

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

عنوان :

کنترل فرکانس با در نظر گرفتن پاسخ بار در ریز شبکه‌ها

دانشجو :

سید میلاد علیزاده

استاد راهنما :

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علی اکبرزاده کلات

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۴

تعهد نامه

اینجانب سید میلاد علیزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل فرکانس با در نظر گرفتن پاسخ بار در ریز شبکه‌ها تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد و دکتر علی اکبرزاده کلات متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

تقدیم بہ

ساحت مقدس امام زمان (عج) اللہ تعالیٰ

و روح پر فتوح امام راحل و شہدای و الامقام

و پدر و مادر و برادر عزیزم

و ہمسر مہربانم

تقدیر و شکر:

حمد و سپاس بی کران خدای را که توفیق عبادت و اسلام آوردن را نصیب این حقیر سرپا تقصیر نمود، باشد که شکر این نعمت را با کار خالصانه برای انقلاب و اسلام به جای آورم

بر خود لازم می دانم از تمام بزرگوارانی که در انجام این پیمان نامه به حقیر کمک نموده اند شکر و قدردانی کنم.

بدین وسیله از زحمات تمام اساتید و معلمان عزیزم که با سه صدر تابه امروز مسئولیت تعلیم و تربیت بنده را به عهده داشته اند کمال شکر را دارم و هم چنین از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر باژاد شکر ویژه امی خواهم داشت که در این مدت به مانند دوستی صمیمی مرا از راهنمایی های خود بهره مند ساخته اند و هم چنین شکر می کنم از جناب آقای دکتر کبرزاده که با توضیحات و راهنمایی های خود مرا بهره مند ساختند.

از خداوند منان موفقیت روز افزون و طول عمر با عزت را برای این دو بزرگوار و تمام اساتید و معلمان دلسوز مسکت دارم.

باشد که فضل الهی شامل حال ما شود و توفیق ییمودن راه شهدار داشته باشیم

من الله التوفیق

سید میلاد علیزاده

۱۳۹۴

چکیده

کنترل فرکانس در سیستم قدرت با کمک تنظیم توان خروجی واحدهای تولیدی در پاسخ به تغییرات بار صورت می‌گیرد. در حال حاضر با توجه به افزایش نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر و بازده پایین منابع تولید متداول در ریز شبکه، مشارکت سمت مصرف کننده در کنترل فرکانس به دلایل فنی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. در سیستم قدرت ایجاد تعادل بین تولید و مصرف بسیار مهم است و عدم تعادل می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری در سیستم قدرت شود.

در این پایان نامه از پاسخ تقاضا و پتانسیل موجود در سمت مصرف کننده برای کنترل فرکانس - بار استفاده خواهد شد. بنابراین ارائه مدلی برای استفاده از پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار بسیار مهم است. در این پایان نامه مدلی ارائه خواهد شد که بر مبنای آن می‌توان اثر پاسخ تقاضا را در کنترل فرکانس - بار مشاهده کرد و به این ترتیب تعادل بین تولید و مصرف با صرف هزینه کمی برقرار خواهد شد. برای این منظور معادلات سیستم قدرت در دو حالت اصلاح شده به کمک پاسخ تقاضا و بدون آن استخراج خواهد شد و با حل این معادلات اثر پاسخ تقاضا را در کنترل فرکانس - بار سیستم قدرت مشاهده خواهیم کرد. در این پایان نامه به منظور بهترین عملکرد در کنترل فرکانس از کنترل بهینه استفاده شده است. ماتریس‌های وزن دهی در تابع هدف به کمک الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات تعیین شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار باعث کاهش انحراف فرکانس در سیستم قدرت می‌شود.

کلمات کلیدی: کنترل فرکانس - بار، پاسخ تقاضا، شبکه هوشمند، کنترل بهینه، مدل سیستم

قدرت دو ناحیه‌ای

لیست مقالات مستخرج:

مقالات داخلی:

۱. سید میلاد علیزاده، مهدی بانژاد، علی اکبرزاده کلات. کنترل فرکانس ریز شبکه اصلاح شده با پاسخ تقاضا با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات و کنترل بهینه. کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی برق و علوم کامپیوتر. دانشگاه تهران شهریور ۱۳۹۴
۲. سید میلاد علیزاده، مهدی بانژاد، علی اکبرزاده کلات. ایجاد تعادل بین تولید و مصرف در ریز شبکه ها با استفاده از پاسخ تقاضا. کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی برق و علوم کامپیوتر. دانشگاه تهران شهریور ۱۳۹۴

مقالات خارجی:

3. S. Milad Alizadeh, Mahdi Banejad, and Ali Akbarzadeh. *Control of Frequency Using Dynamic Demand Response*

در دست ارسال.

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول مقدمه ۱
- ۲- فصل دوم: پاسخ تقاضا، مزایا و چالش‌های آن، کارهای انجام شده ۵
- ۱-۲ مقدمه ۶
- ۲-۲ تعاریف پاسخ تقاضا ۷
- ۲-۳ تقسیم‌بندی مشترکان و مشخصه‌های آنان ۹
- ۴-۲ دسته‌بندی برنامه‌های پاسخ تقاضا ۱۰
- ۵-۲ مزایا و هزینه‌های برنامه‌های پاسخ تقاضا ۱۳
- ۶-۲ هزینه‌های زیرساختی پاسخ تقاضا: ۱۷
- ۷-۲ نتایج حاصل از اجرای آزمایشی برنامه‌های پاسخ تقاضا: ۱۸
- ۱-۷-۲ نتایج حاصل از اجرای آزمایشی طرح در اروپا: ۱۸
- ۲-۸ جمع‌بندی: ۱۹
- ۳- فصل سوم: کنترل فرکانس - بار و مروری بر کارهای انجام شده ۲۱
- ۱-۳ مقدمه ۲۲
- ۲-۳ سیستم قدرت متداول: ۲۵
- ۳-۳ عملکرد کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت در شرایط کاری مختلف: ۲۸
- ۴-۳ مسئله‌ی دینامیک سیستم قدرت و ابعاد زمانی کنترل‌کننده‌ها: ۳۰
- ۵-۳ کنترل فرکانس - بار : ۳۱
- ۶-۳ اساس حلقه‌های کنترل فرکانس: ۳۳

۳۵	۷-۳ مدل پاسخ فرکانسی:
۳۸	۸-۳ جمع بندی:
۳۹	۴- فصل چهارم: ارائه مدل ترکیبی کنترل بار - فرکانس و پاسخ تقاضا.....
۴۰	۱-۴ مقدمه
۴۰	۲-۴ فرمول بندی برای مدل سیستم قدرت دو ناحیه ای با پاسخ تقاضا و بدون آن:.....
۴۵	۳-۴ مدل دینامیکی فضای حالت برای LFC-DR :
۴۶	۴-۴ تقریب پاد:
۵۳	۵-۴ ارزیابی خطای حالت دائمی:
۶۰	۶-۴ روش عمومی طراحی کنترل کننده برای مدل LFC-DR :
۶۰	۱-۶-۴ روش کنترل بهینه و مسئله تنظیم کننده ی بهینه:
۶۶	۷-۴ جمع بندی:
۶۷	۵- فصل پنجم: شبیه سازی
۶۸	۱-۵ مقدمه
۶۹	۲-۵ شبیه سازی مدل فضای حالت سیستم قدرت دو ناحیه ای با پاسخ تقاضا.....
۷۲	۳-۵ اعمال اغتشاش به ناحیه ی اول و مشاهده انحراف فرکانس هر دو ناحیه
۷۴	۴-۵ اعمال اغتشاش به ناحیه دوم و مشاهده انحراف فرکانس هر دو ناحیه
۷۶	۵-۵ اعمال اغتشاش به دو ناحیه و مشاهده انحراف فرکانس هر ناحیه.....
۷۸	۵-۶ بررسی نقش α در LFC-DR
۸۱	۷-۵ تحلیل نتایج:

۸-۵	تعیین ضرایب وزنی در روش LQR	۸۲
۹-۵	الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات:.....	۸۲
۵-۱۰	استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات برای LFC-DR	۸۴
۱۱-۵	تحلیل نتایج:.....	۹۱
۱۲-۵	جمع‌بندی.....	۹۲
۶- فصل ششم:	نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۹۳
۱-۶	نتیجه‌گیری.....	۹۴
۶-۲	پیشنهادها.....	۹۵
۷-مراجع	۹۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: مزایای پاسخ تقاضا [۶] ۱۴
- شکل ۱-۳: ساختار عمومی سیستم قدرت به همراه حلقه‌های کنترلی آن [۳] ۲۷
- شکل ۲-۳: ژنراتور سنکرون به همراه کنترل فرکانس [۳] ۳۴
- شکل ۳-۳: بلوک دیاگرام مدل ژنراتور-بار [۳] ۳۷
- شکل ۴-۳: مدل سیستم قدرت [۳] ۳۷
- شکل ۱-۴: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای بدون پاسخ تقاضا [۴۷] ۴۲
- شکل ۲-۴: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا در هر ناحیه ($\Delta PDR1, \Delta PDR2$) ۴۴
- شکل ۳-۴: نمودار گذر سیگنال برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا ۴۸
- شکل ۴-۴: مدل سیستم قدرت دوناحیه‌ای ساده شده با پاسخ تقاضا ۵۴
- شکل ۵-۴: سطح زیر منحنی ضرایب وزن دهی کنترل بهینه [۵۴] ۶۲
- شکل ۱-۵: روند به دست آوردن مدل فضای حالت سیستم و پیاده‌سازی کنترل بهینه ۶۹
- شکل ۲-۵: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ساده شده با پاسخ تقاضا که کنترل کننده‌های آن مشخص شده‌اند ۷۰
- شکل ۳-۵: انحراف فرکانس ناحیه‌ی اول با اعمال اغتشاش در ناحیه اول ۷۲
- شکل ۴-۵: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به ناحیه اول ۷۳
- شکل ۵-۵: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم ۷۵
- شکل ۶-۵: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم ۷۶
- شکل ۷-۵: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به دو ناحیه ۷۷
- شکل ۸-۵: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به دو ناحیه ۷۸
- شکل ۹-۵: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به دو ناحیه با توجه به α های متفاوت ۸۰

- شکل ۵-۱۰: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به دو ناحیه با توجه به α های متفاوت ۸۱
- شکل ۵-۱۱: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه اول ۸۶
- شکل ۵-۱۲: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه اول ۸۷
- شکل ۵-۱۳: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم ۸۸
- شکل ۵-۱۴: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم ۸۹
- شکل ۵-۱۵: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه ۹۰
- شکل ۵-۱۶: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه ۹۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱: ضرایب فیدبک نمودار گذر سیگنال ۴۹

جدول ۵-۱: داده‌های سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ۷۱

فصل اول:

مقدمه

مقدمه

پاسخ تقاضا^۱ یک بخش غیرقابل انکار سیستم قدرت در آینده خواهد بود. اکثر تحقیقات بر مزایا و کاربرد پاسخ تقاضا متمرکز شده است. در همین راستا تحقیقات کمی بر تأثیر پاسخ تقاضا بر روی عملکرد دینامیکی سیستم قدرت مخصوصاً مسائل مرتبط با کنترل فرکانس^۲ - بار^۳ متمرکز شده است. لذا در این پایان نامه قصد آن می رود که با معرفی حلقه‌ی کنترلی پاسخ تقاضا در مدل متداول کنترل فرکانس^۲ - بار (که به اختصار به آن LFC-DR می گویند) برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای این خلأ تحقیقاتی پوشش داده شود. از جمله نکات مهمی که باید به آن توجه شود، این است که همیشه پاسخ تقاضا به اندازه کافی در شبکه موجود نمی باشد. یعنی در بعضی مواقع مشترکان در برنامه‌های پاسخ تقاضا شرکت نمی کنند و پتانسیل سمت مصرف کننده برای شبکه در دسترس نیست، بنابراین برای به واقعیت نزدیک کردن مسئله از یک متغیر کمکی استفاده شده است که به کمک آن عمل کنترلی بین پاسخ تقاضا و کنترل کننده‌ی کمکی^۳ تقسیم خواهد شد و به این ترتیب میزان مشارکت پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس^۲ - بار قابل تنظیم خواهد بود. همچنین از دیگر پارامترهای قابل توجه که می توان به آن اشاره کرد تأخیر حاصل از ادوات زیر ساختی به کار رفته در پاسخ تقاضا خواهد بود که به عنوان یک واقعیت موجود در برنامه‌های پاسخ تقاضا به آن توجه شده است.

تنظیم فرکانس در سیستم قدرت متداول به کمک ایجاد تعادل بین تولید و مصرف به دست می آید و معمولاً این کار به وسیله‌ی رزرو چرخان / غیر چرخان حاصل می شود [۱].

¹ Demand Response (DR)

² Load-Frequency Control (LFC)

³ Supplementary Control

اهداف استفاده از پاسخ تقاضا:

در آینده میزان نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر^۱ در شبکه قدرت بسیار زیاد خواهد شد و از جمله چالش‌های منابع انرژی تجدید پذیر، متغیر بودن توان خروجی آن‌ها به دلیل وابستگی این نوع منابع به محیط پیرامون آن‌ها است. در چنین مواردی که استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر فراگیر شده باشد، از راه‌های غلبه بر چالش یادشده استفاده از بارهای قابل کنترل می‌باشد بنابراین یکی از اهداف استفاده از پاسخ تقاضا کمک به تنظیم فرکانس ریزش‌بکه می‌باشد که در آن از منابع انرژی تجدید‌پذیر استفاده شده باشد. همچنین به کمک پاسخ تقاضا نیاز به استفاده از تولیدات متداول در مواقع پر باری کاهش می‌یابد که این امر برای محیط‌زیست با اهمیت است و به دنبال آن هزینه‌های جاری شرکت‌های برق بسیار کاهش می‌یابد که این امر از لحاظ اقتصادی بسیار مورد توجه شرکت‌های ارائه‌دهنده انرژی برق می‌باشد. وقتی منابع انرژی تجدید پذیر مانند توربین بادی و سلول خورشیدی در سطح شبکه به صورت گسترده مورد استفاده قرار گیرند در آن صورت به منظور جبران تغییرات زیاد تولید، باید به میزان زیادی رزرو چرخان/غیر چرخان در شبکه موجود باشد که این امر باعث صرف هزینه‌های بسیار زیاد خواهد شد. بنابراین استفاده از منابع پاسخ تقاضا به عنوان راه‌حلی با هزینه‌ی کم، سازگار با محیط‌زیست، مورد توجه است. منابع پاسخ تقاضا می‌توانند سرویس‌های کمکی را فراهم سازند به طوری که این سرویس‌ها مناسب بهره‌برداری برای شرکت‌های توزیع خواهند بود [۲]. شرکت‌های برق به کمک پاسخ تقاضا قادر خواهند بود بارهای قابل کنترل مشترکان را به منظور جابه‌جایی بار^۲ یا کاهش بار در زمان پر باری به گونه‌ای کنترل کنند که فرکانس شبکه در نقطه کار نامی خود باقی بماند و پایداری فرکانسی شبکه حفظ شود.

¹ Renewable Energy Resources (RE)

² Load Shifting

روند ارائه مطالب

فصل دوم این پایان نامه به بررسی پاسخ تقاضا می پردازد و تعاریفی که سازمان های بین المللی از آن ارائه کرده اند ذکر می گردد هم چنین در همین رابطه مزایا و چالش های پاسخ تقاضا بیان خواهد شد. کارهای صورت گرفته توسط محققین به صورت مروری بیان می شود. و در نهایت مروری بر طرح های آزمایشی حاصل از پاسخ تقاضا که در چند کشور پیاده سازی شده است، به عنوان مصادیقی از پاسخ تقاضا بیان می گردد.

در **فصل سوم** انواع سیستم قدرت از لحاظ یک ناحیه ای یا چند ناحیه ای بودن، وجود حلقه های کنترلی مختلف، توابع تبدیل مختلف و ترکیبی از حالت های مختلف بررسی می شود. هم چنین روش های کنترلی مختلف ذکر می شوند. در نهایت سعی می شود که گزارشی از کارهای انجام شده در این زمینه به صورت کامل آورده شود.

در **فصل چهارم** فرمول بندی مسئله پاسخ تقاضا و نحوه ی به کارگیری آن در کنترل فرکانس سیستم قدرت بیان خواهد شد، هم چنین روند به دست آوردن توابع تبدیل و در نهایت معادلات حاکم بر سیستم مورد مطالعه بیان می گردد.

در **فصل پنجم** پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر کنترل فرکانس در شبیه سازی ها مورد مقایسه قرار می گیرند و درصد تغییرات فرکانس به ازای تغییر پارامترهای مختلف به صورت نمودار آورده می شود تا به کمک مقایسه و تحلیل نتایج بهترین مقادیر برای پارامترها به منظور عملکرد بهتر کنترل فرکانس صورت بگیرد.

در **فصل ششم** نتایج نهایی حاصل از به کارگیری پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس بیان می شوند و پیشنهادهایی در زمینه چگونگی اجرایی ساختن ایده ی مذکور ذکر می شود.

فصل دوم:

پاسخ تقاضا، مزایا و چالش‌های آن، کارهای

انجام‌شده

۲-۱ مقدمه

برای ایجاد پایداری فرکانس در سیستم قدرت از کنترل‌کننده‌های سمت تولید مانند گاورنر^۱ و کنترل‌کننده تولید خودکار^۲ استفاده می‌شود، که این امر هزینه‌های قابل‌توجه‌ای به همراه دارد. اما آنچه در شبکه‌های هوشمند در حال به وقوع پیوستن است در واقع توجه به پتانسیل موجود در طرف مصرف‌کننده می‌باشد که از آن با عنوان پاسخ تقاضا (پاسخ تقاضا) یاد می‌کنند که این امر باعث کاهش وابستگی ریز شبکه به کنترل‌کننده‌های پرهزینه‌ی سمت تولید خواهد شد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ریز شبکه‌ها، اجتناب از واحدهای تولیدکننده بسیار بزرگ می‌باشد به طوری که در ریز شبکه‌ها^۳ واحدهای تولیدی به صورت پراکنده در نظر گرفته شده‌اند که به آن‌ها واحدهای تولید پراکنده^۴ می‌گویند [۳]. یکی از مؤثرترین روش‌ها به منظور اجرایی ساختن پاسخ تقاضا استفاده از فناوری شبکه‌های ارتباطی و ادوات کنترلی پیشرفته خواهد بود. به شبکه‌هایی که دارای چنین فناوری پیشرفته‌ای باشند ریز شبکه می‌گویند. در ریز شبکه این توانایی وجود دارد که منابع انرژی محلی با یکدیگر در تعامل باشند [۴]. تولیدات پراکنده مانند منابع انرژی تجدید پذیر، میکروتوربین‌ها^۵ و موتورهای دیزل ژنراتور^۶ به صورت بسیار وسیع در ریز شبکه‌ها مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند. نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر در شبکه‌ی قدرت به مانند منابع تولید متداول با مشکلات و چالش‌هایی همراه است [۵].

¹ Governor

² Automatic Generation Control

³ Microgrid

⁴ Distributed Generation (DG)

⁵ Micro Turbine

⁶ Diesel Engine Generator

۲-۲ تعاریف پاسخ تقاضا

در چشم‌انداز آژانس بین‌المللی انرژی^۱ برای سال‌های ۲۰۰۸ - ۲۰۱۰ فعال کردن سمت تقاضا به دلیل منافع اقتصادی و سطوح مختلف بهره‌برداری بسیار بااهمیت شد و در اکثر سیاست‌گذاری‌ها سعی کردند از پتانسیل سمت تقاضا استفاده کنند [۶]. یک تعریف جامع برای مدیریت سمت تقاضا^۲ در [۷] آمده است. در واقع پاسخ تقاضا می‌تواند توان جاری‌شده در شبکه را مدیریت کند، پروفایل ولتاژها را تنظیم کند، توان اکتیو و راکتیو و تپ‌چنجرها را تنظیم کند، تلفات را کاهش دهد، بازآرایی شبکه^۳ را آسان کند، و همچنین استفاده از بارهای قابل کنترل را به‌صورت هوشمند ممکن می‌کند [۸].

یکی از کامل‌ترین تعاریف پایه برای پاسخ تقاضا را کمیته‌ی تنظیم انرژی فدرال^۴ ارائه کرده است که بر مبنای آن پاسخ تقاضا توانایی مشترکان در پاسخ دادن به نیازهای سیستم قدرت می‌باشد به‌طوری‌که هم قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حد مطلوب برقرار شود و همچنین هزینه‌های مصرف‌کنندگان و شبکه‌ی قدرت کاهش یابد [۹]. برای مدت‌های زیادی بر طبق تعریف ارائه‌شده، پاسخ تقاضا فقط عاملی برای کاهش پیک‌بار شبکه تلقی می‌شد. در واقع طبق تعریف ارائه‌شده در بالا که جزء تعاریف پایه می‌باشد، منظور از پاسخ تقاضا کاهش مصرف مشترکان می‌باشد و در قبال این کاهش مصرف، تشویقی‌هایی در صورت حساب ماهانه‌ی مشترکان در نظر گرفته می‌شود و اگر مشتری با پذیرفتن پاسخ تقاضا به آن عمل نکند جریمه خواهد شد و جریمه به صورت حساب ماهانه‌ی آن مشترک اضافه خواهد شد [۹]. آنچه از تعریف اخیر دریافت می‌شود پرداخت‌های تشویقی به ازای کاهش مصرف در زمان پرباری خواهد بود، حال آنکه شبکه قدرت نوردل^۵ تعریف مشابه و

¹ International Energy Agency (IEA)

² Demand Side Management (DSM)

³ Network Restructuring

⁴ Federal Energy Regulation Commission (FERC)

⁵ NORDEL

باکمی اصلاحات را ارائه داده است که بر مبنای آن پاسخ تقاضا یک اقدام داوطلبانه از سوی مشترکان خواهد بود که در زمان پر باری که قابلیت اطمینان سیستم قدرت به خطر خواهد افتاد اقدام می‌کند و این اقدام داوطلبانه با پرداخت تشویقی همراه خواهد بود تا بدین روش مشترکان بیشتری متمایل به شرکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا باشند.

بر مبنای تعریف اصلاح شده توسط شرکت نوردل: پاسخ تقاضا می‌تواند در زمان پر باری شبکه به کار گرفته شود که در این صورت از آن به‌عنوان ظرفیت موجود در شبکه یاد می‌کنند یا به‌صورت یک‌زمان نسبتاً کوتاه به کار گرفته شود که در آن صورت از آن به‌عنوان انرژی موجود در شبکه یاد می‌کنند. پرداخت‌های تشویقی را می‌توان از طریق شرکت‌هایی که صورت حساب ماهانه را حساب می‌کنند به مشترکان پرداخت کرد. به‌طور معمول منابع پاسخ تقاضا به‌عنوان سرویس زیرمجموعه رزرو غیر چرخان قراردادده می‌شوند و بنابراین باید در محدوده زمانی ۱۰ دقیقه یا کمتر در دسترس باشند [۲]. وقتی پس از وقوع اغتشاش یا اضافه شدن بار بزرگی در شبکه، منابع پاسخ تقاضا سریعاً مورد بهره‌برداری قرار بگیرند در آن صورت به این نوع کنترل، کنترل مستقیم بار^۱ می‌گویند. این ظرفیت به‌صورت کاربردی و اقتصادی از طریق کنترل مستقیم وسایلی مانند آبگرمکن‌های برقی که دارای مخزن آب می‌باشند به کار گرفته می‌شود [۱۰، ۱۱]. اگرچه این حقیقت وجود دارد که یک منبع پاسخ تقاضا به‌تنهایی دارای نرخ عدم همکاری بالایی می‌تواند باشد، اما باید توجه کرد که با تجمیع تعداد زیادی از منابع پاسخ تقاضا یک منبع پاسخ تقاضا با قابلیت اطمینان بالا بدست خواهد آمد. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت اطمینان منابع پاسخ تقاضا بیشتر از منابع متداول می‌باشد، چون حتی اگر برای یک تولیدکننده‌ی متداول در زمان شروع به کار مشکلی پیش بیاید مقدار بسیار زیادی از ظرفیت رزرو چرخان از دست خواهد رفت، حال آنکه چنین ویژگی‌ای در پاسخ تقاضا وجود ندارد [۱۲].

¹ Direct Load Control

۳-۲ تقسیم‌بندی مشترکان و مشخصه‌های آنان

مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی را می‌توان به سه دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی کرد [۶]:

(۱) مصرف‌کنندگان صنعتی

(۲) مصرف‌کنندگان تجاری

(۳) مصرف‌کنندگان بخش خانگی.

هر گروه از مشترکان دارای مشخصه‌ها و پارامترهای مخصوص به خود هستند که با آن ویژگی‌ها می‌توانند در برنامه‌های پاسخ تقاضا شرکت کنند و از مزایای طرح بهره‌مند شوند.

مشترکان می‌توانند در زمان پرباری شبکه بدون آنکه در الگوی مصرف خود تغییری ایجاد کنند فقط با تغییر زمان مصرف خود در برنامه‌های پاسخ تقاضا شرکت کنند، به طوری که در زمان پرباری بخشی از مصرف خود را متوقف کنند و آن‌ها را به زمان دیگری که شبکه در حالت پرباری نمی‌باشد انتقال دهند، که البته این نوع مشارکت به وسایل خاصی اختصاص دارد، وسایلی مانند ماشین لباسشویی که می‌توان زمان مصرف آن‌ها را جابجا کرد. یکی دیگر از انتخاب‌های پیش روی مشترکان استفاده از تولیدات پراکنده می‌باشد، در واقع مشترکان می‌توانند در زمان پرباری شبکه از تولیدات پراکنده استفاده کنند تا در صورت شرکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا در صورت حساب ماهانه آن‌ها هزینه‌های اضافی حساب نشود و به این ترتیب در کاهش هزینه‌های جاری نقش مثبتی ایفا کنند. بر اساس آنچه در [۱۳] گزارش شده است تعداد مشترکان صنعتی و تجاری بسیار کمتر از مشترکان خانگی می‌باشند، اما پتانسیل مشترکان صنعتی و تجاری برای کاهش پیک بار بسیار بیشتر از مشترکان خانگی می‌باشد. به دلیل وجود سیستم‌ها و ادوات قرارداده شده در سمت مشترکان صنعتی و تجاری، امکان مشارکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا در این دسته از مصرف‌کنندگان بیشتر می‌باشد و

درواقع این گروه از مشترکان با صرف هزینه‌های زیرساختی کمتر قادر خواهند بود در برنامه‌های پاسخ تقاضا مشارکت داشته باشند.

۲-۴ دسته‌بندی برنامه‌های پاسخ تقاضا

دسته‌بندی برنامه‌های پاسخ تقاضا از سال ۲۰۰۶ به بعد دست‌خوش تغییرات بسیار زیادی شد، چون اولین اصلاحات از پاسخ تقاضا و اندازه‌گیری پیشرفته توسط FERC اعلام شد. قبل از ایجاد تغییرات در دسته‌بندی برنامه‌های پاسخ تقاضا، دودسته‌ی اصلی برای آن‌ها وجود داشت، برنامه‌های مشوق^۱ و برنامه‌های بر اساس هزینه^۲. در [۱۳] تقسیم‌بندی جدیدی بدون توجه به تقسیم‌بندی اولیه گزارش شده است و تعداد تنوع برنامه‌های پاسخ تقاضا تا سال ۲۰۰۸ به دوازده برنامه و تا سال ۲۰۱۰ به پانزده برنامه‌ی متنوع رسیده است. کنترل بار به‌صورت مستقیم از کارآمدترین برنامه‌های پاسخ تقاضا است و طبق تعریف مشخص شده برای آن در واقع بهره‌برداران سیستم قدرت بارهای خاصی از مشترکان را به‌صورت خودکار تحت کنترل شبکه درخواهند آورد و در صورت لزوم آن بارها را با تاخیر راه‌اندازی می‌کنند یا وسایلی مانند تهویه‌ی هوا را با تغییر نقطه‌ی کار آن برای زمان کمی خاموش می‌کنند و به‌این‌ترتیب این برنامه در سیستم قدرت بیشترین تأثیرگذاری را دارد. در واقع برنامه‌ی کنترل مستقیم بار، مشترکان را به سمت مصرف کمتر سوق خواهد داد و بیشتر برای بخش خانگی و بخش کوچکی از مشترکان تجاری مناسب می‌باشد. برنامه‌ی ایجاد وقفه در بار^۳ که به‌عنوان یکی از برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشد، وظیفه ایجاد وقفه‌ی کوتاه‌مدت در بار را به عهده دارد به‌طوری‌که وقتی شبکه در حالت پرباری قرار می‌گیرد دستور وقفه را به بعضی از وسایل که شرایط وقفه در آن وسایل باعث عدم رضایت مشترکان نشود را صادر می‌کند. همان‌طور که بیان شد این برنامه برای همه‌ی وسایل مناسب نیست و در واقع در تمام برنامه‌های پاسخ تقاضا سعی می‌شود برای مشترکان

^۱ Incentive Based Program (IBP)

^۲ Price Based Program (PBP)

^۳ Interruptible Load Program

عدم رضایت ایجاد نشود، بنابراین یکی از دلایل تنوع برنامه‌های پاسخ تقاضا، تنوع وسایل مورد استفاده‌ی مشترکان و به دنبال آن تنوع مشخصه‌های وسایل موجود می‌باشد، به‌طور مثال برنامه‌ی ایجاد وقفه برای وسایلی مانند ماشین لباسشویی بسیار مناسب است و هیچ عدم رضایتی برای مشترک ایجاد نمی‌گردد حال آنکه اگر برنامه ایجاد وقفه برای سیستم‌هایی که عمل پردازش اطلاعات را انجام می‌دهند صورت پذیرد باعث ایجاد ضرر و زیان مشترکان و حتی از دست رفتن اطلاعات آنان می‌گردد، که این عامل نشان‌دهنده درست نبودن برنامه‌ی ایجاد وقفه برای سیستم‌های دارای پردازش اطلاعات می‌باشد [۱۴]. یکی از برنامه‌های پاسخ تقاضا برنامه‌ی افزایش هزینه در زمان پیک بار بحرانی به صورت کنترل شده^۱ می‌باشد. در واقع این برنامه تلفیقی از برنامه‌ی کنترل مستقیم بار و برنامه‌ی افزایش هزینه انرژی در زمان پیک بار بحرانی می‌باشد. البته پیک بار بحرانی توسط بهره‌برداران سیستم قدرت شناسایی می‌شود و توسط ادوات ارتباطی دوطرفه به آن دسته از مشترکان که قابلیت دریافت اطلاعات را دارند، این اطلاعات گزارش می‌شود تا اقدامات لازم در جهت کاهش پیک بار را انجام دهند و مشمول دریافت تشویقی در صورت حساب ماهانه‌ی خویش گردند. البته لازم به ذکر است طبق گزارش FERC هر کدام از برنامه‌های پاسخ تقاضا باید از قبل بین بهره‌برداران سیستم قدرت و هر یک از مشترکان به صورت توافقی مورد قرارداد واقع گردد تا در صورت نیاز بتوان از آن‌ها استفاده‌ی لازم را به عمل آورد. امروزه بار به‌عنوان یک منبع انرژی فرضی تلقی می‌شود، به طوری که برنامه‌های ایجاد ظرفیت و منابع سمت تقاضا می‌توانند در جهت کاهش حوادث سیستم قدرت مانند از دست رفتن بخشی از تولید به کمک سیستم قدرت آمده و بدین ترتیب تأمین توان توسط سیستم قدرت پابرجا باشد و سیستم قدرت دچار خاموشی سراسری نگردد [۱۵]. از دیگر برنامه‌های پاسخ تقاضا، پاسخ تقاضای اضطراری^۲ می‌باشد که در زمان ایجاد حوادث در شبکه قدرت،

¹ Critical Peak Pricing with Control

² Emergency Demand Response Program

با پیشنهاد تشویقی‌های مناسب، سعی در ترغیب مشترکان برای مشارکت در این نوع برنامه را دارد و در واقع هدف این برنامه ایجاد سطح امنیت مناسب برای سیستم قدرت در مواقع ایجاد خطر می‌باشد. سرویس‌های تنظیم‌کننده در آخرین بررسی‌های FERC به‌عنوان سرویس‌های کمکی در نظر گرفته شده‌اند. سرویس‌های تنظیم‌کننده به‌عنوان سرویس‌های پاسخ تقاضا می‌توانند در جهت کاهش مصرف مشترکان یا افزایش مصرف آن‌ها اقداماتی را انجام دهند، البته در شبکه‌های هوشمند این عمل به‌صورت خودکار و با فرستادن یا دریافت سیگنال از بازار برق و شبکه‌ی قدرت انجام می‌گیرد. در واقع مشترکانی که با شرکت‌های برق در زمینه برنامه‌های پاسخ تقاضا همکاری می‌کنند، بر طبق صورت‌حساب که به‌صورت دوره‌ای برای آن‌ها قابل‌نمایش می‌باشد می‌توانند تصمیم‌گیری کنند که چه مقدار بار مصرفی خود را کاهش دهند البته نمایش صورت‌حساب به‌صورت دوره‌ای در شبکه‌های هوشمند به کمک ادوات ارتباطی دوطرفه امکان‌پذیر می‌باشد. از دیگر برنامه‌های پاسخ تقاضا زمان واقعی^۱ می‌باشد، که بر طبق این برنامه هزینه انرژی مصرفی از شرکت برق متناسب با موقعیت‌های گوناگون شبکه قدرت تغییر می‌کند. البته باید به این نکته توجه داشت که هزینه‌های حساب‌شده توسط این نوع برنامه به‌صورت میانگین هزینه‌های جاری تولید و انتقال می‌باشد، هم‌چنین در این نوع برنامه بازه‌های تغییر به گونه‌ای می‌باشد که مشترکان مجبور به بررسی پیوسته قیمت‌ها نباشند و در واقع دائماً قیمت‌ها تغییر نمی‌کند بلکه در بازه‌های زمانی معقول که عدم رضایتی برای مشترکان ایجاد نشود، هزینه‌های نهایی برای مشترکان تغییر می‌کند. برنامه‌ی هزینه در زمان پیک‌بار بحرانی^۲ از دیگر برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشد که بر طبق این برنامه هزینه برق مصرفی مشترکان فقط در زمان‌های پرباری تغییر می‌کند و در ساعات دیگر هزینه‌ها هیچ تغییری نخواهند کرد، بدین ترتیب مشترکان با اطلاع از ساعات پرباری شبکه که توسط شبکه اعلام می‌شود می‌توانند مصرف خود را به‌گونه‌ای تنظیم کنند که هم قابلیت اطمینان شبکه در حد مطلوب باقی بماند و هم‌چنین هزینه‌های

¹ Time of Use (TOU)

² Critical Peak Pricing (CPP)

صورت حساب ماهانه‌ی خود را به بهترین نحو مدیریت کنند و آن را تا حد ممکن کاهش دهند. البته شرکت برق برای تشویق مشترکان به کاهش مصرف در زمان پرباری تشویقی‌های مختلف را پیشنهاد می‌دهد. برنامه‌ی هزینه زمان واقعی^۱ از دیگر برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشد که هزینه برق مصرفی مشترکان را به صورت لحظه‌ای البته در بازه‌های یک‌ساعته یا بیشتر محاسبه می‌کند و در هر بازه‌ی زمانی با احتساب پارامترهای مختلف هزینه جاری شبکه برق حساب می‌شود و بر طبق آن برای مشترکان متناسب با مصرف، صورت حساب ماهانه صادر خواهد شد. از لحاظ اقتصادی مؤثرترین و کارآمدترین برنامه، برنامه RTP می‌باشد که به صورت مستقیم بر مشارکت مصرف‌کنندگان در بازار برق نظارت می‌کند. تخفیف دادن در زمان پیک‌بار^۲ از دیگر برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشد به طوری که اگر در زمان پیک‌بار بحرانی، مشترکان مصرف خود را کاهش دهند و کمتر از مقدار مشخص شده^۳ مصرف کنند، تشویقی دریافت خواهند کرد و در این نوع برنامه، زمان پیک‌بار بحرانی به صورت ماهانه یا سالانه به مشترکان اطلاع‌رسانی می‌شود و این زمان به صورت بازه‌های چندساعته می‌باشد، که مشترکان با اطلاع از آن به راحتی می‌توانند در طرح شرکت کنند و از مزایای آن بهره‌مند شوند. با اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا هم‌چنین تراکم خطوط انتقال کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت که از این جهت نیز، این گونه طرح‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشند.

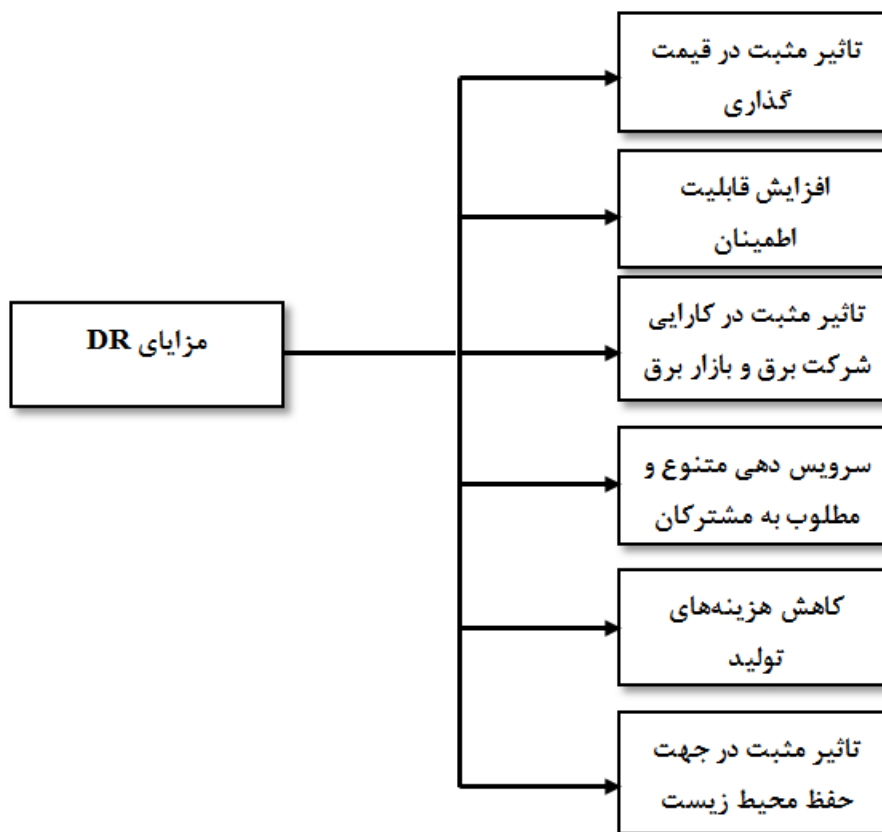
۵-۲ مزایا و هزینه‌های برنامه‌های پاسخ تقاضا

مزایای پاسخ تقاضا همان طور که در شکل (۲-۱) دیده می‌شود، به شش دسته‌ی اصلی می‌شود [۶].

^۱ Real Time Pricing (RTP)

^۲ Peak Time Rebate

^۳ Base Line



شکل ۱-۲: مزایای پاسخ تقاضا [۶].

از دیدگاه مشتریان درواقع تشویقی‌های مناسب می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها شود به شرط آنکه مشتریان بر طبق قرارداد خود، مصرفشان را کاهش دهند [۱۶, ۱۷]. اگرچه مشتریان می‌توانند بدون کاهش مصرف خود، تشویقی‌های برنامه‌های پاسخ تقاضا را دریافت کنند، به این صورت که زمان مصرف خود را از ساعات پرباری به ساعات کم باری تغییر دهند و به این صورت به قابلیت اطمینان شبکه کمک کنند و تشویقی‌های گوناگون طرح‌ها و برنامه‌های پاسخ تقاضا را دریافت کنند. باوجود مزایای اقتصادی منابع پاسخ تقاضا، مسئله‌ی نوسان فرکانس که در اثر سریع بودن تغییر توان مصرفی وسایل هوشمند اتفاق می‌افتد، یک چالش مهم برای اجرایی ساختن پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس می‌باشد که باید آن را مورد توجه قرارداد.

در صورت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر مانند توربین بادی و سلول خورشیدی به‌منظور

حفظ پایداری فرکانس و ولتاژ در سیستم قدرت باید از روش‌های جدید مانند پاسخ تقاضا استفاده گردد. امروزه بارهای بسیاری توسط میکروپروسورها تجهیز شده‌اند که این ویژگی، کنترل این وسایل را ممکن می‌سازد. این وسایل قادر هستند حالت‌های مختلف سیستم قدرت را به صورت کلی پایش کنند و به کمک اطلاعات داده شده به آن‌ها، توان مصرفی خودشان را طوری تنظیم کنند که تعادل در تولید و مصرف در سیستم قدرت ایجاد گردد. بارهایی که سرویس‌دهی آن‌ها به صورت انرژی گرمایی است مانند یخچال فریزرها، گرم‌کن‌ها و... بهترین کاندید برای استفاده در برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشند چون ظرفیت گرمایی ذاتی این وسایل این توانایی را ایجاد می‌کند که به راحتی مصرف این‌گونه بارها را در مواقع لازم، جابجایی زمانی^۱ داده بدون اینکه کوچک‌ترین نارضایتی‌ای برای مصرف‌کنندگان ایجاد گردد. در واقع بارها با اندازه‌گیری فرکانس سیستم، توان مصرفی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که در جهت کاهش خطای فرکانس از مقدار نامی آن باشد و به این ترتیب تنظیم فرکانس از طریق بارها صورت می‌گیرد. این مفهوم بانام تقاضا به عنوان رزرو برای کنترل فرکانس^۲ [۱۸] و همچنین با نام‌های برنامه‌ریزی توان مصرفی تطبیقی با فرکانس^۳ [۱۹]، تقاضای دینامیکی [۲۰] یا کنترل بارهای قابل کنترل برای تنظیم فرکانس [۲۱] شناخته می‌شود. نقش کنترل‌کننده‌ها در سیستم قدرت (هر دو نوع خودکار و غیرخودکار) برقراری پایداری سیستم و باقی نگه داشتن سیستم قدرت حول نقطه کار آن می‌باشد به طوری که اگر اغتشاش کوچک یا بزرگ در سیستم قدرت صورت گیرد، کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت آن را به نقطه‌ی کار خود بازمی‌گردانند [۲۲]. به عبارت دیگر وظیفه‌ی کنترل‌کننده‌ها در سیستم قدرت باقی نگه داشتن سیستم قدرت در عملکرد مطلوب و همچنین ایجاد پایداری در سیستم قدرت ضمن به وجود آمدن اغتشاش مانند اتصال کوتاه، از دست رفتن بخشی از تولید یا بارگذاری در شبکه می‌باشد [۳]. سیستم قدرت

¹ Time Shifting

² Demand Frequency Controlled Required

³ Frequency Adaptive Power Energy Rescheduler

درواقع یک سیستم به شدت غیرخطی و دارای ابعاد بزرگ و یک سیستم دینامیکی دارای چندین ورودی - چندین خروجی^۱ با تعداد بسیار زیاد متغیر، ادوات حفاظتی و حلقه‌های کنترلی با مشخصه‌ها و پاسخ‌های دینامیکی متفاوت می‌باشد. مشارکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا در بلندمدت باعث کاهش هزینه‌های شرکت برق می‌گردد چون با اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا، استفاده از منابع گران‌قیمت کاهش می‌یابد و به این ترتیب، صرفه‌جویی بسیار خوبی در استفاده از انرژی صورت خواهد گرفت، در نتیجه‌ی چنین اقدامی، مشترکان نیز با کاهش قابل توجه صورت حساب ماهانه خود مواجه می‌شوند که این مسئله نیز بسیار حائز اهمیت است و نقش برنامه‌های پاسخ تقاضا را در کاهش هزینه‌ها و بالا بردن قابلیت اطمینان به خوبی نشان می‌دهد [۲۳، ۲۴]. در کنار موارد بیان شده، اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا باعث کاهش هزینه‌های رزرو چرخان/غیر چرخان می‌شود، چون با اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا نیاز شبکه به ظرفیت مازاد در ساعات پرباری کاهش می‌یابد و دیگر نیازی به تولید مازاد در یک بازه‌ی کوتاه‌مدت وجود نخواهد داشت، هم‌چنین در صورت اجرایی شدن برنامه‌های پاسخ تقاضا نیاز به افزایش زیرساخت‌های بخش توزیع کاهش می‌یابد و در واقع زیرساخت‌های موجود جواب‌گوی نیاز مشترکان خواهد بود و هزینه‌های بسیار بالای ایجاد زیرساخت‌های جدید به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. برنامه‌های پاسخ تقاضا علاوه بر آنچه بیان شد، هم‌چنین تأثیر به سزایی در کاهش خطرپذیری و افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌ی قدرت دارند. مزایای قابلیت اطمینان را می‌توان در بحث برنامه‌های پاسخ تقاضا به عنوان سرویس‌های کمکی^۲ بیان کرد. مفاهیم سرویس‌های کمکی حاصل از برنامه‌های پاسخ تقاضا مشابه سرویس‌های کمکی تولیدات متداول می‌باشد، تفاوت آن‌ها در این است که تولیدات متداول با افزایش تولید در جهت رفع نیاز شبکه اقدام می‌کنند. از جمله موارد برتری AS-DRP نسبت به سرویس‌های کمکی متداول این است که برای استفاده از سرویس‌های کمکی متداول، شرکت‌های برق مجبور به تأمین انرژی راه‌اندازی تولیدکنندگان متداول می‌باشد که این امر مستلزم

¹ Multi Input Multi Output

² Ancillary Service as DR Program (AS-DRP)

صرف هزینه زیادی می‌باشد، هم‌چنین به دلیل روشن و خاموش کردن مکرر رزرو غیر چرخان، باید هزینه‌های تعمیر و نگهداری حاصل از این کار را به هزینه‌های جاری اضافه کنیم که چنین مواردی در AS-DRP وجود ندارد. علاوه بر مزیت اقتصادی در AS-DRP در مقابل سرویس‌های کمکی متداول، زمان شروع به کار سرویس‌های کمکی نیز مطرح می‌باشد که این زمان برای سرویس‌های کمکی متداول به‌طور میانگین در حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد، اما در AS-DRP، این زمان مطرح نمی‌باشد و با شروع طرح بلافاصله AS-DRP شروع به کار خواهد کرد [۲۵].

۲-۶ هزینه‌های زیرساختی پاسخ تقاضا:

اجرا کردن و بهره‌برداری از برنامه‌های پاسخ تقاضا برای هر دو طرف مشترکان و شرکت‌های برق هزینه‌های اولیه خواهد داشت. برای سمت مصرف‌کننده هزینه‌هایی مانند نصب ترموستات‌های هوشمند، زیرساخت‌های ارتباطی، کنترل‌کننده‌های پیک‌بار سیستم‌های مدیریت انرژی^۱ وجود دارد که باید آن‌ها را بپردازند. علاوه بر هزینه‌های اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز وجود دارد که باید به‌صورت پیوسته و در بازه‌های زمانی مشخص توسط مشترکان پرداخت شود که بتوان برنامه‌های پاسخ تقاضا را به‌صورت مستمر ادامه داد. در واقع برای مشارکت در برنامه‌های پاسخ تقاضا باید برای یک بار هزینه‌های اولیه و به‌صورت مستمر هزینه‌های تعمیر و نگهداری ادوات مربوط به آن را پرداخت کرد.

در همین راستا سرمایه‌گذاری در منابع تولید پراکنده نیز به‌عنوان هزینه‌هایی می‌باشد که مشترکان آن را پرداخت می‌کنند. ارائه‌دهندگان برنامه‌های پاسخ تقاضا یعنی شرکت‌های توزیع نیز هزینه‌هایی باید پرداخت کنند. این هزینه‌ها شامل هزینه برای زیرساخت‌های ارتباطی در بخش کنترل‌کننده‌ها و زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته می‌باشد، به‌طوری‌که اطلاعات اندازه‌گیری شده جمع‌آوری، ذخیره و انتقال داده می‌شوند. نهایتاً از جمله هزینه‌های ابتدایی که شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی پاسخ تقاضا یعنی

¹ Energy Management System (EMS)

شرکت‌های توزیع آن را پرداخت خواهند کرد هزینه‌ی آموزش به مشترکان می‌باشد که مشترکان با اطلاعات کامل نسبت به شرکت در طرح‌ها و برنامه‌های پاسخ تقاضا اقدام کنند. در واقع آموزش و اطلاع‌رسانی از مزیت‌های برنامه‌های پاسخ تقاضا از این جهت حائز اهمیت می‌باشد که موفقیت در برنامه‌های پاسخ تقاضا مستلزم مشارکت، مشترکان می‌باشد و هر مقدار درصد مشارکت بیشتر شود، موفقیت در برنامه‌های پاسخ تقاضا بیشتر خواهد بود، بنابراین باید به مشترکان، که از مهم‌ترین ارکان اجرا شدن برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌باشند، آموزش لازم ارائه گردد.

۲-۷ نتایج حاصل از اجرای آزمایشی برنامه‌های پاسخ تقاضا :

۲-۷-۱ نتایج حاصل از اجرای آزمایشی طرح در اروپا:

در این بخش گزارشی از اجرای آزمایشی برنامه‌های پاسخ تقاضا در سه کشور اروپایی یعنی ایتالیا، اسپانیا و نروژ ارائه خواهد شد.

در نروژ برنامه‌های پاسخ تقاضا به منظور پیش‌بینی گسترش ظرفیت شبکه اجرا شدند. در نتیجه‌ی اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا در بخش اسلو، ۱۰ درصد کاهش مصرف انرژی گزارش شد، همچنین در اثر اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا، بالا رفتن اطلاعات مشترکان نسبت به برنامه‌ها قابل ملاحظه بود [۲۴]. گزارش‌ها نشان می‌دهد که اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا کاهش ۴/۵ مگاواتی پیک بار در بخش مشترکان تجاری را در پی داشته است و همچنین باعث صرفه‌جویی ۱۵ درصدی در مصرف انرژی شده است. در ایتالیا برای بخش قابل توجهی از مشترکان صنعتی برنامه‌های پاسخ تقاضا اجرا شد و ۶/۵ درصد پیک بار شبکه در این بخش کاهش یافت و برنامه‌ی حذف بار به صورت خودکار به قطع بعضی بارها در زمان اضطراری اقدام کرده است. برنامه حذف بار به صورت خودکار به دو برنامه تقسیم شده است یکی برنامه‌ی حذف بار بدون اعلان قبلی و دیگری برنامه حذف بار که ۱۵ دقیقه قبل از حذف بار به مشترک اطلاع‌رسانی می‌شود. میزان باری که در برنامه حذف بار بدون اطلاع قبلی، قطع شده برابر ۱۲۰۰ مگاوات و میزان باری که در برنامه‌ی حذف بار با اطلاع قبلی، قطع شده برابر

۱۷۵۰ مگاوات گزارش شده است. در اسپانیا نیز تمرکز اصلی در برنامه‌های پاسخ تقاضا بر بخش صنعتی می‌باشد. در بیشتر شرکت‌های اروپایی کنترل مستقیم بار یکی از استراتژی‌های مدیریت سمت تقاضا می‌باشد و این برنامه از مشترکان کوچک تا بخش صنعتی را نیز در بر گرفته است.

۸-۲ جمع‌بندی:

در این فصل تعاریف پاسخ تقاضا ارائه شد و انواع برنامه‌های پاسخ تقاضا آورده شد. همچنین تقسیم‌بندی مشترکان و ذکر بخشی از مشخصه‌های آنان نیز بیان شد تا بدین ترتیب به راحتی بتوان راجع به انتخاب برنامه‌های پاسخ تقاضا اظهار نظر کرد و مناسب‌ترین برنامه برای هر مشترک را انتخاب کرد.

در فصول بعدی راجع به کنترل فرکانس و چگونگی مدل کردن پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس بحث خواهد شد.

فصل سوم:

کنترل فرکانس – بار و مروری بر کارهای انجام

شده

۳-۱ مقدمه

در این بخش سعی می‌شود مروری بر کنترل فرکانس - بار و چالش‌های مربوط به آن صورت گیرد و همچنین مسائل مختلف مربوط به کنترل فرکانس - بار در سیستم قدرت متداول و سیستم قدرت همراه با منابع تولید پراکنده بررسی خواهد شد.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد کنترل فرکانس - بار در طراحی و بهره‌برداری از سیستم قدرت نقش بسیار مهمی بر عهده دارد. هدف کنترل فرکانس - بار در سیستم قدرت چند ناحیه‌ای که به صورت به هم پیوسته کار می‌کند کمک به ایجاد پایداری فرکانس برای هر ناحیه به صورت مستقل و با در نظر گرفتن قیود هر ناحیه می‌باشد و همچنین از دیگر وظایف کنترل فرکانس - بار تنظیم توان جاری شده در خط ارتباطی^۱ بین دو ناحیه می‌باشد به طوری که توان جاری شده از خط ارتباطی به کمک کنترل فرکانس - بار در نقطه کار خود قرار گیرد که در اثر این کار توان خروجی ژنراتورها و توان مصرفی مشترکان در محدوده‌ی قابل قبول خواهد بود و به این ترتیب تمام سیستم قدرت به صورت پایدار به کار خود ادامه خواهد داد.

به منظور کنترل فرکانس در سیستم قدرت با استفاده از مدل خطی تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در [۲۶] با استفاده از فیدبک خطی، کنترل فرکانس - بار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از روش شبکه‌ی عصبی به منظور طراحی کنترل کننده برای کنترل فرکانس - بار در سیستم قدرت استفاده شده است [۲۷]. در [۲۸] به منظور کنترل فرکانس - بار سیستم قدرت دو ناحیه‌ای مقدار بهینه ضریب بایاس مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات مختلف پیرامون مسئله‌ی کنترل فرکانس - بار برای سیستم قدرت با استفاده از مدل خطی، کنترل کننده‌های مختلف طراحی شده است و همچنین مقدار بهینه برای پارامترهای مختلف سیستم قدرت در نظر گرفته شده است، اما در این پایان‌نامه از پتانسیل سمت مصرف کننده به منظور کنترل فرکانس - بار سیستم

¹ Tie-Line

قدرت دو ناحیه‌ای بهره خواهیم برد. برای این منظور از مدل خطی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای استفاده شده است و پتانسیل سمت مصرف کننده به عنوان کنترل کننده‌ی کمکی در حلقه کنترل فرکانس ثانویه مدل شده است. در واقع با این کار سعی بر آن خواهد بود که با صرف هزینه کمتر و استفاده از پتانسیل موجود در شبکه، تغییرات فرکانس سیستم قدرت دو ناحیه‌ای دارای کمترین انحراف باشد و به این ترتیب کنترل کننده فرکانس - بار سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با استفاده از پاسخ تقاضا بهبود یابد.

تاثیر مزرعه توربین بادی بر کنترل فرکانس - بار با در نظر گرفتن همگام‌سازی بین انرژی توربین بادی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند چرخ طیار^۱ در [۲۹] بررسی شده است.

یک سیستم قدرت که خوب طراحی شده باشد و به درستی از آن بهره‌برداری شود باید در مقابل اغتشاشات به وجود آمده و همچنین در اثر تغییر بار، توان خروجی مناسب به مشترکان و مصرف‌کنندگان ارائه دهد به طوری که پایداری ولتاژ و پایداری فرکانس در سیستم قدرت برقرار شود.

در اثر هر نوع اغتشاشی عملکرد سیستم قدرت از نقطه کار نامی که برای آن در نظر گرفته شده است خارج خواهد شد و نقطه کار سیستم در مقداری غیر از نقطه کار نامی خواهد بود. همچنین در اثر به وجود آمدن اغتشاش در یک ناحیه از سیستم قدرت چند ناحیه‌ای، نواحی دیگر نیز از نقطه کار نامی خود خارج خواهند شد و در نقطه کار دیگری غیر از نقطه کار نامی خود به کار خود ادامه خواهند داد.

تحقیقات مختلف در زمینه کنترل فرکانس - بار با اهداف مقابله با چالش‌های گوناگون در زمینه تنظیم و کنترل خودکار تولید^۲، طراحی کنترل کننده برای سیستم تحریک و عملکرد مناسب

¹ Fly Wheel

² Automatic Generation Control (AGC)

کنترل کننده در مقابل تغییرات مختلف می باشد. در [۳۰] مروری بر برنامه های کنترلی و طرح های مختلف برای مشارکت بار در کنترل فرکانس صورت گرفته است. همچنین با توجه به اینکه سیستم قدرت مدرن بسیار پیچیده می باشد نوسانات به وجود آمده در اثر هر نوع اغتشاشی می تواند کل سیستم قدرت را به سمت خاموشی سوق دهد. در چنین شرایطی روش های مختلف کنترلی مانند کنترل بهینه^۱، کنترل تطبیقی^۲، کنترل مقاوم^۳ و روش های کنترلی هوشمند^۴ برای کنترل فرکانس - بار به کار برده خواهند شد و تحقیقات بسیاری در این زمینه ها در حال انجام می باشد [۳]. همچنین تحقیقات دیگری که بر روش های کامپیوتری پیشرفته استوار است در زمینه کنترل فرکانس - بار در حال انجام می باشد از جمله شبکه های عصبی مصنوعی^۵، منطق فازی^۶ و همچنین الگوریتم های ترکیبی از موارد بیان شده که به کمک کامپیوتر قابل اجرا می باشند.

در حال حاضر به دلیل نفوذ منابع تولید پراکنده و پیشرفته شدن ادوات موجود در سیستم قدرت ساختار سیستم قدرت دچار تغییرات بسیاری شده است و در نتیجه، مسئله ی کنترل فرکانس - بار با مسائل گوناگونی ترکیب شده است که از جمله ی آن ها وجود ادوات ارتباطی دوطرفه در سیستم قدرت و بهره گیری از آن ها در کنترل فرکانس - بار می باشد. همگام سازی منابع انرژی پراکنده در نواحی مختلف ریز شبکه و حل مشکل طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرالی در کنترل فرکانس - بار در [۳۱] آمده است.

از جمله مسائل جدیدی که در رابطه با مسئله ی کنترل فرکانس - بار قابل بررسی می باشد تأخیر حاصل از ادوات ارتباطی بی سیم خواهد بود و همچنین نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر که دارای تنوع زیادی می باشند.

¹ Optimize Control

² Adaptive Control

³ Robust Control

⁴ Intelligent Control

⁵ Artificial Neural Network

⁶ Fuzzy logic

۲-۳ سیستم قدرت متداول:

سیستم قدرت متداول که متشکل از ژنراتورها، خطوط انتقال و نهایتاً خطوط توزیع می‌باشد سال‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. اما اخیراً این سیستم قدرت با توجه به تنوع تولیدکننده‌های آن از جمله انرژی هسته‌ای، زمین‌گرمایی، برق‌آبی و... که به کمک تولیدکننده‌های متداول آمده‌اند دارای گستردگی بیشتر شده است. و متناسب با این تنوع و گستردگی، روش‌های کنترلی و کنترل‌کننده‌های پیچیده‌تری نیز برای سیستم قدرت لحاظ شده است. اما در قرن ۲۱ با توجه به کمبود سوخت فسیلی و آلاینده‌گی بسیار زیاد آن و همچنین اهمیت محیط‌زیست، استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بسیار اهمیت یافته است، به طوری که منابع انرژی غیرمتداول که به صورت منابع تولید پراکنده می‌باشند در تولید توان در سیستم قدرت نقش مهمی ایفا خواهند کرد. بنابراین مسائل کنترل فرکانس- بار که برای پایداری فرکانس و ولتاژ سیستم قدرت بسیار مهم می‌باشند در رابطه با سیستم قدرت متداول و همچنین منابع تولید پراکنده تعریف خواهند شد و بنابراین پیچیدگی بیشتری نیز خواهند داشت.

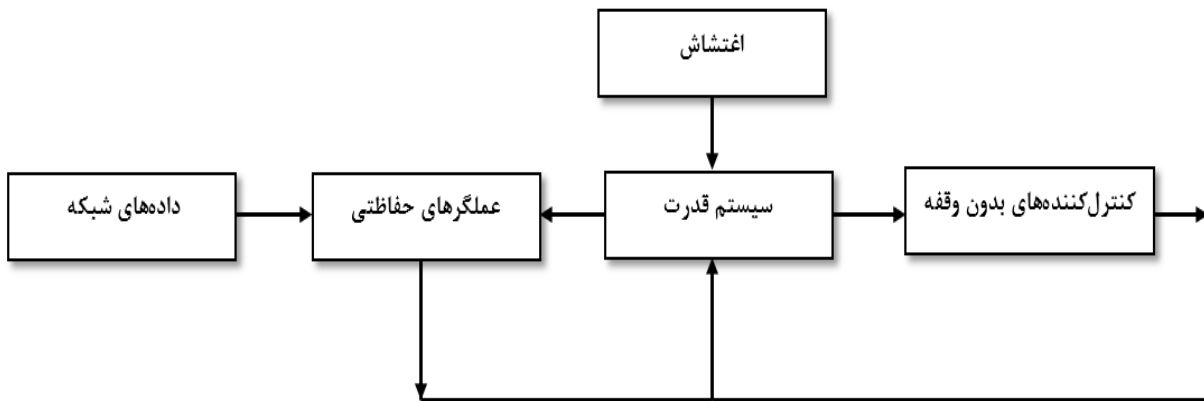
در هر سیستم قدرت باید ژنراتورها را طوری تنظیم کنیم که در هر لحظه توان حقیقی تولیدی برابر بار مصرفی و تلفات باشد و در این میان فرکانس نیز در نقطه‌ی کار نامی خود به صورت پایدار برقرار باشد تا سیستم قدرت دارای پایداری فرکانس باشد. بدین ترتیب سیستم قدرت دچار ازهم‌گسیختگی و خاموشی سراسری نشود. سیستم قدرت مدرن نیازمند افزایش هوشمندسازی در ادوات و تجهیزات به کار رفته در آن می‌باشد و همچنین باید انعطاف پذیری در کنترل‌کننده‌های آن افزایش یابد که در صورت بروز اغتشاشات جدی تعادل بین تولید و مصرف به صورت پایدار برقرار باشد [۳۲]. بیشتر تحقیقات صورت گرفته پیرامون مدل‌های خطی شده سیستم قدرت یک ناحیه‌ای یا چند ناحیه‌ای می‌باشد. در این میان تغییرات فرکانس وابسته به عدم تطبیق توان حقیقی تولیدشده و بار مصرفی می‌باشد. بنابراین حلقه‌ی کنترل اولیه شامل گاورنر می‌باشد که آن نیز از مکانیسم کنترلی

مشخصه‌ی اف‌تی^۱ بهره می‌برد. بنابراین در مرکز کنترل، کنترل‌کننده‌ی کمکی به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی ثانویه شناخته می‌شود.

سیستم قدرت دارای کنترل‌کننده‌های گوناگونی از جمله کنترل تحریک ژنراتور، کنترل‌کننده‌ی مشخصه‌ی اف‌تی، کنترل‌کننده‌ی قطع ژنراتور بار^۲، قطع‌کننده‌های فوق‌سریع^۳، قطع‌کننده‌های دینامیکی^۴، جبران‌کننده‌ی توان راکتیو^۵، کنترل بار-فرکانس، کنترل‌کننده‌ی زاویه‌ی فاز و کنترل‌کننده‌ی مخصوص HVDC^۶ می‌باشد. از نقطه‌نظر عملکرد همه‌ی کنترل‌کننده‌ها را می‌توان به دودسته‌ی کنترل‌کننده‌ی پیوسته^۷ و کنترل‌کننده‌ی ناپیوسته^۸ تقسیم‌بندی کرد [۳۳-۳۵].

مسئله کنترل فرکانس - بار برای همگام‌سازی سیستم قدرت متداول با منابع انرژی پراکنده به منظور افزایش پایداری در [۳۶] مطرح شده است. یک ساختار عمومی برای سیستم قدرت به همراه حلقه‌های کنترلی اصلی به‌صورت حلقه بسته در شکل (۳-۱) نشان داده شده است:

-
- 1 Droop
 - 2 Generator/Load Tripping Control
 - 3 High Speed Re-closing
 - 4 Dynamic Braking
 - 5 Reactive Power Compensation
 - 6 High Voltage DC
 - 7 Continues
 - 8 Discontinues



شکل ۳-۱: ساختار عمومی سیستم قدرت به همراه حلقه‌های کنترلی آن [۳]

اکثر کنترل کننده‌های پیوسته مانند کنترل کننده‌ی تحریک ژنراتور، سیگنال کنترلی را مستقیماً به ژنراتور اعمال می‌کنند و در محل واحد نیروگاهی واقع شده‌اند. کنترل کننده‌های پیوسته شامل کنترل تحریک ژنراتور (تنظیم ولتاژ خودکار^۱)، کنترل توان راکتیو و کنترل توان مخصوص HVDC می‌باشد. همه‌ی کنترل کننده‌های نام‌برده معمولاً خطی هستند، که به صورت پیوسته فعال می‌باشند و برای سنجش و اندازه‌گیری محلی کاربرد دارند. در یک واحد نیروگاهی، گاورنر ولتاژ و توان راکتیو خروجی توسط کنترل کننده‌ی تحریک تنظیم می‌شوند درحالی‌که پارامترهای سیستم تغذیه‌ی انرژی (دما، توان جاری شده و فشار) و تنظیم کننده‌ی سرعت^۲ به کمک کنترل کننده‌ی مشخصه‌ی اف‌تی کنترل می‌شوند. کنترل تولید خودکار^۳ بین مجموع توان تولیدی و بار (بار و تلفات) تعادل ایجاد می‌کند تا بدین ترتیب فرکانس سیستم قدرت در مقدار نامی خود (معمولاً ۵۰ Hz یا ۶۰ Hz) باقی بماند و توان جاری شده بین نواحی مختلف در مقدار برنامه‌ریزی شده برقرار گردد. بعد از ایجاد اغتشاشات گوناگون کنترل کننده‌های ناپیوسته وظیفه ایجاد پایداری در سیستم را به عهده‌دارند. و اکثراً برای زمان‌های بسیار حساس که وظیفه‌ی عملکرد سیستم به خطر افتاده است کاربرد دارند.

^۱ Automatic Voltage Regulator (AVR)

^۲ Speed Regulation

^۳ Automatic Generation Control (AGC)

معمولاً این کنترل‌کننده‌ها به این صورت عمل می‌کنند که دستور قطع ژنراتور- بار^۱، کلید زنی خازن‌ها^۲ و دیگر دستورات حفاظتی را به عهده‌دارند.

کنترل‌کننده‌های ناپیوسته در سیستم قدرت هم به صورت محلی در محل نیروگاه قرار دارند و هم به صورت توزیع‌شده در زیرمجموعه‌های دیگر سیستم قدرت قرار داده شده‌اند و تضمین‌کننده‌ی عدم خطر در پست توزیع با حاشیه‌ی امنیت بالا خواهند بود [۳۴]. کنترل‌کننده‌های پیوسته در واقع تکامل‌یافته‌ی کنترل‌کننده‌های کمکی و کنترل‌کننده‌های اضطراری برای برنامه‌ریزی حفاظتی هستند [۳۷]. علاوه بر کنترل‌کننده‌های پیوسته و سیستم‌های حفاظتی، کنترل‌کننده‌های دیگری در بخش خطوط انتقال و توزیع سیستم قدرت قرار دارند که از جمله آن‌ها کلیدهای خازنی برای جبران توان راکتیو و تپ‌چنجرها و تغییردهنده‌های فاز در ترانسفورماتورها، کنترل‌کننده‌های HVDC، کندانسورهای سنکرون‌کننده، جبران‌سازهای توان اکتیو و راکتیو به صورت استاتیکی^۳ می‌باشند. علی‌رغم تعداد زیادی کنترل‌کننده و حلقه‌های کنترلی، هدف همه‌ی کنترل‌کننده‌ها برقراری پایداری در سرتاسر سیستم قدرت می‌باشد و این بدان معنی است که برای پایداری سیستم قدرت باید فرکانس و ولتاژ سیستم قدرت در ناحیه‌ی مشخص شده در مقدار نامی خود به صورت پایدار و با خطای حالت دائمی و گذرای استاندارد و در محدوده مجاز قرار گیرد.

۳-۳ عملکرد کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت در شرایط کاری مختلف:

کنترل‌کننده‌ها در سیستم قدرت سعی می‌کنند تا حالت کاری تمام سیستم قدرت را از حالت غیرنامی به حالت نامی برسانند. در این راستا طبقه‌بندی حالت‌های مختلف سیستم قدرت به حالت کاری عادی، اختلال، اضطراری، در حالت فروپاشی و حالت بازیابی به نقطه کار عادی، برای طراحی سیستم‌های کنترل‌کننده‌ی کارآمد بسیار مفید می‌باشند [۲۲]. در حالت عملکرد نرمال، تمام

¹ Generator/Load Tripping

² Capacitor/Ractor Switching

³ Statics VAR Compensator

متغیرهای سیستم قدرت (مانند فرکانس و ولتاژ) در بازه‌ی تعریف‌شده و نامی خود قرار دارند. در حالت اخطار نیز همه‌ی متغیرهای سیستم قدرت در بازه‌ی قابل قبول قرار دارند اما در حالت اخطار اگر اغتشاشی در سیستم صورت بگیرد سیستم قدرت آمادگی بسیار زیادی برای تغییر وضعیت به حالت اضطراری را خواهد داشت.

در حالت عملکرد اضطراری بعضی از متغیرهای سیستم در خارج از بازه‌ی قابل قبول خود قرار دارند و هر لحظه سیستم می‌تواند به حالت فروپاشی برود. در حالت عملکردی فروپاشی، خاموشی جزئی یا سراسری سیستم قدرت اتفاق خواهد افتاد.

بر اساس طبقه‌بندی بیان‌شده کنترل‌کننده‌های سیستم قدرت را می‌توان به دودسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی کرد [۳]:

(۱) نخست کنترل‌کننده‌های نرمال یا کنترل‌کننده‌های پیش‌گیرنده^۱، این گروه از کنترل‌کننده‌ها برای حالت نرمال یا اخطار به کار گرفته می‌شوند و هدف این گروه از کنترل‌کننده‌ها بازگردانی سیستم از حالت اخطار به نرمال یا برقرار نگه‌داشتن سیستم در حالت نرمال می‌باشد.

(۲) گروه دوم از کنترل‌کننده‌ها، کنترل‌کننده‌های اضطراری نامیده می‌شوند و برای حالت اضطراری یا فروپاشی سیستم قدرت به کار گرفته می‌شوند و هدفشان جلوگیری از فروپاشی تمام سیستم قدرت خواهد بود تا در صورت امکان سیستم قدرت را به حالت‌های اضطراری، اخطار و نرمال بازگردانند.

کنترل‌کننده‌های خودکار ولتاژ و فرکانس به‌عنوان کنترل‌کننده‌های نرمال یا پیش‌گیرنده محسوب

¹ Normal/Preventive Control

می‌شوند درحالی‌که برنامه‌های کنترلی دیگر مانند حذف بار زیر فرکانس^۱ و حذف بار زیر ولتاژ^۲ و برنامه‌های خاص حفاظتی سیستم قدرت را می‌توان به‌عنوان کنترل‌کننده‌های اضطراری در نظر گرفت. معمولاً سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده نرمال (پیش‌گیرنده) شامل فعال کردن نقطه‌ی کار ژنراتور، کنترل توان جاری‌شده بر اساس نقطه‌ی کار مرجع برای ادوات FACTS^۳، نقطه‌ی کار ولتاژ برای ژنراتور، SVC^۴، کلید زنی خازن‌ها در بانک خازنی و... می‌باشد. سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده‌ی اضطراری معمولاً شامل دستور قطع ژنراتور از شبکه، دستور قطع بار، اتصال خطوط ارتباطی دو ناحیه مختلف، قطع تپ چنجر ترانسفورماتورها می‌باشد.

۳-۴ مسئله‌ی دینامیک سیستم قدرت و ابعاد زمانی کنترل‌کننده‌ها:

به‌منظور آنالیز و بررسی دینامیکی سیستم قدرت، بسیار مهم است که بدانیم ابعاد زمانی برای پایداری زاویه‌ی رتور در حالت پایداری گذرا یعنی اغتشاش بزرگ در حدود ۳ - ۱۰ ثانیه و در حالت پایداری دائمی یعنی اغتشاش کوچک حدود ۱۰ - ۲۰ ثانیه خواهد بود [۳].

پایداری زاویه رتور به‌عنوان مسئله‌ی پایداری کوتاه مدت شناخته می‌شود درحالی‌که مسئله‌ی پایداری ولتاژ به‌عنوان مسئله‌ی پایداری کوتاه مدت و میان مدت به‌حساب می‌آید. بازه‌های زمانی و ابعاد زمانی مهم برای مسئله‌ی پایداری ولتاژ بسیار گسترده خواهد بود از چند ثانیه تا چند دقیقه نیز می‌توان برای پایداری ولتاژ متناسب با نوع و اندازه اغتشاش در نظر گرفت. پایداری فرکانس سیستم قدرت توسط دینامیک‌های سریع و کند تحت تأثیر قرار خواهد گرفت و از این‌رو برای پایداری فرکانس سیستم قدرت نیز ابعاد زمانی از چند ثانیه تا چند دقیقه در نظر می‌گیرند [۳۸]. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده برای سیستم قدرت معمولاً مشخصه‌های حلقه‌های کنترلی در پایین‌ترین سطح سیستم

¹ Under-Frequency Load Shedding

² Under-Voltage Load Shedding

³ Flexible AC Transmission System

⁴ Static VAR Compensator

قدرت (معمولاً در ژنراتور) و توسط ثابت‌های زمانی کوچک‌تر تعیین می‌شود به‌طور مثال AVR که وظیفه‌ی تنظیم ولتاژ پایانه‌های ژنراتور را به عهده دارد معمولاً در ابعاد زمانی ثانیه یا کمتر از آن پاسخ می‌دهد.

هم‌چنین کنترل‌کننده‌ی ولتاژ ثانویه که وظیفه تعیین مقدار مرجع برای ادوات کنترل ولتاژ را به عهده دارد در ابعاد زمانی چند ثانیه تا چند دقیقه پاسخ می‌دهد. و این بدان معنا خواهد بود که این دو حلقه‌ی کنترلی از هم جدا^۱ هستند. چون ثابت زمانی سیستم تحریک بسیار کوچک‌تر از ثابت زمانی حلقه‌ی کنترلی مشخصه‌ی اف‌تی می‌باشد و بنابراین تأثیری بر دینامیک سیستم کنترل فرکانس- بار نمی‌گذارد بنابراین تزویج مشترک^۲ بین حلقه‌ی کنترل فرکانس- بار و حلقه‌ی AVR نادیده گرفته می‌شود. این نکته به‌صورت عمومی برای حلقه‌های کنترلی دیگر برقرار می‌باشد. به‌عنوان یک نتیجه‌ی کلی، به‌منظور حفاظت از سیستم قدرت، کنترل توربین، کنترل ولتاژ و فرکانس و تعدادی از حلقه‌های کنترلی جدا از هم در ابعاد زمانی مختلف در سیستم قدرت عمل می‌کنند. کنترل تمام سیستم قدرت مسئله‌ی بسیار پیچیده‌ای خواهد بود، اما با توجه به اینکه حلقه‌های کنترلی جدا از هم وجود دارد بنابراین می‌توان به‌صورت انفرادی و جداگانه هر حلقه‌ی کنترلی را مورد بررسی و آنالیز قرارداد. متناسب با ذات حلقه‌ی کنترلی، مدل موردنیاز برای سیستم قدرت، اهمیت متغیرهای مختلف و عدم قطعیت مختلف کنترلی برای سیستم قدرت قابل پیاده‌سازی خواهد بود [۳].

۳-۵ کنترل فرکانس - بار :

یک اغتشاش شدید در سیستم قدرت باعث ایجاد عدم تعادل بین تولید و مصرف خواهد شد و عملکرد سیستم قدرت به‌شدت کاهش می‌یابد و حتی پایداری سیستم قدرت نیز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که دیگر نمی‌توان چنین اغتشاشی را در مطالعات پایداری گذرای ولتاژ و فرکانس بررسی کرد.

¹ De-Coupled

² Cross-Coupling

این نوع از پدیده‌ها که نسبتاً کند هم می‌باشند باید در مطالعات کنترل فرکانس سیستم قدرت بررسی شوند. تنظیم فرکانس سیستم قدرت که بانام کنترل فرکانس - بار^۱ شناخته می‌شود، به‌عنوان یک بخش اساسی از کنترل تولید خودکار است و یکی از مهم‌ترین مسائل کنترلی در طراحی و بهره‌برداری از سیستم قدرت می‌باشد.

اگر فرکانس در نقطه‌ای غیر از نقطه‌ی کار سیستم و هم‌چنین خارج از محدوده‌ی مجاز پیرامون نقطه‌ی کار نامی سیستم باشد می‌تواند منجر به ناپایداری تمام سیستم قدرت بشود [۲۲]. یک نوسان یا انحراف شدید در فرکانس سیستم قدرت می‌تواند منجر به خرابی تجهیزات، افت عملکرد بار، اضافه‌بار شدید در خطوط انتقال، اختلال در عملکرد سیستم‌های حفاظتی و نهایتاً ایجاد شرایط ناپایدار برای سیستم قدرت شود [۳۹]. برقراری فرکانس و توان جابه‌جاشده بین دو ناحیه‌ی مختلف در مقدار برنامه‌ریزی‌شده دو هدف اولیه‌ی مهم برای کنترل فرکانس - بار در سیستم قدرت می‌باشد. این اهداف با اندازه‌گیری سیگنال خطای کنترل که اصطلاحاً به آن خطای کنترل ناحیه^۲ می‌گویند قابل دستیابی می‌باشند.

بکار بردن منطق فازی در کنترل فرکانس - بار می‌تواند باعث افزایش کارایی سیستم قدرت شود [۴۰].

مقدار خطای کنترل ناحیه، عدم تعادل بین توان حقیقی تولیدی و بار را نشان می‌دهد و یک ترکیب خطی از انحراف فرکانس و مبادله‌ی توان بین نواحی مختلف می‌باشد. وقتی از کنترل‌کننده‌ی انتگرالی استفاده می‌کنیم خطاهای احتمالی در فرکانس و توان جاری‌شده بین دو ناحیه را می‌توانیم با تنظیم دقیق پارامترهای کنترل‌کننده تصحیح کنیم. تنظیم دقیق پارامترهای دینامیکی کنترل‌کننده برای عملکرد بهینه کنترل فرکانس - بار بسیار مهم است و باید به آن توجه شود. محققان

¹ Load-Frequency Control

² Area Control Error (ACE)

از منطق فازی به صورت گسترده در طراحی کنترل کننده استفاده کرده‌اند [۴۰-۴۸]

در حال حاضر کنترل فرکانس به دلیل پیچیدگی، تغییر ساختار و بزرگ‌تر شدن سیستم قدرت بسیار بااهمیت شده است و باید به آن توجه ویژه‌ای داشت. به دلیل افزایش هزینه‌ها و فشارهای اقتصادی بر سیستم قدرت برای برقراری پایداری و بالا بردن کارایی سیستم قدرت باید فرکانس سیستم و توان جاری شده در خط ارتباطی بسیار نزدیک مقدار نامی مشخص شده برای آن قرار گیرد. بنابراین در سیستم قدرت مدرن و پیشرفته، کنترل فرکانس - بار به‌عنوان سرویس کمکی^۱ برای ایجاد شرایط بهتر در بازار برق نقش بسیار مهم را بر عهده دارد.

۳-۶ اساس حلقه‌های کنترل فرکانس:

فرکانس در یک سیستم قدرت به تعادل توان حقیقی آن سیستم بستگی دارد. تغییر در بار در یک نقطه از سیستم قدرت باعث تغییر فرکانس سیستم قدرت می‌شود. بنابراین فرکانس سیستم قدرت تعادل یا عدم تعادل بین توان تولیدی و بار مصرفی را به‌خوبی نشان می‌دهد. هر عدم تعادل کوتاه‌مدت^۲ در انرژی بلافاصله منجر به تغییرات فرکانس سیستم می‌شود، مانند اغتشاشات که باعث تغییرات در انرژی جنبشی رتور در حال چرخش می‌شوند.

تغییرات قابل‌توجه در انرژی تولیدی و توان تولیدی ژنراتورها بدون پاسخ مناسب سیستم قدرت باعث تغییرات بسیار شدید فرکانس خواهد شد به‌طوری‌که فرکانس از محدوده‌ی مجاز خود تجاوز خواهد کرد. کنترل فرکانس و توان تولیدی ژنراتورها به‌صورت عمومی مربوط به کنترل فرکانس - بار می‌شود که این خود نیز یک بخش مهمی از کنترل تولید خودکار در سیستم قدرت می‌باشد.

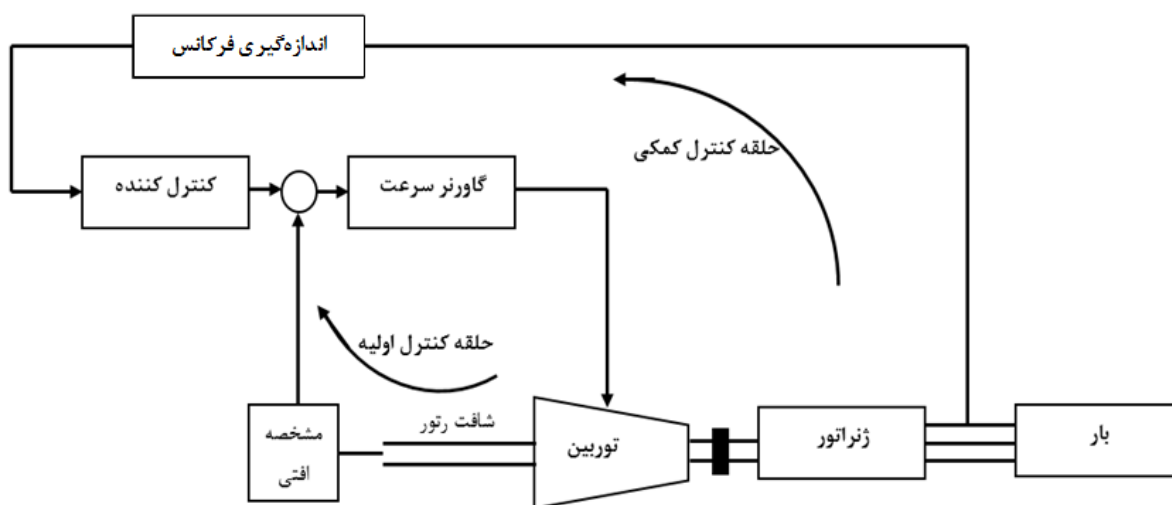
به‌منظور رضایت‌بخش بودن عملکرد سیستم قدرت فرکانس باید نزدیک یک مقدار ثابت برقرار

¹ Ancillary Service

² Short Term

باشد [۲۲].

علاوه بر کنترل فرکانس اولیه اکثر ماشین‌های سنکرون بزرگ توسط حلقه کنترل فرکانس کمکی تجهیز شده‌اند. یک نمای شماتیکی از ژنراتور سنکرون به همراه حلقه‌های کنترل فرکانس در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: ژنراتور سنکرون به همراه کنترل فرکانس [۳]

در شکل (۲-۳) گاورنر سرعت، تغییرات سرعت یا همان فرکانس را به کمک حلقه‌های اولیه و کمکی پایش می‌کند. گاورنر سرعت در هر واحد نیروگاهی عمل کنترل سرعت حلقه‌ی کنترل اولیه را انجام می‌دهد و تمام واحدهای نیروگاهی در تغییرات حاصل‌شده مشارکت خواهند داشت. اما اگر بار به صورت محلی توسط ژنراتور خاصی تغذیه شود، در صورت وجود تغییرات، فقط همان ژنراتور در تغییرات حاصل‌شده مشارکت خواهد داشت چون در این حالت خطوط ارتباطی بین واحدهای مختلف برقرار نیست. عمل کنترل حلقه‌ی کنترل اولیه برای بازگرداندن فرکانس به نقطه‌ی کار نامی فرکانس کافی نیست بنابراین مخصوصاً در یک سیستم چند ناحیه‌ای، حلقه‌ی کنترل کمکی به منظور ایجاد مرجع فرکانس و بازگرداندن فرکانس به نقطه‌ی کار نامی آن لازم و ضروری خواهد بود و نقطه‌ی مرجع فرکانس ایجادشده توسط حلقه‌ی کنترل کمکی به گاورنر سرعت داده می‌شود تا عمل بازیابی

فرکانس توسط توربین انجام شود. حلقه‌ی کنترل کمکی با گرفتن فیدبک از نوسانات فرکانس و اضافه کردن آن به حلقه‌ی کنترل اولیه، عمل کنترلی خود را تکمیل خواهد کرد. سیگنال حاصل شده از حلقه‌ی کمکی به منظور تنظیم فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سیستم قدرت واقعی کنترل‌کننده‌ی دینامیکی معمولاً یک کنترل‌کننده انتگرال‌گیر ساده یا یک کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی ساده می‌باشد. مطابق شکل (۳-۲) تغییرات گذرای فرکانس متناسب با تغییرات بار خواهد بود. بنابراین وظیفه‌ی مکانیسم فیدبک ایجاد سیگنالی مناسب، برای توربین می‌باشد که توان تولیدی را مناسب با بار ایجاد کند و فرکانس را به نقطه‌ی کار خود بازگرداند.

۷-۳ مدل پاسخ فرکانسی:

ذات سیستم قدرت بسیار غیرخطی و متغیر با زمان است. اما برای آنالیز و بررسی کنترل فرکانس در یک درصد مشخصی از اغتشاشات یعنی اغتشاشات سیگنال کوچک که مقدار آن در بیشترین حالت ۰/۱ پریونیت خواهد بود مدل مرتبه‌ی پایین خطی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با دینامیک ولتاژ و دینامیک زاویه‌ی رتور، دینامیک تأثیرگذار بر پاسخ فرکانسی نسبتاً آرام‌تر است و در ابعاد ثانیه تا دقیقه می‌باشد.

با در نظر گرفتن دینامیک سریع برای سیستم قدرت و با در نظر گرفتن دینامیک بار و ژنراتور با جزئیات کامل، روش‌های بسیار پیچیده‌ی عددی نیاز است که به کمک آن در گام‌های مختلف زمانی سیستم قدرت و نوسانات متغیرهای آن را بتوان شبیه‌سازی کرد بنابراین با نادیده گرفتن دینامیک سریع یعنی دینامیک زاویه‌ی رتور و ولتاژ مدلی از سیستم قدرت به دست خواهد آمد که پیچیدگی کمتری خواهد داشت و داده‌های کمتری برای شبیه‌سازی آن مورد نیاز خواهد بود که بدین ترتیب شبیه‌سازی آن توسط کامپیوتر راحت‌تر خواهد شد، هم‌چنین بررسی نتایج بسیار آسان‌تر خواهد بود.

در این بخش یک مدل ساده برای پاسخ فرکانس سیستم قدرت ارائه خواهد شد که بر طبق

شکل (۲-۳) می‌باشد، که شامل یک ژنراتور می‌باشد. نهایتاً می‌توان مدل ارائه‌شده را به سیستم چند ناحیه‌ای برای چندین ژنراتور تعمیم داد. ارتباط دینامیکی بار - ژنراتور بین عدم تطبیق توان $(\Delta P_m - \Delta P_L)$ و انحراف فرکانس (Δf) را می‌توان به صورت معادله (۱-۳) بیان کرد:

$$\Delta P_g(t) - \Delta P_l(t) = 2H \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} + D\Delta\omega(t) \quad (1-3)$$

انحراف فرکانس: $\Delta\omega(t)$

تغییرات توان مکانیکی: $\Delta P_g(t)$

تغییرات بار: $\Delta P_l(t)$

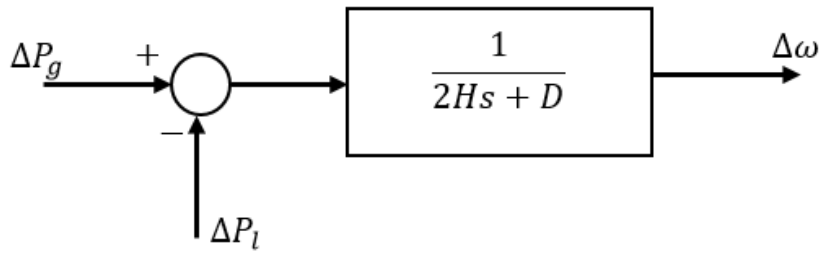
ثابت اینرسی: H

ضریب میرایی بار: D

ضریب میرایی معمولاً به صورت درصدی از تغییرات بار به ازای ۱٪ تغییر در فرکانس بیان می‌شود. به طور مثال مقدار معمول برای D ، ۱/۵٪ می‌باشد و به این معنی است که ۱٪ تغییر در فرکانس باعث تغییر ۱/۵٪ در بار می‌شود. با استفاده از تبدیل لاپلاس معادله (۱-۳) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

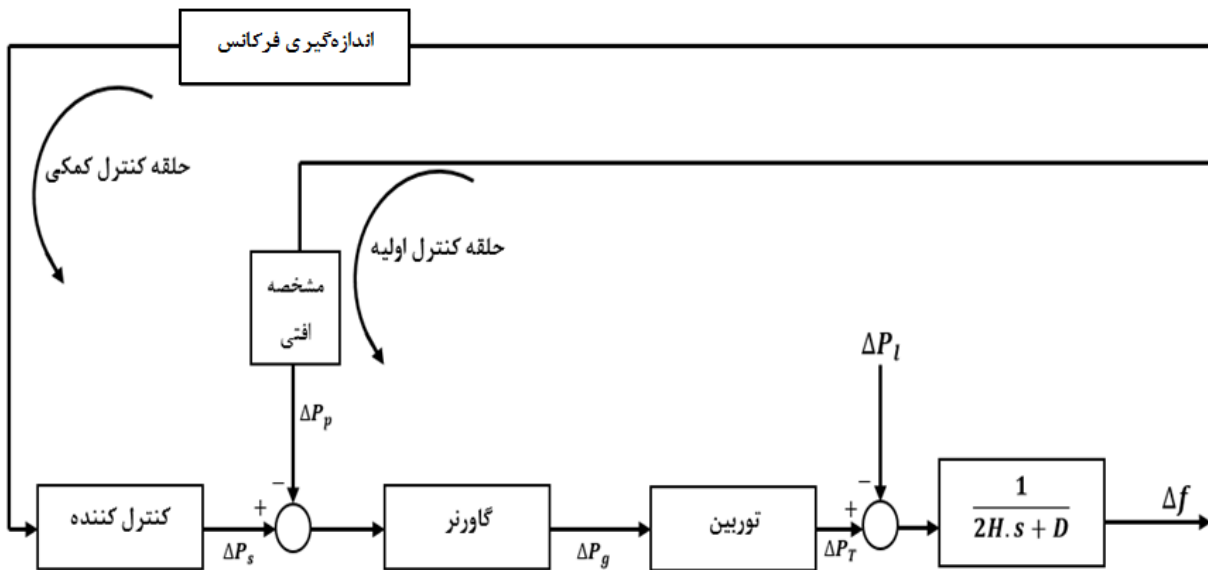
$$\Delta P_g(s) - \Delta P_l(s) = 2H.s.\Delta\omega + D.\Delta\omega(s) \quad (2-3)$$

معادله‌ی (۲-۳) را می‌توان به صورت بلوک دیاگرام شکل (۳-۳) بیان کرد:



شکل ۳-۳: بلوک دیاگرام مدل ژنراتور- بار [۳]

مدل ژنراتور بار بیان شده می‌تواند به‌سادگی ژنراتور سنکرون شکل (۲-۳) را به‌صورت بلوک دیاگرام حلقه بسته نشان دهد که در بلوک دیاگرام شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳: مدل سیستم قدرت [۳]

۳-۸ جمع بندی:

در این فصل ابتدا مطالبی راجع به سیستم قدرت متداول به صورت کلی بیان شد و سپس مطالبی راجع به کنترل کننده‌های آن و پیوسته یا ناپیوسته بودن آنها بیان شد هم‌چنین عملکرد کنترل کننده‌ها در شرایط کاری مختلف سیستم قدرت بررسی شد. در ادامه مطالبی راجع به کنترل فرکانس - بار و اهمیت آن بیان شد. در این فصل هم‌چنین مدل ژنراتور سنکرون به همراه کنترل فرکانس به صورت شماتیک آورده شد و مدل پاسخ فرکانسی سیستم و نهایتاً مدل سیستم قدرت استخراج گردید. در فصل بعد مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا و بدون آن آورده خواهد شد و معادلات حاکم بر آن نیز استخراج خواهد گردید.

فصل چهارم:

ارائه مدل ترکیبی کنترل بار – فرکانس و پاسخ

تقاضا

۴-۱ مقدمه

در سیستم کنترل فرکانس متداول معمولاً بار (ΔP_L) به عنوان یک عنصر غیرقابل کنترل در نظر گرفته می‌شود و به منظور تصحیح انحراف فرکانس باید توان خروجی ژنراتور (ΔP_g) را تنظیم کنیم. توان خروجی تمام واحدهای نیروگاهی که در حلقه کنترل فرکانس اولیه شرکت دارند باید برای تصحیح انحراف فرکانس تنظیم شوند. عمل تنظیم توان خروجی به منظور تصحیح انحراف فرکانس برای ژنراتورهای مختلف می‌تواند بدون ایجاد ارتباط بین ژنراتورهای مختلف صورت گیرد و در واقع هر ژنراتور به کمک مشخصه افتی در گاورنر مربوط به همان ژنراتور عمل تنظیم توان خروجی را انجام می‌دهد و به تصحیح فرکانس کمک می‌کند [۴۹]. در ساده‌ترین حالت ممکن وقتی که فرکانس سیستم قدرت نسبت به مقدار نامی خود کاهش (افزایش) داشته باشد مشخصه‌ی افتی باعث افزایش (کاهش) خطی در توان خروجی واحد نیروگاهی خواهد شد.

در مشخصه افتی واقعی و عملی یک محدوده‌ی مجاز و در واقع یک باند مجاز وجود دارد که از تنظیم توان غیرضروری که در اثر نوسانات فرکانس اتفاقی صورت می‌گیرد جلوگیری می‌کند.

۴-۲ فرمول‌بندی برای مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا و بدون

آن:

مدل سیستم قدرت خطی شده مرتبه پایین که در تحقیقات به منظور بررسی و آنالیز کنترل فرکانس - بار از آن استفاده می‌شود توسط معادله توان و انحراف فرکانس بیان می‌شود:

$$\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s) = 2H \cdot s \cdot \Delta f(s) + D \cdot \Delta f(s) \quad (۱-۴)$$

$\Delta P_T(s)$: توان تولیدی توربین در ناحیه نام

$\Delta P_L(s)$: توان مصرفی بار در ناحیه نام

$\Delta f_i(s)$: انحراف فرکانس ناحیه i ام

H_i : ثابت اینرسی ناحیه i ام

D_i : ضریب میرایی بار در ناحیه i ام

S : عملگر تبدیل لاپلاس

$i = \{1,2\}$

حال با توجه به مدل سیستم قدرت بیان شده در فصل قبل (شکل (۳-۴)) و معادله (۴-۱) مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای بدون پاسخ تقاضا در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

در شکل (۴-۱)، پارامترهای به کاررفته به صورت زیر می‌باشند:

T_{i_i} : ثابت زمانی توربین برای ناحیه i ام

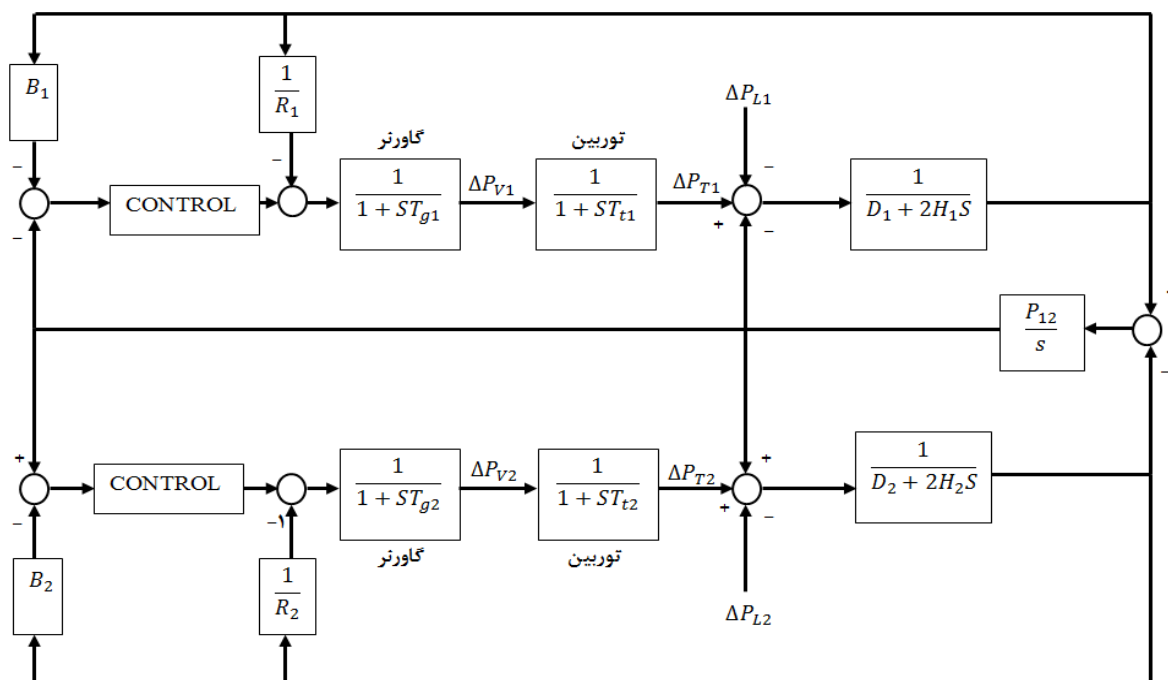
T_{g_i} : ثابت زمانی گاورنر برای ناحیه i ام

R_i : مقدار مشخصه افتی برای ناحیه i ام

B_i : ضریب تنظیم فرکانس^۱ برای ناحیه i ام

$i = \{1,2\}$

¹ Frequency Bias Factor



شکل ۴-۱: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای بدون پاسخ تقاضا [۵۰]

چون پاسخ تقاضا به‌عنوان سرویس کمکی مانند رزرو چرخان عمل می‌کند، بنابراین به‌طور مثال باید زمانی که انحراف فرکانس منفی (مثبت) شد، آن بخش از بارهای شرکت‌کننده در برنامه‌های پاسخ تقاضا را خاموش (روشن) کند، بنابراین معادله (۴-۱) به‌راحتی با حضور پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس بار تصحیح خواهد شد و به‌صورت زیر بیان می‌شود [۵۱]:

$$\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s) + \Delta P_{DR}(s) = 2H \cdot s \cdot \Delta f(s) + D \cdot \Delta f(s) \quad (۲-۴)$$

در تعدادی از تحقیقات انجام‌گرفته مانند [۵۲، ۵۳] تأثیر پاسخ تقاضا را در ضریب میرایی بار لحاظ کرده‌اند. اما در واقع ضریب میرایی بار (D)، یک پارامتر داخلی و ذاتی سیستم و غیرقابل کنترل است، بنابراین به دلیل آن که پاسخ تقاضا (ΔP_{DR}) یک پارامتر قابل کنترل می‌باشد نمی‌توان آن را در ضریب میرایی بار لحاظ کرد. هم‌چنین معادله (۲-۴) به ما این اجازه را می‌دهد که حلقه کنترلی مخصوص پاسخ تقاضا داشته باشیم در واقع با این کار ساختار واقعی تری خواهیم

داشت که به کمک آن طراحی کنترل کننده بهبود خواهد یافت.

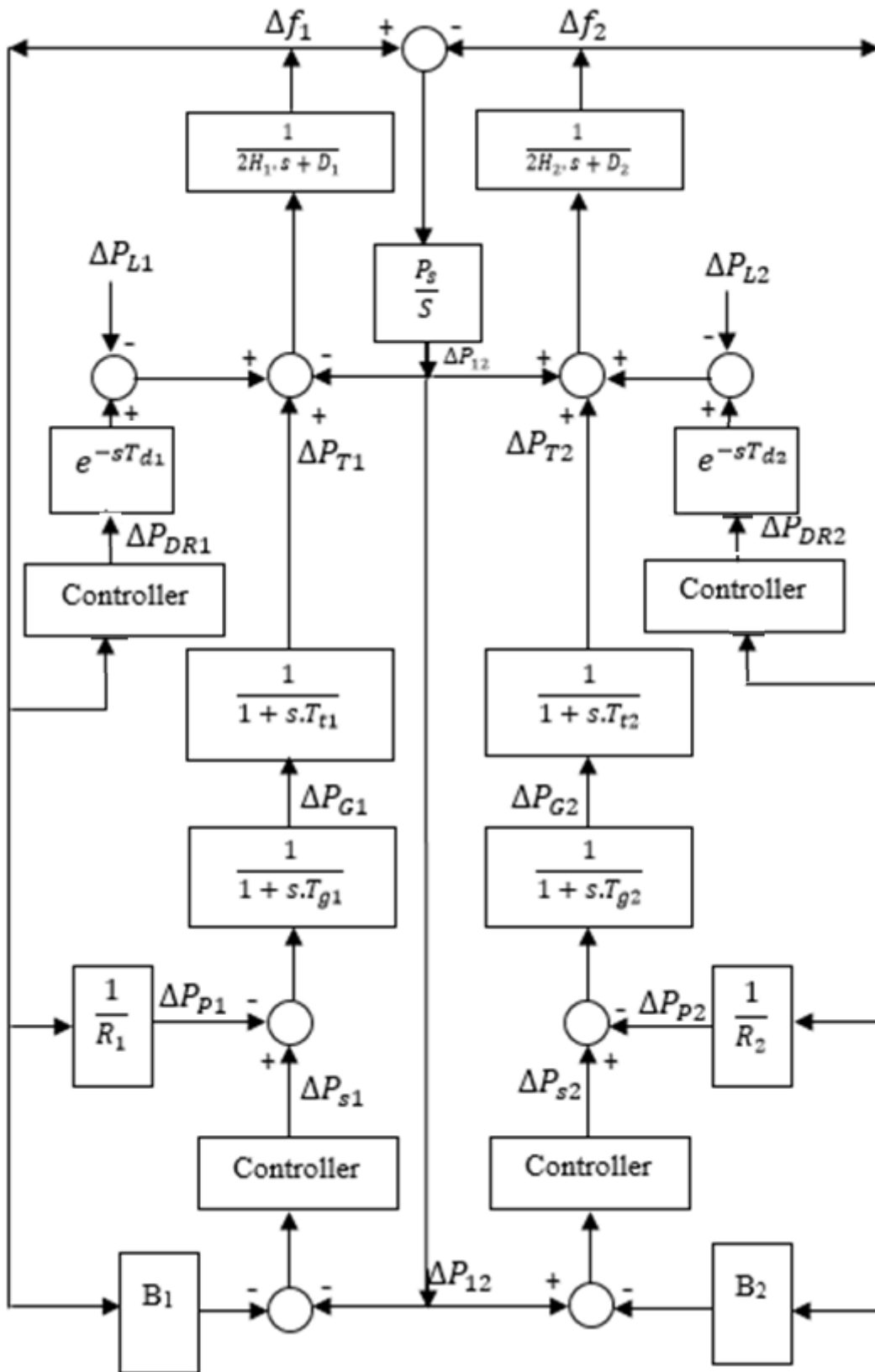
بر مبنای شکل (۱-۴) و به کمک معادله (۲-۴) می‌توانیم مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا را استخراج کنیم. این مدل در شکل (۲-۴) آمده است. و پارامترهای به کار رفته در آن به مانند پارامترهای به کار رفته در شکل (۱-۴) می‌باشد و تاخیر در آن به صورت زیر آمده است:

تاخیر در نظر گرفته شده برای پاسخ تقاضا در ناحیه i ام : T_{d_i}

$$i = \{1,2\}$$

این مدل به عنوان بخش اصلی ایده‌ی مطرح شده در نظر گرفته شده است. برخلاف سرویس‌های کمکی متداول در سیستم قدرت برای پاسخ تقاضا که به عنوان سرویس کمکی در نظر گرفته می‌شود شیب افزایشی یا کاهشی^۱ در نظر نمی‌گیرند. در واقع برای بارهای شرکت کننده در برنامه‌های پاسخ تقاضا بعد از ارسال سیگنال کنترلی، عمل کنترلی بلافاصله و به صورت آنی صورت خواهد گرفت. بنابراین تنها زمان تأخیر برای پاسخ تقاضا تأخیر ادوات ارتباطی دوطرفه می‌باشند که در مدل سیستم قدرت، لحاظ شده‌اند.

¹ Ramp Up/Down



شکل ۴-۲: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا در هر ناحیه ($\Delta P_{DR1}, \Delta P_{DR2}$)

۳-۴ مدل دینامیکی فضای حالت برای LFC-DR :

بیان فضای حالت برای مدل کنترل فرکانس- بار ابزاری سودمند برای به کار بردن تئوری کنترل مدرن خواهد بود [۳]. همچنین به کمک آن می‌توان قالب کلی از کنترل فرکانس- بار به‌منظور بررسی و آنالیز تغییرات فرکانس ارائه کرد که برای سیستم قدرت در هر ابعاد و اندازه‌ای قابل‌استفاده می‌باشد. بنابراین می‌توان پاسخ تقاضا را در فضای حالت برای سیستم قدرت بیان کرد و به‌این‌ترتیب می‌توان اثرات پاسخ تقاضا را بر روی کنترل فرکانس- بار بررسی کرد و به کمک آن کنترل‌کننده مناسب را طراحی کرد.

اگرچه مدل LFC-DR برای سیستم قدرت ساده با توربین بخار بدون باز گرمایش^۱ بیان‌شده است اما می‌توان این مدل را برای همه نوع توربین در مدل سیستم قدرت بیان کرد.

تحقق فضای حالت برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به همراه پاسخ تقاضا (در شکل (۴-۲) نشان داده‌شده است) توسط معادله (۴-۳) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A.X(t) + B.U(t) \\ Y(t) &= C.X(t) \end{aligned} \tag{۳-۴}$$

A: ماتریس سیستم

B: ماتریس ورودی کنترل‌کننده

X: بردار حالت

U(t): بردار ورودی

¹ Nonreheat Turbine

C: ماتریس خروجی

Y(t): خروجی سیستم

به منظور استخراج مدل فضای حالت خطی سیستم نیاز است که مدل خطی سیستم مورد مطالعه را استخراج کنیم. مطابق شکل (۲-۴) تمام عناصر به غیر از تأخیر مدل شده برای ادوات ارتباطی موجود در حلقه کنترلی پاسخ تقاضا خطی هستند. بنابراین نیاز است تأخیر زمانی خطی برای مدل فضای حالت خطی سیستم استخراج شود. تقریب پاد^۱ به منظور خطی سازی تأخیر زمانی موجود در مدل سیستم قدرت در نظر گرفته شده است و در بخش بعدی راجع به آن توضیحاتی داده خواهد شد.

۴-۴ تقریب پاد:

تقریب پاد به منظور خطی سازی تأخیر زمانی به صورت گسترده در مهندسی کنترل مورد استفاده قرار می گیرد و نتایج خوبی از خود نشان می دهد [۵۴]. این تقریب تأخیر زمانی را به کمک معادله ی چند جمله ای تقریب می زند.

تابع پاد برای $e^{-sT_{d_i}} \approx R_{pq}(e^{-sT_{d_i}})$ به صورت معادله (۴-۴) بیان می شود [۵۵]:

$$R_{pq}(e^{-sT_{d_i}}) = \frac{N_{pq}(e^{-sT_{d_i}})}{D_{pq}(e^{-sT_{d_i}})} \quad i = \{1,2\} \quad (4-4)$$

$$N_{pq}(e^{-sT_{d_i}}) = \sum_{k=0}^p \frac{p!(p+q-k)!}{k!(p+q)!(p-k)!} \cdot (-sT_{d_i})^k \quad i = \{1,2\} \quad (5-4)$$

¹ Pade Approximation

$$D_{pq}(e^{-s.T_{d_i}}) = \sum_{k=0}^q \frac{q!(p+q-k)!}{k!(p+q)!(q-k)!} \cdot (s.T_{d_i})^k \quad i = \{1,2\} \quad (6-4)$$

در معادلات (۴-۵) و (۴-۶) D_{pq} و N_{pq} به ترتیب چندجمله‌ای‌های مرتبه‌ی p و q هستند.

بسیار معمول است که صورت و مخرج تابع کسری تقریب پادِ هم‌مرتبه باشند و معمولاً

مرتبه‌ای بین ۵ تا ۱۰ خواهند داشت [۵۴]. در این پایان نامه مرتبه تقریب پادِ برابر ۵ در نظر

گرفته شده است که در نتیجه آن خواهیم داشت:

$$N_{pq}(e^{-s.T_{d_i}}) = \sum_{k=0}^5 \frac{5!(5+5-k)!}{k!(5+5)!(5-k)!} \cdot (-s.T_{d_i})^k \quad i = \{1,2\} \quad (7-4)$$

$$D_{pq}(e^{-s.T_{d_i}}) = \sum_{k=0}^5 \frac{5!(5+5-k)!}{k!(5+5)!(5-k)!} \cdot (s.T_{d_i})^k \quad i = \{1,2\} \quad (8-4)$$

$$R_{pq}(e^{-s.T_{d_i}}) = \frac{N_{pq}(e^{-s.T_{d_i}})}{D_{pq}(e^{-s.T_{d_i}})} = \frac{\sum_{k=0}^5 \frac{5!(5+5-k)!}{k!(5+5)!(5-k)!} \cdot (-s.T_{d_i})^k}{\sum_{k=0}^5 \frac{5!(5+5-k)!}{k!(5+5)!(5-k)!} \cdot (s.T_{d_i})^k} \quad (9-4)$$

$$i = \{1,2\}$$

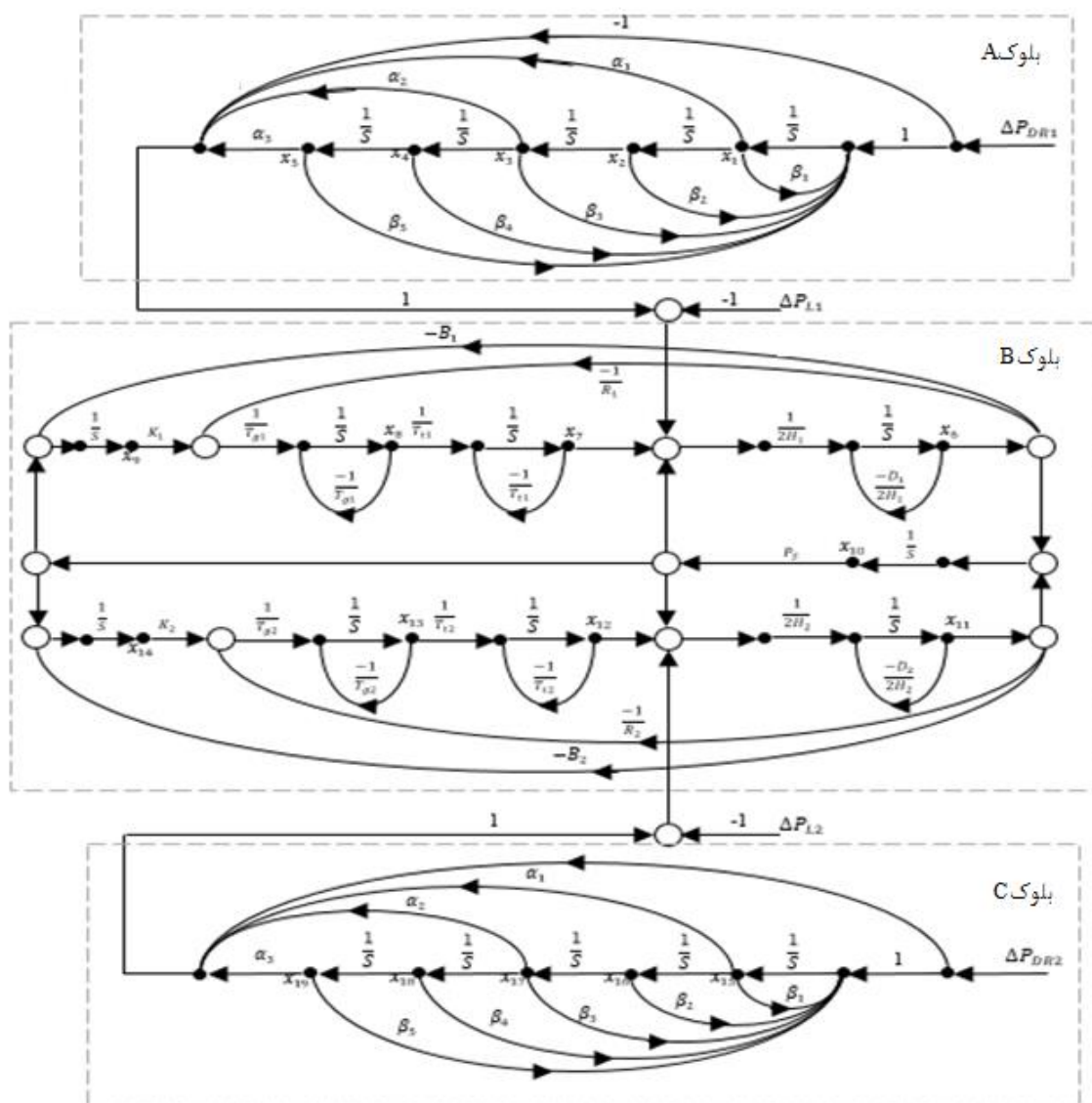
با حل معادله (۴-۹)، تقریب خطی پادِ برای تاخیر به صورت معادله (۴-۱۰) بدست خواهد

آمد:

$$e^{-sT_{d_i}} \approx R_{pq}(e^{-sT_{d_i}}) = G_i(s) = \frac{-s^5 + \frac{30}{T_{d_i}}.s^4 - \frac{420}{T_{d_i}^2}.s^3 + \frac{3360}{T_{d_i}^3}.s^2 - \frac{15120}{T_{d_i}^4}.s + \frac{30240}{T_{d_i}^5}}{s^5 + \frac{30}{T_{d_i}}.s^4 + \frac{420}{T_{d_i}^2}.s^3 + \frac{3360}{T_{d_i}^3}.s^2 + \frac{15120}{T_{d_i}^4}.s + \frac{30240}{T_{d_i}^5}} \quad (10-4)$$

$$i = \{1,2\}$$

معادله (۴-۱۰) تابع تبدیل حاصل از خطی سازی تاخیر به کمک تقریب پاد را نشان می‌دهد. نمودار گذر سیگنال^۱ برای مدل فضای حالت سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۴-۲) با تقریب پاد از نوع مرتبه ۵ام در شکل (۴-۳) نشان داده شده است:



شکل ۴-۳: نمودار گذر سیگنال برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا

^۱ Signal Flow Graph (SFG)

در شکل (۳-۴) بلوک A و C به ترتیب نمودار گذر سیگنال حاصل از تابع تبدیل $G_1(s)$ و $G_2(s)$ می‌باشند.

$G_1(s)$: تابع تبدیل حاصل از خطی سازی تاخیر به کمک تقریب پادِ در ناحیه اول

$G_2(s)$: تابع تبدیل حاصل از خطی سازی تاخیر به کمک تقریب پادِ در ناحیه دوم

بلوک A در شکل (۳-۴) نشان دهنده نمودار گذر سیگنال سیستم قدرت دو ناحیه‌ای می‌باشد. به این ترتیب با خطی سازی تمام اجزا مدل سیستم قدرت دوناحیه‌ای با پاسخ تقاضا، نمودار گذر سیگنال آن بدست آمد که با کمک این نمودار می‌توانیم معادلات حالت سیستم را تشکیل دهیم.

ضرایب فیدبک مرتبه‌ی ۵م تقریب پادِ که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است در جدول (۱-۴) آورده شده است. T_d تأخیر ارتباطی پاسخ تقاضا می‌باشد.

جدول ۱-۴: ضرایب فیدبک نمودار گذر سیگنال

β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
$\frac{-30}{T_d}$	$\frac{-420}{T_d^2}$	$\frac{-3360}{T_d^3}$	$\frac{-15120}{T_d^4}$	$\frac{-30240}{T_d^5}$
α_1	α_2	α_3		
$\frac{60}{T_d}$	$\frac{6720}{T_d^3}$	$\frac{60482}{T_d^5}$		

به کمک تقریب تأخیر زمانی، سیستم (۳-۴) توسط ماتریس‌های فضای حالت (۴-۱۱) تا (۴-۱۳) بیان خواهند شد و T عملگر ترانپوز^۱ ماتریس می‌باشد. ماتریس‌های مدل فضای حالت سیستم در ادامه آورده شده‌اند. برای سیستم‌های قدرت پیچیده نیز می‌توان ماتریس‌های حاصل از مدل فضای حالت سیستم را به‌مانند آنچه بیان شد به دست آورد.

$$B^T = \begin{bmatrix} 1-\alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1+\alpha_1}{2H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1+\alpha_2}{2H_2} & 0 & 0 & 0 & 1-\alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۴-۱۱)$$

$$C^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (۴-۱۲)$$

^۱ Transpose

متغیرهای حالت سیستم قدرت مورد مطالعه به صورت زیر می باشند:

متغیرهای مرتبط با تقریب پادِ (X_{15}, \dots, X_{19}) و (X_1, \dots, X_5) :

$X_6 = \Delta f_1$: انحراف فرکانس ناحیه اول

$X_7 = \Delta P_{t1}$: توان خروجی ژنراتور ناحیه اول

$X_8 = \Delta P_{g1}$: توان خروجی گاورنر ناحیه اول

$X_9 = \Delta P_{s1}$: توان مرجع برای ناحیه اول

$X_{10} = \Delta P_{12}$: تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ناحیه

و به طریق مشابه متغیرهای حالت برای ناحیه دوم بهمانند زیر خواهند بود:

$X_{11} = \Delta f_2$

$X_{12} = \Delta P_{t2}$

$X_{13} = \Delta P_{g2}$

$X_{14} = \Delta P_{s2}$

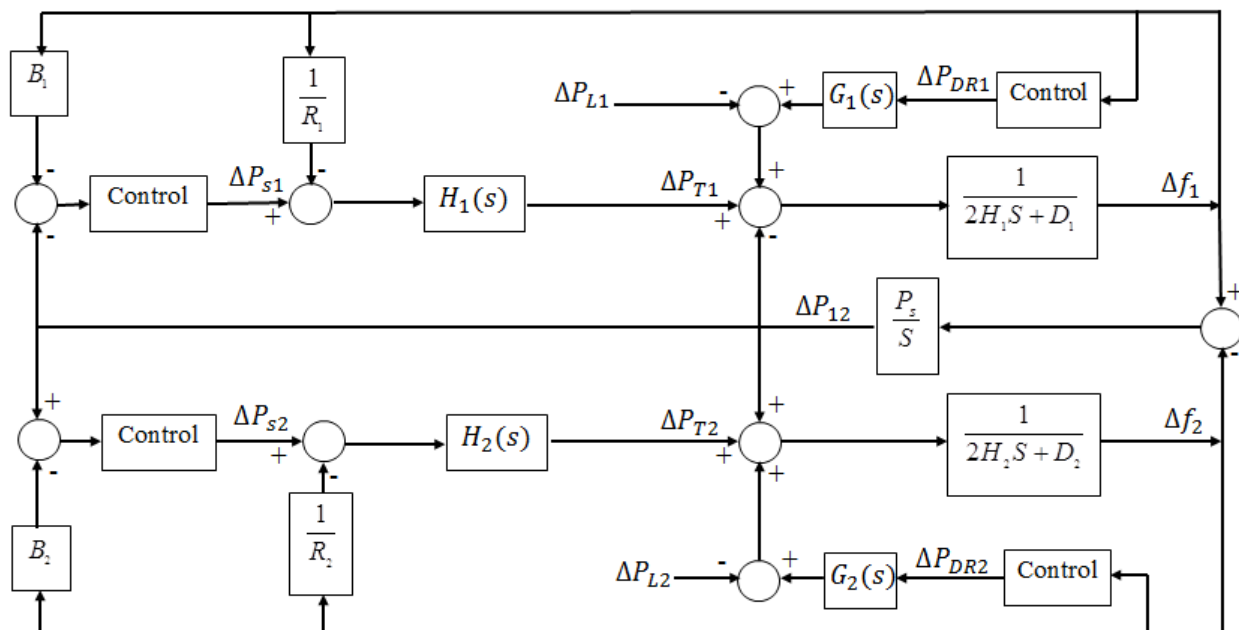
۴-۵ ارزیابی خطای حالت دائمی:

حلقه کنترل اولیه نشان داده شده در شکل (۴-۲) به عنوان حلقه کنترلی مشخصه افتری فرکانس^۱ شناخته می شود. و سریع ترین عکس العمل کنترلی سیستم قدرت محسوب می شود، اما این کنترل کننده برای تصحیح انحراف فرکانس به مقدار صفر در حالت دائمی کافی نمی باشد. به همین دلیل حلقه کنترل فرکانس کمکی، که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است برای کنترل اضافی مورد نیاز می باشد. اگرچه حلقه کنترل پاسخ تقاضا نیز در این بررسی ها اضافه شده است. بنابراین لازم و ضروری خواهد بود که اثر حلقه کنترل پاسخ تقاضا را برای خطای حالت دائمی سیستم قدرت، مورد مطالعه و بررسی قرار دهیم. در انتهای فصل از یک متغیر کمکی استفاده خواهد شد که عمل کنترلی را بین حلقه کنترل پاسخ تقاضا و حلقه کنترل کمکی تقسیم کند تا بدین ترتیب اثر هر کدام از حلقه ها را به تنهایی و به صورت اشتراکی با یکدیگر در کنترل انحراف فرکانس سیستم مشاهده کنیم.

معادلات حالت دائمی برای کنترل فرکانس_ بار متداول در تحقیقات گوناگون استخراج شده است [۳، ۲۲].

به منظور تحلیل راحت تر مسئله، در شکل (۴-۲) بعضی از بلوک ها با هم تلفیق شده اند که شکل نهایی به صورت شکل (۴-۴) بیان شده است:

¹ Frequency Droop Control



شکل ۴-۴: مدل سیستم قدرت دوناحیه‌ای ساده شده با پاسخ تقاضا

در شکل (۴-۴) $H_1(s)$ و $H_2(s)$ از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} H_1(s) = \frac{1}{(1 + s.T_{g1})(1 + s.T_{t1})} \\ H_2(s) = \frac{1}{(1 + s.T_{g2})(1 + s.T_{t2})} \end{cases} \quad (۱۴-۴)$$

هم‌چنین در شکل (۴-۴) تقریب پاد برای خطی‌سازی تاخیر در ناحیه اول و دوم به ترتیب با

$G_1(s)$ و $G_2(s)$ نشان داده شده است. از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$G_1(s) = G_2(s) = \frac{-s^5 + \frac{30}{T_d}.s^4 - \frac{420}{T_d^2}.s^3 + \frac{3360}{T_d^3}.s^2 - \frac{15120}{T_d^4}.s + \frac{30240}{T_d^5}}{s^5 + \frac{30}{T_d}.s^4 + \frac{420}{T_d^2}.s^3 + \frac{3360}{T_d^3}.s^2 + \frac{15120}{T_d^4}.s + \frac{30240}{T_d^5}} \quad (۱۵-۴)$$

انحراف فرکانس سیستم قدرت را می توان به صورت معادله (۱۶-۴) بیان کرد:

$$\begin{cases} \Delta f_1(s) = \frac{1}{2H_1 \cdot s + D_1} [\Delta P_{T1}(s) - \Delta P_{L1}(s) + G_1(s) \cdot \Delta P_{DR1}(s)] \\ \Delta f_2(s) = \frac{1}{2H_2 \cdot s + D_2} [\Delta P_{T2}(s) - \Delta P_{L2}(s) + G_2(s) \cdot \Delta P_{DR2}(s)] \end{cases} \quad (16-4)$$

به طوری که:

$$\begin{cases} \Delta P_{T1}(s) = H_1(s) \cdot \left[\Delta P_{S1} - \frac{1}{R_1} \cdot \Delta f_1(s) \right] \\ \Delta P_{T2}(s) = H_2(s) \cdot \left[\Delta P_{S2} - \frac{1}{R_2} \cdot \Delta f_2(s) \right] \end{cases} \quad (17-4)$$

همان طور که دیده می شود هر نوع مدلی از توربین و گاورنر و در مجموع هر نوع مدلی از سیستم قدرت را می توان به واسطه تصحیح $H(s)$ به صورت معادلات (۱۴-۴) تا (۱۷-۴) بیان کرد.

با قرار دادن معادله (۱۷-۴) در (۱۶-۴) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \Delta f_1(s) = \frac{1}{2H_1(s) + D_1} \cdot \left[H_1(s) \cdot \left[\Delta P_{S1} - \frac{1}{R_1} \cdot \Delta f_1(s) \right] - \Delta P_{L1}(s) + G(s) \cdot \Delta P_{DR1}(s) \right] \\ \Delta f_2(s) = \frac{1}{2H_2(s) + D_2} \cdot \left[H_2(s) \cdot \left[\Delta P_{S2} - \frac{1}{R_2} \cdot \Delta f_2(s) \right] - \Delta P_{L2}(s) + G(s) \cdot \Delta P_{DR2}(s) \right] \end{cases} \quad (18-4)$$

با حل معادله (۱۸-۴) برای $\Delta f(s)$ نتایج به صورت معادله انحراف فرکانس به صورت معادله

(۱۹-۴) خواهد شد:

$$\begin{cases} \Delta f_1(s) = \frac{1}{\zeta_1(s)} \cdot [H_1(s) \cdot \Delta P_{S1} + G_1(s) \cdot \Delta P_{DR1}(s)] - \frac{1}{\zeta_1(s)} \cdot \Delta P_{L1}(s) \\ \Delta f_2(s) = \frac{1}{\zeta_2(s)} \cdot [H_2(s) \cdot \Delta P_{S2} + G_2(s) \cdot \Delta P_{DR2}(s)] - \frac{1}{\zeta_2(s)} \cdot \Delta P_{L2}(s) \end{cases} \quad (19-4)$$

به طوری که:

$$\begin{cases} \zeta_1(s) = 2H_1 \cdot s + D_1 + \frac{H_1(s)}{R_1} \\ \zeta_2(s) = 2H_2 \cdot s + D_2 + \frac{H_2(s)}{R_2} \end{cases} \quad (20-4)$$

در بررسی و آنالیز کنترل فرکانس- بار معمولاً از اغتشاشات از نوع پله برای $\Delta P_L(s)$ استفاده

می کنند، بنابراین:

$$\begin{cases} \Delta P_{L1}(s) = \frac{\Delta P_{L1}}{s} \\ \Delta P_{L2}(s) = \frac{\Delta P_{L2}}{s} \end{cases} \quad (21-4)$$

با قرار دادن (21-4) در (19-4) مقدار حالت دائمی انحراف فرکانس سیستم قدرت را می توان

به صورت معادله (22-4) بیان کرد:

$$\begin{cases} \Delta f_{1SS} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta f_1(s) = \frac{\Delta P_{S1,SS} + \Delta P_{DR1,SS} - \Delta P_{L1}}{\zeta_1(0)} \\ \Delta f_{2SS} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta f_2(s) = \frac{\Delta P_{S2,SS} + \Delta P_{DR2,SS} - \Delta P_{L2}}{\zeta_2(0)} \end{cases} \quad (22-4)$$

که $\Delta P_{s1,ss}$ مقدار نهایی ΔP_{s1} می باشد، در نتیجه:

$$\begin{cases} \Delta P_{s1,ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s.H_1(s).\Delta P_{s1}(s) \\ \Delta P_{s2,ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s.H_{21}(s).\Delta P_{s2}(s) \end{cases} \quad (23-4)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{DR1,ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s.G_1(s).\Delta P_{DR1}(s) \\ \Delta P_{DR2,ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s.G_2(s).\Delta P_{DR2}(s) \end{cases} \quad (24-4)$$

$$\begin{cases} \zeta_1(0) = D_1 + \frac{H_1(0)}{R_1} = D_1 + \frac{1}{R_1} \approx B_1 \\ \zeta_2(0) = D_2 + \frac{H_2(0)}{R_2} = D_2 + \frac{1}{R_2} \approx B_2 \end{cases} \quad (25-4)$$

بنابراین $\zeta(0)$ معادل مشخصه‌ی پاسخ فرکانسی سیستم خواهد بود که هم‌چنین آن را معادل با متغیر جدیدی به نام B در نظر می‌گیرند که به آن ضریب تنظیم فرکانس¹ می‌گویند. بنابراین در نهایت انحراف فرکانس حالت دائمی برای دو ناحیه $(\Delta f_{s1,ss}, \Delta f_{s2,ss})$ را می‌توان به صورت معادله (26-4) بیان کرد:

$$\begin{cases} \Delta f_{s1,ss} = \frac{\Delta P_{s1,ss} + \Delta P_{DR1,ss} - \Delta P_{L1}}{D_1 + \frac{1}{R_1}} \\ \Delta f_{s2,ss} = \frac{\Delta P_{s2,ss} + \Delta P_{DR2,ss} - \Delta P_{L2}}{D_2 + \frac{1}{R_2}} \end{cases} \quad (26-4)$$

از معادله (26-4) می‌توان مشاهده کرد که اگر کنترل‌کننده‌ی پاسخ تقاضا $(\Delta P_{DRi},)$ و کنترل‌کننده‌ی کمکی $(\Delta P_{is}, i = \{1,2\})$ وجود نداشته باشند انحراف فرکانس در

¹ Frequency Bias Factor

حالت دائمی صفر نخواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که حلقه کنترل پاسخ تقاضا انعطاف‌پذیری بیشتری به سیستم قدرت خواهد داد به عبارت دیگر برای سیستم قدرت به‌منظور انتخاب حلقه کنترل کمکی و حلقه کنترل پاسخ تقاضا حق تصمیم‌گیری وجود خواهد داشت و همچنین بهره‌برداران سیستم قدرت می‌توانند به‌صورت اشتراکی از هر دو حلقه پاسخ تقاضا و کمکی در جهت تصحیح انحراف فرکانس اقدام کنند.

از معادله (۴-۲۶) می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

✓ خطای حالت دائمی به تأخیر و مرتبه‌ی تقریب آن بستگی ندارد. یعنی با توجه به معادله... $G_1(s)$ و $G_2(s)$ از هر مرتبه‌ای که باشند چون در حالت دائمی تمام عبارتهایی که ضریب s دارند صفر می‌شوند و فقط آخرین عبارت صورت و مخرج که باهم برابر هستند باقی می‌مانند، در نتیجه $G_1(s)$ و $G_2(s)$ برابر یک خواهند شد که در نتیجه مرتبه تقریب در خطای دائمی تأثیر گذار نخواهد بود.

$$G_1(s) = G_2(s) = \frac{-s^5 + \frac{30}{T_d} \cdot s^4 - \frac{420}{T_d^2} \cdot s^3 + \frac{3360}{T_d^3} \cdot s^2 - \frac{15120}{T_d^4} \cdot s + \frac{30240}{T_d^5}}{s^5 + \frac{30}{T_d} \cdot s^4 + \frac{420}{T_d^2} \cdot s^3 + \frac{3360}{T_d^3} \cdot s^2 + \frac{15120}{T_d^4} \cdot s + \frac{30240}{T_d^5}} \quad (۴-۲۷)$$

در حالت دائمی در $s=0$ نتیجه خواهیم داشت:

$$G_1(0) = G_2(0) = \frac{\frac{30240}{T_d^5}}{\frac{30240}{T_d^5}} = 1 \quad (۴-۲۸)$$

✓ با در دسترس بودن پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس_ بار قابلیت اطمینان سیستم به‌منظور تنظیم فرکانس بسیار بالا خواهد بود، چون حلقه کنترلی پاسخ تقاضا به همراه حلقه کنترل کمکی کنترل را کامل‌تر می‌کند و در مواردی که به هر دلیلی کنترل کمکی در

دسترس نباشد عملکرد تصحیح انحراف فرکانس توسط حلقه کنترلی پاسخ تقاضا تضمین خواهد شد، البته در صورت در دسترس بودن مقدار کافی پاسخ تقاضا، یعنی مشارکت مشترکان در برنامه‌های پاسخ تقاضا در حد قابل قبول باشد.

✓ به‌منظور به صفر رساندن انحراف فرکانس در حالت دائمی می‌توان مقدار عمل کنترلی موردنیاز را بین حلقه کنترلی پاسخ تقاضا و حلقه کنترل کمکی تقسیم کرد و از هر دو حلقه به‌صورت اشتراکی بهره برد. به‌عبارت‌دیگر بهره‌برداران سیستم قدرت می‌توانند با در نظر گرفتن هزینه‌های استفاده از هر حلقه‌ی کنترلی (یعنی حلقه کنترلی پاسخ تقاضا و حلقه کنترل کمکی) به صورتی استفاده کنند که هزینه‌های جاری سیستم قدرت کاهش یابد و قابلیت اطمینان سیستم قدرت نیز همچنان در حد قابل قبول برقرار گردد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، حالتی را در نظر بگیرید که اگر پاسخ تقاضا در دسترس نباشد. بنابراین خطای فرکانس وقتی صفر خواهد شد که $\Delta P_{s,ss} = \Delta P_L$ باشد. این بدان معنا خواهد بود که کنترل‌کننده کمکی باید تمام رزرو چرخان / غیر چرخان را در زمان به وجود آمدن اغتشاش فراهم سازد تا انحراف فرکانس سیستم را تصحیح کند. در صورت در دسترس بودن پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس_ بار مقدار کنترل موردنیاز، در این پایان‌نامه آن را با متغیر φ نشان می‌دهیم، می‌تواند بین حلقه کنترلی پاسخ تقاضا و حلقه کنترل کمکی متناسب با در نظر گرفتن هزینه هرکدام در زمان واقعی تقسیم شود، که آن را در معادله (۴-۲۹) مشاهده می‌کنید:

$$\begin{cases} \Delta P_{Si}(s) = \alpha_i \cdot \varphi \\ \Delta P_{DRi}(s) = (1 - \alpha_i) \cdot \varphi \end{cases} \quad (۴-۲۹)$$

$$i = \{1, 2\}$$

به‌طوری‌که $0 \leq \alpha \leq 1$ خواهد بود. $\alpha = 1$ به معنای آن است که تمام تنظیم موردنیاز توسط تنظیم‌کننده‌ی متداول تأمین خواهد شد، مانند رزرو چرخان/ غیر چرخان و همچنین $\alpha = 0$ بدان

معنا است که تمام تنظیم موردنیاز توسط پاسخ تقاضا تأمین خواهد شد. تصمیم برای مقدار α بر عهده‌ی بهره‌برداران سیستم قدرت خواهد بود که متناسب با هزینه‌ی هرکدام از رزرو چرخان/ غیر چرخان یا پاسخ تقاضا و یا به صورت ترکیبی از آن‌ها به چه صورت تقسیم‌بندی را انجام خواهند داد.

نهایتاً مقدار حالت دائمی دو ورودی را می‌توان به صورت معادله (۴-۳۰) بیان کرد:

$$\begin{cases} \Delta P_{Si,SS} = \alpha_i \cdot \Delta P_{Li} \\ \Delta P_{DRi,SS} = (1 - \alpha_i) \cdot \Delta P_{Li} \end{cases} \quad (۴-۳۰)$$

$$i = \{1, 2\}$$

۴-۶ روش عمومی طراحی کنترل‌کننده برای مدل LFC-DR:

چندین روش کنترلی، از جمله کنترل مدرن و کنترل کلاسیک برای مسئله کنترل فرکانس- بار به کار برده شده است [۵۶]. در این بخش روش کلی طراحی کنترل‌کننده برای مسئله کنترل فرکانس- بار به همراه حلقه کنترلی پاسخ تقاضا بیان خواهد شد. در این پایان‌نامه از روش تنظیم‌کننده مربعی خطی^۱ استفاده شده است و علت استفاده از آن مینیمم‌سازی مصرف انرژی مورد نیاز به منظور کنترل متغیرهای سیستم می‌باشد. در واقع با توجه به تابع هدف مورد استفاده در کنترل بهینه مینیمم توان مصرفی برای عمل کنترلی صرف خواهد شد و این نکته برای ما بسیار مهم است.

۴-۶-۱ روش کنترل بهینه و مسئله تنظیم‌کننده مربعی خطی:

در روش تنظیم‌کننده مربعی خطی، روش کلی کنترل به این صورت است که بهترین انتخاب بین عملکرد و هزینه‌ی کنترل باید اتخاذ گردد. طراحی بهینه می‌تواند برای هر دو حالت سیستم حلقه بسته و سیستم حلقه باز صورت بگیرد [۵۷]. شکل استاندارد برای سیستم حلقه بسته که ناظر بر کنترل سیستم خواهد بود وظیفه مینیمم‌سازی شاخصی به نام J را به عهده دارد که به

^۱ Linear Quadratic Regulation (LQR)

شکل زیر بیان می‌شود [۵۸]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (۳۱-۴)$$

به طوری که :

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag}(q_i) \\ R &= \text{diag}(r_j) \end{aligned} \quad (۳۲-۴)$$

در معادله (۳۱-۴) Q و R ماتریس‌های وزن دهی می‌باشند و غالباً به صورت قطری هستند.

ترم‌های $x^T Q x$ و $u^T R u$ در معادله (۳۱-۴) به صورت فرم‌های مربعی^۱ می‌باشند و به ترتیب ناظر بر عملکرد و هزینه‌ی کنترل‌کننده خواهند بود. این ترم‌ها مقادیر عددی^۲ دارند که در زیر نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} x^T Q x &= \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 x_1 \\ \vdots \\ q_n x_n \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^n q_i x_i^2 \end{aligned} \quad (۳۳-۴)$$

به طریق مشابه خواهیم داشت:

¹ Quadratic
² Scalar

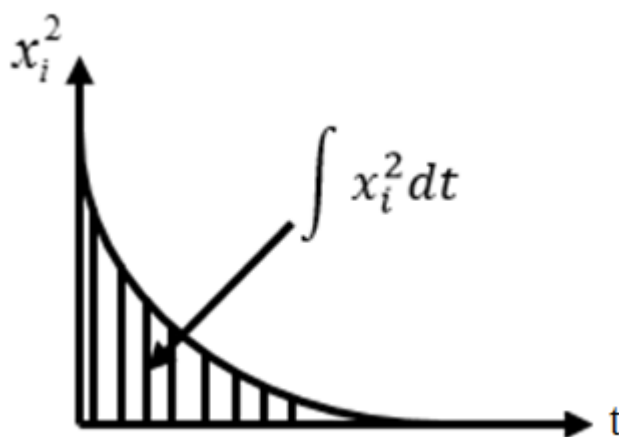
$$u^T Ru = \sum_{j=1}^n r_j u_j^2 \quad (34-4)$$

حال با جاگذاری معادلات (33-4) و (34-4) در معادله (31-4) خواهیم داشت:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(\sum_{i=1}^n q_i x_i^2 + \sum_{j=1}^n r_j u_j^2 \right) dt \quad (35-4)$$

بنابراین کنترل بهینه، مجموع وزن‌های داده‌شده تحت نواحی منحنی‌های x_i^2 و u_j^2 را

همان‌طور که در شکل (4-5) نشان داده شده است مینیمم می‌کند:



شکل ۴-۵: سطح زیر منحنی ضرایب وزن دهی کنترل بهینه [۵۷].

انتخاب المان‌های ماتریس‌های Q و R متناسب با وزن دهی برای متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترل‌کننده می‌باشد.

البته می‌توان مقادیر درایه‌های ماتریس‌های Q و R را به صورت دلخواه انتخاب کرد و نتایج را بررسی کرد و آن‌قدر مقادیر ماتریس‌های Q و R را تغییر داد تا به نتایج موردنظر دست‌یافت و به

این صورت با سعی و خطا بهترین مقادیر برای درایه‌های ماتریس‌های Q و R انتخاب گردند.

حال طراحی فیدبک حالت به منظور مینیمم کردن J را در نظر بگیرید، داریم:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (36-4)$$

معادله کنترل و مدل سیستم حلقه بسته به صورت معادله (37-4) می‌باشد:

$$\begin{aligned} u &= -Kx \quad K = \{K_{ij}\} \\ \dot{x} &= (A - BK) \end{aligned} \quad (37-4)$$

با جاگذاری معادله (37-4) در (31-4) خواهیم داشت:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} x^T (Q + K^T R K) x dt \quad (38-4)$$

اگر سیستم حلقه بسته پایدار باشد یعنی $x(\infty) = 0$ در آن صورت ماتریس P که به صورت

مثبت معین باشد وجود خواهد داشت، در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{d}{dt}(x^T P x) = -x^T (Q + K^T R K) x \quad (39-4)$$

$$P = \{P_{ij}\}$$

ماتریس P مثبت معین است اگر و تنها اگر کهادهای اصلی آن مثبت باشند:

$$P_{11} \geq 0$$

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \geq 0$$

(۴۰-۴)

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \geq 0$$

بنابراین با قرار دادن معادله (۳۹-۴) در (۳۸-۴) خواهیم داشت:

$$J = \frac{-1}{2} \int_0^{\infty} \frac{d}{dt} (x^T P x) dt = \frac{-1}{2} x^T P x \Big|_0^{\infty} = \frac{-1}{2} x^T(\infty) P x(\infty) + \frac{1}{2} x^T(0) P x(0)$$

(۴۱-۴)

$$\Rightarrow J = \frac{1}{2} x^T(0) P x(0)$$

می‌توان با کمک معادله‌های (۳۹-۴) و (۳۷-۴)، ماتریس P را به دست آورد:

$$\frac{d}{dt} (x^T P x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} = x^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)] x$$

(۴۲-۴)

حال باید طرف راست معادله (۴۲-۴) با طرف راست معادله (۳۹-۴) برابر باشد، بنابراین داریم:

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -Q - (K^T R K)$$

(۴۳-۴)

معادله (۴۳-۴) معادله ماتریس لیاپانوف می‌باشد و برای حل آن، ماتریس P که مثبت معین

باشد لازم است.

مینیمم مقدار برای J در معادله (۴-۴۱) با قرار دادن P به دست آمده از معادله (۴-۴۳) به دست می آید. حل تحلیلی فقط برای مسائل بسیار ساده که تعداد K_{ij} های آن کوچک باشد قابل اجرا خواهد بود.

معمولاً پارامترهایی که به صورت روش های بهینه به دست آمده باشند برای به دست آوردن مینیمم J به کار برده می شوند و به این ترتیب با استفاده از روش های بهینه سازی می توان معادله (۴-۴۱) را حل کرد.

برای حل فیدبک حالت و معادله لیاپانوف باید معادله ریکاتی را برای به دست آوردن ماتریس P حل کنیم. در کنترل بهینه با وجود ضرایب ثابت برای فیدبک حالت، تئوری تنظیم کننده بهینه به صورت معادله (۴-۴۴) خواهد بود:

$$\begin{aligned} u_{opt} &= -Kx \\ K &= R^{-1}B^T P \end{aligned} \quad (۴۴-۴)$$

در این حالت P همان ماتریس مثبت معین می باشد که از حل معادله ریکاتی زیر به دست آمده باشد:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (۴۵-۴)$$

در مسائل بسیار ساده، می توان معادله ریکاتی را به صورت مستقیم حل کرد اما معمولاً روش های حل کامپیوتری برای حل معادله ریکاتی مورد نیاز می باشد. برای حل کامپیوتری، مقداردهی اولیه نیز مهم می باشد و باید به آن توجه کرد در غیر این صورت ممکن است حل کامپیوتری به جواب مطلوب منجر نشود.

در این پایان نامه به منظور کنترل سیستم قدرت با پاسخ تقاضا و در واقع به منظور یافتن ورودی

برای کنترل متغیرهای سیستم قدرت از روش تنظیم کننده مربعی خطی استفاده شده است، که فرمول‌های آن به تفصیل در بالا آورده شده است.

۴-۷ جمع‌بندی:

در این فصل مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای و معادلات حاکم بر آن بیان شد. هم‌چنین پاسخ تقاضا به مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای اضافه شد و فرمول‌های آن نیز استخراج گردید. در ادامه نیز از تقریب پاد استفاده شد و المان‌های غیر خطی سیستم قدرت، خطی سازی گردید و مدل فضای حالت برای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا استخراج گردید. هم‌چنین خطای حالت دائمی سیستم قدرت دوناحیه‌ای با پاسخ تقاضا بررسی شد و نتایج حاصل از آن ارائه گردید. در انتها روش کنترل بهینه آورده شد.

در فصل بعد از روش کنترلی مذکور برای کنترل فرکانس - بار استفاده خواهد شد و نتایج حاصل از آن آورده می‌شود.

فصل پنجم:

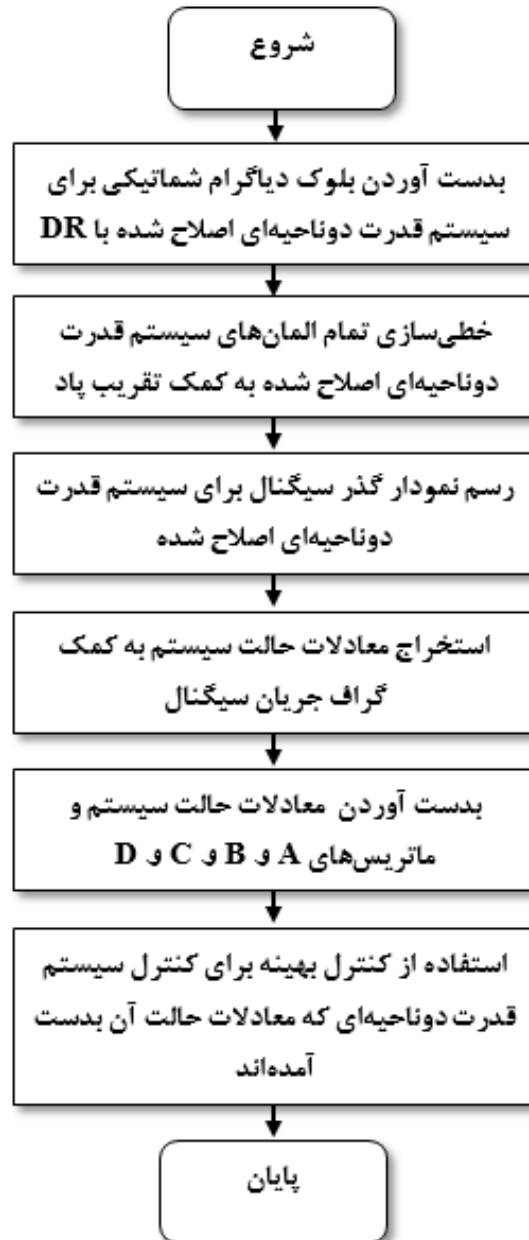
شبه‌سازی

۵-۱ مقدمه

در بخش‌های قبل مقدماتی راجع به پاسخ تقاضا و دسته‌بندی‌های مختلف آن بیان شد و همچنین مسئله‌ی کنترل فرکانس- بار در سیستم قدرت بررسی شد. همان‌طور که بیان شد برای ایجاد پایداری فرکانس در سیستم قدرت باید به مسئله کنترل فرکانس- بار توجه ویژه‌ای کرد. در مسئله طراحی کنترل فرکانس- بار باید، طراحی کنترل‌کننده به‌گونه‌ای باشد که در مقابل اغتشاشات و عوامل ناخواسته بهترین عملکرد را داشته باشد. در واقع در شبکه‌های هوشمند شرایطی به وجود آمده است که ظرفیت‌های جدیدی در اختیار بهره‌برداران سیستم قدرت قرار می‌دهد. از جمله ویژگی‌های قابل توجه در شبکه‌های هوشمند توانایی ایجاد ارتباط دوطرفه می‌باشد. با کمک ادوات ارتباط دوطرفه در ریزشبکه‌ها اندازه‌گیری پیشرفته قابل انجام می‌باشد که در نتیجه‌ی آن اطلاعات بسیار مناسبی از نحوه‌ی مصرف مشترکان و همچنین میزان مصرف همه مشترکان در اختیار بهره‌برداران شبکه قرار خواهد گرفت. در چنین شرایطی می‌توان با کنترل مصرف مشترکان از ناپایداری شبکه جلوگیری کرد و در واقع با ایجاد زیرساخت‌های مناسب می‌توان با صرف هزینه‌ای بسیار کم پیک‌بار شبکه را کنترل کرد و تعادل بین تولید و مصرف را برقرار ساخت.

از جمله ایده‌های نو و جدیدی که به‌واسطه شبکه‌های هوشمند قابل پیاده‌سازی خواهد بود بحث پاسخ تقاضا می‌باشد که در صورت اجرایی شدن آن علاوه بر صرفه‌جویی‌های بسیار زیاد در سیستم قدرت، آلاینده‌گی حاصل از مصرف سوخت فسیلی کاهش و همچنین قابلیت اطمینان شبکه افزایش خواهد داشت.

روند به دست آوردن مدل فضای حالت و در نتیجه شبیه‌سازی سیستم قدرت دوناچه‌ای توسط فلوچارت شکل (۵-۱) بیان می‌شود:



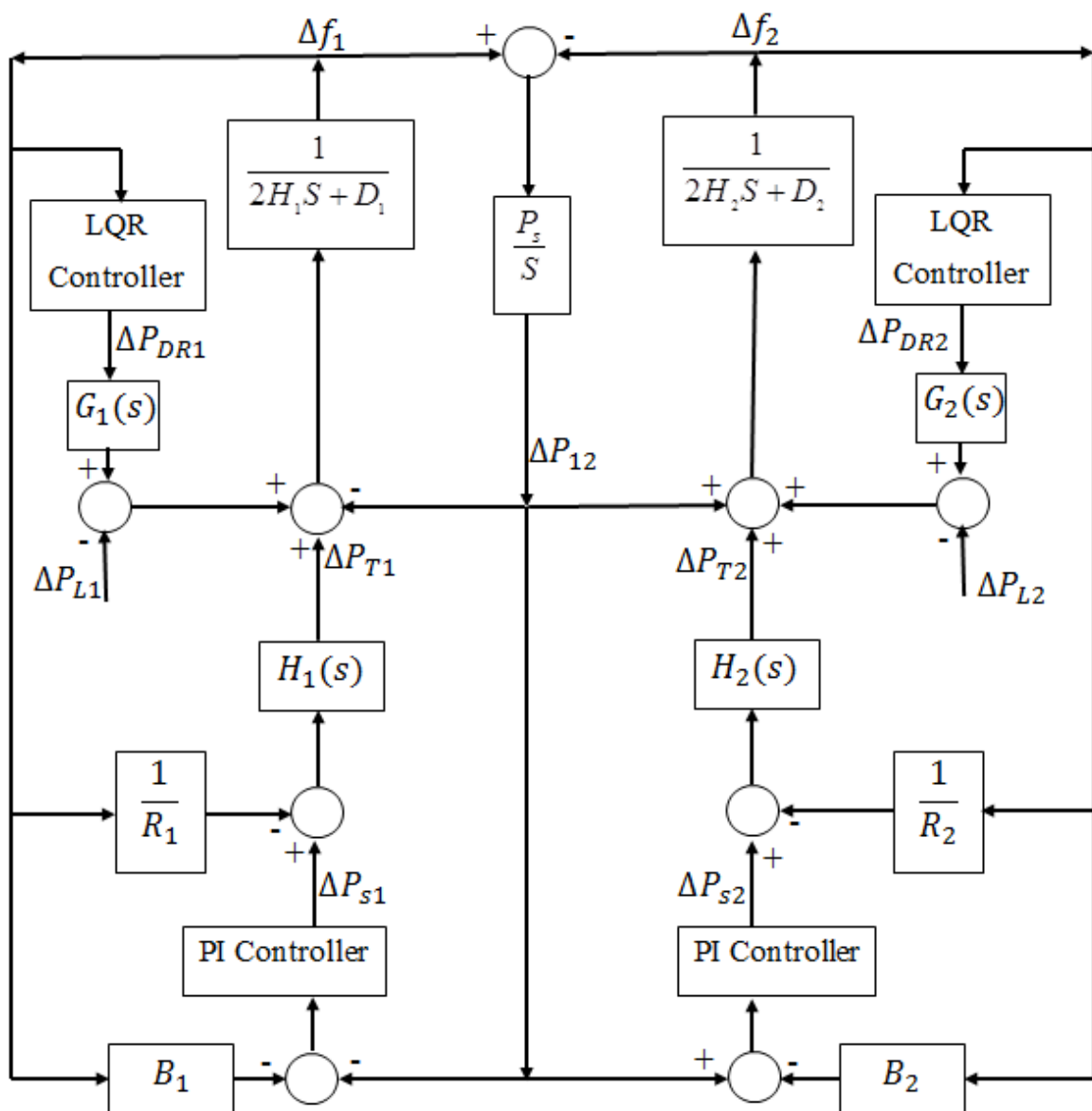
شکل ۵-۱: روند به دست آوردن مدل فضای حالت سیستم و پیاده‌سازی کنترل بهینه

۵-۲ شبیه‌سازی مدل فضای حالت سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا

به منظور بررسی نقش پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار، سیستم قدرت شکل (۵-۲) را

شبیه‌سازی می‌کنیم. در واقع این شکل ساده شده شکل (۴-۲) می‌باشد که نوع کنترل کننده‌ها در آن

مشخص شده است و بعضی از بلوک‌ها با هم تلفیق شده‌اند.



شکل ۵-۲: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ساده شده با پاسخ تقاضا که کنترل کننده‌های آن مشخص شده‌اند

در این پایان‌نامه به منظور شبیه‌سازی سیستم قدرت معادلات حالت سیستم به کمک شکل (۵-۲) استخراج شده‌اند. هدف در این پایان‌نامه کاهش انحراف فرکانس در دو ناحیه $(\Delta f_1, \Delta f_2)$ می‌باشد. هم‌چنین افزایش بار $(\Delta P_{L1}, \Delta P_{L2})$ به اندازه ۰/۱ پریونیت به سیستم اعمال خواهد شد. به منظور

کنترل سیستم قدرت از روش تنظیم کننده مربعی خطی استفاده شده است (معادلات (۴-۳۱) تا (۴-۴۵)). در روش تنظیم کننده مربعی خطی به منظور یافتن سیگنال کنترلی U باید داراییه‌های ماتریس‌های R و Q مشخص باشند که در این بخش داراییه‌های ماتریس‌های R و Q به صورت مقادیر تصادفی بین صفر و یک انتخاب شده‌اند.

پارامترهای سیستم قدرت شکل (۴-۲) در جدول (۵-۱) آمده است.

جدول ۵-۱: داده‌های سیستم قدرت دو ناحیه‌ای

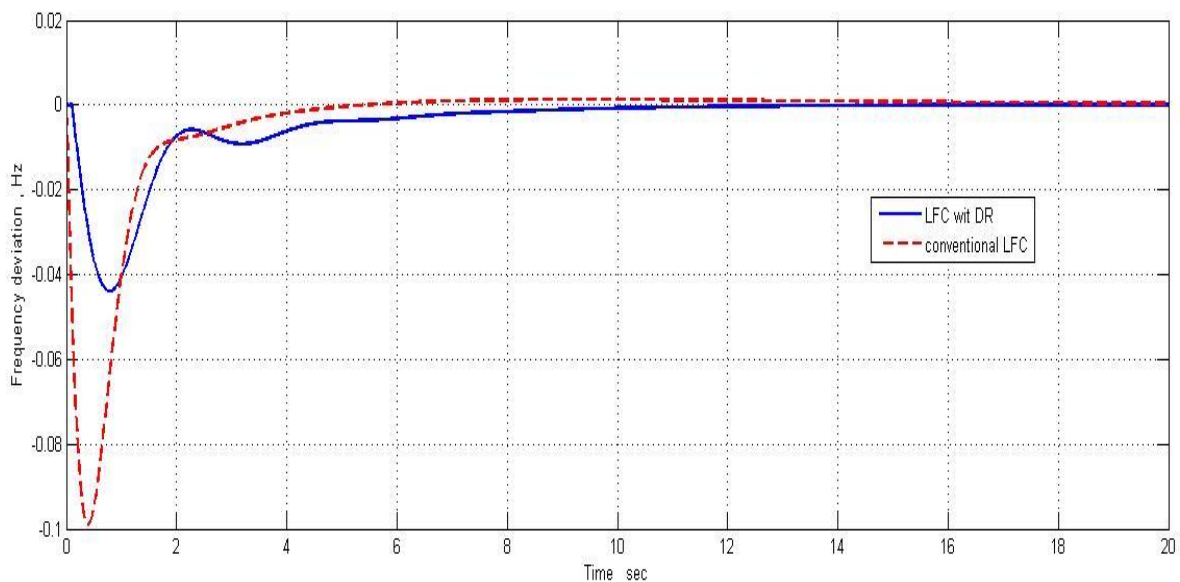
ناحیه اول	ناحیه دوم		
۰/۰۸ sec	۰/۰۶sec	T_g	ثابت زمانی گاورنر
۰/۴ sec	۰/۴۴ sec	T_t	ثابت زمانی توربین
۳ Hz/pu	۲/۷۳ Hz/pu	R	تنظیم سرعت گاورنر
۰/۱۶۶۷ pu.sec	۰/۲۰۱۷ pu.sec	H	ثابت اینرسی ژنراتور
۰/۰۱۵ pu/Hz	۰/۰۱۶ pu/Hz	D	ضریب میرایی بار
۰/۱ sec	۰/۱ sec	T_d	تاخیر ادوات ارتباطی
۰/۱ pu	۰ pu	ΔP_L	تغییرات بار
-۰/۳ sec ⁻¹	-۰/۲ sec ⁻¹	K	ضریب انتگرال‌گیر
۰/۳۴۸۳ pu/Hz	۰/۳۸۲۷ pu/Hz	B	ضریب تنظیم فرکانس
۰/۲ pu/Hz	۰/۲ pu/Hz	P_s	ضریب همگام‌سازی توان

در اولین شبیه‌سازی به منظور بررسی اثر پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس، اغتشاشی به اندازه ۰/۱

پریونیت به ناحیه‌ی اول وارد خواهیم کرد و تغییرات فرکانس در دو ناحیه را مشاهده می‌کنیم.

۳-۵ اعمال اغتشاش به ناحیه‌ی اول و مشاهده انحراف فرکانس هر دو ناحیه

در این قسمت اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار که از جنس توان و به اندازه ۰/۱ پریونیت می‌باشد به ناحیه‌ی اول اعمال خواهیم کرد و انحراف فرکانس هر دو ناحیه را به صورت جداگانه مشاهده می‌کنیم و نتایج را با سیستم قدرت بدون پاسخ تقاضا مقایسه خواهیم کرد.



شکل ۳-۵: انحراف فرکانس ناحیه‌ی اول با اعمال اغتشاش در ناحیه اول

همان‌طور که در شکل (۳-۵) مشاهده می‌شود با وجود اغتشاشی به اندازه‌ی ۰/۱ پریونیت در ناحیه‌ی اول، انحراف فرکانس در ناحیه‌ی اول با کمک پاسخ تقاضا بسیار کمتر از حالتی است که از پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس استفاده نشده باشد.

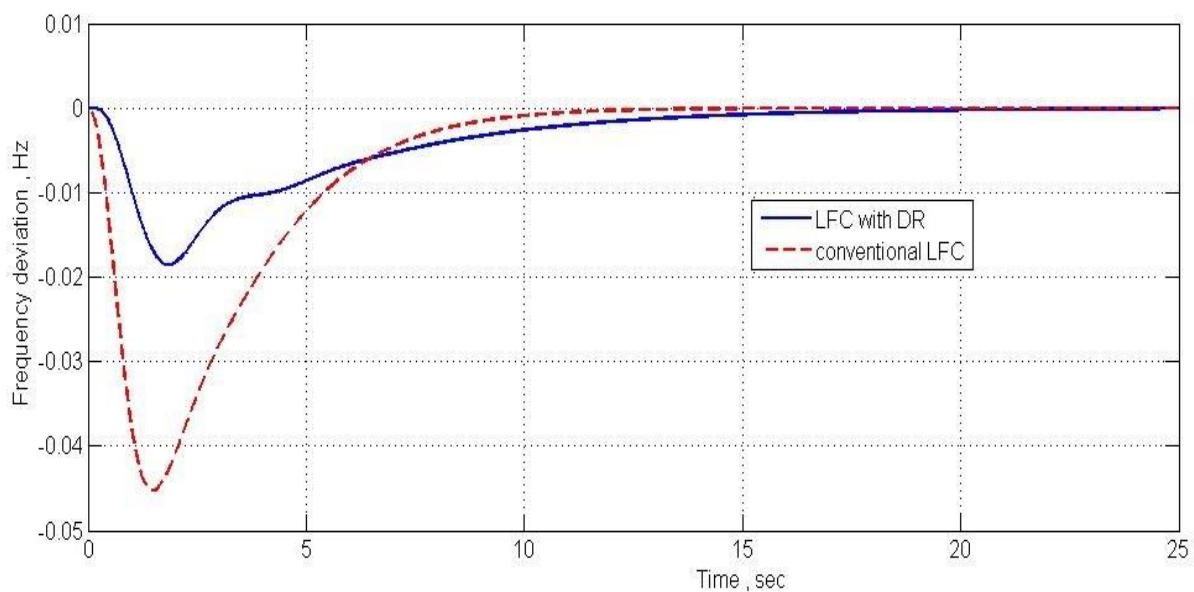
درواقع وقتی اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به اندازه ۰/۱ پریونیت در ناحیه‌ی اول رخ دهد انحراف فرکانس در صورتی که پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس به کار برده شده باشد، برابر Hz

۰/۰۴- می‌شود درحالی‌که اگر از پتانسیل پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس استفاده نشود تغییرات فرکانس تقریباً برابر ۱ Hz- خواهد شد و این بدان معنا خواهد بود که احتمال ناپایداری فرکانسی شبکه بسیار خواهد بود.

علاوه بر انحراف فرکانس باید به زمان نشست انحراف فرکانس دقت شود که برای سیستم با پاسخ تقاضا این زمان تقریباً برابر ۱۲ ثانیه می‌باشد درحالی‌که در سیستم بدون پاسخ تقاضا این زمان تقریباً برابر ۱۵ ثانیه می‌باشد.

برای مشاهده عملکرد پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس سیستم قدرت علاقه‌مند هستیم اغتشاش در هر یک از ناحیه‌ها اعمال کنیم و انحراف فرکانس هر دو ناحیه را مشاهده کنیم و همچنین اغتشاشی به‌صورت هم‌زمان به دو ناحیه اعمال خواهیم کرد و انحراف فرکانس هر ناحیه را به‌صورت جداگانه مشاهده خواهیم کرد و تمام موارد را با سیستم بدون پاسخ تقاضا مقایسه خواهیم کرد.

در این قسمت باوجود اعمال اغتشاش به ناحیه اول انحراف فرکانس ناحیه دوم را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴-۵: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به ناحیه اول

همان‌طور که از شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود انحراف فرکانس ناحیه دوم از انحراف فرکانس ناحیه اول کمتر است و این نیز قابل پیش‌بینی بود. چون اغتشاش به ناحیه اول اعمال شده است انحراف فرکانس ناحیه اول در مقایسه به ناحیه دوم بیشتر شده است.

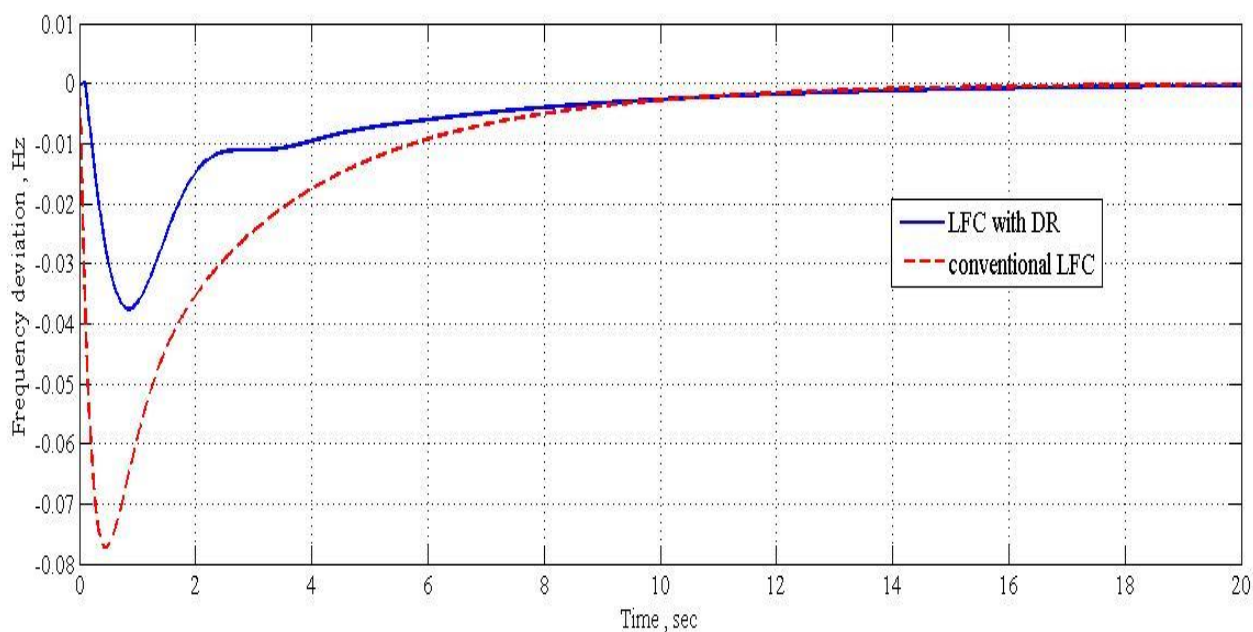
اما انحراف فرکانس ناحیه دوم در دو حالت سیستم با پاسخ تقاضا و بدون آن نیز قابل توجه می‌باشد. در سیستم با پاسخ تقاضا انحراف فرکانس ناحیه دوم تقریباً برابر 0.18 Hz - می‌باشد در حالی که در سیستم بدون پاسخ تقاضا این انحراف تقریباً برابر 0.45 Hz - می‌باشد.

از دیگر نکات قابل توجه زمان نشست می‌باشد، که در سیستم بدون پاسخ تقاضا تقریباً برابر ۱۴ ثانیه و در سیستم با پاسخ تقاضا برابر ۱۷ ثانیه می‌باشد. و برای کمتر کردن زمان نشست سیستم با پاسخ تقاضا باید پارامترهای کنترل‌کننده را تغییر دهیم تا به زمان نشست کمتری برسیم.

۴-۵ اعمال اغتشاش به ناحیه دوم و مشاهده انحراف فرکانس هر دو ناحیه

به‌مانند آنچه در قسمت قبل انجام شد در این قسمت نیز اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به‌اندازه 0.1 پریونیت به ناحیه دوم اعمال خواهد شد و انحراف فرکانس حاصل از آن را در دو ناحیه مشاهده می‌کنیم.

ابتدا انحراف فرکانس ناحیه دوم را در دو حالت سیستم با پاسخ تقاضا و بدون مشاهده می‌کنیم.

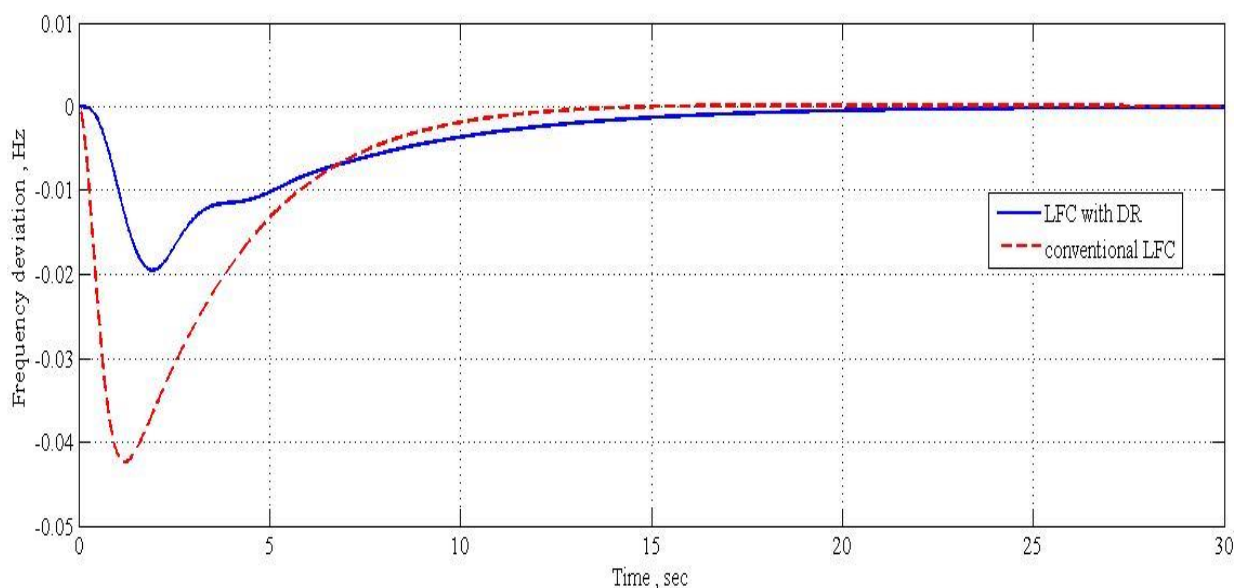


شکل ۵-۵: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم

با توجه به شکل (۵-۵) نتایج حاصل از اعمال اغتشاش به ناحیه دوم و انحراف فرکانس ناشی از آن در ناحیه دوم مشاهده می‌شود. برای سیستمی که در کنترل فرکانس - بار آن از پاسخ تقاضا استفاده شده است انحراف فرکانس تقریباً برابر 0.037 Hz می‌باشد در حالی که در سیستم متداول انحراف فرکانس تقریباً برابر 0.077 Hz می‌باشد.

البته زمان نشست برای هر دو حالت سیستم با پاسخ تقاضا و بدون آن تقریباً برابر ۱۷ ثانیه می‌باشد.

حال می‌خواهیم انحراف فرکانس ناحیه اول که ناشی از اعمال اغتشاش در ناحیه دوم می‌باشد را مشاهده کنیم.



شکل ۵-۶: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم

از شکل (۵-۶) مشاهده می‌شود که با توجه به اعمال اغتشاش ۰/۱ پریونیت به ناحیه دوم انحراف فرکانس ناحیه اول کمتر از انحراف فرکانس ناحیه دوم است.

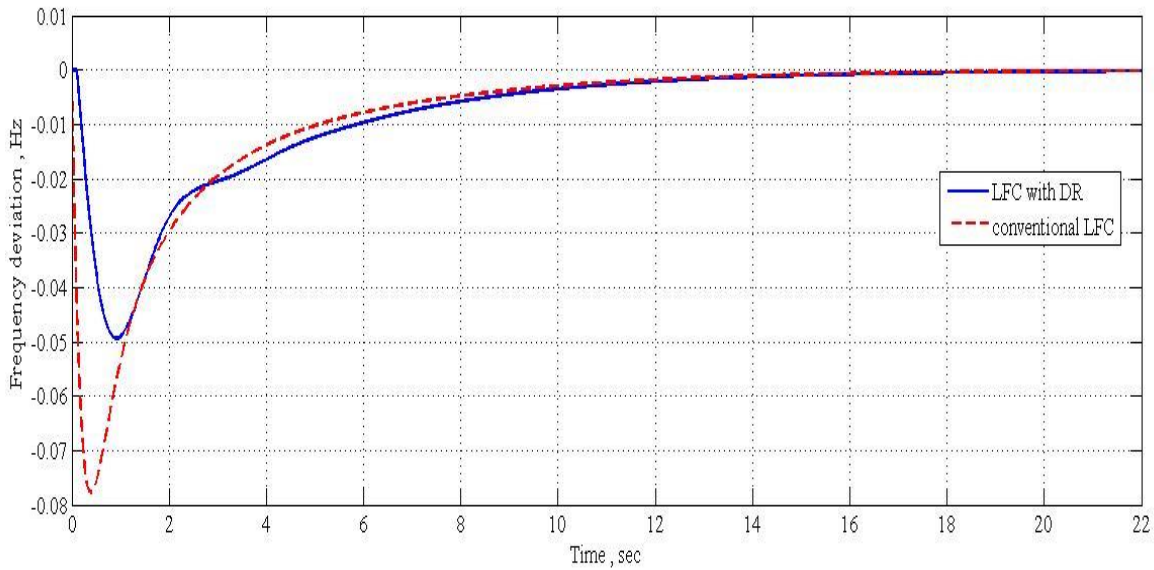
در شکل (۵-۶) انحراف فرکانس ناشی از اعمال اغتشاش به سیستمی که از پاسخ تقاضا استفاده کرده است تقریباً برابر 0.019 Hz می‌باشد در حالی در سیستم متداول این مقدار تقریباً برابر 0.042 Hz می‌باشد. زمان نشست برای سیستم با پاسخ تقاضا تقریباً برابر ۲۲ ثانیه و برای سیستم متداول تقریباً برابر ۱۷ ثانیه می‌باشد.

حال علاقه‌مندیم انحراف فرکانس در ناحیه را با توجه به اعمال اغتشاش به دو ناحیه مشاهده کنیم.

۵-۵ اعمال اغتشاش به دو ناحیه و مشاهده انحراف فرکانس هر ناحیه

در این قسمت نیز اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به اندازه ۰/۱ پریونیت به هر دو ناحیه

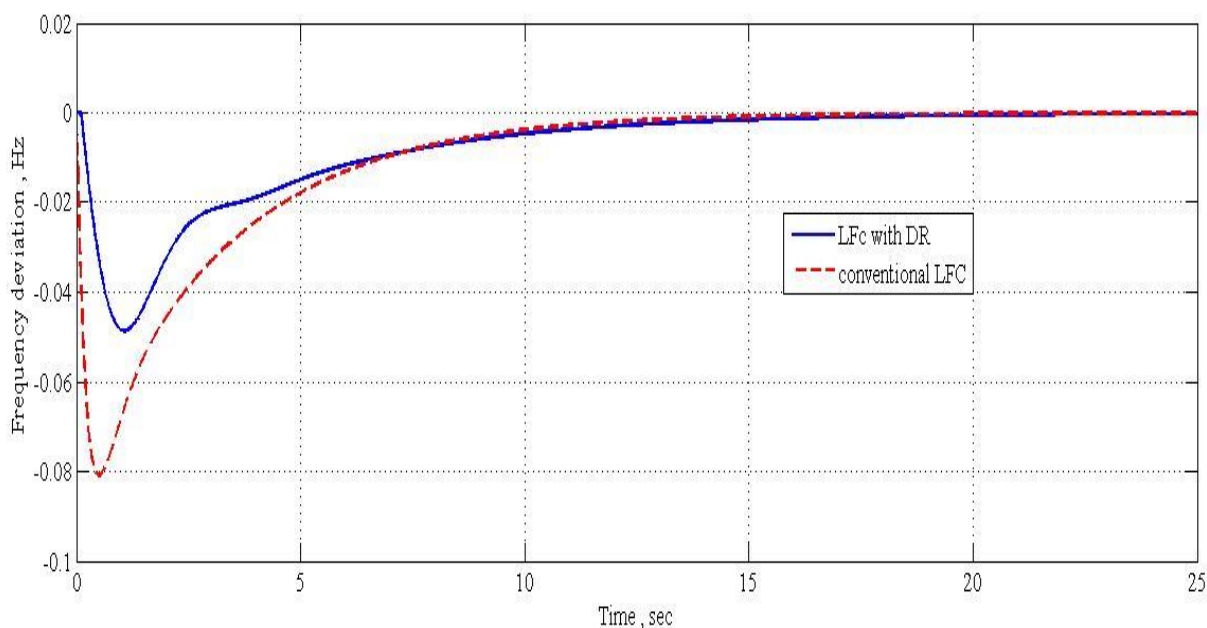
اعمال خواهیم کرد و انحراف فرکانس ناشی از آن را مشاهده می کنیم.



شکل ۵-۷: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به دو ناحیه

از شکل (۷-۵) مشاهده می شود در اثر اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه برای سیستم با پاسخ تقاضا انحراف فرکانس ناحیه اول تقریباً برابر 0.05 Hz می باشد در حالی که در سیستم متداول این مقدار تقریباً برابر 0.078 Hz می باشد. هم چنین زمان نشست برای هر دو سیستم تقریباً برابر ۱۷ ثانیه می باشد.

حال انحراف فرکانس ناحیه دوم را تحت شرایط قبل مشاهده می کنیم.



شکل ۵-۸: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به دو ناحیه

از شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود انحراف فرکانس ناحیه دوم با توجه به شرایطی که بیان شد برای سیستم با پاسخ تقاضا تقریباً برابر 0.05 Hz می‌باشد درحالی‌که این مقدار برای سیستم متداول تقریباً برابر 0.08 Hz می‌باشد. هم‌چنین زمان نشست برای هر دو حالت تقریباً برابر ۱۷ ثانیه می‌باشد.

۵-۶ بررسی نقش α در LFC-DR

همانطور که پیش‌تر بیان شد در بعضی مواقع پتانسیل سمت مصرف‌کننده در دسترس شبکه نیست و در این حالت به منظور کنترل فرکانس ریز شبکه باید از رزروچرخان/غیرچرخان استفاده کرد. در همین راستا به منظور نزدیک کردن شبیه‌سازی‌ها به واقعیت از پارامتری به نام α استفاده شده است که عمل کنترلی را بین کنترل‌کننده کمکی و پاسخ تقاضا تقسیم خواهد کرد و به این ترتیب در هر شبیه‌سازی می‌توان مقدار مشخصی از پتانسیل پاسخ تقاضا را به منظور کنترل فرکانس - بار در

نظر گرفت.

با توجه به آنچه که بیان شد برای α داریم:

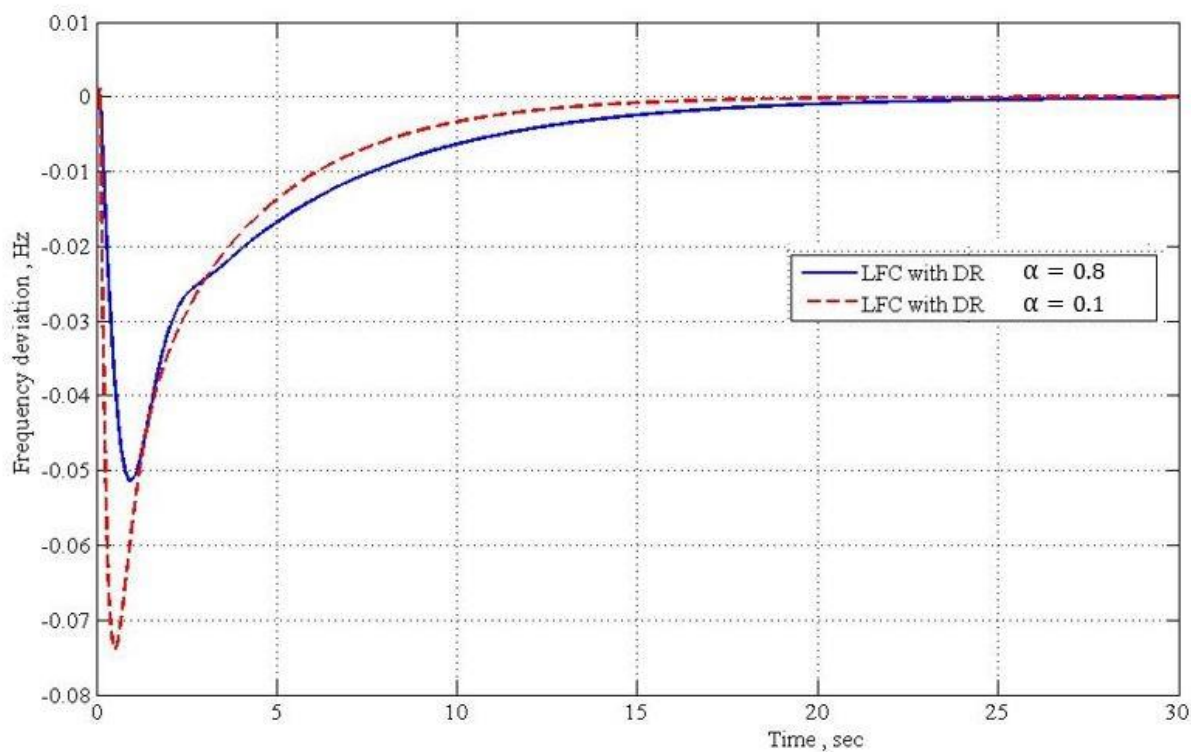
$$\begin{cases} \Delta P_i = \alpha_i \cdot \Delta P_{Li} \\ \Delta P_{DRi} = (1 - \alpha_i) \cdot \Delta P_{Li} \end{cases} \quad (1-5)$$

$i = \{1, 2\}$

بنا بر آنچه بیان شد، $0 < \alpha < 1$ می‌باشد و $\alpha = 1$ بدان معنا خواهد بود که تمام تنظیم انحراف فرکانس سیستم قدرت توسط تنظیم‌کننده‌ی متداول تأمین خواهد شد، مانند رزرو چرخان/ غیر چرخان و هم‌چنین $\alpha = 0$ بدان معنا است که تمام تنظیم فرکانس سیستم قدرت توسط پاسخ تقاضا تأمین خواهد شد.

حال می‌خواهیم با تغییر مقدار α از $0/1$ تا $0/8$ نقش آن را در LFC-DR مشاهده کنیم.

برای این منظور اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به‌اندازه $0/1$ پریونیت به دو ناحیه اعمال خواهیم کرد و انحراف فرکانس هر ناحیه و اثر α را مشاهده می‌کنیم.

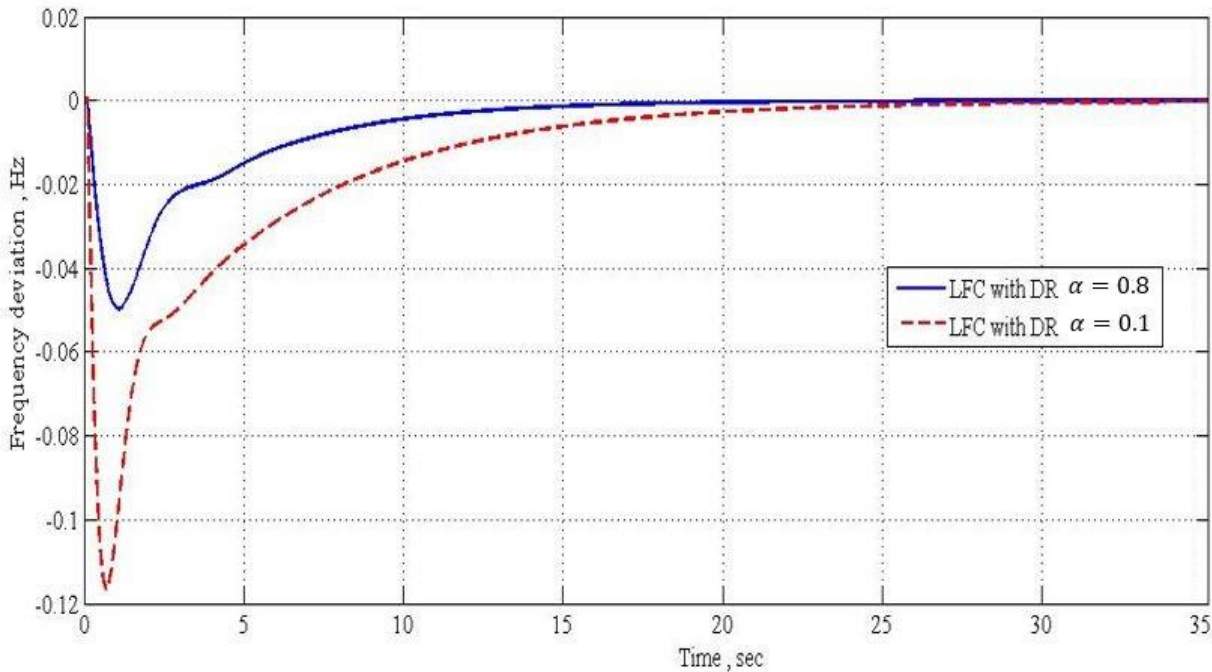


شکل ۵-۹: انحراف فرکانس در ناحیه اول با اعمال اغتشاش به دو ناحیه با توجه به α های متفاوت

همان طور که مشاهده می شود وقتی α برابر $0/8$ است انحراف فرکانس کمتری رخ داده است و این به دلیل تأثیر بیشتر پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار می باشد. در واقع وقتی α برابر $0/8$ است بدان معنا است که نقش پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار بیشتر شده است. و وقتی α برابر $0/1$ است تقریباً سیستم مانند سیستم متداول عمل می کند و نقش پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار بسیار کم رنگ شده است. این شبیه سازی به خوبی نقش پاسخ تقاضا را در کنترل فرکانس نشان می دهد چراکه در صورت همکاری بیشتر پاسخ تقاضا کنترل کننده به خوبی انحراف فرکانس را تصحیح کرده است و در صورت تأثیر کم پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس - بار انحراف فرکانس مقدار بیشتری داشته است.

حال به مانند شبیه‌سازی بالا انحراف فرکانس ناحیه دوم را تحت دو شرایط تأثیر پاسخ تقاضا برابر

۰/۸ و ۰/۱ مشاهده می‌کنیم.



شکل ۵-۱۰: انحراف فرکانس در ناحیه دوم با اعمال اغتشاش به دو ناحیه با توجه به α های متفاوت

با توجه به شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود به مانند ناحیه اول، در ناحیه دوم نیز وقتی تأثیر پاسخ تقاضا بیشتر شده است انحراف فرکانس کمتر شده است و برای تأثیر کمتر پاسخ تقاضا انحراف فرکانس بسیار بیشتر شده است.

۵-۷ تحلیل نتایج:

همانطور که از شکل‌ها و شبیه‌سازی‌ها مشخص است با استفاده از پاسخ تقاضا انحراف فرکانس در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا بسیار کمتر از سیستم قدرت متداول می‌باشد. در همین راستا هم‌چنین از متغیر کمکی به نام α استفاده شده است که به کمک آن عمل کنترلی بین پاسخ

تقاضا و کنترل کننده کمکی تقسیم شده است و به این ترتیب مقادیر مختلف در دسترس بودن پاسخ تقاضا و تاثیر آن بر کاهش انحراف فرکانس بررسی شده است که در نتیجه آن در صورت در دسترس بودن پاسخ تقاضا انحراف فرکانس کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

از دیگر نکات قابل به ذکر زمان نشست می‌باشد که در سیستم قدرت متداول و سیستم قدرت با پاسخ تقاضا دارای تفاوت چندانی نمی‌باشد و در واقع مشخص می‌شود که پاسخ تقاضا در بهبود زمان نشست تاثیر چندانی ندارد.

۵-۸ تعیین ضرایب وزنی در روش LQR:

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از روش الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات^۱، ماتریس‌های وزن‌دهی R و Q را بدست آوریم و سپس تاثیر آن را بر روی نتایج ارزیابی کنیم. برای این منظور ابتدا روش PSO را تشریح می‌کنیم

۵-۹ الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات:

الگوریتم PSO یک روش بهینه سازی است که بر پایه‌ی جمعیتی از پاسخ‌های اولیه عمل می‌کند. در این روش سیستم محاسبات خود را با پاسخ‌های اولیه شروع می‌کند و با حرکت دادن این پاسخ‌ها در طی تکرارهای متوالی به دنبال یافتن پاسخ بهینه می‌باشد. روش بهینه‌سازی PSO در طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرالی به منظور استفاده در کنترل فرکانس - بار در شبکه‌های هوشمند که از انرژی بادی و هم‌چنین انرژی باتری و خودروه‌های الکتریکی بهره‌مند بودند پیشنهاد شده است [۵۹]

الگوریتم PSO از طبیعت و رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان الهام گرفته شده است. فرض کنید دسته‌ای از پرندگان در محدوده‌ی مشخصی به دنبال غذا باشند و در این محدوده فقط یک تکه غذا باشد و پرندگان هم از محل دقیق این غذا خبر نداشته باشند، اما در هر لحظه فاصله خود با محل غذا

¹ Particle Swarm Optimaization (PSO)

را بدانند. در این حالت یک روش خوب برای دستیابی به محل غذا، استفاده از اطلاعات پرنده‌ای می‌باشد که به غذا نزدیک‌تر است. آنچه که به عنوان یک سناریو بیان شد، همان سناریوی به کار رفته در روش PSO می‌باشد.

تمام پاسخ‌های مسئله یک مقدار شایستگی^۱ دارند که این مقدار از تابع شایستگی مسئله بدست خواهد آمد. مقدار شایستگی در جهت و سرعت پاسخ‌های مسئله به سمت پاسخ بهینه تاثیر خواهد داشت.

در روش PSO تعدادی پاسخ اولیه وجود خواهد داشت که با تکرارهای متوالی سعی بر یافتن بهترین پاسخ می‌باشد و در هر تکرار دو مقدار بهترین مکان هر ذره که به آن Pbest می‌گویند و بهترین مکان کل ذرات که به آن Gbest می‌گویند مشخص می‌شود.

پس از یافتن مقادیر بهترین مکان هر ذره و بهترین مکان کل ذرات، سرعت حرکت هر ذره از معادله (۲-۵) و مکان بعدی هر ذره از معادله (۳-۵) بدست خواهد آمد.

$$V_{i,t+1} = w \cdot V_{i,t-1} + C_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - P_{i,t}) + C_2 \cdot r_2 \cdot (Gbest_i - P_{i,t}) \quad (۲-۵)$$

$$P_{t+1} = P_t + V_t \quad (۳-۵)$$

r_1, r_2 : عددی تصادفی بین صفر و یک

C_1, C_2 : ضرایب یادگیری که معمولاً برابر ۲ می‌باشند.

^۱ Fitness Value

- W : عامل اینرسی^۱ که بین جستجوی محلی و جستجوی سراسری فضای مسئله تعادل ایجاد می کند و مقداری برابر ۰/۴ تا ۰/۹ دارد.
- V_i : سرعت ذره در هر لحظه
- P_i : پاسخ ذره در هر لحظه
- Gbest : بهترین پاسخ کل ذرات
- Pbest : بهترین پاسخ هر ذره

۵-۱۰ استفاده از الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذرات برای LFC-DR

حال با توجه به آنچه که بیان شد مراحل الگوریتم PSO در این پایان نامه به صورت زیر می باشد:

✓ در کنترل بهینه به دنبال مینیمم سازی شاخصی به نام J هستیم که به صورت زیر بیان می شود:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (۴-۵)$$

بنابراین باید به دنبال یافتن المانهای ماتریس های R و Q باشیم که بر طبق معادله (۴-۵)، R ماتریس ضرایب وزن دهی به ورودی های سیستم می باشد و Q ماتریس ضرایب وزن دهی به متغیرهای سیستم می باشد. بنابراین تعداد ذرات در الگوریتم PSO برابر تعداد المانهای ماتریس های R و Q می باشد که برابر بیست و دو المان می باشد.

✓ تعداد پاسخ های تولید شده و در واقع جمعیت پاسخ های مسئله برابر ۷۰ پاسخ در نظر

¹ Inertia

گرفته شده است.

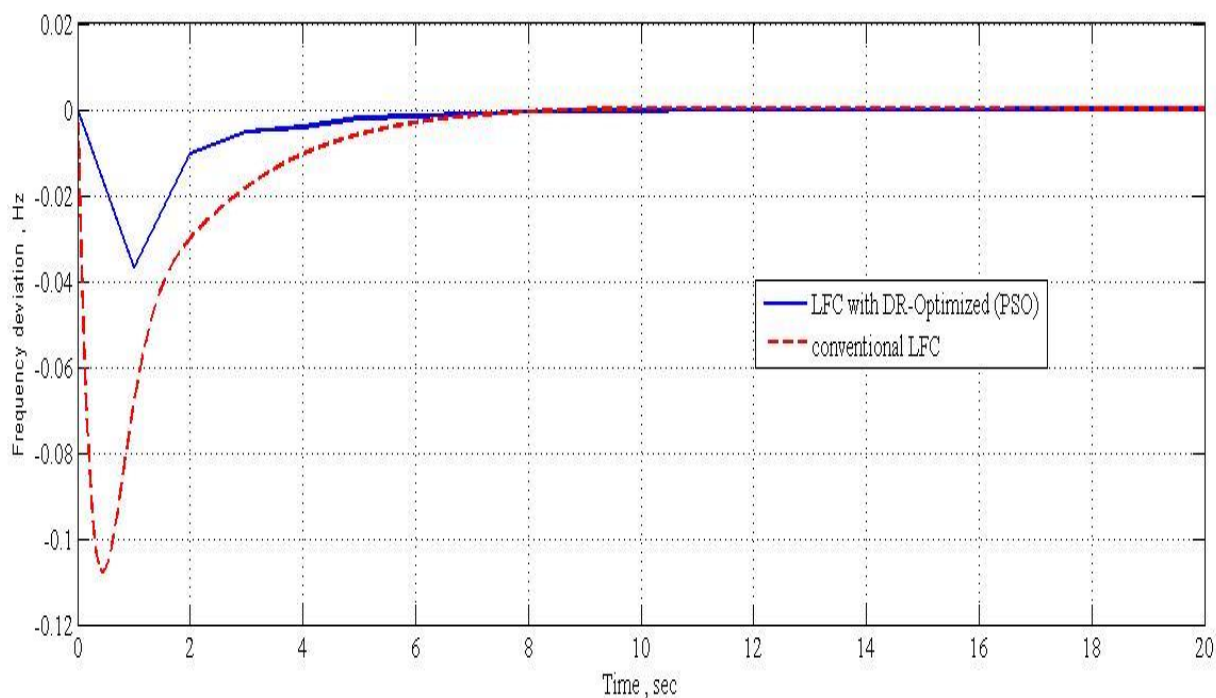
✓ تعداد تکرار مسئله برابر صد تکرار در نظر گرفته شده است.

✓ تابع هزینه در الگوریتم بیان شده (J') برابر سطح زیر منحنی انحراف فرکانس که همان خطای خروجی است می‌باشد و باید آن را مینیمم کنیم. در واقع در این پایان‌نامه هدف این می‌باشد که تغییرات فرکانس کمترین مقدار را داشته باشد، بنابراین سطح زیر منحنی انحراف فرکانس به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شده است که در هر لحظه سعی در مینیمم سازی آن خواهیم داشت.

$$J' = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (t \|E\|) dt \quad (5-5)$$

بنابراین در این قسمت با پیاده‌سازی معادله (۵-۲) و با قرار دادن پارامترهای مختلف معادله، متناسب با آنچه که بیان شد می‌توانیم انحراف فرکانس برای سیستم متداول و سیستم با پاسخ تقاضا و الگوریتم PSO را مشاهده کنیم

ابتدا با اعمال اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به‌اندازه ۰/۱ پریونیت به ناحیه اول، انحراف فرکانس هر ناحیه را به‌صورت جداگانه مشاهده می‌کنیم.



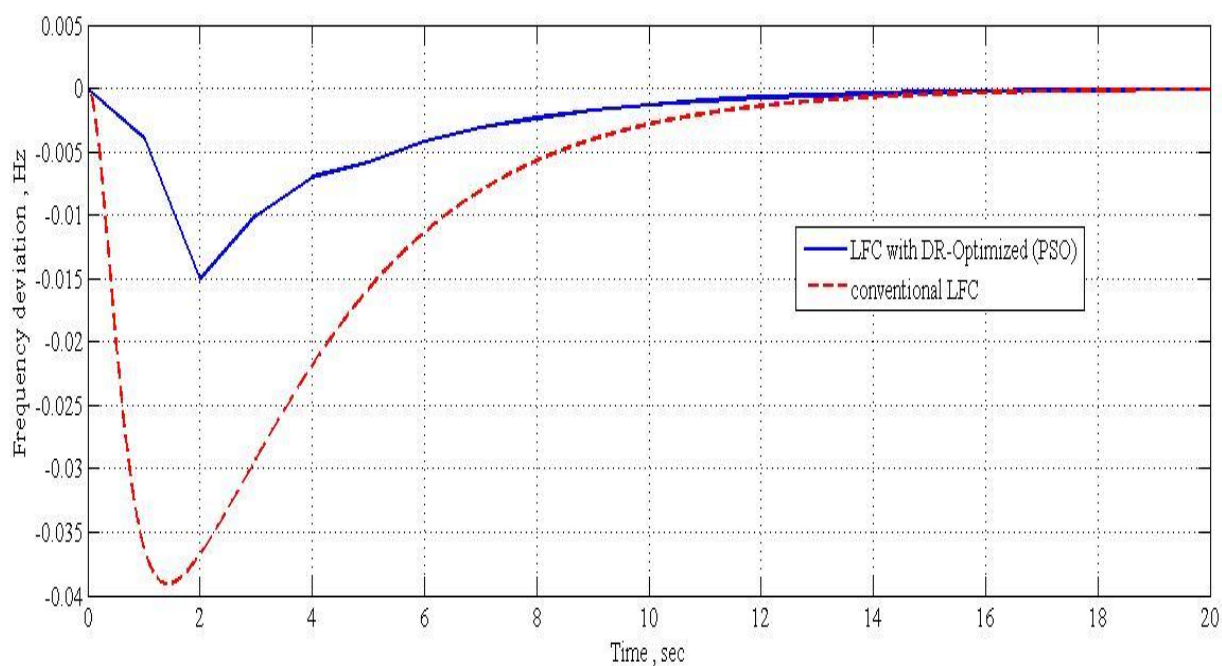
شکل ۵-۱۱: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه اول

همان‌طور که از شکل (۵-۱۱) دیده می‌شود در سیستمی که از پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی در کنترل فرکانس آن استفاده شده است انحراف فرکانس کمتری داشته و هم‌چنین زمان نشست آن کمتر شده است.

انحراف فرکانس سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی تقریباً برابر $0.37\% \text{ Hz}$ - و برای سیستم متداول تقریباً برابر 0.108 Hz - می‌باشد.

از نکات مهم مقایسه پاسخ تقاضا و پاسخ تقاضا به همراه بهینه‌سازی، زمان نشست می‌باشد که در پاسخ تقاضا به همراه بهینه‌سازی این زمان بسیار بهتر شده است و هم‌چنین انحراف فرکانس نیز کاهش داشته است.

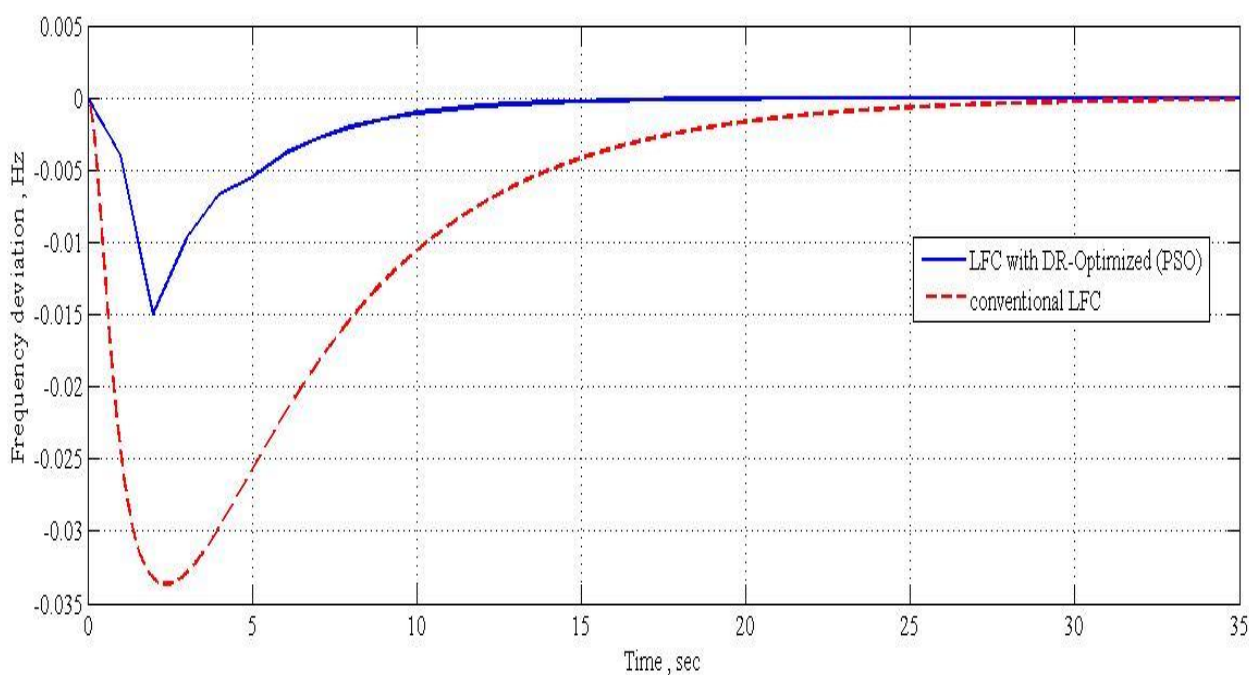
حال انحراف فرکانس ناحیه دوم را تحت شرایط ذکر شده مشاهده می‌کنیم.



شکل ۵-۱۲: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه اول

همان‌طور که از شکل (۵-۱۲) مشاهده می‌شود انحراف فرکانس در سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی بسیار کمتر از سیستم متداول است.

حال با اعمال اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به‌اندازه $0/1$ پریونیت به ناحیه دوم انحراف فرکانس ناحیه اول و دوم را مشاهده خواهیم کرد.

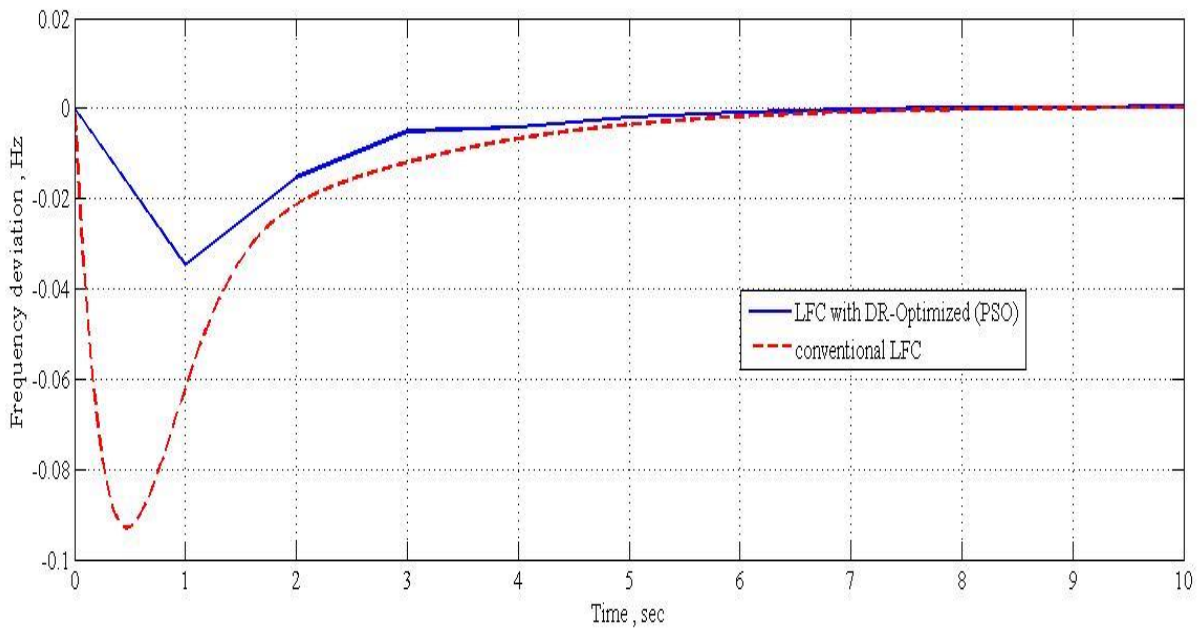


شکل ۵-۱۳: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم

از شکل (۵-۱۳) مشاهده می‌شود که انحراف فرکانس سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی بسیار کمتر از سیستم متداول است. انحراف فرکانس سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی تقریباً برابر 0.015 Hz و برای سیستم متداول این مقدار تقریباً برابر 0.034 Hz می‌باشد.

چون اغتشاش را به ناحیه دوم اعمال کرده‌ایم انحراف فرکانس ناحیه اول در هر دو حالت سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی و سیستم متداول کمتر از ناحیه دوم خواهد بود که این نکته در شکل (۵-۱۳) قابل مشاهده است. هم‌چنین با به کار بردن بهینه‌سازی زمان نشست کمی بهبود یافته است.

حال تحت شرایط ذکر شده انحراف فرکانس ناحیه دوم را مشاهده می‌کنیم.

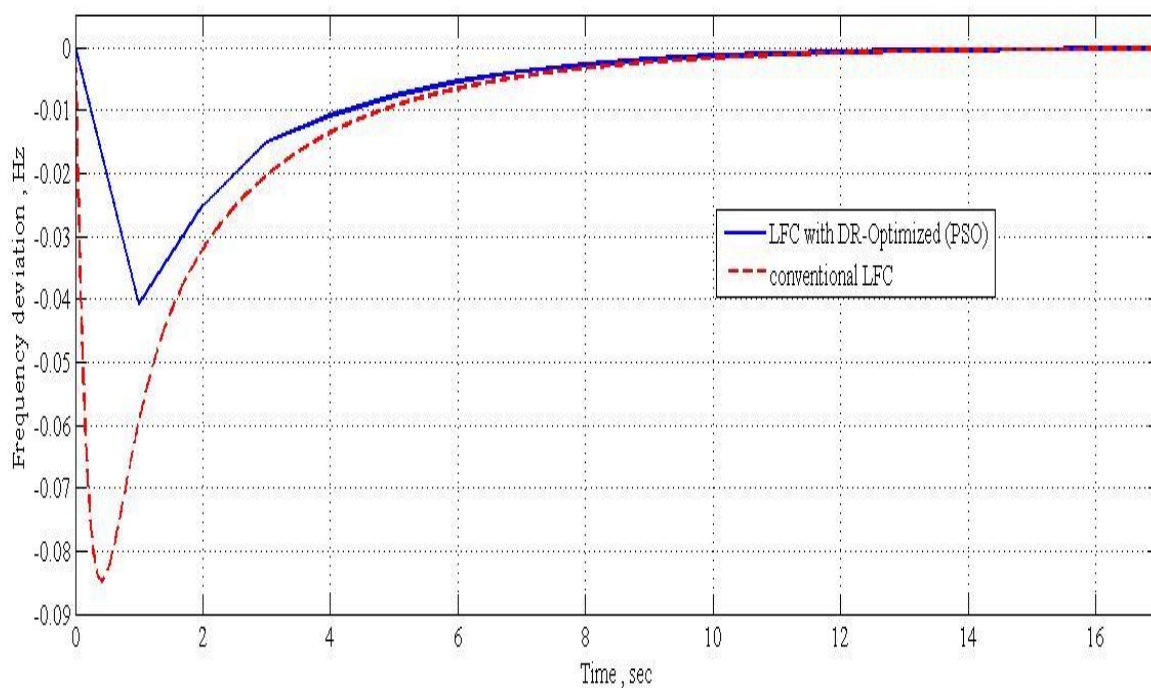


شکل ۵-۱۴: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به ناحیه دوم

به‌مانند آنچه پیش‌تر بیان شد از شکل (۵-۱۴) نیز مشاهده می‌شود که انحراف فرکانس سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی بسیار کمتر از سیستم متداول است. از جمله نکات قابل توجه زمان نشست است که با به کار بردن الگوریتم بهینه‌سازی این زمان نیز کمی بهبود یافته است.

حال در آخرین شبیه‌سازی‌ها با اعمال اغتشاشی به صورت افزایش پله‌ای بار و به‌اندازه ۰/۱ پریونیت به هر دو ناحیه انحراف فرکانس هر ناحیه را مشاهده خواهیم کرد.

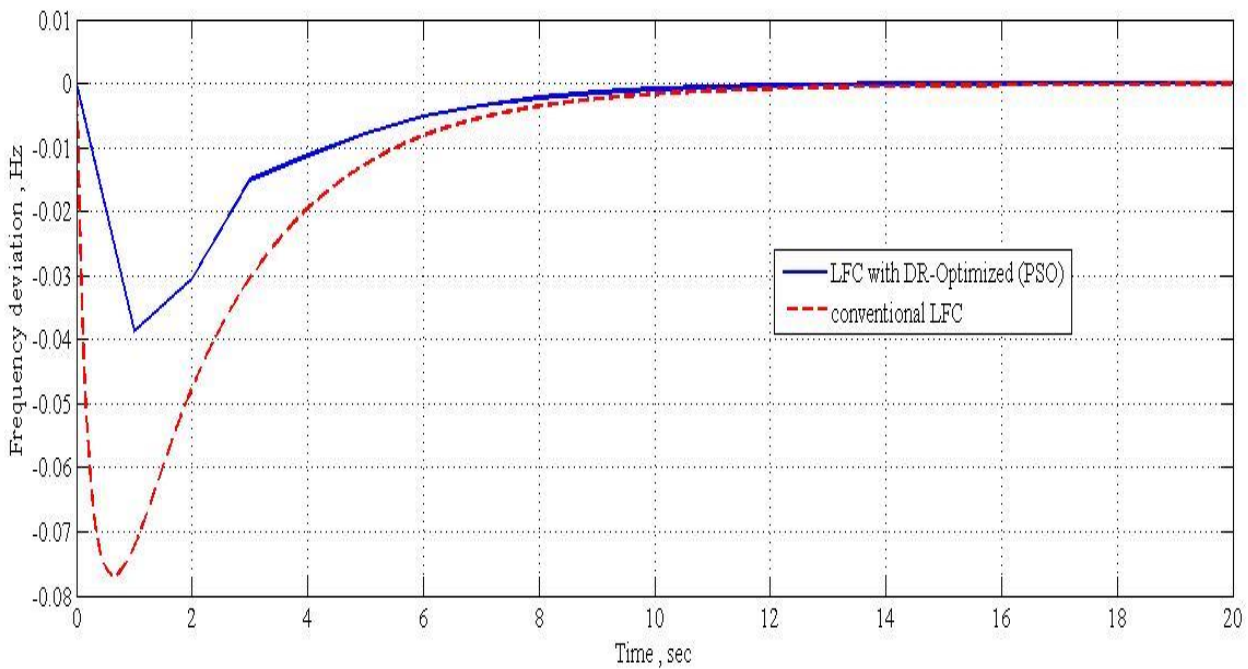
ابتدا انحراف فرکانس ناحیه اول را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۵-۱۵: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه اول به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه

از شکل (۵-۱۵) قابل مشاهده است که انحراف فرکانس ناحیه اول تحت اغتشاش وارد شده در سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی کمتر از سیستم متداول است.

حال انحراف فرکانس ناحیه دوم را تحت اغتشاش اعمال شده مشاهده می‌کنیم.



شکل ۵-۱۶: کنترل انحراف فرکانس در ناحیه دوم به کمک بهینه‌سازی در LFC-DR با اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه

همان‌طور که از شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود انحراف فرکانس در سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی بسیار کمتر از انحراف فرکانس در سیستم متداول است. انحراف فرکانس ناحیه دوم در اثر اعمال اغتشاش به هر دو ناحیه برای سیستم با پاسخ تقاضا و بهینه‌سازی تقریباً برابر 0.037 Hz می‌باشد در حالی این مقدار برای سیستم متداول تقریباً برابر 0.078 Hz می‌باشد.

۵-۱۱ تحلیل نتایج:

مشاهده می‌شود با کمک الگوریتم بهینه‌سازی و استفاده از پاسخ تقاضا انحراف فرکانس در سیستم قدرت با پاسخ تقاضا کمتر از انحراف فرکانس سیستم قدرت متداول می‌باشد. هم‌چنین با مقایسه سیستم قدرت با پاسخ تقاضا با الگوریتم بهینه‌سازی و بدون آن مشخص می‌شود که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انحراف فرکانس کاهش یافته است و در این راستا کاهش انحراف

فرکانس بهبود نسبی داشته است. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد حتی با به کار بردن الگوریتم بهینه سازی زمان نشست سیستم قدرت با پاسخ تقاضا نسبت به سیستم قدرت متداول بهبود نیافته است و این مشاهدات این نکته‌ی را تایید می‌کند که پاسخ تقاضا باعث بهبود زمان نشست در انحراف فرکانس نخواهد شد بلکه فقط باعث کاهش انحراف فرکانس می‌شود.

۵-۱۲ جمع‌بندی

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل فرکانس - بار در سیستم قدرت برای دو حالت سیستم قدرت متداول و سیستم قدرت اصلاح‌شده به کمک پاسخ تقاضا بررسی شد. همچنین حالت‌های مختلفی مانند اعمال اغتشاش به یک ناحیه و مشاهده انحراف فرکانس هر ناحیه به صورت جداگانه بررسی شد و همچنین اعمال اغتشاش به دو ناحیه و مشاهده انحراف فرکانس هر ناحیه بررسی شد. در این فصل هم‌چنین از الگوریتم PSO برای استفاده در LFC-DR به کار گرفته شد و نتایج حاصل از آن مشاهده شد.

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

کنترل فرکانس - بار برای ایجاد پایداری فرکانس در سیستم قدرت بسیار حائز اهمیت است. امروزه با کمک شبکه‌های هوشمند و ادوات پیشرفته‌ای که از طریق این شبکه‌ها قابل استفاده می‌باشد شرایطی به وجود آمده است که به کمک آن می‌توان با صرف هزینه بسیار کم به بهبود عملکرد شبکه در راستای پایداری فرکانس و ولتاژ کمک کرد. از جمله روش‌هایی که به کمک شبکه‌های هوشمند قابل پیاده‌سازی می‌باشد و می‌تواند به کنترل فرکانس - بار کمک کند استفاده از ظرفیت سمت مصرف‌کننده خواهد بود. از این ظرفیت بانام پاسخ تقاضا یاد می‌کنند.

در این پایان‌نامه سعی شده است تا مدلی برای بررسی اثرات پاسخ تقاضا در کنترل فرکانس ارائه شود تا بدین ترتیب بتوان به کارایی یا عدم کارایی روش بیان‌شده پی برد. در واقع در این پایان‌نامه مدل پاسخ تقاضا به مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای اضافه شده است و نهایتاً مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا استخراج گردیده است. به کمک مدل پیشنهاد شده، مدل فضای حالت سیستم قدرت دو ناحیه‌ای با پاسخ تقاضا استخراج شده است. هم‌چنین خطای حالت دائمی سیستم قدرت با پاسخ تقاضا نیز بررسی شده است. در این میان در مدل پیشنهاد شده المانهای غیر خطی وجود داشت که به کمک تقریب پادِ خطی سازی شدند که در نتیجه آن مدل پیشنهاد شده به صورت خطی ارائه گردید. در ادامه سعی شد تا معادلات حاکم بر سیستم ارائه‌شده استخراج شود و نهایتاً با حل معادله دیفرانسیل سیستم خروجی‌های سیستم که همان انحراف فرکانس می‌باشد را مشاهده کنیم. هم‌چنین برای کنترل سیستم پیشنهاد شده از روش کنترل بهینه و الگوریتم PSO استفاده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در صورت اعمال اغتشاش به مدل سیستم قدرت انحراف فرکانس هر ناحیه از سیستم قدرت اصلاح‌شده به کمک LFC-DR کمتر از انحراف فرکانس سیستم قدرت متداول می‌باشد. و در واقع به این ترتیب می‌توان به کارایی روش مذکور پی برد و توانایی آن را در کاهش انحراف فرکانس سیستم قدرت مشاهده کرد.

۶-۲ پیشنهادها

در این پایان نامه استفاده از روش پاسخ تقاضا به منظور بهبود کنترل فرکانس - بار مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور کارایی بیشتر و اجرایی شدن روش مذکور می توان موارد زیر را پیشنهاد کرد:

۱. استفاده از روش های کنترلی مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر به منظور انتخاب بهترین کنترل کننده متناسب با شرایط هر ناحیه

۲. استفاده از الگوریتم های مناسب برای کنترل وسایل مشترکان به منظور کاهش دفعات خاموش و روشن شدن وسایل مشترکان

٧ - مراجع

- [1] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 236-242, 2010.
- [2] F. E. R. Commission, "Assessment of demand response and advanced metering," 2008.
- [3] H. Bevrani, *Robust power system frequency control* vol. 85: Springer, 2009.
- [4] C. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 673-681, 2005.
- [5] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.
- [6] J. Aghaei and M.-I. Alizadeh, "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 64-72, 2013.
- [7] F. Pilo, G. Pisano, and G. Soma, "Advanced DMS to manage active distribution networks," in *PowerTech, IEEE Bucharest*, pp. 1-8 , 2009.
- [8] I. DSM, "Worldwide Survey of Network-driven Demand-side Management Projects," ed: Revised, 2008.
- [9] D. Kathan, C. Daly, E. Eversole, M. Farinella, J. Gadani, R. Irwin, *et al.*, "National action plan on demand response," *The Federal Energy Regulatory Commission Staff, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, Tech. Rep. AD09-10*, 2010

- [10] G. C. Heffner, C. Goldman, and M. M. Moezzi, "Innovative approaches to verifying demand response of water heater load control," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 388-397, 2006.
- [11] J. Kondoh, N. Lu, and D. J. Hammerstrom, "An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service," in *Power and Energy Society General Meeting IEEE*, pp. 1-8, 2011.
- [12] U. DoE, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. A report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005," 2006.
- [13] F. E. R. Commission, "Assessment of Demand Response and Advanced Metering: Federal Energy Regulatory Commission," Staff Report, Docket Number AD-06-2-000, 2008.
- [14] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 426-435, 2010.
- [15] H. Arasteh, M. P. Moghaddam, M. Sheikh-El-Eslami, and A. Abdollahi, "Integrating commercial demand response resources with unit commitment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 51, pp. 153-161, 2013.
- [16] E. Bloustein, "Assessment of customer response to real time pricing," *Rutgers-The State University of New Jersey, Tech. Rep*, 2005.
- [17] D. Violette, "Development of a Comprehensive/Integrated DR Value Framework," *California Energy Commission, PIER DRRC. LBNL*, vol. 60130, 2006.
- [18] Z. Xu, J. Ostergaard, M. Togeby, and C. Marcus-Moller, "Design and modelling of thermostatically controlled loads as frequency controlled reserve," in *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, pp. 1-6, 2007.

- [19] F. C. Schweppe, R. D. Tabors, J. L. Kirtley Jr, H. R. Outhred, F. H. Pickel, and A. J. Cox, "Homeostatic utility control," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 1151-1163, 1980.
- [20] J. Short, D. G. Infield, and L. L. Freris, "Stabilization of grid frequency through dynamic demand control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1284-1293, 2007.
- [21] A. Molina-García, F. Bouffard, and D. S. Kirschen, "Decentralized demand-side contribution to primary frequency control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 411-419, 2011.
- [22] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control* vol. 7: McGraw-hill New York, 1994.
- [23] M. H. Albadi and E. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric power systems research*, vol. 78, pp. 1989-1996, 2008.
- [24] A. Abdollahi, M. P. Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 12-25, 2012.
- [25] D. Kirschen and G. Strbac, *Front Matter: Wiley Online Library*, 2004.
- [26] I. Kocaarslan and E. Çam, "Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, pp. 542-549, 2005.
- [27] E. Yeşil, M. Güzelkaya, and I. Eksin, "Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 377-390, 2004.

[۲۸] امیر احمدی، محمد تقی عاملی، مجتبی شیوایی، "کنترل بار-فرکانس سیستمهای قدرت دو ناحیه ای با در نظر گرفتن مقدار بهینه ضریب بایاس به کمک الگوریتم جستجوی همنوایی." بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۹۲.

- [29] F. Díaz-González, M. Hau, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 68, pp. 313-326, 2015.
- [30] K. Dehghanpour and S. Afsharnia, "Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1267-1276, 2015.
- [31] V. R. Pandi, A. Al-Hinai, and A. Feliachi, "Coordinated control of distributed energy resources to support load frequency control," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 918-928, 2015.
- [32] M. R. Khalghani, M. H. Khooban, E. Mahboubi-Moghaddam, N. Vafamand, and M. Goodarzi, "A self-tuning load frequency control strategy for microgrids: Human brain emotional learning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 311-319, 2016.
- [33] A. Morched, P. Kar, G. Rogers, and G. Morison, "Long-term dynamics simulation: Modeling requirements," Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Ontario Hydro, Toronto, ON (Canada)1989.
- [34] C. W. Taylor, "WACS-wide-area stability and voltage control system: R&D and on-line demonstration ",in *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, p. 4 Vol. 1, 2004.
- [35] T. Torizuka and H. Tanaka, "An outline of power system technologies in Japan," *Electric Power Systems Research*, vol. 44, pp. 1-5, 1998.
- [36] A. Ghafouri, J. Milimonfared, and G. Gharehpetian, "Coordinated Control of Distributed Energy Resources and Conventional Power Plants for Frequency Control of Power Systems," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 104-114, 2015.
- [37] V. V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1260-1266, 2006.

- [38] J. Paserba, J. Sanchez-Gasca, P. Kundur, E. Larsen, and C. Concordia, "Small Signal Stability and Power System Oscillations," *Power System Stability and Control*, 2007.
- [39] B. J. Kirby, J. Dyer, C. Martinez, R. A. Shoureshi, R. Guttromson, and J. Dagle, *Frequency control concerns in the North American electric power system*: United States. Department of Energy, 2003.
- [40] D. N. M. Abadi and M. H. Khooban, "Design of optimal Mamdani-type fuzzy controller for nonholonomic wheeled mobile robots," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 27, pp. 92-100, 2015.
- [41] M. H. Khooban and T. Niknam, "A new intelligent online fuzzy tuning approach for multi-area load frequency control: Self Adaptive Modified Bat Algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 71, pp. 254-261, 2015.
- [42] M. H. Khooban, D. N. M. Abadi, A. Alfi, and M. Siahi", "Swarm optimization tuned Mamdani fuzzy controller for diabetes delayed model," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 21, pp. 2110-2126, 2013.
- [43] M. R. Soltanpour, M. H. Khooban, and M. Soltani, "Robust fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator in joint space and in presence of uncertainties," *Robotica*, vol. 32, pp. 433-446, 2014.
- [44] M. Shamsi-Nejad, M. R. Khalghani, and M. H. Khooban, "Determination of optimum hysteresis bandwidth to improve electric machines operation," *Journal of Power Technologies*, vol. 93, pp. 207-215, 2013.
- [45] M. Shahsadeghi, M. H. Khooban, and T. Niknam, "A robust and simple optimal type II fuzzy sliding mode control strategy for a class of nonlinear chaotic systems," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, vol. 27, pp. 1849-1859, 2014.
- [46] M. H. Khooban, D. Nazari Maryam Abadi, A. Alfi, and M. Siahi, "Optimal Type-2 fuzzy controller for HVAC systems," *AUTOMATIKA: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, vol. 55, pp. 69-78, 2014.

- [47] M. H. Khooban and T. Niknam, "A new and robust control strategy for a class of nonlinear power systems: Adaptive general type-II fuzzy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2015.
- [48] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an ac microgrid: online PSO-based fuzzy tuning approach," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1935-1944, 2012.
- [49] A. J. Wood and B. Wollenberg, "Generation, Operation, and Control," ed: John Wiley & Sone, Inc, 1996.
- [50] H. Saadat, *Power system analysis*: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [51] S.A. Pourmousavi and M. H. Nehrir, "Introducing Dynamic Demand Response in the LFC Model," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 1562-1572, 2014.
- [52] D. Jay and K. Swarup, "Frequency restoration using dynamic demand control under smart grid environment," in *Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India), IEEE PES*, pp 311-315, 2011.
- [53] H. Huang and F. Li, "Sensitivity analysis of load-damping characteristic in power system frequency regulation," *Power Systems, IEEE Transactions on* ,vol. 28, pp. 1324-1335, 2013.
- [54] R. C. Dorf and R. H. Bishop, "Modern control systems," 1998.
- [55] G. H. Golub and C. F. Van Loan, "matrix computations, 3rd," ed: Johns Hopkins Univ Press, 1996.
- [56] P. Kumar and D. P. Kothari, "Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 346-357, 2005.
- [57] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, "Feedback control of dynamics systems," *Addison-Wesley, Reading, MA*, 1994.
- [58] D. E. Kirk, *Optimal control theory: an introduction*: Courier Corporation, 2012.

- [59] S. Vachirasricirikul and I. Ngamroo, "Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 371-380, 2014.

Abstract

In the power system the frequency can be controlled by adjusting the generator outputs in response to load changes. At the present, due to high penetration of renewable energy and low efficiency of traditional generator in the microgrid, the load participation in the frequency control has received many attentions from technical and economic aspects. In the power system the balance between generation and load is important and the mismatch between generation and load leads to instability in power system.

In this thesis, demand response and consumers potential are used in load- frequency control. Therefore, presenting a model for using the demand response in load frequency control is important. In this thesis, a model is developed by which the effect of load response in load frequency control is considered. This helps in adjusting balance between load and generation. To do this the power system equations in two cases with and without load response are extracted. Then, after solving these equations the effect of load response in the load frequency control are observed. In this thesis the optimal control is used to have better performance in the frequency control. The weighting matrices in the objective function are determined using the PSO, algorithm. The results of the simulation show that using the load response in the load frequency control leads to decrease in the frequency deviation.

Keywords: Load Frequency Control, Demand Response, Smart Grid, Optimal control, two Area Power System Model



Shahrood University of Technology

Department of Electrical and Robotic Engineering

Frequency Control in Microgrids Considering Load Response

A thesis submitted for Master of Science in Electrical Engineering

Seyed Milad Alizadeh

Supervisor

Dr. Mahdi Banejad

Advisor

Dr. Ali Akbarzadeh Kalat

January 2016