بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت

بهینه‌سازی غیرخطی پاسخ زمانی برای تنظیم کنترل فرکانس بار

استاد راهنما:

دکتر امین خدابخشیان

استاد مشاور:

دکتر رحمت الله هوشمند

پژوهشگر:

مصطفی عزت‌آبادی پور

اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت آقای مصطفی عزت‌آبادی پور

تحت عنوان

بهینه سازی غیرخطی پاسخ زمانی برای تنظیم کنترل فرکانس بار

در تاریخ ۸۸/۱۲/۵ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر امین خدابخشیان با مرتبه ی علمی دانشیار امضا

۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر رحمت الله هوشمند با مرتبه ی علمی دانشیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر محمد عطایی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر سید عباس طاهر با مرتبه ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه

درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان

در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم .

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم

چراکه این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن

را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان....

تشکر و قدردانی

حال که به لطف و کرم خدای، این مجال به سرمنزل رسیده است با دلی سرشار از خضوع و خشوع و مهر و عشق نسبت به ذات اقدس خداوندی، وی را شکر و سپاس می‌گویم که شایستگی تحصیل و پوییدن راه علم و تحقیق را به من عطا فرمود. همچنین بر خود فرض می‌دانم مراتب تقدیر و قدردانی خالصانه و صمیمانه خود را تقدیم عزیزانی نمایم که بدون پشتیبانی و مساعدت های ایشان طی این طریق بسیار بعید و دشوار می‌نمود:

- استاد راهنمای بزرگوارم دکتر میلان خانبابائیان که پشتوانه غنی علمی، معنوی و اخلاق ایشان توشه ارزشمندی بود که تمرین این راه گردید. از ایشان بی‌نهایت سپاسگزارم چرا که در مدت این دوره و همچنین در زمان تحصیلم و در همه حال درس های ارزشمند بسیاری از ایشان آموخته ام. امیدوارم که شایستگی حفظ سمت شاگردی ایشان را برای همیشه داشته باشم.
- جناب آقای دکتر رحمت الله هوشمند در سمت استاد مشاور که به حق استادی دانشمند و متواضع می باشند و به ویژه منش بزرگوارانه ایشان کم نظیر و ستودنی است.
- اساتید محترم داور و ناظر که نظرات ارزشمندشان بر غنای این پژوهش افزود.
- خانواده عزیزم که کمک های بی دریغشان پیمودن این راه را برمن هموار ساخت.

چکیده:

کنترل فرکانس بار فرآیند کنترلی می‌باشد که توسط آن توان تولیدی و توان مصرفی در حالت تعادل نگهداشته می‌شوند. هدف اصلی کنترل فرکانس بار برگرداندن فرکانس سیستم و توان عبوری از خطوط ارتباطی به مقادیر نامی و از پیش تعیین شده خود می‌باشد. با پیشرفت صنعت و افزایش پیچیدگی‌های سیستم‌های قدرت، مسئله کنترل فرکانس بار از اهمیت زیادی برخوردار شده است، به گونه‌ای که در سالهای گذشته، توجه زیادی روی مسئله طراحی کنترل فرکانس بار در سیستم‌های قدرت و تکنیک‌های مختلف طراحی آن، شده است. در اکثر تحقیقات پیشین با فرض تغییرات اندک سیستم در موقع تغییرات بار، فرآیند طراحی بر روی سیستم خطی شده انجام می‌شد. اما سیستم‌های قدرت ذاتاً غیرخطی می‌باشند. ضمناً لازم است که اندازه سیگنال کنترل در حدود مشخصی قرار گیرد، با در نظر گرفتن این اصل و حضور عواملی مانند محدودیت نرخ تولید و باند مرده، طراحی کنترل فرکانس بار به صورت غیرخطی در می‌آیدکه این موضوع در بسیاری از تحقیقات پیشین مد نظر قرار نگرفته است.

در این پایان نامه، از یک روش جدید بهینه سازی غیرخطی بنام برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی برای طراحی کنترل فرکانس بار استفاده شده است. در این روش می‌توان از مدل سیستم با قیود غیرخطی مورد نیاز استفاده کرد و سیگنال‌های تغییرات فرکانس و تغییرات توان جاری در خطوط ارتباطی را بطور مستقیم در فرآیند طراحی بکار برد. شبیه‌سازی بر روی سیستم‌های غیرخطی یک و دو ناحیه، در حضور محدودیت نرخ تولید انجام شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی و الگوریتم PSO، کارایی بهتر روش پیشنهادی در طراحی کنترل فرکانس بار مشخص می‌شود.

واژگان کلیدی: کنترل فرکانس بار، محدودیت نرخ تولید، بهینه سازی غیرخطی، روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کنترل فرکانس بار

۱-۱- مقدمه.. ۱
۱-۲- روش‌های سنتی.. ۳
۱-۲-۱- کنترل‌کننده انتگرالگیر ۴
۱-۲-۲- کنترل بهینه ۵
۱-۳- کنترل تطبیقی... ۷
۱-۳-۱- سیستم‌های ساختار متغیر ۸
۱-۳-۲- سیستم‌های خودتنظیم... ۱۰
۱-۴- کنترل مقاوم ۱۲
۱-۵- روش‌های هوشمند.. ۱۳
۱-۵-۱- الگوریتم ژنتیک ۱۳
۱-۵-۲- الگوریتم حرکت دسته جمعی پرندگان ۱۴
۱-۵-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۵
۱-۵-۴- نظریه مجموعه فازی.. ۱۷

فصل دوم مدلسازی کنترل فرکانس بار

۲-۱- مقدمه.. ۱۹
۲-۲- سیستم کنترل فرکانس بار تک ناحیه ۲۰
۲-۲-۱- سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۲۱
۲-۲-۲- مدل خطی سیستم کنترل فرکانس بار تک ناحیه ۲۴
۲-۳- سیستم چندماشینه ۲۵
۲-۳-۱- کنترل فرکانس بار چند ناحیه ۲۵
۲-۳-۲- مدل خطی سیستم کنترل فرکانس بار چند ناحیه ۲۷
۲-۴- قیود مسئله کنترل فرکانس بار ۲۹
۲-۴-۱-مقدمه ۲۹
۲-۴-۲-قید نرخ تولید یا GRC.. ۳۱

عنوان **صفحه**

۲-۴-۳- قیود بر روی گاورنر ۳۱

۲-۴-۴- وجود باند مرده ۳۲

۲-۵-کنترل فرکانس بار در فضای تجدید ساختار شده ۳۲

فصل سوم الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی

۳-۱- مقدمه.. ۳۸

۳-۱-۱- حل مسئله بهینه سازی مقید ۳۸

۳-۱-۲- حل مسئله نمونه با استفاده از روش SQP ۴۰

۳-۱-۳- انتخاب الگوریتم در حل مسئله بهینه سازی مقید ۴۲

۳-۲- پیاده سازی برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی ۴۵

۳-۲-۱- زیر مسئله برنامه‌ریزی درجه دوم ۴۶

۳-۲-۲- بهنگام سازی هسین ۴۸

۳-۲-۳- حل مسأله برنامه‌ریزی درجه دوم.. ۴۹

۳-۲-۴- تابع کاهشی و معیار همگرایی ۵۱

۳-۳- روش SQP در جعبه ابزار بهینه سازی ۵۲

۳-۳-۱- مقدمه ۵۲

۳-۳-۲- جعبه ابزار بهینه‌سازی ۵۳

۳-۳-۳- نحوه پیاده سازی تابع به منظور حل مسئله ۵۳

فصل چهارم نتایج شبیه سازی

۴-۱- مقدمه.. ۵۶

۴-۲- تابع هدف.. ۵۶

۴-۳- طراحی بر روی سیستم‌های خطی شده.. ۵۸

۴-۳-۱- سیستم تک ناحیه.. ۵۸

۴-۳-۲- سیستم دو ناحیه ۶۳

۴-۴- طراحی کنترل فرکانس بار با استفاده از روش SQP در حوزه زمان ۷۳

۴-۴-۱ سیستم تک ناحیه ۷۳

عنوان **صفحه**

۴-۴-۲- طراحی کنترل فرکانس بار برای سیستم چندماشینه ۷۸

فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهاد ادامه کار

۵-۱- نتیجه گیری ۹۳

۵-۲- پیشنهاد ادامه کار ۹۴

منابع و مآخذ ۹۵

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱) : کنترل فرکانس بار با استفاده از کنترلر PI ۴
شکل (۱-۲) : کنترل‌کننده ساختار متغیر [۲۴] ۸
شکل (۱-۳) : نمودار بلوکی رگولاتور خودتنظیم ۱۰
شکل (۱-۴) : مدل یک پرسپترون چند لایه ۱۶
شکل (۱-۵) : مدل ساده شده یک نرون ۱۶
شکل (۲-۱) : نمایش ساده حلقه‌های LFC و AVR یک ژنراتور ۱۹
شکل (۲-۲) : کنترل سرعت در یک واحد نیروگاهی مجزا ۲۱
شکل (۲-۳) : شماتیک سیستم قدرت تک ماشینه ۲۱
شکل (۲-۴): بلوک دیاگرام سیستم کنترل فرکانس بار ۲۵
شکل (۲-۵) : سیستم دو ناحیه ۲۷
شکل (۲-۶) : مدل الکتریکی سیستم دو ناحیه ۲۷
شکل (۲-۷) : بلوک دیاگرام سیستم کنترل فرکانس بار دو ناحیه ۲۹
شکل (۲-۸) : نمایش بلوکی عناصر غیرخطی سیستم کنترل فرکانس بار ۳۰
شکل (۲-۹) : مدل غیرخطی توربین با در نظر گرفتن GRC ۳۱
شکل (۲-۱۰) : بلوک دیاگرام سیستم تک ناحیه با درنظر گرفتن محدود کننده‌های گاورنر ۳۱
شکل (۲-۱۱) : ساختار بازار برق ۳۳
شکل (۲-۱۲) : نمای کلی سیستم دو ناحیه در فضای رقابتی ۳۴
شکل (۲-۱۳) : ماتریس مشارکت توزیع یک سیستم دو ناحیهای ۳۴
شکل (۳-۱): الگوریتم روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی ۳۹
شکل (۴- ۱) : منحنی‌های فرکانس حقیقی و ایده ال ۵۶
شکل (۴-۲) : تغییرات فرکانس سیستم کنترل شده با کنترلر PI ۵۹
شکل (۴- ۳) : تغییرات فرکانس سیستم کنترل شده با کنترلر PID ۵۹
شکل (۴- ۴): تغییرات فرکانس سیستم با استفاده از کنترل¬کننده‌های PI و PID ۶۰
شکل (۴- ۵) : مدل غیرخطی توربین با در نظر گرفتن GRC ۶۰
شکل (۴-۶) : تغییرات فرکانس سیستم با درنظر گرفتن GRC برای کنترلر PI ۶۱
شکل (۴-۷) : تغییرات فرکانس سیستم با درنظر گرفتن GRC برای کنترلر PID ۶۱

عنوان **صفحه**

شکل (۴-۸) : تغییرات فرکانس سیستم با در نظر گرفتن GRC برای کنترل¬کننده‌های PI و PID...... ۶۲
شکل (۴- ۹) : تغییرات فرکانس ناحیه اول ۶۴
شکل (۴- ۱۰) : تغییرات فرکانس ناحیه دوم ۶۴
شکل (۴- ۱۱) : تغییرات توان انتقالی از خط ارتباطی ۶۵
شکل (۴-۱۲) : تغییرات فرکانس ناحیه اول با استفاده از کنترلکننده PID ۶۶
شکل (۴-۱۳) : تغییرات فرکانس ناحیه دوم با استفاده از کنترلکننده PID................................ ۶۶
شکل (۴- ۱۴) : تغییرات توان انتقالی با استفاده از کنترلکننده PID ۶۷
شکل (۴- ۱۵) : تغییرات فرکانس ناحیه اول با استفاده از کنترلکنندههای PI و PID.................... ۶۷
شکل (۴- ۱۴) : تغییرات فرکانس ناحیه اول و با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت ۶۹
شکل (۴- ۱۵) : تغییرات فرکانس ناحیه دوم و با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت................. ۶۹
شکل (۴- ۱۶) : تغییرات توان انتقالی و با استفاده از کنترل‌کننده فیدبک حالت ۷۰
شکل (۴- ۱۷) : تغییرات فرکانس ناحیه اول برای کنترل‌کننده‌های PID و فیدبک حالت............... ۷۱
شکل (۴- ۱۸) : تغییرات فرکانس ناحیه اول با در نظر گرفتن GRC ۷۲
شکل (۴- ۱۹) : تغییرات فرکانس ناحیه دوم با در نظر گرفتن GRC... ۷۲
شکل (۴- ۲۰) : تغییرات توان انتقالی از خط ارتباطی با در نظر گرفتن GRC ۷۳
شکل (۴- ۲۱) : شماتیک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۷۴
شکل (۴- ۲۲) : تغییرات فرکانس سیستم SMIB.. ۷۶
شکل (۴- ۲۳) : تغییرات فرکانس سیستم SMIB.. ۷۶
شکل (۴- ۲۴) : تغییرات فرکانس سیستم با درنظر گرفتن GRC برای کنترلر PI........................ ۷۷
شکل (۴- ۲۵) : تغییرات فرکانس سیستم با درنظر گرفتن GRC برای کنترلر PID...................... ۷۸
شکل (۴- ۲۶) : دیاگرام تک خطی سیستم دو ناحیه مورد مطالعه ۷۹
شکل (۴- ۲۷) : تغییرات فرکانس ژنراتور اول در سیستم دارای کنترلر PI ۸۰
شکل (۴- ۲۸) : تغییرات فرکانس ژنراتور دوم در سیستم دارای کنترلر PI................................. ۸۱
شکل (۴- ۲۹) : تغییرات فرکانس ژنراتور سوم در سیستم دارای کنترلر PI ۸۱
شکل (۴- ۳۰) : تغییرات فرکانس ژنراتور چهارم در سیستم دارای کنترلر PI ۸۲
شکل (۴- ۳۱) : تغییرات توان عبوری از خط ارتباطی برای سیستم دارای کنترلر PI ۸۲
شکل (۴- ۳۲) : تغییرات فرکانس ژنراتور اول در سیستم دارای کنترلر PID ۸۳

عنوان **صفحه**

شکل (۴- ۳۳) : تغییرات فرکانس ژنراتور دوم در سیستم دارای کنترلر PID ۸۳
شکل (۴- ۳۴) : تغییرات فرکانس ژنراتور سوم در سیستم دارای کنترلر PID ۸۴
شکل (۴- ۳۵) : تغییرات فرکانس ژنراتور چهارم در سیستم دارای کنترلر PID ۸۴
شکل (۴- ۳۶) : تغییرات توان عبوری از خط ارتباطی ۸۵
شکل (۴- ۳۷) : تغییرات فرکانس ژنراتور اول ۸۵
شکل (۴- ۳۸) : تغییرات توان انتقالی از خط ارتباطی ۸۶
شکل (۴- ۴۱) : تغییرات فرکانس ژنراتور اول با استفاده از کنترلر PI.......................................۸۷
شکل (۴- ۴۲) : تغییرات فرکانس ژنراتور دوم با استفاده از کنترلر PI ۸۸
شکل (۴- ۴۳) : تغییرات فرکانس ژنراتور سوم با استفاده از کنترلر PI......................................۸۸
شکل (۴- ۴۴) : تغییرات فرکانس ژنراتور چهارم با استفاده از کنترلر PI...................................۸۹
شکل (۴- ۴۵) : تغییرات توان انتقالی از خط ارتباطی بین نواحی با استفاده از کنترلر PI ۸۹
شکل (۴- ۴۶) : تغییرات فرکانس ژنراتور اول با استفاده از کنترلر PID ۹۰
شکل (۴- ۴۷) : تغییرات فرکانس ژنراتور دوم با استفاده از کنترلر PID.....................................۹۰
شکل (۴- ۴۸) : تغییرات فرکانس ژنراتور سوم با استفاده از کنترلر PID....................................۹۱
شکل (۴- ۴۹) : تغییرات فرکانس ژنراتور چهارم با استفاده از کنترلر PID.................................۹۱
شکل (۴- ۵۰) : تغییرات توان انتقالی از خط ارتباطی با استفاده از کنترلر PID ۹۲

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱) : مقایسهٔ تعداد تکرارها در روشهای مرتبه اول و روشهای مرتبه دوم[۶] ۴۲

جدول (۳-۲) : نتایج بهینه‌سازی از روشهای مختلف [۹] ۴۴

جدول (۴-۱) : اطلاعات سیستم تک ناحیه ۵۸

جدول (۴-۲) : حدود درنظر گرفته شده برای گاورنر ۵۸

جدول (۴- ۳) : مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده برای سیستم تک ناحیه.............................۵۸

جدول (۴- ۴) : مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده برای سیستم تک ناحیه با در نظر گرفتن GRC ۶۱

جدول (۴-۵) : اطلاعات سیستم دو ناحیه ۶۳

جدول (۴-۶) : نتایج طراحی کنترل‌کننده برای سیستم دو ناحیه با استفاده از روش SQP ۶۳

جدول (۴- ۷) : مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده برای سیستم دو ناحیه با در نظر گرفتن GRC............۷۱

جدول (۴- ۸) : پارامترهای سیستم مورد استفاده در شبیه سازی ۷۴

جدول (۴- ۹) : اطلاعات مربوط به سیستم کنترل فرکانس بار ۷۴

جدول (۴- ۱۰) : پارامترهای کنترل‌کننده طراحی شده برای سیستم SMIB...............................۷۵

جدول (۴- ۱۱) : اطلاعات مربوط به الگوریتم PSO ۷۵

جدول (۴- ۱۲) : پارامترهای کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از الگوریتم PSO ۷۵

جدول (۴- ۱۳) : پارامترهای کنترل‌کننده PI تنظیم شده با روش SQP ۷۷

جدول (۴- ۱۴) : پارامترهای کنترل‌کننده PI تنظیم شده با روش PSO ۷۷

جدول (۴- ۱۵) : اطلاعات ژنراتورهای سیستم چندماشینه ۷۹

جدول (۴- ۱۶) : پارامترهای کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از SQP برای سیستم چندماشینه ۷۹

جدول (۴- ۱۷) : پارامترهای کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از PSO برای سیستم چندماشینه ۸۰

جدول (۴- ۱۸) : کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از SQP با درنظر گرفتن GRC.....................۸۶

جدول (۴- ۱۹) : کنترل‌کننده طراحی شده با استفاده از PSO با درنظر گرفتن GRC.....................۸۷

فصل اول

کنترل فرکانس بار

۱-۱- مقدمه

سیستم قدرت مدرن بایستی دارای قابلیت تأمین کمی و کیفی بارهای مصرفی کوچک و بزرگ، اعم از بارهای خانگی، تجاری و صنفی باشد و در مقابل تأثیرات و اغتشاشات داخلی و خارجی وارد بر آن، امنیت و پایداری خوبی داشته باشد. یکی از مشخصات کیفی بسیار مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، ثابت بودن فرکانس سیستم و یا حداقل تغییرات در محدوده مجاز می‌باشد. به عبارت دیگر برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت لازم است فرکانس در محدوده مشخصی ثابت بماند. کنترل فرکانس در نقطه نامی، اطمینان از سرعت ثابت موتورهای القایی و سنکرون را به دنبال خواهد داشت. سرعت ثابت موتورها، مخصوصاً برای نیروگاه‌های گازی، آبی و سیکل ترکیبی اهمیت زیادی دارد. علاوه بر آن در یک شبکه، افت قابل توجه در فرکانس منجر به جریان مغناطیسی شدید در موتورهای القایی و ترانسفورماتورها می‌شود. همچنین استفاده وسیع از ساعت‌های الکتریکی و استفاده از فرکانس برای دیگر اهداف زمانبندی، نیازمند زمان سنکرون دقیق است، که متناسب با انتگرال فرکانس می‌باشد. در نتیجه، در سیستم قدرت نه تنها فرکانس، بلکه انتگرال آن نیز بایستی ثابت باشد [۱].

ثابت ماندن فرکانس در یک سیستم قدرت، وابسته به تعادل بین توان اکتیو تولیدی و توان مصرفی می‌باشد و از آنجا که فرکانس عامل مشترکی در سرتاسر سیستم است، هر تغییری در تقاضای توان اکتیو یک نقطه، به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس شود. به علت اینکه در سیستم‌های قدرت بزرگ برق بصورت همزمان تولید و مصرف می‌شود و قابل ذخیره‌سازی نمی‌باشد، بایستی سیستم بگونه‌ای کنترل شوند تا بار مورد تقاضا بین ژنراتورها که تأمین کننده توان اکتیو مورد تقاضا می‌باشند، تقسیم شده و توان خروجی ژنراتورها به نحو مناسبی تغییر کند و به این ترتیب تعادل توان اکتیو برقرار شود. البته تقسیم بار بین ژنراتورها و کنترل اولیه سرعت توسط گاورنرهای نصب شده بر روی ژنراتورها صورت می‌پذیرد. لیکن جهت تنظیم دقیق فرکانس در مقدار نامی و جلوگیری از ایجاد خطای حالت ماندگار در فرکانس شبکه، نیاز به یک کنترل‌کننده تکمیلی[۱] می‌باشد [۲]. ضمناً در یک سیستم به هم پیوسته که از دو یا چند ناحیه کنترلی مجزا تشکیل شده است، علاوه بر کنترل فرکانس در هر ناحیه، توان گذرنده از خطوط انتقالی به نواحی همسایه نیز بایستی در مقدار برنامه‌ریزی شده باقی بماند [۳].

سیستم کنترلی که عدم توازن بین مصرف و تولید را با تغییر خودکار توان تولیدی ژنراتورها، از بین می‌برد و به این ترتیب فرکانس و توان انتقالی از خطوط را در مقدار نامی‌خود ثابت نگه می‌دارد، در علم مهندسی قدرت کنترل فرکانس بار[۲] (LFC) یا کنترل اتوماتیک تولید[۳] (AGC) نامیده می‌شود.

بطور کلی در مسئله کنترل فرکانس بار، دو مسئله مورد توجه قرار می‌گیرد که شامل قرار گرفتن فرکانس نواحی و توان عبوری از خطوط ارتباطی به مقادیر از پیش تعیین شده می‌باشد. به همین دلیل این دو متغیر با استفاده از یک ترکیب خطی بصورت یک متغیر در می‌آیند و خطای کنترل ناحیه[۴] (ACE) نامیده می‌شود.

با گسترش سیستم‌های قدرت، کنترل فرکانس بار از اهمیت زیادی برخوردار شده است و اگر این کنترل صورت نگیرد، هر چند طراحی مناسبی برای سیستم قدرت صورت گرفته باشد، باز هم شبکه قدرت با مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای مواجه خواهد شد. بر این اساس، اهداف اصلی کنترل فرکانس بار برای یک سیستم قدرت بصورت خلاصه عبارتند از [۴]:

۱- اطمینان از صفر بودن خطای حالت ماندگار تغییرات فرکانس

۲- حداقل کردن توان جاری برنامه ریزی نشده بین نواحی کنترلی همسایه

---

[۱] - Ancillary

[۲] - Load Frequency Control

[۳] - Automatic Generation Control

[۴] - Area Control Error

۳- تعقیب تقاضاهای بار و حذف اغتشاشات

۴- تأمین بالازدگی و زمان نشست قابل قبول برای تغییرات فرکانس و توان تبادلی

با پیشرفت صنعت و افزایش پیچیدگی‌های سیستم‌های قدرت، مسئله کنترل فرکانس بار از اهمیت زیادی برخوردار شده است. به گونه‌ای که در سالهای گذشته، توجه زیادی روی مسئله طراحی کنترل فرکانس بار در سیستم‌های قدرت و تعیین استراتژی‌های مختلف برخورد با آن، شده است. معیارهای سنجش کارایی یک کنترل فرکانس بار را می‌توان بصورت زیر بیان نمود [۴-۷]:

- صفر کردن خطای کنترلی در هر ناحیه در حالت پایدار یا به عبارت دیگر، صفر کردن انحراف فرکانس و انحراف توان جاری در خطوط ارتباطی در حالت پایدار
- بدست آوردن پاسخ گذرا و محدوده پایداری بهتر
- اعمال قانون کنترلی با حداقل توان
- سادگی و راحتی در پیاده سازی کنترل‌کننده

بر این اساس تکنیک‌های مختلفی بمنظور طراحی کنترل فرکانس بار پیشنهاد شده است که به تکنیک‌های کلاسیک، وفقی ، مقاوم و هوشمند تقسیم می‌شوند. ادامه این فصل شامل توضیح در مورد هر یک از این تکنیک‌ها می‌باشد.

۱-۲- روش‌های سنتی[۱]

کارهای ابتدایی برای طراحی کنترل فرکانس بار از روش‌های کنترلی مانند بد، نایکوئیست و ... استفاده می‌کردند و به این ترتیب ارتباط بین پاسخ فرکانسی سیستم کنترلی و عملکرد گذرای حلقه بسته سیستم را در حوزه زمان برقرار می‌کردند. استراتژی‌های کنترل سنتی برای مسئله کنترل فرکانس بار، آنهایی می‌باشند که انتگرال خطای کنترل به عنوان سیگنال کنترلی در نظر گرفته می‌شود. در روش‌های کنترل کلاسیک، برای بدست آوردن گین و حاشیه فاز مناسب معمولاً از دیاگرام‌های بد و نایکوئیست بعلاوه مکان هندسی ریشه‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، فرآیند طراحی روش‌های کلاسیک ساده، آسان و منطبق بر پیاده سازی‌های عملی می‌باشند و این باعث استفاده وسیع از آنها در فرایندهای کنترل می‌باشد. تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است، نشان داد

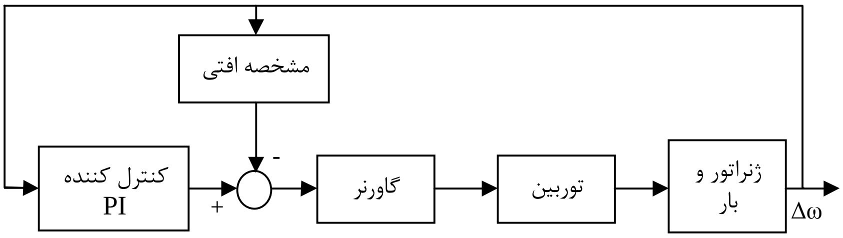
---

[۱] Conventional

که طراحی کنترل فرکانس بار با استفاده از روش‌های متعارف منجر به بالازدگی زیاد و منجر به زمان نشست نسبتاً زیاد می‌شود [۸-۱۰].

۱-۲-۱- کنترل‌کننده انتگرالگیر

متداول‌ترین کنترل‌کننده کلاسیک مورد استفاده در صنعت، کنترل‌کننده PI می‌باشند. نحوه اعمال کنترل‌کننده PI به سیستم تک ناحیه در شکل (۱-۱) آورده شده است.



شکل (۱-۱) : کنترل فرکانس بار با استفاده از کنترلر PI

بازه پایداری برای بهره[۱] انتگرالگیر را میتوان با استفاده از روش روث-هرویتس بدست آورد. سپس در این بازه با استفاده از دیاگرام بد و یا نایکوئیست یا روش سعی و خطا می‌توان بهره بهینه را که در آن حاشیه فاز و پایداری حداکثر است، را بدست آورد [۴]. همان گونه که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده متعارف بدلیل سادگی در رنج وسیعی در صنعت بکار می‌رود، ولی یک عیب اساسی آن وابستگی زیاد عملکرد سیستم به انتخاب بهره کنترل‌کننده می‌باشد. بهره کوچک باعث افزایش زمان نشست پاسخ سیستم می‌شود، در حالیکه بهره بزرگ ممکن است باعث خراب شدن پاسخ سیستم شود و آن را نوسانی کند و یا در بیشتر مواقع باعث ناپایداری سیستم شود [۱۱].

بر همین اساس، تحقیقات بسیاری برای تنظیم بهره کنترل‌کننده انتگرالگیر گزارش شده است. در مرجع [۱۲] یک کنترل‌کننده انتگرالگیر توسعه یافته برای حذف خطای حالت ماندگار و همچنین دستیابی به پاسخی با بالازدگی اندک در سیستم کنترل شده، پیشنهاد شده است. روش فازی نیز برای طراحی گین کنترل‌کننده انتگرالگیر پیشنهاد شده است [۱۳].

---

[۱] Gain

۱-۲-۲- کنترل بهینه

در سال ۱۹۷۲ برای اولین بار از کنترل بهینه[1] در طراحی کنترل فرکانس بار استفاده شد [۱۴]. با استفاده از کنترل بهینه، قطب‌های سیستم حلقه بسته را می‌توان توسط یک فیدبک حالت خطی مناسب، در مکان‌های دلخواه جایگذاری کرد. به این ترتیب می‌توان دینامیک دلخواه را برای سیستم بدست آورد. به منظور طراحی این کنترل‌کننده ، ابتدا بایستی مدل خطی شده سیستم بدست آورده شود. مدل خطی توسط معادلات حالت به فرم زیر شرح داده می‌باشد [۱۵, ۱۶].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$ (۱-۱)

که در آن A و B ماتریس‌های سیستم، x بردار حالت، u بردار سیگنال کنترل و y بردار خروجی می‌باشد. فرض کنید تمامی‌متغیرهای حالت برای فیدبک در دسترس باشند [۱۷]. بنابراین قانون کنترل برابر است با:

$$u = -Kx$$ (۲-۱)

که در آن K ماتریس بهره‌های فیدبک می‌باشد.

برای سیستم خطی بیان شده توسط رابطه (۱-۱)، سیگنال بهینه کنترل u که اندیس عملکردی تعریف شده در رابطه (۱-۳) را حداقل می‌کند، تابعی خطی از متغیرهای حالت سیستم می‌باشد و بصورت رابطه (۱-۴) تعیین می‌گردد.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt$$ (۳-۱)

$$u = -Kx = -R^{-1} B^T P x$$ (۴-۱)

که در آن، Q و R ماتریس‌های وزنی[2] می‌باشند و P از حل معادله ماتریس ریکاتی[3] زیر بدست می‌آید.

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$$ (۵-۱)

معادله ریکاتی کلید بدست آوردن کنترل بهینه می‌باشد. هنگامی‌که ماتریس‌های Q و R داده می‌شوند، برای بدست آوردن ماتریس P کافی است که معادله ریکاتی را حل کرد. با محاسبه ماتریس P بردار کنترل بهینه u بسادگی بر اساس رابطه (۱-۴) بدست خواهد آمد.

---

[1] ۱- Optimal Control

[2] ۲-Weighting matrices

[3] ۳- Riccati

تاکنون فرض کردیم که تمامی متغیرهای حالت سیستم برای فیدبک در دسترس باشند. اما این فرض برای اکثر سیستم‌ها مانند کنترل فرکانس بار غیر واقعی می‌باشد. اغلب، فقط تعداد کمی‌از متغیرهای حالت و یا یک ترکیب خطی از آنها قابل دسترسی می‌باشد که بردار خروجی (y) نامیده می‌شوند. در مواقعی که تعداد متغیرهای خروجی کمتر از تمامی‌متغیرهای حالت باشد و یا به عبارت دیگر، تمامی‌متغیرهای خروجی برای فیدبک حالت در دسترس نباشد، با استفاده از فیدبک خروجی، تنها قطب‌های متناظر با متغیرهای خروجی در دسترس را می‌توان در مکان‌های دلخواه جایگذاری کرد و کنترلی بر روی بقیه متغیرها وجود ندارد [۱۸]. در اینگونه مواقع فیدبک خروجی بصورت زیر تغییر می‌کند.

فرض کنید که بخواهیم بردار کنترل را تنها از روی خروجی سیستم تعیین نماءیم، یعنی:

$$u=-Fy$$ (۶-۱)

که F ماتریس بهره فیدبک می‌باشد. مدل خطی سیستم را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{x}=[A-BFC]\cdot x$$ (۷-۱)

چنانچه $A^* \triangleq [A-BFC]$ باشد، ماتریس F برای آنکه بردار کنترل u بهینه باشد و اندیس عملکردی را حداقل کند، برابر است با:

$$F=R^{-1}B^TK^*L^*\ C^T\left[CL^*C\right]^{-1}$$ (۸-۱)

ماتریس K^* حل مثبت نیمه معین[۱] رابطه زیر می‌باشد.

$$K^*A^*+A^{*T}K^*+Q+C^TF^TRFC=0$$ (۹-۱)

و L^* یک حل مثبت معین[۲] رابطه زیر است.

$$L^*A^{*T}+A^*L^*+I=0$$ (۱۰-۱)

یکی از روش‌های محاسبه ماتریس F استفاده از روش بازگشتی می‌باشد که در آن لازم است رابطه بازگشتی زیر را حل نمود.

$$F_{n-1}=R^{-1}B^TK_{n-1}L_{n-1}C^T\left[CL_{n-1}C^T\right]^{-1}$$ (۱۱-۱)

که در آن K_n و L_{n-1} از حل روابط زیر بدست می‌آیند.

---

[۱] Positive semi-definite

[۲] Positive definite

$$K_n\left[A-BF_{n-1}C\right]+\left[A-BF_{n-1}C\right]^T K_n+Q+ C^T F_{n-1}^T R F_{n-1}C=0 \tag{۱-۱۲}$$

$$L_n\left[A-BF_{n-1}C\right]^T+\left[A-BF_{n-1}C\right]\ L_n+I=0 \tag{۱-۱۳}$$

توضیحات بیشتر در این زمینه در [۱۹] آورده شده است.

همانگونه که ذکر شد در طراحی یک کنترل‌کننده بهینه کنترل فرکانس بار، برای تولید سیگنال‌های فیدبک نیازمند تمامی‌متغیرهای حالت می‌باشیم. بردار متغیرهای حالت سیستم، تنها در حالتی در دسترس می‌باشند که سیستم مشاهده‌پذیر و متغیرهای حالت قابل اندازه‌گیری باشند. حتی در زمانی که شرایط مشاهده‌پذیری برای سیستم برقرار باشد، نتایج حاصل از طراحی با این روش بسیار پیچیده است. بنابراین این روش برای سیستم‌های بزرگ که دارای متغیرهای حالت زیاد می‌باشند مناسب نمی‌باشد. در [۲۰] به علت محدودیت‌های پیاده سازی کنترل‌کننده فرکانس بار بر اساس فیدبک تمامی‌متغیرهای حالت، طراحی کنترل‌کننده بر اساس برخی متغیرهای حالت انجام شده که سبب ساده‌تر شدن ساختار کنترل‌کننده و پیاده سازی راحت‌تر آن شده است. روش دیگر طراحی کنترل‌کننده فرکانس بار، بکارگیری روش دوم لیاپانوف و استفاده از حداقل تنظیمات تئوری زمان است که در [۲۱] بر روی یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای اعمال شده است.

اما مشکل بزرگی که در پیاده سازی کنترل بهینه بر روی سیستم‌های قدرت وجود دارد، نبودن روش مشخصی برای پیدا کردن ماتریس‌های وزندهی (Q و R) و در ادامه اندیس عملکرد می‌باشد.

۱-۳- کنترل تطبیقی

طراحی کنترل فرکانس بار بر اساس مقادیر نامی‌پارامترهای سیستم ممکن است برای سیستم دارای پارامترهای متغیر که به علت شرایط مختلف محیطی و عملکردی سیستم تغییر می‌کند، مناسب نباشد و بنابراین، بکار بردن این کنترل‌کننده روی سیستم ممکن است عملکرد مورد انتظار را بدنبال نداشته باشد و باعث کاهش اثر کنترل‌کننده و در برخی مواقع باعث ناپایداری سیستم شود. با توجه به این نکته تحقیقات زیادی در زمینه طراحی کنترل فرکانس بار با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای سیستم انجام شده است [۲۲].

از این تکنیک‌ها که در آنها کنترل‌کننده به گونه ای طراحی می‌شود که حساسیت کمتری نسبت به تغییرات پارامترها داشته باشد، بعنوان روش‌های کنترل تطبیقی یاد می‌شود. کنترل تطبیقی بیش از ربع قرن است که یکی از