بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کنترل توزیع‌شده‌ی بار-فرکانس تحت شبکه در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل

حمید زمانیان

اساتید راهنما

دکتر جعفر قیصری

دکتر فرید شیخ‌الاسلام

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – کنترل آقای حمید زمانیان

تحت عنوان

کنترل توزیع‌شده‌ی بار-فرکانس تحت شبکه در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته

در تاریخ ۱۳۹۳/۷/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر جعفر قیصری
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر فرید شیخ‌الاسلام
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمدامین لطیفی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمدعلی خسروی فرد

خداوند منان را شکر گذارم که صبر و استقامتی به من اعطا فرمود تا بتوانم وظیفه‌ی خویش را به انجام رسانم و در انجام این وظیفه کوتاهی و قصوری را به عمد مرتکب نشوم. خدا را شاکر هستم که فرشتگانی را به خدمت گذاشت تا شرایط را آن چنان که باید فراهم آورند تا بتوانم آنچه را که مسئولیت خویش می دانم با تمام توان انجام دهم. فرشتگانی مهربان، دلسوز، و بزرگوار به نام پدر و به نام مادر که زبان و قلم در وصفشان ناتوان است و البته برادران عزیزم که اگر دل گرمی آن ها نبود بی شک این پایان نامه به انجام نمی رسید.

صد البته، در انجام رسالت خویش همراهی جناب آقای دکتر جعفر قیصری و دکتر فرید شیخ الاسلام اساتید راهنمای گران قدرم کمال تشکر و قدردانی را به جای می آورم که بدون راهنمایی های این عزیزان به بار نشاندن این تلاش ها قطعاً غیر ممکن می نمود.

همچنین، بر خود لازم می دارم از راهنمایی های جناب آقای دکتر محمد امین لطیفی استاد مشاور بزرگوارم سپاسگزاری نمایم.

بر خود لازم می داریم از راهنمایی و همکاری دوستان خوبم در پژوهشکده‌ی کنترل و اتوماسیون صنعتی بویژه مهندس فهیمه کاظم پور، مهندس محمد علی باقرزاده، مهندس امیر حسین گلمر کمال تشکر و قدردانی را به جای آورم.

همچنین، مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر احمد رضا تابش و دکتر ایمان ایزدی که مسئولیت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند، به جای می آورم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم با عشق به:

پدر، مادر و برادران عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ تاریخچه ۲

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده ۳

۱-۳ شرح مسئله و اهداف ۵

۱-۴ کارهای انجام شده در این پایان‌نامه ۸

۱-۵ روند ارائه مطالب ۱۰

فصل دوم: کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت

۲-۱ مقدمه ۱۲

۲-۲ مقدمه‌ای بر کنترل بار- فرکانس در سیستم قدرت سنتی ۱۲

۲-۳ کنترل بار-فرکانس در محیط تجدید ساختار یافته ۱۹

۲-۴ محدودیت‌های فیزیکی LFC ۲۴

۲-۴-۱ محدودیت تولید واحدهای تولید توان و عملکرد گاورنر ۲۴

۲-۴-۲ نامعینی‌ها ۲۵

۲-۴-۳ محدودیت‌های شبکه‌ی مخابراتی ۲۵

۲-۵ جمع بندی ۲۷

فصل سوم: بررسی میزان تداخل بین زیرسیستم‌ها

۳-۱ مقدمه ۲۹

۳-۲ ساختار کنترلی غیرمتمرکز ۳۰

۳-۳ ساختار کنترلی توزیع‌شده ۳۱

۳-۴ تحلیل و بررسی میزان وابستگی بین زیرسیستم‌ها در یک سیستم ابعاد وسیع ۳۳

۳-۵ مثال شبیه‌سازی ۳۵
۳-۶ جمع‌بندی ۴۱
فصل چهارم: کنترل‌کننده‌ی توزیع‌شده‌ی مقاوم LFC با حضور تأخیر زمانی در شبکه‌ی مخابراتی: رویکرد اول
۴-۱ مقدمه ۴۲
۴-۲ توصیف مدل سیستم کنترلی توزیع‌شده ۴۳
۴-۳ تحلیل پایداری توزیع‌شده‌ی مقاوم ۴۵
۴-۴ طراحی کنترل‌کننده‌ی توزیع‌شده‌ی مقاوم ۴۸
۴-۵ بررسی عملکرد رویکرد کنترلی پیشنهادی بر روی سیستم قدرت در محیط تجدید ساختار یافته ۴۹
۴-۵-۱ سناریوی ۱ ..... ۵۲
۵-۶ جمع‌بندی ۵۷
فصل پنجم: کنترل‌کننده‌ی توزیع‌شده‌ی مقاوم LFC با حضور تأخیر زمانی در شبکه‌ی مخابراتی: رویکرد دوم
۵-۱ مقدمه ۵۸
۵-۲ توصیف سیستم در حضور تأخیر زمانی ۵۹
۵-۳ تحلیل پایداری مقاوم پیشنهادی ۶۱
۵-۴ طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم پیشنهادی ۶۶
۵-۴-۱ الگوریتم حل مسئله ۶۹
۵-۵ بررسی عملکرد رویکرد کنترلی پیشنهادی بر روی سیستم قدرت سنتی ۷۲
۵-۵-۱ سناریوی ۱ ..... ۷۴
۵-۵-۲ سناریوی ۲ ..... ۷۸
۵-۶ بررسی عملکرد رویکرد کنترلی پیشنهادی بر روی سیستم قدرت در محیط تجدید ساختار یافته ۸۲
۵-۶-۱ سناریوی ۱ ..... ۸۴
۵-۶-۲ سناریوی ۲ ..... ۸۹
۵-۷ جمع‌بندی ۱۰۰
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ جمع‌بندی کلی نتایج ۱۰۱
۶-۲ پیشنهادات ۱۰۴
پیوست ۱۰۵
مراجع ۱۰۶

چکیده

همزمان با پیچیده‌تر شدن سیستم قدرت، تجدید ساختارهای ایجاد شده در آن و حرکت‌های نو صورت گرفته در راستای شبکه‌های الکتریکی هوشمند، استفاده از شبکه‌ی مخابراتی به عنوان بستر انتقال داده افزایش یافته است. مزایای فراوان سیستم‌های کنترل تحت شبکه سبب شده است تا به‌کارگیری آن‌ها در سیستم قدرت به عنوان یک ضرورت مطرح گردد. یکی از حوزه‌های مورد استفاده از سیستم‌های کنترل تحت شبکه در سیستم قدرت، پشتیبانی از سرویس‌های جانبی از جمله سیستم کنترل بار-فرکانس در محیط تجدید ساختار یافته می‌باشد. کنترل فرکانس—که به عنوان یکی از وظایف اصلی سیستم کنترل تولید خودکار شناخته می‌شود - یکی از مهم‌ترین مسائل کنترلی در طراحی و عملکرد سیستم قدرت بشمار می‌رود. در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته، سیستم‌های کنترل تولید خودکار برای گروهی از نیروگاه‌ها طراحی و بکار گرفته می‌شود. نگه‌داشتن انحرافات فرکانس در محدوده مجاز و تبادلات توان بین نواحی کنترلی نزدیک به مقادیر برنامه‌ریزی شده‌ی خود دو وظیفه‌ی اصلی سیستم کنترل تولید خودکار می‌باشد. دریافت سیگنال از نواحی کنترلی و انتقال سیگنال‌های کنترلی کنترل تولید خودکار از طریق شبکه‌ی مخابراتی صورت می‌پذیرد. یکی از چالش‌هایی که در شبکه‌های مخابراتی برانگیخته می‌شود، تأخیر زمانی در ارسال و یا دریافت سیگنال‌های کنترلی است. تأخیر زمانی به گونه‌ای است که می‌تواند عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس را تحت تأثیر قرار دهد و یا حتی سبب ناپایداری سیستم قدرت گردد. در این پایان‌نامه، ابتدا به بررسی میزان تداخل و وابستگی بین نواحی کنترلی در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته پرداخته شده است. با بررسی میزان تداخل و وابستگی بین نواحی کنترلی بر مبنای باندهای گریشگورین در این پژوهش، این نتیجه حاصل شد که تداخل بین نواحی کنترلی در سیستم قدرت سنتی و تجدید ساختار یافته میزان قابل ملاحظه می‌باشد. از این‌رو، انتظار می‌رود تا با به‌کارگیری ساختار کنترلی توزیع‌شده بتوان عملکرد کنترلی سیستم کنترل تولید خودکار را بهبود داد. در ادامه، با ارائه‌ی دو روش کنترلی جدید به طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم بر مبنای معماری کنترلی توزیع‌شده برای سیستم کنترل تولید خودکار پرداخته شده است. در روش کنترلی اول، اثر تداخلی بین نواحی کنترلی در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای به صورت ورودی در معادلات حالت هر ناحیه‌ی کنترلی در نظر گرفته شده است. در این روش، قانون کنترلی در هر ناحیه‌ی کنترلی به‌گونه‌ای پیشنهاد شده است تا کنترل‌کننده در هر ناحیه، علاوه بر اطلاع از حالت‌های ناحیه‌ی کنترلی خود، از حالت‌های نواحی کنترلی مجاور خود نیز اطلاع داشته باشد و در نتیجه، کنترل‌کننده با اطلاعات بیشتر به کنترل سیستم بپردازد و بهبود بیشتری در پایداری و عملکرد سیستم ایجاد نماید. در روش کنترلی دوم، اثر تداخل بین نواحی کنترلی به عنوان اختلال در نظر گرفته شده است. ساختار کنترلی پیشنهادی در این روش به گونه‌ای است که با وارد نمودن اندازه‌ی تأخیر در مراحل طراحی کنترل‌کننده و همچنین، در نظر گرفتن ماتریس‌های وزنی مناسب؛ ضمن کاهش محافظه‌کاری، عملکرد مقاوم بهتری را در مقایسه با دیگر کنترل-کننده‌های مشابه از خود نشان می‌دهد. به منظور نشان دادن کارایی روش‌های پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در سیستم قدرت سه ناحیه‌ای بهم پیوسته انجام خواهد شد. این شبیه‌سازی‌ها، در دو محیط سنتی و تجدید ساختار یافته سیستم قدرت انجام شده و در سناریوهای مختلفی از بار، تأخیرهای زمانی مختلف و در حضور نامعینی‌های پارامتری در سیستم، به ارزیابی کمی و کیفی نتایج به دست آمده خواهیم پرداخت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رویکردهای پیشنهادی می‌توانند در برابر نامعینی‌های پارامتری، اختلالات وارد بر سیستم قدرت ناشی از تغییرات بار و در حضور هر نوع تأخیر زمانی ثابت و یا متغیر با زمان، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مشابه پیشنهادی در مقالات دیگر، رفتار دینامیکی و مقاومت بهتری را از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته، سیستم کنترل تحت شبکه (NCS)، سیستم کنترل بار-فرکانس (LFC)، سیستم کنترل تولید خودکار (AGC)، تأخیر زمانی، کنترل توزیع‌شده.

فصل اول
مقدمه

۱-۱ تاریخچه

در دنیای امروزه اهمیت انرژی الکتریکی بر کسی پوشیده نیست. به دلایل فراوانی از جمله مسائل زیست محیطی، استفاده از انرژی الکتریکی به عنوان محرک اولیه‌ی صنایع با استقبال فراوانی همراه شده است. در همین راستا، انتظارات مشتریان صنعت برق در دریافت انرژی الکتریکی با قابلیت اعتماد و کیفیت بالا و قیمت مناسب روز به روز در حال افزایش است. از این‌رو، عملکرد دینامیکی سیستم قدرت بایستی برای شرایط عملکردی وسیع و سناریوهای مختلفی از بار طرح‌ریزی گردد [۱]. در این راستا، مهندسین صنعت برق سرویس‌های متنوعی را همراه با توسعه‌ی شبکه، با اهدافی نظیر تحویل انرژی به مشتریان در سطوح ولتاژ و فرکانس مناسب، افزایش بازدهی سیستم قدرت طراحی نموده‌اند. این سرویس‌ها که از آن‌ها به عنوان سرویس‌های جانبی[1] یاد می‌گردد علاوه بر حفظ قابلیت اطمینان شبکه، به تأمین معیارهای عملکردی سیستم -که توسط واحد استانداردسازی NERC[2] تعیین شده است- می‌پردازند [۲].

[1] Ancillay services
[2] North American Electric Reliability Council

شاید بتوان از سرویس کنترل بار-فرکانس[1] (و یا به اختصار LFC) به عنوان مهم‌ترین سرویس جانبی در سیستم قدرت نام برد. مسئله‌ی کنترل و پایدارسازی فرکانس در سیستم قدرت در دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی مطرح گردید [۳]. از آنجایی که، موفقیت در عملکرد سیستم‌های قدرت بهم پیوسته، نیازمند تطابق بین کل توان تولیدی و تقاضای بار (به علاوه تلفات) در سیستم است و کوچک‌ترین عدم تعادل در انرژی، به طور همزمان سبب تغییر فرکانس می‌شود. بنابراین، مطالعه‌ی رفتار فرکانس سیستم شاخص بسیار مناسبی را به منظور ارزیابی تعادل بار و تولید در سیستم‌های قدرت به وجود آورده است. از طرفی، ناتوانی در حفظ تعادل بین تولید و تقاضا می‌تواند مشکلاتی نظیر عملکرد ناصحیح رله‌ها و وسایل حفاظتی شبکه، آسیب رساندن به توربین نیروگاه‌ها، از دست دادن بخشی از بار و یا حتی خاموشی سراسری[2] را در پی داشته باشد [۴]. تنظیم فرکانس سیستم قدرت که به عنوان یکی از وظایف اصلی سیستم *کنترل تولید اتوماتیک*[3] (AGC) شناخته می‌شود- یکی از مهم‌ترین مسائل کنترلی در طراحی و عملکرد سیستم قدرت محسوب می‌شود [۱]. یکی از موضوعات تحقیقاتی در زمینه‌ی LFC، ارائه‌ی استراتژی‌ها و ساختارهای کنترلی مختلف برای سیستم AGC با هدف بهبود کنترل فرکانس سیستم می‌باشد. در بخش بعد، مروری کوتاه بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی کنترل بار-فرکانس خواهیم داشت.

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

همان‌طور که در بخش ۱-۱ توضیح داده شد، اهمیت مسئله‌ی LFC سبب شده است برای تحلیل و سنتز سیستم AGC روش‌های کنترلی مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. به عنوان نمونه، در [۵ و ۶] مرور کلی بر کارهای تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مسئله‌ی LFC شامل روش‌های کنترلی مختلفی که بر اساس تئوری کنترل کلاسیک، بهینه، مقاوم و هوشمند انجام شده است، آورده شده است. همچنین، در [۷ و ۸] به طور مبسوط به بررسی خصوصیت‌ها و ویژگی‌های تکنیکی و اقتصادی مسئله‌ی کنترل فرکانس و ولتاژ در سیستم‌های قدرت سراسر جهان پرداخته شده است. در [۹] نیز به بررسی جنبه‌های فیزیکی و مهندسی مسئله‌ی طراحی LFC با تأکید بر کاربرد تکنیک‌های کنترل مقاوم پرداخته شده است.

در [۱۰ و ۱۱] به منظور حفظ فرکانس سیستم قدرت، برای سیستم AGC یک کنترل‌کننده مبتنی بر معماری متمرکز[4] پیشنهاد شده است. در معماری کنترل متمرکز، تمام اطلاعات سیستم جمع‌آوری شده و به یک واحد کنترل

---

[1] Load Frequency Control
[2] Black out
[3] Automatic Generation Control
[4] Centralized Architecture

مرکزی فرستاده می‌شوند و سپس، فرمان کنترل محاسبه شده در کنترل‌کننده‌ی مرکزی به تک تک عملگرها ارسال می‌شود. اما، با توسعه‌ی فیزیکی سیستم قدرت و پیچیده‌تر شدن سطح ارتباطات در آن، سیستم قدرت تبدیل به یک *سیستم پیچیده‌ی ابعاد وسیع*[1] شده است. مشخصه‌ی برجسته‌ی اکثر سیستم‌های ابعاد وسیع آن است که به خاطر گسترش جغرافیایی، فقدان اطلاعات متمرکز و یا پیچیدگی محاسبات متمرکز طراحی، به‌کارگیری یک کنترل‌کننده‌ی متمرکز را عملاً غیر ممکن کرده است، در نتیجه نمی‌توان چنین سیستم‌هایی را به صورت یک بلوک در نظر گرفت و مسائل کنترلی آن‌ها را با استفاده از روش‌های یکپارچه[2] و تئوری‌های کنترل کلاسیک حل نمود [۱۲]. به منظور حل این مشکل، اغلب سیستم‌های ابعاد وسیع را به چندین زیرسیستم قابل مدیریت کوچک‌تر تقسیم می‌کنند و بسته به میزان تداخل[3] و وابستگی زیرسیستم‌ها با یکدیگر، از ساختارهای کنترلی نظیر معماری غیرمتمرکز[4] و توزیع شده[5] به منظور کنترل آن‌ها استفاده می‌کنند (چنانچه، میزان وابستگی زیرسیستم‌ها با یکدیگر کم و قبل صرفه نظر باشد ساختار کنترلی غیرمتمرکز و در غیر این صورت، ساختار کنترلی توزیع‌شده مناسب‌ترین گزینه برای جایگزینی ساختار کنترلی متمرکز می‌باشد [۱۳]). سیستم قدرت نیز به عنوان یکی از پیچیده‌ترین سیستم‌های ابعاد وسیع از این قاعده مستثنی نیست. سیستم قدرت –بستگی به ساختار شبکه و سیاست‌های کلان مانند خرید و فروش برق– به چندین ناحیه‌ی کنترلی (یا همان زیرسیستم) تقسیم می‌گردد که از طریق خطوط انتقال به یکدیگر متصل شده‌اند که آن به عنوان *سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته*[6] (یا متصل) یاد می‌شود. در این نوع سیستم قدرت، برای هر ناحیه‌ی کنترلی یک سیستم AGC طراحی می‌شود به‌گونه‌ای‌که نگه‌داشتن انحرافات فرکانس در بازه‌ی مجاز و مبادلات توان بین نواحی نزدیک به مقادیر برنامه‌ریزی شده‌ی خود به دنبال تغییرات بار سیستم و یا اختلالات وارد بر آن، از جمله‌ی مهم‌ترین وظایف این واحد کنترلی محسوب می‌گردد [۱۴]. در بسیاری کارهای تحقیقاتی انجام شده در زمینه‌ی طراحی سیستم AGC نظیر [۱۵–۱۸] ساختار کنترلی ارائه شده است که در طراحی کنترل‌کننده‌ی آن‌ها، نواحی کنترلی به صورت مجزا فرض شده‌اند و اثر خطوط ارتباطی بین نواحی (که نقش تداخلی بین نواحی کنترلی را نشان می‌دهد) به صورت نامعینی و یا یک مجموعه سیگنال اختلال در نظر گرفته می‌شود. در [۱۹ و۲۰] نیز کنترل‌کننده‌ی مبتنی بر پیش بینی مدل[7] به عنوان یک راه‌کار برای کنترل توزیع‌شده‌ی سیستم AGC پیشنهاد شده است.

---

[1] Large-Scale complex system
[2] One-shot
[3] Couple
[4] Decentralized Architecture
[5] Distributed Architecture
[6] Multi-area Interconnected Power System
[7] Model Predictive Control

اما، به تازگی صنعت برق در حال تغییر و تحول بنیادی می‌باشد. در سیستم قدرت سنتی[1]، که از به عنوان ساختار VIU[2] یاد می‌شود [۲۱]، انرژی الکتریکی توسط یک مرجع-که عموماً در انحصار دولت است- تولید، انتقال و توزیع شده و تحویل مصرف‌کننده می‌شود. اما، با ورود بخش‌های خصوصی در عرصه‌ی تولید، توزیع و انتقال انرژی و ایجاد فضای رقابتی در بازار آزاد انرژی[3] [۱]-که از آن به عنوان *سیستم قدرت تجدید ساختار یافته*[4] یاد می‌شود- به خاطر پیچیده شدن ارتباطات میان واحدها در حضور محدودیت‌های قابلیت اطمینان، مسئله‌ی LFC شکل پیچیده‌تری را به خود گرفته است [۲۲ و۲۳]. از این‌رو، مدل‌سازی این نامعینی‌ها و رفتار دینامیکی آن‌ها در طراحی کنترل‌کننده‌ی AGC بسیار حائز اهمیت است [۱، ۲۴ و ۲۵]. به عنوان نمونه، در [۲۶-۲۸] برای هر ناحیه‌ی کنترلی در یک سیستم قدرت چندناحیه‌ای بهم پیوسته، کنترل‌کننده‌ی مقاوم بر اساس روش‌های H_∞ و ترکیب H_2/H_∞ به منظور حل مسئله‌ی LFC در محیط تجدید ساختار یافته ارائه شده است. همچنین، در [۲۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در [۱۱] بر اساس روش کنترلی مد لغزشی کنترل‌کننده‌ی سیستم AGC پیشنهاد شده است. در کلیه‌ی این مراجع نشان داده شده است که رویکرد کنترلی پیشنهادی به خوبی توانسته است اهداف مسئله‌ی LFC را برآورده نماید. اما، در اکثر آن‌ها کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی دارای مرتبه بالایی است به‌طوری که پیاده‌سازی آن را مشکل می‌سازد. در [۳۰ و ۳۱] نیز مروری بر مسئله‌ی LFC در محیط تجدید ساختار یافته، رویکردهای کنترلی مناسب در این محیط انجام شده است.

یکی دیگر از موضوعات مطرح شده، تحلیل و سنتز رفتار فرکانس در حضور منابع انرژی تجدید پذیر و توجه به جنبه‌های عملکردی و کنترلی آن‌ها در سیستم قدرت می‌باشد. به عنوان نمونه، می‌توان به رشد و توسعه‌ی سریع توربین‌های بادی در سال‌های اخیر اشاره نمود. از آنجایی که در بسیاری از سیستم‌های قدرت، توان خروجی توربین-های بادی و در نتیجه فرکانس، با نوسانات سرعت باد تغییر می‌کند؛ از این‌رو مطالعه، تحلیل و سنتز سیستم LFC در حضور توربین‌های بادی زمینه‌ی تحقیقاتی جدیدی پیش روی محققان گشوده است [۳۲-۳۵].

۱-۳ شرح مسئله و اهداف

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته، برای هر ناحیه‌ی کنترلی یک سیستم AGC طراحی می‌شود. سیستم AGC از طریق کنترل سطح توان تولیدی واحدهای نیروگاهی تحتِ کنترل،

---

[1] Traditional power system
[2] Vertically Integrated Utility
[3] Liberalized electricity market
[4] Deregulated power system

مسئله‌ی LFC را در سیستم قدرت دنبال می‌نماید (در حقیقت، تعدادی از نیروگاه‌های موجود در هر ناحیه‌ی کنترلی با در نظر گرفتن مسائلی نظیر قابلیت مانور مناسب در شرایط مختلف، هزینه‌ی تمام شده‌ی تولید برق و امکان رقابت در بازار آزاد انرژی به منظور مشارکت در مسئله‌ی LFC انتخاب می‌شوند). در سیستم AGC، معمولاً اعمال فرمان کنترلی به هر نیروگاه تحتِ کنترل در هر ناحیه، از طریق یک مرکز کنترلی دور از نواحی به نام *مرکز دیسپاچینگ*[1] صادر می‌شود. انتقال داده‌هایی نظیر میزان مبادلات توان بین نواحی کنترلی، فرکانس سیستم و بارگذاری مگاوات واحدها از طریق واحدهای دسترسی از راه دور[2] (یا به اختصار RTUها) به مرکز دیسپاچینگ صورت می‌گیرد که پس از پردازش توسط کامپیوترهای دیجیتال، سیگنال‌های کنترلی از طریق همان RTUها به واحدهای نیروگاهی تحت کنترل فرستاده می‌شوند. یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های کنترلی را می‌توان تأخیر زمانی به شمار آورد، به‌گونه‌ای که این عامل می‌تواند اثرات نامطلوبی بر عملکرد سیستم قدرت داشته باشد [۳۶]. در سیستم AGC، تأخیر زمانی ناشی از شبکه‌ی ارتباطی ممکن است در دو مسیر ایجاد می‌شود:

۱- تأخیر زمانی بین سنسور و کنترل‌کننده: میزان تأخیر زمانی است که در مسیر انتقال سیگنال از سمت بار به مرکز دیسپاچینگ و سیستم AGC ایجاد می‌شود.
۲- تأخیر زمانی بین کنترل‌کننده و عملگرها: میزان تأخیر زمانی است که در مسیر ارسال سیگنال کنترلی از مرکز دیسپاچینگ و سیستم AGC به نیروگاه‌های تحت کنترل ایجاد می‌شود.

در سیستم‌های قدرت سنتی و مبتنی بر ساختار VIU، دریافت سیگنال از نواحی کنترلی و انتقال سیگنال‌های کنترلی AGC، از طریق خطوط ارتباطی اختصاصی[3] صورت می‌پذیرد. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی انجام شده، از تأخیر زمانی ایجاد شده در نتیجه‌ی انتقال داده از طریق این خطوط ارتباطی اختصاصی چشم‌پوشی شده است [۳۷-۴۰]. این فرض تا حدودی قابل قبول است، چرا که میزان این تأخیر در مقایسه با دینامیک آهسته‌ی LFC –که نسبتاً مقادیر کوچکی دارد– قابل صرفه نظر کردن است. اما، همزمان با پیچیده‌تر شدن سیستم قدرت، تجدید ساختار یافتن آن و حرکت‌های نو صورت گرفته در راستای شبکه‌های الکتریکی هوشمند[4]، استفاده از شبکه‌های مخابراتی افزایش یافته است [۴۱-۴۳]. در حقیقت، شبکه‌ی مخابراتی بستری را به عنوان مسیر انتقال داده بین کنترل‌کننده و سیستم تحت کنترل فراهم می‌آورد که از آن به عنوان *کنترل تحت شبکه*[5] (ویا به اختصار NCS) یاد می‌شود. مزایای فراوان

[1] Dispatching center
[2] Remote Terminal Units
[3] Dedicated communication channel
[4] Smart grids
[5] Networked Control System (or Networked based Control System)

NCS در قیاس با سیستم‌های کنترل متعارف و سیم‌کشی‌های نقطه به نقطه نظیر تبادل حجم وسیع داده‌ها در پوشش جغرافیایی وسیع‌تر سیستم‌های کنترل [۴۴]، کاهش پیچیدگی در ایجاد ارتباط اجزای مختلف سیستم کنترل، کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی سیستم کنترل ابعاد وسیع و سهولت نصب، سادگی در نگهداری و عیب یابی [۱۲ و ۱۳] سبب شده است تا به‌کارگیری آن‌ها در سیستم قدرت به عنوان یک ضرورت برای پشتیبانی از سرویس‌های جانبی مطرح گردد [۱، ۴۲، ۴۵ و ۴۶]. در این میان، دریافت سیگنال از نواحی کنترلی و انتقال سیگنال‌های کنترلی AGC در محیط تجدید ساختار یافته از طریق بستر شبکه صورت می‌پذیرد. اما، در کنار مزایای بسیار NCS، استفاده از شبکه‌ی مخابراتی چالش‌هایی نیز به همراه دارد [۱۲]. یکی از برجسته‌ترین چالش‌ها در استفاده از شبکه‌ی مخابراتی، ایجاد تأخیر زمانی ثابت یا تصادفی در انتقال داده به علت پهنای باند محدود، گم شدن[1] و یا جابجایی[2] بسته‌های داده می‌باشد [۴۷ و ۴۸]. در [۱] بیان شده است که در آینده‌ی نزدیک، به خاطر توسعه‌ی زیرساخت‌های فیزیکی سیستم قدرت همزمان با تجدید ساختار یافتن آن، تأخیر ارتباطی به عنوان یکی از برجسته‌ترین چالش‌ها در زمینه‌ی تحلیل و سنتز LFC خواهد بود. در [۹] نیز بیان شده است که با توسعه‌ی تکنولوژی‌های اندازه‌گیری ناحیه‌وسیع[3] (WAM) نظیر واحدهای اندازه‌گیری فازوری[4] (PMU) در سیستم قدرت، انتقال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به مرکز دیسپاچینگ می‌تواند با تأخیر ارتباطی بزرگی همراه باشد به‌گونه‌ای که در [۴۹] دامنه‌ی تغییرات این تأخیر ارتباطی بین ده تا چندین هزار میلی ثانیه یا بیشتر عنوان شده است. تأخیر ارتباطی به‌گونه‌ای است که می‌تواند عملکرد سیستم AGC را تحت تأثیر قرار دهد و یا حتی سبب ناپایداری سیستم قدرت گردد [۳۶، ۳۷، ۴۹ و ۵۰].

طراحی کنترل‌کننده‌های مقاومی که بتواند در حضور تأخیرهای ارتباطی تحمیل شده به سیستم AGC عملکرد خوبی را نتیجه دهد، یکی از موضوعات مطرح در سال‌های اخیر می‌باشد [۵۱]. به عنوان نمونه، در [۵۰] بر مدل‌سازی تأخیر شبکه و نیازمندی به شبکه‌ی مخابراتی به منظور پشتیبانی از طرح LFC تمرکز شده است. در [۵۲] روشی به منظور جبران تأخیر ارتباطی پیشنهاد شده است. در [۲] نیز یک روش طراحی کنترل‌کننده بر اساس نامساوی خطی ماتریسی[5] (LMI) برای سیستم AGC در حضور تأخیرهای ارتباطی پیشنهاد شده است. [۵۳] سعی داشته است با استفاده از تئوری کنترل مقاوم بر اساس روش‌های H_∞ و ترکیب H_2/H_∞ به همراه توسعه‌ی یک الگوریتم تکرار، رویکرد کنترلی را برای تنظیم بهره‌ی کنترلی PI پیشنهاد نماید که در حضور تأخیر زمانی به عنوان نامعینی در مسئله‌ی

[1] Dropout
[2] Disordering
[3] Wide-Area Measurement
[4] Phasor Measurement Unit
[5] Linear Matrix Inequality

LFC، سیستم مقاومت خوبی را از خود نشان دهد. در [۱] رویکرد پیشنهاد شده در [۵۳]، بر روی یک مدل آزمایشگاهی غیرخطی سیستم قدرت سنتی تست و صحت رویکرد مورد تأیید قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه می‌خواهیم، کنترل‌کننده‌ی مقاوم بر مبنای معماری کنترل توزیع‌شده با به‌کارگیری دو رویکرد نو، به منظور حل مسئله‌ی LFC و برآورده نمودن اهداف سیستم AGC در حضور شبکه‌ی مخابراتی با تأکید بر نقش تأخیر زمانی در آن ارائه نماییم. در رویکرد کنترلی اول، اثر تداخل بین نواحی کنترلی به صورت ورودی در معادلات هر زیرسیستم در نظر گرفته شده است. در این رویکرد، کنترل‌کننده در هر ناحیه‌ی کنترلی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود تا علاوه بر اطلاع از حالت‌های ناحیه‌ی کنترلی خود، از حالت‌های نواحی کنترلی مجاور خود نیز اطلاع داشته باشد و در نتیجه، کنترل‌کننده با اطلاعات بیشتر به کنترل سیستم پرداخته و بهبود بیشتری در پایداری و عملکرد سیستم ایجاد نماید. یکی دیگر از کارهای انجام شده در این پایان‌نامه، ارائه‌ی رویکرد کنترل توزیع‌شده‌ی مقاوم دیگری خواهد بود. در این رویکرد کنترلی برخلاف رویکرد کنترلی اول، اثر تداخل بین نواحی کنترلی به صورت یک سیگنال اختلال در روند طراحی کنترل‌کننده در نظر گرفته شده است. همچنین، در این رویکرد با وارد نمودن میزان تأخیر زمانی در مراحل طراحی کنترل‌کننده، بهره‌ی کنترلی با محافظه‌کاری کمتر ارائه خواهد شد. به منظور نشان دادن کارایی رویکردهای پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در سیستم قدرت سه ناحیه‌ای بهم پیوسته انجام خواهد شد. این شبیه‌سازی‌ها، در دو محیط سنتی و تجدید ساختار یافته سیستم قدرت انجام شده و در سناریوهای مختلفی از بار، تأخیرهای زمانی مختلف و در حضور نامعینی‌های پارامتری در سیستم، به ارزیابی کمی و کیفی نتایج به دست آمده خواهیم پرداخت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رویکردهای پیشنهادی می‌توانند در برابر نامعینی‌های پارامتری، اختلالات وارد بر سیستم قدرت ناشی از تغییرات بار و در حضور هر نوع تأخیر زمانی ثابت و یا متغیر با زمان، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مشابه پیشنهادی در دیگر مقالات، رفتار دینامیکی و مقاومت بهتری را از خود نشان می‌دهد.

۱-۴ کارهای انجام شده در این پایان‌نامه

در این پایان‌نامه ابتدا، به بررسی میزان تداخل و وابستگی بین نواحی کنترلی در سیستم قدرت سنتی و تجدید ساختار یافته -با هدف یافتن ساختار کنترلی مناسب (غیرمتمرکز یا توزیع‌شده)- در سیستم AGC می‌پردازیم. در طراحی کنترل‌کننده‌ی بر مبنای معماری غیرمتمرکز، از اثر تداخل بین نواحی کنترلی چشم‌پوشی می‌شود. این فرض هنگامی به عملکرد خوب کنترل‌کننده‌ی غیرمتمرکز در مقایسه با کنترل متمرکز و توزیع‌شده منجر می‌گردد که اثر تداخل بین نواحی مقدار کوچکی داشته باشد و بتوان از آن صرفه‌نظر کرد. در این پژوهش، با بررسی میزان تداخل و

وابستگی بین نواحی کنترلی سیستم قدرت-در دو مورد مطالعاتی- این نتیجه حاصل شد که میزان تداخل بین نواحی کنترلی در سیستم قدرت سنتی و تجدید ساختار یافته قابل ملاحظه می‌باشد و در نتیجه می‌توان انتظار داشت تا با به‌کارگیری ساختار کنترلی مبتنی بر معماری توزیع‌شده بتوان عملکرد دینامیکی سیستم AGC را بهبود داد. از این‌رو، کنترل‌کننده‌های مقاومی بر مبنای معماری کنترل توزیع‌شده به منظور برآورده نمودن اهداف سیستم AGC پیشنهاد خواهد شد. در رویکرد کنترلی اول، کنترل‌کننده‌ی هر ناحیه‌ی کنترلی به‌گونه‌ای پیشنهاد شده است تا علاوه بر اطلاع از حالت‌های ناحیه‌ی کنترلی خود، از حالت‌های نواحی کنترلی مجاور خود نیز اطلاع داشته باشد. در نتیجه، کنترل‌کننده با اطلاعات بیشتر به کنترل سیستم می‌پردازد. بدین منظور، در یک قضیه‌ی پیشنهادی رویکرد کنترل توزیع‌شده‌ی مقاوم بر اساس LMI ارائه خواهد گردید تا بتوان از طریق آن بهره‌های کنترل‌کننده‌ای را به دست آورد تا ضمن پایدارسازی مجانبی هر زیرسیستم و بالاتر از آن سیستم کلی بتواند مقاومت خوبی در برابر اختلالات و نامعینی‌های وارد بر سیستم داشته باشد.

یکی دیگر از نوآوری‌های انجام شده در این پایان‌نامه، ارائه‌ی رویکرد کنترل توزیع‌شده‌ی مقاوم دیگری خواهد بود. در این رویکرد کنترلی برخلاف رویکرد کنترلی اول، اثر تداخل بین نواحی کنترلی به صورت یک سیگنال اختلال در روند طراحی کنترل‌کننده در نظر گرفته خواهد شد. همچنین، در این رویکرد با وارد نمودن حدود و نرخ تغییرات تأخیر زمانی در مراحل طراحی کنترل‌کننده، بهره‌ی کنترلی با محافظه‌کاری کمتر ارائه خواهد شد. در روند اثبات پایداری مقاوم سیستم، شروط کافی بر اساس تابعی لیاپانوف-کراسوفسکی جدید به همراه چند ماتریس وزنی مناسب ساخته شده‌اند. از آنجایی که این ماتریس‌های وزنی توسط نرم‌افزار MATLAB تعیین می‌شود، درجه‌ی آزادی مناسبی برای طراحی ایجاد می‌کنند و در نتیجه، محافظه‌کاری تعیین بهره‌های کنترل‌کننده در مقایسه با دیگر روش‌های پیشنهادی کمتر شده است.

در پایان، شبیه‌سازی‌های بر روی سیستم قدرت در محیط سنتی و تجدید ساختار یافته در نرم افزار سیمولینک انجام خواهد شد. در این شبیه‌سازی‌ها، به مقایسه عملکرد سیستم AGC در حضور دو رویکرد کنترلی توزیع‌شده پیشنهادی در این پایان‌نامه پرداخته خواهد شد. همچنین، در شبیه‌سازی‌ها محدودیت‌های غیرخطی نظیر محدودیت تولید نیروگاه‌ها به صورت ترم اشباع و کندی پاسخ‌گویی گاورنرِ سرعت به صورت باند مرده مد نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن این محدودیت‌ها، سبب می‌شود که نتایج بدست آمده، تا حدودی تطابق نزدیک‌تری با سیستم قدرت واقعی داشته باشد و می‌توان آن‌را به عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های این اثر بیان نمود. از دیگر نوآوری در این پایان‌نامه می‌توان به استخراج معیارهای بررسی پایداری مقاوم و قضایای طراحی کنترل‌کننده با وجود تأخیر زمانی به فرم LMI اشاره نمود که در نتیجه‌ی آن، طراح یا مهندس سیستم قادر خواهد بود به راحتی و تنها با به‌کارگیری

یکی از حل کننده‌های عددی موجود مثلاً جعبه ابزار LMI در نرم‌افزار MATLAB تحلیل‌ها و طراحی‌های لازم را انجام دهد.

۱-۵ روند ارائه مطالب

برای نیل به اهداف مشخص شده در این پایان‌نامه، در فصل دوم به معرفی دو مدل خطی متداول به منظور مطالعه‌ی مسئله‌ی LFC می‌پردازیم. این مدل‌های خطی بر مبنای مدل سیستم قدرت سنتی و تجدید ساختار یافته می‌باشند که به منظور مطالعات طرح LFC مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس، به بررسی محدودیت‌ها و چالش‌های اصلی سیستم LFC با تأکید بر نقش برجسته‌ی تأخیر ارتباطی می‌پردازیم.

در فصل سوم، به بررسی میزان تداخل و وابستگی بین نواحی کنترلی سیستم قدرت سه ناحیه‌ای بهم پیوسته خواهیم پرداخت. با بررسی معیار باندهای گریشگورین در دو مورد مطالعاتی سیستم قدرت در محیط سنتی و تجدید ساختار یافته نشان داده خواهد شد که در سیستم قدرت سنتی و تجدید ساختار یافته، اثر تداخل بین نواحی کنترلی میزان قابل ملاحظه‌ای دارد. لذا، این انتظار برانگیخته می‌شود تا با طراحی کنترل‌کننده‌ی سیستم AGC بر مبنای معماری توزیع‌شده برای هر یک از نواحی کنترلی در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته بتوان به عملکرد دینامیکی بهتری دست یافت.

در فصل چهارم، به تحلیل پایداری مقاوم سیستم ابعاد وسیع متشکل از تعدادی زیرسیستم مرتبط با هم بر مبنای کنترل‌کننده‌ی توزیع‌شده در سیستم قدرت خواهیم پرداخت. در این فصل، به ارائه‌ی قضیه‌ای بر مبنای LMI می‌پردازیم که از آن طریق بتوان به راحتی بهره‌های کنترل‌کننده‌ی سیستم را یافت. در پایان، رویکرد کنترلی پیشنهادی بر روی سیستم قدرت سه ناحیه‌ای بهم پیوسته در محیط تجدید ساختار یافته مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و به تحلیل نتایج پرداخته خواهد شد.

در فصل پنجم، با تأکید بر نقش برجسته‌ی تأخیر زمانی در شبکه‌ی مخابراتی به طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم نوع PI بر مبنای معماری کنترلی توزیع‌شده و غیرمتمرکز می‌پردازیم. با این هدف، قضیه‌ای در حضور حدود و نرخ تغییرات تأخیر زمانی در مراحل طراحی کنترل‌کننده پیشنهاد گردیده است. از آنجایی که، یافتن بهره‌های کنترلی در قضیه‌ی پیشنهادی، نیازمند حل مسئله‌ی غیر محدب می‌باشد، لذا با به‌کارگیری یک روش خطی‌سازی ICCL[1] به تبدیل مسئله به یک مسئله‌ی محدب خواهیم پرداخت. در ادامه، با معرفی الگوریتمی بر مبنای روش ICCL، با دنبال

[1] Improved Cone Complementarity Linearization method

نمودن گام‌های مشخص، جواب زیر بهینه‌ای[1] برای مسئله‌ی کنترلی بدست خواهیم آورد. همچنین، به منظور ارزیابی قضیه‌ی پیشنهادی، در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی‌هایی بر روی سیستم قدرت در محیط‌های سنتی و تجدید ساختار یافته انجام می‌شود و به طور مبسوطی به تحلیل نتایج می‌پردازیم. به علاوه، در پایان این فصل با معرفی سه شاخص عملکردی به بررسی و ارزیابی کمی نتایج به دست آمده پرداخته شده است.

سرانجام، در فصل ششم به جمع‌بندی نتایج کار خواهیم پرداخت و پیشنهاداتی برای ادامه کار در آینده مطرح خواهد شد.

[1] Suboptimal