طراحی کنترل کننده مقاوم برای کنترل بار- فرکانس در نیروگاه گازی

عاطفه حسینی[۱] ، جواد مشایخی فرد [۲*]، باقر مهذبی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
sabz_2008@yahoo.com
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
mashayekhi@iaus.ac.ir
۳- مربی، گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران
mohazzabi_b@iaus.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۳۱

چکیده: طراحی و کنترل سیستم های قدرت با وجود پایداری و قابلیت اطمینان انجام می پذیرد. فرکانس به عنوان یکی از متغیرهای مهم برای تثبیت سرعت بارهای موتوری استفاده می شود. با توجه به نقش حیاتی توربین های گازی در تولید برق بدون اثر مخرب بر محیط زیست دراین مقاله با استفاده از مدل روون برای سیستم قدرت فرکانس متغیر، به بررسی کنترل بار- فرکانس با حلقه کنترل ثانویه پرداخته شده است. برای این منظور طراحی توسط تابع تبدیل و فضای حالت انجام شده است. ابتدا کنترل کننده کلاسیک PID با بهره گیری از الگوریتم های CHR و CC به منظور افزایش سرعت سیستم، حذف اثر اغتشاش و کاهش حداکثر فراجهش طراحی شده است. سپس کنترل کننده بهینه خطی LQR استفاده شده است. در نهایت با توجه به وجود عدم قطعیت و اغتشاش، کنترل کننده مقاوم H_2/H_∞ به منظور تحقق سه شرط عملکرد نامی، پایداری مقاوم و کاهش اغتشاش مورد توجه قرار گرفته است. به کمک نرم افزار متلب، نتایج بدست آمده با / بدون حضور اغتشاش بررسی و مقایسه گردیده است. نتایج شبیه سازی ها، در بین تمام روشهای کنترلی مورد بررسی، موفقیت روش پیشنهادی کنترل مقاوم H_2/H_∞ از لحاظ سرعت همگرایی و دامنه نوسانات را نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: **کنترل بار – فرکانس ، نیروگاه گازی، PID مقاوم، کنترل مقاوم H_2/H_∞، کنترل کننده بهینه خطی LQR**

۱- مقدمه

هدف اصلی از طراحی، اجرا و توسعه شبکه برق در سیستم های قدرت، تولید توان الکتریکی و تحویل آن به مصرف کننده است. بهره برداری پایدار از سیستم های قدرت مستلزم توانایی آنها در حفظ تعادل بین توان های الکتریکی خروجی نیروگاهها و بارهای الکتریکی سیستم است [۱]. در مطالعات پایداری در یک شین، با افزارها و وسایل متنوع از قبیل لامپ های فلورسنت و معمولی، یخچال، گرم کننده، کمپرسور، موتورهای القایی و DC و ... روبرو هستیم. لذا تقریب و تخمین ترکیب بار مشکل است. از طرفی این ترکیب تحت تأثیر عواملی از قبیل زمان وضعیت آب و هوا و وضعیت اقتصادی متغیر است[۲]. تحویل انرژی الکتریکی مناسب، ایمن و پیوسته برای مصرف کننده، لزوم طراحی سیستم قدرت را مشخص می کند. از طرفی پدیده رشد بار یا افزایش تقاضا باید در طراحی اولیه سیستم مدنظر قرار بگیرد تا شبکه پایدار باقی بماند. فرکانس یکی از مهمترین پارامترهای موجود در عملکرد سیستم قدرت است[۳] و کنترل بار -فرکانس یکی از مهمترین مشکلات سیستم های قدرت می باشد که ناشی از عدم تطابق بین تولید و مصرف برق واقعی به صورت تغییرات لحظه ای مصرف برق می باشد. در نتیجه فرکانس سیستم قدرت ممکن است به دلیل تغییرات پیوسته بار از محدوه مجاز خارج شده که منجر به مشکلات کیفیت قدرت می شود. هدف اصلی کنترل فرکانس- بار در سیستمهای قدرت، تولید توان الکتریکی در یک سیستم به هم پیوسته است به صورتی که تا حد امکان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

قابل اطمینان و اقتصادی باشد و در عین حال ولتاژ ها و فرکانس در درون محدوده مجاز قرار بگیرند؛ [۱]. چنانچه تغییر ناگهانی بار در هر منطقه کنترل یک سیستم قدرت بهم پیوسته رخ دهد، انحراف فرکانس و همچنین انحراف قدرت در خطوط انتقال، وجود خواهد داشت. برای عملکرد رضایت بخش سیستم قدرت، باید فرکانس درمحدوده مجاز ثابت باشد. انحرافات فرکانس می تواند به طور مستقیم بر عملکرد و پایداری سیستم تاثیر گذارد. انحرافات زیاد در فرکانس می تواند به تجهیزات آسیب برساند، عملکرد بارگیری را کاهش دهد، سبب بار اضافی در خطوط انتقال شده و بر عملکرد سیستم های حفاظتی تأثیر بگذارد. این وقایع می تواند در نهایت منجر به فروپاشی سیستم شود[۴].

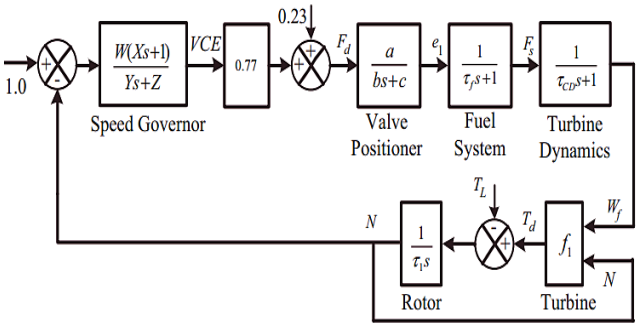
در جهت حفظ پایداری یک سیستم قدرت، باید در نظر داشت که نظارت محلی یا همان حلقه کنترل اولیه بوسیله گاورنر و دریچه بخار، تنها بخشی از خروجی ژنراتور را برای جبران تغییر بار، میتواند تنظیم کند. اثرات عدم وجود کنترل ثانویه در نتایج بدست آمده در شبیه سازی ها، نشان دهنده تغییرات زیاد فرکانس در حالت گذرا می باشد که باعث فروپاشی سیستم می گردد. بنابراین یک کنترل کننده اضافی برای تأمین و پشتیبانی فرکانس سیستم بدون توجه به بار ضروری است. این حلقه کنترل اضافی یا همان کنترل ثانویه[۱] ، LFC نامیده می شود[۱]. به طور معمول و رایج، طراحی و کنترل سیستم های قدرت با درنظرگرفتن معیارهای کلیدی پایداری، قابلیت اطمینان و امنیت انجام می شود، که در این راستا یکی از متغیرهای بسیار مهم، فرکانس می باشد. افت زیاد فرکانس منجر به ایجاد جریان های شدید مغناطیسی در موتورهای القایی و ترانسقورماتورها می شود و صدمات جبران ناپذیری به سیستم قدرت وارد می نماید[۵]. به همین علت طراحی کنترل کننده های ثانویه به روش های مختلف در سیستم های قدرت امری ضروری است. در شش دهه گذشته، پیشرفت تحقیقاتی زیادی در مورد LFC انجام شده است. در فاز اول کنترل کننده فرکانس بار براساس استراتژی کنترل متمرکز بود[۶] ، که عمدتاً نیاز به تبادل اطلاعات از راه دور، همراه با افزایش محاسبات و پیچیدگی های ذخیره سازی آنها گسترش یافت[۷] . برای غلبه بر محدودیت، LFC غیر متمرکز توسعه یافته است، که هر منطقه کنترل خود را بر اساس متغیرهای حالت موجود محلی اجرا می کند. در میان انواع مختلف LFC غیر متمرکز، که به طور گسترده در صنعت برق کار می کنند کنترل PID یکی از آنهاست. پیاده سازی کنترل کننده PID ساده است اما زمان نشست ۱۰ تا ۲۰ ثانیه دارد و انحراف فرکانس بزرگ تولید می کند[۵]. در یک مدل سیستم قدرت، پارامترها تقریباً هر دقیقه نوسان دارند، برای حل این مشکل و غلبه بر عدم قطعیت ها، روش های کنترل مقاوم H_∞ و کنترل کننده های تطبیقی برای سیستم قدرت اعمال می شوند[۸]. این کنترل کننده ها نه تنها عدم قطعیت های پارامترها را شناسایی می کنند، بلکه خطای کنترل ناحیه[۲] (ACE) را نیز تنظیم می کنند. در [۹] ، کنترل کننده غیر متمرکز مرتبه دوم مد لغزشی بر پایه کنترل بار فرکانس در شبکه قدرت طراحی شده است. در[۱۰] با استفاده از شبکه عصبی سیستم قدرت دو ناحیه ای طرحی شده است. پارامترهای سیستم توسط کنترل کننده فازی نوع دو مشخص شده اند. سپس مقایسه با PI ، PID ، فازی PI و شبکه عصبی اثربخشی کنترل کننده مذکور را نشان می دهد. در [۱۱] یک هماهنگ کننده هوشمند برای خازن های سری کنترل شده با گیت[۳] (GCSC) و کنترل تولید خودکار[۴] (AGC) در سیستم برق چند ناحیه ای می پردازد. پارامترها به روش آنلاین و از طریق منطق فازی تنظیم می شوند که در آن الگوریتم سینوس کسینوس برای بهینه سازی استفاده شده است. مقایسه با الگوریتم کلنی مصنوعی زنبور عسل ، الگوریتم ژنتیک ، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بهبود یافته و الگوریتم بهینه سازی کلنی مورچه موفقیت روش مذکور را نشان می دهد. در [۱۲] یک کنترل کننده با استفاده از تئوری H_∞ برای حذف نوسانات فرکانس در یک سیستم مقیاس کوچک متشکل از ماشین های الکتریکی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده طراحی شده است. در [۱۳] مدل سازی و شبیه سازی نوع خاصی از سیستم توربین گازی انجام شده است. الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه سازی سیستم و تعیین پایگاه قواعد فازی ساختار کنترل کننده فازی اضافه شده است. در این مقاله با ارائه یک مدل برای سیستم قدرت فرکانس متغیر، به بررسی کنترل بار- فرکانس بار در حالت- سیستم کنترل گاورنر(حلقه کنترل اولیه)و بدون کنترل ثانویه پرداخته شده است. روش پیشنهادی کنترل مقاوم برای رسیدن به اهداف پایداری مقاوم، عملکرد نامی و کاهش نویز می باشد و با کنترل کننده PID با دو روش تنظیم ضرایب CHR وCC و کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی خطی مقایسه می گردد. برای این منظور ابتدا مدل دینامیکی سیستم قدرت فرکانس متغیر بدست آمده است. سپس به طراحی کنترل کننده های PID، کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی خطی و کنترل کننده H_∞/ H_2 پرداخته و در نهایت شبیه سازی و مقایسه نتایج انجام شده است.

۲- مدل دینامیکی سیستم قدرت فرکانس متغیر

از گذشته تاکنون تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت پیچیده با انتخاب استراتژی‌های مختلف کنترلی انجام شده است. با این وجود، کنترل و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های قدرت به دلیل دینامیک‌های غیرخطی پیچیده و متغیر با زمان به علت نداشتن یک مدل دقیق و قابل اعتماد، همواره یک چالش جدی بوده است. مدل توربین گازی توسط روون در ۱۹۸۳ ارائه گردید[۱۴]. معادلات حاکم بر هر یک از اجزای سازنده توربین های گازی با انجام آزمایشات مناسب تولید می شوند. تنظیم کننده سرعت ، موقعیت یاب شیر ، سیستم سوخت ، توربین و روتور از اجزای اصلی نیروگاه گازی هستند. مدل شکل (۱) [۱۵] شامل گاورنر، توربین و ژنراتور بوده و یک مدل جامع به شمار می‌رود. با توجه به شکل (۱، سیستم قدرت توان بالا دارای اجزای اصلی گاورنر سرعت، موقعیت‌دهنده‌ی شیر، سیستم سوخت، توربین و روتور است. مدل مورد نظر تک ورودی-تک خروجی بوده و متغیر ورودی T_L(گشتاور بار) و متغیر خروجی N(سرعت روتور توربین) می باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

X، Y، Z، مقادیر ثابت تنظیم کننده سرعت، W بهره گاورنر، a، b، c مقادیر ثابت بلوک موقعیت دهنده شیر، τ_f ثابت زمانی سیستم سوخت، τ_{CD} ثابت زمانی تخلیه کمپرسور، τ_1 ثابت زمانی روتور توربین. می باشد.



شکل (۱): مدل سیستم قدرت فرکانس متغیر مبتنی بر گاورنر و توربین [۱۵]

برای تکمیل مدل سیستم قدرت با توجه به رابطه گشتاور و توان الکتریکی ژنراتور، متغیر ورودی توان اکتیو ژنراتور خواهد بود.

۳- طراحی کنترل کننده

۳-۱- کنترل کننده PID

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، از کنترل‌کننده‌ی تناسبی P، تناسبی- مشتق‌گیر PD، تناسبی-انتگرال‌گیر PI و کنترل‌کننده‌ی تناسبی- انتگرال‌گیر - مشتق‌گیر PID به‌عنوان ساختار اصلی کنترل استفاده می‌شود. شکل کلی یک کنترل‌کننده‌ی PID به‌صورت (۱) است.

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}) \qquad (۱)$$

که در آن، u فرمان کنترل و e خطای فرآیند ($e = y_d - y$) است. روش چین-رونز-رسویک [۵] CHR به منظور تنظیم خروجی بر روی مقدار مرجع مطلوب به ساختار کنترل‌کننده‌ی کلاسیک PID اضافه می‌شود [۱۶] . به علاوه، این روش تنظیم قادر خواهد بود که همزمان سرعت پاسخ را بهبود بخشد و دامنه‌ی فراجهش را کاهش دهد. یکی دیگر از روش‌های تنظیم کنترل‌کننده‌ی کلاسیک PID، روش کوهن-کون CC[۶] می‌باشد [۱۷].

در این روش هم همانند روش CHR، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID بر اساس اطلاعات به دست آمده از پاسخ پله‌ی حلقه باز سیستم مورد بررسی قابل استخراج است. هدف حذف اثر اغتشاش می باشد. نسبت تنزل ۰,۲۵ و فاصله قطبها از مبدا طوری تنظیم می گردد تا انتگرال خطا کمینه شود. روابط تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID به کمک روش های CHR و CC در(۲) آمده است[۱۶] .

۳-۲ کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی خطی LQR [۷]

طراحی فیدبک حالت برای پایدارسازی و بهبود عملکرد سیستم های خطی بر مبنای جایابی قطب ارائه گردید. تعیین مکان قطبهای حلقه بسته در توصیف رفتار مطلوب مورد نظر طراح بسیار مهم و امری دشوار است. با انتخاب بهینه قطبهای حلقه بسته، می توان به سرعت دلخواه و اندازه قابل قبول سیگنال کنترلی دست یافت. در کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی رگولاتور درجه دوم خطی LQR، هدف آن است که قانون کنترل به گونه‌ای طراحی شود که تابع هزینه‌ی J در (۳) حداقل گردد[۱۸].

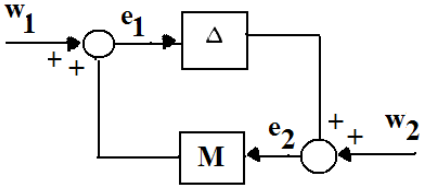
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$J = \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt$$

$$u(t) = -Kx(t), K = R^{-1}B^T P,\ A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \qquad (۳)$$

۳-۳ طراحی کنترل کننده H_2/H_∞

وجود عدم قطعیت در یک سیستم واقعی سبب می گردد با تئوری سیستمهای کنترل خطی و مدل ریاضی نتوان یک سیستم را بطور کامل کنترل نمود. از این رو اهداف مختلفی برای یک سیستم در نظر گرفته می شود: عملکرد نامی و مقاوم ، پایداری نامی و مقاوم، حداکثر فراجهش، زمان نشست و... . نوع عدم قطعیت نیز در بررسی سیستم بسیار تاثیر گذار است. عدم قطعیت با انحراف جمع شونده شکل (۲) ($\Delta_f = 0$) را در نظر بگیرید.



شکل(۲): مدل $M - \Delta$

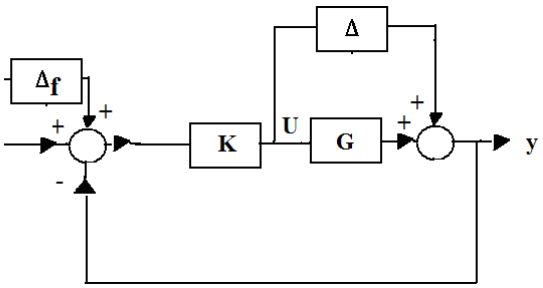
$$G_c(s) = K_p(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s}) \quad CHR: \quad K_p = \frac{0.95}{a}, T_i = 1.4T,\ T_d = 0.47L, Overshoot: 20\% \qquad (۲)$$

$$CHR: \quad K_p = \frac{0.6}{a}, T_i = T,\ T_d = 0.5L, Overshoot: 0\%, a = \frac{KL}{T}$$

$$CC: \quad K_p = \frac{1.35}{a}(1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau}), \quad T_i = \frac{2.5 - 2\tau}{1 - 0.39\tau}L, \quad T_d = \frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau}, \quad \tau = \frac{L}{L+T}$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023



شکل(۳): عدم قطعیت با انحراف جمع شونده

کنترل کننده K طوری طراحی می شود که تواما" سه شرط عملکرد نامی، پایداری مقاوم و کاهش نویز را داشته باشد، می‌توان نوشت[۱۹]:

۱- وقتی $\Delta = 0$ است $\|FS\|_\infty < 1$ شود. که در آن $S = (I + GK)^{-1}$ بوده و F(S) تابع وزنی است. (عملکرد نامی)

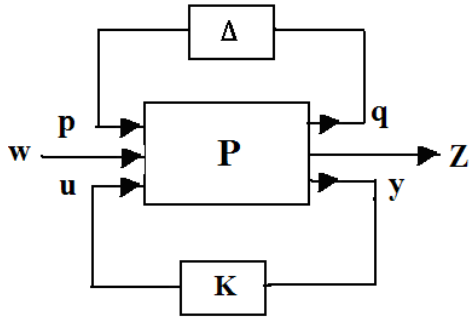
۲- وقتی $\Delta \neq 0$ است و با فرض اینکه $\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \le \gamma(j\omega)$ باشد، سیستم پایداری مقاوم داشته باشد. $\gamma(s)$ تابع وزنی است.

$$\|\gamma(S)M\|_\infty < 1 \quad \text{و} \quad M = (I + KG)^{-1}K \qquad (۴)$$

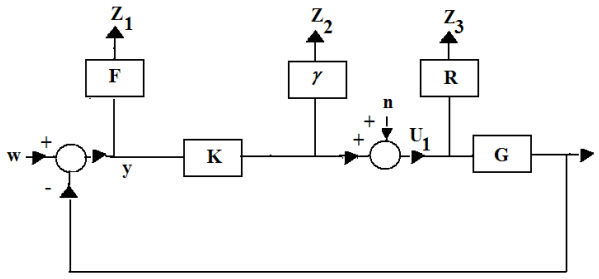
۳- واریانس U_1 اگر n نویز سفید به قدرت واحد باشد حداقل می‌گردد.

$$\|T_{nU_1}\|_{H_2} < 1$$

R(S) تابع وزنی است. پس سه شرط $\|F(S)S\|_\infty < 1$ و $\|\gamma(S)M\|_\infty < 1$ و $\|R(S)T_{nU_1}\|_\infty < 1$ برای طراحی وجود دارد. ثابت می شود به جای سه شرط مذکورکافیست مسئله $\left\| \begin{bmatrix} FS(K,G) \\ \gamma M(K,G) \\ RT(K,G) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1$ حل گردد. کلاس بزرگی از سیستمهای با عدم قطعیت را بصورت ساختار استاندارد تبدیل کسری خطی LFT[۸] می‌توان نمایش داد (شکل ۴). W: سیگنالهای اغتشاش وارده به سیستم که تابعی از حالتهای سیستم نباشند. Z، متغیری که می‌خواهیم کنترل کنیم. P، سیستم حلقه باز نامی Y، خروجی قابل اندازه گیری سیستم. با تبدیل دیاگرام تغییر یافته شکل (۵) به مدل LFT مساله را به فرم استاندارد (۵) نوشته و سپس توسط قضایای طراحی، کنترل کننده تعیین می‌گردد. تعیین سه تابع وزنه که در شکل (۵) مشخص شده دارای اهمیت است.



شکل (۴): مدل LFT



شکل (۵): مسئله عملکرد نامی + پایداری مقاوم+ حذف اغتشاش

$$\dot{x} = Ax + B_1W + B_2u \quad , \quad z = C_1x + D_{11}W + D_{12}u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_\gamma \\ \dot{x}_R \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ -B_fC & A_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_R \end{bmatrix}}_{A_{CL}} \begin{bmatrix} x \\ x_f \\ x_\gamma \\ x_R \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & B & B \\ B_f & -B_fD & -B_fD \\ 0 & 0 & B_\gamma \\ 0 & B_R & B_R \end{bmatrix}}_{\begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} r & n & u \\ & W & \end{bmatrix}^T$$

$$y = C_2x + D_{21}W + D_{22}u \quad , \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FS \\ \gamma M \\ RT \end{bmatrix} r$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -D_fC & C_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_R \\ -C & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} x \\ x_f \\ x_\gamma \\ x_R \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} D_f & -D_fD & -D_fD \\ 0 & 0 & D_\gamma \\ 0 & D_R & D_R \\ 1 & -D & -D \end{bmatrix}}_{D_{CL}} [r \quad n \quad u]^T$$

(۵)

۴- نتایج شبیه سازی

برای شبیه سازی سیستم قدرت از شکل (۶) استفاده می شود[۲۰]. به منظور طراحی کنترل‌کننده‌ی کلاسیک PID با روشهای CHR و CC، لازم است پارامترهای L، T و a در (۲) مشخص شوند. با توجه به پاسخ حلقه باز سیستم توربین-ژنراتور مدل شده به ورودی پله a=0.118 K=0.2,T=3.447,L=2.037, به دست آمده است. در شکل (۷) روشهای CHR بدون فراجهش، CHR با حداکثر فراجهش 20% و CC با هم مقایسه شده اند. شکل (۷) نشان می دهد روش CC حداکثر فراجهش کمتر و همچنین دارای زمانهای صعود، اوج و نشست کمترمی باشد. معادلات حالت و خروجی شکل (۶) به صورت (۶) می باشد. سیستم کنترل ناپذیر بوده و تنها متغیرهای حالت x_1، x_2 و x_3 قابلیت کنترل دارند. با توجه به اینکه خروجی سیستم x_5 می باشد سیستم قابلیت کنترل دارد. شکل (۸) سرعت روتور توربین که توسط کنترل کننده LQR کنترل شده است را نشان می دهد. در شکل (۵) ، جهت طراحی کنترل مقاوم ابتدا F(s)، ϒ (s) و R(s) با توجه به کارایی مطلوب سیستم در حوزه زمان و با مشخصات زمان نشست کمتر از ۳ ثانیه و فراجهش کمتر از ۲۰ درصد محاسبه می‌شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} -12.195 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.5126 & -2.5126 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0818 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5882 & -0.5882 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5882 & -0.5882 & -0.3226 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 9.78 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(۶)

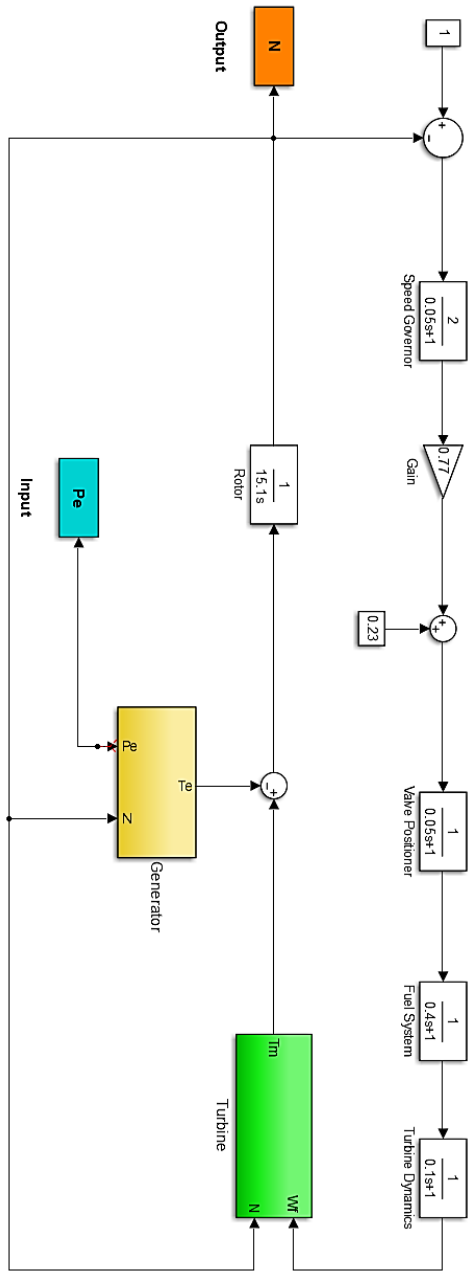
F(s) و R(s) در (۸) و (۹) بدست آمده اند. با توجه به آنکه نباید هزینه‌ی پیاده‌سازی کنترل‌کننده بالا باشد، بنابراین لازم است که سیگنال کنترل مقاوم طراحی شده محدود باشد و برای این کار $\Upsilon(s)=1$ در نظر گرفته شده است. در شکل (۹) منحنی مقادیر تکین حلقه بسته رسم شده است.

$$F(s) = \frac{s^2 + 12s + 225}{(s+0.01)(s+12)(0.001s+1)} \qquad (۷)$$

$$R(s) = \frac{1.3859 \times 10^{-5}(s+35.81)(s+0.505)}{(s+0.006)(s^2+1.544s+9.259)} \qquad (۸)$$

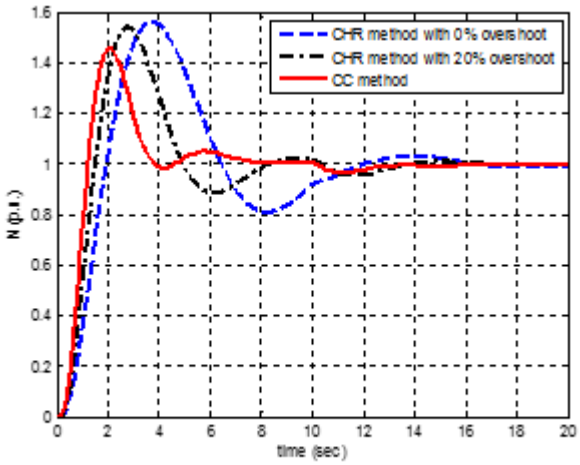
در شکل (۹)، منحنی توپر، مقدار تکین بیشینه‌ی سیستم حلقه بسته را به ازای کنترل‌کننده‌ی طراحی شده نشان می‌دهد که در فرکانسهای پایین نسبتاً تخت بوده و مقدار بیشینه‌ی آن 11.8 می‌باشد. منحنی خط-نقطه تابع تبدیل R(s)T(s) را نمایش می‌دهد که مقدار آن همواره کوچک بوده و از تحلیل این منحنی می‌توان فهمید که سیستم حلقه بسته از پایداری مقاوم با حاشیه‌ی اطمینان بسیار خوبی بهره‌مند است.

منحنی $\Upsilon(s)$ U(s) نیز در فرکانس‌های پایین از مقدار کم شروع به افزایش کرده و در فرکانس تقریبی 10 Hz بر نمودار مقدار تکین بیشینه‌ی سیستم حلقه بسته منطبق شده است. شکل (۱۰) سرعت روتور توربین برای کنترل‌کننده‌ی مقاوم H_2/H_∞ را نشان می دهد. شکل (۱۱) مقایسه‌ی سرعت روتور برای CHR، CC، LQR و H_2/H_∞ را نشان می دهد. با توجه به شکل (۱۱)، کنترل کننده مقاوم نسبت به سایر کنترل کننده ها از نظر دامنه‌ی نوسانات و سرعت همگرایی برتری دارد. برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده، سیگنال اغتشاش خارجی مطابق شکل (۱۲) در نظر گرفته می شود. شکل (۱۳) مقایسه‌ی سرعت روتور برای CHR، CC، LQR و H_2/H_∞ با وجود اغتشاش خارجی را نشان می دهد. شکل (۱۲)، برتری کنترل کننده مقاوم نسبت به سایر کنترل کننده ها را در مقابل اغتشاش خارجی نشان می دهد.

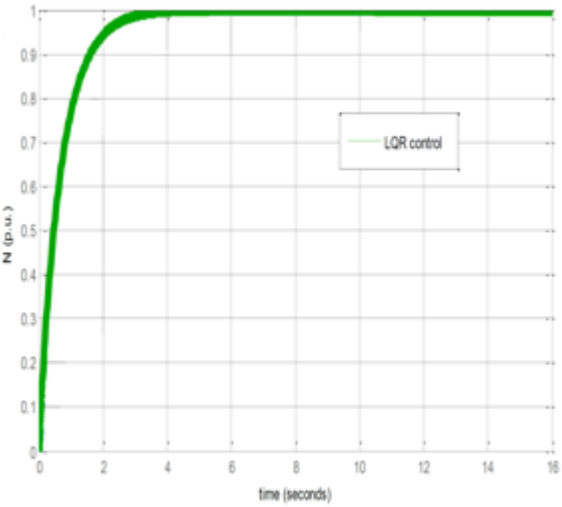


شکل (۶): مدل نهایی سیستم قدرت

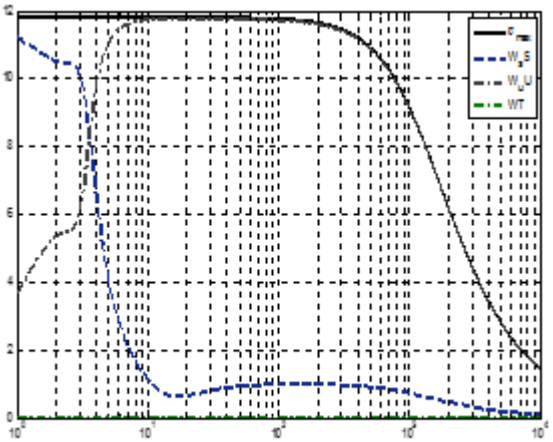
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



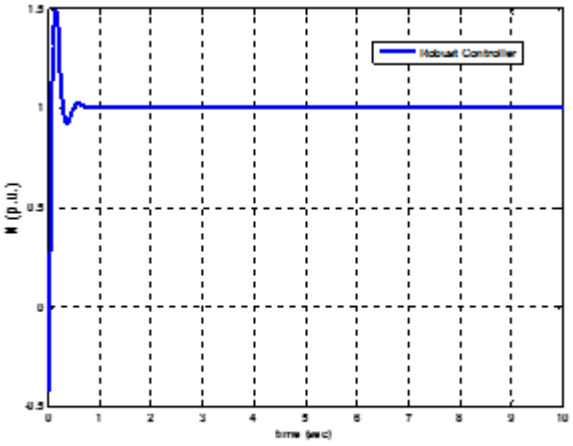
شکل۷: مقایسه‌ی کنترل‌کننده‌ی PID با روشهای CHR و CC



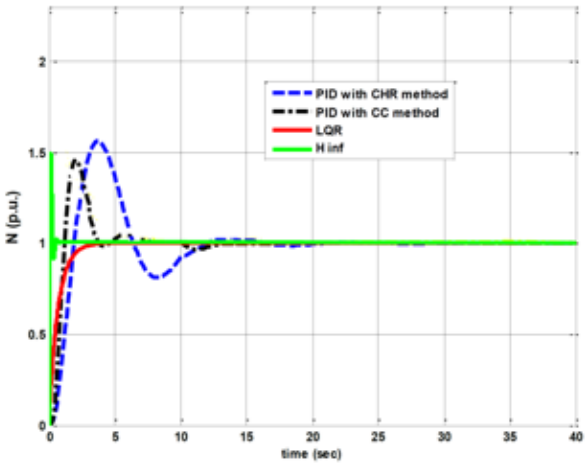
شکل۸: سرعت روتور توربین برای کنترل‌کننده LQR



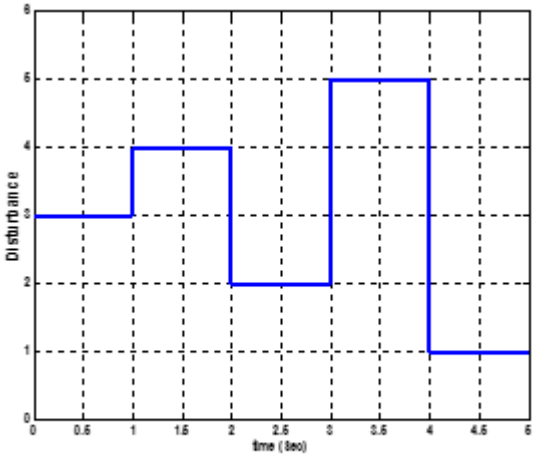
شکل۹ : منحنی مقدار تکین سیستم حلقه بسته



شکل۱۰: سرعت روتور توربین برای کنترل‌کننده‌ی مقاوم H_2/H_∞

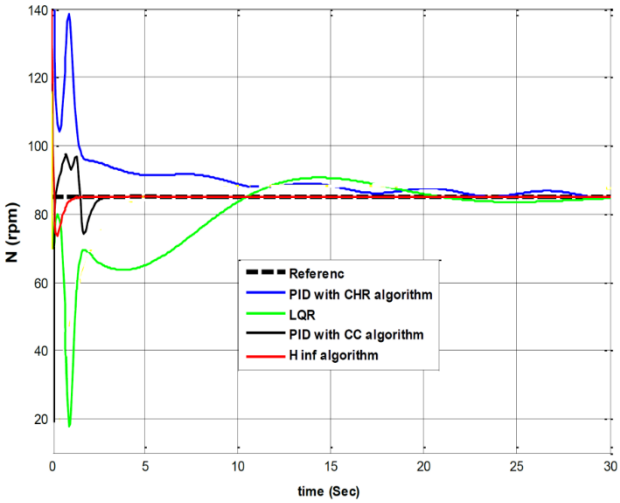


شکل ۱۱: مقایسه‌ی سرعت روتور برای CHR، CC، LQR و H_2/H_∞



شکل۱۲: سیگنال اغتشاش خارجی واردشده به سیستم

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



شکل ۱۳: مقایسه‌ی سرعت روتور برای CHR، CC، LQR و H_2/H_∞ با وجود اغتشاش

۵- نتیجه‌گیری

به دلیل روند افزایشی تعداد توربین های گازی نصب شده ، منابع انرژی تجدید پذیر و منابع تولید پراکنده در نیروگاه ها، ارائه ی راه حل هایی برای رفع چالش های مربوط به کنترل فرکانس اهمیت پیدا کرده است. در این مقاله، سیستم قدرت توربین-ژنراتور با توجه به مدل رووِن درنظر گرفته شده است. برای کنترل سیستم مذکور از کنترل کننده های PID ، بهینه خطی LQR و کنترل کننده مقاوم استفاده شده است. برای تعیین ضرایب کنترل کننده PID از روش های CHR و CC به منظور افزایش سرعت سیستم، حذف اثر اغتشاش و کاهش حداکثر فراجهش استفاده گردیده است. نتایج نشان می دهد روش CC موفق تر عمل نموده است. سپس معادلات حالت و خروجی سیستم بدست آمده اما سیستم کنترل ناپذیر می باشد. با توجه به اینکه خروجی سیستم سرعت روتور توربین است، متغیر مورد نظر کنترل پذیر بوده و کنترل کننده بهینه خطی LQR طراحی شده است که پاسخ بدون نوسان را نشان میدهد. وجود عدم قطعیت در یک سیستم واقعی سبب می‌گردد با تئوری سیستمهای کنترل خطی و مدل ریاضی نتوان یک سیستم را بطور کامل کنترل نمود. از این رو اهداف مختلفی از جمله عملکرد نامی ، پایداری مقاوم و کاهش نویز در نظر گرفته شده است. بررسی نتایج نشان می دهد کنترل کننده زمان صعود، زمان نشست و زمان اوج کمتری نسبت به سایر کنترل کننده ها دارد و همچنین در مقابل اغتشاش خارجی نیز بسیار موفق تر عمل نموده است.

مراجع

[1] K. Nagarjuna, M. S. Krishnarayalu “ADRC for Two-Area LFC” International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 3, Issue. 11, 2014.

[2] A.R. Bib Azizian “Simulation of Dynamic Load Effect on Power Syatem Frequency”, Msc. Thesis, University Tun Hussein, Malaysia , Feb. 2013.

[3] S.K. Montazeri, S. Shojaeian,M. Lotfi ,” Load-Frequency control of a power system using an optimized Sliding Mode Controller “,Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 4 , no. 1, pp. 35-45, Autumn 2015 (in Persian).

[4] K. Saiteja, M.S. Krishnarayalu “Load Frequency Control of Two-Area Smart Grid” International Journal of Computer Applications, vol. 117, no. 14, pp. 1-9, May 2015 (doi: 10.5120/20619-3323).

[5] Lili Dong, Y. Zhang, “On Design of a Robust Load Frequency Controller for Interconnected Power Systems” American Control Conference , USA,July. 2010(doi:10.1109/ACC.2010.5531492).

[6] V. Donde, M. A. Pai, I. A. Hiskens, “Simulation and Optimization in an AGC System after Deregulation,” IEEE Trans. on Power Systems, vol. 16,Issue. 3, pp. 481–489, Aug. 2001 (doi: 10.1109/59.932285).

[7] P. K. Ibraheem, D. P. Kothari, “Recent Philosophies of Automatic Generation Control Strategies in Power Systems”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, Issue. 1, pp. 346-357, Feb. 2005 (doi: 10.1109/TPWRS.2004.840438).

[8] L. Kong, and L. Xiao, “A New Model Predictive Control Scheme-Based Load-Frequency Control,” Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation, pp. 2514–2518, June. 2007 (doi: 10.1109/ICCA.2007.4376815).

[9] S. Trip, M. Cucuzzella, C.D. Persis, A. Ferrara, J. M. A. Scherpen, “Robust load frequency control of nonlinear power networks”, International Journal of Control, vol. 93, no. 2, pp. 346-359, Dec. 2018(doi: 10.1080/00207179.2018.1557338).

[10] A.Dokht Shakibjoo, M. Moradzadeh, S.Z. Moussavi, H. Afrakhte, “Online adaptive type-2 fuzzy logic control for load frequency of multi-area power system”, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 37, no. 1, pp. 1033-1042, July. 2019 (doi: 10.3233/JIFS-181963).

[11] R. Khezri,A. Oshnoei, S. Oshnoei, H. Bevrani, S.M.Muyeen, “An intelligent coordinator design for GCSC and AGC in a two-area hybrid power system”, Applied Soft Computing, Volume 76, , pp. 491-504, March. 2019 (doi: 10.1016/J.ASOC.2018.12.026).

[12] S. Horie; K. Yukita; T. Mathumura; Y. Goto , “Load frequency control using H infinity control in

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

case of considering PV", 20th International Conference on Electrical Machines and Systems , Australia, Aug. 2017 (doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056445).

[13] M. Abadpour, H. Hamidi, "Stabilization of V94.2 Gas Turbine Using Intelligent Fuzzy Controller Optimized by the Genetic Algorithm", International Journal of Applied and Computational Mathematics, vol. 3, Issue. 4, pp. 2929–2942, Nov. 2016 (doi: 10.1007/s40819-016-0276-2).

[14] W. I. Rowen, "Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines", Journal of Engineering for Power, Vol. 105, No. 4, pp. 865-869, Oct. 1983 (doi:10.1115/1.3227494).

[15] M. Moloudi and A. H. Mazinan, "Controlling disturbances of islanding in a gas power plant via fuzzy-based neural network approach with a focus on load-shedding system", Complex and Intelligent Systems, Vol. 5, Issue. 1, pp. 79-89, June. 2018. (doi: 10.1007/s40747-018-0077-9).

[16] H. Rajaee, J. Mashayekhifard, G. Faezian, "Comparison of Smith Predictor, Sliding Mode, Sequential Loop Closing and Robust PID Controller for Power Plant Boiler" Majlesi Journal of Mechatronic Systems, vol. 10, no. 1, pp. 29-36. March. 2021 (doi: 10.29252/mjms.10.1.29).

[17] O. H. Adigun, "Decentralized Fuzzy-PID Based Control Model for a Multivariable Liquid Level System", Journal of Advances in Computer Engineering and Technology, Vol.4, Issue.4, pp.247-254, Spring. 2018.

[18] S.H. Shahalami, D. Farsi, "Analysis of Load Frequency Control in a restructured multi-area power system with the Kalman filter and the LQR controller", International Journal of Electronics and Communications, vol. 86, pp. 25-46, March. 2018 (doi: 10.1016/j.aeue.2018.01.011)

[19] J. MashayekhiFard, "Robust Multi-Objective Control of Power System Stabilizer Using Mixed H_2/H_∞ and μ Analysis, "International Journal of Electrical and Computer Engineering, vo. 8, no. 6, pp. 4800-4809, Dec. 2018 (doi: 10.11591/ijece.v8i6.pp4800-4809).

[20] S. Balamurugan, N. Janarthanan, and K. V. Chandrakala, "Small and large signal modeling of heavy duty gas turbine plant for load frequency control," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 79, pp. 84–88, 2016.

رزومه



عاطفه حسینی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار (۱۳۹۸) سپری کرده است. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه کنترل هوشمند و کاربرد آن در سیستم قدرت است.



جواد مشایخی فرد متولد ۱۳۵۹ تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد(۱۳۸۲)، کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب (۱۳۸۵) و دکتری مهندسی برق کنترل در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران(۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه کنترل سیستم های چند متغیره، کنترل هوشمند، کنترل مقاوم و پایدارساز سیستم قدرت است و ایشان در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار می باشد.



باقر مهذبی متولد ۱۳۴۵ تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق مخابرات در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (۱۳۶۸) و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت در دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۷۸) سپری کرده است. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ادواتFACTS ، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن است و ایشان در حال حاضر مربی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار می باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

زیرنویس ها

[1] Load Frequency Control
[2] Area Control Error
[3] Gate Controlled Series Capacitors
[4] Automatic Generation Control
[5] Chien–Hrones–Reswick
[6] Cohen-Coon
[7] Linear Quadratic Regulator
[8] Linear Fractional Transformation

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

Robust Controller Design for Load Frequency in Gas Power Plant Control

Atefeh Hoseini [1], Javad MashayekhiFard [2], Bagher Mohazzabi [3]

1- MSc student, Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, sabz_2008@yahoo.com
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, mashayekhi@iaus.ac.ir
3- Lecturer, Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, mohazzabi_b@iaus.ac.ir

Abstract: Power system design and controls are done with stability and reliability. Frequency is one of the important variables to stabilize the speed of engine loads. Considering the vital role of gas turbines in producing electricity without harmful effects on the environment, in this paper, utilizing the Rowen model for the frequency power system, the load-frequency control with the secondary control loop has been examined. For this reason, the design is done by the transfer function and state space. To begin with, the conventional PID controller is designed utilizing CHR and CC calculations in order to increase the system speed, eliminate disturbance and reduce the sum of overshoot. At that point, LQR linear optimal controller is utilized. Finally, due to the uncertainty and disturbance, H_2/H_∞ robust controller has been considered with the three conditions of nominal performance, robust stability, and reduction of disturbance. The simulation results obtained with/without the presence of disturbance have been checked and compared in MATLAB software. The results of the simulations show the success of the proposed H_2/H_∞ robust control strategy in terms of convergence rate and fluctuation range among all the control strategies examined.

Keywords: Load Frequency Control, Gas Power Plant, Robust PID, H_2/H_∞ Robust control, Optimal Linear Controller.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.6.7]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023