

طراحی سیستم کنترل یک پارچه بویلر - توربین بر مبنای کنترل کننده مد لغزشی بهبود یافته

سیاوش گل محمدی، رحمت‌الله هوشمند و محمد عطائی

خارجی علاوه بر حلقه کنترل مگاوات در سیستم کنترل توربین وجود دارد. تاکنون کنترل کننده‌های متعددی برای بویلر-توربین نیروگاه بخار طراحی شده است که هر یک دارای معایب و مزایای خود است. این کنترل کننده‌ها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد. گروه اول، رویکردهای هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک و منطق فازی است [۴] و [۶]. برخی از این روش‌ها بر اساس ورودی‌ها، یک سری خروجی تولید می‌کنند و برای مدل تجهیزات بلوک‌های جعبه سیاه تولید می‌کنند و لذا در مدل‌سازی دینامیک‌های داخلی ضعف دارند. گروه دوم، رویکردهای کنترل کلاسیک مانند کنترل پیش‌بین [۱]، روش خطی درجه دوم گوسی (LQG) [۷]، روش LQG/LTR [۸]، رویکرد H_{∞} [۹] و [۱۰] و ترکیب روش‌های مذکور می‌باشد. بسیاری از این روش‌ها بر اساس خطی‌سازی مدل سیستم عمل می‌کنند. با توجه به غیر خطی بودن مدل نیروگاه بخار و تغییر وسیع نقطه کار، خطای حاصل از خطی‌سازی زیاد می‌شود. با توجه به موارد مذکور روش‌های کنترلی که بتواند بر اساس مدل غیر خطی عمل کند و در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم مقاوم باشد، مورد توجه قرار گرفته است [۱۱] و [۱۲]. از این رو کنترل کننده‌های ساختار متغیر مانند کنترل کننده‌های مد لغزشی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۷].

لازم به ذکر است اکثر مطالعات انجام شده در زمینه کنترل بویلر و یا توربین به‌طور مجزا بوده است. این در حالی است که برخی پارامترهای بویلر و توربین به شدت با هم تزیوج دارند و کنترل هر کدام به تنهایی و نادیده گرفتن اثر کمیت‌ها بر هم در هنگام بهره‌برداری در مود کنترلی یکپارچه کارایی ندارد [۱۳]. لذا کنترل هماهنگ بویلر و توربین مهم است و به‌خاطر اثرات این دو بر هم، باید آنها را همانند دو جزء یک سیستم مد نظر قرار داد [۷]. به‌عبارتی باید از سیستم‌های کنترل چندمتغیره بهره جست.

در این مقاله یک سیستم کنترل پیشنهادی مبتنی بر کنترل کننده‌های مد لغزشی برای کنترل هماهنگ دور توربین (فرکانس) و فشار بخار خروجی بویلر یک نیروگاه بخاری طراحی شده است. همچنین از مدل دقیق توربوژنراتور و بویلر به همراه سیستم‌های کنترلی آن استفاده شده است. در این مدل‌سازی سعی شده است که کلیه حلقه‌های کنترلی و سیگنال‌های مربوط به کنترل دیسپاچینگ سیستم بویلر و توربین لحاظ گردد و در نهایت، این شبیه‌سازی بر روی نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی، برتری کنترل کننده مد لغزشی را در مواجهه با تغییرات بار و اغتشاشات بویلر به خوبی نشان می‌دهد.

۲- مدل‌سازی نیروگاه بخاری

قبل از طراحی سیستم کنترل مورد نظر لازم است مدل‌سازی اجزای سیستم بویلر-توربین صورت گیرد. با توجه به این که محور کار بر اساس واحد دوم ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان است، لذا لازم است

چکیده: برای مشارکت نیروگاه بخاری در تنظیم فرکانس شبکه علاوه بر تولید بار پایه، باید بویلر و توربین به‌طور هماهنگ کنترل شوند. عدم کنترل هماهنگ بویلر-توربین سبب ناپایداری، نوسانی شدن توان تولیدی و پارامترهای بویلر، کاهش قابلیت اطمینان واحد و وارد شدن تنش‌های ترمودینامیکی به تجهیزات می‌گردد. در این مقاله یک سیستم کنترل پیشنهادی بر مبنای کنترل مد لغزشی برای کنترل هماهنگ دو پارامتر اصلی بویلر-توربین، یعنی دور توربین (فرکانس) و فشار بخار سوپر هیت خروجی بویلر ارائه می‌گردد. در این راستا سعی می‌شود تا با مدل‌سازی دقیق و کامل سیستم از قبیل توربو ژنراتور، بویلر و سیستم‌های کنترلی آن، قابلیت روش پیشنهادی بهتر نمایان شود. این روش پیشنهادی بر روی نیروگاه بخاری اسلام‌آباد اصفهان شبیه‌سازی شده و با کنترل کننده‌های تناسبی انتگرالی به کار رفته در آن مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی، قابلیت سیستم کنترل مد لغزشی را در کنترل فرکانس و فشار بخار سوپر هیت در حضور تغییرات بار و اغتشاشات بویلر به خوبی نشان می‌دهد.

کلید واژه: نیروگاه بخاری، کنترل مد لغزشی، فرکانس، فشار بخار تروتل.

۱- مقدمه

کنترل فرکانس یکی از ارکان اساسی پایداری شبکه برق است. به‌منظور مشارکت واحدهای بخاری در تنظیم فرکانس شبکه برق لازم است که بویلر و توربین در ارتباطی هماهنگ چنان عمل کنند که توربین به سرعت به تقاضای بار شبکه پاسخ دهد. همچنین بویلر بتواند پارامترهای خود که مهم‌ترین آن فشار بخار اصلی خروجی از آن و ورودی به توربین است را در مقدار مطلوب نگه دارد. به‌منظور نیل به این اهداف لازم است اجزای این سیستم، یعنی بویلر، توربین و گاورنر به دقت مدل‌سازی و کنترل شود.

در حال حاضر بیشتر سیستم‌های کنترل نیروگاهی از نوع تناسبی-انتگرالی می‌باشد که غالباً بر اساس دیدگاه‌های سیستم‌های خطی تک‌ورودی-تک‌خروجی طراحی شده‌اند [۱] تا [۳]. این در حالی است که سیستم بویلر-توربین، یک سیستم غیر خطی چندورودی-چندخروجی با تزیوج زیاد بین متغیرهای حالت می‌باشد.

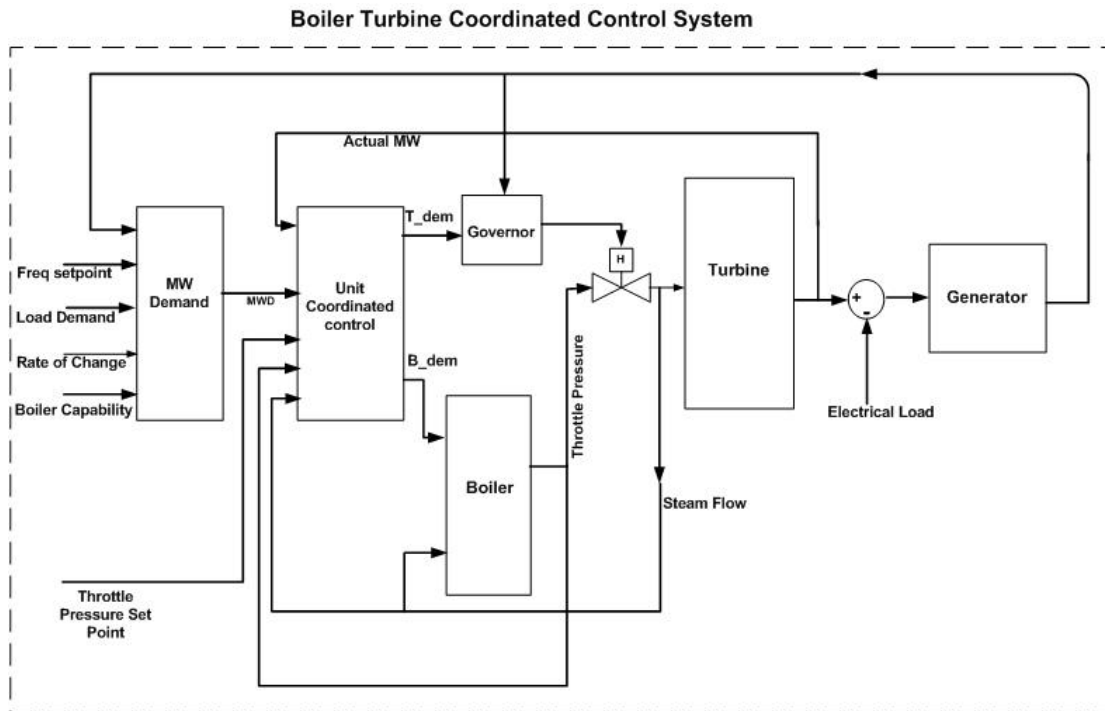
در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، حلقه کنترل فرکانس مدل‌سازی نشده است و صرفاً حلقه کنترل مگاوات مدل شده است [۲]، [۴] و [۵]. باید توجه داشت که در عمل، فیدبک فرکانس به‌صورت دو حلقه داخلی-

این مقاله در تاریخ ۱۴ مهر ماه ۱۳۸۹ دریافت و در تاریخ ۲۰ آبان ماه ۱۳۹۰ بازنگری شد.

سیاوش گل محمدی، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: Samani25@gmail.com)

رحمت‌الله هوشمند، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: Hooshmand_r@eng.ui.ac.ir)

محمد عطائی، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: Ataei@eng.ui.ac.ir)



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترل واحد دوم ۳۲۰ مگاواتی در استان اصفهان - ایران.

ورودی به توربین (که از این به بعد فشار بخار تروتل خواهیم نامید) را دارد اما عملکرد این دو مستقل از هم نیستند و با یکدیگر در ارتباط هستند [۱۴] و [۱۵] که در بخش چهارم به تشریح آن خواهیم پرداخت. در واقع سیستم کنترل یک پارچه بویلر-توربین، شامل دو زیرسیستم است. یکی از این سیستم‌ها، سیستم کنترل دور توربین که همان حلقه معروف کنترل بار-فرکانس (LFC) توربین است. سیستم دیگر، حلقه کنترل فشار بخار سوپرهیت خروجی بویلر و ورودی به توربین است. این حلقه با اندازه‌گیری فشار بخار سوپرهیت و مقایسه آن با یک مقدار مرجع، فرمان‌هایی به زیرحلقه‌های کنترل سوخت و هوا و آب تغذیه صادر می‌کند.

۲-۲ معادلات حالت سیستم

برای اعمال روش کنترل پیشنهادی بر سیستم لازم است معادلات حالت سیستم مورد مطالعه تعیین گردد. بر این اساس، سیستم بیان شده در بلوک دیاگرام شکل ۱ دارای ده حالت می‌باشد که عبارتند از

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{10}) \quad (1)$$

$$= (D_Q, M_w, P_D, P_T, S_r, C_v, N_{hp}, N_{ip}, N_{lp}, dw)$$

D_Q : فلوی حرارتی از کوره به لوله‌های دیواره‌ای.

M_w : فلوی آب در لوله‌های دیواره‌ای.

P_D : فشار درام.

P_T : فشار بخار تروتل.

S_r : حالت مربوط به رله سرعت در گاورنر.

C_v : درصد بازبودن گاورنرینگ والوهای توربین.

N_{hp} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشارقوی.

N_{ip} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشارمتوسط.

N_{lp} : قدرت مکانیکی تولیدی توربین فشارضعیف.

dw : اختلاف فرکانس.

در ضمن ورودی‌های این سیستم عبارتند از:

u_1 : درصد کنترل والو سوخت بویلر.

u_2 : درصد کنترل والو توربین.

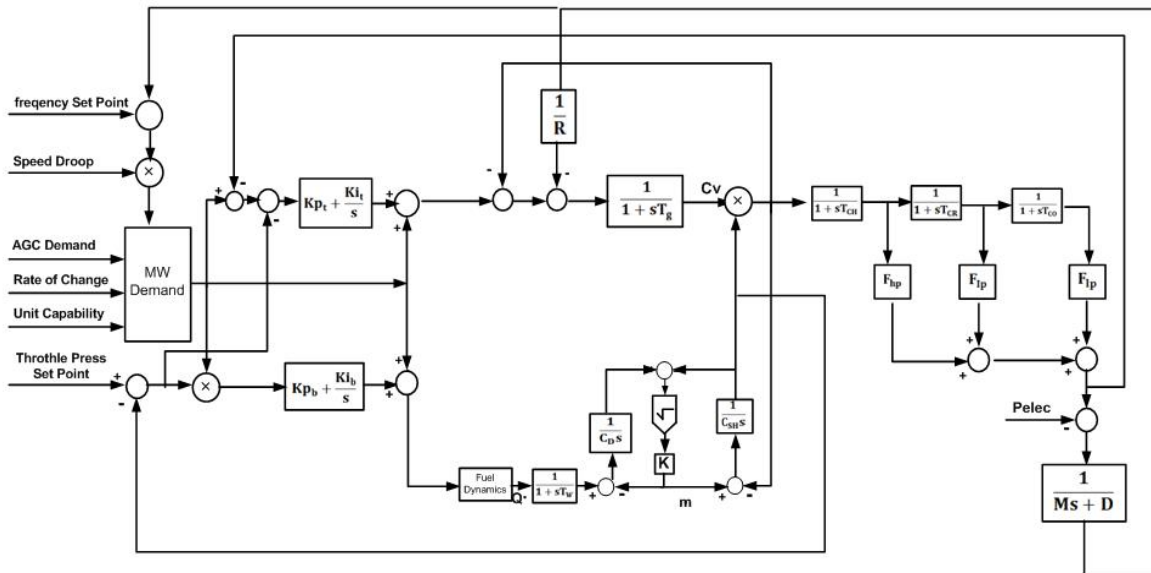
مدل‌های متناسب با آن مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب مدل‌ها باید چنان باشد که در عین سادگی، دینامیک‌های مهم سیستم بویلر-توربین را در بر گیرد. بلوک دیاگرام سیستم کنترل واحد بخاری مد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه قسمت‌های مختلف این بلوک دیاگرام تشریح خواهد شد.

۱-۲ سیستم کنترل بویلر-توربین

در هر واحد بخار با دریافت فرمان از سیستم کنترل اتوماتیک تولید (AGC) و با فیدبک از فرکانس شبکه و با در نظر گرفتن توانایی واحد، سیگنال تقاضای بار واحد (توسط بلوک MW Demand شکل ۱) ساخته می‌شود. سپس این سیگنال، وارد سیستم کنترل هماهنگ بویلر-توربین می‌شود. این سیستم با فیدبک از تولید جاری واحد و فشار بخار تروتل فرمان‌هایی به بویلر و توربین جهت تغییر تولید صادر می‌کند. این بدان معنی است که سیستم کنترل بویلر-توربین تنها بر اساس فرمان سیستم کنترل اتوماتیک تولید عمل نمی‌کند، بلکه فشار بخار اصلی و فرکانس شبکه و توانایی خود را نیز در تصمیم‌سازی تغییر تولید لحاظ می‌کند. به‌عنوان مثال اگر درخواست افزایش بار از سوی شبکه شود و فشار بخار اصلی مطلوب نباشد، واحد بخار پس از اصلاح خطای فشار بخار اصلی به درخواست شبکه پاسخ خواهد داد.

سیگنال تقاضای بار هم‌زمان بر روی توربین و بویلر اثر می‌گذارد و هم‌زمان با تغییر وضعیت گاورنرینگ والوهای توربین، بویلر نیز خروجی خود را تغییر می‌دهد. همچنین در صورت عملکرد مطلوب سیستم کنترل، در یک ارتباطی هماهنگ، توربین طوری کنترل می‌گردد که دبی بخار مورد نیاز بار را فراهم کند و در ضمن بویلر طوری کنترل می‌گردد که بخار مورد نیاز توربین را با فشار و دمای مطلوب فراهم نماید.

سیستم کنترل هماهنگ بویلر-توربین دارای دو کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی تزویج‌شده می‌باشد. یکی از این دو، وظیفه کنترل بار تولیدی واحد در راستای مشارکت در تصحیح خطای فرکانس شبکه را دارد. کنترل‌کننده دیگر وظیفه کنترل فشار بخار سوپرهیت خروجی از بویلر و



شکل ۲: بلوک دیاگرام گسترده سیستم بویلر-توربین واحد دوم ۳۳۰ مگاواتی در استان اصفهان- ایران.

۲-۲-۱ معادلات حالت بویلر

مدل بویلر بر اساس مدل Demello انتخاب شده است [۱۶] و [۱۷] که یک مدل عمومی و پارامتری بویلر است و دینامیک‌های فشار و فلوی بویلر را در بر می‌گیرد و برای بحث مورد نظر ما کفایت می‌کند. بر این اساس معادلات حالت بویلر درام دار به این صورت بیان می‌شوند

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_{fu}} x_1 + \frac{1}{T_{fu}} u_1 \quad (2)$$

$$\dot{x}_r = -\frac{1}{T_w} x_r + \frac{1}{T_w} x_1 \quad (3)$$

$$\dot{x}_r = \frac{1}{C_D} x_r - \frac{K_b \sqrt{x_r - x_f}}{C_D} \quad (4)$$

$$\dot{x}_f = \frac{K_b \sqrt{x_r - x_f}}{C_{SH}} - \frac{x_r x_f}{C_{SH}} \quad (5)$$

که در این معادلات T_{fu} ثابت زمانی احتراق، T_w ثابت زمانی لوله‌های دیواره‌ای، K_b ضریب افت فشار بین درام و تروتل، C_{SH} ضریب ذخیره‌سازی لوله‌های سوپر هیت و C_D ضریب ذخیره‌سازی درام است.

۲-۲-۲ معادلات حالت گاورنر

مدل گاورنر مطابق با واحد نیروگاهی مربوطه، به صورت هیدرولیکی-مکانیکی مد نظر است و پارامترهای کنترلی واحد مذکور در مدل لحاظ شده است [۱۸]. معادلات حالت گاورنر به صورت زیر بیان می‌شوند

$$\dot{x}_\delta = \frac{1}{T_{SR}} x_\delta + \frac{1}{T_{SR}} (u_r - x_f x_f - \frac{x_\delta}{R}) \quad (6)$$

$$\dot{x}_f = -\frac{1}{T_{sm}} x_f + \frac{1}{T_{sm}} x_\delta \quad (7)$$

که در این معادلات T_{SR} ثابت زمانی رله سرعت، T_{sm} ثابت زمانی سرومکانیسم و R دروپ سرعت است.

۲-۲-۳ معادلات حالت توربین

مدل توربین مطابق با آنچه در واحد نیروگاهی مورد نظر وجود دارد، مدل توربین سه مرحله‌ای و دارای ری‌هیست در نظر گرفته شده است و

پارامترهای کنترلی واحد مذکور در مدل در نظر گرفته شده است [۱۹]. توربین نیروگاه دارای معادلات حالت زیر است

$$\dot{x}_v = -\frac{1}{T_{ch}} x_v + \frac{F_{hp}}{T_{ch}} x_f x_f \quad (8)$$

$$\dot{x}_\lambda = -\frac{1}{T_{co}} x_\lambda + \frac{1}{T_{co}} \frac{F_{ip}}{F_{ip}} (x_\lambda - x_\lambda - x_v) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_\lambda = & \frac{1}{T_{ch}} x_v + \frac{F_{ip}}{T_{ch}} x_f x_f - \frac{1}{T_{rh}} (x_\lambda - x_\lambda - x_v) \\ & + \frac{1}{T_{rh}} \frac{F_{ip}}{F_{hp}} x_v - \frac{1}{T_{CO}} x_\lambda + \frac{1}{T_{CO}} \frac{F_{ip}}{F_{ip}} (x_\lambda - x_\lambda - x_v) \end{aligned} \quad (10)$$

که در این معادلات T_{ch} ثابت زمانی محفظه بخار، T_{rh} ثابت زمانی ری‌هیست، T_{co} ثابت زمانی Cross over و F_{hp} ، F_{ip} و F_{ip} به ترتیب سهم مشارکت توربین فشارقوی، فشارمتوسط و فشارضعیف در قدرت مکانیکی تولیدی توربین است.

۲-۲-۴ معادله حالت مربوط به ژنراتور

دینامیک ژنراتور با معادله زیر بیان می‌شود

$$\dot{x}_i = -\frac{D}{M} x_i + \frac{1}{M} x_i - \frac{1}{M} d_i \quad (11)$$

که در آن M ثابت اینرسی ژنراتور، D ضریب میرایی ژنراتور و d_i اغتشاش بار الکتریکی است.

چون سیستم بویلر-توربین-ژنراتور مورد بحث، یک سیستم دورودی - دو خروجی با ده حالت است، لذا باید از روش‌های طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم‌های چندوردی- چندخروجی استفاده نمود.

۳- بلوک دیاگرام کنترلی نیروگاه

شکل ۲ بلوک دیاگرام گسترده سیستم بویلر-توربین را نشان می‌دهد. این شکل شامل مدل بویلر، توربین، گاورنر، بار الکتریکی به انضمام ژنراتور و سیستم کنترل بویلر-توربین می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد سیستم کنترل بویلر-توربین به کار رفته در نیروگاه اسلام‌آباد از دو کنترل کننده تناسبی-انتگرالی تزویج شده تشکیل شده است.

خواهیم داشت

$$x_i^{(m_i)} = f_i(x) + \sum_{j=1}^n b_{ij}(x)u_j + d_i(t) \quad (19)$$

$$s = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_n]^T \quad (20)$$

$$s_i = (D + \lambda_{i1})(D + \lambda_{i2}) \dots (D + \lambda_{i(n-1)})e_i, \quad D = \frac{d}{dt} \quad (21)$$

$$w = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]^T \quad (22)$$

$$w_i = [(F_i + \alpha_i e^{\frac{\beta_i}{|s_i|}}) \tanh(\frac{S_i}{\varepsilon_i}) + \gamma_i s_i] \quad (23)$$

$$U = \hat{B}^{-1}(x_r^{n-1} - \hat{f} - W) \quad (24)$$

که پارامترهای $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ و ε_i با توجه به تحقق شروط لغزش زیر انتخاب می‌گردند

$$S_i \dot{S}_i \leq -\eta_i |s_i| e^{\frac{\beta_i}{|s_i|}} - \gamma_i s_i^2 \quad (25)$$

۵- اعمال روش کنترل پیشنهادی بر روی نیروگاه اسلام‌آباد

در مورد سیستم بویلر-توربین ماتریس B در ابتدای امر معکوس‌پذیر به نظر نمی‌رسد. این از آنجا ناشی می‌شود که هم در معادله متغیر حالت x_7 و هم در معادله متغیر حالت x_8 تنها ورودی u_7 ظاهر می‌شود و ورودی u_8 ظاهر نمی‌شود. اما با توجه به آنچه در عمل در نیروگاه اتفاق می‌افتد، باید کاری کنیم که در معادله حالت x_7 ورودی u_8 و در معادله حالت x_8 ورودی u_7 ظاهر شود؛ یعنی در عمل حالت x_7 توسط ورودی u_8 کنترل‌پذیر است، همچنین حالت x_8 توسط ورودی u_7 کنترل‌پذیر است. برای این منظور به روش زیر عمل می‌کنیم

$$C_{SH} \ddot{x}_7 = x_1 - C_D \ddot{x}_7 - T_{ch} \ddot{x}_8 - \dot{x}_8 \quad (26)$$

$$M \ddot{x}_8 = -D \ddot{x}_8 + \ddot{x}_8 - \ddot{d}_1 \quad (27)$$

$$C_{SH} \ddot{x}_7 = -\frac{1}{T_{fu}} x_1 + \frac{1}{T_{fu}} u_1 - C_D \ddot{x}_7 - T_{ch} \ddot{x}_8 - \dot{x}_8 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{x}_8 &= -D \ddot{x}_8 - \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_8 + \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_7 x_7 + \frac{1}{T_{ch}} x_7 \dot{x}_7 - \ddot{d}_1 \\ &= -D \ddot{x}_8 - \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_8 + \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_7 x_7 \\ &+ \frac{1}{T_{ch}} x_7 [-\frac{1}{T_g} x_7 + \frac{1}{T_g} (u_7 - \frac{x_8}{R})] - \ddot{d}_1 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} &= -D \ddot{x}_8 - \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_8 + \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_7 x_7 + \frac{1}{T_{ch} T_g} x_7 x_7 \\ &+ \frac{1}{T_{ch} T_g} x_7 u_7 - \frac{1}{T_{ch} T_g R} x_7 x_8 - \ddot{d}_1 \end{aligned}$$

لازم به ذکر است که T_g ثابت زمانی گاورنر بوده که برابر $T_{sm} + T_{SR}$ است. مشاهده می‌کنیم با این کار در معادله x_7 ورودی u_1 و در معادله x_8 ورودی u_7 ظاهر می‌شود.

در ادامه سطوح لغزش به صورت زیر تعریف می‌گردند

$$s_1 = \dot{e}_1 + b_1 e_1 \quad (30)$$

$$s_2 = \ddot{e}_2 + c_2 \dot{e}_2 + c_2 e_2 \quad (31)$$

پاسخ این سیستم به تغییرات بار کند و دارای فراجهدش و فروجهش زیاد است. علاوه بر این با توجه به غیر خطی بودن سیستم بویلر-توربین، با تغییر نقطه کار و تغییر پارامترهای سیستم، این کنترل‌کننده‌ها کارایی خود را از دست می‌دهند. به منظور رفع این ضعف‌ها در قسمت بعدی، این دو کنترل‌کننده را با یک کنترل‌کننده مود لغزشی جایگزین خواهیم کرد.

۴- طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی

کنترل‌کننده مد لغزشی با توجه به خصوصیات و ویژگی‌های آن، در کنترل سیستم‌های غیر خطی متفاوتی قابل کاربرد می‌باشد [۲۰]. بدین منظور، سیستم غیر خطی با معادلات دینامیکی فرم کانونیکال زیر در نظر گرفته می‌شود

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u + d(t) \quad (12)$$

که در آن $f(x)$ و $b(x)$ توابع غیر خطی و دارای عدم قطعیت هستند که کران این توابع در دسترس می‌باشد و برابر \hat{f} و \hat{b} است. همچنین تابع $d(t)$ نیز در ارتباط با اغتشاش وارد شده به سیستم می‌باشد. در این رابطه $x[t] = [x(t) \quad \dot{x}(t) \quad \dots \quad x^{(n-1)}(t)]^T$ بردار حالت سیستم است. با در نظر گرفتن بردار حالت مطلوب $x_d(t)$ ، بردار خطای حالت را می‌توان به صورت زیر نمایش داد

$$E(t) = x(t) - x_d(t) = [e(t) \quad \dot{e}(t) \quad \dots \quad e^{(n-1)}(t)]^T \quad (13)$$

اولین گام در طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، مشخص کردن یک سطح لغزش مناسب در فضای حالت است. این سطح لغزش را که تحت عنوان تابع سوئیچ نامیده می‌شود، به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$s = (D + \lambda_1)(D + \lambda_2) \dots (D + \lambda_{n-1})e, \quad D = \frac{d}{dt} \quad (14)$$

دومین گام در طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، تعیین قانون کنترل برای هدایت سیستم به سمت سطح لغزش انتخاب شده می‌باشد. در این روش، همواره قانون کنترل از دو قسمت تشکیل می‌شود که به صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$u(t) = u_{eq}(t) - u_n(t) \quad (15)$$

$$u_{eq}(t) = \hat{b}^{-1}(x_r^{n-1} - \hat{f}) \quad (16)$$

$$x_r^{n-1} = x_d^{(n)} - b_n x_d^{(n-1)} + b_{n-1} \dot{x}_d^{(n-1)} - \dots - b_{n-1} \dot{x}_d + b_{n-1} \dot{x}_d \quad (17)$$

در کنترل‌کننده‌های مود لغزشی کلاسیک، $u_n(t)$ به صورت تابع علامت در نظر گرفته می‌شود ولی به جای آن می‌توان از فرم‌های دیگری نیز استفاده کرد که یک نمونه به صورت (۱۸) بوده که در [۲۱] تبیین و تشریح شده و اثبات پایداری آن نیز صورت گرفته است

$$u_n = \hat{b}^{-1} [(F + \alpha e^{\frac{\beta}{|s|}}) \tanh(\frac{S}{\varepsilon}) + \gamma s] \quad (18)$$

که در آن α و γ ثابت‌های مثبت و $F = \max |f - \hat{f}|$ است. در این حالت ثابت شده است که اگر شرط‌های $\alpha > \eta$ و $\alpha - \eta < 2Fe^{-\beta/|s|}$ برقرار باشد، در این صورت حالت‌های سیستم به سمت سطح لغزش از پیش تعیین شده همگرا خواهد شد. این کنترل‌کننده را کنترل‌کننده مد لغزشی بهبودیافته می‌نامیم. استفاده از این تابع باعث می‌شود ضمن حذف کامل چترینگ، رفتار دینامیکی سیستم به گونه‌ای باشد که در زمان دور شدن سیستم از سطح لغزش سرعت همگرایی آن بیشتر شود.

با تعمیم مطالب فوق برای سیستم‌های چندورودی - چندخروجی

$$u_1 = x_1 + T_{fu} C_D \ddot{x}_r + T_{fu} T_{ch} \ddot{x}_\delta + T_{fu} \dot{x}_\delta + T_{fu} C_{SH} \ddot{x}_{rd} - T_{fu} b_1 x_1 + T_{fu} b_1 C_D \dot{x}_r + T_{fu} b_1 T_{ch} \dot{x}_\delta + T_{fu} b_1 x_\delta + T_{fu} b_1 C_{SH} \dot{x}_r - K_v T_{fu} C_{SH} \operatorname{sgn}(s_1) \quad (40)$$

$$u_r = \frac{T_{ch} T_g D}{x_r} \ddot{x}_r + \frac{T_g}{x_r} \dot{x}_\delta - \frac{T_g}{x_r} \dot{x}_r x_\delta + x_\delta + \frac{1}{R} x_r + \frac{T_{ch} T_g \ddot{d}_l}{x_r} + M \frac{T_{ch} T_g}{x_r} \ddot{x}_{rd} - \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} c_1 \ddot{x}_r + \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} c_1 \ddot{x}_{rd} - \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} c_r \dot{x}_r + \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} c_r \dot{x}_{rd} - \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} c_r \dot{x}_{rd} - \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} k_r \operatorname{sgn}(s_r) \quad (41)$$

البته لازم به ذکر است که جهت انجام شبیه‌سازی بر اساس روش بهبود یافته پیشنهادی، بر طبق (۲۳) و (۲۴) توابع مربوطه جایگزین توابع علامت به کار رفته در روابط فوق شده‌اند که در واقع روابط منتجه زیر حاصل می‌گردد

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} T_{fu} C_{SH} & \cdot \\ \cdot & \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} G_1 \\ G_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (F_1 + \alpha_1 e^{-\frac{\beta_1}{|s_1|}}) \tanh(\frac{s_1}{\varepsilon_1}) + \gamma_1 s_1 \\ (F_r + \alpha_r e^{-\frac{\beta_r}{|s_r|}}) \tanh(\frac{s_r}{\varepsilon_r}) + \gamma_r s_r \end{bmatrix} \right\} \quad (42)$$

۶- نتایج شبیه‌سازی

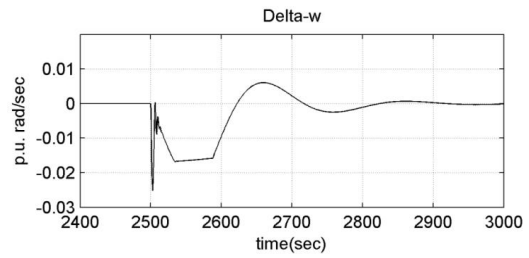
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی اعمال سیستم کنترل پیشنهادی بر روی واحد دوم ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان- ایران و همچنین سیستم کنترل تناسبی انتگرالی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. مدل این نیروگاه بر اساس شکل ۲ می‌باشد که پارامترهای آن در قسمت ضمیمه آورده شده است.

۶-۱ پاسخ سیستم در حضور کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی

در ابتدا فرض می‌شود که فقط از کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی در کنترل فرکانس نیروگاه استفاده شده است. پاسخ پله حالت $\Delta\omega(t)$ به‌ازای تغییر ۰/۱ p.u. در بار الکتریکی به‌صورت شکل ۳ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، زمان نشست پاسخ ۳۵۰ sec و میزان فراجهش آن ۰/۰۰۶ p.u. rad/sec (۰/۰۴۶ Hz) است. لذا سیستم، دارای پاسخ مطلوبی از لحاظ زمان نشست و اضافه جهش نخواهد بود و نیاز به اعمال کنترل بهتری بر روی نیروگاه می‌باشد. همچنین نمودار فشار بخار تروتل در شکل ۴ قابل مشاهده است.

۶-۲ پاسخ سیستم با کنترل مد لغزشی کلاسیک

با توجه به این که کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی قادر به کنترل مطلوب نمی‌باشد، لذا در این قسمت ابتدا از کنترل مد لغزشی کلاسیک استفاده می‌شود. با اعمال یک تغییر ۰/۱ pu در بار سیستم، نمودار پاسخ $\Delta\omega(t)$ و فشار بخار تروتل در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این خصوص لازم به توضیح است که با تغییر ضرایب کنترل‌کننده‌ها و یا ضرایب سطح



شکل ۳: نمودار پاسخ اختلاف فرکانس با کنترل کننده تناسبی انتگرالی.

که در این معادلات، e_1 و e_r خطای حالت‌ها هستند و b_1 ، c_1 و c_r جزء ثابت‌های طراحی هستند. در این روابط، با مشتق‌گیری و جایگذاری روابط خواهیم داشت

$$\dot{s}_1 = \ddot{x}_r - \ddot{x}_{rd} + b_1 \dot{x}_r - b_1 \dot{x}_{rd} \quad (32)$$

$$\dot{s}_r = \ddot{x}_r - \ddot{x}_{rd} + c_1 \ddot{x}_r - c_1 \ddot{x}_{rd} + c_r \dot{x}_r - c_r \dot{x}_{rd} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= \frac{1}{C_{SH}} (\dot{x}_r - C_D \ddot{x}_r - T_{ch} \ddot{x}_\delta - \dot{x}_\delta) - \ddot{x}_{rd} \\ &+ \frac{b_1}{C_{SH}} (x_1 - C_D \dot{x}_r - T_{ch} \dot{x}_\delta - x_\delta) - b_1 \dot{x}_{rd} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{C_{SH}} \left(-\frac{1}{T_{fu}} x_1 + \frac{1}{T_{fu}} u_1 - C_D \ddot{x}_r - T_{ch} \ddot{x}_\delta - \dot{x}_\delta \right) - \ddot{x}_{rd} \\ &+ \frac{b_1}{C_{SH}} (x_1 - C_D \dot{x}_r - T_{ch} \dot{x}_\delta - x_\delta) - b_1 \dot{x}_{rd} \\ \dot{s}_r &= \frac{1}{M} (-D \ddot{x}_r - \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_\delta + \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_r x_\delta - \frac{1}{T_{ch} T_g} x_r x_\delta \\ &+ \frac{1}{T_{ch} T_g} x_r u_r - \frac{1}{T_{ch} T_g R} x_r x_\delta - \ddot{d}_l) \\ &- \ddot{x}_{rd} + c_1 \ddot{x}_r - c_1 \ddot{x}_{rd} + c_r \dot{x}_r - c_r \dot{x}_{rd} \end{aligned} \quad (35)$$

جهت استفاده از (۲۴) برای محاسبه سیگنال کنترلی، ابتدا \hat{B}^{-1} به‌صورت زیر محاسبه شده و سپس قوانین کنترل u_1 و u_r به‌دست می‌آیند

$$\hat{B}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{fu} C_{SH}} & \cdot \\ \cdot & \frac{x_r}{M T_{ch} T_g} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} T_{fu} C_{SH} & \cdot \\ \cdot & \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} \end{bmatrix} \quad (36)$$

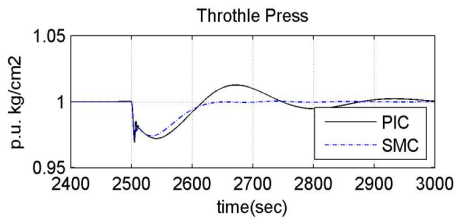
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} T_{fu} C_{SH} & \cdot \\ \cdot & \frac{M T_{ch} T_g}{x_r} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} G_1 \\ G_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ k_r \operatorname{sgn}(s_r) \end{bmatrix} \right\} \quad (37)$$

که G_1 و G_r عبارتند از

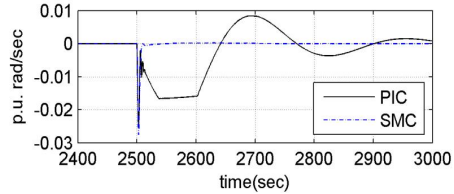
$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{C_{SH} T_b} x_1 - \frac{C_D}{C_{SH}} \ddot{x}_r - \frac{1}{C_{SH}} (T_{ch} \ddot{x}_\delta - \dot{x}_\delta) \\ &- \ddot{x}_{rd} + \frac{b_1}{C_{SH}} (x_1 - C_D \dot{x}_r - T_{ch} \dot{x}_\delta - x_\delta) - b_1 \dot{x}_{rd} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} G_r &= \frac{1}{M} (-D \ddot{x}_r - \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_\delta + \frac{1}{T_{ch}} \dot{x}_r x_\delta \\ &- \frac{1}{T_{ch} T_g} x_r x_\delta - \frac{1}{T_{ch} T_g R} x_r x_\delta - \ddot{d}_l) \\ &- \ddot{x}_{rd} + c_1 \ddot{x}_r - c_1 \ddot{x}_{rd} + c_r \dot{x}_r - c_r \dot{x}_{rd} \end{aligned} \quad (39)$$

لذا قوانین کنترل u_1 و u_r به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند

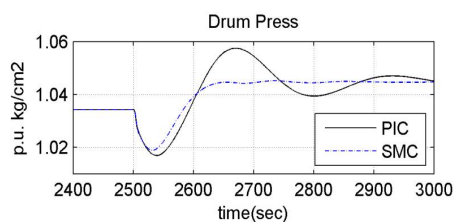


(الف)



(ب)

شکل ۴: مقایسه پاسخ دو سیستم کنترل به‌ازای پله ۰/۸ pu بار، (الف) فشار بخار تروتل و (ب) اختلاف فرکانس.



شکل ۵: مقایسه پاسخ فشار درام برای دو سیستم کنترل به‌ازای پله ۰/۸ pu بار.

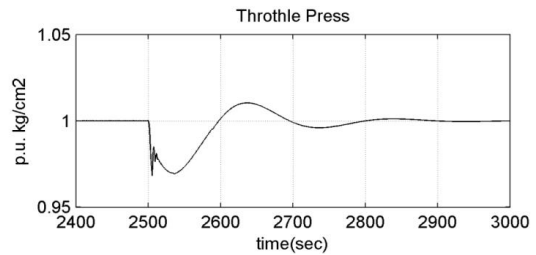
سبب بر هم خوردن سطح درام می‌شود، به‌طوری که با کاهش فشار درام، سطح درام افزایش می‌یابد و بالعکس. سطح درام در یک باند محدودی کنترل می‌شود و خروج از این باند، چه در جهت بالا و چه در جهت پایین، سبب عمل نمودن حفاظت‌های بویلر و خروج واحد بخار می‌گردد. لذا هر چقدر تغییرات سطح درام در دینامیک‌های سیستم کمتر باشد، پایداری سیستم بیشتر می‌گردد. لذا کنترل کننده مود لغزشی از این دیدگاه نیز دارای برتری است.

یکی دیگر از اغتشاشاتی که به سیستم بویلر-توربین وارد می‌شود افت فشار بخار تروتل است. این اغتشاش ناشی از مواردی چون تریپ یک یا دو جفت از مشعل‌های بویلر، افزایش فلوی گازهای گردش بویلر جهت کنترل دمای ری‌هیتر، سوراخ شدن لوله‌های سوپرهیتر و افت فشار سوخت گاز است. برای مدل کردن این اغتشاشات باید یک پالس یا پله منفی به قسمت فشار بخار تروتل در مدل بویلر وارد کرد.

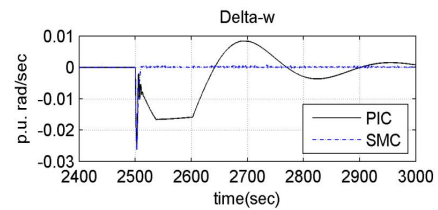
در شکل ۸ نیز رفتارهای دو سیستم برای اغتشاش پله ۵٪ افت فشار بخار تروتل مقایسه شده است. مجدداً ملاحظه می‌شود سیستم کنترل مود لغزشی در کنترل فرکانس دارای فروجهش و فراجهش کمتری است. همچنین زمان نشست آن نیز به مراتب کمتر است.

۷- نتیجه‌گیری

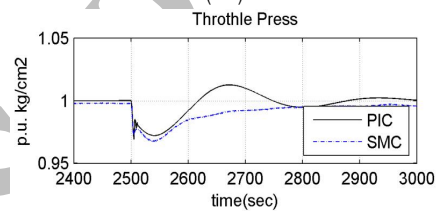
در این مقاله یک سیستم کنترل مد لغزشی جایگزین سیستم کنترل بویلر-توربین مبتنی بر کنترل کننده‌های PI نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان شد. در این راستا از مدل دقیق نیروگاه بخاری شامل مدل بویلر، توربین، گاورنر به همراه سیستم‌های کنترلی آنها استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده مود لغزشی در کنترل فرکانس و فشار بخار تروتل دارای دینامیک بسیار سریع‌تری نسبت به کنترل کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشد. این در حالی است که محدودیت‌های نرخ تغییر



شکل ۴: نمودار فشار بخار تروتل با کنترل کننده تناسبی انتگرالی.



(الف)



(ب)

شکل ۵: نمودار پاسخ‌ها با کنترل مد لغزشی کلاسیک، (الف) اختلاف فرکانس و (ب) فشار بخار تروتل.

لغزش می‌توان شکل پاسخ را تا حدی تغییر داد. به‌عنوان مثال با کاهش ضریب سطح لغزش b_1 می‌توان حالت نوسانی را در پاسخ از بین برد ولی از سوی دیگر پاسخ سیستم کندتر می‌شود، مانند آنچه که در شکل ۵ قابل ملاحظه است. در این حالت زمان خیز و زمان نشست سیستم به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در صورت افزایش این ضریب، گرچه پاسخ سیستم تندتر می‌شود ولی پاسخ نوسانی می‌گردد. در این حالت پاسخ فرکانس دارای چترینگ نامطلوبی است. از طرفی وجود چترینگ ممکن است باعث تحریک دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالای سیستم و حتی ناپایداری سیستم شود.

۶-۳ کنترل مود لغزشی بهبودیافته

در شکل‌های ۶ و ۷ رفتار سیستم در قبال استفاده از کنترل کننده مود لغزشی بهبودیافته و مقایسه آن با کنترل کننده تناسبی انتگرالی متداول به‌ازای اغتشاش پله ۱۰٪ بار الکتریکی مقایسه شده است. با توجه به این شکل‌ها موارد زیر قابل ذکر است:

(۱) کنترل کننده مود لغزشی در کنترل فرکانس دارای دینامیک سریع‌تری نسبت به کنترل کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشد. این در حالی است که محدودیت‌های مورد نیاز برای نرخ تغییر ورودی‌های سوخت و هوا و بخار در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. سرعت دینامیک حالت گذرا از ویژگی‌های برجسته کنترل مود لغزشی است.

(۲) در سیستم با کنترل کننده مود لغزشی فراجهش در فشار بخار تروتل ایجاد نمی‌شود. علاوه بر این میزان افت فشار تروتل در سیستم با کنترل کننده مود لغزشی به مقدار کمی بهتر از سیستم با کنترل کننده نوع تناسبی انتگرالی است.

(۳) دینامیک فشار درام اگر چه مد نظر کنترل نیست، اما این متغیر به‌طور مستقیم در دینامیک سطح درام اثر می‌گذارد. تغییر فشار درام

۴) پارامترهای سیستم کنترل:
پارامترهای سیستم کنترل تناسبی-انتگرالی

$$K_{pi} = ۱,۰۸$$

$$K_{it} = ۳,۲۴$$

$$K_{pb} = ۴,۴$$

$$K_{ib} = ۰,۰۴$$

پارامترهای سیستم کنترل مود لغزشی کلاسیک

$$b_{\gamma} = ۰,۰۱$$

$$c_{\gamma} = ۵$$

$$c_{\gamma} = ۱۵$$

$$K_{smc\gamma} = ۰,۰۳$$

$$K_{smc\gamma} = ۰,۰۱۸$$

پارامترهای سیستم کنترل مود لغزشی بهبودیافته

$$\alpha_{\gamma} = ۲,۹ \quad , \quad \alpha_{\gamma} = ۰,۵$$

$$\beta_{\gamma} = ۰,۰۰۵ \quad , \quad \beta_{\gamma} = ۰,۰۰۳$$

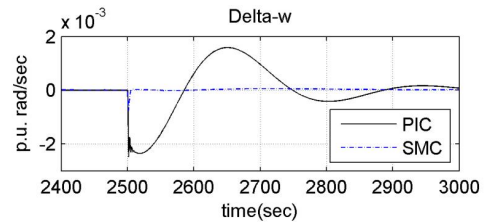
$$\gamma_{\gamma} = ۰,۰۰۸ \quad , \quad \gamma_{\gamma} = ۰,۰۰۴$$

$$\varepsilon_{\gamma} = ۰,۵ \quad , \quad \varepsilon_{\gamma} = ۰,۵$$

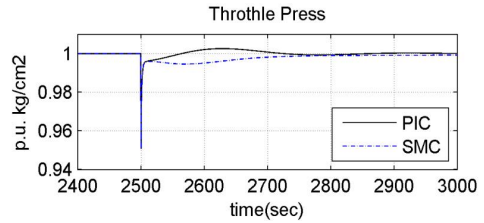
$$F_{\gamma} = ۰,۰۵ \quad , \quad F_{\gamma} = ۰,۰۵$$

مراجع

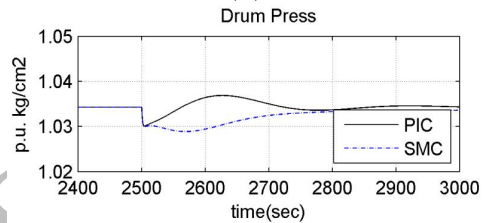
- [1] M. Salehi and A. Afzalian, "Robust H ∞ control design for a boiler-turbine unit," in *Proc. Int. Conf. on Smart Manufacturing Application*, pp. 520-525, Apr. 2008.
- [2] W. G. Kim, U. C. Moon, S. C. Lee, and K. Y. Lee, "Application of dynamic matrix control to a boiler-turbine system," in *Proc. IEEE Conf. on Control Application*, vol. 2, pp. 1595-1600, Jun. 2005.
- [3] D. M. Y. Takagi, K. Mitsumoto, H. Oguchi, A. Nakai, and S. Hino, "A new control strategy for coal fired thermal power plants," in *Proc. IEEE Conf. on Control Applications*, pp. 1680-1685, Toronto, Canada, Aug. 2005.
- [4] Y. Wang and X Yu, "New coordinated control design for thermal power generation units," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 123-130, Aug. 2010.
- [5] Y. Daren and X. U. Zhiqiang, "Nonlinear coordinated control of drum boiler power unit based on feedback linearization," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 204-210, Mar. 2005.
- [6] Z. L. Yong, "Improving performance of PID controller using artificial neural network for disturbance rejection of high pressure steam temperature control in industrial boiler," in *Proc. Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 1204-1207, Oct. 2008.
- [7] W. G. Kim, U. C. Moon, S. C. Lee, and K. Y. Lee, "Fuzzy - adapted recursive sliding - mode controller design for nuclear power plant control," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 51, no. 1, pp. 256-266, Feb. 2004.
- [8] X. J. Liu, P. Guan, and J. Z. Liu, "Power plant coordinated predictive control using neuro fuzzy model," in *Proc. of the 2006 American Control Conf.*, vol. 1, pp. 129-133, Minneapolis, Minnesota, US, Jun. 2006.
- [9] R. Cori and C. Maffezzoni, "Practical optimal control of a drum boiler power plant," *Automatica*, vol. 20, no. 2, pp. 163-173, Mar. 1984.
- [10] A. B. Abdenmour and K. Y. Lee, "A decentralized controller design for a power plant using robust local controllers and functional mapping," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 394-400, Jun. 1996.
- [11] W. Tan, H. J. Marquez, and T. Chen, "Multivariable robust controller design for a boiler system," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 735-742, Sep. 2002.
- [12] H. Peng, T. Ozaki, V. H. Ozaki, and Y. Toyoda, "A nonlinear exponential ARX model - based multivariable generalized predictive control strategy for thermal power plants," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 256-262, Mar. 2002.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸: مقایسه پاسخ دو سیستم به اغتشاش پله برای (الف) اختلاف فرکانس، (ب) افت فشار بخار تروتل و (ج) فشار درام.

ورودی‌های سوخت و هوا و بخار همگی در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند. علاوه بر این، فراجش و فروجش در پاسخ سیستم کاملاً حذف می‌شود. همچنین دینامیک فشار درام که تأثیر مستقیم در دینامیک سطح درام دارد در سیستم با کنترل کننده مود لغزشی، به مراتب بهتر از سیستم با کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی رفتار می‌نماید.

پیوست

مقادیر پارامترهای بلوک دیگر شکل ۲ در ارتباط با نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان به شرح زیر است [۱۹]

۱) پارامترهای بویلر

$$T_w = ۷ \text{ sec} \quad , \quad T_{fu} = ۵ \text{ sec}$$

$$C_d = ۱۰۸ \text{ sec} \quad , \quad C_{sh} = ۱۲ \text{ sec}$$

$$K_b = ۳,۷۸ \text{ sec}$$

۲) پارامترهای توربین و گاورنر

$$T_{ch} = ۰,۴ \text{ sec}$$

$$T_{rh} = ۷,۶۵ \text{ sec}$$

$$T_{co} = ۰,۶۳ \text{ sec}$$

$$R = ۰,۵ \text{ sec}$$

$$T_g = ۰,۲ \text{ sec}$$

$$۰ < u_1 < ۱ \quad , \quad |\dot{u}_1| \leq ۰,۰۷$$

$$۰ < u_2 < ۱ \quad , \quad -۰,۱ < |\dot{u}_2| \leq ۰,۱$$

$$F_{hp} = ۰,۲۹ \quad , \quad F_{ip} = ۰,۲۹ \quad , \quad F_{lp} = ۰,۴۲$$

۳) پارامترهای ژنراتور

$$M = ۶ \text{ sec}$$

$$D = ۰,۰۱$$

سیاوش گل محمدی سامانی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۷۷ در رشته مهندسی برق کنترل دانشگاه تهران به پایان رسانده و مقطع کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۷۹ در رشته مهندسی برق قدرت در دانشگاه اصفهان به پایان رسانده است. نامبرده از سال ۱۳۸۱ تا کنون به عنوان مهندس شیفت بهره‌برداری و کارشناس ابزار دقیق در شرکت مدیریت تولید برق اصفهان مشغول به کار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های کنترل غیرخطی، دینامیک سیستم‌های قدرت، منطق فازی، مهندسی نرم افزار، انرژی‌های نو.

رحمت‌الله هوشمند در سال ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه تهران دریافت نمود. سپس دوره دکتری خود را در مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۷۴ به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. نامبرده قبل از پیوستنش به دانشگاه اصفهان، در سال‌های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع و انتقال، سیستم‌های تجدید ساختار یافته، کاربرد سیستم‌های هوشمند در بهینه‌سازی.

محمد عطائی در سال ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه علم و صنعت ایران در گرایش کنترل دریافت نمود. سپس دوره دکتری خود را در مهندسی برق - کنترل در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی آغاز و با دریافت بورسیه تحصیلی با انجام تز مشترک با دانشگاه برمن آلمان، در سال ۱۳۸۲ این دوره را به پایان رسانده است. از سال ۱۳۸۳ بعنوان عضو هیات علمی به گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه اصفهان ملحق شده و اکنون دانشیار این گروه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تئوری کنترل و کاربرد آن، آنالیز سری‌های زمانی آشوبی و کاربرد کنترل در سیستم‌های قدرت.

- [13] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, and A. Jalili, "Load frequency control strategies: a state - of - the - art survey for the researcher," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 2, pp. 344-353, Feb. 2009.
- [14] J. Zhen, L. Yong, and W. X. Jie Liu, "Modeling and controller design of superheated steam temperature system based on SVM combining adaptive DMC," in *Proc. of the Sixth Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, pp. 533-538, Hong Kong, Aug. 2007.
- [15] K. Kunitomi, A. Kurita, Y. Tada, S. Ihara, S. Price, W. W. Richardson, L. M. Smith, and G. Electr, "Modeling combined - cycle power plant for simulation of frequency excursions," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 18, no. 2, pp. 724-729, May 2003.
- [16] Z. Hu, H. Fan, Y. He, "Robust controller design for boiler system," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Computation Technology and Automation*, pp. 445-449, Oct. 2008.
- [17] F. P. de Mello, "Boiler models for system dynamic performance studies," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 66-74, Feb. 1991.
- [18] IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Dynamic models for fossil fueled steam units in power system studies," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 753-761, May 1991.
- [۱۹] نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان، کتاب طراحی واحد ۵، بخش ابزار دقیق، GIE ایتالیا.
- [20] H. Moradi, F. Bakhtiari - Nejad, and M. Saffar - Avval, "Robust control of an industrial boiler system; a comparison between two approaches: sliding mode control & H_{∞} technique," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 2, pp. 1401-1410, Jun. 2009.
- [21] M. Falahpoor, M. Ataei, and A. Kiyoumars, "A chattering - free sliding mode control design for uncertain chaotic systems," *Chaos, Solitons, and Fractals*, vol. 42, no. 3, pp. 1755-1765, Mar. 2009.

Archive of SID