

تنظیم هوشمند بهره‌های کنترل کننده PI در حلقه‌های کنترلی نیروگاه بخاری

فرهاد محمودی

شرکت مدیریت تولید برق هرمزگان

چکیده

این مقاله به تنظیم بهره‌های کنترل کننده PI در حلقه‌های کنترلی یک نیروگاه بخاری می‌پردازد. تنظیم بهره‌های کنترل کننده بر اساس یک روش هوشمند مبتنی بر سیستم‌های خبره صورت می‌پذیرد. در ابتدا با استفاده از روش‌های سنتی، یک کنترل کننده اولیه طراحی می‌شود. معمولاً پاسخ به دست آمده از این روش‌ها، مشخصه‌های مناسبی ندارد و بایستی کنترل کننده دقیق‌تر تنظیم شود. سیستم خبره طراحی شده می‌تواند بهره‌های یک کنترل کننده PID یا کنترل کننده PI را به منظور یافتن پاسخ حلقه بسته بهتر، تغییر دهد. این تنظیم کننده خبره بر اساس تشخیص الگو عمل می‌کند و با به کارگیری قوانینی که تجربیات مهندسی فرآیند در آنها گنجانده شده است، کار تنظیم بهره‌ها را انجام می‌دهد. سیستم خبره نیازی به مدل فرآیند ندارد و مراحل تنظیم کنترل کننده، بر اساس مشاهده خروجی فرآیند انجام می‌شود. به منظور بررسی کارایی این روش یک مدل نیروگاه بخاری دارای درام به همراه دو حلقه کنترل آب تغذیه و کنترل سوخت در نظر گرفته شده است و این سیستم خبره جهت تنظیم بهره‌های کنترل کننده‌های PI در این دو حلقه کنترل استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، کارایی روش هوشمند پیشنهادی را در تنظیم کنترل کننده‌های PI این دو حلقه کنترلی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تنظیم کنترل کننده PI و PID، حلقه کنترل آب تغذیه، حلقه کنترل سوخت، مدل نیروگاه بخاری، سیستم خبره

۱- مقدمه

روشهای تحلیلی مناسب نیستند. بنابراین امروزه از روش‌های هوشمند مانند الگوریتم فازی [۳،۴،۵]، شبکه عصبی [۶،۷] و الگوریتم ژنتیک [۸] جهت تنظیم بهره‌های کنترل کننده PID استفاده می‌شود. در این مقاله از یک سیستم خبره^۱، به منظور تنظیم بهره‌های کنترل کننده PID یا PI استفاده می‌شود.

در تحقیقات مختلف، از سیستم‌های خبره برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID استفاده شده است [۹،۱۰]. از جمله افرادی که در این زمینه کار کرده است جاناتان لیت

در اغلب فرآیندهای صنعتی، کنترل کننده‌های PI یا PID رایج‌ترین نوع کنترل کننده‌ها می‌باشد. اگر چه روشهای مختلفی برای تنظیم کنترل کننده‌های PID ارائه شده است، اما در بیشتر آنها فرضیاتی مانند معلوم بودن مدل فرآیند، در نظر گرفته می‌شود [۱،۲]. اگر مدل ریاضی ساده‌ای برای فرآیند وجود داشته باشد، شاید بتوان روشی تحلیلی برای تنظیم کنترل کننده یافت، اما در دنیای واقعی، فرآیندها بسیار پیچیده می‌باشند و مدل‌های به دست آمده از آنها برای استفاده در

¹ Expert System

تعیین گردد. در این جا دو روش پاسخ پله حلقه باز و روش آزمایش فیدبک رله‌ای مطرح می‌شود.

۱-۲ روش پاسخ پله حلقه باز

در مقاله [۱۹] یک کنترل کننده PI مقاوم توسط پنتین و کیو برای کنترل سیستم‌های چندمتغیره پایدار ارائه شده است. این کنترل کننده را می‌توان در حالت خاص برای کنترل سیستم‌های یک ورودی- یک خروجی پایدار نیز به کار برد. بر این اساس یک سیستم تحت کنترل پایدار و کنترل کننده PI را به شکل زیر در نظر بگیرید.

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) \quad (1)$$

در این صورت مقادیر مثبت σ^* و ε^* وجود خواهند داشت به گونه‌ای که اگر بهره‌های کنترل کننده PI به شکل زیر انتخاب شوند، سیستم حلقه بسته پایدار خواهد بود.

$$K_p = \sigma \left(\frac{y(\infty)}{u_0} \cdot \frac{\dot{y}(0)}{u_0} \right)^{-1}, 0 < \sigma < \sigma^* \quad (2)$$

$$K_i = \varepsilon \left(\frac{y(\infty)}{u_0} \cdot \frac{\dot{y}(0)}{u_0} \right)^{-1}, 0 < \varepsilon < \varepsilon^*$$

پارامترهای روابط بالا از یک آزمایش پاسخ پله حلقه باز به دست می‌آید که در آن ورودی ثابت u_0 به ورودی سیستم اعمال شده و خروجی y ثبت می‌گردد. $y(\infty)$ بیانگر مقدار خروجی در حالت دائم و $\dot{y}(0)$ نشان دهنده مشتق خروجی در لحظه 0 می‌باشد.

۲-۲ روش آزمایش فیدبک رله‌ای

روش پاسخ فرکانسی زیگلر- نیکولز فرمول‌های ساده‌ای را برای بدست آوردن پارامترهای کنترل کننده PI بر حسب بهره نهایی^۲ (K_u) و دوره تناوب نهایی^۳ (T_u) ارائه می‌دهد. این فرمول‌ها در جدول زیر آمده است [۱].

جدول ۱ پارامترهای کنترل کننده PI، تعیین شده توسط روش

پاسخ فرکانسی زیگلر- نیکولز		
Controller	K	T_i
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$

در این حالت فرض شده است کنترل کننده PI به شکل زیر است.

$$U(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (3)$$

می‌باشد [۱۱]. وی سیستم خبره‌ای به منظور طراحی کنترل کننده PID یک ورودی- یک خروجی، برای فرآیندهای مرتبه ۲ ایجاد کرده است. در این کار برای مقایسه پاسخ‌ها با یکدیگر، به هر پاسخ یک امتیاز داده می‌شود؛ این امتیاز با توجه به مشخصه‌های مختلف پاسخ نظیر فراجش، زمان صعود و ... محاسبه می‌شود. تنظیم کننده خبره دیگری که توسط شناسا طراحی و ساخته شده است، قادر می‌باشد که بهره‌های کنترل کننده PI در طیف وسیعی از سیستم‌ها را با استفاده از یک پایگاه قوانین تنظیم کند [۱۲، ۱۳]. این تنظیم کننده بر مبنای تشخیص الگو عمل می‌کند و به سیستم‌های چند متغیره نیز اعمال شده است [۱۴]. در مقاله [۱۵] از الگوهایی که شناسا برای پاسخ حلقه بسته تعریف کرده است، استفاده می‌گردد و قوانین تنظیم بهره‌ها برای کنترل کننده‌های PID توسعه داده می‌شود و همچنین سیستم خبره طراحی شده برای تنظیم بهره‌های کنترل کننده‌های PID چند متغیره نیز به کار می‌رود.

مدلهایی برای توصیف دینامیک نیروگاه‌های بخاری معرفی شده است که می‌توان از آن‌ها به منظور بررسی کارایی روش‌های کنترل مختلف استفاده نمود. بل و آستروم یک مدل مرتبه سوم از یک سیستم متشکل از بویلر دارای درام، توربین و ژنراتور معرفی نموده‌اند که دینامیک‌های غالب یک واحد نیروگاه بخاری را ارائه می‌نماید [۱۶]. این مدل در سال‌های اخیر در مقالات زیادی جهت ارزیابی روش‌های کنترلی به کار گرفته شده است [۱۷، ۱۸] و بدین جهت از آن برای ارزیابی تنظیم کننده خبره پیشنهادی استفاده شده است.

بخش ۲ به معرفی روش‌هایی جهت تنظیم اولیه یک کنترل کننده PI می‌پردازد و بخش ۳، سیستم خبره تنظیم کننده کنترل کننده‌های PID را معرفی خواهد نمود. در بخش ۴، ابتدا مدل نیروگاه بخاری مطرح می‌شود و سپس روش تنظیم پیشنهادی جهت تنظیم دو کنترل کننده PI در دو حلقه کنترل آب تغذیه و کنترل سوخت یک نیروگاه بخاری دارای درام به کار رفته و نتایج به دست آمده ارائه می‌گردد. در نهایت در بخش ۵ نیز به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

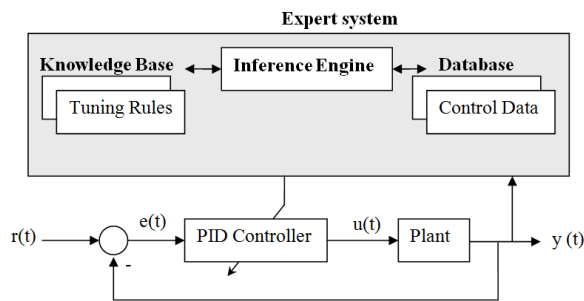
۲- تنظیم اولیه کنترل کننده PI

از آن جایی که تنظیم کننده خبره کار خود را از یک سری بهره اولیه آغاز می‌کند، ابتدا بایستی با استفاده از یکی از روش‌های موجود، بهره‌های اولیه‌ای برای کنترل کننده PI

² Ultimate Gain
³ Ultimate Period

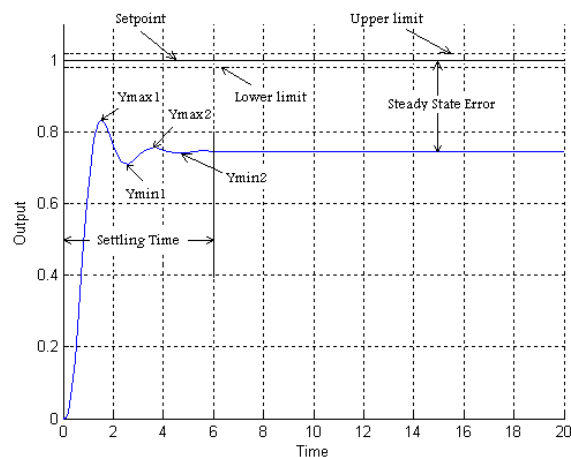
۳- تنظیم کننده خبره

در این بخش یک سیستم خبره برای تنظیم کنترل کننده-های PI یا PID معرفی می‌شود. دیاگرام مربوط به تنظیم کنترل کننده PID، با استفاده از سیستم خبره در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، سیستم خبره یک برنامه کامپیوتری است که تجربه مهندسی کنترل را در تنظیم بهره‌های PID، شبیه سازی می‌کند. این سیستم خبره بر مبنای الگوی پاسخ حلقه بسته عمل می‌کند. همچنین این تنظیم کننده، یک سیستم خبره مبتنی بر قوانین بوده و بهره‌های PID را با استفاده از تعدادی قانون تنظیم می‌کند. سیستم خبره شامل بخش‌های پایگاه داده، پایگاه دانش و موتور استنتاج می‌باشد.



شکل ۳ دیاگرام بلوکی کنترل کننده هوشمند PID

پایگاه داده شامل خصیصه‌های مختلف و الگوی پاسخ حلقه بسته می‌باشد. در شکل ۴ یک نمونه از پاسخ حلقه بسته و خصیصه‌های مختلفی از آن که برای سیستم خبره تعریف شده، آمده است. همچنین با توجه به این خصیصه‌ها، الگوهای مختلفی همچون بالازدگی- پایین زدگی، بالازدگی- بدون پایین زدگی، S شکل آهسته، ناپایدار و ... برای پاسخ حلقه بسته تعریف شده است [۱۲]. در شکل ۵ یک نمونه از این الگوها رسم شده است.



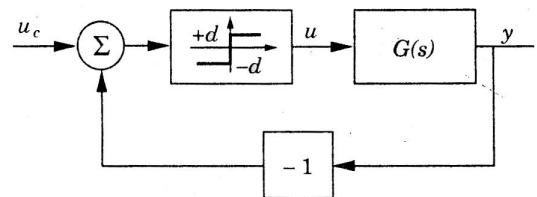
شکل ۴ خصیصه‌های مختلف یک پاسخ حلقه بسته

فرم مورد استفاده در تنظیم کننده خبره به شکل معادله (۱) می‌باشد و بنابراین بایستی تبدیلات لازم زیر صورت پذیرد.

$$K_p = K \quad (4)$$

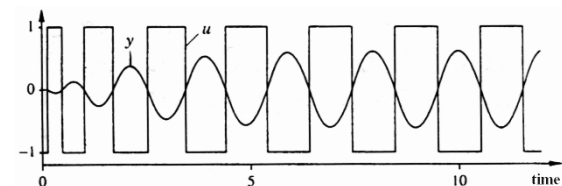
$$K_i = \frac{K}{T_i}$$

آزمایش فیدبک رله‌ای برای به دست آوردن بهره نهایی و دوره تناوب نهایی سیستم‌ها به کار می‌رود و توسط استروم و هاگلاند ارائه شده است [۱،۲۰]. ایده اساسی در این روش، این است که بسیاری از فرآیندها تحت فیدبک رله‌ای دارای نوسانات سیکل حدی هستند. نمودار بلوکی چنین سیستمی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱ سیستم خطی با کنترل فیدبک رله‌ای

سیگنال‌های ورودی و خروجی حاصل هنگامی که سیگنال فرمان u_c برابر صفر است، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ ورودی و خروجی یک سیستم با کنترل فیدبک رله‌ای

فرض کنید دامنه موج مربعی برابر d باشد، آنگاه دامنه مؤلفه اصلی بسط فوریه، برابر $4d/\pi$ خواهد بود. با اعمال این تقریب که همه هماهنگ‌های بالاتر قابل چشم‌پوشی هستند، در می‌یابیم که خروجی فرآیند، سیگنالی سینوسی با فرکانس ω_u و دامنه

$$a = \frac{4d}{\pi} |G(i\omega_u)| \quad (5)$$

است و در نتیجه داریم:

$$|G(i\omega_u)| = \frac{a\pi}{4d} = \frac{1}{K_u} \quad (6)$$

که در آن K_u را می‌توان به عنوان بهره معادل رله، برای انتقال سیگنال‌های سینوسی با دامنه a در نظر گرفت و در حقیقت K_u همان بهره نهایی می‌باشد. این بهره، بهره‌ای است که سیستمی با تابع تبدیل $G(s)$ را تحت کنترل تناسبی خالص به محدوده پایدار می‌آورد. به طور مشابه دوره تناوب $T_u = 2\pi/\omega_u$ نیز همان دوره تناوب نهایی است.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

۱-۴ مدل نیروگاه بخاری دارای درام

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی یک سیستم متشکل از بویلر دارای درام، توربین و ژنراتور که دینامیک‌های غالب یک نیروگاه بخاری ۱۶۰ مگاواتی با ورودی سوخت مایع را توصیف می‌نماید، به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۶]. این مدل متشکل از معادلات حالت مرتبه سه می‌باشد و با استفاده از قوانین فیزیکی و همچنین داده‌های تجربی به دست آمده است.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= 0.9u_1 - 0.0018u_2 P\% - 0.15u_3 \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{(0.73u_2 - 0.16)P\% - E}{10} \\ \frac{d\rho_f}{dt} &= \frac{14u_3 - (1.1u_2 - 0.19)P}{85} \end{aligned} \quad (۸)$$

که در آن P فشار بخار درام بر حسب (kg/cm^2) ، انرژی الکتریکی تولیدی بر حسب (MW) و ρ_f چگالی آب و بخار بر حسب (kg/m^3) است. ورودی‌های کنترلی به سیستم شامل مکان شیرهای کنترل دبی جرمی سوخت u_1 دبی بخار ورودی به توربین u_2 و دبی آب تغذیه ورودی به درام u_3 می‌باشد. این ورودی‌ها به دلیل ساختار فیزیکی عمل دهنده‌های آنها از نظر اندازه و نرخ تغییرات دارای محدودیت‌های زیر هستند.

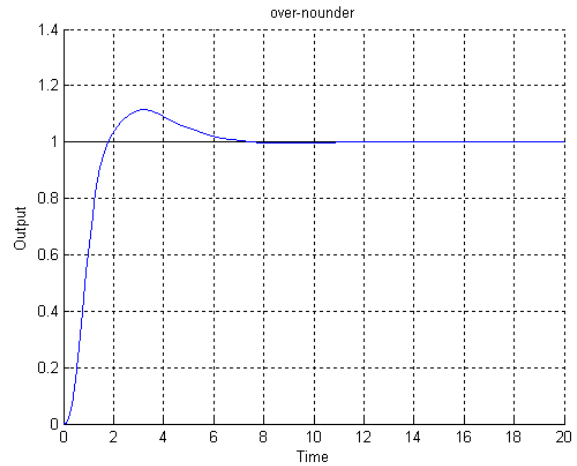
$$\begin{aligned} 0 &\leq u_1, u_2, u_3 \leq 1 \\ -0.007 &\leq \dot{u}_1 \leq 0.007 \\ -2 &\leq \dot{u}_2 \leq 0.2 \\ -0.05 &\leq \dot{u}_3 \leq 0.05 \end{aligned} \quad (۹)$$

سطح آب در درام L نیز بر حسب (m) از روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} L &= 0.05(0.13073\rho_f + 100\alpha_s + q_e / 9 - 67.975), \\ \alpha_s &= \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8P - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304P)}, \\ q_e &= (0.854u_2 - 0.147)P + 45.59u_1 \\ &\quad - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

که در آن α_s کیفیت بخار و q_e نرخ بخار شدن آب در درام بر حسب (kg/s) است. شکل ۶ این سیستم را نشان می‌دهد و در شکل ۷ نیز یک سیستم کنترل شامل دو کنترل‌کننده PI جهت کنترل سطح درام در حلقه کنترل آب تغذیه و کنترل فشار بخار درام در حلقه کنترل سوخت، پیشنهاد شده است.

در پایگاه دانش قوانین مربوط به تنظیم بهره‌های PID وجود دارد. این قوانین به صورت اگر-آنگاه بوده و با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد بر روی سیستم‌های مختلف طراحی شده‌اند. به عنوان مثال می‌توان گفت اگر الگوی پاسخ بالازدگی-بدون پایین زدگی است، بایستی بهره انتگرالی کاسته شود.



شکل ۵ یک نمونه از الگوی پاسخ حلقه بسته (بالازدگی-بدون پایین زدگی)

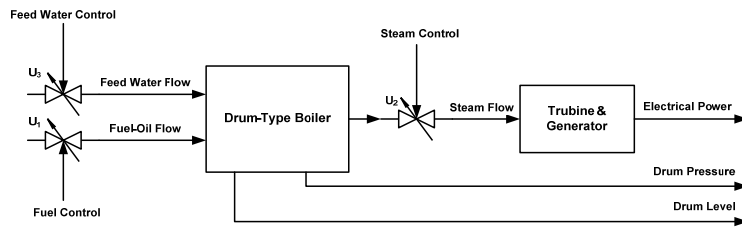
موتور استنتاج روند حل مساله را به پیش می‌برد. ابتدا سیستم خبره با استفاده از بهره‌های اولیه پاسخ حلقه بسته را به دست می‌آورد. سپس با استفاده از پایگاه قوانین، بهره‌های PID به منظور بهبود پاسخ، تغییر داده می‌شود. در این سیستم خبره تمامی قوانین پایگاه دانش از اولویت یکسان برخوردارند و ممکن است در هر گام یک یا چند قانون اجرا شود. در حالتی که در یک گام تنظیم، چند قانون با هم اجرا شوند، اثر آنها ترکیب شده و به بهره‌ها اعمال می‌گردد. گام‌های تنظیم تا وقتی ادامه می‌یابد که پاسخ بهتری یافت نشود و یا اینکه پاسخ‌ها پیوسته بدتر شوند.

در این تحقیق به منظور تعیین بهینگی پاسخ‌ها، یک تابع هزینه جدید، بر مبنای زمان نشست، خطای حالت دائم و بالازدگی پاسخ به صورت زیر تعریف شده است:

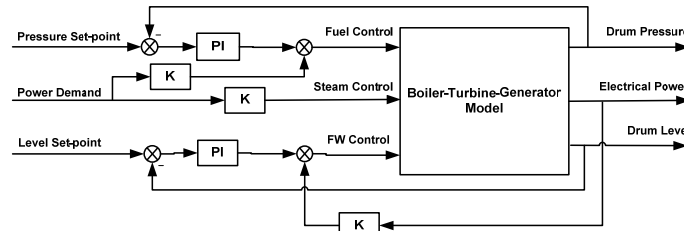
$$CF = W_{st} \frac{ST}{Tf} + W_{sse} \frac{|SSE|}{ref} + W_{os} \frac{Y_{max1} - Y_{min1}}{ref} \quad (۷)$$

که در آن W_{st} ، W_{sse} و W_{os} ضرایب وزنی هستند. این مقادیر وزنی با توجه به اهمیت خصیصه‌های مختلف پاسخ حلقه بسته، تعیین می‌شود. همچنین Tf و ref به ترتیب زمان نهایی شبیه‌سازی و مقدار ورودی مرجع سیستم حلقه بسته می‌باشد. هر چه مقدار تابع هزینه کمتر باشد به این معنی است که پاسخ حلقه بسته، در مجموع، مشخصه‌های مناسب‌تری دارد.

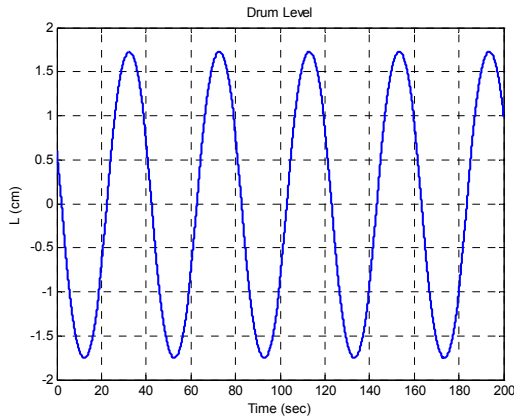
⁴ Actuator



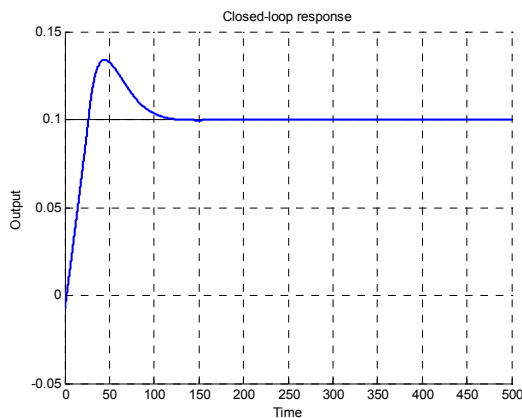
شکل ۶ سیستم بویلر، توربین و ژنراتور



شکل ۷ ساختار سیستم کنترل پیشنهادی



شکل ۸ پاسخ سطح درام در آزمایش فیدبک رله‌ای با دامنه رله 0.4



شکل ۹ پاسخ سطح درام (L (m)) حول نقطه کار به ازای پارامترهای اولیه کنترل کننده

سیستم خبره پس از طی ۳۰ گام تنظیم (شکل ۱۰)، بهترین بهره‌ها را به شکل زیر ارائه می‌دهد.

$$\begin{aligned} K_p &= 1.7349 \\ K_i &= 1.9354 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (13)$$

همان گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، از شیر ورودی سوخت جهت کنترل فشار درام و از شیر ورودی آب تغذیه جهت کنترل سطح درام استفاده می‌گردد. انرژی الکتریکی خروجی نیز به صورت دستی توسط اپراتور با استفاده از تغییر مکان شیر ورودی بخار توربین تنظیم می‌شود.

این سیستم یک سیستم چندمتغیره می‌باشد و حلقه‌های کنترل مختلف بر روی هم تأثیر گذار هستند؛ به علاوه سیستم فوق یک سیستم غیرخطی است و یک نقطه تعادل آن به شکل زیر می‌باشد که مطالعات و تنظیمات لازم حول این نقطه کار صورت می‌گیرد.

$$\begin{aligned} P &= 108 \text{ kg/cm}^2 & E &= 66.65 \text{ MW} & L &= 0 \text{ m} \\ u_1 &= 0.34 & u_2 &= 0.69 & u_3 &= 0.433 \end{aligned} \quad (11)$$

۲-۴ تنظیم حلقه کنترل آب تغذیه

جهت به دست آوردن بهره‌های اولیه برای کنترل کننده PI حلقه کنترل آب تغذیه از آزمایش فیدبک رله‌ای و فرمول زیگلر-نیکولز استفاده می‌شود. این حلقه تحت کنترل فیدبک رله‌ای دارای نوسانات سیکل حدی است. پاسخ این آزمایش در شکل ۸ رسم شده است. بر این اساس بهره نهایی $K_u=0.055$ و دوره تناوب نهایی $T_u=40.28 \text{ sec}$ به دست می‌آید. در نتیجه بر اساس فرمول زیگلر-نیکولز بهره‌های اولیه کنترل کننده چنین خواهد شد

$$\begin{aligned} K_p &= 11.7756 \\ K_i &= 0.3654 \end{aligned} \quad (12)$$

و پاسخ به دست آمده به ازای این بهره‌ها در شکل ۹ آمده است.

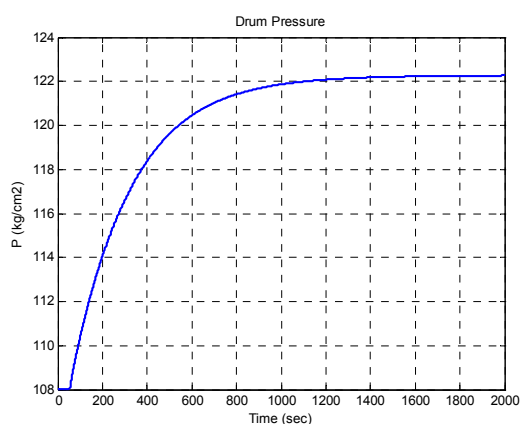
۳-۴ تنظیم حلقه کنترل سوخت

جهت به دست آوردن بهره‌های اولیه برای کنترل‌کننده PI حلقه کنترل سوخت از آزمایش پاسخ پله حلقه باز استفاده می‌گردد. این حلقه در صورتی که حلقه آب تغذیه تحت کنترل باشد، پایدار خواهد بود. پاسخ این آزمایش در شکل ۱۳ رسم شده است. با مشاهده پاسخ این آزمایش و انتخاب $\sigma = \varepsilon = 0.01$ بهره‌های اولیه کنترل‌کننده چنین به دست می‌آید.

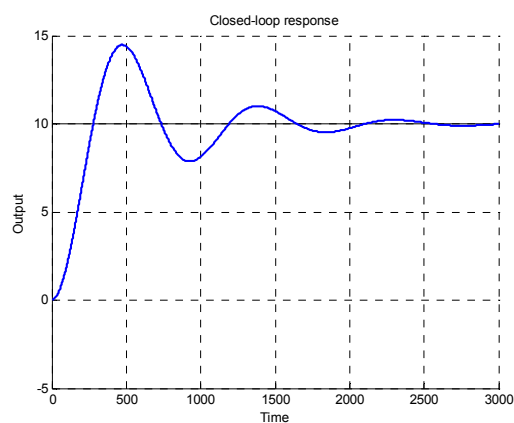
$$K_p = 4.3798 \times 10^{-5}$$

$$K_i = 4.3798 \times 10^{-5} \quad (14)$$

و پاسخ به دست آمده به ازای این بهره‌ها در شکل ۱۴ آمده است.



شکل ۱۳ پاسخ فشار درام در آزمایش پاسخ پله حلقه باز با دامنه ورودی 0.05



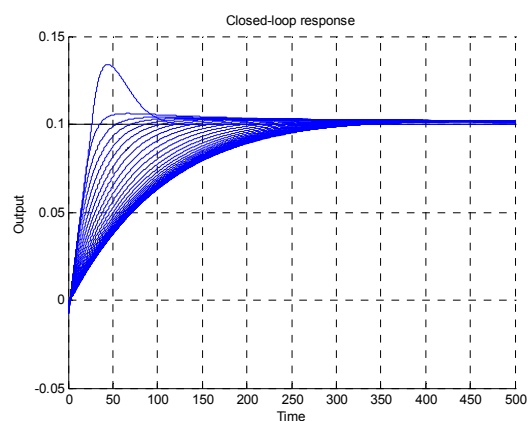
شکل ۱۴ پاسخ فشار درام P (kg/cm^2) حول نقطه کار به ازای پارامترهای اولیه کنترل‌کننده

سیستم خبره پس از طی ۱۰ گام تنظیم (شکل ۱۵)، بهترین بهره‌ها را به شکل زیر ارائه می‌دهد.

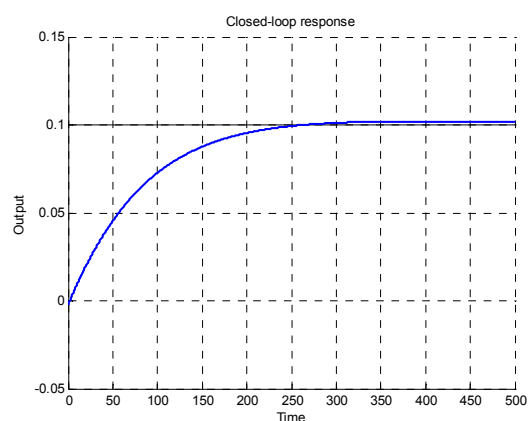
$$K_p = 5.5408 \times 10^{-5}$$

$$K_i = 5.3404 \times 10^{-6} \quad (15)$$

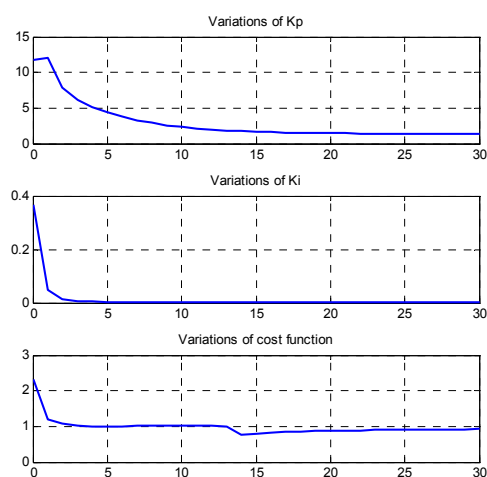
پاسخ حلقه بسته مربوط به این بهره‌ها در شکل ۱۱ رسم شده است.



شکل ۱۰ پاسخ‌های سطح درام L (m) در طول مراحل تنظیم پارامترها توسط تنظیم‌کننده خبره



شکل ۱۱ پاسخ سطح درام L (m) حول نقطه کار به ازای پارامترهای تنظیم شده

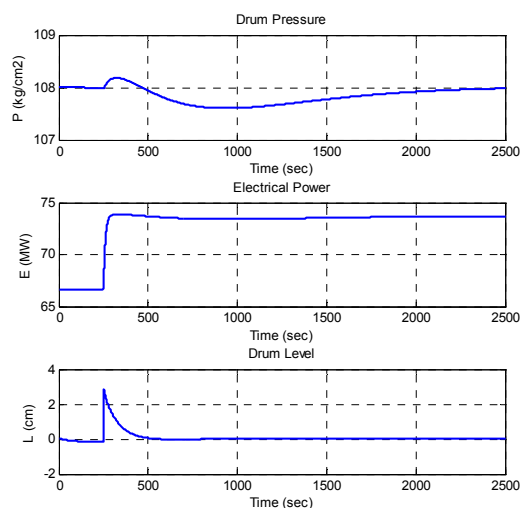


شکل ۱۲ تغییرات پارامترهای کنترل‌کننده سطح درام و تابع هزینه در طول گام‌های تنظیم

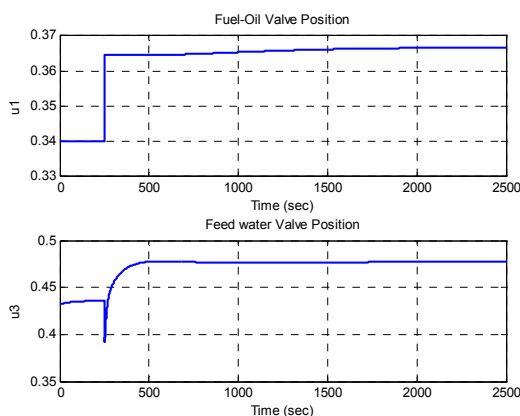
تغییرات پارامترهای کنترل‌کننده سطح درام و تابع هزینه مربوطه در طول گام‌های تنظیم نیز در شکل ۱۲ آمده است.

۴-۴ بررسی کارایی سیستم کنترل تنظیم شده در زمان تغییر بار

به منظور نشان دادن کارایی سیستم کنترل تنظیم شده، نقطه تنظیم فشار درام P در 108 kg/cm^2 و نقطه تنظیم سطح درام L در 0 cm نگه داشته می‌شود و مکان شیر ورودی بخار توربین در لحظه $t=250 \text{ sec}$ از 0.69 به 0.74 تغییر داده می‌شود تا انرژی الکتریکی خروجی نیروگاه از 66.65 MW به 73.71 MW افزایش یابد. در این حالت پاسخ فشار درام، انرژی الکتریکی خروجی و سطح درام در شکل ۱۸ رسم شده است که کارایی سیستم کنترل تنظیم شده را نشان می‌دهد؛ چرا که سطح و فشار درام به شکل مناسبی کنترل شده‌اند. به علاوه تغییرات سیگنال‌های کنترلی یعنی مکان‌های شیر ورودی سوخت و شیر ورودی آب تغذیه نیز در شکل ۱۹ آمده است که نشان می‌دهد این سیگنال‌ها از نظر فیزیکی قابل قبول و قابل پیاده سازی هستند.

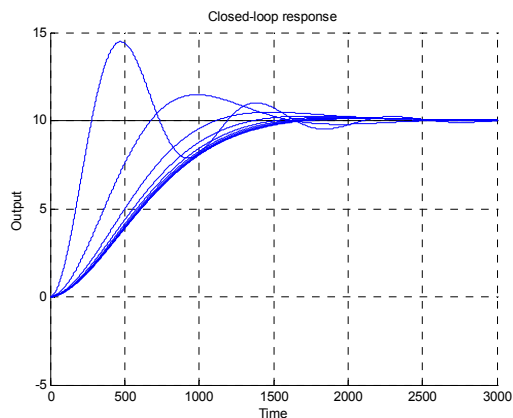


شکل ۱۸ پاسخ سیستم به باز شدن ۵ درصدی شیر ورودی بخار توربین در لحظه $t=250 \text{ sec}$

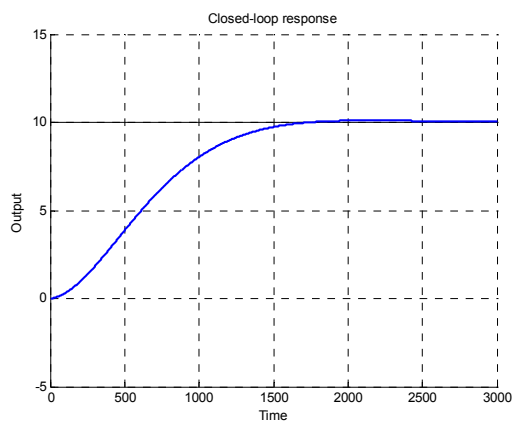


شکل ۱۹ تغییرات سیگنال‌های کنترلی نسبت به باز شدن ۵ درصدی شیر ورودی بخار توربین در لحظه $t=250 \text{ sec}$

پاسخ حلقه بسته مربوط به این بهره‌ها در شکل ۱۶ رسم شده است.

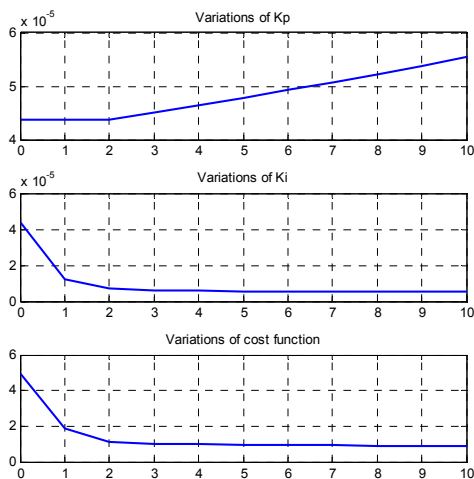


شکل ۱۵ پاسخ‌های فشار درام P (kg/cm^2)، در طول مراحل تنظیم پارامترها توسط تنظیم کننده خبره



شکل ۱۶ پاسخ فشار درام P (kg/cm^2) حول نقطه کار به ازای پارامترهای تنظیم شده

تغییرات پارامترهای کنترل کننده فشار درام و تابع هزینه مربوطه در طول گام‌های تنظیم نیز در شکل ۱۷ آمده است.



شکل ۱۷ تغییرات پارامترهای کنترل کننده فشار درام و تابع هزینه در طول گام‌های تنظیم

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از یک سیستم خبره یا هوشمند جهت تنظیم بهره‌های کنترل‌کننده‌های PI در دو حلقه کنترلی یک نیروگاه بخاری که دارای تداخل نیز هستند، استفاده گردید. این سیستم خبره با استفاده از روش تشخیص الگو و یک سری قوانین تنظیمی، بهره‌های اولیه کنترل‌کننده را در جهت بهبود پاسخ حلقه بسته تغییر می‌دهد چرا که تابع هدف تعریف شده در مراحل تنظیم هر دو حلقه کنترلی روند تقریباً نزولی را طی نموده است و نوسانات و بالا زدگی‌های موجود در پاسخ‌های حلقه بسته اولیه، از میان رفته است. کنترل‌کننده‌های تنظیم شده در حالت اعمال اغتشاش به آن‌ها نیز، از طریق افزایش بار تولیدی نیروگاه، کارایی مناسبی از خود نشان می‌دهند و کمیت‌های سطح درام و فشار درام به خوبی تنظیم می‌شوند. در طول کلیه مراحل تنظیم اولیه و یا تنظیم دقیق کنترل‌کننده‌ها توسط سیستم خبره، نیازی به مدل سیستم تحت کنترل نمی‌باشد و تنها از پاسخ‌های خروجی سیستم تحت کنترل، استفاده می‌گردد.

مراجع

- [8] C. Vlachos, D. Williams and J. B. Gomm, "Genetic Approach To Decentralized PI Controller Tuning For Multivariable Processes", IEE Proceedings of Control Theory and Applications, Vol. 146, Issue 1, January 1999.
- [9] R. Devanathan, C. C. Keonq, T. L. Pei and Y. T. Ting, "Expert PID Controller for an Industrial Process", Fourth IEEE Region 10 International Conference, 22-24 November, 1989.
- [10] K. A. Toh and R. Devanathan, "Expert Autotuner for Multiloop SISO Controllers", Proceeding of the International Symposium on Intelligent Control, Chicago, August 1993.
- [11] J. Litt, "An Expert System to Perform On-line Controller Tuning", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 11, Issue 3, April 1991.
- [12] M. H. Shenassa, "Expert Tuners for PI Controllers", Ph.D. Thesis, University of Salford, 1988.
- [13] M. H. Shenassa, "Single Step Expert Tuner for PI Controller Incorporating Intelligent Identifier", First International Conference in Modeling, Simulation and Applied Optimization, Sharjeh, 1-3 Feb, 2005.
- [14] M. H. Shenassa, "Rule-Based Expert Tuner for Multivariable PID Controller", Yemeni Science Conference 2004, Sana'a, 11-13 October, 2004.
- [15] F. Mahmoodi, M.H. Shenassa and A. Khaki Sedigh, "Design of Expert PID Controllers for Nonlinear Multivariable Systems", The Second International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization, Abu Dhabi, UAE, March 24-27, 2007.
- [16] R.D. Bell and K.J. Astrom, "Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160 MW unit", Lund Institute of Technology, Sweden, Re TFRT-TFRT3192, 1987.
- [17] X. Liu and X. Kong, "Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler-turbine system", Journal of Process Control, Vol. 23, pp. 1023-1040, 2013.
- [18] X. Wu, J. Shen, Y. Li, and K.Y Lee, "Data-Driven Modeling and Predictive Control for Boiler-Turbine Unit", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 28, No. 3, September 2013.
- [19] J. Penttinen and H. N. Koivo, "Multivariable Tuning Regulators for Unknown Systems", Automatica, Vol. 16, pp. 393-398, 1980.
- [20] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive Control, 2nd Edition", Prentice Hall, 1994.
- [1] K. J. Astrom and T. Haggglund, "PID Controllers, 2nd Edition", Instrument Society of America, 1995.
- [2] A. O'Dwyer, "Handbook of Pi and Pid Controller Tuning Rules", Imperial College Press, 2003.
- [3] J. Sun, J. Wang, H. Fang and Y. Wu, "Study on the fuzzy adaptive PID algorithm for control system of biomass boiler", International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010.
- [4] H. B. Kazemian, "Developments of fuzzy PID controllers", Journal of Expert Systems, Vol. 22, No. 5, November 2005.
- [5] S. Tzafestas and N. P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, pp. 365-371, October 1990.
- [6] S. Akhyar and S. Omatu, "Neuromorphic Self-Tuning PID Controller", IEEE International Conference on Neural Networks, vol.1, pp. 552-557, April 1993.
- [7] T. Yamamoto, T. Oki and S. L. Shah, "Design of a Multivariable Neural-Net Based PID Controller", International Conference on Neural Information Processing, Vol. 3, 16-20 November, 1999.