

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

جایابی جبرانساز استاتیک توزیع به منظور بهبود کیفیت توان شبکه‌های توزیع

نگارنده:

سپهر ایرانمنش

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

اسفند ۱۴۰۰



فرم شماره (۳): صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سپهر ایرانمنش شماره دانشجویی ۹۸۲۷۴۵۴ رشته مهندسی برق گرایش سیستم های قدرت تحت عنوان: جایابی جبرانساز استاتیک توزیع به منظور بهبود کیفیت توان شبکه های توزیع که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۰۹ با حضوریات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید بشرح ذیل اعلام می گردد:

- الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده :

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم بہ

مقدس ترین واثرہ مادر لغت نامہ دلم، مادر مہربانم کہ زندگیم را دیون مہر و عطفوت

آن می دانم

پدرم، مہربانی مشفق، بردبار و حامی

دخوشی ہمیشگی ام؛ برادر عزیزم کہ صفایش مایہی آرامشم است.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر مهدی باثراد که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان‌نامه همواره با سه صدر و گشاده رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

جناب آقای دکتر مرتضی آیین به عنوان مشاور صنعتی در مجتمع مس سرچشمه مسئولیت سنگینی را قبول زحمت فرمودند: و مطمئناً بدون حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و روحیه‌بخشی ایشان، انجام بخش مهمی از این پایان‌نامه میسر نمی‌شد. بدین وسیله از بزرگواری، حسن سلوک و حمایت بی‌دریغ ایشان تشکر کرده و برای ایشان طول عمر توام با سربلندی را آرزو مندم.

از خانواده و دوستان عزیزم که لمس حضورشان گذر از این راه را برایم هموار نمود و لحظه‌لحظه همراهیشان و همدلیشان با من بود بسیار سپاسگذارم.

تعهد نامه

اینجانب سپهر ایرانمنش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق/سیستم‌های قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه جایابی جبرانساز استاتیک توزیع به منظور بهبود کیفیت شبکه‌های توزیع تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد 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 بوده‌اند 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 افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، موجب کاهش سطح کیفیت توان سیستم‌های توزیع می‌شود، بنابراین مدیریت سیستم‌های قدرت نوین و تامین توان راکتیو با استفاده از جبران‌ساز استاتیک توزیع با قابلیت واکنش سریع نسبت به تغییرات توان در شرایط مختلف سیستم، عملکرد بهتری نسبت به ادوات جبران‌ساز توان راکتیو در سیستم‌های توزیع داشته است. در این پایان‌نامه، روش جدیدی برای تعیین بهینه اندازه و مکان جبران‌ساز استاتیک توزیع برای افزایش کیفیت توان و بهبود شرایط کلی شبکه ارائه شده است. در روش پیشنهادی با محاسبه شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید سیستم جهت جایگذاری جبران‌ساز تعیین می‌گردند. تابع هدف مسئله شامل کمینه نمودن تلفات توان اکتیو، تلفات توان راکتیو، هزینه نصب، نگهداری و بهره‌برداری از جبران‌ساز استاتیک توزیع در افق برنامه‌ریزی پیش‌بینی شده با در نظر داشتن محدودیت اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و ولتاژ باس‌های سیستم می‌باشد. در این پایان‌نامه پخش بار جاروب پسرو-پیشرو و ترکیبی از روش‌های تحلیلی- فراابتکاری مبتنی بر شاخص پایداری ولتاژ سریع و الگوریتم ازدحام ذرات پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی منجر به کاهش فضای جستجو حل مسئله و در نتیجه افزایش دقت محاسبات می‌گردد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های تست IEEE ۱۸ باسه توزیع اصلاح شده، IEEE ۳۳ باسه توزیع و بخشی از شبکه توزیع شعاعی کارخانه مجتمع مس سرچشمه واقع در شهرستان رفسنجان، صحت روش پیشنهادی تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جایابی و اندازه‌یابی بهینه، جبران‌ساز استاتیک توزیع، مدل بار، پخش بار هارمونیکی، روش بهینه‌سازی مبتنی ترکیبی

فهرست مطالب

فصل اول: پیش‌گفتار

- ۱-۱- بیان مسئله..... ۲
- ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق..... ۳
- ۳-۱- اهداف تحقیق..... ۳
- ۴-۱- نوآوری‌های پایان‌نامه..... ۴
- ۵-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه..... ۵

فصل دوم: جبران‌ساز استاتیک توزیع در بخش بار سیستم‌های توزیع‌یاد نظر کر فتن مدل بار

- ۱-۲- مقدمه..... ۸
- ۲-۲- جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۸
- ۳-۲- مدل‌سازی جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۱۰
- ۴-۲- مدل‌سازی بار در سیستم توزیع..... ۱۴
- ۵-۲- مدل‌سازی بارهای غیرخطی..... ۱۵
- ۶-۲- پخش بار شبکه‌های توزیع..... ۱۶
- ۷-۲- پخش بار پسرو پیشرو در محیط هارمونیکی..... ۲۰
- ۸-۲- جمع‌بندی..... ۲۴

فصل سوم: مروری بر کارهای انجام شده در زمینه جایابی جبران ساز استاتیک توزیع

۳-۱- مقدمه.....	۲۶
۳-۲- روش‌های بهینه‌سازی در مسائل جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع.....	۲۶
۳-۲-۱- روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی در مسائل جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع.....	۳۱
۳-۲-۲- روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در مسائل جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع.....	۳۲
۳-۲-۳- روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی در مسائل جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع.....	۳۵
۳-۳- جمع‌بندی.....	۳۷

فصل چهارم: فرمول‌بندی مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع

۴-۱- مقدمه.....	۴۰
۴-۲- توابع هدف و قیود مسئله.....	۴۰
۴-۲-۱- تابع هدف.....	۴۰
۴-۲-۲- قیود مسئله.....	۴۶
۴-۳- روش بهینه‌سازی پیشنهادی.....	۴۹
۴-۳-۱- شاخص پایداری و لتاژ سریع.....	۵۰
۴-۴- مدل بار در مسئله جایابی بهینه.....	۵۳
۴-۵- جمع‌بندی.....	۵۵

فصل پنجم: شبیه سازی روش پیشنهادی برای جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع

۵-۱- مقدمه.....	۵۸
۵-۲- مراحل انجام روش پیشنهادی در شبیه سازی.....	۵۹
۵-۳- معرفی سیستم های تست و شبکه صنعتی مجتمع مس سرچشمه مورد مطالعه.....	۶۱
۵-۳-۱- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم تست IEEE ۱۸ باسه توزیع.....	۶۱
۵-۳-۲- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم تست IEEE ۳۳ باسه توزیع.....	۶۴
۵-۳-۳- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم ۲۰ باسه توزیع کارخانه مجتمع مس سرچشمه.....	۶۸
۵-۴- جمع بندی.....	۷۱

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری.....	۷۲
۶-۲- پیشنهادات.....	۷۵
پیوست.....	۷۶
مراجع.....	۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): پیکربندی جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۹
- شکل (۲-۲): مدار معادل دو باس متوالی در سیستم توزیع..... ۱۰
- شکل (۳-۲): نمودار فازوری معادله قانون ولتاژ کیرشهف بدون وجود جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۱۰
- شکل (۴-۲): نمودار فازوری معادله قانون ولتاژ کیرشهف با وجود جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۱۱
- شکل (۵-۲): مدار معادل شبکه توزیع..... ۱۸
- شکل (۶-۲): روندنمای پخش بار پسرو پیشرو با در نظر گرفتن حضور بارهای وابسته به ولتاژ..... ۱۹
- شکل (۷-۲): مدار معادل سیستم توزیع با حضور بار غیرخطی..... ۲۱
- شکل (۸-۲): روندنمای پخش بار جاروب پسرو پیشرو هارمونیکی..... ۲۳
- شکل (۱-۳): تقسیم‌بندی روش‌های بهینه‌سازی مسئله جاییابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۲۹
- شکل (۱-۴): اهداف انتخاب شده در مسئله جاییابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۴۲
- شکل (۲-۴): مدل مدار معادل شبکه توزیع..... ۴۳
- شکل (۳-۴): روندنمای روش پیشنهادی جاییابی جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۴۶
- شکل (۴-۴): مدار معادل دو باس متوالی شبکه توزیع..... ۵۰
- شکل (۵-۴): روندنمای روش پیشنهادی شاخص پایداری ولتاژ در مسئله جاییابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۵۴
- شکل (۶-۴): مراحل روش دو مرحله‌ای جاییابی و اندازه‌یابی بهینه پیشنهادی..... ۵۴

شکل (۵-۱): روندنمای اجرای روش پیشنهادی در مسئله جاییابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع..... ۶۰

شکل (۵-۲): پروفیل ولتاژ سیستم ۱۸ باسه توزیع قبل و بعد از جاییابی جبران‌ساز استاتیک

توزیع..... ۶۴

شکل (۵-۳): پروفیل ولتاژ سیستم ۳۳ باسه توزیع قبل و بعد از جاییابی جبران‌ساز استاتیک

توزیع..... ۶۷

شکل (۵-۴): پروفیل ولتاژ شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه توزیع قبل و بعد از جاییابی جبران‌ساز

استاتیک توزیع..... ۷۱

شکل (پ-۱) دیاگرام تک خطی سیستم تست ۱۸ باسه توزیع..... ۷۷

شکل (پ-۲) دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۳ باسه توزیع اصلاح شده..... ۷۷

شکل (پ-۳) دیاگرام تک خطی شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه..... ۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): انواع بار و مقادیر ضرایب وابستگی..... ۱۵
- جدول (۱-۴): ضرایب هم‌وزنی تابع هدف..... ۴۱
- جدول (۲-۴): پارامترهای جبران‌ساز استاتیک توزیع در تابع هدف..... ۴۴
- جدول (۱-۵): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید شبکه تست ۱۸ باسه توزیع..... ۶۲
- جدول (۲-۵): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم ۱۸ باسه توزیع..... ۶۳
- جدول (۳-۵): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم ۱۸ باسه توزیع..... ۶۳
- جدول (۴-۵): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید شبکه تست ۳۳ باسه اصلاح شده توزیع..... ۶۵
- جدول (۵-۵): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی شبکه ۳۳ باسه توزیع..... ۶۶
- جدول (۶-۵): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم ۳۳ باسه توزیع..... ۶۶
- جدول (۷-۵): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید شبکه ۲۰ باسه توزیع مجتمع مس سرچشمه..... ۶۹

جدول (۵-۸): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی شبکه

۲۰ باسه توزیع مجتمع مس سرچشمه.....۶۹

جدول (۵-۹): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی

شبکه ۲۰ باسه کارخانه مجتمع مس سرچشمه.....۷۰

جدول (پ-۱): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۱۸ باسه.....۷۹

جدول (پ-۲): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۳۳ باسه اصلاح شده.....۸۰

جدول (پ-۳): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه.....۸۱

جدول (پ-۴): اندازه جریان هارمونیک به عنوان درصدی از جریان اصلی بار.....۸۲

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- بیان مسئله

بهره‌برداری از ادوات الکترونیک قدرت و بارهای حساس به پارامترهای شبکه، موجب کاهش سطح کیفیت توان در شبکه‌های توزیع و اختلال در عملکرد کلی سیستم قدرت می‌شوند. به همین علت، کیفیت توان الکتریکی ارائه شده بدون وقفه در کاهش تلفات توان، حجم و کیفیت تولیدات صنعتی، طول عمر و عملکرد تجهیزات اهمیت اساسی دارد. بنابراین مسئله کیفیت توان و بهبود شرایط کلی سیستم در دهه‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌است. همچنین بکارگیری دستگاه‌های مبتنی بر ریزپردازنده، کنترل‌کننده‌ها در فرآیندهای صنعتی و بارهای غیرخطی^۱ در شبکه، منجر به کاهش پروفیل ولتاژ، افزایش تلفات توان کل اکتیو^۲ و راکتیو^۳، ایجاد اعوجاج هارمونیک و در نتیجه کاهش سطح کیفیت توان در شبکه توزیع می‌گردد.

با نفوذ ادوات الکترونیک قدرت در سیستم‌های توزیع، ادوات جبران‌ساز توان راکتیو در سطح شبکه‌های توزیع، تحت عنوان ادوات توان سفارشی^۴ نقش موثری در حل مشکلات کیفیت توان شبکه با تزریق و مدیریت توان راکتیو ایفا نموده‌اند. هزینه نصب و بهره‌برداری بالای این تجهیزات بعلاوه فناوری پیشرفته آنها، لزوم جایابی و اندازه‌یابی بهینه با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی را ایجاب می‌کند [۱-۳].

اکثر مطالعات در زمینه روش‌های تعیین محل و اندازه بهینه جبران‌سازهای توان در سیستم قدرت با استفاده از شاخص‌ها و الگوریتم‌های فراابتکاری^۵ مختلف جهت رسیدن به اهداف مختلف همچون کاهش تلفات توان، بهبود پایداری ولتاژ و افزایش پروفیل ولتاژ متمرکز بوده است که در روش پیشنهادی این پایان‌نامه، مکان و اندازه بهینه جبران‌ساز توان به طور جداگانه تعیین می‌شود، که در مرحله اول

¹ Nonlinear Load

² Total Active Power Loss

³ Total Reactive Power Loss

⁴ Custom Power Device

⁵ Metaheuristic Algorithm

جایابی بهینه از روش تحلیلی محاسبه می‌گردد و در مرحله دوم بهترین ظرفیت بهینه جبران‌ساز توان با در نظر گرفتن بارهای غیرخطی تعیین می‌گردد. مزیت این روش نسبت به روش‌های متداول دیگر، کاهش حجم محاسبات و فضای جستجوی الگوریتم و افزایش دقت در نتایج مسئله می‌باشد [۴].

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

کیفیت پایین در سیستم‌های توزیع موجب اختلال در عملکرد تجهیزات حساس و وسایل الکتریکی گردد. جایابی و اندازه‌یابی نادرست ادوات جبران‌ساز توان ممکن است موجب مشکلات و اختلالات بیشتر در سیستم با افزایش هزینه‌های اقتصادی بهره‌برداری از شبکه توزیع گردد. بنابراین جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع^۱ بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

بکارگیری روش‌های متداول بهینه‌سازی به بار محاسباتی و ذخیره‌سازی گسترده بالایی نیاز دارد تا دقت بالای محاسبات را فراهم نماید. همچنین برخی از روش‌های متداول بهینه‌سازی، قادر به حل مسائلی که شامل توابع هدف ناپیوسته پیچیده و محدودیت‌های برابر و نابرابر نمی‌باشند. لذا این پایان‌نامه در نظر دارد روشی در حل ساده‌تر و کمک به الگوریتم‌های حل مسئله جایابی و اندازه‌یابی جبران‌سازهای توان از جمله جبران‌ساز استاتیک توزیع را ارائه دهد.

۳-۱- اهداف تحقیق

در این پایان‌نامه، روش پیشنهادی دو مرحله‌ای بهینه‌سازی با ترکیب روش‌های تحلیلی و فراابتکاری ارائه می‌شود. اهداف اصلی مسئله جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع شامل کمینه نمودن تلفات کل توان^۲، کاهش انحراف ولتاژ^۳ از مقدار مرجع باس‌های سیستم، افزایش پایداری ولتاژ و کاهش اعوجاج

^۱ Distribution Static Compensator

^۲ Total Power Loss

^۳ Voltage Deviation

هارمونیکی سیستم با در نظر گرفتن مدل بار استاتیکی وابسته به ولتاژ جهت واقعی تر شدن نتایج می باشد. در این روش، فضای جستجوی روش های حل مسائل بهینه سازی متداول کاهش و در نتیجه دقت محاسبات افزایش می یابد. لازم به ذکر است روش پیشنهادی، قابل اجرا و محاسبه در تمامی مسائل جایابی بهینه ادوات جبران ساز توان می باشد.

۴-۱- نوآوری های پایان نامه

در این پایان نامه جهت کاهش تلفات توان، افزایش پایداری ولتاژ و در نهایت بهبود شرایط سیستم های توزیع در مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع، ترکیب روش های بهینه سازی جایابی متداول فراابتکاری و تحلیلی معروف به روش های دو مرحله ای بعنوان نوآوری در این پایان نامه معرفی می گردد. نوآوری های این پایان نامه بصورت زیر می باشد:

۱- الویت بندی باس های سیستم بر اساس محاسبه شاخص پایداری ولتاژ سریع^۱ در مسئله جایابی بهینه در مرحله اول روش دو مرحله ای بهینه سازی پیشنهادی.

۲- تعیین ظرفیت بهینه جبران ساز استاتیک توزیع با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری در مسئله چند هدفه جایابی بهینه، بعنوان مرحله دوم روش دو مرحله ای بهینه سازی پیشنهادی.

با محاسبه شاخص پایداری ولتاژ سریع در الگوریتم پایه، مدل بار وابسته به ولتاژ و بارهای غیرخطی در سیستم جهت ارزیابی عملکرد جبران ساز استاتیک توزیع به منظور افزایش دقت محاسبات در شرایط بهره برداری واقعی و تحلیل هارمونیکی سیستم بعنوان روش پیشنهادی بهینه سازی ارائه می گردد.

¹ Fast Voltage Stability Index

۱-۵- مروی بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم، مدل‌سازی و عملکرد جبران‌ساز استاتیک توزیع در پخش بار پسر-پیشرو به عنوان روشی مناسب و کارآمد در سیستم‌های توزیع ارائه می‌شود. همچنین در این فصل مدل‌سازی بارهای وابسته به ولتاژ و بارهای غیرخطی در پخش بار هارمونیک شرح داده می‌شوند. در فصل سوم مروری بر ادبیات موضوع و کارهای انجام شده در زمینه جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع جهت بهبود کیفیت توان شبکه‌های توزیع پرداخته می‌شود. در فصل چهارم، به بررسی روش‌های بهینه‌سازی جایابی و اندازه‌یابی بهینه ادوات جبران‌ساز توان پرداخته و روش پیشنهادی ترکیبی دو مرحله‌ای معرفی و فرمول بندی مسئله جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع ارائه می‌گردد. در فصل پنجم، روش ارائه شده به منظور بررسی تأثیر و عملکرد جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی دو سیستم تست IEEE ۱۸ باسه، IEEE ۳۳ باسه و بخشی از شبکه مجتمع مس سرچشمه واقع در استان کرمان، شهرستان رفسنجان شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده در هر مرحله تحلیل و ارزیابی می‌شود. در فصل آخر نیز جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مدل سازی جبران ساز استاتیک توزیع در پخش بار سیستم های

توزیع باد نظر گرفتن مدل بار

۲-۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، با توسعه ادوات الکترونیک قدرت و تجهیزات حساس به کیفیت توان، چالش‌های متعددی در صنعت برق افزایش یافته است. عملکرد بارهای غیرخطی باعث ایجاد اعوجاج هارمونیکی و در نتیجه کاهش سطح کیفیت توان سیستم‌های توزیع می‌گردد. بکارگیری ادوات سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر در سیستم‌های توزیع با کاربرد و استراتژی کنترلی متنفاوت تحت عنوان ادوات توان سفارشی مطرح می‌شود. این تجهیزات برای رفع مشکلات مربوط به کیفیت توان و شرایط کلی سیستم مانند کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ، جبران‌سازی توان راکتیو در سیستم‌های توزیع به کار برده می‌شوند. در ادامه، مدل‌سازی جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه‌های توزیع شرح داده می‌شود [۵].

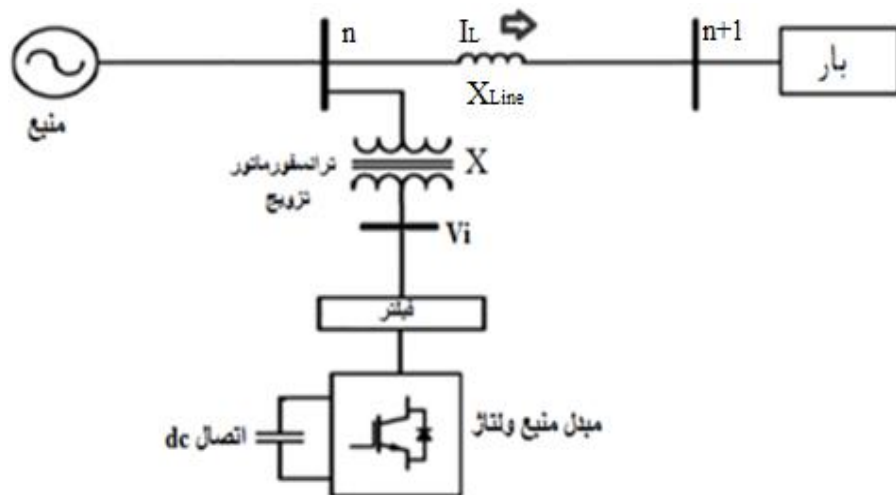
۲-۲- جبران‌ساز استاتیک توزیع

مبدل منبع ولتاژ دو سطحی، فیلتر ac جهت کاهش اثرات اعوجاج هارمونیکی، دستگاه ذخیره انرژی dc و ترانسفورماتور تزویج اصلی ترین بخش‌های جبران‌ساز استاتیک توزیع می‌باشند که بصورت موازی به شبکه توزیع متصل می‌شود. شکل (۱-۲) نمای ساده‌ای از اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده جبران‌ساز استاتیک توزیع در یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد.

اجزاء اصلی جبران‌ساز استاتیک توزیع شامل، مبدل منبع ولتاژ سه فاز، خازن تامین‌کننده ولتاژ dc، ترانسفورماتور تزویج، فیلتر ac بین ترانسفورماتور و مبدل، سیستم کنترلی جهت کنترل سوئیچینگ کلیدهای مبدل می‌باشد.

در صورت لزوم در مواجهه با شرایط پیک بار شبکه برای جبران توان اکتیو و راکتیو همزمان موردنیاز شبکه و هزینه مصرف انرژی، یک منبع ذخیره ساز انرژی خارجی جهت جبران‌سازی توان اکتیو است [۵].
تنظیم مناسب اندازه و فاز ولتاژ خروجی مبدل منبع ولتاژ جبران‌ساز استاتیک توزیع اجازه کنترل موثر تبادلات توان توان راکتیو بین جبران‌ساز استاتیک توزیع و سیستم قدرت را می‌دهد.

با صرف نظر کردن از جریان‌های هارمونیکی درون راکتانس نشتی و مقاومت ترانسفورماتور تزویج، روابط ریاضی جبران‌ساز استاتیک توزیع به صورت زیر بدست می‌آید:



شکل (۱-۲): پیکربندی جبران‌ساز استاتیک توزیع [۶].

$$I = \left| \frac{V_i - V_n}{jX} \right| \quad (۱-۲)$$

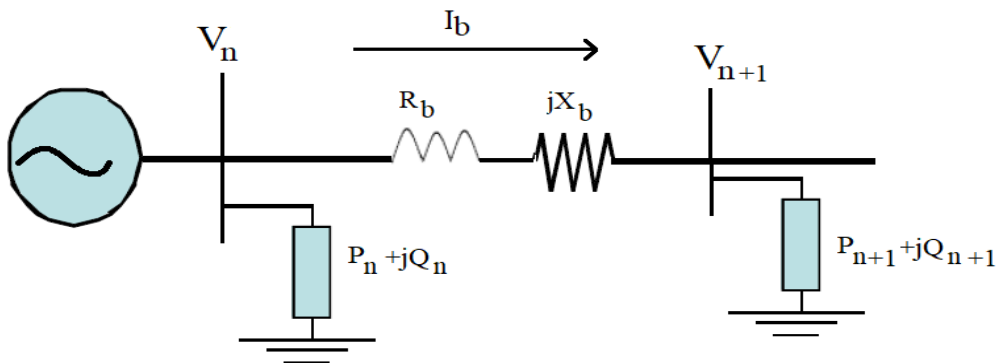
$$P = \frac{V_i \cdot V_n}{X} \cdot \sin \varphi \quad (۲-۲)$$

$$Q = \frac{V_i \cdot V_n}{X} \cdot \cos \varphi - \frac{V_n^2}{X} \quad (۳-۲)$$

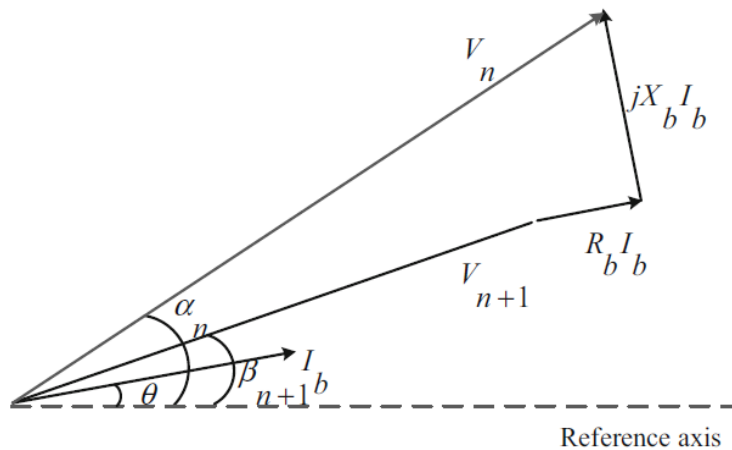
که در روابط فوق، V_i ولتاژ خروجی مبدل منبع DC، V_n ولتاژ سیستم توزیع و X راکتانس نشتی ترانسفورماتور تزویج و φ اختلاف زاویه فاز بین V_i و V_n می‌باشد. میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مبادله شده بین جبران‌ساز استاتیک توزیع و شبکه توزیع به ترتیب P و Q می‌باشند. با توجه به شرایط بهره‌برداری سیستم توزیع، مدیریت تزریق توان راکتیو جبران‌ساز توسط روش‌های کلیدزنی مدنظر توسط بهره‌بردار شبکه انجام می‌شود [۶].

۳-۲- مدل سازی جبران ساز استاتیک توزیع

جبران ساز استاتیک توزیع بعنوان مولد توان راکتیو بصورت موازی در سیستم توزیع متصل می شود که از طریق نقطه اتصال مشترک^۱ مدیریت توان راکتیو عمل جبران سازی را انجام می دهد. شکل (۲-۲) مدار معادل دو باس متوالی n و $n+1$ از شبکه توزیع است، تقاضای توان اکتیو و راکتیو بار متصل به این باس ها با P و Q نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): مدار معادل دو باس متوالی در سیستم توزیع [۶].



شکل (۳-۲): نمودار فازوری معادله قانون ولتاژ کیرشهف بدون وجود جبران ساز استاتیک توزیع [۶].

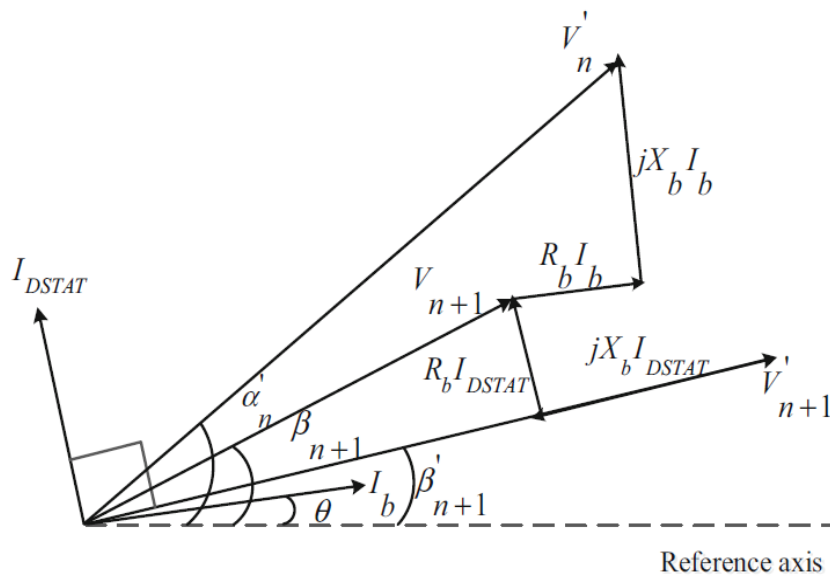
¹ Point of Common Coupling

معادله قانون ولتاژ کیرشهف^۱ شکل (۳-۲) بصورت رابطه (۴-۲) می باشد:

$$\bar{V}_{n+1} \angle \beta_{n+1} = \bar{V}_n \angle \alpha_n - (R_b + jX_b) \bar{I}_b \angle \theta \quad (4-2)$$

که در رابطه فوق، V مقدار ولتاژ باس ها، α و β به ترتیب زوایای ولتاژ باس های n و $n+1$ قبل از جایگذاری جبران ساز استاتیک توزیع در باس $n+1$ می باشند. R_b و X_b نیز مقاومت و راکتانس بین خطوط n و $n+1$ می باشند. همچنین جریان بین دو خط متوالی با I_b نشان داده شده است.

نمودار فازوری روابط مربوط به (۴-۲) در شکل (۴-۲) نشان داده شده است:



شکل (۴-۲): نمودار فازوری معادله قانون ولتاژ کیرشهف با وجود جبران ساز استاتیک توزیع [۶].

با توجه به معادله قانون ولتاژ کیرشهف با وجود جبران ساز استاتیک توزیع در باس $n+1$ با نماد پریم ($'$) در شبکه شکل (۴-۲) نشان داده می شود :

$$\bar{V}'_{n+1} \angle \beta'_{n+1} = \bar{V}'_n \angle \alpha'_n - (R_b + jX_b) \times \left(\bar{I}_b \angle \theta + \bar{I}_{DSTAT} \angle \left(\frac{\pi}{2} + \beta'_{n+1} \right) \right) \quad (5-2)$$

نمودار فازوری مربوط به معادله (۵-۲) در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

¹ Kirchhoff's Law

با توجه به نمودار فازوری شکل (۴-۲) و تزریق جریان جبران ساز استاتیک توزیع I_{DSTAT} در نقطه اتصال مشترک، زاویه جریان جبران ساز به صورت زیر بیان می شود:

$$\bar{I}_{DSTAT} = \frac{\pi}{2} + \beta_{n+1} \quad (۶-۲)$$

با تفکیک قسمت های حقیقی و موهومی معادله (۵-۲) داریم:

قسمت حقیقی:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{DSTAT} \cos(\beta_{n+1} + 90^\circ) \\ = \left(\frac{\bar{V}'_n R_b \cos \alpha'_n}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\bar{V}'_n X_b \sin \alpha'_n}{R_b^2 + X_b^2} - \frac{\bar{V}'_{n+1} R_b \cos \beta'_{n+1}}{R_b^2 + X_b^2} \right. \\ \left. - \frac{\bar{V}'_{n+1} X_b \sin \beta'_{n+1}}{R_b^2 + X_b^2} - \bar{I}_b \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (۷-۲)$$

قسمت موهومی:

$$\begin{aligned} j(\bar{I}_{DSTAT} \sin(\beta_{n+1} + 90^\circ)) \\ = \left(\frac{\bar{V}'_n R_b \sin \alpha'_n}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\bar{V}'_n X_b \cos \alpha'_n}{R_b^2 + X_b^2} - \frac{\bar{V}'_{n+1} R_b \sin \beta'_{n+1}}{R_b^2 + X_b^2} \right. \\ \left. - \frac{\bar{V}'_{n+1} X_b \cos \beta'_{n+1}}{R_b^2 + X_b^2} - \bar{I}_b \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (۸-۲)$$

با جایگذاری پارامترهای زیر در روابط (۷-۲) و (۸-۲) مقدار جریان جبران ساز استاتیک توزیع از رابطه (۱۱-۲) بدست می آید:

$$\begin{aligned} a = -\frac{\bar{V}'_{n+1} R_b}{R_b^2 + X_b^2}, \quad b = \frac{\bar{V}'_{n+1} X_b}{R_b^2 + X_b^2}, \quad c = \frac{\bar{V}'_n R_b}{R_b^2 + X_b^2}, \quad d = \frac{\bar{V}'_n X_b}{R_b^2 + X_b^2}, \\ e = \bar{I}_{DS} \end{aligned} \quad (۹-۲)$$

$$\psi = \beta_{n+1} + 90^\circ, \phi = \bar{I}_b \quad (۱۰-۲)$$

جریان تزریقی جبران ساز استاتیک توزیع برابر است با:

$$\bar{I}_{DS} = \frac{K_1 + K_2 \sin(\alpha_n - \theta - \varphi)}{\sin(\psi + \theta)} \quad (۱۱-۲)$$

با حل معادله درجه دوم رابطه فوق K_1 و K_2 از رابطه زیر بدست می‌آیند [۶]:

$$K_1 = \alpha \sin(\beta_{n+1} + \theta) + b \cos(\beta_{n+1} - \theta) \quad (۱۲-۲)$$

$$K_2 = \sqrt{c^2 + d^2} = \frac{\bar{V}'_n}{\sqrt{R_b^2 + X_b^2}} \quad (۱۳-۲)$$

در رابطه (۱۱-۲)، φ یک زاویه‌ای است که باید شرایط زیر را برآورده نماید:

$$-\pi < \varphi < \pi, \quad \tan \varphi = \frac{d}{c} = \frac{X_b}{R_b} \quad (۱۴-۲)$$

شرایط فوق تا زمانی برقرار می‌باشد که d و c برابر صفر نباشند.

با جایگذاری پارامتر روابط (۹-۲)، با حل معادله درجه دوم رابطه (۱۲-۲)، معادله (۱۵-۲) محاسبه می‌گردد. مقدار جریانی که باید جبران‌ساز استاتیک توزیع در باس $n + 1$ شبکه توزیع تزریق کند تا توان راکتیو، تلفات توان و کمبود ولتاژ را جبران نماید. بنابراین، توان راکتیو قابل تزریق توسط جبران‌ساز استاتیک توزیع به صورت زیر بیان می‌شود [۶]:

$$jQ_{DSTAT} = \bar{V}'_{n+1} \cdot I_{DSTAT}^* \quad (۱۵-۲)$$

نماد * در رابطه فوق مزدوج جریان جبران‌ساز و $\bar{V}'_{n+1}$ عملگرد مختلط می‌باشد. هدف این پایان‌نامه، یافتن اندازه بهینه Q_{DSTAT} در بهترین باس شبکه با هدف کمینه نمودن تابع هدف که در فصل چهارم به آن پرداخته خواهد شد، می‌باشد. به منظور ارزیابی تحلیل پخش بار شبکه توزیع با در نظر گرفتن جبران‌ساز استاتیک توزیع برای هر تکرار جاروب رو به جلو (پیشرو)، مقدار توان راکتیو را می‌توان با معادلات بالا محاسبه نمود که در نهایت بعد از جایابی بهینه، جبران‌ساز اثر مقدار توان راکتیو بارهای سیستم را کاهش می‌دهد و جبران‌سازی توسط جبران‌ساز انجام می‌گیرد. ولتاژهای سیستم با توجه به معیار همگرایی در هر تکرار بروز می‌شوند. تزریق توان راکتیو توسط جبران‌ساز استاتیک توزیع برای گام پسرو و با هدف تعیین پخش بار در رفت و برگشت به عقب در تکرار بعدی اعمال می‌شود. میزان توان راکتیو که قرار است در سیستم جبران شود، از رابطه (۱۶-۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q_{Load_{n+1}}^{new} = jQ_{Load_{n+1}} - jQ_{DSTAT_{n+1}} \quad n = 1, \dots, m \quad (۱۶-۲)$$

Q_{DSTAT} از رابطه (۱۵-۲) قابل محاسبه می‌باشد. همچنین در رابطه فوق Q_{Load} و Q^{new} به ترتیب تقاضای توان راکتیو قبل و بعد از جایگذاری جبران‌ساز استاتیک توزیع در باس $n+1$ ام می‌باشد.

۲-۴- مدل‌سازی بار در سیستم توزیع

یکی از مهم‌ترین بخش مدل‌سازی بار، تعیین پارامترهای مدل بار می‌باشد. مدل استاتیکی بار برای مسائل پخش بار و محاسبه تلفات خطوط و سایر عملیات‌ها روی شبکه در حالت مانا^۱ بکار می‌رود. در پخش بار متداول، توان اکتیو و راکتیو بارها به صورت توان ثابت در نظر گرفته می‌شود در حالی که در عمل بارها وابسته به ولتاژ می‌باشند زیرا اندازه ولتاژ باس‌های سیستم بر بارهای اکتیو و راکتیو سیستم تأثیر می‌گذارد. در این پایان‌نامه، از مدل بار نمایی وابسته به ولتاژ برای تست روش پیشنهادی جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شرایط واقعی بهره‌برداری استفاده شده‌است. به طور کلی بارها به سه نوع مختلف تقسیم بندی می‌شوند که شامل بارهای صنعتی، مسکونی و تجاری می‌باشند. مدل بار وابسته به ولتاژ یک مدل بار استاتیکی است که نشان‌دهنده وابستگی بارهای سیستم‌های قدرت توزیع با ولتاژ بصورت مدل ریاضی نمایی در روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲) بیان می‌گردد [۷]:

$$P_i = P_{0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^\alpha \quad (۱۷-۲)$$

$$Q_i = Q_{0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^\beta \quad (۱۸-۲)$$

در روابط فوق P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو در باس i هستند. P_{0i} و Q_{0i} نیز توان‌های اکتیو و راکتیو باس i قبل از اعمال ضرایب وابستگی بارها به ولتاژ هستند. V_i و V_{0i} به ترتیب ولتاژ واقعی و نامی باس i است. پارامترهای مدل‌سازی توان‌های راکتیو و اکتیو بار به ترتیب α و β می‌باشند [۸]. مقادیر

¹ Steady State

پیشنهادی ضرائب مدل سازی نمایی انواع مختلف بار از جمله بارهای صنعتی، مسکونی و تجاری در جدول (۱-۲) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱-۲): انواع بار و مقادیر ضرایب مدل نمایی [۸-۹].

مدل های مختلف بار	α	β
بارهای توان ثابت	۰	۰
بارهای مسکونی	۰/۹۲	۴/۰۴
بارهای صنعتی	۰/۱۸	۶
بارهای تجاری	۱/۵۱	۳/۴

۲-۵- مدل سازی بارهای غیرخطی

یکی از ساده ترین و واقعی ترین روش برای مدل سازی بارهای غیرخطی در مسئله پخش بار هارمونیک، مبتنی بر آزمایشات و اندازه گیری می باشد که از آن به عنوان مدل عملی نام برده می شود. در واقع منظور از مدل عملی، استفاده از مقادیر اندازه گیری شده جریان تزریق شده توسط بارهای غیرخطی می باشد. در این مدل سازی، هارمونیک های تولیدی توسط بارهای غیرخطی توسط جدولی از جریان هارمونیک توسط بار مدل می شود که اصطلاحاً به آنها طیف هارمونیک نیز گفته می شود. از مزیت های این روش، سهولت در پیاده سازی، اجرای سریع و نتایج واقعی تر است ولیکن قابلیت تبدیل اطلاعات در بارهای غیرخطی متعدد را ندارد و بایستی بارهایی که طیف هارمونیک آنها مشخص نمی باشد، اندازه گیری نمود. در بخش پیوست جدول (پ-۴) طیف هارمونیک برخی از مبدل های شش پالسه مورد استفاده برای تحلیل هارمونیک نشان می دهد [۱۰].

به طور کلی مدل سازی بارهای غیرخطی به منظور تحلیل رفتار الکتریکی آنها به چهار دسته تقسیم بندی می شوند:

۱- مدل معادلاتی

۲- مدل بلوک دیاگرام

۳- مدل تخمینی

۴- مدل عملی

جهت بررسی و اطلاعات بیشتر در زمینه مدل سازی بارهای غیرخطی می توان به [۱۱] مراجعه نمود.

۲-۶- پخش بار شبکه توزیع

در این بخش، معادلات مربوط به پخش بار جاروب پسرو-پیشرو با در نظر گرفتن مدل بار در محیط هارمونیک بعنوان روشی موثر در شبکه های توزیع ارائه می گردد. در انتهای هر بخش جهت درک بهتر مراحل، روندنمای الگوریتم حل در شکل (۲-۶) و (۲-۷) رسم می گردد. در چند دهه اخیر، تکنیک های حل پخش بار موثر و قابل اعتماد، مانند گاوس-سایدل، نیوتن-رافسون و پخش بار مجزای سریع، توسعه یافته و به طور گسترده برای بهره برداری، کنترل و برنامه ریزی سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته اند. با این حال در مطالعات اخیر نشان داده شده است که این روش ها در تحلیل سیستم های توزیع به دلیل ویژگی های خاص چنین شبکه هایی یعنی ساختار شعاعی، نسبت بالای R/X ، خطوط توسعه نیافته و بارهای نامتعادل، در برخی موارد ممکن است واگرا شوند. علاوه بر این، ماتریس های شبکه توزیع به طور کلی غیرشرطی هستند و این امر باعث ایجاد مشکلات محاسباتی برای الگوریتم پخش بارهای مرسوم در سیستم های قدرت شود [۱۰].

این ویژگی ها محاسبه پخش بار در سیستم های توزیع را در مقایسه با تحلیل پخش بار سیستم های انتقال، متفاوت و تا حدودی دشوار می سازد. به طور معمول محاسبه پخش بار، بر این فرض استوار می باشد که تمامی بارهای سیستم خطی هستند و تنها شامل مولفه های فرکانس اصلی ولتاژ و جریان هستند [۱۱].

بهره برداری از ادوات الکترونیک قدرت و بارهای غیرخطی که جریان ها و ولتاژهای هارمونیک را در سیستم تولید می کنند، نیاز به توسعه روش های جدید و همچنین تطبیق روش های فعلی، به منظور بررسی اثر هارمونیک ها لازم می باشد. [۱۲].

الگوریتم پخش بار پسرو-پیشرو یکی از موفق‌ترین روش‌های تحلیل پخش بار برای شبکه‌های توزیع شعاعی و در برخی موارد شبکه‌های حلقوی ضعیف است که شامل دو فرآیند محاسباتی در هر تکرار است. در فرآیند رو به عقب (پسرو)، مراحل محاسبه شارش توان یا جریان است که از باس‌های انتهایی شروع می‌شوند و به سمت باس متصل به باس مرجع حرکت می‌کنند. در همین مرحله، پس از محاسبه جریان باس‌های شبکه، جریان خطوط محاسبه می‌گردد.

در مرحله حرکت رو به جلو، ولتاژ در هر باس را از باس مرجع سیستم که در ابتدا برابر ۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود، به گره‌های انتهایی شبکه محاسبه می‌کند. پس از هر تکرار، مقدار تغییرات ولتاژ باس‌ها جهت تعیین معیار همگرایی و دقت پخش بار محاسبه می‌شود [۱۳].

اولین گام در تحلیل پخش بار پیشنهادی، محاسبه جریان تزریق در هر باس است که با استفاده از معادله (۱۹-۲) محاسبه می‌شود. شکل (۵-۲) مدار معادل شبکه توزیع را نشان می‌دهد. ابتدا با فرض اینکه ولتاژ تمامی باس‌ها برابر ۱ پریونیت می‌باشد، جریان بارها محاسبه می‌گردد:

$$I_i^{(k)} = \text{conj} \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right) = \text{conj} \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^{(k-1)}} \right), \quad i = 2, 3, 4 \dots n \quad (19-2)$$

که در رابطه فوق $I_i^{(k)}$ جریان تزریق در باس i و تکرار k در پخش بار می‌باشد. S_i توان بارهای باس i است که شامل توان اکتیو (P) و راکتیو (Q) می‌باشد و $V_i^{(k-1)}$ نیز ولتاژ باس i در تکرار $k-1$ می‌باشد.

مرحله اول، حرکت رو به عقب (پسرو) است. با استفاده از معادله (۲۰-۲) ماتریس مشخصه شبکه از آخرین شاخه مرتب می‌شود که نشان‌دهنده نحوه اتصال باس‌های شبکه به یکدیگر می‌باشد.

$$J_{i-1,i}^{(k)} = I_i^{(k)} + \sum (J_{i,i+1}^{(k)}) \quad (20-2)$$

در رابطه فوق، $J_{i-1,i}^{(k)}$ جریان شاخه‌ای که باس i را به باس بالادست آن یعنی باس $i-1$ متصل می‌کند. و $J_{i,i+1}^{(k)}$ نیز مجموع تمام جریان‌های شاخه‌های منشعب از باس i می‌باشد.

گام بعدی در تحلیل پخش بار پسرو-پیشرو، حرکت رو به جلو (پیشرو) است که جریان را برای هر گره با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌کند.

گام بعدی حرکت رو به جلو (پیشرو) است که جریان را برای هر گره با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌کند:

$$V_i^{(k)} = V_{i-1}^{(k)} - J_{i-1,i}^{(k)} Z_{i-1,i} \quad (2-21)$$

ولتاژ باس i و باس بالادست آن $i-1$ ، به ترتیب برابر $V_i^{(k)}$ و $V_{i-1}^{(k)}$ در تکرار شماره k می‌باشد.

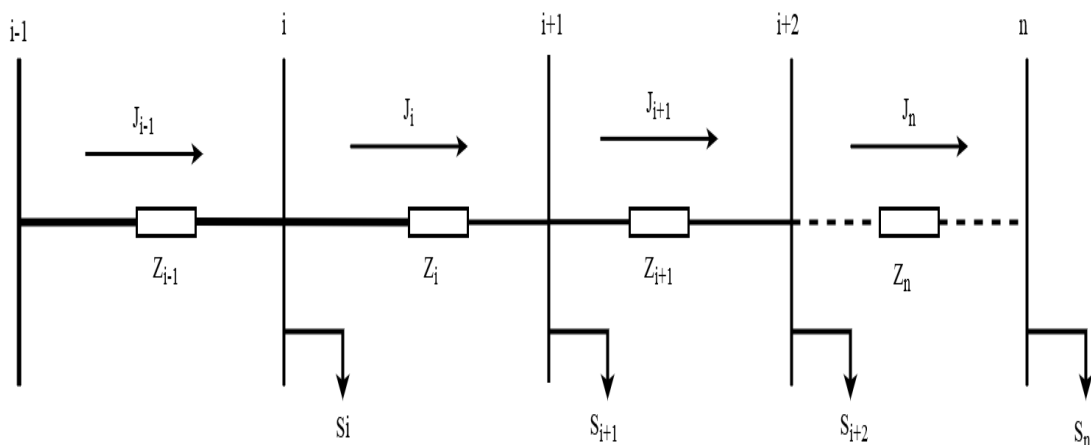
$J_{i-1,i}^{(k)}$ جریان خطوط بین باس های i و $i-1$ و همچنین $Z_{i-1,i}$ امپدانس خطوط سیستم می‌باشد.

رایج‌ترین معیارهای توقف برای پخش بار پسرو-پیشرو، مقدار دقت بدست آمده از حاصل اختلاف ولتاژ باس‌های شبکه بین دو تکرار متوالی و تعداد تکرار مشخص (K_{spec}) است.

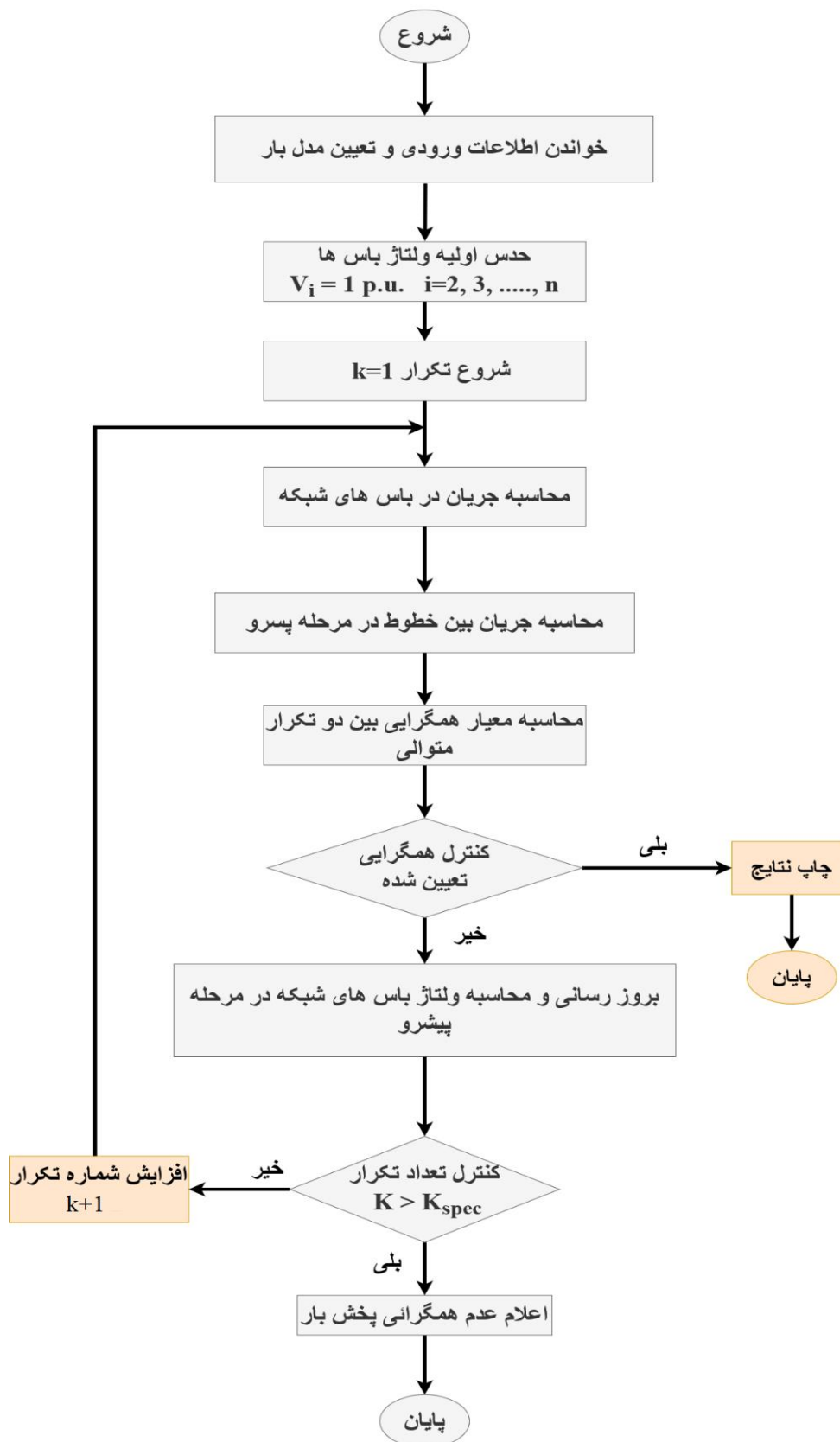
الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که شرایط معادله (2-22) برآورده می‌شوند [۱۴]:

$$\Delta V_{i+1}^k = |abs(V_{i+1}^k) - abs(V_{i+1}^{k-1})|, \max(\Delta V_{i+1}^k) < \varepsilon \quad (2-22)$$

ε در این پایان‌نامه، برابر 0.0001 در نظر گرفته شده است.



شکل (2-۵): مدار معادل شبکه توزیع [۱۴].



شکل (۲-۶): روندنمای پخش بار پسرو پیشرو با در نظر گرفتن حضور بارهای وابسته به ولتاژ [۱۵].

۲-۷- پخش بار پسر-پیشرو در محیط هارمونیکی

در این بخش، پخش بار پسر-پیشرو در محیط هارمونیکی، با در نظر داشتن بارهای غیرخطی برای محاسبات مشخصه‌های سیستم در فرکانس اصلی شبکه و آنالیز هارمونیکی در سیستم‌های توزیع شعاعی معرفی می‌شود. هدف از بکارگیری پخش بار جاروب پسر-پیشرو هارمونیکی، جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع به منظور آنالیز و کاهش اعوجاج‌های هارمونیکی در سیستم‌های توزیع با وجود بارهای خطی و غیرخطی می‌باشد. در این پایان‌نامه روشی برای تحلیل هارمونیکی با در نظر گرفتن بارهای غیرخطی مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم استفاده شده است. در این روش ولتاژ هارمونیکی ایجاد شده توسط منابع غیرخطی برای تمامی مرتبه‌های هارمونیکی بار محاسبه می‌گردد.

در ابتدا چندین فرض عملی در مسئله اتخاذ شده است:

- سیستم توزیع متقارن و متعادل است.
 - ولتاژ در پست اصلی شبکه ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است.
 - تمامی بارهای شبکه بصورت بارهای وابسته به ولتاژ مدل‌سازی شده‌اند.
 - در فرکانس‌های هارمونیک، بارهای غیرخطی به عنوان منابع جریان هارمونیک با طیف هارمونیکی مشخص در نظر گرفته شده است.
- به طور مرسوم، پخش بار در فرکانس اصلی سیستم، نقطه بهره‌برداری اصلی سیستم را نشان می‌دهد. جریان و ولتاژ هارمونیکی بارهای غیرخطی را می‌توان به عنوان یک تابع ارزیابی نمود که به مشخصات شبکه و پارامتر بارهای غیرخطی مانند طیف هارمونیکی آنها بستگی دارد.
- همانطور که در بخش ۲-۵ ذکر شد، مبدل‌های الکترونیک قدرت که در سیستم توزیع استفاده می‌شوند، می‌توانند بعنوان مولدهای هارمونیک مدل‌سازی شوند. در این مورد، روش تکراری مورد استفاده در اینجا با روشی که در مرحله پخش بار در فرکانس اصلی شبکه در بخش ۲-۶ توضیح داده شد متفاوت است، زیرا تزریق جریان هارمونیک از بارهای غیرخطی، در طول کل فرآیند پخش بار ثابت می‌ماند، که به طور

کلی در دو مرحله اصلی زیر، شاخص اصلی اعوجاج هارمونیکی محاسبه و تحلیل می‌گردد [۱۶]. شکل

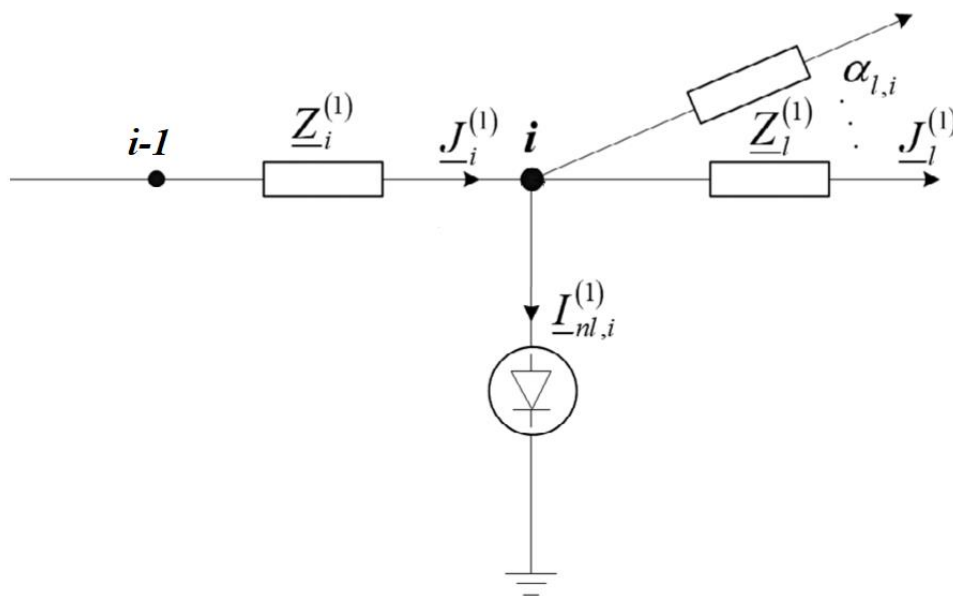
(۲-۷) مدار معادل سیستم توزیع با در نظر گرفتن بار غیرخطی را نشان می‌دهد.

الف) مرحله اول: محاسبه جریان هارمونیکی بارهای غیرخطی

ابتدا جریان هارمونیک مرتبه h ام تزریق شده توسط بار غیرخطی در باس i شبکه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_{nl,i}^{(h)} = C(h)I_{nl,i} \quad i = 2, 3, 4, \dots, n \quad h = 1, 3, 5, \dots, h\text{-th} \quad (23-2)$$

در رابطه (۲۳-۲) $I_{nl,i}^{(h)}$ مقدار جریان اصلی تزریق شده توسط بار غیرخطی در باس i است و $C(h)$ نسبت جریان هارمونیک مرتبه h مشخص بار غیرخطی به مقدار اصلی آن است که از این مشخصه به طیف هارمونیکی هر بار نام برده می‌شود. اطلاعات مربوط به طیف هارمونیکی هر یک از بارهای غیرخطی مورد استفاده در پیوست آورده شده است [۱۷-۱۹].



شکل (۲-۷): مدار معادل سیستم توزیع با وجود بار غیرخطی [۲۰].

ب) مرحله دوم: محاسبه ولتاژ هارمونیک

در این مرحله با شروع از باس منبع تغذیه شبکه (پست توزیع) که ولتاژ هارمونیک در آن برابر با ۰ است. در گام پیشرو، حرکت رو به جلو به سمت باس‌های انتهایی سیستم، ولتاژهای هارمونیک در تمام باس‌ها از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$(V_i^{(h)})^{(k)} = -Z_{(i)}^{(h)} \cdot (J_i^{(h)})^{(k)} \quad (24-2)$$

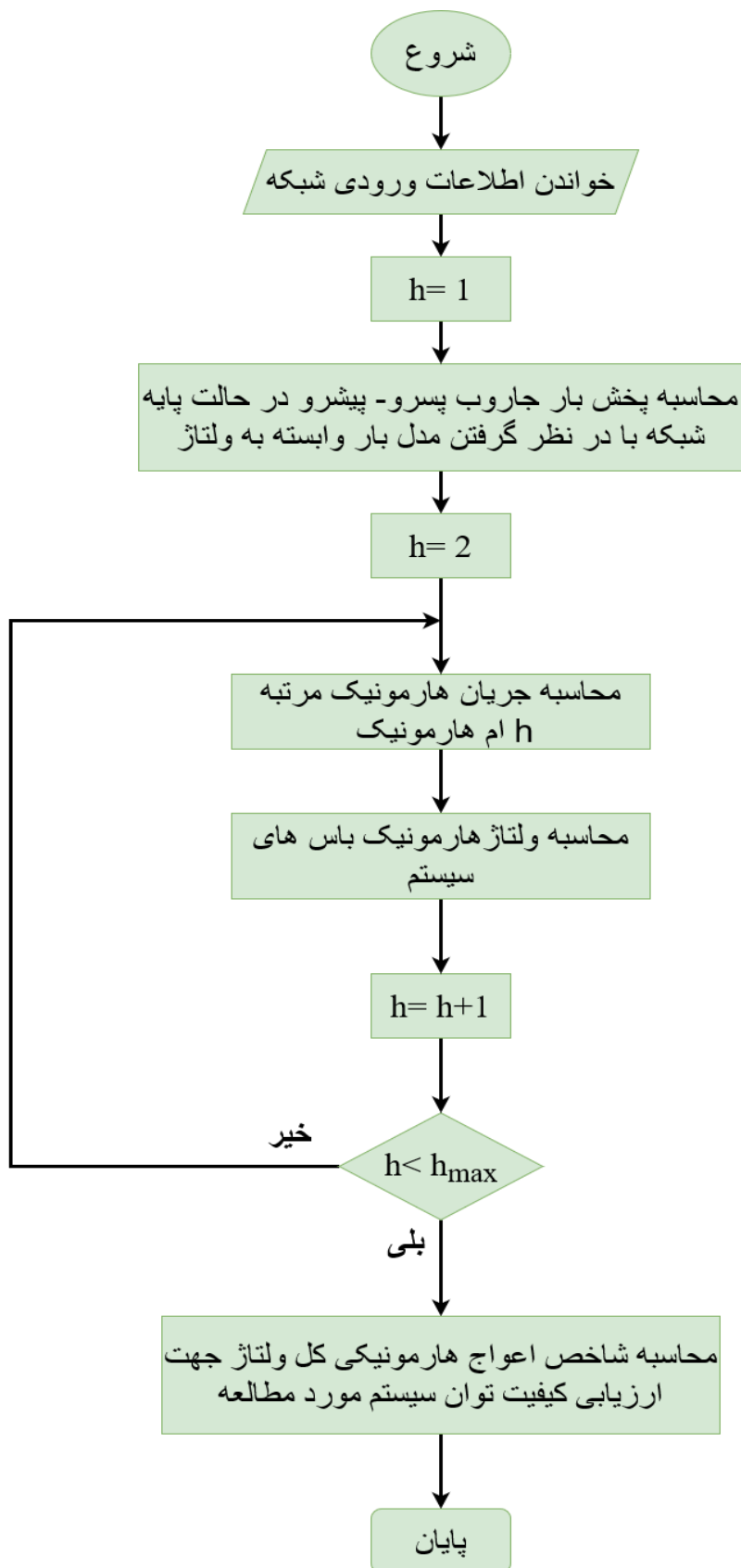
در رابطه فوق، Z امپدانس خط i در هارمونیک مرتبه h ام است و J ماتریس مقادیر جریان شاخه‌های سیستم در مرتبه هارمونیک h ام در تکرار k است. همانند پخش بار اساسی شبکه همگرایی برای هر مرتبه فرکانس هارمونیک محاسبه می‌گردد تا معیار پایان الگوریتم برآورده شود. در گام آخر نیز، شرط بررسی تمامی مرتبه‌های هارمونیک ($h_{\max}$) در تحلیل پخش بار بررسی می‌گردد. پس از اتمام فرآیند حل پخش بار پسرو-پیشرو هارمونیک، شاخص اعوجاج هارمونیک کل (THD) محاسبه می‌گردد. این شاخص یکی از رایج‌ترین شاخص‌های هارمونیک می‌باشد که به طور گسترده برای توصیف مسائل کیفیت توان در سیستم‌های انتقال و توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای هر باس، مقادیر اعوجاج هارمونیک ولتاژ کل (THD_v) به صورت رابطه (25-2) تعریف می‌شود [20]:

$$THD_{v,i} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} (V_i^{(h)})^2}}{V_i^1} \times 100 \quad (25-2)$$

طبق استاندارد IEEE-519-2014، سطح THD_v سیستم‌های توزیع زیر سطح ولتاژ ۶۹ کیلوولت، باید کمتر از ۵ درصد باشد [21].

شکل (2-7) روندنمای مراحل اجرای پخش بار پسرو-پیشرو هارمونیک را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۲): روندنمای پخش بار جاروب پسرو پیشرو هارمونیکی [۱۶].

۲-۸- جمع‌بندی

جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه‌های توزیع به واسطه روش‌های کنترلی آن، باعث جبران‌سازی اعوجاج هارمونیکی، جبران‌سازی توان راکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان بطور مناسب انجام می‌گیرد. علاوه بر این در زمینه حفاظت از شبکه در مقابل اغتشاشات سیستم می‌تواند نقش موثری داشته باشد.

در این فصل، به بررسی مدل جبران‌ساز استاتیک توزیع در مسئله پخش بار جاروب پسرو-پیشرو پرداخته و مراحل حل پخش بار در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار خطی و غیرخطی بررسی شد. به منظور بررسی تحلیل هارمونیک در شبکه، به صورت مجزا سهم هر بار غیرخطی در مرتبه‌های هارمونیکی، برای بارهای مشخص مولد هارمونیک در شبکه محاسبه و مشخص می‌شود. با کاهش اثر بارهای غیرخطی توسط جبران‌ساز توان راکتیو منجر به کاهش جریان و ولتاژ هارمونیکی کل سیستم می‌گردد که موجب کاهش اعوجاج هارمونیکی در کل شبکه می‌شود. لذا یافتن بهترین مکان و اندازه برای این منظور اهمیت فراوانی دارد.

در فصل بعد، مطالعات صورت گرفته در زمینه جایابی و اندازه‌یابی جبران‌ساز استاتیک توزیع توسط دیگر محققین بررسی می‌گردد.

فصل سوم

مروری بر کارهای انجام شده در زمینه جالبی جبران ساز

استاتیک توزیع

۳-۱- مقدمه

جبران‌ساز استاتیک توزیع یکی از ادوات سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر در سطح شبکه توزیع، با تزریق توان پیوسته به کاهش اغتشاشات توان کمک می‌نماید. جایابی و اندازه‌یابی جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم‌های توزیع شعاعی به دلیل تقاضای انرژی الکتریکی بیشتر و محدودیت‌های مختلف فنی و اقتصادی بر روی توسعه شبکه‌های موجود مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۲]. در این قسمت از پایان‌نامه، به بیان مفاهیم روش‌های استفاده شده در مسئله جایابی بهینه جبران‌سازهای توان در شبکه‌های توزیع پرداخته می‌شود. در ادامه مروری بر مقالات ارائه شده در زمینه جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از روش‌های تحلیلی، فراابتکاری و ترکیبی پرداخته می‌شود.

۳-۲- روش‌های بهینه‌سازی در مسائل جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع

تکنولوژی نوین جبران‌سازهای توان در کاهش مشکلات سیستم‌های انتقال و توزیع موثر بوده‌اند. هزینه سرمایه‌گذاری ادوات توان سفارشی بعثت تکنولوژی نوین آنها بسیار زیاد است، از این رو مکان و اندازه مناسب برای اطمینان از سرمایه‌گذاری کافی برای اپراتورهای شبکه ضروری است. در برخی موارد جایابی همزمان چندین جبران‌ساز توان با مکان و اندازه بهینه ممکن است بهبود بیشتری را در عملکرد کلی سیستم به ویژه بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش پایداری ولتاژ، به حداقل رساندن تلفات توان و اعوجاج هارمونیک فراهم کند. علاوه بر این، جنبه‌های اقتصادی بر اساس قابلیت اطمینان، کیفیت و در دسترس بودن سیستم ویژگی‌های اضافی هستند که نیاز به دستیابی به مکان و اندازه بهینه ادوات جبران‌ساز توان در سیستم‌های قدرت را برجسته می‌کنند که در این سیستم قادر به کنترل پارامترهای کلیدی و بهبود ویژگی‌های شبکه قدرت می‌باشد.

حل مسئله بهینه‌سازی که در آن به جستجو برای یافتن بهترین یا بهینه‌ترین مکان و اندازه جبران‌سازهای توان راکتیو مربوط می‌شود، توجه بسیاری از محققان را در طول سال‌های اخیر به خود

جلب کرده است. در بیشتر مطالعات، بیش از یک هدف در مسئله جایابی اندازه‌یابی بهینه در نظر گرفته می‌شود و این مسئله به عنوان مسئله بهینه‌سازی چند هدفه شناخته می‌شود.

مسائل بهینه‌سازی در این زمینه با استفاده از روش مجموع ریاضی، توابع وزنی، تکنیک‌های برنامه‌ریزی هدف‌فازی و مفهوم پرتو بیان می‌شوند. توابع هدف مشترک ارائه‌شده در اکثر تحقیقات اخیر با هدف کمینه کردن تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود پایداری سیستم و ارائه شده‌اند که در این پایان‌نامه علاوه بر این اهداف، کاهش و یا حذف اعوجاج هارمونیکی بعنوان یکی از اهداف اصلی در زمینه بهبود کیفیت توان سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

چندین عامل مختلف مانند تعادل توان اکتیو و راکتیو تقاضای بار و تلفات، محدودیت اندازه ولتاژ باس و زاویه باس، پخش بار، حد پایداری ولتاژ، محدودیت تولید توان راکتیو، هزینه نصب، بهره‌برداری و تعمیرات جبران‌ساز توان، به طور مکرر در اکثر مطالعات به عنوان محدودیت‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند که در این پایان‌نامه، حد مجاز اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ در سیستم‌های دارای بار غیرخطی نیز در نظر گرفته شده است. اهداف بهینه‌سازی را می‌توان با ارزیابی سیستم قدرت تحت شرایط مختلف مانند تغییرات بار و مشخصه انواع مدل‌های بار استاتیکی وابسته به ولتاژ در این مسئله بدست آورد.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه مسائل بهینه‌سازی، روش الگوریتم‌های فراابتکاری در اکثر موارد، نتایج بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی داشته‌اند و به این دلیل می‌باشد که این روش‌ها از ساده‌سازی یا ایجاد فرضیات اضافی در مورد مسئله اصلی خودداری می‌کنند. یک روش اکتشافی- استخراجی^۱ مانند الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به عنوان روشی در نظر گرفته شود که به احتمال زیاد یک راه‌حل عملی بسیار خوب را محاسبه می‌کند، اما نه لزوماً یک راه‌حل بهینه، برای یک مسئله خاص در نظر گرفته شده‌است. هیچ تضمینی در مورد کیفیت راه حل به دست آمده نمی‌توان ارائه کرد، اما یک روش اکتشافی به خوبی طراحی شده معمولاً می‌تواند راه حلی را ارائه دهد که حداقل

¹ Explore- Exploit

تقریباً بهینه باشد. روش‌های اکتشافی اغلب به عنوان الگوریتم تکراری در نظر گرفته می‌شوند، که در آن هر تکرار شامل انجام جستجو برای یک راه‌حل جدید است که ممکن است بهتر از بهترین راه‌حل پیدا شده در گذشته باشد. پس از زمانی که الگوریتم خاتمه می‌یابد، راه‌حلی که ارائه می‌دهد بهترین راه‌حل است که در طول هر تکرار یافت می‌شود [۲۳].

به طور کلی تکنیک‌های مختلفی برای حل مسئله محل و اندازه بهینه جبران‌سازهای توان در تحقیقات متعدد ارائه شده‌است که می‌توان آن‌ها را به چهار گروه تقسیم کرد: (۱) روش‌های مبتنی تحلیلی، (۲) روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی احتمالی، (۳) روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری و (۴) روش‌های ترکیبی [۲۴]. رویکردهای تحلیلی یا رویکردهای مبتنی بر حساسیت مانند ضرائب حساسیت تلفات توان، پایداری ولتاژ، پروفیل ولتاژ و امنیت خطوط می‌باشد که این روش‌ها با کارایی ساده و قابل اعتماد که برای شناسایی راه‌حل‌های بهینه بدون در نظر گرفتن غیرخطی بودن و پیچیدگی سیستم استفاده می‌شوند. به منظور کاهش حجم محاسبات، این الگوریتم‌ها از یک روند تقریبی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کنند، به همین دلیل، این روش‌ها عدم دقت محاسبه و توانایی کافی مسائل جابجایی و اندازه‌یابی همزمان چندین جبران‌ساز توان را ندارند به همین علت به منظور ارائه نتایج دقیق، به بار محاسباتی و ذخیره‌سازی گسترده‌ای نیاز دارد. شکل (۱-۳) تقسیم‌بندی روش‌های بهینه‌سازی را نشان می‌دهد [۲۴]. روش‌های مبتنی مرسوم یا اصطلاحاً سنتی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا^۱، برنامه‌ریزی درجه‌دوم متوالی^۲، نیوتن رافسون^۳ و بسیاری از روش‌های دیگر، ویژگی‌های هم‌گرایی بالایی را ارائه می‌دهند. این الگوریتم‌ها عموماً با تعیین تصادفی راه‌حل اولیه شروع می‌شوند و به سمت راه‌حل بهینه در هر تکرار می‌روند. این الگوریتم‌ها به طور گسترده به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های جستجوی مستقیم^۴ و روش‌های مبتنی بر گرادیان^۵.

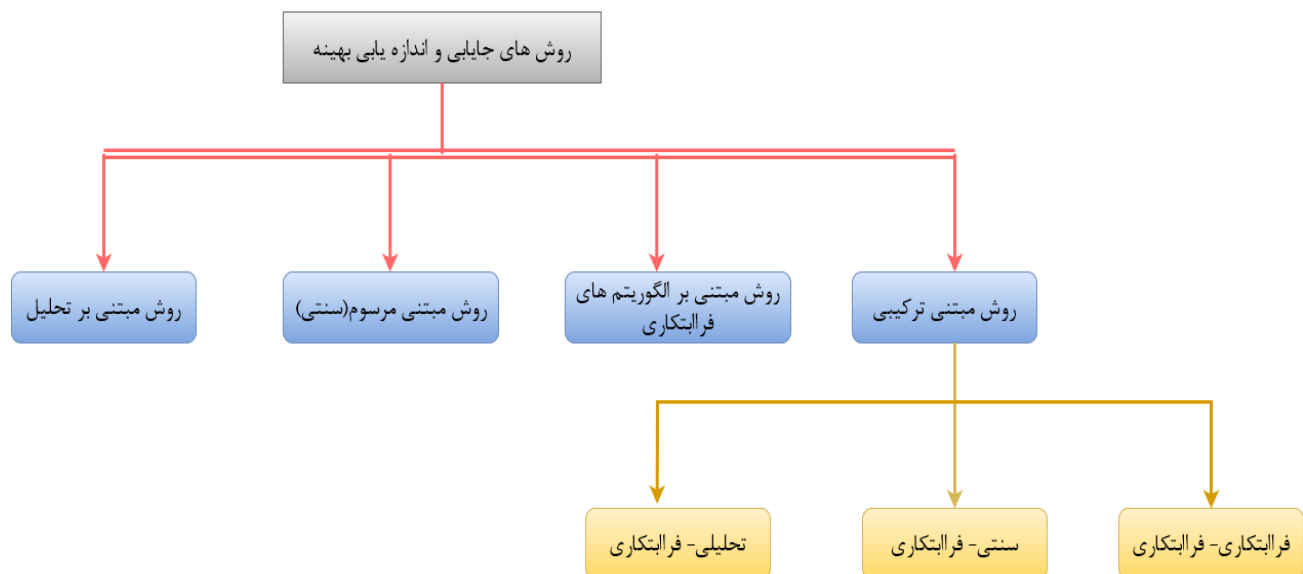
¹ Dynamic Programming

² Sequential Quadratic Programming

³ Newton Raphson

⁴ Direct Search Methods

⁵ Gradient Based Methods



شکل (۳-۱): تقسیم بندی روش های بهینه سازی مسئله جایابی و اندازه یابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع [۴۵].

رویکردهای بهینه سازی سنتی هیچ تضمینی ندارند که راه حل نهایی به دست آمده یک راه حل بهینه سراسری است، زیرا جواب بهینه نهایی به مقدار انتخاب پارامترهای تصادفی اولیه وابسته اند و این یکی از معایب این روش بحساب می آید.

الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم های هستند که در حل هر مسئله ای مستقل بوده و قادر به ارائه یک راه حل بهینه سراسری می باشند که معمولاً یک روش الهام گرفته از رفتار طبیعت هستند. الگوریتم های الهام گرفته از زیست شناسی و طبیعت براساس سه مفهوم دسته بندی می شوند: (۱) تکاملی، (۲) هوش مبتنی بر ازدحام ذرات و (۳) الگوریتم های هوش مبتنی بر گیاه.

الگوریتم های تکاملی در بهینه سازی فراابتکاری مبتنی بر یک جمعیت عمومی هستند که با جمعیت تصادفی اولیه آغاز می شوند.

الگوریتم ها از تکامل بیولوژیکی الهام گرفته اند، برای مثال جهش، تولید مثل، ترکیب مجدد و انتخاب که به طور مکرر جمعیتی از راه حل ها برای حل مشکل بهینه سازی تکامل داده و بهترین افراد تا زمانی که معیارهای خاتمه برآورده شوند به نسل بعدی منتقل می شوند. الگوریتم ژنتیک، برنامه نویسی تکاملی^۱،

استراتژی‌های تکاملی^۱ و برنامه‌نویسی ژنتیک^۲ تحت الگوریتم‌های تکاملی طبقه‌بندی می‌شوند و در میان این الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیک در این پایان‌نامه برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده و با روش پیشنهادی مقایسه می‌گردد.

الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر ازدحام ذرات بر تقلید از رفتار اجتماعی حیوانات بدون کنترل متمرکز است که عوامل موثر در این الگوریتم‌ها بر اساس اطلاعات محلی و تعامل با سایر عوامل و محیط، آنها برای دستیابی به یک هدف مشترک عمل می‌کنند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ الگوریتم پایه برای اکثر الگوریتم‌های مبتنی بر ازدحام و همچنین یکی از ترجیح داده شده‌ترین الگوریتم‌ها حل مسائل بهینه‌سازی جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز توان در چند دهه گذشته است [۲۴].

در ادامه به تعریف روش‌های تحلیلی و ترکیب آنها با روش‌های فراابتکاری در مسئله جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع پرداخته خواهد شد. در روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی پیش‌شناسایی و تخمین باس یا خطوط کاندید شبکه برای مکان بهینه جبران‌سازها از طریق این روش‌ها و روش‌های دیگر بهینه‌سازی مانند الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش فضای جستجو و افزایش دقت محاسبات برای حل مسائل بهینه‌سازی همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد ضروری می‌باشد. این مکان‌های کاندید به عنوان خطوط یا باس‌های بحرانی، ناسالم، ضعیف، آسیب‌پذیر شناخته می‌شوند که منجر به کاهش کیفیت توان و قابلیت اطمینان شبکه می‌شوند. در بیشتر مطالعات انجام‌شده در این زمینه، این خطوط یا باس‌های کاندید مستعد جایابی معمولاً دور از منبع توان می‌باشند. نتایج به‌دست‌آمده از رویکردهای تحلیلی ممکن است به راه‌حل‌های بهینه منجر نشود، زیرا نتایج بر اساس توپولوژی شبکه متفاوت است. این محدودیت را می‌توان با الگوریتم‌های فراابتکاری حل کرد که در آن الگوریتم‌ها برای دستیابی به مکان و اندازه بهینه جبران‌ساز توان براساس هدف (های) اتخاذ شده در تابع هدف اصلی کمک می‌کنند.

1 Evolutionary Strategies

2 Genetic Programming

3 Particle Swarm Optimization

۳-۲-۱- روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی در مسائل جایابی بهینه جبران‌ساز

استاتیک توزیع

در [۲۳] مقایسه روش جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع با شاخص‌های پایداری ولتاژ^۱ و تلفات توان^۲ با اندازه‌یابی تکنیک محاسبه تغییرات^۳ جهت افزایش بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان در شبکه توزیع شعاعی ارائه گردیده است. نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های پایداری ولتاژ، درصد کاهش تلفات توان در مقایسه با مطالعاتی که از شاخص‌های پایداری^۴ عملکرد بهتری داشته است. در [۲۶] مسئله جایابی و اندازه‌یابی بهینه با استفاده از شاخص تلفات توان^۵ (PLI) جهت کاهش تلفات توان خطوط شبکه توزیع شعاعی و بهبود پروفیل ولتاژ ارائه گردیده است. نتایج کاهش تلفات خط و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ و پارامترهای مختلف دیگر را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی و جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه توزیع حلقوی به کمک شاخص پایداری ولتاژ جدید^۶ با سناریوهای تغییرات فصلی بار و رشد بار با توابع هدف بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات توان، بهبود پایداری ولتاژ، هزینه سرمایه‌گذاری نصب تجهیز و هزینه ذخیره ساز انرژی انجام شده است. جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع براساس روش شاخص پایداری ولتاژ جدید پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی عملکرد بهتری داشته است، زیرا در این مسئله اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع برای تزریق توان راکتیو پایین‌تر بوده و در نتیجه هزینه تجهیز نیز پایین‌تر می‌شود [۲۷].

استفاده از تکنیک‌های تحلیلی توسعه یافته برای تعیین اندازه و جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم‌های توزیع شعاعی برای حل مسائل بهینه‌سازی ساده تر و دستیابی به جواب بهینه نهایی با

¹ Voltage Stability Index

² Power Stability Index

³ Variational Technique

⁴ Stability Index

⁵ Power Loss Index

⁶ New Voltage Stability Index

کمک شاخص پایداری توان^۱ برای تعیین مکان بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع استفاده می‌شود که باس‌های کاندید را شناسایی می‌کند. تحلیل حساسیت برای تعیین اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع استفاده می‌شود، اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع به تدریج با اندازه پله‌های تعیین شده تا دستیابی به کم‌ترین تلفات افزایش می‌یابد که تکنیک محاسبه تغییرات معرفی می‌شود [۲۸].

از تکنیک تحلیلی ضریب حساسیت تلفات برای یافتن اندازه و محل بهینه تولیدات پراکنده و جایگذاری جبران‌کننده استاتیک توزیع در یک شبکه توزیع استفاده شده است. جایابی بهینه همزمان منجر به کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ را در یک سیستم توزیع شعاعی را به دنبال خواهد داشت. این تکنیک بر روی یک سیستم توزیع شعاعی ۳۳ باسه از طریق تست شده و در نتیجه بهترین ظرفیت ممکن و مکان بهینه برای منبع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع تعیین می‌شود [۲۹].

۳-۲-۲- روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در مسائل جایابی بهینه جبران‌ساز

استاتیک توزیع

در مرجع [۳۰] جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با کمک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش یادگیری^۲ انجام شده است که تابع چند هدفه آن، شامل سه هدف مجزا است که به شاخص‌های تأثیر گذار در سیستم‌های توزیع مرتبط تبدیل می‌شوند. برای اینکه مسئله به طور همزمان با تجزیه و تحلیل ساده با استفاده از ضرائب هم وزنی به یک هدف واحد تبدیل می‌شود. تابع هدف شامل تلفات توان، انحراف ولتاژ باس از مقدار مرجع و شاخص تعادل بارگذاری^۳ می‌باشد. الگوریتم مورد استفاده عملکرد بهتری در مسئله با تعداد توابع هدف زیاد کاربرد دارد و منجر به کاهش تلفات توان، بارگذاری شبکه و پایداری ولتاژ شده است.

^۱ Power Stability Index

^۲ Teaching Learning Optimization Algorithm

^۳ Load Balancing Index

با افزایش روزافزون ادوات الکترونیک قدرت و بارهای غیرخطی، مطالعات اقتصادی و فنی برای به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری جبران‌ساز استاتیک توزیع و اعوجاج‌های هارمونیک‌ی جهت بهبود کیفیت توان مورد پژوهش محققان گرفته است. برای دستیابی به این هدف، یک مسئله چند هدف پیشنهاد می‌گردد. در روش پیشنهادی، هزینه نصب و بهره‌برداری و اعوجاج هارمونیک‌ی کل^۱ به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. کاربرد این روش براساس یک روش جدید پخش بار هارمونیک‌ی جاروب پسرو-پیشرو با مقایسه جریان ورودی، هارمونیک‌های تولید شده و اثرات خروجی THD بر شبکه ۳۳ باسه $IEEE$ شعاعی را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها و مقایسه نتایج ثابت کرده‌است. روش پیشنهادی قادر به تعیین موثرترین محل جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم توزیع می‌باشد که می‌تواند سطح کیفیت توان را بهبود بخشد. افزایش کیفیت توان سیستم با حداقل کردن THD میسر می‌شود [۳۱].

در [۳۲] تعیین مکان و ظرفیت بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با در نظر گرفتن توابع هدف کاهش تلفات به همراه بهبود پروفیل ولتاژ، صورت گرفته است. توسط الگوریتم فرهنگی^۲ نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از این الگوریتم در جایابی و تعیین ظرفیت جبران‌ساز استاتیک توزیع کمک موثری خواهد نمود. در این روش کمترین تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ حاصل شده است. عدم رسیدن به جواب قطعی با ضرائب وزنی متفاوت در تعیین مکان ادوات جبران‌ساز توان جهت بررسی اهمیت آنها در حل مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

در مرجع [۳۳] برای تعیین محل و اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع از یک عملگر محاسباتی به نام میانگین حداکثر هندسی^۳ برای یک طرح برنامه‌ریزی بلندمدت با استفاده از الگوریتم رقابتی استعماری ارائه شده‌است. هدف اصلی شامل کمینه نمودن تلفات توان، شاخص بهبود پروفیل ولتاژ، شاخص تعدیل بار (کاهش ظرفیت پر شده خطوط) و هزینه سرمایه‌گذاری کل می‌باشد. علاوه بر این، عدم قطعیت بارهای سیستم متعادل با استفاده از یک تکنیک فازی مدل‌سازی گردیده است که می‌تواند

¹ Total Harmonic Distortion

² Cultural Algorithm

³ Max-Geometric Mean

منافع بیشتری از جمله کاهش هزینه‌های شبکه در برنامه‌ریزی بلندمدت پیشنهادی داشته باشد. براساس مقایسه نتایج عددی روش ارائه شده با الگوریتم جستجوی توده باکتریایی^۱ (BFOA)، الگوریتم خفاش^۲ و الگوریتم جستجوی هارمونی^۳، روش ارائه شده نتایج بهتری داشته است.

جایابی و تعیین اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه‌های توزیع شعاعی با هدف کاهش تلفات توان، بهبود عملکرد ولتاژ و قابلیت اطمینان شبکه توسط روش بهینه‌سازی چند هدفه با در نظر گرفتن تغییرات بار ارائه شده است. در این پژوهش جایابی و تعیین اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با در نظر گرفتن انواع مختلف بار مورد بررسی قرار گرفته و همچنین اثر ترکیب قابلیت اطمینان بر شاخص‌های کیفیت توان مانند تلفات توان، حداقل ولتاژ و شاخص انرژی تامین نشده^۴ (ENS) ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تلفات توان و شاخص انرژی تامین نشده کاهش یافته و همچنین پروفیل ولتاژ با تعیین محل و اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ^۵ بهبود می‌یابد. موتورهای صنعتی، ضریب توان^۶ را کاهش می‌دهند. بنابراین نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع در صنایع بزرگ الزامی است. همچنین جبران‌ساز استاتیک توزیع یک دستگاه پر هزینه است بنابراین بهره‌برداری شبکه توزیع باید تحلیل سود اقتصادی را برای بازدهی بیشتر انجام دهد. علاوه بر اینکه مطالعه در حوزه قابلیت اطمینان نسبت به مطالعات پیشین در حوزه بهبود کیفیت توان از اهمیت کمتری برخوردار است. در این پژوهش ارتباط نزدیک شاخص‌های قابلیت اطمینان و شاخص‌های کیفیت توان با یکدیگر در شبکه‌های توزیع را نشان می‌دهد [۳۴]. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی اصلاح شده جستجوی کلاغ^۷ برای به دست آوردن اندازه بهینه و محل انواع مختلف تولیدات پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع در یک سیستم توزیع واقعی ۵۱ باسه

¹ Bacterial Foraging Optimization Algorithm

² Bat Algorithm

³ Harmony Search Algorithm

⁴ Energy Not Supplied

⁵ Whale Optimization Algorithm

⁶ Power Factor

⁷ Modified Crow Search Algorithm

با هدف بهبود ولتاژ سیستم، کاهش تلفات خط، به حداکثر رساندن سود اقتصادی و کاهش سطح آلودگی پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد جایابی بهینه منابع تولید تجدیدپذیر و جبران‌ساز استاتیک توزیع، با در نظر داشتن جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی روش پیشنهادی، بهترین عملکرد از نظر بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات خط در مورد منابع تولید پراکنده بدست می‌آید. پس از بررسی نتایج، استفاده از منابع تولید پراکنده خورشیدی بیش‌ترین سود اقتصادی و کمترین میزان آلودگی زیست محیطی را در مقایسه با سایر موارد پیشنهادی می‌شود [۳۵].

یکپارچه‌سازی بهینه واحدهای الکتریکی، مانند واحدهای تولید پراکنده و جبران‌سازهای توان راکتیو، توسعه قابل‌توجهی از شبکه‌های هوشمند است. این توسعه به طور موثر سیستم شبکه سنتی را تغییر داده و مزایای متعددی در جهت افزایش منافع اقتصادی و کنترل منبع انرژی مستقل استفاده شده است. در توسعه شبکه‌های هوشمند، الگوریتم‌های فراابتکاری یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هستند که به طور گسترده برای کاهش مشکلات سیستم توزیع مانند ناپایداری ولتاژ، تلفات توان و هزینه نصب بالا به کار می‌روند. در [۳۶] یک بررسی جامع از تکنیک‌های فرا ابتکاری برای ادغام بهینه واحدهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع، با در نظر گرفتن مراحل مختلف فرآیند بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. این روش‌ها شامل روش‌هایی برای مدیریت توابع هدف حیاتی و روش‌های ادغام بهینه برای واحدهای الکتریکی مختلف است. این بررسی نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد توسعه الگوریتم‌های فرا ابتکاری کارآمد و کنترل موثر توابع هدف چندگانه را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳- روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی در مسائل جایابی بهینه جبران‌ساز

استاتیک توزیع

با رشد روز افزون بارها، توسعه و بهبود سیستم‌های توزیع ضروریست، زیرا افزایش هزینه‌های ساخت و توسعه شبکه‌های برق، برخی مشکلات جدی مانند افزایش تلفات توان، مشخصات کاهش پروفیل ولتاژ،

ناپایداری ولتاژ و قابلیت اطمینان سیستم در بردارد. یک تکنیک بهینه‌سازی ترکیبی تحلیلی-الگوریتم بهینه‌سازی گرگ^۱ برای محاسبه مکان و اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در [۳۷] پیشنهاد شده است، که در آن هدف اصلی بهبود پروفیل ولتاژ و به حداقل رساندن تلفات توان اکتیو با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری می‌باشد. تکنیک تحلیلی برای تعیین اندازه مناسب جبران‌سازهای استاتیک توزیع استفاده می‌شود، در حالی که الگوریتم مذکور جهت جایابی بهینه استفاده می‌شود. در شبکه‌های ۳۳ و ۶۹ تست برای صحت کارایی روش ترکیبی پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که روش تحلیلی ترکیبی پیشنهادی در جبران توان راکتیو کافی برای کاهش تلفات توان اکتیو در مقایسه با سایر تکنیک‌های موجود کارآمدتر است. در [۳۸] یک روش بهینه‌سازی ترکیبی تحلیلی و فراابتکاری را برای یافتن همزمان جایابی و اندازه‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه‌های توزیع پیشنهاد می‌کند تا تلفات کل را به حداقل برساند. روش‌های تحلیلی ممکن است در برخی مسائل برای یافتن بهترین مکان و ظرفیت جبران‌سازها نامناسب باشد. از اینرو، روش ترکیبی تحلیلی مبتنی بر شاخص پایداری ولتاژ و الگوریتم فراابتکاری سینوس-کسینوس^۲ برای دستیابی به حداقل تلفات و تنظیم ولتاژ سیستم توزیع توسعه داده شده است. در روش پیشنهادی، مکان‌های بهینه با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ انتخاب و ظرفیت‌های بهینه برای منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع در هر باس با استفاده از الگوریتم سینوسی کسینوس ارزیابی می‌شود. روش بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهادی به طور جامع با سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی تحلیلی و فراابتکاری موجود برای اثبات اثربخشی آن مقایسه می‌شود.

¹ Coyote Optimization Algorithm

² Sine Cosine Algorithm

۳-۳- جمع‌بندی

در این فصل به مروری بر ادبیات موضوعی و کارهای گذشته در زمینه جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع پرداخته شد. با ترکیب روش‌های متداول الگوریتم‌های فراابتکاری و تحلیلی، روش ترکیبی دو مرحله‌ای بهینه‌سازی ارائه گردید. تمام تکنیک‌ها و روش‌های بررسی شده باید محل و اندازه بهینه ادوات جبران‌ساز از جمله جبران‌ساز استاتیک توزیع را با در نظر گرفتن توابع هدف خاص تعیین کنند. با توجه به اینکه مساله ادغام بهینه عملاً مبتنی بر بهبود بیش از یک هدف است، محققان با چندین هدف و تصمیم‌گیری مواجه می‌شوند، که انتخاب یک روش مناسب و صحیح برای رسیدگی به چندین تابع هدف می‌باشد. برتری این روش نسبت به روش‌های دیگر، افزایش دقت و کاهش فضای جستجوی الگوریتم بهینه‌سازی که منجر به کاهش پیچیدگی محاسبات نسبت به روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده در کارهای انجام شده می‌باشد که در این روش در قدم اول مکان‌های کاندید جهت نصب ادوات جبران‌ساز با استفاده از روش‌های تحلیلی تعیین و در نهایت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری، مکان و اندازه بهینه به دست می‌آید. در فصل بعدی، روش پیشنهادی بهینه‌سازی دو مرحله‌ای جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از یکی از شاخص پایداری ولتاژ و به کمک الگوریتم فراابتکاری ارائه می‌گردد.

فصل چهارم

روش پیشنهادی برای جایابی جبران ساز استاتیک توزیع

۴-۱- مقدمه

در این پایان نامه، روش پیشنهادی جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع در شبکه های توزیع شعاعی به منظور کاهش تلفات توان در محیط هارمونیکی با محدودیت اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کل و ولتاژ باس های سیستم جهت بهبود نتایج ارائه می گردد. با در نظر داشتن هزینه های سرمایه گذاری نصب، بهره برداری و تعمیرات جبران ساز استاتیک توزیع و هزینه خرید توان الکتریکی از شبکه بالادست صورت می گیرد. بدین منظور از روش دو مرحله ای پیشنهادی، با کمک الگوریتم ازدحام ذرات، برای یافتن مکان و اندازه بهینه این جبران ساز در شبکه های توزیع استفاده می شود.

۴-۲- توابع هدف و قیود مسئله

در این بخش جهت کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و شرایط کلی سیستم، به معرفی تابع هدف و قیود مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع پرداخته می شود. لازم به ذکر است که این اهداف در نهایت با استفاده از روش جمع وزنی^۱ به یک تابع هدف واحد تبدیل می گردد [۳۹].

۴-۲-۱- تابع هدف

تابع هدف جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع، شامل سه هدف اصلی می باشد که در نهایت پس از استفاده از روش جمع وزنی بصورت زیر می باشد:

$$\text{Min } F = k_1 \cdot f_1 + k_2 \cdot f_2 + k_3 \cdot f_3 \quad (۴-۱)$$

در این بخش هر کدام از توابع هدف شامل f_1 تا f_3 که شامل توابع فنی و اقتصادی می باشد، توضیح داده می شود. شکل (۴-۱) اهداف انتخاب شده برای مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع را نشان می دهد.

قسمت اول تابع هدف اصلی (f_1) شامل توابع زیر می باشد:

¹ Weighted Sum Method

$$f_1 = W_1 \cdot f_{11} + W_2 \cdot f_{12} \quad (۲-۴)$$

قیود تابع هدف f_1 در زیر بخش ۲-۲-۴ ارائه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^2 W_i = 1, \quad W_i \geq 0 \quad (۳-۴)$$

$$\sum_{j=1}^3 k_j = 1, \quad k_j \geq 0 \quad (۴-۴)$$

روابط (۳-۴) و (۴-۴) تعداد ضرایب هم‌وزنی توابع هدف در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد.

در این پایان‌نامه، W و K ضرائب هم‌وزنی بر اساس اهمیت هر تابع هدف اختصاص داده می‌شود و ممکن است بر اساس تصمیم‌گیری مورد نظر اپراتورهای سیستم قدرت متفاوت باشد. ضرایب وزنی همه توابع چند هدفه را با استفاده از مجموع وزنی به یک تابع هدف اصلی تبدیل می‌کند.

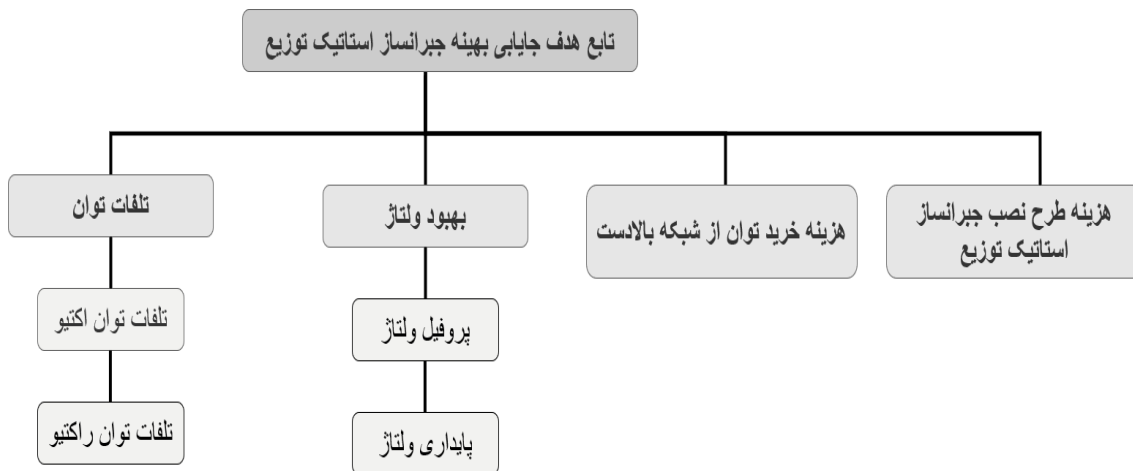
با این حال، روش مجموع ضرایب هم‌وزنی، مسئله بهینه‌سازی را به یک هدف واحد تبدیل می‌کند، که لزوماً معادل مسئله چند هدفه اصلی نیست، زیرا ضرایب وزنی ممکن است دلخواه باشند، در حالیکه راه‌حل‌های نهایی همچنان به این ضرایب بستگی دارند. هنگامی که هیچ قانونی برای پیروی وجود ندارد، ساده‌ترین راه انتخاب این ضرائب، اهمیت پارامترهای مورد استفاده در مسئله جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع می‌باشد که معمولاً مجموع آنها برابر با یک می‌باشد.

تجمیع این شاخص‌ها در به دست آوردن یک تابع چند هدفه مورد توجه قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه، با بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک، بر اساس ضرایب جدول (۴-۱) به جایابی بهینه و تعیین اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه‌های تست استاندارد IEEE ۱۸ و ۳۳ باسه اصلاح شده پرداخته شده است.

جدول (۴-۱): ضرایب هم‌وزنی تابع هدف

ضرایب	W_1	W_2	k_1	k_2	k_3
مقدار	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۳

بنابراین از چالش‌های این روش، ضرورت چند بار اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت یافتن بهترین جواب‌ها و همچنین تعیین مقادیر مناسب وزن‌ها بر اساس وابستگی و اهمیت آنها به مسئله می‌باشد [۴۰].



شکل (۴-۱): اهداف انتخاب شده در مسئله جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع

▪ تلفات توان اکتیو (f_{11})

یکی از اهداف اساسی قابل توجه در نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم‌های توزیع، به حداقل رساندن تلفات اکتیو کل سیستم (f_{11}) می‌باشد که مطابق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$P_{loss(i,j)} = \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{|V_j|^2} \right) \times R_{ij} = \sum_{k=1}^{nb} |I_{ij}|^2 \times R_{ij} \quad (۵-۴)$$

می‌توان تلفات توان اکتیو کل سیستم را با جمع تمام تلفات توان خطوط شبکه محاسبه نمود:

$$f_{11} = P_{Total\ loss} = \sum P_{loss(i,j)} \quad (۶-۴)$$

در رابطه (۴-۶) P_j و Q_j به ترتیب مقدار توان اکتیو و راکتیو بار شبکه می‌باشد. nb تعداد باس‌های سیستم می‌باشد. V_j و I_{ij} به ترتیب، ولتاژ نهایی باس شبکه و مقدار جریان بین خطوط i و j می‌باشد، R_{ij} و X_{ij} به ترتیب مقاومت و راکتانس خط بین i و j در شکل (۴-۲) می‌باشد [۴۰].

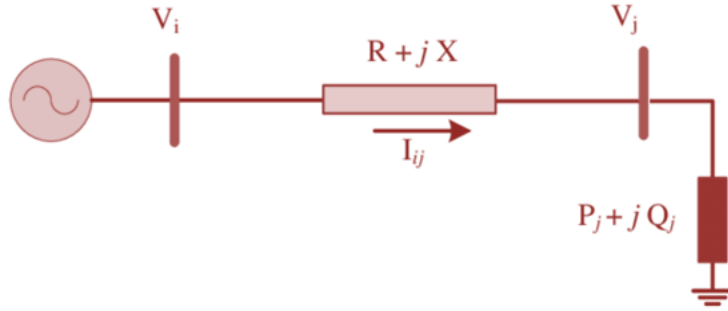
▪ تلفات توان راکتیو (f_{12})

یکی از اهداف اساسی دیگر در نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم‌های توزیع، به حداقل رساندن تلفات راکتیو کل سیستم می‌باشد که مطابق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q_{\text{loss}(i,j)} = \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{|V_j|^2} \right) \times X_{ij} = \sum_{k=1}^{nb} |I_{ij}|^2 \times X_{ij} \quad (7-4)$$

می‌توان تلفات توان راکتیو کل سیستم را از جمع تمام تلفات توان خطوط شبکه محاسبه نمود [۴۰]:

$$f_{12} = Q_{\text{Total loss}} = \sum Q_{\text{loss}(i,j)} \quad (8-4)$$



شکل (۲-۴): مدل مدار معادل شبکه توزیع

تابع f_2 در رابطه (۱-۴) مربوط به نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع می‌باشد که شامل هزینه نصب و سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری، هزینه تعمیرات و نگهداری می‌باشد. رابطه (۱۱-۴) مربوط به هزینه‌های جبران‌ساز نشان داده شده است:

$$f_2 = f_{21} + f_{22} + f_{23} \quad (11-4)$$

در روابط فوق، f_{21} ، f_{22} و f_{23} به ترتیب هزینه نصب و سرمایه‌گذاری کل، هزینه بهره‌برداری و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری می‌باشند که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$f_{21} = (C_{in} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times PWV \quad (12-4)$$

$$f_{22} = \sum_{y=1}^{PH} [(C_{op} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times PWV] \quad (13-4)$$

$$f_{23} = \sum_{y=1}^{PH} [(C_{in} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times C_{ma} \times PWV] \quad (14-4)$$

در روابط فوق، C_{in} هزینه سرمایه‌گذاری اولیه^۱ (طرح نصب) جبران‌ساز استاتیک توزیع به ازای هر kVar می‌باشد، C_{op} هزینه بهره‌برداری^۲ جبران‌ساز به ازای هر kvar می‌باشد و همچنین C_{ma} هزینه تعمیرات جبران‌ساز^۳ است که بر حسب درصدی از هزینه اولیه جبران‌ساز استاتیک توزیع در هر سال y محاسبه می‌شود. اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع نیز با $Q^{D-STATCOM}$ با واحد کیلووار در مکان بهینه نشان داده شده است.

برای ارزیابی ارزش اقتصادی طرح نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع لازم است محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری در همان سال مطالعه صورت گیرد، از این رو بودجه مورد انتظار و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در کل افق برنامه‌ریزی در این طرح لحاظ می‌گردد. ضریب ارزش فعلی^۴ بصورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$PWV = \frac{(1 + \gamma)^{\tau} \times \gamma}{(1 + \gamma)^{\tau} - 1} \quad (15-4)$$

هزینه سرمایه‌گذاری جبران‌ساز استاتیک توزیع بر پایه نرخ بازگشت و طول عمر دستگاه محاسبه می‌گردد. در رابطه فوق γ نرخ بازگشت^۵ و τ طول عمر^۶ تجهیز جبران‌ساز استاتیک توزیع بر حسب سال می‌باشد. در این پایان‌نامه، نرخ بازگشت طول عمر و جبران‌ساز استاتیک توزیع با توجه به طول افق برنامه‌ریزی^۷ (PH) طرح نصب، به ترتیب ۱۰ درصد و ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. پارامترهای پیشنهادی مربوط به تابع هدف f_2 در جدول (۲-۴) آورده شده است [۴۲].

¹ Investment Cost

² Operation Cost

³ Maintenance Cost

⁴ Present Worth Factor

⁵ Interest Rate

⁶ Lifetime

⁷ Planning Horizon

جدول (۲-۴): پارامترهای جبران ساز استاتیک توزیع در تابع هدف f_2 [۴۳].

C_{in}	C_{op}	C_{ma}
$50 \text{ \$/kVar}$	$0.2 \text{ \$/kVar}$	20%

در ادامه تابع f_3 که در رابطه (۱-۴) به کار رفته است در رابطه (۱۶-۴) بیان می شود که شامل هزینه خرید توان الکتریکی از شبکه بالادست می باشد که هزینه توان موردنیازی است که باید از شبکه بالادست خریداری شود. برای این هزینه، مقدار توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز با قیمت انرژی الکتریکی ضرب خواهد شد و هزینه نهایی در تابع هدف بدست خواهد آمد:

$$f_3 = f_{31} + f_{32} \quad (16-4)$$

$$f_{31} = Q_{PUSN} \times P_{USN} \quad (17-4)$$

$$f_{32} = Q_{QUSN} \times Q_{USN} \quad (18-4)$$

در روابط فوق P_{USN} و Q_{USN} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو دریافتی از پست توزیع (شبکه بالادست)^۱

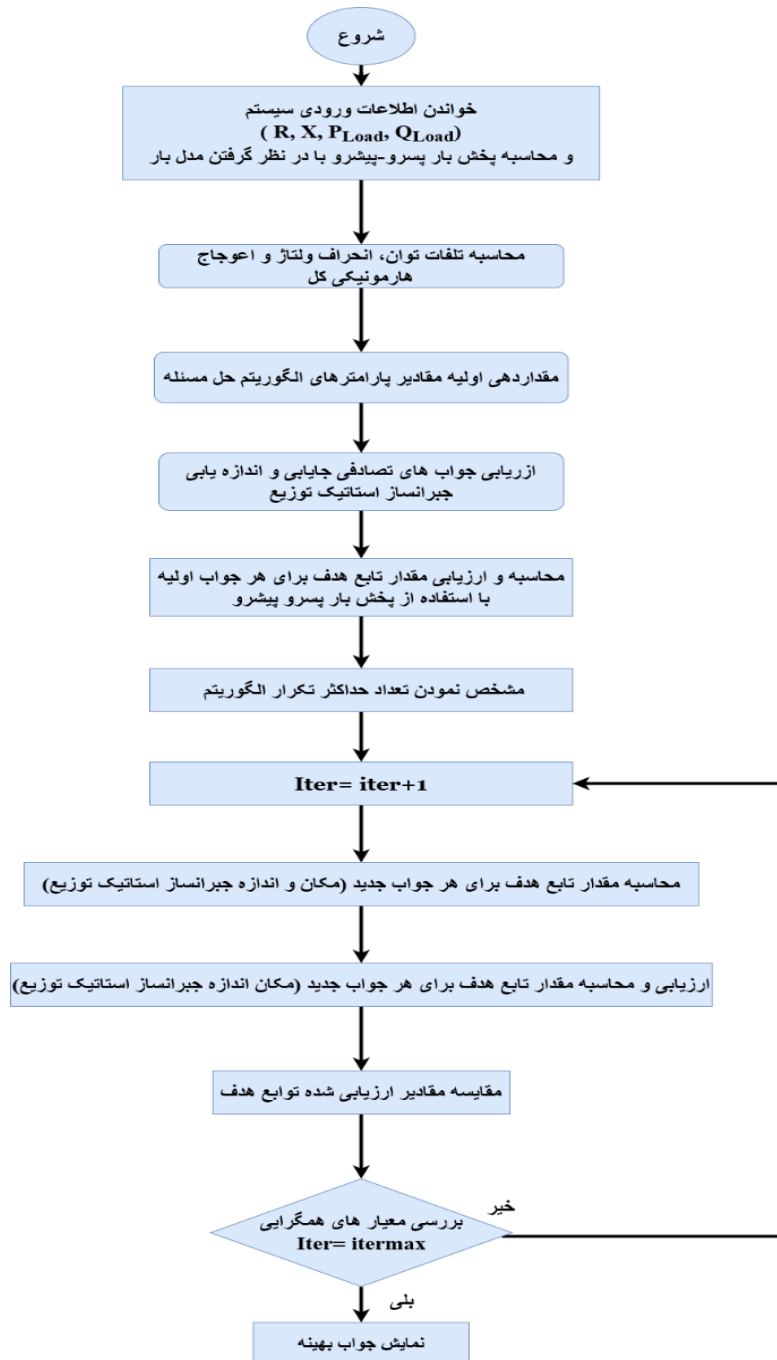
و همچنین Q_{PUSN} و Q_{QUSN} هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو می باشند [۴۳].

بنابراین تابع هدف اصلی جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع جهت کاهش تلفات توان، اعوجاج

هارمونیکی، انحراف ولتاژ باس ها که در رابطه (۱-۴) بیان شد، بصورت زیر ارائه می گردد:

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & k_1 \cdot (W_1 \cdot \sum \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{|V_j|^2} \right) \times R_{ij} + W_2 \cdot \sum \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{|V_j|^2} \right) \times X_{ij}) \\ & + k_2 \cdot ((C_{in} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times PWV \\ & + \sum_{y=1}^{PH} [(C_{op} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times C_{ma} \times PWV] \\ & + \sum_{y=1}^{PH} [(C_{in} \times Q_n^{D-STATCOM}) \times C_{ma} \times PWV]) \\ & + k_3 \cdot (Q_{PUSN} \times P_{USN}) + (Q_{QUSN} \times Q_{USN}) \end{aligned} \quad (19-4)$$

¹ Upstream Network



شکل (۴-۳): روندنمای روش پیشنهادی جایابی جبران ساز استاتیک توزیع

۴-۲-۲- قیود مسئله

به طور کلی مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع، شامل قیود تعادل تولید و تقاضای توان اکتیو و راکتیو (قید تعادل بار)، محدودیت ولتاژ، محدودیت اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کل و ظرفیت جبران ساز استاتیک توزیع مورد استفاده می باشد. در کنار بهینه کردن توابع هدف، باید قیود فنی مسئله رعایت شوند [۴۴].

• قید محدودیت ولتاژ

با پیشرفت تکنولوژی و نفوذ وسایل الکتریکی حساس، اعم از وسایل کنترلی در بیمارستان‌ها و کارخانجات صنعتی، این ادوات برای بهره‌برداری در یک محدوده خاص طراحی شده‌اند و هرگونه انحراف ولتاژ از مقدار مرجع باعث کاهش راندمان، بازدهی و حتی آسیب رساندن به این تجهیزات می‌گردد. لذا حداقل‌سازی میزان انحراف ولتاژ باس‌های شبکه از مقدار مرجع یکی از مسائل مهم کیفیت توان در شبکه‌های توزیع به حساب می‌آید. هرچه انحراف ولتاژ باس‌های سیستم از ولتاژ نامی کمتر باشد، وضعیت ولتاژ سیستم بهتر است [۴۰].

یکی از مهم‌ترین قیدهایی که رعایت می‌شود، قید محدودیت ولتاژ در محدود مجاز معین می‌باشد که در رابطه (۲۰-۴) نشان داده شده است [۴۴].

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (20-4)$$

که V_i بیانگر ولتاژ باس‌های شبکه، $V_{\min}$ حداقل ولتاژ و $V_{\max}$ حداکثر ولتاژ مجاز می‌باشد که ترتیب برابر ۰/۹۰ و ۱/۰۵ پریونیت طبق استاندارد در نظر گرفته شده‌اند.

• قید تعادل بار

تعادل و توازن بین توان راکتیو تولیدی جبران‌ساز استاتیک توزیع، بارهای شبکه و تلفات توان سیستم بصورت معادلات (۲۱-۴) و (۲۲-۴) به مسئله اعمال می‌گردد:

$$P_{post} = \sum_{i=1}^{Nbranch} Ploss(i) + \sum_{m=1}^{Nbus} Pload(m) \quad (21-4)$$

$$Q_{post} + \sum_{b=1}^{Nrs} QG(b) = \sum_{i=1}^{Nbranch} Qloss(i) + \sum_{q=1}^{Nbus} Qload(m) \quad (22-4)$$

در معادلات فوق، توان‌های راکتیو تزریق شده توسط جبران‌سازهای استاتیک توزیع به ترتیب باید با توان اکتیو و راکتیو تقاضای بارهای شبکه برابر باشد. علاوه بر تلفات توان اکتیو و راکتیو در شبکه نیز باید مدنظر قرار گیرد [۴۴].

در روابط (۲۱-۴) و (۲۲-۴)، Q_{post} و P_{post} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو دریافتی از پست اصلی شبکه می‌باشند و $P_{load(m)}$ و $Q_{load(m)}$ به ترتیب تقاضای توان اکتیو و راکتیو در باس m را نشان می‌دهد. N_{rs} به تعداد جبران‌سازهای استاتیک توزیع نصب شده در شبکه اشاره دارد. $P_{loss(i)}$ و $Q_{loss(i)}$ تلفات توان اکتیو و راکتیو شبکه را در خط i نشان می‌دهد. مجموع توان راکتیو جبران‌ساز با $QG(b)$ نشان داده شده است [۴۵].

$$Q_{G,min} < Q_{G,(b)} < Q_{G,max} \quad (۲۳-۴)$$

حداقل و حداکثر اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع باید در رابطه (۲۳-۴) رعایت شود.

• قید محدودیت اعوجاج هارمونیک ولتاژ کل

امروزه با توجه به افزایش بارهای غیرخطی و مبدل‌های الکترونیک قدرت و همچنین وجود بارهای حساس نسبت به پدیده‌های کیفیت توان در شبکه و وجود بازار رقابتی، مسائل مربوط به کیفیت توان در شبکه‌های توزیع مورد توجه ویژه قرار گرفته‌است. از میان مشکلات کیفیت توان، هارمونیک‌ها بدلیل ایجاد تلفات و گرمای اضافی در ادوات ذخیره‌ساز توان، ترانسفورماتورها، خطوط شبکه و ماشین‌های الکتریکی، پیری زودرس تجهیزات، اشغال ظرفیت شبکه، تداخل با خطوط تلفن، عملکرد نادرست تجهیزات کنترلی از اهمیت بالایی برخوردارند. در شبکه‌ها دارای بارهای غیرخطی، راهکارهای مختلف به منظور رفع مشکلات مربوط به کاهش کیفیت توان در تحقیقات و مطالعات گذشته صورت گرفته است. یکی از روش‌های بهینه در این مورد، استفاده از جبران‌ساز استاتیک توزیع به منظور کاهش اثر بارهای تولید هارمونیک در سیستم توزیع می‌باشد [۴۱].

طبق استاندارد IEEE 519 - 2014 مقادیر اعوجاج هارمونیک ولتاژ کل باید کمتر یا مساوی حد مجاز یعنی ۵٪ در سطح ولتاژ کمتر از ۶۹ کیلوولت باشد [۴۵].

$$THD_{V(\%)} \leq THD_{max} \quad (۲۴-۴)$$

۴-۳- روش بهینه‌سازی پیشنهادی

در این پایان‌نامه، از شاخص پایداری ولتاژ جهت یافتن باس‌های کاندید شبکه جهت تشخیص باس‌های حساس به فروپاشی ولتاژ یک سیستم توزیع و اطلاعات مربوط به پایداری خط متصل بین دو باس در سیستم ارائه می‌گردد.

۴-۳-۱- شاخص پایداری ولتاژ سریع

در این پایان‌نامه، برای مقایسه دو سناریو برای حل مسئله جاییابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در نظر گرفته شده است: در سناریوی اول کل باس‌های شبکه توزیع بعنوان باس‌های کاندید جهت جاییابی و اندازه‌یابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در نظر گرفته می‌شود. در سناریوی دوم، با استفاده از تعدادی باس کاندید محدود برای حل مسئله مدنظر است. از شاخص پایداری ولتاژ سریع برای یافتن باس‌های کاندید برای جبران‌ساز استاتیک توزیع و ضریب حساسیت به تلفات توان استفاده می‌گردد [۴۶].

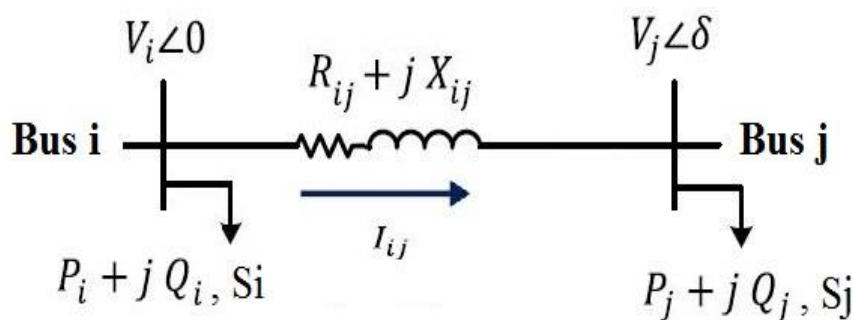
ناپایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت ممکن است بر اثر وقوع یک اغتشاش، کمبود توان راکتیو سیستم و یا هر دو به وجود آید. ناپایداری ولتاژ، معمولاً در سیستم‌های تحت بارگذاری شدید رخ می‌دهد. عوامل اصلی فروپاشی ولتاژ عبارتند از: محدودیت‌های کنترل توان راکتیو، اثر بارهای الکتریکی می‌باشند. در صورتی که سیستم قدرت با افزایش تقاضای توان راکتیو مواجه شود، در صورتیکه این تقاضای توان اضافی به کمک ذخیره‌سازهای توان راکتیو و ژنراتورها برآورده شود سیستم در یک سطح ولتاژ پایدار استقرار می‌یابد. اما اگر به علت ترکیب تعدادی از رویدادها در یک زمان خاص و وضعیت سیستم تقاضای توان راکتیو توسط ذخیره‌سازها و جبران‌سازهای توان برآورده نشود، نهایتاً سیستم به فروپاشیدگی ولتاژ^۱ می‌رسد که خود باعث از کار افتادگی قسمت عمده‌ای از سیستم یا همه آن خواهد شد. با تامین صحیح توان راکتیو در این شبکه‌ها، از بروز فروپاشی ولتاژ

¹ Voltage Collapse

جلوگیری می‌گردد

با استفاده از روش پیشنهادی، اطلاعات مفیدی در مورد چگونگی جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ برای نوسانات سیستم یا استراتژی‌های بهره‌برداری اپراتور شبکه بدست می‌آید. رویکردهای پایداری ولتاژ در حوزه مدل‌سازی استاتیک بار براساس تحلیل حالت پایدار شبکه است [۴۷].

در روابط زیر، از نماد i برای متغیرهای ابتدای خط و از نماد j برای متغیرهای انتهای خط استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، تحلیل شاخص پایداری ولتاژ سریع (FVSI) برای تعیین مکان‌های کاندید در این بخش ارائه می‌شود. شکل (۴-۴) مدار معادل دو باس متوالی در شبکه توزیع را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): مدار معادل دو باس متوالی شبکه توزیع

با در نظر گرفتن مدار معادل شبکه توزیع شکل (۴-۴)، شاخص FVSI برای این خط ij بصورت زیر محاسبه می‌شود:

جریان بین دو باس متوالی برابر است با:

$$I_{ij} = \frac{V_i \angle 0 - V_j \angle \delta}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (۲۵-۴)$$

در آخرین باس سیستم مورد مطالعه، جریان سمت بار نیز برابر است با:

$$I_{ij} = I_j \quad (۲۶-۴)$$

V_i به عنوان شین مبدا با زاویه صفر در نظر گرفته شده است. توان ظاهری روی شین j به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$S_j = V_j \cdot I_j^* \Rightarrow I_j = \left(\frac{S_j}{V_j \angle \delta} \right)^* \quad (۲۷-۴)$$

با توجه به اینکه $S_j = P_j - jQ_j$ ، بنابراین می‌توان نوشت:

$$I_j = \left(\frac{P_j + jQ_j}{V_j \angle \delta} \right)^* \Rightarrow I_j = \frac{P_j - jQ_j}{V_j \angle -\delta} \quad (28-4)$$

با مساوی قرار دادن مقادیر جریان‌های روابط (۲۵-۴) و (۲۶-۴) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{V_i \angle 0 - V_j \angle \delta}{R_{ij} + jX_{ij}} = \frac{P_j - jQ_j}{V_j \angle -\delta} \quad (29-4)$$

$$(V_i \cdot V_j \angle \delta) - V_j^2 = (R_{ij} + jX_{ij}) \cdot (P_j - jQ_j) \quad (30-4)$$

پس:

$$(V_i \cdot V_j \angle \delta) - V_j^2 = R_{ij} \cdot P_j - jR_{ij}Q_j + jP_jX_{ij} + Q_jX_{ij} \quad (31-4)$$

با مساوی قرار دادن عبارات حقیقی و موهومی در دو طرفین معادله فوق می‌توان نوشت:

$$V_i \cdot V_j \cos \delta - V_j^2 = R_{ij} \cdot P_j - X_{ij} \cdot Q_j \quad (32-4)$$

$$-V_i \cdot V_j \sin \delta = X_{ij} \cdot P_j - R_{ij} \cdot Q_j \quad (33-4)$$

از ترکیب معادلات (۳۲-۴) و (۳۳-۴) می‌توان نوشت:

$$V_j^2 + \left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \sin \delta + \cos \delta \right) V_i \cdot V_j + \left(X_{ij} + \frac{R_{ij}^2}{X_{ij}} \right) \cdot Q_j = 0 \quad (34-4)$$

معادله (۳۴-۴) یک معادله درجه دوم با متغیر V_j می‌باشد، برای حل آن از روش دلتا استفاده می‌شود.

ریشه‌های V_j به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$V_j = \frac{\left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \sin \delta + \cos \delta \right) \cdot V_i \pm \sqrt{\left(\left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \sin \delta + \cos \delta \right) \cdot V_i \right)^2 - 4 \left(X_{ij} + \frac{R_{ij}^2}{X_{ij}} \right) \cdot Q_j}}{2} \quad (35-4)$$

پس از محاسبه ریشه‌های V_j ، برای اینکه معادله دارای جواب حقیقی باشد باید عبارت زیر رادیکال بزرگتر و یا مساوی صفر باشد.

$$\left[\left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \sin \delta + \cos \delta \right) V_i \right]^2 - 4 \left(X_{ij} + \frac{R_{ij}^2}{X_{ij}} \right) Q_j \geq 0 \quad (36-4)$$

$$\left[\left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \sin \delta + \cos \delta \right) V_i \right]^2 \geq 4 \left(X_{ij} + \frac{R_{ij}^2}{X_{ij}} \right) Q_j \quad (37-4)$$

با تقسیم طرفین رابطه (37-4) به مقدار سمت چپ رابطه می توان نوشت:

$$\frac{4 \cdot \left(X_{ij} + \frac{R_{ij}^2}{X_{ij}} \right) \cdot Q_j}{\left[\left(\frac{R_{ij}}{X_{ij}} \cdot \sin \delta + \cos \delta \right) \cdot V_i \right]^2} \leq 1 \quad (38-4)$$

به دلیل آنکه δ مقدار خیلی کوچکی است، پس:

$$\delta \approx 0 \rightarrow \sin \delta = 0, \cos \delta = 1 \quad (39-4)$$

$$R_{ij} \cdot \sin \delta \approx 0 \quad (40-4)$$

$$X_{ij} \cdot \cos \delta \approx X_{ij} \quad (41-4)$$

اگر صورت و مخرج کسر سمت راست رابطه (38-4) در متغیر X_{ij}^2 ضرب شود، می توان رابطه زیر را بدست آورد:

$$\frac{(4 \cdot (X_{ij}^2 + R_{ij}^2) \cdot Q_j) \cdot X_{ij}}{[(R_{ij} \cdot \sin \delta + X_{ij} \cdot \cos \delta) V_i]^2} \leq 1 \quad (42-4)$$

$$Z_{ij}^2 = R_{ij}^2 + X_{ij}^2 \quad (43-4)$$

با جایگذاری رابطه (43-4) در معادله (42-4) و همچنین با در نظر گرفتن روابط (39-4) تا (41-4) شاخص پایداری ولتاژ سریع محاسبه می گردد:

$$FVSI(i, j) = \frac{4 \cdot Z_{ij}^2 \cdot Q_j}{V_i^2 \cdot X_{ij}} \leq 1 \quad (47-4)$$

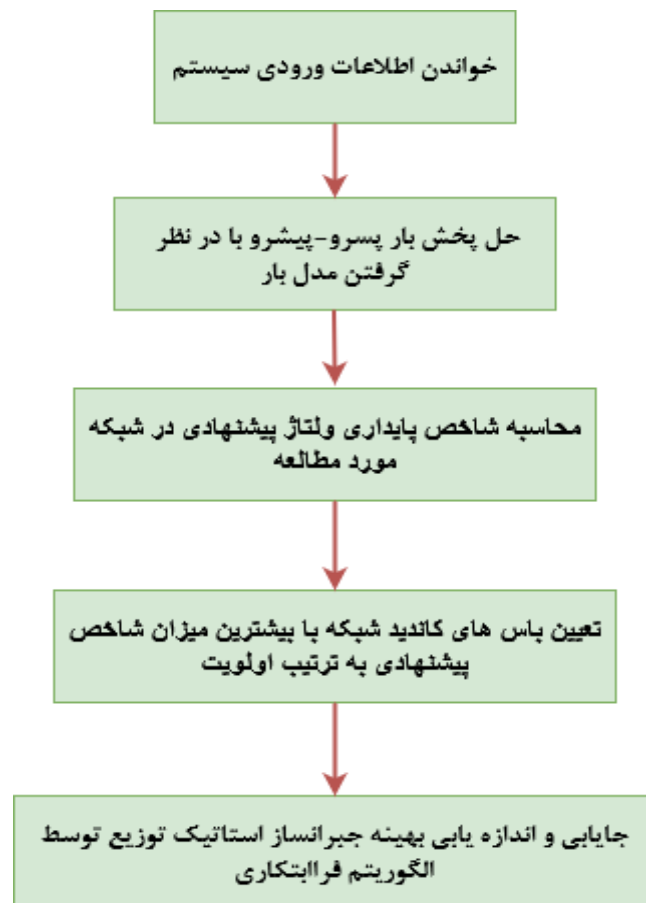
استفاده از این شاخص علاوه بر کاهش فضای جستجو در فرآیند بهینه سازی موجب افزایش سرعت حل مسئله و دقت بیشتر محاسبات به واسطه تعیین باس های کاندید جایگذاری جبران ساز استاتیک توزیع می گردد. پس از محاسبه شاخص پیشنهادی، مقادیر کم تر از ۱/۰۰ یک شرط پایدار را نشان می دهد.

با توجه به مطالبی که ارائه گردید، روندنمای شکل (3-4) به روندنمای شکل (4-4) که اساس روش پیشنهادی است تبدیل می گردد. اگر $FVSI$ نزدیک به یک باشد، خط ویژه نزدیک به ناپایداری است. اگر

FVSI از مقدار ۱ بیشتر شود (در حالت بارگذاری بیش از حد سیستم و یا کمبود توان راکتیو)، ولتاژ باس به طور ناگهانی و غیرقابل کنترل افت خواهد کرد که منجر به فروپاشی سیستم خواهد شد. بنابراین باس‌هایی که بیشترین میزان شاخص پایداری ولتاژ را دارند بعنوان باس‌های کاندید و پر اهمیت تعیین می‌گردند.

۴-۴- مدل بار در مسئله جایابی بهینه

در بیشتر مطالعات پخش بار و جایابی بهینه، فرض بر این است که بار سیستم ثابت است. با این حال، سیستم توزیع عمدتاً شامل سه نوع بار مانند بارهای خانگی، تجاری و صنعتی است. توان اکتیو و راکتیو برای این نوع بارها به ولتاژ و فرکانس سیستم بستگی دارد. تغییر مشخصه بار، تحلیل پخش بار و هم‌گرایی آن را تغییر می‌دهد و نمی‌توان فرکانس سیستم را به صورت محلی کنترل کرد، بنابراین با در نظر گرفتن مدل‌های استاتیکی بار موجب دقت در محاسبات و نتایج مسئله جایابی در شرایط بهره‌برداری واقعی می‌گردد. از اینرو، در این پایان‌نامه مدل‌سازی بارهای سیستم وابسته به ولتاژ در نظر گرفته شده است. مدل بار در شبکه‌های توزیع، بیانگر رابطه ریاضی میان ولتاژ هر باس سیستم، توان یا جریان جاری شده در همان باس است. انواع مدل‌های بار عملی که در سیستم‌های توزیع وجود دارند. شامل بارهای خانگی، تجاری و صنعتی می‌باشد. بارهای اکتیو و راکتیو در مدل نمایی، وابسته به ضرایب ذکر شده در بخش (۲-۴) می‌باشند [۴۹-۵۰].



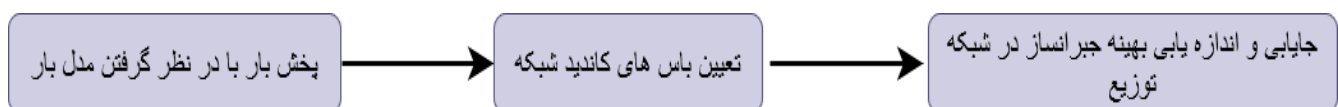
شکل (۴-۵): روندنمای روش پیشنهادی شاخص پایداری ولتاژ در مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع

مراحل روش دو مرحله‌ای جایابی و اندازه‌یابی بهینه پیشنهادی بصورت زیر است:

- محاسبه پخش بار پسر-پیشرو با در نظر گرفتن مدل بار.
- محاسبه شاخص پایداری ولتاژ سریع ($FVSI$) جهت تعیین باس‌های کاندید سیستم.
- جایابی و اندازه‌یابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع توسط الگوریتم‌های فراابتکاری.

شکل (۴-۷) مراحل روش پیشنهادی دو مرحله‌ای جایابی جبران ساز در سیستم‌های توزیع را نشان

می‌دهد:



شکل (۴-۶): مراحل روش دو مرحله‌ای جایابی و اندازه‌یابی بهینه پیشنهادی

در این روش، ابتدا پس از محاسبه پخش بار شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار جهت واقعی‌تر شدن نتایج آن، به بررسی و تعیین باس‌های کاندید شبکه با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ سریع پرداخته می‌شود. در مرحله دوم با استفاده از نتایج مرحله قبل و شناسایی باس‌های تعیین شده، به محاسبه جایابی و اندازه‌یابی بهینه با کمک الگوریتم‌های فراابتکاری با هدف تعیین شده پرداخته می‌شود.

۴-۵- جمع‌بندی

روش‌های جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع موجود در مطالعات و تحقیقات اخیر برای جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در چهار دسته، روش‌های سنتی، روش‌های تحلیلی، بهینه‌سازی فراابتکاری و روش‌های مبتنی ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند. روش ترکیبی پیشنهادی در این پایان‌نامه، ترکیب شاخص پایداری ولتاژ سریع و الگوریتم ازدحام‌ذرات می‌باشد که به عنوان روش دو مرحله‌ای شناخته می‌شود، تکنیک رایج برای حل مسائل بهینه‌سازی مکان و اندازه بهینه است زیرا ساختار الگوریتم‌ها ساده است و به حجم محاسبات کمتری نیاز دارد و در عین حال نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید. در مسئله جایابی و بهینه‌سازی پیشنهادی در این پایان‌نامه، به واسطه ترکیب دو روش تحلیلی و الگوریتم فراابتکاری، معروف به روش‌های ترکیبی دو مرحله‌ای بهینه‌سازی جهت افزایش دقت محاسبات و کاهش فضای جستجوی الگوریتم بهینه‌سازی نسبت به روش‌های متداول دیگر ارائه می‌گردد. در این روش در قدم اول مکان‌های کاندید جهت نصب جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از روش تحلیلی شاخص پایداری ولتاژ تعیین و در نهایت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری، مکان و اندازه بهینه بدست می‌آید. در فصل پنجم، بر اساس روش بهینه‌سازی پیشنهادی، بر اساس اهداف و مقادیر بیان شده در بخش قبل، شبیه‌سازی در سیستم‌های تست توزیع IEEE و مجتمع مس سرچشمه انجام خواهد گرفت. مقادیر و پارامترهای الگوریتم PSO و GA¹ بر اساس مقادیر پیش فرض تعیین گردیده‌اند. همچنین با در نظر گرفتن مدل‌سازی استاتیکی بارهای وابسته به ولتاژ در سیستم، می‌توان به نتایج در شرایط بهره‌برداری واقعی و دقیق‌تر دست یافت.

¹ Genetic Algorithm

فصل پنجم

شیء سازی روش پشهادی برای جایی بهینه جبران ساز

استاتیک توزیع

۵-۱- مقدمه

در این فصل، از روش جدید پیشنهادی دو مرحله‌ای برای تعیین محل و اندازه بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با هدف مینیمم کردن تابع هدف اصلی که شامل، تلفات توان اکتیو و راکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن محدودیت اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ به جهت افزایش دقت محاسبات استفاده می‌گردد. با در نظر گرفتن توجیهات اقتصادی مانند، هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری جبران‌ساز استاتیک توزیع در افق برنامه‌ریزی شده طرح و همچنین هزینه خرید توان از شبکه بالادست در شبکه‌های توزیع می‌باشد. جایگذاری و اندازه‌یابی نادرست در سیستم، منجر ایجاد اختلال در عملکرد سیستم و یا حتی به خطر افتادن عملکرد کل سیستم خواهد شد.

جهت مقایسه الگوریتم‌های ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک اندازه جمعیت هر دو الگوریتم ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در این پایان‌نامه، همانطور که ذکر شد، به منظور رسیدن به بهترین جواب ممکن، پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات با توجه به مطالعات کندی^۱ بصورت پیش‌فرض تنظیم شده است. در الگوریتم ژنتیک نیز بطور پیش‌فرض عملگر جابه‌جایی^۲ برابر ۰/۹ و عملگر جهش^۳ برابر ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است.

مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری براساس تعداد برابری از ارزیابی‌های تابع هدف^۴ به یک عمل استاندارد تبدیل شده است. اخیراً، چالش‌ها، مسائل و سوالات بسیاری در رابطه با مقایسه منصفانه نسبت به شیوه‌های نوین برای ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی مطرح شده است که توابع هدف ارزیابی شده (NFE)، هم بر عملکرد و هم بر رفتار الگوریتم حل تأثیر می‌گذارد. مطالعات و بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هیچ الگوریتم سراسری بهترین راه‌حل برای همه مسائل بهینه‌سازی وجود ندارد. بنابراین با مقایسه تعداد توابع ارزیابی شده توسط روش‌های متداول و روش بهینه‌سازی پیشنهادی،

¹ Kennedy

² Crossover

³ Mutation

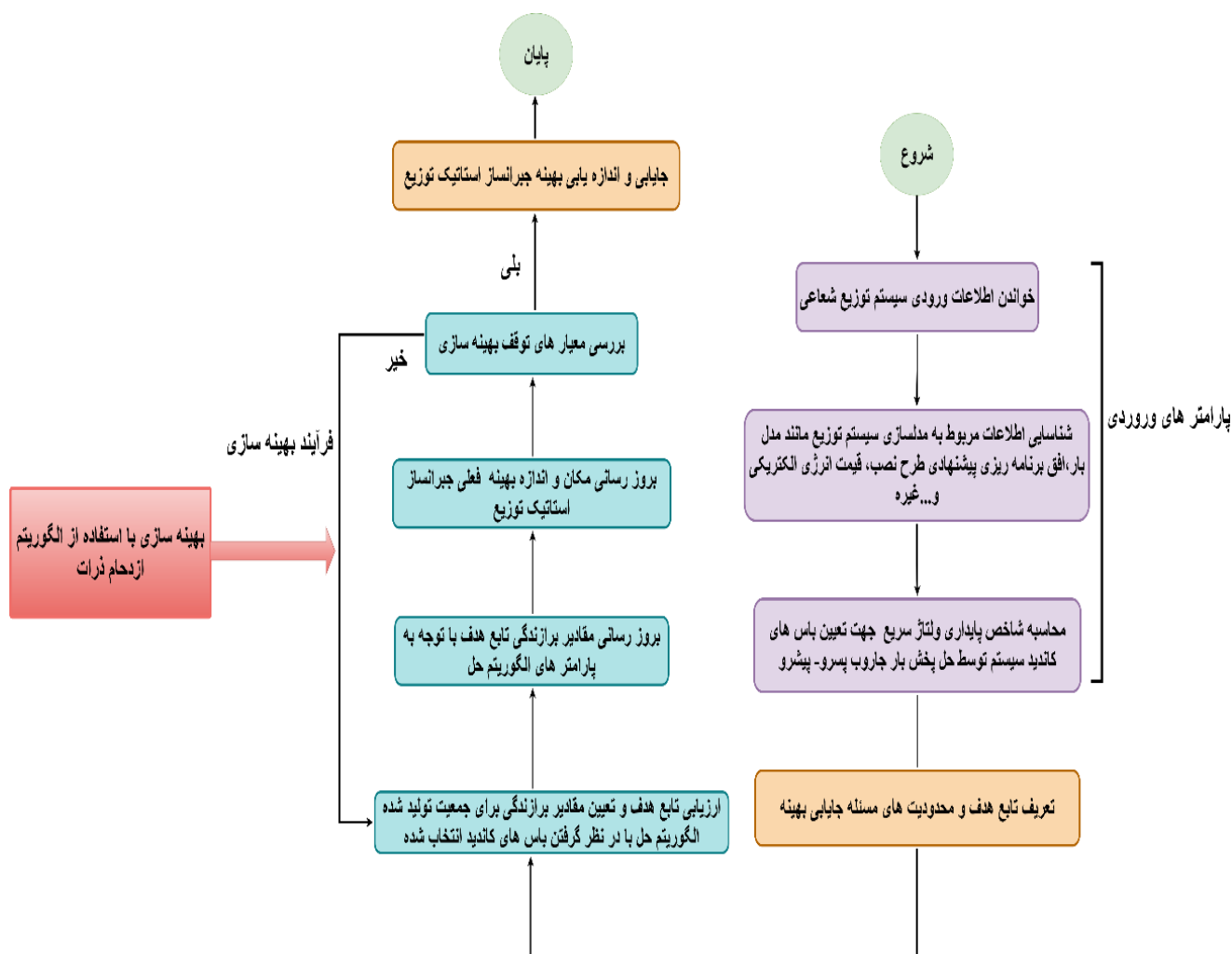
⁴ Number of Objective Function Evaluations

می توان ارزیابی صحیح و دقیقی را انجام داد.

۵-۲- مراحل انجام روش پیشنهادی در شبیه سازی

در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج روش پیشنهاد شده برای دو شبکه تست شعاعی ۱۸ باسه و ۳۳ باسه *IEEE* و بخشی از شبکه توزیع کارخانه مجتمع مس سرچشمه پرداخته می شود. همچنین برای بررسی روش پیشنهادی، نتایج با الگوریتم های متداول دیگر نیز مقایسه گردیده است. روش پیشنهاد شده بر روی نرم افزار *MATLAB.R2019b.V9.7.0* با مشخصات سیستمی *intel Core i7-4500U, 2.4GHz* با ۶ گیگابایت حافظه رم انجام شده است. برای یافتن تلفات توان، اندازه و فاز ولتاژ، مقادیر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ باس های سیستم، تحلیل پخش بار پسترو هارمونیکی به طور مستقیم انجام می شود. و در طول انجام تحلیل پخش بار، مدل بار استاتیکی وابسته به ولتاژ جهت نزدیک تر شدن نتایج به نتایج بهره برداری اعمال می گردد. حداکثر ظرفیت جبران ساز استاتیک توزیع، ۱۰۰٪ کل بارگذاری توان راکتیو شبکه می باشد. همچنین در شبکه های مورد مطالعه و با توجه به میزان بار شبکه جهت دستیابی به بهینه ترین حالت ممکن در مسئله جاییابی بهینه، حداکثر تعداد جبران ساز استاتیک توزیع جهت جایگذاری در سیستم به دو عدد محدود می شود، زیرا که فراتر از این مقدار، علاوه بر افزایش هزینه های اقتصادی طرح نصب، بهبود قابل توجهی در مشخصات کیفی سیستم های مورد مطالعه ایجاد نمی کند.

پس از خواندن اطلاعات ورودی شبکه توزیع و حل پخش بار با در نظر گرفتن مدل بار وابسته به ولتاژ و بارهای غیرخطی، در مرحله اول روش پیشنهادی، باس های کاندید سیستم تعیین می گردند و سپس در مرحله دوم، جاییابی و اندازه یابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع توسط روش الگوریتم های فراابتکاری با در نظر گرفتن محدودیت های برابر و نابرابر سیستم توزیع، مشخص می گردد. شکل (۵-۱) روندنمای اجرای برنامه شبیه سازی روش پیشنهادی را نشان می دهد



شکل (۵-۱): روندنمای اجرای شبیه سازی روش پیشنهادی در مسئله جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع

در مرحله اول، پارامترهای ورودی شبکه شامل، خواندن اطلاعات ورودی سیستم توزیع شعاعی، شناسایی اطلاعات مربوط به مدل سازی سیستم توزیع مانند مدل سازی بار، طول مدل طرح برنامه ریزی، قیمت انرژی الکتریکی، مدل بار هارمونیکی و استخراج می گردد. پس از محاسبه پخش بار در سیستم و تعیین باس های کاندید سیستم، نتایج جهت ارزیابی تابع هدف و تعیین مقادیر برازندگی در طول فرآیند بهینه سازی بروزرسانی می گردند تا فرآیند حل مسئله جایابی و اندازه یابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع توقف نماید.

۵-۳- معرفی سیستم‌های تست و شبکه صنعتی مجتمع مس سرچشمه مورد

مطالعه

در این قسمت مشخصات سیستم‌های تست مورد مطالعه در شبیه‌سازی معرفی می‌گردد.

۵-۳-۱- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم تست IEEE ۱۸ باسه توزیع

این سیستم شامل ۱۸ باس و ۱۷ خط می‌باشد. اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای این سیستم، در جدول (پ-۱) آورده شده است. مقادیر پایه این سیستم برای محاسبات در واحد پریونیت برابر 10 MVA و $12/5\text{ KV}$ می‌باشند و کل توان اکتیو و راکتیو این سیستم به ترتیب برابر $10/25\text{ MW}$ و $7/58\text{ MVAR}$ می‌باشد. در این شبکه یک بار غیرخطی با ۳ مگاوات توان اکتیو و $2/25$ مگاوار توان راکتیو در باس شماره ۵ قرار دارد. جدول (پ-۱) طیف هارمونیک که اندازه جریان هارمونیک را به عنوان درصدی از جریان اصلی بارهای غیرخطی را نشان می‌دهد. هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو در این سیستم به ترتیب برابر ۲۴۰ دلار بر کیلووات و ۱۹۰ دلار بر کیلووار در نظر گرفته شده است.

روش پیشنهادی دو مرحله ایی جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم ۱۸ باسه

به منظور یافتن محل بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع، مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع که در بخش (۴-۳-۱) ارائه شد، برای تمامی باس‌ها محاسبه می‌شود و پس از محاسبه مقادیر شاخص پایداری ولتاژ، این مقادیر به صورت نزولی مرتب می‌گردند. باس‌هایی که دارای حساسیت بیشتری نسبت فروپاشی ولتاژ داشته باشند، بسته به شرایط سیستم مورد مطالعه، چندین باس اول متناظر با بیشترین مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع محاسبه شده برای تمامی باس‌های سیستم، بعنوان باس‌های کاندید برای جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع برگزیده می‌شوند. جدول (۵-۱) مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید را نشان می‌دهد. باس‌های کاندید تعیین شده توسط روش تحلیلی در این شبکه، باس‌های ۷، ۱۰، ۱۷، ۱۵، ۱۲ و ۱۶ به ترتیب دارای مقادیر شاخص پایداری ولتاژ بیشتری بوده

و بعنوان باس‌های کاندید جهت جاییابی جبران‌ساز استاتیک توزیع برگزیده می‌شوند. انتخاب مقادیر باس‌های کاندید شبکه، توسط بهره‌بردار شبکه با توجه به شرایط سیستم و مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع اتخاذ می‌گردد. با در نظر گرفتن مدل بارهای تجاری در این شبکه، نتایج شبیه‌سازی با کمک محاسبه شاخص پایداری ولتاژ سریع ارائه شده است.

جدول (۵-۱): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید شبکه تست ۱۸ باسه توزیع

الویت بندی	شماره باس	خط مبدا	خط مقصد	شاخص پایداری ولتاژ سریع (FVSI)
۱	۷	۶	۷	۰/۰۰۴۰
۲	۱۰	۹	۱۰	۰/۰۰۳۳
۳	۱۷	۱۴	۱۷	۰/۰۰۳
۴	۱۵	۱۴	۱۵	۰/۰۰۲۶
۵	۱۲	۳	۱۳	۰/۰۰۲۳
۶	۱۶	۱۳	۱۶	۰/۰۰۱۱

با توجه به مقادیر محاسبه شده $FVSI$ ، ۶ باس که بیشترین مقادیر را دارند بعنوان باس‌های کاندید جهت جاییابی و اندازه‌یابی بهینه مرتب شده است. در این جدول اطلاعات مربوط به اتصال خطوط متناسب با تقاضای توان راکتیو که بیشترین احتمال وقوع فروپاشی ولتاژ را دارند، اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد.

جدول (۵-۲): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم ۱۸ باسه

توزیع

روش حل	جایابی و اندازه‌یابی بهینه در شبکه ۱۸ باسبه		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (THDv)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
روش پیشنهادی (FVSI)	۱۵ ۱۵	۱۵۴۴ ۱۷۷۳	۱۰۷/۴۳	۷۹۱/۳۶	۱/۳۶	۰/۹۹۸۸	۱۱۴/۲۴	۷۲۰

جدول (۵-۳): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم ۱۸ باسه توزیع

باسبه توزیع

روش حل	جایابی و اندازه‌یابی بهینه در شبکه ۱۸ باسبه		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (%THDv)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
حالت پایه	---	---	۱۱۱/۲	۹۹۳/۵۲	۱/۳۷۴	۰/۹۸۲	---	---
PSO	۱۵ ۱۵	۱۵۴۹ ۱۷۷۴	۱۰۸/۵۱	۷۹۲/۲۶	۱/۳۶۲	۰/۹۹۸۵	۱۱۵/۶۸	۱۲۰۰
GA	۱۵ ۱۵	۱۵۴۷ ۱۷۷۰	۱۰۸/۶۵	۷۹۳/۳۵	۱/۳۶۴	۰/۹۹۸۴	۱۱۴/۳۵	۱۱۴۵
روش پیشنهادی (FVSI)	۱۵ ۱۵	۱۵۴۴ ۱۷۷۳	۱۰۷/۴۳	۷۹۱/۳۶	۱/۳۶	۰/۹۹۸۸	۱۱۴/۲۴	۷۲۰

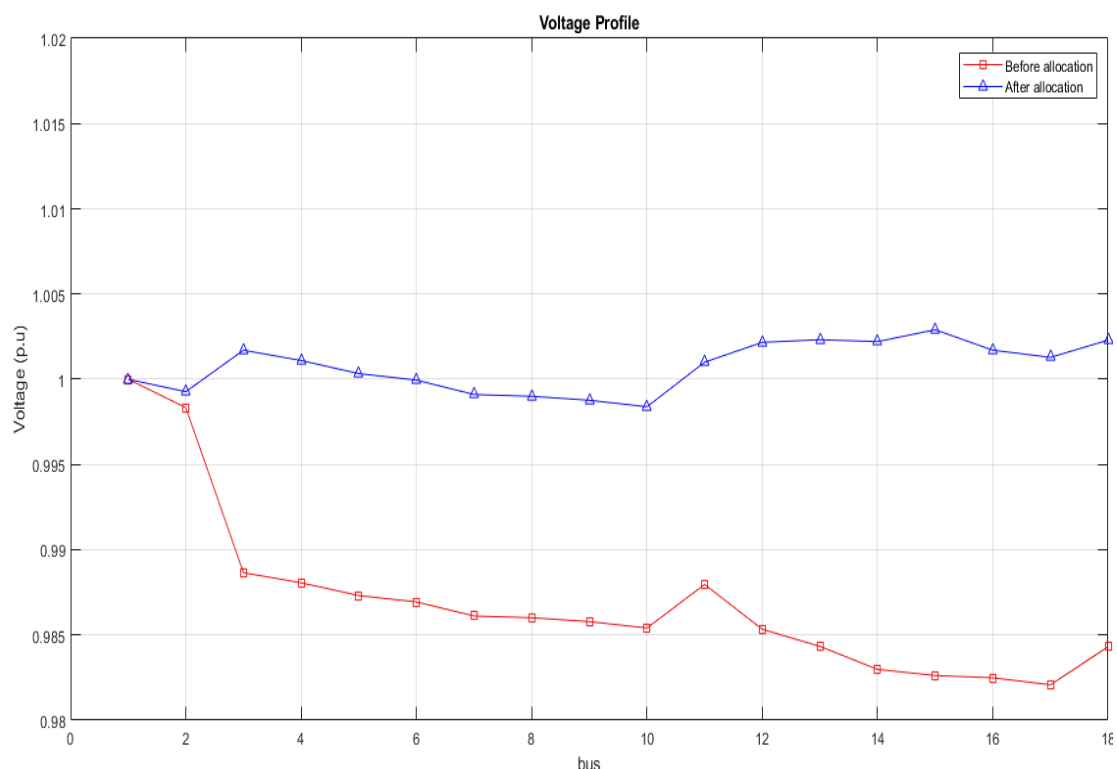
با توجه به جدول (۵-۳)، در این سیستم، به علت توپولوژی و پراکندگی بارهای شبکه، جبران‌سازهای

استاتیک توزیع در باس اصلی سیستم، باس شماره ۱۵ با اندازه‌های بهینه ۱۵۴۴ و ۱۷۳۳ کیلووار

محاسبه گردیده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، میزان تلفات اکتیو به مقدار ۳/۵۱٪،

تلفات راکتیو ۲۰/۳۴٪، و حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ باس‌های سیستم ۱۸/۰٪ کاهش داشته است. تعداد توابع ارزیابی شده الگوریتم PSO با روش FVSI دو مرحله‌ای پیشنهادی برابر ۷۲۰ تابع می‌باشد که در مقایسه با نتایج الگوریتم‌های PSO و GA تعداد توابع ارزیابی بسیار کمتر و دقت محاسبات بیشتر شده است. پروفیل ولتاژ سیستم قبل و بعد از جابجایی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع برای شبکه ۱۸ باسه در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

شکل(۲-۵): پروفیل ولتاژ سیستم ۱۸ باسه توزیع قبل و بعد از جابجایی جبران‌ساز استاتیک توزیع



با توجه به پروفیل ولتاژ شبکه مورد مطالعه، کمترین مقدار ولتاژ باس ۱۸ با مقدار ۰/۹۸۲ می باشد که پس از جابجایی جبران‌ساز استاتیک توزیع، این مقدار به ۰/۹۹۸۸ تبدیل گردیده است. لازم است به جهت بررسی و تحلیل نتایج در پخش بار هارمونیکی، حذف کامل اعوجاج‌های هارمونیکی از فیلترهای هارمونیکی در باس شماره هفت استفاده گردد.

۵-۳-۲- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم تست IEEE ۳۳ باسه توزیع

این سیستم شامل ۱۸ باس و ۱۷ خط می‌باشد. اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای این سیستم، در

پیوست ۲ آورده شده است. مقادیر پایه برای پریونیت، برابر ۱۰۰ MVA و ۱۲/۶۶ kV و کل بارهای توان اکتیو و راکتیو سیستم به ترتیب ۳/۷۱۵ مگاوات و ۲/۳ مگاوار می‌باشد. سیستم تک خطی در شکل (پ-۲) نشان داده شده است. در این شبکه چهار بار غیرخطی (مبدل شش پالسی) در باس‌های شماره ۱۶، ۲۱، ۲۵ و ۳۲ قرار دارد که مشخصات آنها در پیوست آورده شده است. هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو در این سیستم به ترتیب برابر ۷۳۲ دلار بر کیلووات و ۶۴۶ دلار بر کیلووار در نظر گرفته شده است.

روش پیشنهادی دو مرحله ایی جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم ۳۳ باسه

در مرحله اول باس‌های کاندید تعیین شده توسط روش تحلیلی پایداری ولتاژ سریع برای تمامی باس‌های شبکه محاسبه شده می‌شود. باس‌های شماره ۳۰، ۲۴، ۲۵، ۸، ۳۲، ۷، ۳۱، ۲۰، ۲۹، ۴ و ۱۴ به ترتیب بیشترین مقدار این شاخص، بصورت نزولی مرتب شده و جهت جایابی و اندازه‌یابی بهینه مرحله دوم انتخاب می‌گردند. جدول (۴-۵) مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید جهت جایابی جبران‌ساز استاتیکی توزیع در این سیستم را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مدل بارهای مسکونی در این شبکه، نتایج شبیه‌سازی در جدول (۵-۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۵): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید سیستم تست ۳۳ باسه توزیع

شاخص پایداری ولتاژ سریع (FVSI)	خط مقصد	خط مبدا	شماره باس	الویت بندی
۰/۰۳۶۹	۳۰	۲۹	۳۰	۱
۰/۰۲۰۸	۲۴	۲۳	۲۴	۲
۰/۰۲۰۶	۲۵	۲۴	۲۵	۳
۰/۰۱۸۱	۸	۷	۸	۴
۰/۰۰۷۳	۳۲	۳۱	۳۲	۵
۰/۰۰۶۶	۷	۶	۷	۶
۰/۰۰۶۳	۳۱	۳۰	۳۱	۷
۰/۰۰۵۶	۲۰	۱۹	۲۰	۸

۹	۲۹	۲۸	۲۹	۰/۰۰۵۰
۱۰	۴	۳	۴	۰/۰۰۴۲
۱۱	۱۴	۱۳	۱۴	۰/۰۰۴۰

در این سیستم، ۱۱ باس که بیشترین مقادیر شاخص پیشنهادی را دارند بعنوان باس‌های کاندید که

بیشترین اهمیت از نظر پایداری ولتاژ را دارند، جهت جابجایی و اندازه‌یابی بهینه مرتب شده است.

جدول (۵-۵): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم تست ۳۳

باسه توزیع

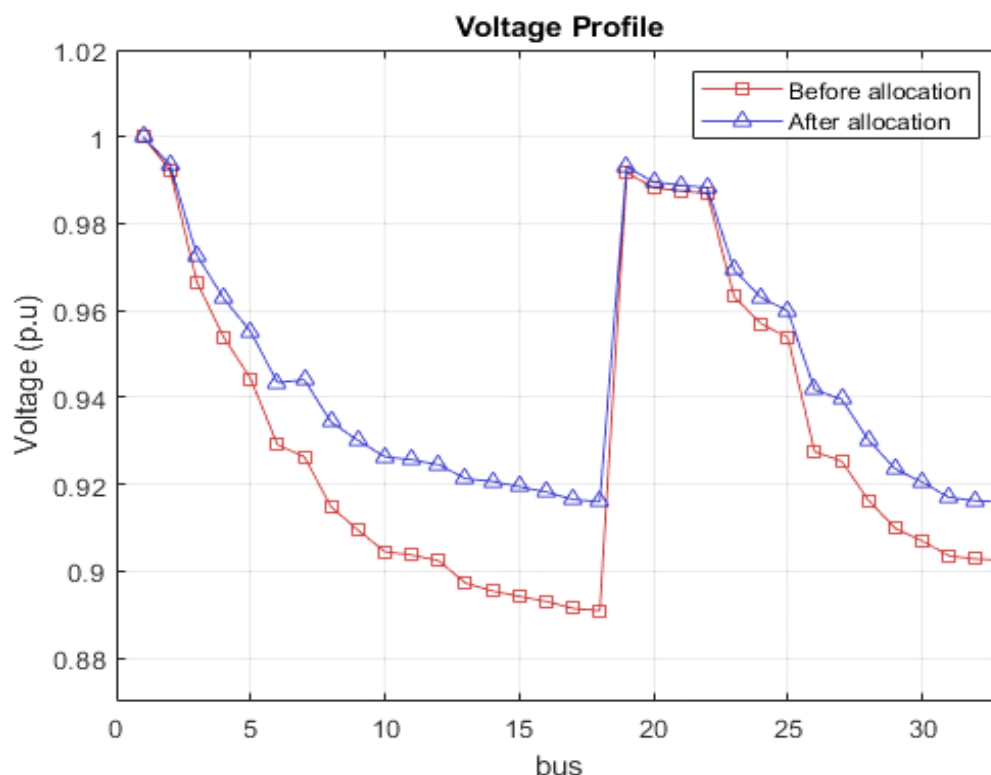
روش حل	شبکه تست ۳۳ باسه اصلاح شده توزیع		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (%THDv)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
روش پیشنهادی (FVSI)	۷ ۱۴	۷۶۰/۱۳ ۳۷۸/۵۹	۳۷۹/۴۲	۲۰۸/۳۷	٪۲/۰۵۷	۰/۹۲۵	۱۶/۳۵۲	۱۸۷۰

جدول (۵-۶): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی سیستم تست

۳۳ باسه توزیع

روش حل	شبکه تست ۳۳ باسه اصلاح شده توزیع		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (%THDv)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
حالت پایه	--	--	۴۱۸/۱۳	۲۳۸/۸۰	٪۲/۰۹۱	۰/۸۹۱۴	--	--
PSO	۴ ۱۷	۶۴۲/۳۵ ۳۲۷/۹۷	۳۹۸/۳۵	۲۲۹/۳۰	٪۲/۰۶۱	۰/۹۲۱	۱۶/۴۴۶	۳۸۰۰
GA	۴ ۱۳	۳۶۶/۶ ۵۳۳/۳۴	۴۰۶/۱۵	۲۳۳/۷۷	٪۲/۰۶۳	۰/۹۱۳	۱۶/۴۱۸	۳۹۹۰
روش پیشنهادی (FVSI)	۷ ۱۴	۷۶۰/۱۳ ۳۷۸/۵۹	۳۷۹/۴۲	۲۰۸/۳۷	٪۲/۰۵۷	۰/۹۲۵	۱۶/۳۵۲	۱۸۷۰

با توجه به مقایسه نتایج حاصل شده در جدول (۵-۶)، واحدهای جبران‌ساز استاتیک توزیع به طور بهینه در باس‌های شماره ۷ و ۱۴ با مقدارهای بهینه $۷۶۰/۱۳$ و $۳۷۸/۵۹$ کیلووار قرار داده شده است. تلفات توان اکتیو $۹/۲۵\%$ ، تلفات توان راکتیو $۱۲/۷۲\%$ ، حداکثر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ $۱/۶۲\%$ کاهش داشته است و حداقل ولتاژ نیز $۳/۷۶۹\%$ بهبود یافته است. تعداد توابع ارزیابی در روش پیشنهادی برابر ۱۸۷۰ تابع می باشد. شکل (۵-۳) پروفیل ولتاژ قبل و بعد از جابجایی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه تست ۳۳ باسه را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۳): پروفیل ولتاژ سیستم ۳۳ باسه توزیع قبل و بعد از جابجایی جبران‌ساز استاتیک توزیع

با توجه به پروفیل ولتاژ سیستم ۳۳ باسه توزیع، ولتاژ باس‌های ۷ تا ۱۸ بعلت وجود بارهای زیاد و دور بودن از پست شبکه توزیع، کاهش چشمگیری داشته است که پس از جابجایی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع، ولتاژ باس‌های سیستم در محدوده مجاز بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

۵-۳-۳- نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم ۲۰ باسه توزیع کارخانه مجتمع

مس سرچشمه

مجتمع مس سرچشمه با توانایی تولید سالانه ۱۶۰ هزار تن مس محتوای معدنی و ۲۵۰ هزار تن مس کاتدی بزرگ‌ترین تولیدکننده مس در خاورمیانه می‌باشد. در این مجتمع انواع سیستم‌های الکتریکی و ماشین‌های الکتریکی با ظرفیت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است و یکی از مشکلات اساسی موجود در بهره‌برداری کارخانجات این مجتمع، وجود هارمونیک‌های زیاد در برخی از فیدرهای تغذیه‌کننده می‌باشد. وجود درصد نسبتاً بالای هارمونیک، سبب کاهش کیفیت توان و راندمان بهره‌برداری سیستم شده است. با در نظر گرفتن دو بار غیرخطی در باس‌های شماره ۶ و ۱۷ که مشخصات بارها در جدول (پ-۴) آورده شده است. در این بخش عملکرد جبران‌ساز استاتیک توزیع بر کاهش میانگین سطح اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ این شبکه را مورد بررسی قرار داده است. ولتاژ مبنای این شبکه برابر ۲۰ kV و توان مبنا برابر ۱۰ MVA می‌باشد. با در نظر گرفتن بارهای وابسته به ولتاژ صنعتی، مجموع مصرف بار اکتیو و راکتیو شبکه مورد مطالعه به ترتیب ۲۲/۰۱۴ مگاوات و ۱۱/۴۳۲۵ مگاوار می‌باشد. هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو در این سیستم به ترتیب برابر ۳۵۰۰ دلار بر کیلووات و ۲۴۰۰ دلار بر کیلووار در نظر گرفته شده است. دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه در شکل (پ-۳) و اطلاعات خطوط و بارهای شبکه در جدول (پ-۳) آورده شده است.

روش پیشنهادی دو مرحله ایی جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه ۲۰ باسه توزیع کارخانه

مجتمع مس سرچشمه

باس‌های کاندید شبکه بر اساس روش پیشنهادی شاخص پایداری ولتاژ سریع در این شبکه باس‌های ۹، ۱۰، ۱۲، ۶، ۱۴ و ۵ جهت حل مسئله جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در شبکه انتخاب می‌گردند. مقادیر شاخص پایداری ولتاژ باس‌های کاندید در جدول (۵-۷) آورده شده است.

همچنین نتایج شبیه‌سازی پس از جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در جدول (۵-۸) نشان

داده شده است.

جدول (۷-۵): مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سریع باس‌های کاندید شبکه ۲۰ باسه توزیع مجتمع مس سرچشمه

شاخص پایداری ولتاژ سریع (FVSI)	خط مقصد	خط مبدا	شماره باس	الویت بندی
۰/۰۱۹۵	۹	۸	۹	۱
۰/۰۱۹۱	۱۰	۳	۱۰	۲
۰/۰۱۶۶	۱۲	۲	۱۲	۳
۰/۰۱۱۸	۶	۵	۶	۴
۰/۰۰۳۹	۱۵	۱۲	۱۴	۵
۰/۰۰۳۴	۵	۳	۵	۶

در شبکه توزیع کارخانه مجتمع مس سرچشمه، بعلت وجود بارهای صنعتی بزرگ و کوچک بودن شبکه، ۶ باس که بیشترین مقادیر شاخص پیشنهادی را دارند بعنوان باس‌های کاندید جهت جاییابی و اندازه‌یابی بهینه مرتب شده است.

جدول (۸-۵): نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی شبکه ۲۰ باسه

توزیع مجتمع مس سرچشمه

روش حل	جاییابی و اندازه‌یابی بهینه در شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (%THD _v)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
روش پیشنهادی (FVSI)	۵ ۵	۶۵۴۲/۳ ۱۹۹۲	۶۷۸۳/۳	۱۳۳۸۹	۴/۴۷۸	۰/۹۵۶۹	۱۶۹/۶۴۷	۱۷۴۰

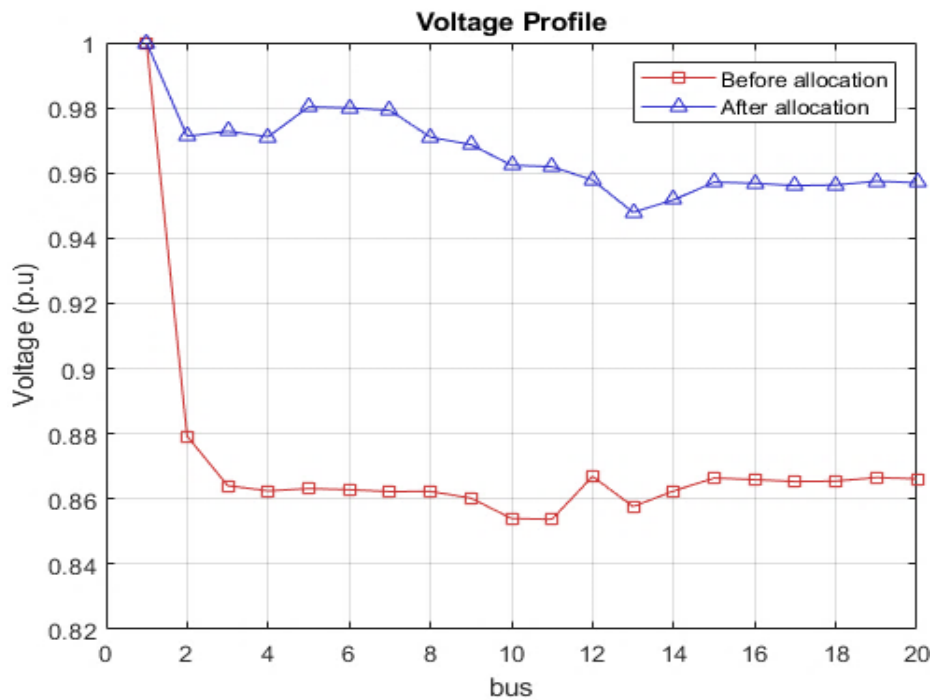
جدول (۵-۹): مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی پس از نصب دو جبران‌ساز استاتیک توزیع بر روی شبکه ۲۰

باسه کارخانه مجتمع مس سرچشمه

روش حل	جایابی و اندازه‌یابی بهینه در شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه		تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVar)	حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ (%THDv)	حداقل ولتاژ سیستم (p.u)	تابع هدف (F)	تعداد توابع ارزیابی شده (NFE)
	مکان (شماره باس)	اندازه (kVar)						
حالت پایه	--	--	۸۶۹۲/۶	۱۷۲۸۲	۵/۶۴۸	۰/۸۵۳	--	--
PSO	۵ ۱۴	۶۷۰۳ ۲۰۰۸/۹	۶۹۱۲/۹	۱۳۳۹۴	۴/۵۴۰	۰/۹۵۴	۱۷۱/۲۰۰	۱۹۸۰
GA	۵ ۱۲	۴۷۶۳/۵ ۲۶۱۰/۵	۶۹۵۴/۹	۱۳۴۶۳	۴/۵۲۱	۰/۹۵۳۹	۱۷۰/۹۶۷	۱۷۸۰
روش پیشنهادی (FVSI)	۵ ۵	۶۵۴۲/۳ ۱۹۹۲	۶۷۸۳/۳	۱۳۳۸۹	۴/۴۷۸	۰/۹۵۶۹	۱۶۹/۶۴۷	۱۷۴۰

با توجه به جدول فوق، واحدهای جبران‌ساز استاتیک توزیع به طور بهینه در باس با اهمیت بیشتر شبکه، باس شماره ۵ با مقدارهای بهینه ۶۵۴۲/۳ و ۱۹۹۲ کیلووار قرار داده شده است. تلفات توان اکتیو ۲۱/۹۶٪، تلفات توان راکتیو ۲۲/۵۲٪، حداکثر اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ ۲۰/۷۱٪ کاهش داشته است و حداقل ولتاژ نیز ۱۲٪ بهبود یافته است. با توجه به توپولوژی شبکه و کوچک بودن شبکه توزیع مجتمع مس سرچشمه، تعداد توابع ارزیابی شده روش پیشنهادی در مقایسه با روش متداول بهینه‌سازی تقریباً برابر می‌باشد.

وجود بارهای صنعتی در شبکه مورد مطالعه کارخانه مجتمع مس سرچشمه، موجب کاهش چشمگیر ولتاژ باس‌های شبکه و در نتیجه افزایش احتمال فروپاشی ولتاژ را دارد. با جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع در فیدر صنعتی کارخانه مورد مطالعه، باس‌های سیستم در محدوده مجاز بهره‌برداری قرار گرفته اند.



شکل (۴-۵): پروفیل ولتاژ شبکه ۲۰ باسه کارخانه مجتمع مس سرچشمه قبل و بعد از جابجایی جبران‌ساز استاتیک توزیع

۴-۵- جمع‌بندی

با توجه به نتایج تمام موارد مقایسه شده در این بخش، استفاده از روش تحلیلی پیشنهادی توانسته صحت جابجایی بهینه جبران‌سازهای توان برای سیستم، متناسب با مدل بار فراهم کند. در این روش، موجب افزایش پایداری سیستم، بهبود کیفیت توان و کاهش تلفات توان گردیده است. علاوه بر این، به دلیل حجم محاسبات مسئله، در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی متداول، فضای جستجوی الگوریتم حل مسائل کاهش و دقت محاسبات افزایش یافته است. برای دستیابی به حداکثر مزایای سیستم توزیع با فیدر صنعتی، نصب چندین جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم پیشنهاد می‌شود. در نتایج شبیه‌سازی بدست آمده توسط روش پیشنهادی نسبت به دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در بهینه کردن سیستم‌های توزیع کارآمدتر می‌باشد.

فصل ششم

نتیجہ گیری و پیشہادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به منظور جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از روش ترکیبی تحلیلی-فراابتکاری، با عنوان روش دو مرحله‌ای شاخص پایداری ولتاژ سریع و الگوریتم ازدحام ذرات در شبکه‌های توزیع شعاعی ارائه شد.

با حل پخش بار جاروب پسرو-پیشرو با در نظر داشتن مدل بار استاتیکی وابسته به ولتاژ و وجود بارهای غیرخطی جهت تحلیل سیستم در محیط هارمونیک، عملکرد جبران‌ساز استاتیک توزیع بررسی گردید.

روش پیشنهادی به جهت دستیابی به حداکثر بهره‌وری و بهبود کیفیت توان دریافتی مشترکین شبکه-های توزیع و شرایط کلی سیستم ارائه گردید، که دقت محاسبات نسبت به الگوریتم پایه و روش‌های بهینه‌سازی متداول دیگر مانند الگوریتم ژنتیک داشته است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، نیازی به بررسی بیشتر برای تنظیم پارامترهای آن نسبت به سایر الگوریتم‌های دیگر ندارد، لذا با ترکیب روش‌های تحلیلی و الگوریتم ازدحام ذرات، فضای جستجوی الگوریتم کاهش و دقت محاسبات افزایش می‌یابد.

جهت کاهش تلفات توان، بهبود پایداری ولتاژ و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در باس‌های سیستم‌های توزیع که رابطه مستقیم با مدیریت توان راکتیو دارد، مسئله جایابی جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از تحلیل شاخص پایداری ولتاژ یافتن مکان‌های کاندید جهت تضمین دستیابی به حداکثر مزایای سیستم توزیع با فیدر صنعتی، ضروری است.

روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های تست ۱۸ و ۳۳ باسه اصلاح شده و بخشی از شبکه کارخانه مجتمع مس سرچشمه آزمایش گردید. اثر اعوجاج هارمونیک بارهای غیرخطی در محاسبات توابع هدف لحاظ شده است. نتایج حاصل از جایابی بهینه جبران‌ساز استاتیک توزیع حاکی از عملکرد روش پیشنهادی برای کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش اعوجاج هارمونیک کل با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی بهتر از دیگر روش‌های موجود می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادات

جایابی بهینه جبران ساز استاتیک توزیع، منجر به کاهش اعوجاج‌های هارمونیکی بارهای غیرخطی شبکه می‌گردد، علاوه بر اینکه هزینه‌های اقتصادی نیز کاهش می‌یابد.

بر اساس تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده، می‌توان پیشنهادهای زیر را جهت ادامه کار ارائه کرد:

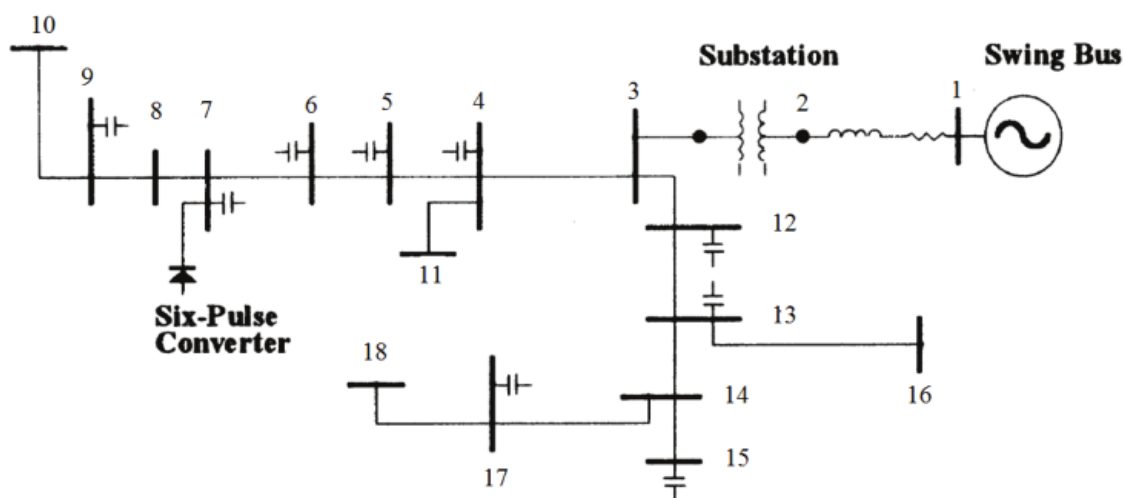
۱- جایابی همزمان منابع تولید پراکنده و جبران ساز استاتیک توزیع و تعریف شرایط عملکرد منابع تولید پراکنده در مسئله جایابی همزمان.

با در نظر گرفتن منبع ذخیره ساز انرژی توان اکتیو برای جبران ساز استاتیک توزیع، جهت هماهنگی و مدیریت توان در شبکه و تعریف شرایط بهره‌برداری و عملکرد منابع تولید پراکنده تجدید پذیر مانند، شرایط سرعت و میزان وزش باد در توربین‌های بادی، میزان و مدت تابش نور خورشید در سیستم‌های فتوولتائیک با در نظر گرفتن مدل هارمونیکی منابع تولید پراکنده و پیش بینی بار.

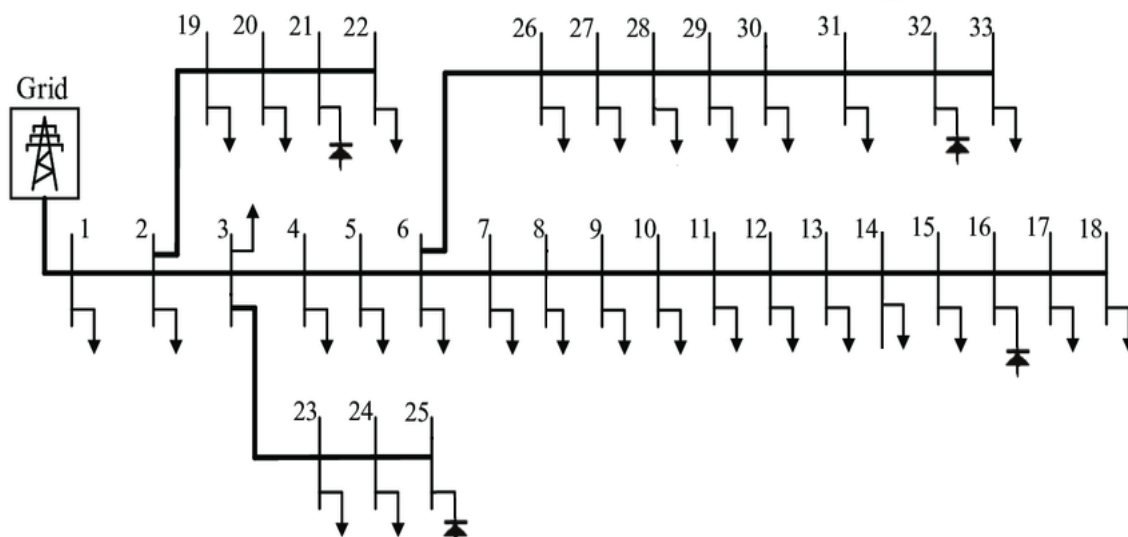
۲- تلفیق شاخص‌های کیفیت توان و قابلیت اطمینان در تابع هدف پیشنهادی.

پیوست

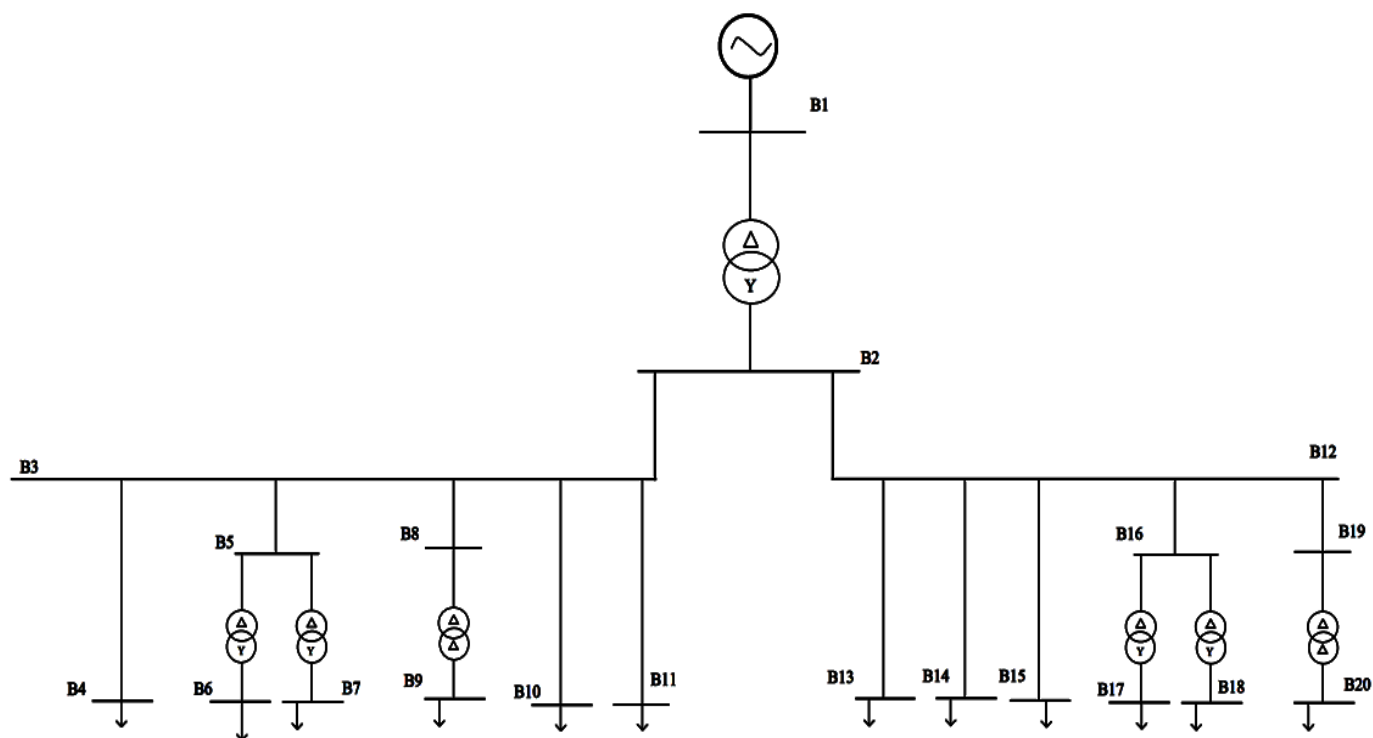
در این بخش اطلاعات شبکه‌های مورد مطالعه در پایان‌نامه شرح داده می‌شود.



شکل (پ-۱): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۱۸ باسه توزیع [۵۰].



شکل (پ-۲): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۳ باسه توزیع اصلاح شده.



شکل (پ-۳): دیاگرام تک خطی شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه

جدول (پ-۱): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۱۸ باسه [۵۰].

شماره خط	از باس	به باس	مقاومت (Ω)	راکتانس (Ω)	مشخصات بار	
					توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVar)
۱	۱	۲	۰/۰۰۴۳۱	۰/۰۱۲۰۴	۰	۰
۲	۲	۳	۰/۰۰۶۰۱	۰/۰۱۶۷۷	۲۰۰	۱۲۰
۳	۳	۴	۰/۰۰۳۱۶	۰/۰۰۸۸۲	۴۰۰	۲۵۰
۴	۴	۵	۰/۰۰۸۹۶	۰/۰۲۵۰۲	۱۵۰	۹۳۰
۵	۵	۶	۰/۰۰۲۹۵	۰/۰۰۸۲۴	۳۰۰۰	۲۲۵۰
۶	۶	۷	۰/۰۱۷۲	۰/۰۲۱۲	۸۰۰	۵۰۰
۷	۷	۸	۰/۰۴۰۷	۰/۰۳۰۵۳	۲۰۰	۱۲۰
۸	۲	۹	۰/۰۱۷۰۶	۰/۰۲۲۰۹	۱۰۰۰	۶۲۰
۹	۱	۲۰	۰/۰۲۹۱	۰/۰۳۷۶۸	۵۰۰	۳۱۰
۱۰	۲۰	۲۱	۰/۰۲۲۲۲	۰/۰۲۸۷۷	۱۰۰۰	۶۲۰
۱۱	۲۱	۲۲	۰/۰۴۸۰۳	۰/۰۶۲۱۸	۳۰۰	۱۹۰
۱۲	۲۱	۲۳	۰/۰۳۹۸۵	۰/۰۵۱۶	۲۰۰	۱۲۰
۱۳	۲۳	۲۴	۰/۰۲۹۱	۰/۰۳۷۶۸	۸۰۰	۵۰۰
۱۴	۲۳	۲۵	۰/۰۳۷۲۷	۰/۰۴۵۹۳	۵۰۰	۳۱۰
۱۵	۲۵	۲۶	۰/۰۲۲۰۸	۰/۰۲۷۲	۱۰۰۰	۶۲۰
۱۶	۲۵	۲۶	۰/۰۲۲۰۸	۰/۰۲۷۲	۲۰۰	۱۲۰
۱۷	۵۰	۱	۰/۰۰۳۱۲	۰/۰۶۷۵۳	۰	۰
۱۸	۵۰	۵۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۳۴۴	۰	۰

جدول (پ-۲): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۳۳ باسه اصلاح شده

شماره خط	از باس	به باس	مقاومت (Ω)	راکتانس (Ω)	مشخصات بار	
					توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVar)
۱	۱	۲	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷۷	۱۰۰	۶۰
۲	۲	۳	۰/۴۹۳۰	۰/۲۵۱۱	۹۰	۴۰
۳	۳	۴	۰/۳۶۶۰	۰/۱۸۶۴	۱۲۰	۸۰
۴	۴	۵	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۶۰	۳۰
۵	۵	۶	۰/۸۱۹۰	۰/۷۰۷۰	۶۰	۲۰
۶	۶	۷	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۸۸	۲۰۰	۱۰۰
۷	۷	۸	۱/۷۱۱۴	۱/۲۳۵۱	۲۰۰	۱۰۰
۸	۸	۹	۱/۰۳۰۰	۰/۷۴۰۰	۶۰	۲۰
۹	۹	۱۰	۱/۰۴۰۰	۰/۷۴۰۰	۶۰	۲۰
۱۰	۱۰	۱۱	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵۰	۴۵	۳۰
۱۱	۱۱	۱۲	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۶۰	۳۵
۱۲	۱۲	۱۳	۱/۴۶۸۰	۱/۱۵۵۰	۶۰	۳۵
۱۳	۱۳	۱۴	۰/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۱۲۰	۸۰
۱۴	۱۴	۱۵	۰/۵۹۱۰	۰/۵۲۶۰	۶۰	۱۰
۱۵	۱۵	۱۶	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵۰	۶۰	۲۰
۱۶	۱۶	۱۷	۱/۲۸۹۰	۱/۷۲۱۰	۶۰	۲۰
۱۷	۱۷	۱۸	۰/۷۳۲۰	۰/۵۷۴۰	۹۰	۴۰
۱۸	۲	۱۹	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۶۵	۹۰	۴۰
۱۹	۱۹	۲۰	۱/۵۰۴۲	۱/۳۵۵۴	۹۰	۴۰
۲۰	۲۰	۲۱	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۹۰	۴۰
۲۱	۲۱	۲۲	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۹۰	۴۰
۲۲	۳	۲۳	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	۹۰	۵۰
۲۳	۲۳	۲۴	۰/۸۹۸۰	۰/۷۰۹۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۴	۲۴	۲۵	۰/۸۹۶۰	۰/۷۰۱۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۵	۶	۲۶	۰/۲۰۳۰	۰/۱۰۳۴	۶۰	۲۵
۲۶	۲۶	۲۷	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷	۶۰	۲۵
۲۷	۲۷	۲۸	۱/۰۵۹۰	۰/۹۳۳۷	۶۰	۲۰
۲۸	۲۸	۲۹	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶	۱۲۰	۷۰
۲۹	۲۹	۳۰	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵	۲۰۰	۶۰۰
۳۰	۳۰	۳۱	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳۰	۱۵۰	۷۰
۳۱	۳۱	۳۲	۰/۳۱۰۵	۰/۳۶۱۹	۲۱۰	۱۰۰
۳۲	۳۲	۳۳	۰/۳۴۱۰	۰/۵۳۰۲	۶۰	۴۰

جدول (پ-۳): اطلاعات خطوط و بار شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه

شماره خط	از باس	به باس	مقاومت (Ω)	راکتانس (Ω)	مشخصات بار	
					توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVar)
۱	۱	۲	۰/۳۵۰	۰/۷۱۰	۰	۰
۲	۲	۳	۰/۳۵۰	۰/۵۱۰	۰	۰
۳	۳	۴	۰/۳۹۸	۰/۲۸۴	۱۲۵۰	۶۴۰/۳۹
۴	۴	۵	۰/۱۷۶	۰/۴۶۲	۰	۰
۵	۵	۶	۰/۲۸۳	۰/۴۰۱	۶۵۰	۴۰۰
۶	۶	۷	۰/۶۲۴	۰/۳۷۵	۸۹۵	۴۵۸/۵۲
۷	۳	۸	۰/۶۷۴	۰/۷۲۰	۰	۰
۸	۸	۹	۰/۷۶۱	۰/۵۶۷	۸۹۵	۴۵۸/۵۲
۹	۳	۱۰	۰/۷۶۷	۰/۶۵۰	۴۱۰۳	۲۰۱۲/۰۳
۱۰	۳	۱۱	۰/۸۶۷	۰/۶۵۰	۴۱۰۳	۲۰۱۲/۰۳
۱۱	۲	۱۲	۰/۳۵۰	۰/۲۱۰	۰	۰
۱۲	۱۲	۱۳	۰/۸۶۰	۰/۷۲۰	۴۱۰۳	۲۰۱۲/۰۳
۱۳	۱۲	۱۴	۰/۰۱۵	۰/۸۷۳	۴۱۰۳	۲۰۱۲/۰۳
۱۴	۱۲	۱۵	۰/۰۱۵	۰/۷۷۳	۴۴۴	۲۲۷/۴۶
۱۵	۱۲	۱۶	۰/۴۱۶۳	۰/۳۲۱	۰	۰
۱۶	۱۶	۱۷	۰/۳۵۰	۰/۷۶۱	۸۰۰	۵۰۰
۱۷	۱۶	۱۸	۰/۳۷۵	۰/۴۳۷	۳۳۴	۱۷۱/۱۱
۱۸	۱۲	۱۹	۰/۲۸۴	۰/۳۵۶۵	۰	۰
۱۹	۱۹	۲۰	۰/۳۰۴	۰/۴۸۶	۳۳۴	۱۷۱/۱۱

جدول (پ-۴): اندازه جریان هارمونیک به عنوان درصدی از جریان اصلی بار

مرتبه	بار غیرخطی شبکه ۱۸ باسه	بار غیرخطی شبکه ۳۳ باسه	بار غیرخطی شبکه ۲۰ باسه مجتمع مس سرچشمه
	Six-Pulse 1 باس (۷)	Six-Pulse with inductor باس (۳۲، ۲۵، ۲۱، ۱۶)	Six-Pulse 2 باس (۱۷، ۶)
	اندازه (%)	اندازه (%)	اندازه (%)
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۵	۴۲	۳۰	۵۴

۷	۱۴/۳	۱۲	۳۶
۱۱	۷/۹	۹	۱۰
۱۳	۳/۲	۶	۶/۷
۱۷	۳/۷	۴	۷
۱۹	۲/۳	۴	۵
۲۳	۲/۳	.	.
۲۵	۱/۴	.	.

مراجعة

- [1] T. Chughl and A. Singh, "Reactive Power Compensation Using D-STATCOM With Fuzzy Logic Supervision", *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, Delhi, India, 2016.
- [2] N. Prakash, N. Kumarappan, R. Arulraj, "Multiple Installation of DG and DSTATCOM in Radial Distribution Network Using Lightning Search Algorithm", *International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, Chennai, India, 2018.
- [3] T. S. Saggu and L. Singh, "Comparative Analysis of Custom Power Devices for Power Quality Improvement in Non-linear Loads", *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2016.
- [4] A. M. Shaheen, S. R. Spea, S. M. Farrag, M. A. Abido, "A Review of Meta-heuristic Algorithms for Reactive Power Planning Problem", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 2, PP 215-231, 2018.
- [5] Kerrouche, K.D.E., Lodhi, E., Kerrouche, M.B. et al, "Modeling and Design of the Improved D-STATCOM Control for Power Distribution Grid", *SN Applied Sciences*, 2020.
- [6] B. S. Chabok, A. Ashouri, "Optimal Placement of D-STATCOMs into the Radial Distribution Networks in the Presence of Distributed Generations", *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 4, PP. 40 - 48, 2016.
- [7] B. Singh, V. Mukherjee, P. Tiwari, "Genetic Algorithm Optimized Impact Assessment of Optimally Placed DGs and FACTS Controller with Different Load Models from Minimum Total Real Power Loss Viewpoint", *Energy and Buildings*, Vol. 126, PP. 194–219, 2016.
- [8] U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, "Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, PP. 91–110, 2009.
- [9] س. عاقلی گله تپه، ا. صادقی یزدان پناه، "جایابی و اندازه بهینه منابع DG و ادوات FACTS در شبکه توزیع با مدل‌های مختلف بار جهت کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ با الگوریتم هوشمند" سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق، ۱۳۹۷.
- [10] Ł. Michalec, M. Jasinski, T. Sikorski, Z. Leonowicz, Ł. Jasinski and V. Suresh, "Impact of Harmonic Currents of Nonlinear Loads on Power Quality of a Low Voltage Network—review and Case Study", *Energies*, Vol. 14, 2021.
- [11] C. Venkatesh, D. Srikanth Kumar, D.V.S.S. Sarma, and M. Sydulu, "Modelling of Nonlinear Loads and Estimation of Harmonics in Industrial Distribution System", *Fifteenth National Power Systems Conference*, IIT Bombay, 2008.
- [12] R. Satish, K. Vaisakh, A Y. Abdelaziz and A. El-Shahat, "A Novel Three-phase Harmonic Power Flow Algorithm for Unbalanced Radial Distribution Networks with the Presence of D-STATCOM Devices", *Energies*, Vol. 10, 2021.
- [13] S. Kawambwa, R. Mwifunyi, D. Mnyanghwalo, N. Hamisi, E. Kalinga and Nerey Mvungi, "An Improved Backward/forward Sweep Power Flow Method based on Network Tree Depth for Radial Distribution Systems", *Journal of Electrical Systems and Information Technology volume*, Vol. 8, 2021.

- [14] S. Ouali and A. Cherkaoui, "An Improved Backward/Forward Sweep Power Flow Method based on a New Network Information Organization for Radial Distribution Systems", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020.
- [۱۵] گلکار م، "طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی"، جلد اول، انتشارات صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ص ۸۰.
- [16] F. Safargholi, B. Vahidi, J. S. Moghani, "Improved Algorithm for Harmonic Load Flow Solution in Radial Distribution Networks", *SCIENCE INTERNATIONAL*, Vol. 27, 2015.
- [17] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications", *2nd Edition*, Chapter. 33, 2007.
- [18] A. Ulinuha, M.A.S. Masoum, S.M. Islam, "Harmonic Power Flow Calculations for a Large Power System with Multiple Nonlinear Loads using Decoupled Approach", *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Perth. WA. Australia, 2008.
- [19] M. E. Moghadam, H. Falaghi, and M. Farhadi, "A Novel Method of Optimal Capacitor Placement in the Presence of Harmonics for Power Distribution Network Using NSGA-II Multi-Objective Genetic Optimization Algorithm", *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 25, Issue. 1, 2020.
- [20] M. Milovanović, J. Radosavljević, B. Perović, "A Backward/Forward sweep Power Flow Method for Harmonic Polluted Radial Distribution Systems with Distributed Generation Units", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 30, Issue. 5, 2019.
- [21] IEEE Std 519-2014, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 2014.
- [22] R. Sirjani, A. R. Jordehi, "Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator (D-STATCOM) in Electric Distribution Networks: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, PP 688-694, 2017.
- [23] S. Muthuraman, V. P. Venkatesan, "A Comprehensive Study on Hybrid Meta-Heuristic Approaches Used for Solving Combinatorial Optimization Problems", *World Congress on Computing and Communication Technologies (WCCCT)*, Tiruchirappalli, India, 2017.
- [24] B. Ismail, N. I. A. Wahab, M. L. Othman, M. A. M. Radzi, K. N. Vijayakumar, and M. N. M. Naain, "A Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Loadability Enhancement", *IEEE Access*, Vol. 8, PP. 222733 - 222765, 2020.
- [25] A. R. Gupta, A. Kumar, "Energy Savings Using D-STATCOM Placement in Radial Distribution System", *Procedia Computer Science*, Vol. 70, PP 558-564, 2015.
- [26] A. R. Gupta, A. Jain, A. Kumar, "Optimal D-STATCOM Placement in Radial Distribution System based on Power Loss Index Approach", *International*

Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), Shillong, India, 2016.

- [27] A. R. Gupta, A. Kumar, "Impact of Various Load Models on D-STATCOM Allocation in DNO Operated Distribution Network", *Procedia Computer Science*, Vol. 125, PP 862-870, 2018.
- [28] S. Sinha, R. Roshan, Md. A. Alam, S. Banerjee, "Optimal Placement of D-STATCOM for Reduction of Power Loss and Improvement of Voltage Profile using Power Stability and Power Loss Indices in a Radial Distribution System", *IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Bombay, India, 2019.
- [29] B. Weqar, M. T. Khan, A. S. Siddiqui, "Optimal Placement of Distributed Generation and D-STATCOM in Radial Distribution Network", *Smart Science*, Vol. 6, PP 125-133, 2018.
- [30] R. R. Duvvuru, Y. Sudha, P. P., G. Pashikanti, K. S. S. N. Teja, R. R. Duvvuru, "Optimal Placement of DSTATCOM in Electrical Distribution System", *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29, No. 4, 2020.
- [31] M. H. Nazari, A. Khodadadi, A. Lorestani, S. H. Hosseini, Gharehpetian, B. Gevork, "Optimal Multi-objective D-STATCOM Placement using MOGA for THD Mitigation and Cost Minimization", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 35, No. 2, PP. 2339-2348, 2018.
- [۳۲] ش. شجاعی، م. صدیق زاده، "تعیین مکان و ظرفیت D-STATCOM در شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ با استفاده از الگوریتم فرهنگی" هفتمین همایش ملی برق و کامپیوتر مجلسی، ۱۳۹۷.
- [33] M. Sedighizadeh, A. E. Moarref, "The Imperialist Competitive Algorithm for Optimal Multi-Objective Location and Sizing of DSTATCOM in Distribution Systems Considering Loads Uncertainty", *INAE Letters*, Vol. 2, PP. 83–95, 2017.
- [34] A. Noori, Y. Zhang, N. Nouri, M. Hajivand, "Multi-Objective Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator in Radial Distribution Networks with Variable Residential, Commercial and Industrial Demands Considering Reliability", *IEEE Access*, Vol. 9, 2021.
- [35] S. Sannigrahi, P. Acharjee, "Implementation of Crow Search Algorithm for Optimal Allocation of DG and DSTATCOM in Practical Distribution System", *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, Thrissur, India, 2018.
- [36] K. E. Adetunji, I. W. Hofsaier, A. M. Abu-Mahfouz, L. Cheng, "A Review of Metaheuristic Techniques for Optimal Integration of Electrical Units in Distribution Networks", *IEEE Access*, Vol. 9, PP. 5046 - 5068, 2020.
- [37] A. Amin, S. Kamel, A. Selim, L. Nasrat, "Optimal Placement of Distribution Static Compensators in Radial Distribution Systems Using Hybrid Analytical-Coyote optimization Technique", *21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2019.
- [38] A. Selim, S. Kamel, F. Jurado, "Hybrid Optimization Technique for Optimal Placement of DG and D-STATCOM in Distribution Networks", *Twentieth*

International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2019.

- [39] X. S. Yang, “Nature-Inspired Optimization Algorithms”, *Elsevier*, Chapter. 14 2014.
- [40] O. A. Zongo A. Oonsivilai, “Optimal Placement of Distributed Generator for Power Loss Minimization and Voltage Stability Improvement”, *Energy Procedia*, Vol. 138, PP. 134-139, 2017.
- [41] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, H. Zayandehroodi, “Optimum D-STATCOM Placement using Firefly Algorithm for Power Quality Enhancement”, *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, Langkawi, Malaysia, 2013.
- [42] J. Sanam, S. Ganguly, A. K. Panda, C. Hemanth, “Optimization of Energy Loss Cost of Distribution Networks with the Optimal Placement and Sizing of DSTATCOM Using Differential Evolution Algorithm”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 42, PP. 2851–2865, 2017.
- [43] G. Strbac and J. Mutale, “Framework and Methodology for Pricing of Distribution Networks with Distributed Generation”, *Centre for Distributed Generation and Sustainable Electrical Energy*, 2005.
- [44] T. Yuvaraja, K. R. Devabalajia, K. Ravi, “Optimal placement and sizing of DSTATCOM using Harmony Search algorithm”, *Energy Procedia*, Vol. 79, PP. 759 – 765, 2015.
- [45] A. Noori, Y. Zhang, N. Nouri, M. Hajivand, “Hybrid Allocation of Capacitor and Distributed Static Compensator in Radial Distribution Networks Using Multi-Objective Improved Golden Ratio Optimization Based on Fuzzy Decision Making”, *IEEE Access*, Vol. 8, PP. 162180 - 162195, 2020.
- [46] I. Musirin, T. K. A. Rahman, “On-line Voltage Stability based Contingency Ranking using Fast Voltage Stability index (FVSI)”, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan, 2017.
- [47] I. Musirin, T. K. A. Rahman, “Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System”, *Student Conference on Research and Development*, Shah Alam, Malaysia, 2002.
- [48] M. Kumar, P. Nallagownden and I. Elamvazuthi, “Optimal Placement and Sizing of Distributed Generators for Voltage-Dependent Load Model in Radial Distribution System”, *Renewable Energy Focus*, Vol. 19-20, PP. 23-37, 2014.
- [49] A. Kazikova, M. Pluhacek, R. Senkerik, “How Does the Number of Objective Function Evaluations Impact Our Understanding of Metaheuristics Behavior?”, *IEEE Access*, Vol. 9, PP. 44032 - 44048, 2021.
- [50] S. A. Taher, M. Hasani, A. Karimian, “A Novel Method for Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distribution Systems with Nonlinear Loads and DG using GA”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 16, PP. 851 - 862, 2012.

Abstract

Increasing demand for electrical energy and power electronic devices, leads to reduced power quality level, so the management of modern power systems and reactive power supply using distribution static compensator (D-STATCOM) with fast response to power changes as well as injecting or absorbing reactive power in different system conditions have been better than other Compensator devices. In this thesis, a new method is proposed for optimizing the size and location of the D-STATCOM for increasing the power quality and improving the overall network conditions. In the proposed method, by calculating the Fast Voltage Stability Index (FVSI), the candidate buses of the system are determined for placement of the compensator. The objective function is to minimize the active power loss, reactive power loss, the installation cost, maintenance and operation of D-STATCOM on the forecast planning horizon with considering constraints of total harmonic distortion voltage and system bus voltages. In this thesis, the backward - forward load flow and combination of analytical – meta-heuristic approaches based on FVSI are proposed. The proposed method reduces the search space to solve the problem and increase the accuracy of the computation. The accuracy of the proposed method is verified by investigating the simulation results of IEEE 18 - bus test system, IEEE 33 bus distribution system and sarcheshmeh copper complex radial distribution network in the city of Rafsanjan.

Keywords: optimal allocation, distribution static compensator, load model, harmonic power flow, hybrid- based optimization method



**Shahrood University of
Technology**

**Faculty of Electrical and Robotics Engineering
M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering**

Distribution Static Compensator Allocation in order to improvement the Power Quality in Distribution Networks

By:
Sepehr Iranmanesh

Supervisor:
Dr. Mahdi Banejad

February, 2022