بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق- قدرت

کنترل توان راکتیو در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

توسط :

محمد امین جنگجو

استاد راهنما

دکتر علیرضا سیفی

شهریور ۱۳۹۱

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب محمد امین جنگجو (۸۸۰۶۳۹) دانشجوی رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر اظهار می‌کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می-نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی :محمد امین جنگجو

تاریخ و امضا ۱۳۹۱/۰۷/۰۸

به نام خدا

کنترل توان راکتیو در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

به کوشش

محمد امین جنگجو

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی
از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی برق- قدرت

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان‌نامه با درجه: **عالی**

دکتر علیرضا سیفی، دانشیار بخش قدرت و کنترل (رئیس کمیته دفاع) .....

دکتر محمد محمدی، استادیار بخش قدرت و کنترل .....

دکتر حیدر صامت، استادیار بخش قدرت و کنترل .....

شهریور ۱۳۹۱

تقدیم به مادرم

که روح زندگی بود.

تقدیم به پدرم

که معنای تلاش بود.

سپاسگزاری

حمد و سپاس خداوند متعال را که فضل و رحمت بی‌کرانش توفیق دیگری نصیب این بنده ناچیز نمود تا بتوانم این پایان‌نامه را به نتیجه برسانم. در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از تمام کسانی که به نحوی در انجام این پایان‌نامه به من کمک کردند تشکر نمایم . پیش از هر چیز از خانواده‌ام که با تلاش فراوان محیط خانوادگی آرامی برای من ایجاد نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و همواره خود را مدیون آنها و زحماتشان خواهم دانست.

همچنین سپاس ویژه از راهنمائیها و حمایتهای بیدریغ دکتر علیرضا سیفی که اگر اعتماد ایشان به بنده حقیر نبود مطمئناً هرگز این تحقیق انجام نمی‌شد.

از اساتید محترم دکتر محمد محمدی و دکتر حیدر صامت نیز که با راهنماییهای خویش مرا در جهت تهیه هرچه بهتر این پایان‌نامه یاری دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

امیدوارم این تلاش علمی ناچیز مورد قبول درگاه احدیت و حضرتش آقا امام زمان (عج) قرار بگیرد.

چکیده

کنترل توان راکتیو در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

به کوشش
محمد امین جنگجو

کنترل توان راکتیو یکی از مسائل مهمی است که در شبکه‌های قدرت، چه در بخش انتقال و چه در بخش توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد. کمبود توان راکتیو در شبکه باعث فرو پاشی ولتاژ در شبکه می‌شود و زیاد بودن آن سبب افزایش تلفات و اضافه ولتاژ در گره‌ها می‌شود. بنابراین لازم است که آن را به طور بهینه کنترل کرد. متغیرهای کنترل‌پدیر در شبکه توزیع عبارتند از ۱- توان اکتیو خروجی DGهای موجود در شبکه ۲- توان راکتیو خروجی بانکهای خازنی موجود در شبکه ۳- موقعیت تپ ترانس موجود در شبکه. مسأله کنترل توان راکتیو عبارت است از پیدا کردن مقادیر بهینه این متغیرهای کنترلی به منظور بهینه کردن تابع هدف مورد نظر، که این تابع هدف می‌تواند کاهش هزینه تلفات اکتیو و یا تثبیت ولتاژ در شبکه باشد.

متغیرهای کنترلی استفاده شده در این پایان‌نامه مقادیر گسسته‌ای دارند بنابراین یک روش برای پیدا کردن بهترین مقادیر این متغیرهای کنترلی جهت مینیمم کردن تابع هدف مفروض این است که به ازای تمامی ترکیبات متغیرهای کنترلی از شبکه پخش بار گرفته شود و ترکیبی که باعث شود تابع هدف مفروض کمترین مقدار خود را داشته باشد بهترین ترکیب است. این روش که به grid search معروف است از دقت کامل و سرعت بسیار پایینی برخوردار است که همین سرعت پایین آن سبب عدم کاربردش در بحث کنترل توان راکتیو می‌شود

در این پایان‌نامه، به کمک تئوری مجموعه‌های فازی روشی برای تعیین مقادیر بهینه این متغیرهای کنترلی با در نظر گرفتن قیود ولتاژ و جریان در شبکه‌های توزیع استفاده شده است که از سرعت و دقت بالایی برخوردار است. روش پیشنهاد شده بر روی شبکه‌ی ۳۴ باسه و ۳۳ باسه به منظور مینیمم کردن تابع هدفهای مختلف تست شده و نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده از روش grid search مقایسه شده است. نتایج این مقایسه بیانگر صحت الگوریتم پیشنهاد شده می‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول ۱
مقدمه ۲
۱-۱- پیشگفتار ۲
فصل دوم ۶
تعیین مقادیر متغیرهای کنترلی در بخش توزیع ۷
۲-۱- مقدمه ۷
۲-۲- مزایای متغیرهای کنترلی در شبکه‌های توزیع ۷
۲-۲-۱- خازن ۷
۲-۲-۱-۱- آزادسازی ظرفیت ۸
۲-۲-۱-۲- کاهش انرژی تلفاتی و تلفات پیک ۹
۲-۲-۲- تپ چنجر ۱۰
۲-۲-۳- منابع تولید پراکنده ۱۲
۲-۲-۳-۱- مزایای استفاده از تولید پراکنده ۱۳
۲-۲-۳-۱-۱- تولید برق اضطراری ۱۳
۲-۲-۳-۱-۲- کیفیت توان و قابلیت اطمینان ۱۳
۲-۲-۳-۱-۳- تولید برق و گرما به صورت هم زمان ۱۴
۲-۲-۳-۱-۴- پیک‌سائی ۱۴
۲-۲-۳-۲- تاثیر منابع تولید پراکنده در کنترل ولتاژ و کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع ۱۴
۲-۳- روشهای تعیین متغیرهای کنترلی به منظور بهینه کردن تابع هدف ۱۶
۲-۳-۱- روشهای تحلیلی ۱۷
۲-۳-۲- روش بهینه‌سازی نیوتن ۱۷

۲-۳-۳- روشهای جدید ۱۷
۲-۳-۳-۱- روش آبکاری فولاد ۱۸
۲-۳-۳-۲- الگوریتم ژنتیک ۱۸
۲-۳-۳-۳- شبکه‌های عصبی ۱۹
۲-۴- روش پیشنهاد شده جهت مقداریابی بهینه‌ی متغیرهای کنترلی ۲۰
۲-۴-۱- تلفات ۲۰
۲-۴-۲- ولتاژ مرجع ۲۱
۲-۴-۳- باس حساس ۲۲
۲-۴-۴- الگوریتم پیشنهاد شده ۲۲
فصل سوم ۲۴
پخش بار در شبکه‌های توزیع ۲۵
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- تاریخچه ۲۵
۳-۳- مدل خط ۲۶
۳-۴- مدل بار و الگوی مصرف ۲۶
۳-۵- روش‌های پخش بار در شبکه‌های توزیع ۲۷
۳-۵-۱- پخش بار مستقیم[۳۷] ۲۷
۳-۵-۱-۱- فرمول‌بندی روش پخش‌بار ۲۸
۳-۵-۱-۲- الگوریتم پخش بار شبکه‌های شعاعی ۲۹
۳-۵-۲- پخش بار به روش Baran, Wu [۳۸] ۲۹
۳-۵-۲-۱- تئوری روش پخش بار Baran, Wu ۲۹
۳-۵-۳- پخش بار به روش Up- Down Stream [۳۹] ۳۱
۳-۵-۳-۱- پخش بار شعاعی ۳۲
۳-۵-۴- روش پخش بار جبرانی[۳۶] ۳۴
۳-۵-۴-۱- مقدمه ۳۴
۳-۵-۴-۲- شماره‌گذاری شاخه‌ها ۳۴

۳-۵-۴-۳- حل شبکه‌های توزیع شعاعی ۳۵
۳-۵-۴-۳-۱- محاسبه جریان گره‌ها ۳۵
۳-۵-۴-۳-۲- حرکت به سمت عقب ۳۶
۳-۵-۴-۳-۳- حرکت به سمت جلو ۳۶
۳-۵-۴-۳-۴- معیار همگرایی ۳۶
فصل چهارم ۳۸
الگوریتم‌های تعیین مقادیر بهینه‌ی متغیرهای کنترلی ۳۹
۴-۱- مقدمه ۳۹
۴-۲- بخش اول ۳۹
۴-۲-۱- تابع هدفهای بررسی شده ۳۹
۴-۲-۱-۱- هزینه‌ی تولید توان اکتیو ۴۰
۴-۲-۱-۲- تثبیت ولتاژ ۴۱
۴-۲-۱-۲-۱- تثبیت ولتاژ بدون در نظر گرفتن هزینه ۴۱
۴-۲-۱-۲-۲- تثبیت ولتاژ با در نظر گرفتن هزینه ۴۲
۴-۲-۱-۳- کاهش هزینه‌ی تلفات ۴۳
۴-۲-۱-۳-۱- هزینه‌ی تلفات اکتیو ۴۳
۴-۲-۱-۳-۲- هزینه تلفات انرژی ۴۳
۴-۲-۱-۳-۳- هزینه تولید در پیک ۴۴
۴-۲-۱-۳-۴- تابع هزینه‌ی تلفات ۴۴
۴-۲-۲- قیود حاکم بر مسئله ۴۵
۴-۲-۲-۱- شرط همگرایی پخش بار ۴۵
۴-۲-۲-۲- شرط ولتاژ ۴۵
۴-۲-۲-۳- شرط جریان ۴۶
۴-۲-۳- ترکیب متغیرهای کنترلی ۴۶
۴-۲-۴- فازی کردن مسئله ۴۷
۴-۲-۴-۱- مقدمه ۴۷

۴-۲-۴-۲- روش کلی کار برای پیدا کردن باس حساس ۴۷
۴-۲-۴-۳- تابع عضویت تلفات توان ۴۸
۴-۲-۴-۴- ۴-۲-۴-۴- تابع عضویت ولتاژ باسها ۴۹
۴-۳- بخش دوم ۵۰
۴-۳-۱- روش کار الگوریتم پیشنهاد شده ۵۰
۴-۴- بخش سوم ۵۲
فصل پنجم ۵۴
مطالعات عددی ۵۵
۵-۱- مقدمه ۵۵
۵-۲- شبیه‌سازی شبکه ۳۴ شینه ۵۵
۵-۳- تابع هدفهای برسی شده بر روی شبکه‌ی ۳۴ شینه ۵۹
۵-۳-۱- تثبیت ولتاژ ۵۹
۵-۳-۱-۱- تثبیت ولتاژ بدون در نظرگرفتن هزینه ۵۹
۵-۳-۱-۱-۱- سناریو اول ۵۹
۵-۳-۱-۱-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۶۱
۵-۳-۱-۱-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۶۳
۵-۳-۱-۱-۲- سناریو دوم ۶۵
۵-۳-۱-۲- تثبیت ولتاژ با در نظرگرفتن هزینه ۶۸
۵-۳-۱-۲-۱- سناریو اول ۶۸
۵-۳-۱-۲-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۷۰
۵-۳-۱-۲-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۷۱
۵-۳-۱-۲-۲- سناریو دوم ۷۲
۵-۳-۲- کاهش هزینه‌ی تلفات ۷۳
۵-۳-۲-۱- سناریو اول ۷۳
۵-۳-۲-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۷۵
۵-۳-۲-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۷۶

۵-۳-۲-۲- سناریو دوم ۷۶
۵-۴- شبیه‌سازی شبکه ۳۳ شینه ۷۸
۵-۵- تابع هدفهای برسی شده در شبکه‌ی ۳۳ شینه ۸۱
۵-۵-۱- تثبیت ولتاژ ۸۱
۵-۵-۱-۱- تثبیت ولتاژ بدون در نظرگرفتن هزینه ۸۱
۵-۵-۱-۱-۱- سناریو اول ۸۱
۵-۵-۱-۱-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۸۳
۵-۵-۱-۱-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۸۵
۵-۵-۱-۱-۲- سناریو دوم ۸۵
۵-۵-۱-۲- تثبیت ولتاژ با در نظرگرفتن هزینه ۸۹
۵-۵-۱-۲-۱- سناریو اول ۸۹
۵-۵-۱-۲-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۹۱
۵-۵-۱-۲-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۹۲
۵-۵-۱-۲-۲- سناریو دوم ۹۳
۵-۵-۲- کاهش هزینه‌ی تلفات ۹۵
۵-۵-۲-۱- سناریو اول ۹۵
۵-۵-۲-۱-۱- ترکیب متغیرهای کنترلی ۹۶
۵-۵-۲-۱-۲- الگوریتم پیشنهاد شده ۹۷
۵-۵-۲-۲- سناریو دوم ۹۸
۵-۶- مقایسه‌ی شاخص پیشنهاد شده با شاخص SN ۱۰۰
۵-۶-۱- تثبیت ولتاژ بدون در نظر گرفتن هزینه ۱۰۰
۵-۶-۱-۱- سناریو اول ۱۰۰
۵-۶-۲- تثبیت ولتاژ با در نظر گرفتن هزینه ۱۰۰
۵-۶-۲-۱- سناریو اول ۱۰۰
۵-۶-۳- کاهش هزینه‌ی تلفات ۱۰۱
۵-۶-۳-۱- سناریو اول ۱۰۱

فصل ششم ۱۰۲
نتایج و پیشنهادات ۱۰۳
۶-۱- مقدمه ۱۰۳
۶-۲- نتایج ۱۰۳
۶-۳- پیشنهادات ۱۰۴
فصل هفتم: ۱۰۵
ضمیمه ۱۰۶
۷-۱- مجموعه فازی ۱۰۶
۷-۱-۱- مقدمه ۱۰۶
۷-۱-۲- نظریه مجموعه‌های فازی در مقابل مجموعه‌های کلاسیک ۱۰۷
۷-۱-۳- تابع عضویت ۱۰۸
۷-۱-۳-۱- تابع عضویت مثلثی(trimf) ۱۰۸
۷-۱-۳-۲- تابع عضویت ذوزنقه‌ای(trapmf) ۱۰۸
۷-۱-۳-۳- تابع عضویت گوسی(gaussmf) ۱۰۹
۷-۱-۳-۴- تابع عضویت زنگوله‌ای شکل(bellmf) ۱۱۰
۷-۱-۴- معرفی مفاهیم اساسی مرتبط با مجموعه‌های فازی ۱۱۰
۷-۱-۴-۱- تکیه‌گاه ۱۱۱
۷-۱-۴-۲- منفرد فازی ۱۱۱
۷-۱-۴-۳- مجموعه فازی تهی ۱۱۱
۷-۱-۴-۴- مرکز ۱۱۱
۷-۱-۴-۵- نقطه تقاطع ۱۱۱
۷-۱-۴-۶- ارتفاع ۱۱۱
۷-۱-۴-۷- برش آلفا ۱۱۲
۷-۱-۵- عملیات بر روی مجموعه فازی ۱۱۲
۷-۱-۵-۱- معادل بودن دو مجموعه فازی ۱۱۲
۷-۱-۵-۲- زیر مجموعه بودن ۱۱۲

۷-۱-۵-۳- مکمل مجموعه فازی ۱۱۳
۷-۱-۵-۴- اجتماع دو مجموعه فازی ۱۱۳
۷-۱-۵-۵- اشتراک دو مجموعه فازی ۱۱۴
۷-۱-۵-۶- ضرب دو مجموعه فازی ۱۱۴
۷-۲- الگوریتم ژنتیک ۱۱۴
۷-۲-۱- مقدمه ۱۱۴
۷-۲-۲- مفاهیم اولیه الگوریتم ژنتیک ساده ۱۱۵
۷-۲-۲-۱- کروموزوم ۱۱۵
۷-۲-۲-۲- کدکردن رشته‌ها ۱۱۵
۷-۲-۲-۳- مقدار برازندگی ۱۱۵
۷-۲-۲-۴- عملگر انتخاب ۱۱۶
۷-۲-۲-۵- عملگر پیوند ۱۱۶
۷-۲-۲-۶- عملگر جهش ۱۱۶
۷-۲-۲-۷- عملگر معکوس ۱۱۷
۷-۲-۲-۸- عملگر تجربی ۱۱۷
فهرست منابع و مآخذ ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱. هزینه‌ی تولید توان اکتیو توسط واحدهای تولیدی ۴۱
جدول ۵-۱. اطلاعات بار نامی شبکه ۳۴شینه ۵۶
جدول ۵-۲. اطلاعات خطوط شبکه ۳۴شینه ۵۷
جدول ۵-۳. اطلاعات متغیرهای کنترلی موجود در شبکه ۳۴ شینه ۵۸
جدول ۵-۴. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی ۶۰
جدول ۵-۵. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی ۶۰
جدول ۵-۶. وضعیت سیستم در سطح بار نامی ۶۰
جدول ۵-۷. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی ۶۱
جدول ۵-۸. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۶۲
جدول ۵-۹. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۶۲
جدول ۵-۱۰. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۶۳
جدول ۵-۱۱. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۶۳
جدول ۵-۱۲. داده‌های منحنی بار مربوط به هر بار ۶۵
جدول ۵-۱۳. داده‌های منحنی بار پیش‌بینی شده مربوط به هر بار ۶۶
جدول ۵-۱۴. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار پیش‌بینی شده ۶۷
جدول ۵-۱۵. معیار انحراف استاندارد و هزینه‌ی توانهای ورودی برای هر سطح بار ۶۷
جدول ۵-۱۶. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی ۶۸
جدول ۵-۱۷. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی ۶۹
جدول ۵-۱۸. وضعیت سیستم در سطح بار نامی ۶۹
جدول ۵-۱۹. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی ۶۹
جدول ۵-۲۰. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۷۰
جدول ۵-۲۱. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۷۱
جدول ۵-۲۲. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۷۲
جدول ۵-۲۳. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار ۷۲
جدول ۵-۲۴. معیار انحراف استاندارد و هزینه‌ی توانهای ورودی به شبکه برای هر سطح بار. ۷۳

جدول ۵-۲۵. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی ۷۴
جدول ۵-۲۶. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی ۷۴
جدول ۵-۲۷. وضعیت سیتم در سطح بار نامی ۷۴
جدول ۵-۲۸. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی ۷۵
جدول ۵-۲۹. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۷۵
جدول ۵-۳۰. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۷۵
جدول ۵-۳۱. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۷۶
جدول ۵-۳۲. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۷۶
جدول ۵-۳۳. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار پیش‌بینی شده ۷۷
جدول ۵-۳۴. هزینه‌ی تلفات اکتیو و هزینه‌ی توانهای ورودی به شبکه برای هر سطح بار ۷۷
جدول ۵-۳۵. اطلاعات بار نامی شبکه ۳۳ شینه ۷۹
جدول ۵-۳۶. اطلاعات خطوط شبکه ۳۳ شینه ۸۰
جدول ۵-۳۷. توانهای راکتیو تولیدی توسط خازنهای موجود در شبکه ۳۴ شینه ۸۰
جدول ۵-۳۸. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی ۸۲
جدول ۵-۳۹. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی ۸۲
جدول ۵-۴۰. وضعیت سیستم در سطح بار نامی ۸۲
جدول ۵-۴۱. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی ۸۳
جدول ۵-۴۲. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۸۳
جدول ۵-۴۳. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۸۴
جدول ۵-۴۴. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۸۵
جدول ۵-۴۵. داده‌های منحنی بار مربوط به هر بار ۸۶
جدول ۵-۴۶. داده‌های منحنی بار پیش‌بینی شده مربوط به هر بار ۸۷
جدول ۵-۴۷. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار ۸۸
جدول ۵-۴۸. معیار انحراف از معیار و هزینه توانهای ورودی برای هر سطح بار ۸۸
جدول ۵-۴۹. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی ۸۹
جدول ۵-۵۰. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی ۸۹
جدول ۵-۵۱. وضعیت سیستم در سطح بار نامی ۹۰
جدول ۵-۵۲. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی ۹۰
جدول ۵-۵۳. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۹۱
جدول ۵-۵۴. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۹۱
جدول ۵-۵۵. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف ۹۲
جدول ۵-۵۶. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی ۹۳

جدول ۵-۵۷. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار ۹۴
جدول ۵-۵۸. معیار انحراف استاندارد و هزینه‌ی توانهای ورودی به شبکه برای هر سطح بار. ۹۴
جدول ۵-۵۹. ضرایب وزنی بهینه برای بارهای نامی..... ۹۵
جدول ۵-۶۰. بهترین مقادیر متغیرهای کنترلی برای سطح بار نامی..... ۹۵
جدول ۵-۶۱. وضعیت سیستم در سطح بار نامی..... ۹۶
جدول ۵-۶۲. وضعیت سیستم قبل از بهینه‌سازی..... ۹۶
جدول ۵-۶۳. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف..... ۹۶
جدول ۵-۶۴. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی..... ۹۷
جدول ۵-۶۵. مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از بهینه‌سازی تابع هدف..... ۹۷
جدول ۵-۶۶. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی..... ۹۷
جدول ۵-۶۷. ضرایب وزنی بدست آمده برای هر سطح بار پیش‌بینی شده..... ۹۸
جدول ۵-۶۸. هزینه‌ی تلفات اکتیو و هزینه‌ی توانهای ورودی به شبکه برای هر سطح بار ۹۸
جدول ۵-۶۹. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی..... ۱۰۰
جدول ۵-۷۰. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی..... ۱۰۱
جدول ۵-۷۱. وضعیت سیستم بعد از بهینه‌سازی..... ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱. آزاد سازی ظرفیت بعد از جبران توان راکتیو ۸
شکل ۲-۲. دیاگرام تک خطی شبکه‌ی توزیع در حضور خازن..... ۹
شکل ۲-۳. دیاگرام تک خطی تپ‌جنجر..... ۱۱
شکل ۲-۴. مدار معادل تپ‌چنجر..... ۱۱
شکل ۲-۵. مدار کنترلر تپ‌چنجر ۱۲
شکل ۲-۶. دیاگرام تک خطی شبکه‌ی توزیع در حضور DG..... ۱۵
شکل ۲-۷. دیاگرام تک خطی شبکه‌ی توزیع ۲۲
شکل ۳-۱. دیاگرام تک خطی شبکه شعاعی ۲۹
شکل ۳-۲. نمونه شماره‌گذاری شاخه‌ها و باسها..... ۳۲
شکل ۳-۳. شبکه با دو گره و یک شاخه..... ۳۳
شکل ۳-۴. نحوه شماره‌گذاری شاخه‌های یک شبکه توزیع با ساختار شعاعی..... ۳۵
شکل ۴-۱. منحنی بار روزانه برای هر بار ۵۳
شکل ۵-۱. شبکه ۳۳ شینه..... ۵۶
شکل ۵-۲. پروفیل ولتاژ سیستم قبل و بعد از وقوع اغتشاش..... ۶۱
شکل ۵-۳. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی..... ۶۲
شکل ۵-۴. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی ۶۴
شکل ۵-۵. ولتاژ باسهای سیستم بعد از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ۴-۱ و الگوریتم پیشنهاد شده..... ۶۴
شکل ۵-۶. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز..... ۶۸
شکل ۵-۷. پروفیل ولتاژ سیستم قبل و بعد از وقوع اغتشاش..... ۷۰
شکل ۵-۸. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی..... ۷۱

شکل ۵-۹. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز ۷۳
شکل ۵-۱۰. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز ۷۷
شکل ۵-۱۱. شبکه ۳۳ شینه ۷۸
شکل ۵-۱۲. پروفیل ولتاژ سیستم قبل و بعد از افزایش بار ۸۳
شکل ۵-۱۳. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی ۸۴
شکل ۵-۱۴. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز ۸۸
شکل ۵-۱۵. پروفیل ولتاژ سیستم قبل و بعد از افزایش بار ۹۰
شکل ۵-۱۶. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی ۹۲
شکل ۵-۱۷. ولتاژ باسهای سیستم قبل و بعد از بهینه‌سازی ۹۳
شکل ۵-۱۸. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز ۹۴
شکل ۵-۱۹. وضعیت متغیرهای کنترلی در طول شبانه روز ۹۹
شکل ۷-۱. تابع عضویت مثلثی ۱۰۸
شکل ۷-۲. تابع عضویت ذوزنقه‌ای ۱۰۹
شکل ۷-۳. تابع عضویت گوسی ۱۰۹
شکل ۷-۴. تابع عضویت زنگوله‌ای شکل ۱۱۰
شکل ۷-۵. زیر مجموعه بودن دو مجموعه فازی ۱۱۲
شکل ۷-۶. مجموعه فازی A و مکمل آن ۱۱۳
شکل ۷-۷. دو مجموعه فازی A وB ۱۱۳
شکل ۷-۸. اجتماع دو مجموعه فازی A وB ۱۱۳
شکل ۷-۹. اشتراک دو مجموعه فازی A وB ۱۱۴

فصل اول