

Design and analysis of adaptive control of the reference model to control the output pressure of the boiler system

Amirreza Azizi*, Zahra Toohidinejad, Iman Haghightpour

Shahed University of Tehran, Technical and Engineering Faculty, Department of Electrical Engineering

E-mails: Amirreza.azizi@shahed.ac.ir ; Zahra.tohidi@shahed.ac.ir ; haqiqat@academic.ac.ir

*corresponding author

Abstract

Boilers and most boilers are classified as pressure vessels, and according to this article, they should not work at low pressure. If these tanks are working at low pressure, their efficiency will decrease and it will cause a drop in the quality of the output steam in the boiler. On the other hand, each of the steam applications require a certain working pressure and their maximum allowed working pressure is different. If the steam pressure entering the steam consuming equipment is higher than the working pressure, it may cause dangers. Therefore, it is very important and important to control the pressure of the boiler as accurately as possible. Since we are dealing with a non-linear and time-varying system, therefore, a control system must be designed that can handle this system well. Most of the proposed methods so far either do not have the ability to be realized physically or have considered the system to be very simple. Therefore, in this thesis, while modeling the boiler as accurately as possible and the relations governing its pressure, we will introduce an adaptive control system of the reference model with various uncertainties so that the uncertainty and inaccuracy of the model can be compensated. The simulation results prove the effectiveness of the proposed method in boiler pressure control.

Keywords

boiler, adaptive control, reference model control

طراحی و تحلیل کنترل تطبیقی مدل مرجع برای کنترل فشار خروجی سیستم بویلر

امیررضا عزیزی*، زهرا توحیدی نژاد، ایمان حقیقت پور

1,2,3: دانشگاه شاهد تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق

ایمیل نویسندگان: Amirreza.azizi@shahed.ac.ir; Zahra.tohidi@shahed.ac.ir; haqiqat@academic.ac.ir

چکیده

دیگ بخار و اکثر بویلرها در دسته بندی مخازن تحت فشار قرار می گیرند و با توجه به این مطلب نباید در فشار پایین کار کنند. در صورت کار این مخازن در فشار پایین راندمان آنها کاهش پیدا کرده و در دیگ بخار باعث افت کیفیت بخار خروجی می شود. از طرف دیگر هر کدام از کاربردهای بخار فشارکاری خاصی را می طلبند و حداکثر فشار کاری مجاز آنها متفاوت است. اگر فشار بخار ورودی به تجهیزات مصرف کننده بخار از حد فشار کاری بیشتر باشد، ممکن باعث بروز خطراتی شود. لذا، کنترل هرچه دقیق تر فشار بویلر بسیار مهم و مورد توجه است. از آنجایی که با یک سیستم غیر خطی و متغیر با زمان روبرو هستیم لذا، سیستم کنترلی باید طراحی گردد که از عهده این سیستم به خوبی برآید. اکثر روش های مطرح شده تا کنون یا قابلیت تحقق فیزیکی ندارند و یا سیستم را بسیار ساده در نظر گرفته اند. بنابراین، در این پایان نامه ضمن مدل سازی هرچه دقیق تر بویلر و روابط حاکم بر فشار آن، یک سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع با وجود نامعینی های مختلف معرفی خواهیم کرد بطوریکه نامعینی و نادقیقی مدل را بتوان جبران کرد. نتایج شبیه سازی گواه کارایی روش پیشنهادی در کنترل فشار بویلر می باشد.

کلمات کلیدی

دیگ بخار، کنترل تطبیقی، کنترل مدل مرجع.

نام نویسنده مسئول: امیررضا عزیزی

ایمیل نویسنده مسئول: Amirreza.azizi@shahed.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

۱- مقدمه

سنگین پیدا کرده است و این بخش از صنعت و تکنولوژی آن تا دو دهه گذشته بطور کامل در اختیار کشورهای پیشرفته صنعتی و محدود کشورهای در حال توسعه بوده است. هم اکنون کشورهای دیگر از جمله ایران توانسته اند، تکنولوژی طراحی و مهندسی و عملیات ساخت دیگ های بخار سنگین و نیمه سنگین دست یابند و تلاش برای دستیابی به تکنولوژی طراحی و مهندسی و ساخت دیگ های بخار فوق سنگین از نوع یکبار گذار (بویلرهای بنسون) می باشند، نیز باید مورد توجه قرار گیرد. آنچه که سبب گسترش صنعت می گردد، توسعه صنعتی کشورها، و نیز تعدد و تنوع محصولات جدید در بخش های پتروشیمی، پالایشی، شیمیایی و سلولزی است و نیز افزایش روز افزون نیاز به انرژی الکتریکی با توسعه نیروگاههای جدید حرارتی و استفاده از بویلر می باشند [۲].

۱-۱-۲- دیگ های بخار واتر تیوپ و فایرتیوپ

دیگ های بخار فایرتیوپ یا لوله آتشی برای تولید آب داغ مورد استفاده در سیستم های گرمایشی نیز کاربرد فراوان دارند و بصورت دوپاس و سه پاس و در دو نوع برگشت تر^۱ و برگشت خشک^۲ و طراحی و ساخته می شوند کمترین ظرفیت که از این بویلرها بصورت دو یا سه ساخته می شود نزدیک به (۱ kcal/hr) بوده و بیشترین ظرفیتی که تاکنون از نوع فایرتیوپ طراحی و ساخته شده است، برای تولید بخار (2Δton/hr) می باشند. دیگ های تولید آب داغ با شرایط فشار حداقل طراحی می شوند و دیگ های بخار فایرتیوپ برای

صنایع شیمیایی منابع انرژی زیادی را مصرف می کنند تا بتوانند انرژی مورد نیاز خود را به منظور بسیاری کارها از جمله بکار اندازی فرآیندی، تامین انرژی حرارتی مورد نیاز برای گرم کردن مواد و غیره تامین نماید. منابع انرژی حال حاضر در جهان عمدتاً شامل سوخت های فسیلی، آب و باد، انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و انرژی هسته ای هستند. از این میان سوخت های فسیلی بیش از سایر منابع برای تهیه حامل های انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. معمولاً در صنایع شیمیایی، حامل های انرژی برق و بخار می باشند. بهترین راه برای آنکه بتوان از انرژی سوخت های فسیلی برای تولید برق و بخار استفاده کرد، سوزاندن آن است. در فرآیند سوختن، انرژی درونی بصورت حرارت آزاد می شود و به شکل تابش و جابجایی به محیط انتقال می یابد. بویلرها و توربین های گازی تجهیزات هستند که معمولاً برای تولید بخار و برق از طریق سوزاندن سوخت های فسیلی مورد استفاده قرار می گیرند. بخار فاز گازی و مایع آب است. در واقع چنانچه آب در فشار اتمسفریک گرما جذب کند، شروع به جوشش و تولید بخار می نماید و با تبدیل آب به بخار، حجم آن تقریباً ۱۶۰۰ برابر می شود و در حالت اشباع افزایش می یابد. گاز بر خلاف مایع تراکم پذیر است و به راحتی انرژی درونی آن نیز حداقل به میزان ۶ برابر آنرا فشرده نمود [۱]. استفاده و کاربرد دیگ های بخار در تولید انرژی الکتریکی در نیروگاهها و فرآیندهای شیمیایی و پالایشی و پتروشیمی و نیز در تاسیسات گرمایشی، به حدی فراوان است که امروزه طراحی و ساخت آنها جایگاه خاصی در صنایع

² Dry Back

¹ Wet Back

N_{hp} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشار قوی
 N_{ip} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشار متوسط
 N_{lp} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشار ضعیف
 dw : اختلاف فرکانس می باشد.

شماره نیز مربوط به بخش نتیجه گیری است و همان طوری که در پاراگراف قبلی بیان گردید؛

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{T_{fu}}x_1 + \frac{1}{T_{fu}}u_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T_w}x_2 + \frac{1}{T_w}x_1 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C_D}x_2 - \frac{K_b\sqrt{x_3-x_4}}{T_{fu}} \\ \dot{x}_4 &= \frac{K_b\sqrt{x_3-x_4}}{C_{SH}} - \frac{x_4x_6}{C_{SH}} \end{aligned} \quad (2)$$

در معادلات فوق، u_1 ورودی و درصد کنترل والو سوخت بویلر است. همچنین T_{fu} ثابت زمانی احتراق، T_w ثابت زمانی لوله های دیواره ای، K_b ضریب افت فشار بین درام و تروتل^۴ C_{SH} ضریب ذخیره سازی لوله های سوپرهیتر و C_D ضریب ذخیره سازی درام است.

۲-۳- معادلات حالت بویلر

مدل گاورنر مطابق با واحد نیروگاهی مربوطه، به صورت هیدرولیکی - مکانیکی مدنظر است و پارامترهای کنترلی واحد مذکور در مدل لحاظ شده است. معادلات گاورنر بصورت زیر بیان می شوند [۱۲].

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= \frac{1}{T_{SR}}x_5 + \frac{1}{T_{SR}}(u_2 - x_4x_6 - \frac{x_{10}}{R}) \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{T_{sm}}x_6 + \frac{1}{T_{sm}}x_5 \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات فوق u_2 درصد کنترل والو توربین، T_{SR} ثابت زمانی رله سرعت، T_{sm} ثابت زمانی سرومکانیسم و R دروپ^۵ سرعت است.

۲-۴- معادلات حالت توربین

مدل توربین مطابق اکثر بویلرهای نیروگاهی بصورت سه مرحله ای و دارای ری هیتر در نظر گرفته شده و پارامترهای کنترلی توربین در مدل در نظر گرفته می شوند. توربین نیروگاه دارای معادلات حالت زیر است.

$$\begin{aligned} \dot{x}_7 &= -\frac{1}{T_{ch}}x_7 + \frac{F_{hp}}{T_{ch}}x_4x_6 \\ \dot{x}_8 &= -\frac{1}{T_{c0}}x_8 + \frac{1}{T_{c0}}\frac{F_{ip}}{F_{ip}}(x_9 - x_8 - x_7) \\ \dot{x}_9 &= \frac{1}{T_{ch}}x_7 + \frac{F_{ip}}{T_{ch}}x_4x_6 - \frac{1}{T_{c0}}(x_9 - x_8 - x_7) \\ &\quad + \frac{1}{T_{rh}}\frac{F_{ip}}{F_{hp}}x_7 - \frac{1}{T_{rh}}x_8 \\ &\quad + \frac{1}{T_{c0}}\frac{F_{ip}}{F_{ip}}(x_9 - x_8 - x_7) \end{aligned} \quad (4)$$

در معادلات فوق، T_{ch} ثابت زمانی محفظه بخار، T_{rh} ثابت زمانی ری هیتر، T_{c0} ثابت زمانی Cross Over و F_{hp} ، F_{ip} ، F_{ip} به ترتیب سهم مشارکت توربین فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف در قدرت مکانیکی تولیدی توربین است.

تولید بخار اشباع شده تا حداکثر فشار طراحی و ساخته شده اند. بیشترین ظرفیت تولید بخار در بویلرهای فایرتیوپ می تواند کمترین ظرفیت تولید بخار در بویلرهای واترتیوپ فرض گردد و حداکثر فشار طراحی بویلرهای فایرتیوپ و نیز کمترین فشار طراحی بویلرهای واترتیوپ می باشد و این در حالیست که دیگرهای بخار واترتیوپ یا لوله آبی تا ظرفیت تولید بخار بیش از (/ ton hr ۲۳۵۰) برای تولید انرژی الکتریکی نزدیک به (۷۰۰ MW) طراحی و ساخته شده اند و از نظر فشار طراحی بیش از $200 kg/m^2$ و در شرایط فشار بحرانی^۳ نیز طراحی می گردد.

۱-۱-۲- دیگر های بخار واتر تیوپ و فایرتیوپ

این نوع بویلرها به دو دسته اصلی بویلرهای با گردش طبیعی آب یا بویلرهای زیر فشار کاری بحرانی و بویلرهای با گردش اجباری آب یا با فشار کاری بالای فشار بحرانی تقسیم می شوند، در نوع اول که به بویلرهای چند بار گذار هم موسوم هستند، اختلاف دانسیته بین آب و بخار باعث گردش آب می شود ولی در بویلر نوع دوم با استفاده از مجموعه پمپ های سانتریفوژ عمل گردش آب صورت می پذیرد. در این بویلرها، پمپ ها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. این بویلرها به بویلرهای یک بار گذار یا بنسون هم معروف هستند [۶].

۲-۱-۲- انواع بویلرهای واترتیوپ

تقسیم بندی بویلرهای واترتیوپ متناسب با ظرفیت تولید بخار این بویلرها و فشار کارکرد می باشد [۷]. لذا تقسیم بندی روتین بر اساس بویلرهای موجود در حال کار در ایران مطابق فهرست زیر می باشد.

- ۱- بویلرهای تیپ SC شامل (پکیج بویلر بویلر کمکی & بویلر پروسس و بویلر صنعتی)
- ۲- بویلرهای SD شامل بویلرهای کاربرد دوگانه
- ۳- بویلرهای SR با شامل بویلرهای نیروگاهی
- ۴- بویلر SOR یا بویلر نیروگاهی با فشار بالای فوق بحرانی یا بویلر بنسون یا بویلر یکبار گذار.
- ۵- بویلر HRSG بویلر بازیافت حرارتی یا سیکل ترکیبی.

۲-۲- معادلات حاکم بر بویلر

برای تحلیل هر سیستم ابتدا بایستی معادلات ریاضی حاکم بر آن را بطور دقیق مورد بررسی قرار داد. کاملترین معادلات ریاضی حاکم بر مجموعه بویلر نیروگاهی دارای ۱۰ حالت در نمایش فضای حالت می باشد که در ادامه بیان می شود [۱۲].

$$\begin{aligned} X &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}) \\ &= (D_Q, M_W, P_D, P_T, S_r, C_v, N_{hp}, N_{ip}, N_{lp}, dw) \end{aligned} \quad (1)$$

- که در آن
- D_Q : فلوی حرارتی از کوره به لوله های دیواره ای
 - M_W : فلوی آب در لوله های دیواره ای
 - P_D : فشار درام
 - P_T : فشار بخار تروتل
 - S_r : سرعت گاورنر
 - C_v : درصد باز بودن گاورنینگ والوهای توربین

⁵ Droop

³ super critical pressure
⁴ Throttle

۲-۵- معادلات حالت ژنراتور

$$\dot{x}_{10} = -\frac{D}{M}x_{10} + \frac{1}{M}x_9 - \frac{1}{M}d_i \quad (5)$$

دینامیک ژنراتور با معادله فوق بیان می‌شود که در آن M ثابت اینرسی ژنراتور، D ضریب میرایی ژنراتور و d_i اغتشاش بار الکتریکی است.

۲- مدلسازی ریاضی سیستم بویلر

در این مقاله از مدل دینامیکی غیرخطی دیگ بخار- توربین- ژنراتور ارائه شده توسط بل و آستروم استفاده شده است. از آنجایی که این مدل از داده‌های یک سیستم واقعی در سوئد استخراج شده، لذا از سال ۱۹۸۷ در اکثر پروژهای تحقیقاتی از این مدل استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، y_1 فشار بخار درام بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (kg/cm^2)، y_2 توان الکتریکی خروجی بر حسب مگا وات (MW) و y_3 سطح آب درام بر حسب متر (m) متغیرهای خروجی این سیستم چندمتغیره هستند. همچنین u_1 دبی سوخت ورودی، u_2 دبی بخار خروجی بویلر و ورودی توربین و u_3 دبی آب ورودی به بویلر متغیرهای ورودی هستند. بنابراین یک سیستم چندمتغیره سه ورودی - سه خروجی داریم. در جدول ۱ مقادیر پارامتری سیستم نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامتری سیستم

توان نامی	۱۶۰ مگا وات
نرخ جریان بخار	۱۴۰ kg/sec
فشار بخار	۱۴۰ kg/cm ²
دمای بخار	۵۳۵°C
حجم درام	۴۰ m ³
جرم آب	۴۰۰۰۰ kg
جرم بخار تحت فشار	۲۰۰۰ kg
دمای آب ورودی	۳۵°C
نرخ جریان سوخت	۱۴ kg/sec

فرم فضای حالت این سیستم چندمتغیره با توان ۱۶۰ مگاوات بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= \frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \\ \dot{x}_3 &= \frac{[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]}{85} \\ y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e - 67.975) \end{aligned} \quad (6)$$

3-1- خطی‌سازی مدل غیرخطی بویلر

خطی‌سازی فرایند جایگزینی مدل سیستم غیرخطی توسط همتای خطی آن در یک منطقه کوچک در حدود نقطه تعادل آن است. سیستم بویلر - توربین- ژنراتور یکی از نمونه‌های غیرخطی و چند متغیره است، فرض بر این است که مدل دقیق ریاضی داده شده است. بنابراین، از مدل خطی برای طراحی کنترلر استفاده می‌شود. در این مقاله، مدل غیرخطی با استفاده از گسترش سری تیلور در نقطه عملیاتی، خطی می‌شود.

$$A_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &= -0.0018 \frac{9}{8} u_2^0 (x_1^0)^{\frac{1}{8}} \\ &= -0.00203 u_2^0 (x_1^0)^{\frac{1}{8}} \\ A_{12} &= \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} = 0 \end{aligned}$$

$$A_{13} = \frac{\partial f_1}{\partial x_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$A_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= \frac{9}{8} \left((0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{1}{8}} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= (0.08212u_2^0 - 0.018)(x_1^0)^{\frac{1}{8}}$$

$$A_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= -0.1$$

$$A_{23} = \frac{\partial f_2}{\partial x_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= 0$$

$$A_{31} = \frac{\partial f_3}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]}{85} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= \frac{(0.19 - 1.1u_2^0)}{85}$$

$$A_{32} = \frac{\partial f_3}{\partial x_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]}{85} \right)_{(x^0, u^0)}$$

$$= 0$$

$$A_{33} = \frac{\partial f_3}{\partial x_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]}{85} \right)_{(x^0, u^0)} = 0$$

همچنین درایه‌های ماتریس B بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

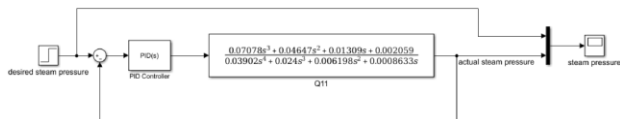
$$B_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial u_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_1} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} = 0.9$$

$$B_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial u_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_2} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} = -0.0018(x_1^0)^{\frac{9}{8}}$$

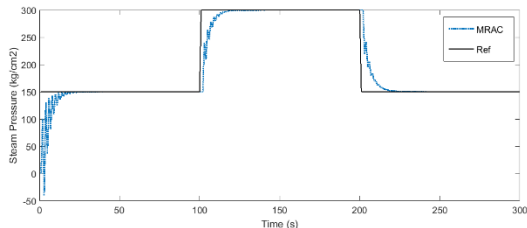
$$B_{13} = \frac{\partial f_1}{\partial u_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_3} \left(-0.0018u_2x_1^{\frac{9}{8}} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \right)_{(x^0, u^0)} = -0.15$$

$$B_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial u_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_1} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)} = 0$$

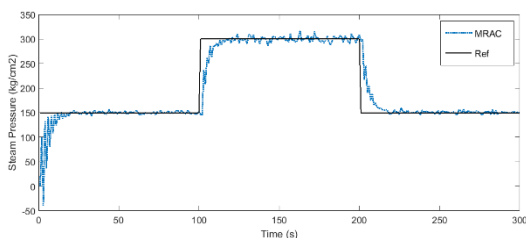
$$B_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial u_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_2} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)} = 0.073(x_1^0)^{\frac{9}{8}}$$



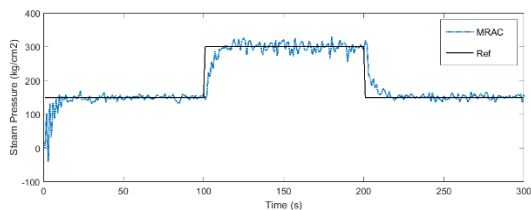
شکل ۱- بلوک دیاگرام سیستم کنترل فشار بخار



شکل ۲- کنترل مدل مرجع فشار بخار بویلر



شکل ۳- کنترل مدل مرجع فشار بخار در حضور نامعینی پارامتری ۱۰٪



شکل ۴- کنترل مدل مرجع فشار بخار در حضور نامعینی پارامتری ۲۰٪

۴- نتیجه گیری

روش های متنوعی جهت کنترل بویلر معرفی شده اند که هر کدام معایب و مزایای خودشان را دارند. متأسفانه اکثر روش های مبتنی بر تئوری کنترل، دینامیک تغییرپذیر سیستم را در نظر نمی گیرند و این مساله علی الخصوص در تغییرات پارامتری و غیرپارامتری به وضوح خود را نشان می دهد. روش های مبتنی بر هوش محاسباتی (فازی، عصبی و ...) مشکلات فوق را ندارند اما از نظر اثبات پایداری و همگرایی تضمین شده نیستند. اما روش کنترلی مدل مرجع ضمن اینکه از نظر تحلیل پایداری و همگرایی مشکلی ندارد، در مقابل تغییرات پارامتری و غیرپارامتری مقاوم بوده و از آنجایی که سیستم کنترل وابسته به سیستم تحت کنترل است لذا با تغییرات مدل، سیستم کنترلی نیز تغییر می یابد. روش کنترل مدل مرجع عملکرد مناسبی برای کنترل بویلر از خود نشان داده است. در این پایان نامه انواع نامعینی ممکن برای بویلر در نظر گرفته شد که روش کنترلی مدل مرجع بخوبی توانست ضمن کنترل دقیق سیستم با پارامترهای نامی، تغییرات را بخوبی رصد کرده و تصمیم کنترلی مناسب اتخاذ گردید. نتایج شبیه سازی نشان دهنده کارایی روش مدل مرجع در کنترل بویلر است.

$$B_{23} = \frac{\partial f_2}{\partial u_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_3} \left(\frac{(0.73u_2 - 0.16)x_1^{\frac{9}{8}} - x_2}{10} \right)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$B_{31} = \frac{\partial f_3}{\partial u_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_1} \left(\frac{141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1}{85} \right)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$B_{32} = \frac{\partial f_3}{\partial u_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_2} \left(\frac{141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1}{85} \right)_{(x^0, u^0)} = -\frac{1.1}{85} x_1^0$$

$$B_{33} = \frac{\partial f_3}{\partial u_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial u_3} \left(\frac{141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1}{85} \right)_{(x^0, u^0)} = \frac{141}{85}$$

همچنین برای تعیین درایه های ماتریس های C و D بصورت زیر

عمل می شود.

$$C_{11} = \frac{\partial h_1}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 1$$

$$C_{12} = \frac{\partial h_1}{\partial x_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_2}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$C_{13} = \frac{\partial h_1}{\partial x_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_3}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$C_{21} = \frac{\partial h_2}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$C_{22} = \frac{\partial h_2}{\partial x_2}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_2}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 1$$

$$C_{23} = \frac{\partial h_2}{\partial x_3}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_3}(x_1)_{(x^0, u^0)} = 0$$

$$C_{31} = \frac{\partial h_3}{\partial x_1}(x^0, u^0) = \frac{\partial}{\partial x_1} (0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e - 67.975))_{(x^0, u^0)}$$

$$= 5 \frac{\partial a_{cs}}{\partial x_1} + 0.05 \frac{\partial q_e}{\partial x_1}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.00203u_2^0(x_1^0)^{\frac{1}{8}} & 0 & 0 \\ (0.08212u_2^0 - 0.018)(x_1^0)^{\frac{1}{8}} & -0.1 & 0 \\ \frac{(0.19 - 1.1u_2^0)}{85} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.0018(x_1^0)^{\frac{9}{8}} & -0.15 \\ 0 & 0.073(x_1^0)^{\frac{9}{8}} & 0 \\ 0 & -\frac{1.1}{85}x_1^0 & \frac{141}{85} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 5 \frac{\partial a_{cs}}{\partial x_1} + 0.05 \frac{\partial q_e}{\partial x_1} & 0 & 0.0065365 + 5 \frac{\partial a_{cs}}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2279 & 0.00427x_1^0 & -0.014 \end{bmatrix}$$

۳- شبیه سازی

جهت بررسی کارایی سیستم کنترل پیشنهادی، فرض کنید فشار بخار خروجی بویلر در ۱۰۰ ثانیه اول مقدار ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، از ثانیه ۱۰۰ تا ثانیه ۲۰۰ مقدار ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، و در نهایت از ثانیه ۲۰۰ تا ثانیه ۳۰۰ مقدار ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع داشته باشد. در شکل زیر عملکرد سیستم کنترل مدل مرجع پیشنهادی به تصویر کشیده شده است.

مراجع

- [1] Trojan, M., Modeling of a steam boiler operation using the boiler nonlinear mathematical model. *Energy*, 2019. 175: p. 1194-1208.
- [2] Ali, M.S. and H. Habibullah, A review on the current status of boiler inspection and safety issues in Bangladesh. *Energy Procedia*, 2019. 160: p. 614-620.
- [3] Duarte, C.A., E. Espejo, and J.C. Martinez, Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler. *Engineering Failure Analysis*, 2017. 79: p. 704-713.
- [4] Beyne, W., et al., Dynamic and steady state performance model of fire tube boilers with different turn boxes. *Applied Thermal Engineering*, 2019. 149: p.1454-1462.
- [5] Mohammadi F, Mohammadi-Ivatloo B, Gharehpetian GB, Ali MH, Wei W, Erdiñç O, Shirkhani M. Robust control strategies for microgrids: A review. *IEEE Systems Journal*. 2021 Jun 8.
- [6] Aazami R, Heydari O, Tavooosi J, Shirkhani M, Mohammadzadeh A, Mosavi A. Optimal Control of an Energy-Storage System in a Microgrid for Reducing Wind-Power Fluctuations. *Sustainability*. 2022 May 19;14(10):6183.
- [7] Iranmehr H, Aazami R, Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi AR, Mohammadzadeh A, Mosavi AH, Guo W. Modeling the price of emergency power transmission lines in the reserve market due to the influence of renewable energies. *Frontiers in Energy Research*. 2022 Jan 13;9:944.
- [8] Tavooosi J, Shirkhani M, Abdali A, Mohammadzadeh A, Nazari M, Mobayen S, Asad JH, Bartoszewicz A. A new general type-2 fuzzy predictive scheme for PID tuning. *Applied Sciences*. 2021 Nov 5;11(21):10392.
- [9] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research*. 2022 Sep 1;210:108073.
- [10] Huang H, Shirkhani M, Tavooosi J, Mahmoud O. A new intelligent dynamic control method for a class of stochastic nonlinear systems. *Mathematics*. 2022 Apr 22;10(9):1406.
- [11] Danyali S, Aghaei O, Shirkhani M, Aazami R, Tavooosi J, Mohammadzadeh A, Mosavi A. A New Model Predictive Control Method for Buck-Boost Inverter-Based Photovoltaic Systems. *Sustainability*. 2022 Sep 19;14(18):11731.
- [12] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based Improved Smith Predictive Control for MIMO Processes. *Mathematics*. 2022 Oct 9;10(19):3696.
- [13] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2021;39(2):97-106.