مقاله پژوهشی

سیستم کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت با نیروگاه توربین گازی: تحلیل پایداری به ازای تغییرات پارامترها

مهدی ریاحی‌نسب[۱،۴]، مجید معظمی[۲،۴]، سید محمدعلی زنجانی[۱،۴]، ندا بهزادفر*[۱،۴]، اکبر گلسرخی اصفهانی[۳]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
m.riahinasab@pel.iaun.ac.ir, sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir, n.behzadfar@pel.iaun.ac.ir
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
m_moazzami@pel.iaun.ac.ir
۳- استادیار، واحد خوراسگان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصهفان، خوراسگان، ایران
golesorkhi2010@yahoo.com
۴- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۰

چکیده: نوسانات توان الکتریکی در سیستم قدرت زمانی اتفاق می‌افتد که تعادل بین تقاضای توان مصرفی و توان تولیدی در یک دوره زمانی وجود نداشته باشد. فرکانس تقریباً باید در همه نقاط سیستم قدرت ثابت باشد. از سیستم کنترل فرکانس بار (کنترل سطح دوم) برای حفظ فرکانس در مقادیر نامی یا نزدیک به آن استفاده می‌شود. هدف از کنترل توان اکتیو، حداقل کردن تغییرات فرکانس برای رسیدن به پایداری سیستم قدرت تا حد قابل قبول است. در این مقاله، هدف مطالعه و شبیه‌سازی سیستم کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت با نیروگاه توربین گازی است. فرکانس به پارامترهای سیستم قدرت بستگی دارد و تغییرات در پارامترها باعث ایجاد انحراف جزئی در فرکانس سیستم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در حوزه زمان با استفاده از نرم‌افزار متلب تعیین شده است. مُدهای سیستم به ازای پارامترهای مختلف سیستم بررسی شده و تاثیر تغییرات پارامترها بر پایداری سیستم قدرت نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه توربین گازی، کنترل فرکانس بار، مُدهای سیستم، تحلیل پایداری

۱- مقدمه

انرژی نقش زیربنایی در توسعه مراکز صنعتی و تجاری، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت یک جامعه ایفا می‌کند [۱،۲]. در سال‌های اخیر با توجه به گسترش مراکز صنعتی و افزایش بارها، مصرف انرژی رو به افزایش است و امروزه صنعت برق با چالش‌هایی مانند راندمان انرژی پایین، کیفیت توان پایین[۱] و حفاظت از محیط زیست[۲] روبرو است [۳،۴]. انرژی الکتریکی یکی از عوامل اصلی و مهم گسترش بخش‌های صنعتی، اقتصادی و اجتماعی است و می‌توان بیان کرد که افزایش ظرفیت تولید و توزیع انرژی الکتریکی باعث پیشرفت کشورها می‌شود [۵،۶].

تامین برق مصرف کنندگان در نقاط دور از دسترس به روشی مقرون به صرفه بسیار اهمیت دارد. نیروگاه‌ها و فناوری‌های مختلف برای تولید برق استفاده می‌شوند. انرژی‌های تجدیدپذیر[۳] برای تولید برق اهمیت زیادی دارند [۷،۸]. استفاده از نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر به علت حل مشکلات زیست محیطی به طور پیوسته در حال افزایش است. افزایش نفوذ منابع انرژی توزیع شده به سیستم-

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

های قدرت باعث افزایش چالش‌هایی در سیستم کنترل شده است. نامنظمی و عدم یکنواخت بودن منابع انرژی تجدیدپذیر باعث ایجاد مشکل در تنظیم ولتاژ و فرکانس سیستم می‌شود، در حالی که نوسانات فرکانس باعث کاهش کیفیت توان می‌شود [۹،۱۰].

افزایش ظرفیت یا وابستگی به منابع مختلف انرژی علت پیچیده شدن ساختار سیستم‌های قدرت[۴] پیشرفته است که باعث شده تا رفتار غیرخطی داشته باشند [۱۱،۱۲]. مشکلات فراوانی همراه با خاصیت غیرخطی بودن و پیچیدگی سیستم‌های قدرت همراه خواهد بود که انحراف فرکانس یکی از مهمترین مشکلات در این زمینه است [۱۳،۱۴]. باقی ماندن فرکانس و ولتاژ در مقادیر استاندارد در زمان عملکرد سیستم برای کیفیت خوب سیستم قدرت الکتریکی لازم و ضروری است [۱۵،۱۶].

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد کنترل فرکانس بار[۵] در سیستم قدرت برای حذف نوسانات فرکانس ارائه شده است [۱۷،۱۸]. یک طرح کنترل فرکانس بار بهینه توزیع شده برای سیستم‌های قدرت چهار ناحیه‌ای با بارهای قابل کنترل در [۱۹] ارائه شده که در آن برای مشارکت در تنظیم فرکانس از ژنراتورها و بارهای قابل کنترل به طور بهینه با حداقل هزینه استفاده می‌شود. همچنین پایدار مجانبی سیستم حلقه کنترل بار فرکانس بررسی شده که نشان دهنده حداقل کردن هزینه کنترل ژنراتورهای و بارهای قابل کنترل است. بررسی نگرانی امنیت در برابر حملات سایبری در سیستم‌های قدرت کنترل فرکانس بار چند ناحیه ای در [۲۰] انجام شده که در آن از رویکرد کنترل حالت لغزشی خروجی مبتنی بر فازی استفاده شده است. برای نشان دادن تهدیدات مخرب از شبکه‌های ارتباطی یک مدل حمله فریب مبتنی بر روند حرکت ارائه شده است. طراحی کنترل متناوب با رویداد برای سیستم کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت چند ناحیه-ای در [۲۱] به منظور پایداری سیستم طراحی شده است. برای مقایسه دو شاخص عملکرد نرخ کنترل و هزینه کنترل تعریف شده‌اند. یک روش کنترل پیش‌بینی مدل در سیستم کنترل فرکانس بار برای سیستم قدرت بهم پیوسته دو ناحیه‌ای متشکل از فتوولتائیک[۶] و ژنراتور حرارتی در [۲۲] ارائه شده که در آن مشخصه دینامیکی سیستم به صورت یک مدل فضای حالت گسسته زمان در نظر گرفته شده است. تابع هزینه در نظر گرفته شده برای بهینه سازی سیگنال کنترل شامل حداقل رساندن مجموع وزنی مجذور خطاهای پیش‌بینی‌شده و مربع مقادیر کنترل آینده است.

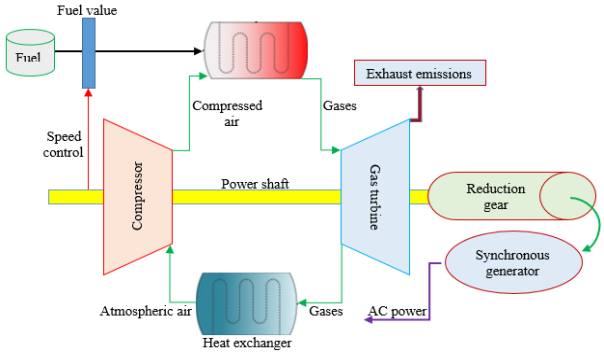
افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و خطوط انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا باعث ایجاد چالش در دستیابی به پایداری فرکانس در اثر تغییرات ناگهانی در سیستم قدرت شده‌اند. مطالعات مروری نیز در زمینه چالش‌ها و روش‌های مختلف طراحی سیستم کنترل فرکانس بار تاکنون ارائه شده است [۲۳،۲۴].

چالش‌های احتمالی و روش‌های کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت تحت نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در [۲۵] همراه با انواع مختلف بارها و منابع انرژی توزیع شده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش‌های جدید در بازیابی پاسخ فرکانس افت شده موثر هستند و پتانسیل زیادی در کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهند. مروری در مورد کنترل فرکانس و روش‌های عملکرد بهینه در [۲۶] برای سیستم‌های قدرت با مسائل اینرسی پایین ارائه شده است. اثرات یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و انتقال مبتنی بر جریان مستقیم ولتاژ بالا تجزیه و تحلیل شده است. یک مطالعه مروری از کنترل فرکانس بار در سیستم‌های قدرت بهم پیوسته چند ناحیه‌ای در [۲۷] ارائه شده که در آن نمای کاملی از کنترل کلاسیک اولیه تا فناوری‌های اخیر و تکنیک‌های مدرن با در نظر گرفتن استراتژی‌ها، کنترل‌کننده‌های مقاوم، بهینه، خود تنظیم و تطبیقی بررسی شده است. همچنین کنترل بار فرکانس در شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های قدرت پیچیده مدرن در مورد پهنای باند ارتباطی محدود، شکست ارتباطی و حملات سایبری نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

عملکرد کنترل فرکانس بار به اختلال‌های نسبتاً کوچک در سیستم قدرت محدود می‌شود و معمولاً از مدل خطی برای طراحی کنترل فرکانس بار استفاده می‌شود. در این مقاله رفتار دینامیکی کنترل فرکانس بار در یک سیستم قدرت تک ناحیه‌ای با استفاده از آنالیز مُدهای سیستم بررسی شده است. نیروگاه توربین گازی[۷] برای شبیه‌سازی سیستم قدرت در نظر گرفته شده است. به ازای پارامترهای مختلف، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب تعیین شده است و مقایسه بین رفتار دینامیکی آنها انجام شده است.

۲- نیروگاه توربین گازی

توربین گاز یک موتور حرارتی احتراق داخلی تنفس هوا است که در قلب یک نیروگاه قرار دارد. در این توربین گاز طبیعی (سوخت‌های مایع) را به انرژی مکانیکی جهت چرخاندن توربین تبدیل می‌کند و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. از این توربین‌ها برای تامین انرژی قطار، هواپیما، پمپ‌ها و ... استفاده می‌شود [۲۸،۲۹]. به علت فرآیند احتراق[۸] کارآمد این توربین‌ها عموماً آلاینده‌های کمتری تولید می‌کنند. دو نوع چرخه توربین گازی وجود دارد: بسته و باز. شکل (۱) چرخه توربین گازی در یک نیروگاه را برای حالت باز نشان می‌دهد.



شکل (۱): سیکل تولید برق در توربین گازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

راندمان توربین براساس خروجی توربین و هزینه سوخت تعیین می‌شود. در مقایسه با موتورهای رفت و برگشتی هم اندازه، توربین گازی قیمت بیشتری دارد. همچنین به علت داشتن سرعت بالای چرخش و دمای علمیاتی بالا، طراحی و ساخت این توربین‌ها دشوار است [۳۰،۳۱].

۳- سیستم کنترل فرکانس بار

کنترل سلسله مراتبی[۹] مطابق یک راه‌حل رایج برای میرا کردن نوسانات فرکانس است که معمولاً به سه سطح کنترل اول، دوم و سوم طبقه بندی می‌شود [۳۲،۳۳]. نوسانات جزئی فرکانس در عملکرد عادی سیستم قدرت توسط کنترل اولیه کاهش پیدا می‌کند [۳۴،۳۵]. از حلقه کنترل فرکانس بار که همان سطح دوم کنترل است، در سیستم‌های قدرت برای حفظ فرکانس در مقدار نامی استفاده می‌شود. تامین توان مورد نیاز از نیروگاه‌های تولیدی فعال در سیستم برای پاسخگویی به تغییرات تقاضای بار و حفظ توان مبادله شده بین نواحی کنترل متصل به هم در مقادیر برنامه‌ریزی شده از وظایف اصلی حلقه کنترلی فرکانس (سطح دوم کنترل) است. حلقه کنترل سطح دوم به افزایش پایداری سیستم قدرت نیز کمک می‌کند [۳۶،۳۷].

شکل (۲) مدل خطی کنترل بار فرکانس نیروگاه توربین گازی را برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک نشان می‌دهد. برای نمایش معادلات دیفرانسیل مدل از ۵ متغیر حالت استفاده می‌شود که در شکل مشخص شده‌اند. پارامترهای سیستم مطابق جدول (۱) تعریف می‌شوند. مدل خطی شده شامل شش بلوک به صورت زیر است که هر کدام نمایش دهنده بخشی از سیستم هستند:

الف- موقعیت سوپاپ: قرار دادن شیر در موقعیت صحیح با افزایش یا کاهش فشار بار هوا بر روی محرک

$$F_{VP}(s)=\frac{K_V}{1+T_V s} \qquad (۱)$$

ب- سیستم سوخت: تحویل سوخت گاز به محفظه های احتراق توربین با فشار و دبی مناسب

$$F_{FS}(s)=\frac{1-T_{CR} s}{1+T_F s} \qquad (۲)$$

ج- سیستم تخلیه کمپرسور: رساندن جریان هوا در کمپرسور توربین گاز به فشار بسیار بالا

$$F_{CD}(s)=\frac{1}{1+T_{CD} s} \qquad (۳)$$

د- تنظیم کننده گاورنر: کنترل فرکانس و بار بر اساس حالت عملکرد و متعادل کردن بار مورد نیاز توان و انحرافات فرکانس

$$F_{SG}(s)=\frac{1+T_L s}{1+T_G s} \qquad (۴)$$

ه- جرم دوار و بار: نمایش معادل سیستم قدرت

$$F_{PS}(s)=\frac{1}{J_M s+K_D} \qquad (۵)$$

کنترل‌کننده متناسب-انتگرال‌گیر به علت پیاده‌سازی ساده و هزینه کم کاربرد فراوانی در سیستم‌های قدرت دارد [۳۸،۳۹]. در سیستم مورد مطالعه به عنوان کنترل کننده فرکانس در حلقه ثانویه از کنترل‌کننده PI استفاده شده که تابع انتقال آن به صورت زیر است:

$$G_C(s)=K_P+\frac{K_I}{s} \qquad (۶)$$

معادلات دیفرانسیل مرتبه اول سیستم مورد مطالعه در فضای حالت به صورت زیر بیان می‌شود [۴۰،۴۱]:

$$\frac{d}{dt}x_1=-\frac{K_D}{J_M}x_1+\frac{1}{J_M}x_2-\frac{1}{J_M}u_1 \qquad (۷)$$

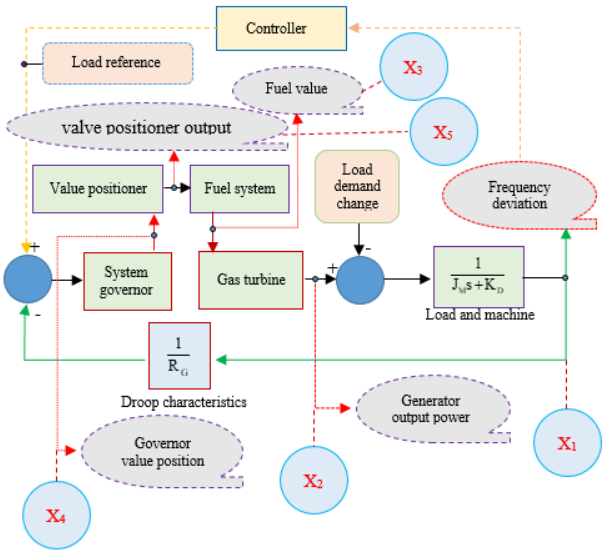
$$\frac{d}{dt}x_2=-\frac{1}{T_D}x_2+\frac{1}{T_D}x_3 \qquad (۸)$$

$$\frac{d}{dt}x_3=\frac{K_V T_L T_{CR}}{T_V R_G T_G T_F}x_1-\frac{1}{T_F}x_3+\frac{1}{T_F}(1+\frac{T_{CR}}{T_G})x_4+\frac{T_{CR}}{T_F T_G}(\frac{T_L}{T_V}-1)x_5-\frac{K_V T_{CR} T_L}{T_F T_V T_G}u_2 \qquad (۹)$$

$$\frac{d}{dt}x_4=-\frac{K_V T_L}{T_V R_G T_G}x_1-\frac{1}{T_G}x_4-\frac{1}{T_G}(\frac{T_L}{T_V}-1)x_5+\frac{K_V T_L}{T_V T_G}u_2 \qquad (۱۰)$$

$$\frac{d}{dt}x_5=-\frac{K_V}{T_V R_G}x_1-\frac{1}{T_V}x_5+\frac{K_V}{T_V}u_2 \qquad (۱۱)$$

که در آن دو ورودی u_1 و u_2 به ترتیب تغییرات بار مصرفی و نقطه مرجع بار هستند. متغیر حالت x_1 تغییرات فرکانس سیستم و متغیر حالت x_2 تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین را نشان می‌دهند.



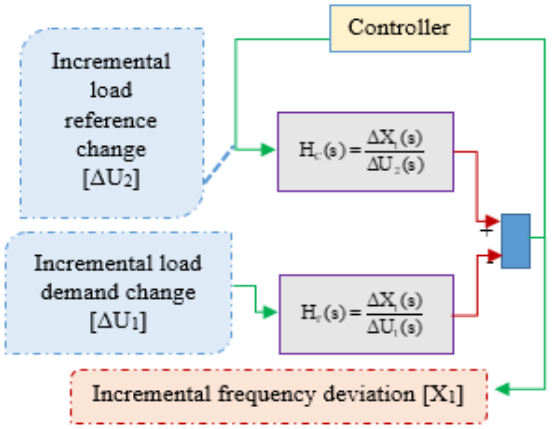
شکل (۲): بلوک دیاگرام نیروگاه توربین گازی با حلقه دوم کنترل فرکانس

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 1- Spring 2024

جدول (۱): پارامترهای نیروگاه توربین گازی

پارامتر	سمبل	مقدار
ثابت زمانی حجم تخلیه کمپرسور	T_D	۰/۲ sec
ثابت اینرسی ترکیبی	J_M	۰/۱۶۶۷
ثابت میرایی	K_D	۰/۰۰۸۳
ثابت زمانی موقعیت دهنده سوپاپ	T_V	۰/۰۵ sec
بهره موقعیت دهنده سوپاپ	K_V	۱
ثابت زمانی هدایت کننده سرعت توربین گازی	T_L	۰/۶ sec
ثابت زمان تاخیر گاورنر سرعت توربین گازی	T_G	۱/۱ sec
تنظیم کننده سرعت گاورنر	R_G	۲/۴ Hz/puMW
ثابت زمانی سوخت توربین گازی	T_F	۰/۲۳ sec
تأخیر زمان واکنش احتراق توربین گاز	T_{CR}	۰/۰۳ sec
بهره متناسب کنترل‌کننده	K_P	۰/۱
بهره انتگرال‌گیر کنترل‌کننده	K_I	۰/۱

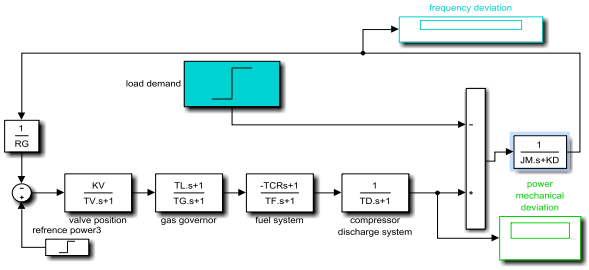
شکل (۳) نمایش بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه را با استفاده از توابع انتقال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود دو تابع انتقال برای نمایش تغییرات فرکانس سیستم با استفاده از دو ورودی سیستم استفاده شده است. تابع انتقال $H_C(s)$ نمایش دهنده نسبت تغییرات فرکانس به نقطه مرجع تغییر بار است. تابع انتقال $H_F(s)$ نمایش دهنده نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات بار مصرفی است. برای کنترل حلقه سطح دوم همانطور که مشاهده می‌شود از تابع انتقال $H_C(s)$ استفاده شده است.



شکل (۳): نمایش بلوک دیاگرام سیستم با استفاده از تابع انتقال

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب، علاوه بر تجزیه و تحلیل مُدهای سیستم، مدل سیستم قدرت مورد مطالعه نیز در سیمولینک متلب مطابق شکل (۴) پیاده‌سازی شده و صحت نتایج شبیه‌سازی تایید گردید. برای بررسی اثرات تغییرات پارامترها ورودی بار به صورت پله‌ای در نظر گرفته می‌شود و پاسخ پله تغییرات فرکانس سیستم بررسی می‌شود.



شکل (۴): پیاده‌سازی مدل سیستم قدرت مورد مطالعه در سیمولینک متلب

سیستم قدرت با مقادیر نامی مطابق جدول (۱) در حالت بدون کنترل‌کننده دارای سه مُد غیرنوسانی ۱۹/۷۹۹۱-، ۷/۳۲۴۰- و ۲/۱۲۳۳- و یم جفت مُد نوسانی ۱/۷۲۹۸±j۰/۵۳۰۲- است. بنابراین با توجه به اینکه مُدهای سیستم در سمت چپ محور موهومی قرار دارند، پاسخ سیستم پایدار خواهد بود. ولی برای سیستم بدون کنترل کننده مقدار تغییرات نوسان به سمت صفر میل نمی‌کند و افت فرکانس در سیستم وجود خواهد داشت.

پاسخ پله تغییرات فرکانس و توان مکانیکی به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فرکانس در نهایت به مقدار ۲/۳۵۲۹- هرتز و توان مکانیکی به ۰/۹۸۰۴ پریونیت خواهد رسید. تغییرات فرکانس و تغییرات توان مکانیکی برحسب یکدیگر در شکل (۷) نشان داده شده است. بنابراین سیستم حلقه باز پایدار خواهد بود ولی افت فرکانس در نهایت وجود دارد. با توجه به افت فرکانس، سیستم نیاز به حلقه سطح دوم کنترل دارد. سیستم قدرت در حالتی که کنترل‌کننده PI استفاده می‌کند دارای چهار مُد غیرنوسانی ۱۹/۷۵۱۴-، ۷/۵۷۹۲-، ۰/۲۰۱۴- و ۲/۰۶۱۶- و یک جفت مُد نوسانی ۱/۹۲۰۵±j۰/۳۵۶۶- است. شکل‌های (۸) و (۹) پاسخ سیستم در حالت حلقه بسته را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ تغییرات فرکانس در نهایت به صفر میل کرده و همچنین پاسخ سیستم پایدار مجانبی خواهد بود.

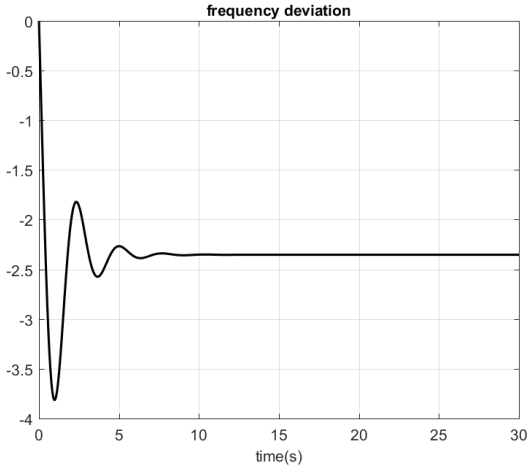
شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب تاثیر افزایش ثابت زمانی هدایت کننده سرعت توربین گازی را بر پاسخ تغییرات فرکانس در دو حالت حلقه باز و حلقه بسته نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش T_L در هر دو حالت باعث کاهش بالازدگی پاسخ می‌شود. همچنین در حالت حلقه باز بر مقدار نهایی تغییرات فرکانس تاثیری ندارد. مقادیر ویژه سیستم در حالت حلقه باز با T_L برابر ۰/۹ عبارتند از: ۱۹/۶۸۳۵-، ۸/۰۴۰۰-، ۱/۱۸۹۷- و ۰/۶۹۶۹±j۲/۲۰۶۳- و مقادیر ویژه در حالت حلقه بسته عبارتند از: ۱۹/۶۰۶۰-، ۸/۳۶۹۶-، ۰/۲۰۲۰-، ۱/۱۸۵۷- و ۰/۴۷۱۶±j۲/۴۱۰۵-. در مقایسه با مُدهای سیستم برای زمانی که T_L برابر ۰/۶ است، مشاهده می‌شود که مُد نوسانی از محور موهومی و محور حقیقی دور شده است.

افزایش مقدار تاخیر زمان واکنش احتراق توربین گاز (T_{CR}) باعث افزایش مقدار بالازدگی پاسخ می‌شود و ممکن است باعث ناپایداری سیستم گردد. در جدول (۲) مُدهای نوسانی سیستم را به ازای

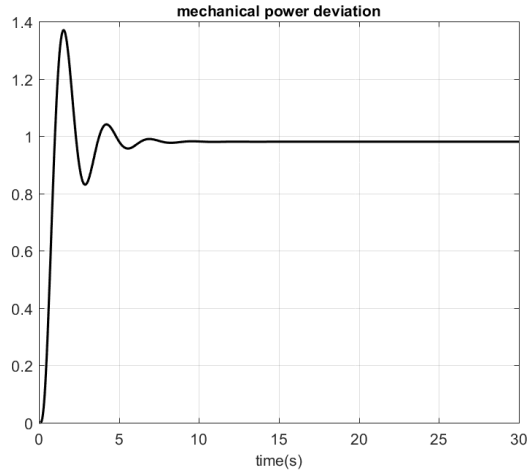
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

تغییرات T_{CR} آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود بـا افـزایش T_{CR} مّد نوسانی به محور موهومی نزدیک می‌شود. نزدیک شدن مّد نوسـانی در سیستم حلقه بسته سریعتر انجام می‌شود و به عبارت دیگر افـزایش T_{CR} در سیستم حلقه بسته سریعتر باعث ناپایداری سیستم خواهد شد.

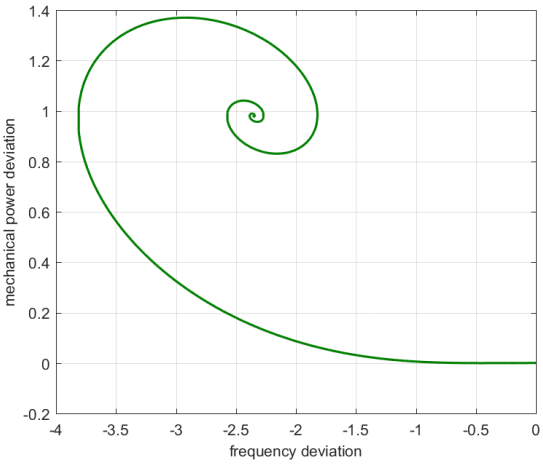
افـزایش ثابـت زمـانی سـوخت تـوربین گـاز (T_F) باعـث افـزایش نوسانات فرکانس و کاهش میرایی پاسخ می‌شود. افزایش T_F هم ممکن است باعث ناپایداری سیستم شود.



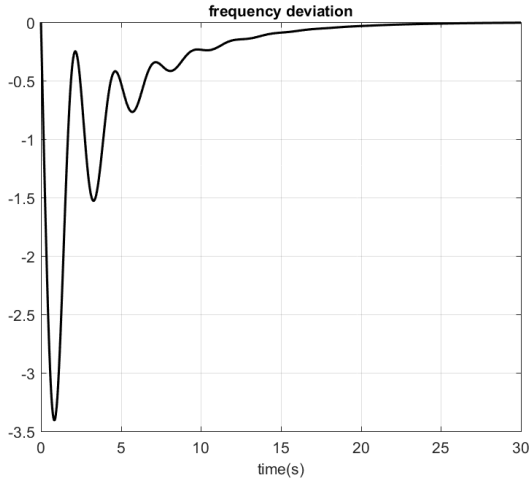
شکل (۵): تغییرات فرکانس سیستم به ازای تغییرات پله‌ای بار



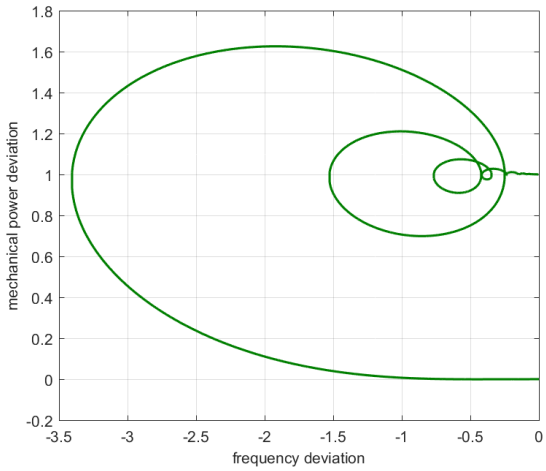
شکل (۶): تغییرات توان مکانیکی به ازای تغییرات پله‌ای بار



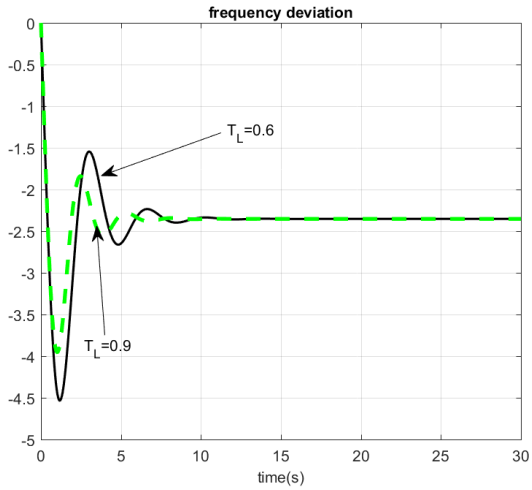
شکل (۷): تغییرات فرکانس و توان مکانیکی



شکل (۸): تغییرات فرکانس سیستم به ازای تغییرات پله‌ای بار در سیستم حلقه بسته

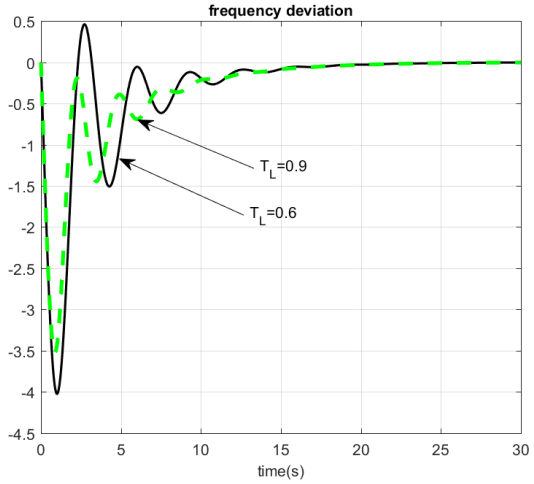


شکل (۹): تغییرات فرکانس و توان مکانیکی در سیستم حلقه بسته



شکل (۱۰): تاثیر افزایش ثابت زمانی هدایت کننده سرعت توربین گازی بر پاسخ تغییرات فرکانس در حلقه باز

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 1- Spring 2024



شکل (۱۱): تاثیر افزایش ثابت زمانی هدایت کننده سرعت توربین گازی بر پاسخ تغییرات فرکانس در حلقه بسته

جدول (۲): مُدهای نوسانی سیستم به ازای افزایش زمان واکنش احتراق توربین گاز

حالت سیستم	T_{CR}=0.03	T_{CR}=0.1	T_{CR}=0.15	T_{CR}=0.2
حلقه باز	-۰/۵۳۰۲ ±j۱/۷۲۹۸	-۰/۴۹۰۹ ±j۱/۱۸۶۷	-۰/۳۵۸۷ ±j۲/۳۲۰۵	-۰/۲۳۶۲ ±j۲/۱۴۵۱
حلقه بسته	-۰/۳۵۶۶ ±j۱/۹۲۰۶	-۰/۲۴۷۱ ±j۱/۳۶۰۰	-۰/۱۰۳۰ ±j۱/۳۲۰۵	۰/۰۳۰۶ ±j۱/۹۲۰۶

۵- نتیجه‌گیری

مشکل انحراف فرکانس یک مسئله دائمی است که در اثر تغییرات دائمی بار تقاضا وجود دارد و لذا نیاز به تغییر توان تولید شده برای ثابت نگه‌داشتن فرکانس در مقدار نامی است. برای حفظ فرکانس در مقدار نامی، سیستم کنترل بار فرکانس در ایستگاه تولید نصب می‌شود تا با تغییر تقاضای توان اکتیو فرکانس سیستم و توان عبوری از خطوط اتصال در محدوده‌های تعیین‌شده قرار گرفته شوند. در این مقاله کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت مجهز به نیروگاه گازی مطالعه و رفتار دینامیکی آن شبیه‌سازی شده شده است. تغییرات بار مصرفی به صورت پله واحد در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی در حوزه زمان نشان داده شده است. در سیستم حلقه بسته ضمن حفظ پایداری سیستم قدرت، مقدار نهایی انحراف فرکانس به سمت صفر میل کرده است.

مراجع

[1] G. Haghshenas, et al., "*High step-up boost-flyback converter with soft switching for photovoltaic applications*", Journal of Circuits, Systems, and Computers, vol. 28, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2019.

[2] F. Ostvar, et al., "*Probabilistic risk-based planning of distributed generation units using multi objective hybrid augmented weighted ε-constraint approach*", Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 18, no. 5, pp. 3517-3531, March 2023.

[3] D. Taheri, et al., "*Simulation of combined boost converter behavior with positive output voltage and investigation of voltage ripple at output*", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 9, no. 3, pp. 1-8, Dec. 2020.

[4] M. Mahdavian and N. Behzadfar, "*A review of wind energy conversion system and application of various induction generators*", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 8, no. 4, pp. 55-66, 2020.

[5] G. Shahgholian and N. Izadpanahi, "*Improving the performance of wind turbine equipped with DFIG using STATCOM based on input-output feedback linearization controller*", Energy Equipment and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 65-79, June 2016.

[6] H. Barati, et al., "*Intelligent control of UPFC for enhancing transient stability on multi-machine power systems*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 1, no. 1, pp. 3-12, Feb. 2010.

[7] A.E. Khalil, et al., "*A novel multi-objective tuning formula for load frequency controllers in an isolated low-inertia microgrid incorporating PV/wind/FC/BESS*", Journal of Energy Storage, vol. 82, Article Number: 110606, March 2024.

[8] G. Shahgholian and A. Fathollahi, "*Analyzing small-signal stability in a multi-source single-area power system with a load-frequency controller coordinated with a photovoltaic system*", AppliedMath, vol. 4, no. 2, pp. 452-467, April 2024.

[9] Y. Zheng, et al., "*Deep reinforcement learning based active disturbance rejection load frequency control of multi-area interconnected power systems with renewable energy*", Journal of the Franklin Institute, vol. 360, no. 17, pp. 13908-13931, Nov. 2023.

[10] M. Fooladgar, et al., "*Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, March 2015.

[11] S.M.A. Zanjani, et al., "*Coordination design of power system stabilizer and FACTS controllers using nature-inspired metaheuristics optimization algorithms– A brief review*", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 89-106, Dec. 2024.

[12] G. Shahgholia and S.M.A. Zanjani, "*A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator*", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023.

[13] S.B. Masikana, et al., "*Renewable energy sources integrated load frequency control of power system: A review*", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 8, Article Number: 100605, June 2024.

[14] G. Shahgholian, "*Power system stabilizer application for load frequency control in hydro-electric power plant*", Engineering Mathematics, vol. 2, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2017.

[15] A. Delavari and I. Kamwa, "*Sparse and resilient hierarchical direct load control for primary frequency response improvement and inter-area oscillations damping*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 33, no. 5, pp. 5309-5318, Sept. 2018.

[16] F. Mohammadzamani, et al., "*Adaptive control of nonlinear time delay systems in the presence of output constraints and actuator's faults*", International Journal of Control, vol. 96, no. 3, pp. 541-553, March 2023.

[17] Q. Zhong, et al., "*Adaptive event-triggered PID load frequency control for multi-area interconnected wind*

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

power systems under aperiodic DoS attacks", Expert Systems with Applications, vol. 241, Article Number: 122420, May 2024.
[18] E. Aghadavoodi and G. Shahgholian, "*A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX*", Applied Thermal Engineering, vol. 133, pp. 381-395, March 2018.
[19] X. Zhao, et al., "*Distributed optimal load frequency control for multi-area power systems with controllable loads*", Journal of the Franklin Institute, vol. 361, no. 13, Article Number: 107007, Sept. 2024.
[20] S. Qiao, et al., "*Security concern and fuzzy output sliding mode load frequency control of power systems*", Information Sciences, vol. 676, Article Number: 120793, Aug. 2024.
[21] C.H. Yan, et al., "*Stabilization of load frequency control system via event-triggered intermittent control*", IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol. 69, no. 12, pp. 4934-4938, Dec. 2022.
[22] G.Q. Zeng, et al., "*An adaptive model predictive load frequency control method for multi-area interconnected power systems with photovoltaic generations*", Energies, vol. 10, Article Number: 1840, Nov. 2017.
[23] I.A. Khan, et al., "*New trends and future directions in load frequency control and flexible power system: A comprehensive review*", Alexandria Engineering Journal, vol. 71, pp. 263-308, May 2023.
[24] S.B. Masikana, et al., "*Renewable energy sources integrated load frequency control of power system: A review*", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 8, Article Number: 100605, June 2024.
[25] Z.A. Obaid, et al., "*Frequency control of future power systems: Reviewing and evaluating challenges and new control methods*", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 1, pp. 9-25, Jan. 2019.
[26] K. Yan, et al., "*Frequency control and optimal operation of low-inertia power systems with HVDC and renewable energy: A review*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 39, no. 2, pp. 4279-4295, March 2024.
[27] M. Wadi, et al., "*Load frequency control in smart grids: A review of recent developments*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 189, Article Number: 114013, Jan. 2024.
[28] G. Shahgholian, et al., "*Small signal stability analysis and frequency control in a single-area multi-source electrical energy system*", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 11, no. 2, pp. 107-116, June 2024.
[29] A. Hoseini, et al., "*Robust controller design for load frequency in gas power plant control*", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 12, no. 2, pp. 73-82, Sept. 2023.
[30] S. Balamurugan, et al., "*Small and large signal modeling of heavy duty gas turbine plant for load frequency control*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 79, pp. 84-88, July 2016.
[31] D. Talah and H. Bentarzi, "*Frequency control system effectiveness in a combined cycle gas turbine plant*", Engineering Proceedings, vol. 14, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2022.
[32] M.S. Toularoud, et al., "*A hierarchical control approach to improve the voltage and frequency stability for hybrid microgrids-based distributed energy resources*", Energy Reports, vol. 10, pp. 2693-2709, Nov. 2023.
[33] X. Zhao, et al., "*A time-varying hierarchical load frequency control method for multi-area power system with wind power participation and HVDC tie-line based on MAS structure*", Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 18, pp. 1523–1537, May 2023.
[34] B. Keyvani, et al., "*Improved droop control method for reactive power sharing in autonomous microgrids*", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 9, no. 3, pp. 1-9, Sept. 2022.
[35] B. Fani, et al., "*Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control*", e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, vol. 2, Article Number: 100068, 2022.
[36] A.B. Kunya, "*Hierarchical bi-level load frequency control for multi-area interconnected power systems*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 155, Article Number: 109600, Jan. 2024.
[37] B.M. Patre, et al., "*Fuzzy sliding mode control for spatial control of large nuclear reactor*", IEEE Trans, on Nuclear Science, vol. 62, no. 5, pp. 2255-2265, Oct. 2015.
[38] M.A. Zanjani, et al., "*Gain tuning PID and IP controller with an adaptive controller based on the genetic algorithm for improvement operation of STATCOM*", Proceeding of the WSEAS/ICEEPS-HV-EM, pp. 28-33, Venice, Italy, Nov. 2007.
[39] A. Khosravi, et al., "*Surge control in centrifugal compressor using dynamic controllers*", International Journal of Natural and Engineering Sciences, vol. 18, no. 2, pp. 92-107, Aug. 2024.
[40] G. Shahgholian, et al., "*Small signal stability analysis of dynamic behavior of gas turbine power plant with secondary control loop in electric power system*", Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 23-35, Dec. 2024.
[41] G. Shahgholian, "*Comparison and analysis of dynamic behavior of load frequency control in power system with steam, hydro and gas power plants*", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 10, no. 4, pp. 311-325, Dec. 2023.

رزومه



مهدی ریاحی‌نسب دوره کارشناسی و کارشناسی‌ارشد خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۰ در دانشگاه صنعتی اصفهان در رشته مهندسی برق الکترونیک به پایان رسانده است. وی در سال ۱۳۹۶ موفق به اتمام دوره دکتری در رشته مهندسی برق الکترونیک در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران شده است. وی اکنون به عنوان استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد مشغول هستند. زمینه پژوهشی ایشان فتونویک، لیزرهای نیمه هادی و بیوسنسورهای نوری است و دارای چندین مقاله و کتاب هستند.



مجید معظمی دوره‌های کارشناسی و کارشناسی‌ارشد خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۶ در رشته مهندسی برق قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به پایان رسانده است. در سال ۱۳۹۲ موفق به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 1- Spring 2024

اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از دانشگاه اصفهان شده است. از ایشان تاکنون مقالات مختلفی چاپ شده است و مجزی یا همکار چندین طرح پژوهشی بوده‌اند. زمینه تخصصی ایشان برنامه-ریزی سیستم‌های قدرت، بازار برق و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت است.



سید محمدعلی زنجانی دوره کارشناسی را در سال ۱۳۷۳ و دوره کارشناسی‌ارشد را در سال ۱۳۷۷ به ترتیب از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد فارغ‌التحصیل شده است. در سال ۱۳۹۷ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه علوم و تحقیقات تهران شده اند. از ایشان تاکنون چندین مقاله به چاپ رسیده و به عنوان مجری یا همکار در طرح‌های پژوهشی مختلفی فعال بوده است. همچنین چندین کتاب تاکنون از ایشان به چاپ رسیده است. زمینه پژوهشی ایشان ابزار دقیق، حسگرهای صنعتی و طراحی فیلترهای مجتمع است.



ندا بهزادفر دوره کارشناسی و کارشناسی-ارشد خود را در رشته مهندسی پزشکی در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹ به ترتیب در دانشگاه اصفهان و دانشگاه تهران و دوره دکتری را در رشته مهندسی پزشکی در سال ۱۳۹۴ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است. وی اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و عضو مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. ایشان تاکنون مجری چندین طرح برون دانشگاهی بوده‌اند. زمینه تخصصی پردازش تصویر، پردازش سیگنال و کنترل هوشمند است.



اکبر گلسرخی اصفهانی دوره کارشناسی را در سال ۱۳۸۸ و دوره کارشناسی‌ارشد را در سال ۱۳۹۱ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد در رشته مهندسی برق قدرت به اتمام رسانده‌اند. دوره دکتری را در سال ۱۴۰۲ در رشته مهندسی برق قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان به پایان رسانده‌اند. زمینه تخصصی ایشان دینامیک سیستم‌های قدرت و حفاظت سیستم‌های قدرت است.

زیرنویس‌ها

[1] Low Power Quality
[2] Environmental Protection
[3] Renewable Energies
[4] Power Systems Structure
[5] Load Frequency Control
[6] Photovoltaic
[7] Gas Turbine Power Plant
[8] Combustion Process
[9] Hierarchical Control

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Research Article

Load Frequency Control System in Power Grid with Gas Turbine Power Plant: Stability Analysis for Parameter Changes

Mehdi Riahinasab[1,4], Majid Moazzami[2,4], S. Mohammadali Zanjani[1,4], Neda Behzadfar*[1,4], Akbar Golsorkhi Esfahani[3]

1- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
m.riahinasab@pel.iaun.ac.ir, sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir, n.behzadfar@pel.iaun.ac.ir
2- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, m_moazzami@pel.iaun.ac.ir
3- Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, golesorkhi2010@yahoo.com
4- Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract: Oscillations in electrical power occur in the power system when there is no balance between the demand for power consumption and power generation in a period of time. The frequency should be almost constant at all points of the power system. The load frequency control system (second level control) is used to maintain the frequency in nominal values or close to it. The purpose of active power control is to minimize frequency changes to achieve acceptable power system stability. In this article, the aim is to study and simulate the load frequency control system in the power system with gas turbine power plant. The frequency depends on the parameters of the power system and the differences in the parameters cause a slight deviation in the frequency of the system. The simulation results in the time domain have been determined using MATLAB software. System modes are checked for different system parameters and the effect of parameter changes on power system stability is shown.

Keywords: **Gas Turbine Power Plant, Load Frequency Control, System Modes, Stability Analysis.**

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 1- Spring 2024