بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی برق

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق
گرایش قدرت

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت ولتاژ

مؤلف:
غلامرضا معمارزاده

استاد راهنما :
دکتر سعید اسماعیلی

استاد مشاور:
دکتر محسن محمدیان

بهمن‌ماه ۱۳۹۳

این پایان‌نامه به‌عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم‌شده است و هیچ‌گونه مدرکی به‌عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : غلامرضا معمارزاده

استاد راهنما: دکتر سعید اسماعیلی

استاد مشاور : دکتر محسن محمدیان

داور ۱ : دکتر

داور۲ : دکتر

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده : دکتر

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تقدیم به:

پیشگاه قطب علم و عالم امکان، و یگانه منجی عالم بشریت، **حضرت ولی‌عصر «عجل الله تعالی فرجه شریف»**

و پدر و مادر بزرگوارم که در کلیه‌ی مراحل زندگی، به‌ویژه در عرصه‌ی کسب دانش همواره مشوق و پشتیبانم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

پروردگار منان را به بزرگی و رحمتش سپاسگزارم، که در تمامی لحظات زندگی و در طول این تحقیق لطف او شامل حال من بوده است؛

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر اسماعیلی که دلسوزانه راهنما و مشوق من در طول انجام این تحقیق بوده‌اند، کمال تشکر و سپاس را دارم ؛

از پدر و مادر مهربانم که زحمات زیادی را در طول زندگی برای من متحمل شده و می‌شوند، سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

امروزه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت مهم‌ترین اولویت در طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های برق است. تلفات در تمام سطوح سیستم قدرت یعنی تولید انتقال و توزیع وجود دارد که حجم زیادی از تلفات، در سیستم‌های توزیع اتفاق می‌افتد. ازاین‌رو کاهش تلفات در اولویت کاری بهره‌برداران از شبکه‌های توزیع است. از طرفی در سیستم‌های توزیع مدرن امروزی شاهد رشد روزافزون تقاضای الکتریسیته در این شبکه‌ها هستیم. ازآنجایی‌که تحت تأثیر ماهیت متغیر بار روزانه شبکه توزیع می‌تواند تجربه‌ی فروپاشی ولتاژ را داشته باشد، پس بایستی برای جلوگیری از این رخداد شاخص پایداری ولتاژ در این شبکه‌ها موردبررسی جدی قرار گیرد. ازجمله روش‌هایی که برای کاهش تلفات و بهبود پایداری شبکه‌های توزیع مطرح‌شده است، کنترل ولتاژ و توان راکتیو و بازآرایی هستند.

در این پایان‌نامه مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت ولتاژ به‌صورت مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدل‌سازی شده است. اهداف موردبررسی قرارگرفته در این پایان‌نامه به ترتیب شامل تلفات انرژی الکتریکی در سیستم توزیع، انحرافات ولتاژ و پایداری ولتاژ هستند. به همین صورت در مسئله یادشده علاوه بر توابع هدف، ولتاژ باس‌ها، محدودیت بیش‌ترین عملکرد تپ ترانسفورماتور، محدودیت بیش‌ترین عملکرد خازن‌های موازی و قیود حاکم بر مسئله بازآرایی به‌عنوان قیود حاکم بر مسئله مطرح‌شده در این پایان‌نامه در نظر گرفته‌شده‌اند. از طرفی برای امکان پیاده‌سازی همزمان مسائل کنترل ولتاژ و توان راکتیو و بازآرایی جهت انجام بازآرایی روش جدیدی ارائه شده است. در این روش با یافتن حلقه‌های درون شبکه که ناشی از کلیدهای مانوری می‌باشد دامنه جستجو کلیدهای منتخب جهت بازشدن به این حلقه‌ها محدود ساخته شده است. جهت حل مسئله بهینه‌سازی فوق از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک (NSGA-II) که قابلیت مناسبی دررسیدن به جواب بهینه را دارد، بهره‌گیری شده است. همچنین در راستای حل این مسئله به بازه بندی بهینه بار با در نظر گرفتن تنوع بار اقدام شده است. سرانجام روش پیشنهادی به کمک نرم‌افزار متلب بر روی دو شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE و ۷۷ باسه سیرجان پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از حل مسئله فوق نشانگر بهبود مؤثر توابع هدف مطرح‌شده همزمان با ارضا نمودن قیود حاکم بر این مسئله است.

واژه‌های کلیدی: کنترل ولتاژ و توان راکتیو، بازآرایی، شبکه توزیع، قیود امنیت ولتاژ، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک

فهرست

فصل اوّل: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۲

۱-۳ بازآرایی در شبکه‌های توزیع ۴

۱-۴ پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع ۵

۱-۴ طرح مسئله ۶

۱-۵ نمای کلی پایان‌نامه ۷

فصل دوم: بازآرایی و کنترل ولتاژ وتوان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۹

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ بازآرایی در شبکه‌های توزیع ۱۰

۲-۳ روش‌های انجام بازآرایی در شبکه‌های توزیع ۱۱

۲-۳-۱ الگوریتم‌های ابتکاری ۱۱

۲-۳-۲ الگوریتم‌های فرا ابتکاری ۱۲

۲-۴ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۱۴

۲-۴-۱ کنترل محلی ولتاژ وتوان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۱۷

۲-۴-۲ کنترل متمرکز ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۱۸

۲-۴-۲-۱ کنترل آنلاین ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۱۹

۲-۴-۲-۲ کنترل آفلاین ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع ۱۹

۲-۴-۲-۱-۱ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید هارمونیک ۲۰

۲-۴-۲-۲-۲ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع بدون حضور منابع تولید پراکنده ۲۱

۲-۴-۲-۲-۳ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده ۲۲
۲-۵ جمع‌بندی ۲۴
فصل سوم: پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع ۲۵
۳-۱ مقدمه ۲۶
۳-۲ پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع ۲۶
۳-۳ محاسبه شاخص پایداری ولتاژ برای سیستم متشکل از دو باس ۲۶
۳-۴ محاسبه شاخص پایداری ولتاژ برای هر باس ارائه شده توسط چاکراورتی ۲۹
۳-۵ جمع‌بندی ۳۲
فصل چهارم: کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت ولتاژ ۳۳
۴-۱ مقدمه ۳۴
۴-۲ فرمول‌بندی مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو با درنظرگرفتن آرایش بهینه شبکه ۳۵
۴-۲-۱ توابع هدف ۳۵
۴-۲-۱-۱ کمینه‌سازی تلفات انرژی الکتریکی در سیستم توزیع ۳۵
۴-۲-۱-۲ کمینه‌سازی انحرافات ولتاژ ۳۵
۴-۲-۱-۳ بیشینه‌سازی پایداری ولتاژ در شبکه توزیع ۳۶
۴-۲-۲ قیود حاکم بر مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو با درنظرگرفتن آرایش بهینه شبکه ۳۷
۴-۲-۲-۱ قیود حاکم بر مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو ۳۷
۴-۲-۲-۱-۱ولتاژ باس‌ها ۳۷
۴-۲-۲-۱-۲ محدودیت بیشترین تعداد عملکرد تپ ترانسفورماتور ۳۷
۴-۲-۲-۱-۳ محدودیت بیشترین تعداد عملکرد کلید زنی خازن ۳۸
۴-۲-۲-۲ قیود حاکم بر مسئله بازآرایی ۳۸

۴-۲-۲-۲-۱ ولتاژ باس‌ها ۳۸
۴-۲-۲-۲-۲ جریان خطوط ۳۹
۴-۲-۲-۲-۳ حفظ شعاعی بودن شبکه ۳۹
۴-۲-۲-۲-۴ میزان بارها از میزان تولید و ظرفیت شبکه بیشتر نباشد ۳۹
۴-۲-۲-۲-۵ شبکه جدید همه باس‌ها را در بر بگیرد ۳۹
۴-۳ الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو ۳۹
۴-۴ برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موجود در شبکه ۴۱
۴-۴-۱ روش بازه زمانی برای سطوح مختلف بار ۴۲
۴-۴-۱-۱ روش بازه زمانی برای در نظر گرفتن انواع مختلف بار در شبکه توزیع ۴۳
۴-۴-۲ برنامه‌ریزی کلید زنی خازن های موازی ۴۴
۴-۴-۲-۱ برنامه‌ریزی خازنهای طول فیدر ۴۶
۴-۴-۲-۲ برنامه‌ریزی خازنهای پست ۴۶
۴-۵ روش حل مسئله بازآرایی در شبکه‌های توزیع ۴۷
۴-۶ الگوریتم پیشنهادی مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه توزیع و قیود امنیت ولتاژ ۵۱
۴-۷ الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک (NSGA-II) ۵۳
۴-۸ جمع‌بندی ۵۵
فصل پنجم: شبیه‌سازی و ارائه نتایج ۵۶
۵-۱ مقدمه ۵۷
۵-۲ شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۵۷
۵-۲-۱ بحث در مورد نتایج ۷۰
۵-۳ شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه ۷۷ باسه سیرجان ۷۱

۵-۳-۱ بحث در مورد نتایج ۸۲
۵-۴ جمع بندی ۸۳
فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای مطالعات آتی ۸۴
۶-۱ نتیجه‌گیری ۸۵
۶-۲ پیشنهادها ۸۶
مراجع ۸۷
پیوست الف: اطلاعات شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۹۱
پیوست ب: اطلاعات شبکه ۷۷ باسه سیرجان ۹۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱. ترانسفورماتور باقابلیت تغییر تپ زیر بار ۱۵
شکل ۲-۲. بانک خازنی خط توزیع ۱۵
شکل ۲-۳. شبکه توزیع نمونه به همراه تپ ترانسفورماتور و خازنهای پست و طول فیدر ۱۷
شکل۳-۱. سیستم دو باسه برای کار مقاومی و همکاران ۲۷
شکل۳-۲. سیستم دو باسه ساده‌شده برای توضیح روش جاسمون و همکاران ۲۸
شکل ۳-۳. شبکه موردنظر با دو باس برای محاسبه شاخص پایداری در این پایان‌نامه ۲۹
شکل ۴-۲. فلوچارت پیشنهادی الگوریتم حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو ۴۰
شکل ۴-۳. ساختار پیشنهادی جواب مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو ۴۱
شکل ۴-۴. نمودار بار روزانه..... ۴۳
شکل ۴-۵. نمودار بار روزانه بارهای مختلف ۴۵
شکل ۴-۶. اطلاعات به بخشی از یک کروموزوم نمونه جهت برنامه‌ریزی خازن طول فیدر ۴۶
شکل ۴-۷. برنامه‌ریزی خازن پست توزیع. (الف) روش برنامه‌نویسی ساعتی. (ب) اطلاعات مربوط به بخشی از یک کروموزوم نمونه. (ج) برنامه‌ریزی نمونه برای زمان‌بندی ساعاتی عملکرد کلیدزنی خازن پست توزیع ۴۷
شکل ۴-۸. ساختار جواب پیشنهادی برای حل مسئله بازآرایی..... ۴۸
شکل ۴-۹. دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ باسه IEEE..... ۴۹
شکل ۴-۱۱. فلوچارت پیشنهادی جهت حل کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت ولتاژ..... ۵۲
شکل ۴-۱۲. فلوچارت الگوریتم چندهدفه ژنتیک ۵۴
شکل ۵-۲. شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE به همراه خازن‌ها و کلیدهای مانوری ۵۸
شکل۵-۳. سهم مشارکت باسهای شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE در انواع بارها ۵۹

شکل ۵-۴ پروفیل بار معادل شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۶۲
شکل ۵-۵. ولتاژ باس ۱۸ به‌عنوان یکی از دو باس ضعیف سیستم در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۶۶
شکل ۵-۶. شاخص پایداری ولتاژ باس ۱۸ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۶۶
شکل ۵-۷. ولتاژ باس ۳۳ به‌عنوان یکی از دو باس ضعیف سیستم در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۶۷
شکل ۵-۸. شاخص پایداری ولتاژ باس ۳۳ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۶۷
شکل ۵-۹. سطح بهینه پرتو برای سناریو ۳ ..... ۶۹
شکل ۵-۱۰. سطح بهینه پرتو برای سناریو ۴ ..... ۶۹
شکل ۵-۱۱. سطح بهینه پرتو برای سناریو ۵ ..... ۷۰
شکل۵-۱۲. سهم مشارکت باس‌های شماره ۱ تا ۳۹ شبکه ۷۷ باسه سیرجان در انواع بارها ۷۲
شکل۵-۱۳. سهم مشارکت باس‌های شماره ۴۰ تا ۷۷ شبکه ۷۷ باسه سیرجان در انواع بارها ۷۳
شکل ۵-۱۳. دیاگرام شبکه ۷۷ باسه سیرجان ۷۴
شکل ۵-۱۴. ولتاژ باس ۴۴ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۷۹
شکل ۵-۱۵. ولتاژ باس ۱۰۶ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۷۹
شکل ۵-۱۶. شاخص پایداری ولتاژ باس ۴۴ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۸۰
شکل ۵-۱۷. شاخص پایداری ولتاژ باس ۱۰۶ در سناریوهای ۱ تا ۵ ..... ۸۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱. اطلاعات مربوط به حلقه‌ها ۵۰

جدول ۴-۲. اطلاعات مربوط به شاخه‌ها ۵۰

جدول ۵-۱. اطلاعات خازن‌های نصب‌شده در شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۵۸

جدول ۵-۲. پارامترهای استفاده‌شده درروش بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) ۵۹

جدول۵-۳. مقایسه روشهای پیشنهادی جهت بازآرایی شبکه توزیع ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۶۰

جدول۵-۴. نتایج روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۶۱

جدول۵-۵. نتایج روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه استاندارد IEEE ۶۲

جدول ۵-۶. نتایج حاصل از پیاده سازی سناریو ۵ در دو حالت بار ۶۳

جدول ۵-۷. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۳ ..... ۶۳

جدول ۵-۸. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۴ ..... ۶۴

جدول ۵-۹. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۵ ..... ۶۵

جدول ۵-۱۰. خلاصه نتایج سناریوهای ۲ تا ۵ در بحث تلفات و ولتاژ ۶۸

جدول ۵-۱۱. خلاصه نتایج سناریوهای ۲ تا ۵ در بحث شاخص پایداری ولتاژ ۶۸

جدول ۵-۱۲. اطلاعات خازن‌های نصبی در شبکه ۷۷ باسه سیرجان ۷۲

جدول ۵-۱۳. نتایج روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۷۷ باسه سیرجان ۷۵

جدول ۵-۱۴. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۳ ..... ۷۶

جدول ۵-۱۵. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۴ ..... ۷۷

جدول ۵-۱۶. برنامه‌ریزی بهینه تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی برای سناریو ۵ ..... ۷۸

جدول ۵-۱۷. خلاصه نتایج سناریوهای ۲ تا ۵ در بحث تلفات و ولتاژ ۸۱

جدول ۵-۱۸. خلاصه نتایج سناریوهای ۲ تا ۵ در بحث شاخص پایداری ولتاژ ۸۱

جدول ا-الف. اطلاعات خطوط ارتباطی شبکه ۷۷ باسه سیرجان ۹۱

جدول۲-الف. اطلاعات نقاط بار در پیک‌بار ۹۲
جدول ا- ب. اطلاعات خطوط ارتباطی شبکه ۷۷ باسه سیرجان..... ۹۳
جدول۲- ب. اطلاعات نقاط بار در پیک‌بار..... ۹۴

فصل اوّل: مقدمه

۱-۱ مقدمه

مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌های توزیع با توابع هدفی مانند کمینه‌سازی تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش سطح هارمونیک موجود در شبکه و افزایش سطح پایداری ولتاژ مطرح می‌شوند. دراین‌بین شرکت‌های برق مقادیر قابل‌توجهی هزینه را به‌واسطه وجود تلفات در شبکه‌های قدرت متحمل می‌شوند. از طرفی سهم قابل‌توجهی از تلفات سیستم قدرت مربوط به تلفات شبکه‌های توزیع است. از مهم‌ترین دلایل تلفات در سیستم توزیع پایین بودن سطح ولتاژ و درنتیجه زیاد بودن اندازه جریان، عبور توان راکتیو در طول فیدرها، ساختار شعاعی شبکه، عدم تعادل جریان فیدرها، آلودگی هارمونیکی، فرسودگی تجهیزات سیستم و انشعابات غیرمجاز است.

پدیده ناپایداری ولتاژ که می‌تواند در هر دو سیستم انتقال و توزیع اتفاق بیفتد پدیده جدیدی رودرروی مهندسین و محققین سیستم‌های قدرت نیست. با بهبود وضعیت اقتصاد جهانی و بهبود سطح رفاه و زندگی مردم جهان، تقاضا برای انرژی الکتریکی به‌طور روزافزونی افزایش‌یافته است. ازاین‌رو به‌مانند سیستم انتقال، شبکه‌های توزیع نیز در مرز پایداری ولتاژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. کاهش سطح پایداری ولتاژ یکی از مهم‌ترین عواملی است که مانع افزایش باری که توسط شرکت توزیع سرویس‌دهی می‌شود، خواهد شد. به‌طور مثال در سال ۱۹۷۷ با بروز ناپایداری ولتاژ در شبکه توزیع و گسترش این ناپایداری به شبکه انتقال متناظر با این شبکه توزیع موجبات ایجاد خاموشی سراسری در سیستم قدرت کشور برزیل فراهم گشت [۱]. ازاین‌رو در نظر گرفتن قیود پایداری ولتاژ برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع ضروری است.

۱-۲ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع

کنترل ولتاژ و توان راکتیو شامل هماهنگی مناسب بین تجهیزات کنترلی موجود در شبکه برای رسیدن به حالت بهینه در پروفایل ولتاژ باس‌ها و توان راکتیو عبوری از خطوط در سیستم است، که دراین‌بین توابع هدف و قیدهای کنترلی و عملیاتی مرتبط باید در نظر گرفته شوند.

ادوات کنترلی مورداستفاده در بحث کنترل ولتاژ و توان راکتیو خازن‌های موازی شبکه و تپ ترانسفورماتور هستند [۲]. تپ ترانسفورماتور قابلیت تنظیم در زیر بار را داراست. خازن‌های موازی که وظیفه تولید توان راکتیو در شبکه‌های توزیع برای افزایش ولتاژ را بر عهده‌دارند، به دودسته خازن‌های پست و خازن‌های طول فیدر تقسیم می‌شوند.

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع به دودسته کنترل محلی و متمرکز تقسیم‌بندی می‌شود. امروزه در بسیاری از شبکه‌های توزیع سنتی، ترانسفورماتور و خازن‌های شنت از طریق کنترل محلی، و بر اساس کنترل‌کننده‌های مبتنی بر ولتاژ، توان راکتیو یا زمانی عمل می‌کنند [۳-۵]. به این صورت که هر یک از تجهیزات بر اساس تنظیمات از پیش تعیین‌شده و در یک بازه مشخص کنترل می‌شوند. نقص عمده روش کنترل محلی این است که تلفات حداقل نمی‌شوند و پروفایل ولتاژ نیز بهینه نخواهد شد.

دیگر روش کنترل مورد استفاده در شبکه‌های توزیع همان‌طور که گفته شد کنترل متمرکز است. کنترل متمرکز خود به دو دسته کنترل آفلاین[۱] و کنترل آنلاین[۲] تقسیم می‌شود. درروش کنترل آفلاین، هدف پیدا کردن تنظیمات مناسب ترانسفورمر و خازن‌های شنت بر طبق پیش‌بینی بار ۲۴ ساعته است [۲ و ۶]. حال آن‌که در کنترل آنلاین، اندازه‌گیری و محاسبات در همان لحظه انجام می‌شود. که این روش به سطح بالایی از خودکارسازی و همچنین تجهیزات پشتیبانی و ارتباطی نیازمند است که این امر هزینه‌های جاری را افزایش می‌دهد و در بسیاری از سیستم‌های توزیع متداول چنین سطحی از تجهیزات کنترلی و لینک‌های ارتباطی وجود ندارد [۷-۹]. ازاین‌رو اگر در شبکه‌های توزیع توانایی کنترل از راه دور توسط لینک‌های ارتباطی با تمام خازن‌ها وجود داشته باشد، کنترل متمرکز آفلاین با کارایی بهتری بدون شک جایگزین کاملی برای کنترل محلی OLTC و خازن است.

کنترل آفلاین ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

۱) کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید هارمونیک [۶و۱۰-۱۲]

۲) کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع بدون حضور منابع تولید پراکنده [۱۳-۱۴]

۳) کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده [۱۵-۱۷].

تحقیقات اخیر این موضوع را تائید می‌کنند که در صورت در نظر نگرفتن هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه‌های توزیع باعث نا دقیق بودن نتایج می‌شود. که این باعث افزایش سطح هارمونیک و تلفات در شبکه توزیع خواهد شد. در همه تقسیم‌های سه‌گانه صورت گرفته در بالا مسئله کنترل

---

[۱] Online control

[۲] Offline control

ولتاژ و توان راکتیو به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی با ماهیت گسسته و غیرخطی مدل‌سازی شده است. توابع هدف این مسئله به‌طورمعمول پیرامون کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ باس‌ها، کاهش عملکرد OLTC و کلید زنی خازن‌ها هستند. در کنار این توابع هدف، قیودی که به‌طورمعمول برای این مسئله در نظر گرفته می‌شود شامل حداکثر عملکرد کلید زنی خازن‌ها و تپ ترانسفورماتور، محدوده ولتاژ مجاز باس‌ها و حداقل ضریب توان سیستم توزیع است. برای حل این مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم‌های هوشمند به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی برای یافت جواب مسئله استفاده شده است. از الگوریتم‌های ژنتیک، ژنتیک با فازی سازی توابع هدف، تلفیق الگوریتم پرندگان یا اجتماع ذرات با نظریه فازی، فرآیند جفت‌گیری زنبورعسل و کلونی مورچگان جهت حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو بهره‌گیری شده است [۱۵-۱۷]. همچنین با توجه به عدم قطعیت‌های در متغیرهای شبکه و طبیعت احتمالاتی اطلاعات مربوط به تقاضای بار و توان تولیدی منابع تولید پراکنده روش‌های فازی و احتمالاتی برای حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های شامل نیروگاه بادی ارائه‌شده است [۱۶ و ۱۸].

البته در کنار الگوریتم‌های هوشمند از روش‌های ریاضی‌مانند برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو بهره‌گیری شده است اما با توجه به ماهیت چند فازی بودن مسئله و وجود سیستم‌های بزرگ در شبکه‌های موردمطالعه به دلیل حجم بار محاسباتی بالا استفاده ازاین‌روش‌ها مناسب نیست.

۱-۳ بازآرایی در شبکه‌های توزیع

یکی دیگر از راه‌هایی که می‌توان به‌وسیله آن تلفات در سطح توزیع را کاهش داد، بازآرایی شبکه توزیع است. بازآرایی چیزی جز تغییر آرایش شبکه برای رسیدن به هدفی خاص مانند قابلیت اطمینان بالاتر، تلفات کمتر، پروفیل ولتاژ بهتر نیست. هنگام این تغییر آرایش باید به این نکته توجه شود که شبکه جدید ساختار شعاعی خود را حفظ کند همه باس‌ها را در بربگیرد و درعین‌حال تمام قیدهای موجود در طراحی شبکه نیز رعایت شود به‌طور مثال ولتاژ و جریان خطوط سایر تجهیزات شبکه در محدوده مجاز باشد.

در نظر گرفتن همه این مسائل باعث می‌شود تا بازآرایی شبکه به یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده غیرخطی تبدیل شود. پاسخ دقیق این مسئله تنها با حجم وسیع محاسبات و بررسی تمام حالات کلیدها امکان‌پذیر است که این امر برای شبکه‌های حقیقی با تعداد کلیدهای زیاد بسیار زمان‌بر خواهد بود.

ازاین‌رو الگوریتم‌های متعددی برای حل مسئله بازآرایی پیشنهادشده است. روش‌های انجام بازآرایی در شبکه‌های توزیع به دودسته الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری تقسیم می‌شوند.

الگوریتم‌های ابتکاری به‌عنوان اولین الگوریتم برای حل مسئله بازآرایی در شبکه‌های توزیع به کار گرفته‌شده‌اند [۱۹-۲۲]. این الگوریتم‌ها به دلیل سرعت‌بالا دریافت آرایش بهینه شبکه و همچنین توانایی آن‌ها در ارضا کردن دو قید حفظ شعاعی بودن شبکه و تغذیه همه بارهای شبکه تا به امروز نیز مورد تکمیل و توسعه قرارگرفته‌اند. الگوریتم‌های ابتکاری شامل روش‌های بازنمودن متوالی حلقه‌ها و روش جابه‌جایی شاخه‌ها است.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی موجود با استفاده از روش‌های متداول قابل‌حل نمی‌باشند. ازاین‌رو استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت حل مسائل بهینه‌سازی موردتوجه قرار می‌گیرد. استفاده از تئوری احتمالات در این الگوریتم‌ها باعث شده تا توانایی آن‌ها در یافتن بهینه فرامحلی در یک‌زمان قابل‌قبول باشد. الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نوع روش‌های تکرارشونده هستند، یعنی اینکه الگوریتم به‌دفعات تکرار می‌شود. این الگوریتم‌ها بسیاری از مسائل بهینه‌سازی را حل می‌کنند. به‌هرحال یک الگوریتم مشخص برای رسیدن به جواب بهینه در همه مسائل وجود ندارد. بعضی از الگوریتم‌ها جواب بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر در برخی مسائل می‌دهند. بنابراین تحقیقات برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید یک مسئله باز است.ازجمله این روش‌ها را می‌توان الگوریتم ژنتیک، فازی و جستجوی هارمونی را نام برد.

توابع هدف موردتوجه قرارگرفته در مسئله بازآرایی شامل کمینه‌سازی تلفات شبکه، انحرافات ولتاژ، جریان عبوری از شاخه‌ها و کنترل متعادل بودن بار در فیدرهای مختلف است. ازجمله قیود مطرح‌شده برای این مسئله را نیز می‌توان حفظ ساختار شعاعی شبکه، تغذیه تمامی بارهای موجود در شبکه و قرار گرفتن ولتاژ شبکه در محدوده مجاز را نام برد.

۱-٤ پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع

امروزه در سیستم‌های توزیع مدرن با توجه به تنوع شرایط بهره برداری و همچنین نصب تعداد زیادی منابع تولید از جمله منابع تولید پراکنده، جهت داشتن حاشیه امنیت مناسب برای ولتاژ، بایستی قید امنیت ولتاژ نیز به تابع هدف مسئله کنترل ولتاژوتوان‌راکتیو یا بازآرایی در کنار سایر توابع اضافه شود. پس بایستی در سیستم توزیع مورد مطالعه با استفاده از یکی از روش‌های بیان شده جهت محاسبه شاخص پایداری ولتاژ مقدار این پارامتر را برای هر کدام از باس‌های شبکه حساب نموده و

سرانجام با توجه به این مقادیر در مورد وضعیت پایداری شبکه و باس‌های موجود در آن تصمیم گیری لازم صورت گیرد.

۱-٤ طرح مسئله

همان‌طور که گفته شد می‌توان با استفاده از دو روش بهره‌برداری سیستم‌های قدرت که همان بازآرایی و کنترل ولتاژ و توان راکتیو می‌باشند در توابع تلفات، پروفیل ولتاژ شبکه و پایداری ولتاژ بهبود حاصل نمود. از طرفی روش بازآرایی قابلیت بهتری در کاهش تلفات شبکه نسبت به موارد مرتبط به ولتاژ دارد. همچنین در مورد کنترل ولتاژ و توان راکتیو این توانایی‌ها به شکل معکوس با بازآرایی می‌باشد. از این رو برای داشتن بهبود در تمامی موارد تلفات، پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ این ضرورت احساس می‌شود که دو مسئله بازآرایی و کنترل ولتاژ و توان راکتیو به صورت همزمان بر روی شبکه‌های مورد نظر اعمال شود. به عبارت دیگر با اعمال همزمان این دو روش بر روی شبکه توزیع بهره‌برداری پایدار و اقتصادی‌تر خواهد بود. از این رو در این پایان‌نامه به حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت ولتاژ اقدام شده است. این مسئله به‌صورت بهینه‌سازی چندهدفه مدل‌سازی شده است. در مدل پیشنهادی کاهش تلفات انرژی الکتریکی، بهبود پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه و بیشینه‌سازی پایداری ولتاژ شبکه به‌عنوان اهداف مسئله مورد توجه قرارگرفته‌است. قیود حاکم بر مسئله فوق شامل قرارگیری ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز، محدودیت بیش‌ترین تعداد عملکرد تپ ترانسفورماتور و محدودیت بیش‌ترین تعداد عملکرد کلید زنی خازن‌های موازی شبکه هستند. در این راستا الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک برای حل این مسئله استفاده‌شده است. که این الگوریتم چندهدفه ژنتیک همان اصلاح‌شده الگوریتم مرسوم ژنتیک است. بدین‌صورت که به‌جای داشتن یک جواب بهینه از خروجی الگوریتم، دسته‌ای از جواب‌های بهینه در اختیار طراح قرار داده می‌شود تا خود او با توجه به شرایط مسئله اقدام به دریافت جواب موردنظر نماید. جهت بررسی کارآمدی روش مطرح‌شده، شبیه‌سازی مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با در نظر گرفتن آرایش بهینه شبکه و قیود امنیت در چهار مدل موردبررسی قرارگرفته است که عبارت‌اند از:

۱) اعمال بازآرایی صرف بر روی شبکه توزیع
۲) اعمال کنترل ولتاژ و توان راکتیو صرف بر روی شبکه توزیع
۳) ابتدا اعمال بازآرایی بر روی شبکه توزیع موردنظر و یافت آرایش بهینه و سپس اعمال کنترل ولتاژ و توان راکتیو