình H.8c là đáp ứng lưu lượng nhiên liệu, hình H.8d là đáp ứng lưu lượng hơi, hình H.8e là đáp ứng sai lệch công suất và hình H.8f là đáp ứng sai lệch áp suất tương ứng với công suất đặt yêu cầu (N^*) thay đổi từ 230÷300MW, tương ứng từ 76%÷100% công suất. Đường 1 là ứng với điều khiển theo lò hơi, đường 2 là ứng với điều khiển theo turbine, đường 3 là ứng với điều khiển theo phối hợp và đường P^* là áp suất đặt yêu cầu.



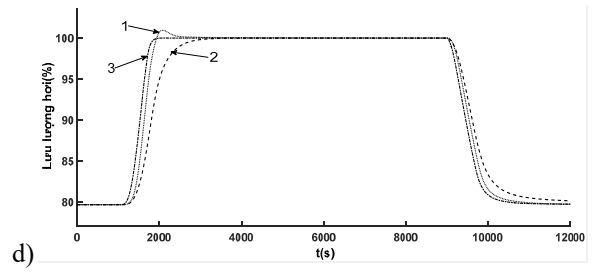
a)



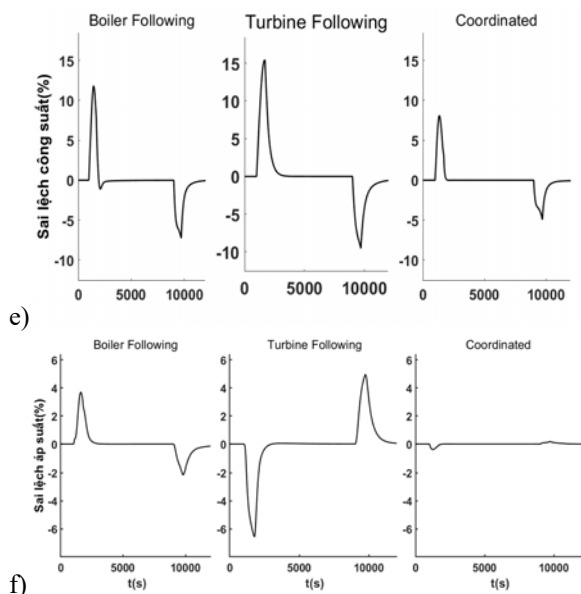
b)



c)



d)



H. 8 Đáp ứng công suất, áp suất hơi, lưu lượng nhiên liệu và lưu lượng hơi ứng với ba chế độ vận hành

Kết quả được đánh giá theo các chỉ tiêu thời gian quá độ (T_{qd}), độ quá điều chỉnh ($\delta\%$), sai lệch công suất, sai lệch áp suất cực đại ($e_{max}(\%)$) trong thời gian tăng tải, giảm tải và sai lệch tĩnh.

Bảng đánh giá chất lượng đối với đặc tính công suất hình H.8a trong bảng B.1 như sau:

B.1 Bảng đánh giá chất lượng của đáp ứng công suất

Chế độ điều khiển	$T_{qd}(s)$		$e_{max}(\%)$		δ [%]
	Tăng tải	Giảm tải	Tăng tải	Giảm tải	
Boiler Following	1744	2170	11,78	7,257	1,1
Turbine Following	910	1355	15,4	9,523	0
Coordinated	822	1155	8,06	4,94	0

Bảng đánh giá chất lượng đối với đặc tính áp suất hình H.8a trong bảng B.2 như sau:

B.2 Bảng đánh giá chất lượng của đáp ứng áp suất

Chế độ điều khiển	$T_{qd}(s)$		$e_{max}(\%)$		δ [%]
	Tăng tải	Giảm tải	Tăng tải	Giảm tải	
Boiler Following	679	2020	3,68	2,143	1,5
Turbine Following	1488	2550	6,55	4,942	0
Coordinated	812	2250	0,392	0,18	0

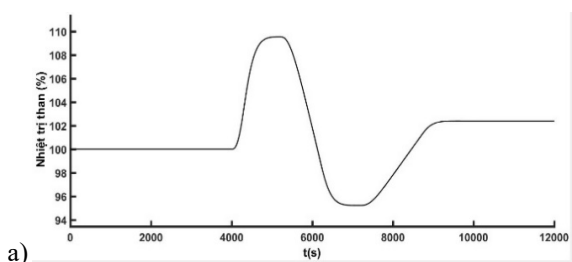
Đối với chỉ tiêu sai lệch tĩnh ở cả đáp ứng áp suất và đáp ứng công suất của ba chế độ đều có sai lệch tĩnh rất nhỏ, không đáng kể.

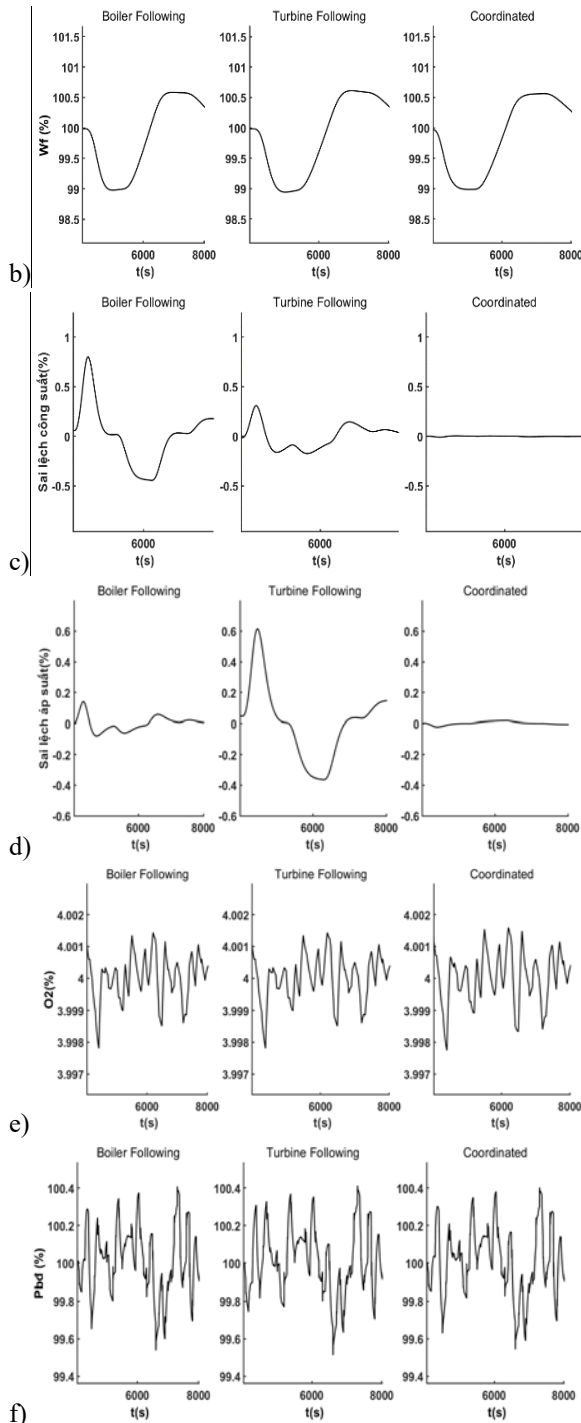
Nhận xét:

- Đối với đáp ứng công suất thì thời gian quá độ của điều khiển phối hợp nhỏ nhất rồi đến Turbine following và lớn nhất là Boiler following. Sai lệch lớn nhất trong tăng tải và giảm tải thì điều khiển phối hợp cũng nhỏ nhất rồi đến Boiler following và lớn nhất là Turbine following. Chỉ có Boiler following là có độ quá điều chỉnh 1,1%. Đáp ứng công suất tốt nhất là điều khiển phối hợp.
- Đối với đáp ứng áp suất thì thời gian quá độ của Boiler following nhỏ nhất rồi đến điều khiển phối hợp và lớn nhất là Turbine following. Sai lệch lớn nhất trong tăng tải và giảm tải thì điều khiển phối hợp cũng nhỏ nhất rồi đến Boiler following và lớn nhất là Turbine following. Chỉ có Boiler following là có độ quá điều chỉnh 1.5% nên đáp ứng chậm hơn và tiêu tốn nhiên liệu hơn. Đáp ứng áp suất tốt nhất cũng là điều khiển phối hợp.
- Các đáp ứng thể hiện như trên là do điều khiển phối hợp là điều khiển đa biến bù được xen kẽ, đồng bộ giữa tuabin- lò hơi. Còn hai cấu trúc còn lại chỉ là điều khiển đơn biến.

+ *Đáp ứng của hệ khi thay đổi nhiệt trị của than*

Để thấy rõ ảnh hưởng của thay đổi nhiệt trị than tới công suất, áp suất và các mạch vòng trong của lò hơi, ta thay đổi nhiệt trị than khi vận hành ổn định để đánh giá các chỉ tiêu đáp ứng công suất. Khi mô phỏng nhiệt trị than thay đổi: Đối với điều khiển theo lò hơi và điều khiển theo tuabin, ta sẽ tác động vào mô hình và hàm $g(N^*,f)$. Hình H.9a là đường nhiệt trị than, hình H.9b là đáp ứng thay đổi lưu lượng nhiên liệu theo sự thay đổi của nhiệt trị, hình H.9c là đáp ứng sai lệch công suất giữa công suất thực và công suất đặt, hình H.9d là đáp ứng sai lệch áp suất giữa áp suất thực và áp suất đặt, hình H.9e là đáp ứng nồng độ O2 dư, hình H.9f là đáp ứng áp suất buồng đốt.





H.9 Đáp ứng của các mạch vòng khi thay đổi nhiệt trị than

Nhận xét:

- Nhiệt trị than thay đổi H.9a khi ổn định ở 100% công suất. Tại thời điểm 4000s, nhiệt trị than tăng lên và đến thời điểm 5000s đạt tới nhiệt trị 110%. Tiếp theo nhiệt trị than giảm xuống và đến thời điểm 7000s nhiệt trị giảm xuống 95%. Sau đó nhiệt trị than tăng tiếp trở lại và ổn định ở thời điểm 9000s với nhiệt trị than là 102%.

- Khi thay đổi nhiệt trị than thì lưu lượng than thay đổi, áp suất hơi thay đổi, lưu lượng hơi vào tuabin thay đổi và công suất cũng thay đổi. Từ đáp ứng thu được cho thấy cả ba chế độ điều khiển ổn định, đúng yêu cầu điều khiển đối với từng chế độ trong nhà máy nhiệt điện đốt than.
- Khi nhiệt trị than thay đổi, nhiên liệu đưa vào lò của điều khiển phối hợp nhanh nhất còn Boiler following và Turbine following đều bị chậm sau. Sai lệch công suất, áp suất của điều khiển phối hợp cũng nhỏ nhất so với hai chế độ còn lại. Điều này có được là do điều khiển phối hợp có hàm $G(N,f)$ tính toán thay đổi lưu lượng nhiên liệu tức thì khi nhiệt trị than thay đổi còn đối với hai chế độ còn lại phải đợi áp suất thay đổi mới điều chỉnh lại nhiên liệu than cấp vào lò.

Từ những nhận xét trên cho thấy chế độ điều khiển phối hợp là tốt nhất

2.4 Đánh giá hệ điều khiển theo chỉ tiêu vận hành tối ưu

Trong nhà máy nhiệt điện chạy than người ta đưa ra bốn chỉ tiêu đánh giá cho vận hành tối ưu [12], gồm:

- Chỉ tiêu thứ nhất:** Hệ vận hành an toàn, ổn định, đảm bảo số lần sự cố xảy ra ít nhất sao cho sản lượng MWh lớn nhất với chi phí vận hành là thấp nhất.
- Chỉ tiêu thứ hai:** Hệ đảm bảo an toàn môi trường, việc phát thải ra môi trường các chất thải rắn, chất thải lỏng, chất thải khí nằm trong tiêu chuẩn môi trường cho phép với chi phí thấp nhất.
- Chỉ tiêu thứ ba:** Hệ bám công suất đặt tốt nhất trong thời gian tăng tải, giảm tải và làm việc ổn định khi có nhiễu tác động, gọi là J_N .
- Chỉ tiêu thứ tư:** Hệ có chi phí nhiên liệu là thấp nhất, gọi là J_f .

Trong nội dung bài báo chỉ lấy hai chỉ tiêu J_N và J_f để khảo sát, đánh giá. Trong đó chỉ tiêu bám lượng đặt và chi phí nhiên liệu được tính [12]:

$$J_N = \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t |e_N| dt \rightarrow \min \quad (2)$$

$$J_f = \frac{\int_{t_0}^t W_f(t) dt}{\int_{t_0}^t N_e(t) dt} \rightarrow \min \quad (3)$$

Áp dụng công thức tính J_N , J_f cho ba giai đoạn: tăng tải, tải ổn định có nhiệt trị thay đổi và giảm tải. Kết quả tính toán được trình bày trong bảng B.2.

B.3 Giá trị các chỉ tiêu J_N (%), J_f (Kg(than)/kWh) từ kết quả mô phỏng

Chế độ điều khiển	J_N (%)	J_f (Kg/kWh)
Boiler Following	4,97	0.4269
Turbine Following	7,6	0.4319
Coordinated	2,63	0.4119

Nhận xét:

Ta thấy, đối với chỉ tiêu bám lượng đặt công suất (J_N) ở cấu trúc điều khiển phối hợp nhỏ nhất rồi đến Boiler Following và lớn nhất là Turbine Following. Đối với chỉ tiêu chi phí nhiên liệu (J_f) ở cấu trúc điều khiển phối hợp nhỏ nhất rồi đến Boiler Following và lớn nhất là Turbine Following. Điều này chứng minh được rằng chế độ điều khiển phối hợp bám lượng đặt tốt nhất và tiêu tốn ít nhiên liệu nhất. Do cấu trúc điều khiển phối hợp là hệ điều khiển đa biến, bù xen kênh tạo nên đồng bộ giữa lò hơi - tuabin. Cấu trúc này có hàm $G(N,f)$ có thể tính toán thay đổi lưu lượng than tức thì khi có công suất và nhiệt trị than thay đổi. Trong khi hai cấu trúc còn lại chỉ là điều khiển đơn biến và không đồng bộ giữa lò hơi - tuabin.

3. Kết luận

Nội dung bài báo đã khảo sát được hệ điều khiển công suất trong nhà máy nhiệt điện đốt than với các cấu trúc điều khiển theo lò hơi, theo tuabin và phối hợp. Trong đó, cấu trúc điều khiển phối hợp là tốt nhất và được xây dựng mới (H.4). Cấu trúc này được phát triển dựa theo cấu trúc của tác giả Dukelov [5], Flynn [9] có bổ sung hàm $G(N,f)$ là đường đặc tính nhiên liệu tương ứng với nhiệt trị than và giới hạn của $g(\Delta P)$ để nâng cao chất lượng điều chỉnh.

Theo cấu trúc mới, đảm bảo cập nhật được đặc tính nhiên liệu để đạt tổng lượng nhiệt yêu cầu chính xác theo yêu cầu điều chỉnh công suất, đồng thời sử dụng bộ điều khiển áp suất để hiệu chỉnh lượng nhiên liệu. Với thiết kế cấu trúc điều khiển phối hợp mới đã đồng bộ giữa lò hơi và tuabin theo yêu cầu đặt ra.

Tài liệu tham khảo

- [1] Khánh BQ, Bình NH, Đăng PQ, Sơn PH (2016) *Hệ điều khiển DCS cho nhà máy sản xuất điện năng*. NXB Khoa học & Kỹ thuật, tái bản lần 2
- [2] Các tài liệu, bản vẽ và thuyết minh: Vận hành lò hơi, tua bin, thiết bị đo, vận hành DCS ... và các tài liệu khác của NM Nhiệt điện Hải Phòng
- [3] Các tài liệu, bản vẽ và thuyết minh: Vận hành lò hơi, tua bin, thiết bị đo, vận hành DCS ... và các tài liệu khác của NM Nhiệt điện Duyên Hải
- [4] Các dữ liệu hoạt động của NM Nhiệt điện Hải Phòng trong tháng 7 - 2017, định dạng dưới dạng file excel
- [5] Dukelov SG (1991) *The control of boiler*. 2nd Edition, ISA
- [6] Sun L et al (2017) *Direct energy balance based active disturbance rejection control for coal-fired power plant*. ISA Transactions, Elsevier Ltd.
- [7] Sun L et al (2016) *Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit*. Control Engineering Practice 55, pp. 38–55, Elsevier Ltd.
- [8] Hui Q, Kaifeng Z, Xianzhong D (2010) *New Energy Balance Controller of Thermal Generating Unit*. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference
- [9] Damian F (2003) *Thermal Power Plant Simulation and Control*. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, United Kingdom
- [10] Lý PT, Sáng NT, Dũng LĐ, Khánh BQ (2018) *Xây dựng mô hình động học cơ bản của hệ phụ tải nhiệt phục vụ đánh giá và chỉnh định điều khiển*. Tạp chí Năng lượng nhiệt, số 143-9/2018, tr. 14-19
- [11] Khánh BQ, Đăng PQ, Nguyễn VT (2014) *Điều khiển quá trình*. NXB Khoa học & Kỹ thuật
- [12] Garduno-Ramirez R, Lee KY (2001) *Multiobjective Optimal Power Plant Operation Through Coordinate Control with Pressure Set Point*. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 16, no. 2, pp. 115-122