

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش سیستم‌های قدرت

عنوان

برنامه‌ریزی روزانه غیر متمرکز شبکه‌های توزیع

با در نظر گرفتن ریز شبکه‌ها

نگارنده

عادل بهدانی

استاد راهنما

دکتر مجید علومی بایگی

بهار ۹۷

اینجانب عادل بهدانی به شماره دانشجویی ۹۴۲۳۰۵۸۰۶۵ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-سیستم های قدرت دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه:

" برنامه ریزی روزانه غیر متمرکز شبکه های توزیع با در نظر گرفتن ریزش بکه ها " تحت راهنمایی آقای دکتر مجید علومی بایگی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد کرده ام.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نگردیده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است. مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا «Ferdowsi University of Mashhad» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده اند را در مقالات مستخرج از رساله رعایت کنم و در تمامی آن ها نام استاد(ان) راهنما به عنوان نویسنده مسئول و نشانی الکترونیکی دانشگاهی آنان را قید نمایم.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی داشته یا از آن ها استفاده کرده ام، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق پژوهشی را رعایت نموده ام.



تاریخ: ۱۳۹۷/۲/۳۱

عادل بهدانی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوط ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

بسمه تعالی

برگه ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو: شماره دانشجویی: ۹۴۲۳۵۸۰۶ گروه آموزشی:
 رشته: گرایش: تاریخ دفاع: ۱۳۹۷/۲/۲۹ نام و نام خانوادگی استاد راهنما:
 عنوان پایان نامه:

معیارهای ارزشیابی		حداکثر نمره	نمره کسب شده	ملاحظات
کیفیت نگارش	نسجام در تنظیم و تدوین مطالب، حسن نگارش و رعایت دستورالعمل	۳	۲/۵	
	کیفیت تصاویر، اشکال و منحنی های استفاده شده			
کیفیت علمی	بررسی تاریخچه موضوع و بیان سابقه پژوهش در موضوع	۱۲	۱۱/۵	
	ابتکار و نوآوری			
	ارزش علمی و یا کاربردی			
	استفاده از منابع و مؤاخذ به لحاظ کمی و کیفی (به روز بودن)			
کیفیت ارائه	کیفیت نظرات و پیشنهادات برای ادامه تحقیق	۳	۳	
	تسلط به موضوع و توانایی در پاسخگویی به سئوالات در جلسه دفاع			
مقاله	نحوه ارائه (رعایت زمان، تنظیم موضوع، کیفیت پاورپوینت و ...	۱	—	
	مقاله مستخرج از پایان نامه که براساس دستورالعمل تهیه و به تأیید استاد راهنما رسیده و به همراه پایان نامه تحویل گردیده است			
گزارش ها	تحویل به موقع گزارش ها	۱	۱	
نمره پایان نامه		۲۰	۱۸/۵	

اعضای هیئت علمی	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	نام دانشگاه	امضاء
استاد راهنما	مجید علوی	دانشیار	خراسان	
استاد مشاور				
عضو دفاع ۱	آرژنگ محمدحسین جادری	استاد	خراسان	
عضو دفاع ۲	آرژنگ حبیب زاده	استاد	خراسان	
نماینده تحصیلات تکمیلی	آرژنگ حرار سار	استاد	خراسان	

جلسه دفاع با حضور هیئت داوران تشکیل و پایان نامه با اخذ نمره به عدد ۱۸/۵ حروف و اعداد با درجه ...

بدون اصلاحات پذیرفته شد. ☐

با اصلاحات پذیرفته شد (دانشجو موظف است تا تاریخ ۱۳۹۷/۲/۲۹ پایان نامه اصلاح شده خود را که به تأیید ... رسیده

است به گروه آموزشی تحویل دهد).

☐ مردود شناخته شد.

گزارش نماینده تحصیلات تکمیلی:

نام و امضای نماینده تحصیلات تکمیلی:

تاریخ و امضا

نام مدیر گروه

** (لطفاً به توضیحات مندرج در پشت برگه توجه فرمائید)**

تقدیم بہ پدر و مادر م



بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه:

برنامه‌ریزی روزانه غیرمتمرکز شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن ریزشبکه‌ها

نام نویسنده: عادل بهدانی

نام استاد راهنما: دکتر مجید علومی بایگی

دانشکده: مهندسی

گروه: مهندسی برق

رشته تحصیلی: مهندسی برق - قدرت

تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

تاریخ دفاع: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ●

دکتری ○

تعداد صفحات: ۱۲۰

چکیده رساله/پایان نامه :

با توجه به نفوذ گسترده منابع تجدیدپذیر انرژی، تغییرات ایجاد شده در الگوی مصرف مشترکین به واسطه تبدیل بارهای غیر فعال به بارهای پاسخگو، ایجاد و افزایش ریزشبکه‌ها در سراسر دنیا و تبدیل شبکه‌های توزیع سنتی به شبکه‌های توزیع هوشمند نیاز به یک مدیریت و برنامه‌ریزی غیر متمرکز، با در نظر داشتن حداقل هزینه‌ها می‌باشد. چرا که برنامه‌ریزی متمرکز برای شبکه‌های توزیع به واسطه زمان اجرای زیاد، آسیب‌پذیری آن در برابر حملات سایبری، عدم رعایت حریم خصوصی اطلاعات مشترکین و از همه مهمتر وجود ریزشبکه‌ها با تولیدهای مستقل از شبکه توزیع، پاسخگوی نیازهای مشترکین نمی‌باشد. در این پایان‌نامه برنامه‌ریزی غیر متمرکز شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها با استفاده از الگوریتم غیر متمرکز ATC، انجام گرفته است. هر کدام از شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های آن شامل انواع بار، اعم از قابل جابجایی، قابل قطع و ثابت، تولیدات پراکنده قابل برنامه‌ریزی و غیر قابل برنامه‌ریزی و سیستم‌های ذخیره انرژی می‌باشند. ابتدا برنامه‌ریزی متمرکز یک شبکه توزیع و ریزشبکه‌های متصل به آن توسط یک بهینه‌سازی مدل می‌گردد. سپس، بهینه‌سازی متمرکز به چند بهینه‌سازی شامل بهینه‌سازی شبکه توزیع، و یک بهینه‌سازی برای هر ریزشبکه شکسته می‌شود. قیمت توان گره انتقال که شبکه توزیع به آن متصل است توسط منحنی حدس قیمت برای ساعت‌های مختلف مدل می‌شود. ابتدا یک شبکه توزیع متصل به گره انتقال در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی‌های غیر متمرکز به صورت تکراری با تبادل اطلاعات بین شبکه توزیع و ریزشبکه‌های آن حل می‌شوند. سپس دو شبکه توزیع متصل به گره انتقال در نظر گرفته می‌شود. در این حالت برای حل مسئله به صورت تکراری علاوه بر تبادل داخلی اطلاعات بین شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های متصل به آنها، بین شبکه‌های توزیع نیز، برای رسیدن به تفاهم بر سر توان درخواستی از شبکه بالادست، تبادل اطلاعات انجام می‌شود. در این پایان‌نامه، از هر دو مدل پخش بار DC و AC مخصوص شبکه‌های توزیع شعاعی بهره برده شده است. در مدل پخش بار DC اطلاعات توان اکتیو بین شبکه توزیع و ریزشبکه‌ها تبادل می‌شود. در مدل پخش بار AC، علاوه بر اطلاعات توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع و ریزشبکه‌های آن نیز تبادل می‌گردد. در انتها روش پیشنهادی به یک شبکه توزیع ۳۹ گره و دو شبکه توزیع ۳۹ گره متصل به یک گره انتقال که هر کدام دارای چهار ریزشبکه می‌باشند، اعمال و نتایج تحلیل می‌گردند. به منظور صحت سنجی مسئله غیر متمرکز، پاسخ مسئله متمرکز در هر یک از حالت‌های فوق با پاسخ مسئله غیر متمرکز مقایسه می‌گردد.

کلید واژه:

۱. شبکه توزیع

۲. ریزشبکه

۳. برنامه‌ریزی غیر متمرکز

۴. برنامه‌ریزی متمرکز

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

قدردانی و شکر

منت خدای را عزوجل، که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می رود مدح حیات است چون برمی آید مفرح ذات. پس در هر نفسی نعمتی و بر هر نعمتی شکری واجب.

از دست و زبان که برآید کز عهده شکرش به درآید (حدی)

سپاس از خانواده عزیزم که همواره در تمامی مراحل زندگی ام همراه و بهکام من بوده اند. سپاس از استاد کرامت‌دور و با اخلاقم، جناب آقای دکتر مجید علومی که رهنمودهای ارزشمند ایشان، همواره راهگشای زندگی و مسیر تحقیقات علمی ام بوده است. در پایان از خداوند منان برای این عزیزان سلامتی و تندرستی مسألت می‌نمایم.

عادل بهدانی

بهار ۹۷

چکیده

با توجه به نفوذ گسترده منابع تجدیدپذیر انرژی، تغییرات ایجاد شده در الگوی مصرف مشترکین به واسطه تبدیل بارهای غیر فعال به بارهای پاسخگو، ایجاد و افزایش ریزشکده‌ها در سراسر دنیا و تبدیل شبکه‌های توزیع سنتی به شبکه‌های توزیع هوشمند نیاز به یک مدیریت و برنامه‌ریزی غیر متمرکز، با در نظر داشتن حداقل هزینه‌ها می‌باشد. چرا که برنامه‌ریزی متمرکز برای شبکه‌های توزیع به واسطه زمان اجرای زیاد، آسیب‌پذیری آن در برابر حملات سایبری، عدم رعایت حریم خصوصی اطلاعات مشترکین و از همه مهم‌تر وجود ریزشکده‌ها با تولیدهای مستقل از شبکه توزیع، پاسخگوی نیازهای مشترکین نمی‌باشد. در این پایان‌نامه برنامه‌ریزی غیر متمرکز شبکه‌های توزیع و ریزشکده‌ها با استفاده از الگوریتم غیر متمرکز ATC^۱، انجام گرفته است. هر کدام از شبکه‌های توزیع و ریزشکده‌های آن شامل انواع بار، اعم از قابل جابجایی، قابل قطع و ثابت، تولیدات پراکنده قابل برنامه‌ریزی و غیر قابل برنامه‌ریزی و سیستم‌های ذخیره انرژی می‌باشند. ابتدا برنامه‌ریزی متمرکز یک شبکه توزیع و ریزشکده‌های متصل به آن توسط یک بهینه‌سازی مدل می‌گردد. سپس، بهینه‌سازی متمرکز به چند بهینه‌سازی شامل بهینه‌سازی شبکه توزیع، و یک بهینه‌سازی برای هر ریزشکده شکسته می‌شود. قیمت توان گره انتقال که شبکه توزیع به آن متصل است توسط منحنی حدس قیمت^۲ برای ساعت‌های مختلف مدل می‌شود. ابتدا یک شبکه توزیع متصل به گره انتقال در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی‌های غیر متمرکز به صورت تکراری با تبادل اطلاعات بین شبکه توزیع و ریزشکده‌های آن حل می‌شوند. سپس دو شبکه توزیع متصل به گره انتقال در نظر گرفته می‌شود. در این حالت برای حل مسئله به صورت تکراری علاوه بر تبادل داخلی اطلاعات بین شبکه‌های توزیع و ریزشکده‌های متصل به آنها، بین شبکه‌های توزیع نیز، برای رسیدن به تفاهم بر سر توان درخواستی از شبکه بالادست، تبادل اطلاعات انجام می‌شود. در این پایان‌نامه، از هر دو مدل پخش بار DC و AC مخصوص شبکه‌های توزیع شعاعی بهره برده شده است. در مدل پخش بار DC اطلاعات توان اکتیو بین شبکه توزیع و ریزشکده‌ها تبادل می‌شود. در مدل پخش بار AC، علاوه بر اطلاعات توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع و ریزشکده‌های آن نیز تبادل می‌گردد. در انتها روش پیشنهادی به یک شبکه توزیع ۳۹ گره و دو شبکه توزیع ۳۹ گره متصل به یک گره انتقال که هر کدام دارای چهار ریزشکده می‌باشند، اعمال و نتایج تحلیل می‌گردند. به منظور صحت سنجی مسئله غیر متمرکز، پاسخ مسئله متمرکز در هر یک از حالت‌های فوق با پاسخ مسئله غیر متمرکز مقایسه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

شبکه توزیع، ریزشکده، برنامه‌ریزی غیر متمرکز، برنامه‌ریزی متمرکز، روش غیر متمرکز ATC

^۱ Analytical Target Cascading (ATC)

^۲ Price Conjecture Curve

صفحه	فهرست مطالب
۱	۱ طرح مسئله.....
۱-۱	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های آن.....
۴	۳-۱ انگیزه و ضرورت انجام طرح.....
۴	۴-۱ تعریف مسئله.....
۶	۲ مروری بر مفاهیم و ادبیات موضوع.....
۶	۱-۲ مقدمه‌ای بر ریزشبکه‌ها.....
۷	۱-۱-۲ ریزشبکه‌ها و نقش آنها در بهبود عملکرد شبکه.....
۸	۲-۱-۲ اجزای اصلی ریزشبکه.....
۱۰	۳-۱-۲ برنامه‌ریزی ریزشبکه.....
۱۰	۱-۳-۱-۲ روش برنامه‌ریزی.....
۱۰	۲-۳-۱-۲ معماری برنامه‌ریزی.....
۱۱	۲-۲ مقایسه الگوریتم‌های توزیع شده/غیر متمرکز با الگوریتم‌های متمرکز.....
۱۲	۱-۲-۲ الگوریتم‌های توزیع شده/غیر متمرکز.....
۱۵	۳-۲ پیشینه پژوهش.....
۱۵	۱-۳-۲ برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مستقل ریزشبکه‌ها.....
۱۶	۲-۳-۲ برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه توزیع و ریزشبکه‌های متصل به آن.....
۲۲	۳ روش تجزیه بهینه‌سازی ATC.....
۳۲	۴ مدل‌سازی و برنامه‌ریزی شبکه توزیع و ریزشبکه‌های آن.....
۳۲	۱-۴ مدل‌سازی.....
۳۲	۱-۱-۴ بار.....
۳۳	۱-۱-۱-۴ بارهای جابجاپذیر.....
۳۴	۲-۱-۱-۴ بارهای قابل قطع.....
۳۵	۲-۱-۴ تولید.....
۳۷	۳-۱-۴ سیستم ذخیره انرژی.....
۳۸	۴-۱-۴ پخش بار بهینه.....
۳۹	۱-۴-۱-۴ پخش بار متناوب.....
۴۲	۵-۱-۴ تبادل توان با شبکه بالادست.....
۴۴	۲-۴ مدل‌سازی و برنامه‌ریزی شبکه توزیع و ریزشبکه‌های آن.....
۴۴	۱-۲-۴ فرمول‌بندی با استفاده از پخش بار مستقیم.....
۴۵	۱-۱-۲-۴ برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع.....
۵۳	۲-۱-۲-۴ برنامه‌ریزی چند شبکه توزیع.....
۵۸	۲-۲-۴ فرمول‌بندی با استفاده از پخش بار متناوب.....
۵۸	۱-۲-۲-۴ برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع.....

۶۴.....	۲-۲-۴ برنامه‌ریزی چند شبکه توزیع.....
۶۹.....	۵ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج.....
۶۹.....	۱-۵ مطالعه یک شبکه توزیع متصل به گره انتقال.....
۹۳.....	۲-۵ مطالعه دو شبکه توزیع متصل به یک گره انتقال.....
۱۱۵.....	۶ جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
۱۱۵.....	۱-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۱۷.....	۲-۶ پیشنهادها.....
۱۱۸.....	مراجع.....

صفحه

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ : شمای کلی از مشترکین مختلف انرژی الکتریکی در سطح توزیع..... ۳
- شکل ۱-۲ : نمایی ساده از معماری ریزشبكة و اجزای آن..... ۹
- شکل ۲-۲ : ساختار بهینه‌سازی‌های توزیع شده و غیر متمرکز..... ۱۲
- شکل ۳-۲ : دسته‌بندی بهینه‌سازی‌های تجزیه شده..... ۱۳
- شکل ۴-۲ : مدل مسئله بهینه‌سازی مرجع ۲۰
- شکل ۱-۳ : ساختار سلسله مراتبی مسئله..... ۲۴
- شکل ۲-۳ : متغیرهای هدف مسئله به عنوان رابط بین اجزاء..... ۲۴
- شکل ۳-۳ : جریان تبادل اطلاعات در الگوریتم ATC..... ۲۹
- شکل ۴-۳ : روندنما حل الگوریتم ATC با الف) یک حلقه و ب) دو حلقه..... ۳۱
- شکل ۱-۴ : دیاگرام شبکه شعاعی..... ۳۹
- شکل ۲-۴ : منحنی تخمین قیمت حاشیه‌ای محلی گره انتقال شبکه توزیع مورد مطالعه..... ۴۳
- شکل ۳-۴ : دسته‌بندی فرمول‌بندی‌های ارائه شده، برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع و ریزشبكة‌های آن..... ۴۴
- شکل ۴-۴ : ساختار مدل با در نظر داشتن یک شبکه توزیع..... ۴۵
- شکل ۵-۴ : روندنما حل مسئله غیر متمرکز DC با وجود یک شبکه توزیع..... ۵۲
- شکل ۶-۴ : ساختار مدل با در نظر داشتن دو شبکه توزیع..... ۵۳
- شکل ۷-۴ : روندنما حل مسئله غیر متمرکز DC با وجود دو شبکه توزیع..... ۵۷
- شکل ۸-۴ : روندنما حل مسئله غیر متمرکز AC با یک شبکه توزیع..... ۶۴
- شکل ۹-۴ : روندنما حل مسئله غیر متمرکز AC با وجود دو شبکه توزیع..... ۶۸
- شکل ۱-۵ : شبکه توزیع ۳۹ گره شماره ۱..... ۷۱
- شکل ۲-۵ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته ریزشبكة اول شبکه توزیع شماره ۱..... ۷۸
- شکل ۳-۵ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته ریزشبكة دوم شبکه توزیع شماره ۱..... ۸۰
- شکل ۴-۵ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته بهره‌بردار شبکه توزیع پایه شماره ۱..... ۸۱
- شکل ۵-۵ : مقایسه بار کل شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزشبكة‌ها و توان خریداری شده از شبکه بالادست..... ۸۱
- شکل ۶-۵ : توان تبدالی با شبکه بالادست و قیمت خرید توان..... ۸۲
- شکل ۷-۵ : همگرایی توان تبدالی بهینه، بین ریزشبكة اول و شبکه توزیع پایه شماره ۱، در ساعت ۵..... ۸۳
- شکل ۸-۵ : همگرایی توان تبدالی بهینه، بین ریزشبكة دوم و شبکه توزیع پایه شماره ۱، در ساعت ۲۰..... ۸۳
- شکل ۹-۵ : توان تبدالی بین شبکه توزیع پایه و ریزشبكة اول، از دید شبکه توزیع پایه، با تغییر پارامتر آلفا..... ۸۴
- شکل ۱۰-۵ : توان تبدالی بین شبکه توزیع پایه و ریزشبكة دوم، از دید شبکه توزیع پایه، با تغییر پارامتر آلفا..... ۸۵

- شکل ۵-۱۱ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته ریزش شبکه چهارم شبکه توزیع شماره ۱..... ۸۷
- شکل ۵-۱۲ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته شبکه توزیع پایه شماره ۱..... ۸۸
- شکل ۵-۱۳ : همگرایی توان اکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه چهارم در ساعت ۵..... ۸۹
- شکل ۵-۱۴ : همگرایی توان راکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه چهارم در ساعت ۵..... ۸۹
- شکل ۵-۱۵ : همگرایی ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه چهارم در ساعت ۵..... ۹۰
- شکل ۵-۱۶ : مقایسه بار کل شبکه توزیع شماره ۱ و توان خریداری شده از شبکه بالادست..... ۹۱
- شکل ۵-۱۷ : توان تبادلی با شبکه بالادست و قیمت خرید توان..... ۹۱
- شکل ۵-۱۸ : تلفات کل شبکه در هر ساعت از بازه برنامه‌ریزی..... ۹۲
- شکل ۵-۱۹ : توان تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه چهارم آن در ساعت ۵ بر حسب آلفا..... ۹۲
- شکل ۵-۲۰ : دو شبکه توزیع ۳۹ گره متصل به یک گره انتقال..... ۹۵
- شکل ۵-۲۱ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته شبکه توزیع پایه شماره ۱..... ۱۰۱
- شکل ۵-۲۲ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته شبکه توزیع پایه شماره ۲..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۳ : توان تبادلی با شبکه بالادست و قیمت خرید توان برای هر دو بهره‌بردار شبکه‌های توزیع..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۴ : مقایسه بار کل شبکه‌های توزیع و میزان توان خریداری شده آنها از شبکه بالادست..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۵ : همگرایی بین توان تبادلی شبکه توزیع پایه شماره ۲ و ریزش شبکه چهارم در ساعت ۱۹..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۶ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته ریزش شبکه دوم شبکه توزیع شماره ۱..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۷ : برنامه‌ریزی بهینه ۲۴ ساعته ریزش شبکه سوم شبکه توزیع شماره ۲..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۸ : توان خریداری شده از شبکه بالادست و قیمت آن برای هر دو شبکه توزیع ۱ و ۲..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۹ : مقایسه بار کل شبکه‌های توزیع و ریزش شبکه‌های آنها و توان خریداری شده از شبکه بالادست..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳۰ : تلفات اکتیو کل، برای هر دو شبکه توزیع در هر ساعت از بازه برنامه‌ریزی..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۱ : همگرایی توان اکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه دوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۲ : همگرایی توان راکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه دوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۳ : همگرایی ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع پایه شماره ۱ و ریزش شبکه دوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۴ : همگرایی توان اکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۲ و ریزش شبکه سوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۵ : همگرایی توان راکتیو تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۲ و ریزش شبکه سوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۶ : همگرایی ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع پایه شماره ۲ و ریزش شبکه سوم در ساعت ۱۷..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۷ : توان تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۲ و ریزش شبکه سوم آن در ساعت ۱۷ بر حسب آلفا..... ۱۱۴

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول ۵-۱ : مشخصات واحدهای تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی شبکه توزیع شماره ۱.....	۷۰
جدول ۵-۲ : میزان پیش‌بینی تولید واحدهای غیرقابل برنامه‌ریزی تجدیدپذیر شبکه توزیع شماره ۱.....	۷۲
جدول ۵-۳ : اطلاعات سیستم‌های ذخیره انرژی شبکه توزیع شماره ۱ در روز مورد مطالعه.....	۷۳
جدول ۵-۴ : مشخصات بارهای قابل جابجایی شبکه توزیع شماره ۱ در روز مورد مطالعه.....	۷۴
جدول ۵-۵ : بار ثابت ساعتی کل شبکه توزیع شماره ۱ در روز مورد مطالعه.....	۷۵
جدول ۵-۶ : مشخصات بارهای قابل قطع شبکه توزیع شماره ۱ در روز مورد مطالعه.....	۷۶
جدول ۵-۷ : شیب و عرض از مبدا منحنی‌های حدس قیمت انرژی در گره انتقال شبکه توزیع ۱.....	۷۷
جدول ۵-۸ : مقادیر پارامترهای تنظیم، در روش غیر متمرکز.....	۷۸
جدول ۵-۹ : خطای توان تبادلی ریزشبه اول با شبکه توزیع پایه شماره ۱ در ساعت ۵.....	۸۵
جدول ۵-۱۰ : خطای توان تبادلی ریزشبه دوم با شبکه توزیع پایه ۱ در ساعت ۲۰.....	۸۶
جدول ۵-۱۱ : ظرفیت مبدل‌های منابع تولید پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی شبکه توزیع شماره ۱.....	۸۶
جدول ۵-۱۲ : خطای توان تبادلی شبکه توزیع پایه شماره ۱ با ریزشبه چهارم در ساعت ۵.....	۹۳
جدول ۵-۱۳ : مشخصات واحدهای تولید پراکنده قابل برنامه‌ریزی شبکه توزیع شماره ۲.....	۹۴
جدول ۵-۱۴ : میزان پیش‌بینی تولید واحدهای غیرقابل برنامه‌ریزی تجدیدپذیر شبکه توزیع شماره ۲.....	۹۶
جدول ۵-۱۵ : اطلاعات سیستم‌های ذخیره انرژی شبکه توزیع شماره ۲ در روز مورد مطالعه.....	۹۷
جدول ۵-۱۶ : مشخصات بارهای قابل جابجایی شبکه توزیع شماره ۲ در روز مورد مطالعه.....	۹۷
جدول ۵-۱۷ : بار ثابت ساعتی کل برای شبکه توزیع شماره ۲ و ریزشبه‌های متصل به آن.....	۹۸
جدول ۵-۱۸ : مشخصات بارهای قابل قطع شبکه توزیع شماره ۲ در روز مورد مطالعه.....	۹۹
جدول ۵-۱۹ : شیب و عرض از مبدا منحنی حدس قیمت انرژی در گره انتقال شبکه توزیع ۲.....	۱۰۰
جدول ۵-۲۰ : خطای توان تبادلی شبکه توزیع شماره ۲ با ریزشبه چهارم آن در ساعت ۱۹.....	۱۰۵
جدول ۵-۲۱ : ظرفیت مبدل‌های منابع تولید پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی شبکه توزیع شماره ۲.....	۱۰۶
جدول ۵-۲۲ : خطای توان تبادلی بین شبکه توزیع پایه شماره ۲ با ریزشبه سوم آن در ساعت ۱۷.....	۱۱۴

فهرست علائم

شاخص‌ها	
$t \in [t_1, \dots, T]$	شاخص زمان برنامه‌ریزی
g	شاخص تولیدات پراکنده
b	شاخص باتری
e	شاخص منابع تجدیدپذیر انرژی
l	شاخص بار (اعم از بار ثابت، قابل کاهش و قابل جابجایی)
i, j, k	شاخص‌های گره‌های شبکه
m	شاخص ریزشبکه
n, w	شاخص شبکه توزیع
مجموعه‌ها	
A	مجموعه شبکه‌های توزیع متصل به گره انتقال
G	مجموعه تولیدات پراکنده (به غیر از تولیدات بادی و خورشیدی)
B	مجموعه باتری‌ها
CL	مجموعه بارهای قابل قطع
E	مجموعه منابع تجدیدپذیر انرژی (تولیدات بادی و خورشیدی)
SL	مجموعه بارهای قابل جابجایی
N	مجموعه گره‌های شبکه
MG	مجموعه ریزشبکه‌ها
L	مجموعه خطوط شبکه
G_i	مجموعه ژنراتورهای متصل به گره i ام
B_i	مجموعه باتری‌های متصل به گره i ام
CL_i	مجموعه بارهای قابل قطع متصل به گره i ام
SL_i	مجموعه بارهای قابل جابجایی متصل به گره i ام
E_i	مجموعه منابع تجدیدپذیر انرژی متصل به گره i ام
$N^{In, DSO}$	مجموعه گره‌هایی از شبکه توزیع که اتصال به ریزشبکه‌ها یا شبکه بالادست ندارند

مجموعه گره‌هایی از شبکه توزیع که به ریزشک‌ها متصل‌اند	$N^{B,DSO}$
مجموعه گره‌هایی از ریزشک‌ها که هیچ اتصالی به شبکه توزیع ندارند	$N^{In,MG}$
متغیرها	
توان اکتیو خروجی از گره i در شبکه شعاعی در ساعت t ام، که گره i بالادستی گره j می باشد	$P_{ij,t}$
توان اکتیو تولید پراکنده g ام در ساعت t ام	$P_{DG\ g,t}$
توان اکتیو منبع تجدید پذیر e ام در ساعت t ام	$P_{RE\ e,t}$
توان اکتیو باتری b ام در ساعت t ام	$P_{Bt\ b,t}$
توان اکتیو کاهش یافته بار قابل قطع l ام در ساعت t ام	$P_C^R\ l,t$
توان اکتیو تأمین شده بار قابل قطع l ام در ساعت t ام	$P_C^S\ l,t$
توان اکتیو پیش‌بینی شده بار قابل قطع l ام در ساعت t ام	$P_C^F\ l,t$
توان اکتیو بار ثابت l ام در ساعت t ام	$P_D\ l,t$
توان اکتیو بار قابل جابجایی l ام در ساعت t ام	$P_S\ l,t$
توان اکتیو پیش‌بینی شده بار قابل جابجایی l ام در ساعت t ام	$P_S^F\ l,t$
توان راکتیو خروجی از گره i در شبکه شعاعی در ساعت t ام، که گره i بالادستی گره j می باشد	$Q_{ij,t}$
توان راکتیو تولید پراکنده g ام در ساعت t ام	$Q_{DG\ g,t}$
توان راکتیو باتری b ام در ساعت t ام	$Q_{Bt\ b,t}$
توان راکتیو کاهش یافته بار قابل قطع l ام در ساعت t ام	$Q_C^R\ l,t$
توان راکتیو تأمین شده بار قابل قطع l ام در ساعت t ام	$Q_C^S\ l,t$
توان راکتیو بار ثابت l ام در ساعت t ام	$Q_D\ l,t$
توان راکتیو بار قابل جابجایی l ام در ساعت t ام	$Q_S\ l,t$
توان راکتیو منبع تجدید پذیر e ام در ساعت t ام	$Q_{RE\ e,t}$
ولتاژ گره i ام در ساعت t ام	$V_{i,t}$
توان اکتیو تزریقی از شبکه بالادست به شبکه توزیع در ساعت t ام	$P_{Tm,t}$
زاویه گره i ام در ساعت t ام	$\delta_{i,t}$
انرژی ذخیره شده در باتری b ام تا انتهای ساعت t ام	$E_{Bt\ b,t}$

توان اکتیو تبدالی بهینه بین ریزشبه m ام و شبکه توزیع پایه در ساعت t ام، از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$P_{D-M\ m,t}^D$
توان راکتیو تبدالی بهینه بین ریزشبه m ام و شبکه توزیع پایه در ساعت t ام، از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$Q_{D-M\ m,t}^D$
ولتاژ گره مشترک بین شبکه توزیع پایه و ریزشبه m ام در ساعت t ام، از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$V_{D-M\ m,t}^D$
توان اکتیو تبدالی بهینه بین ریزشبه m ام و شبکه توزیع پایه در ساعت t ام، از دید ریزشبه m ام	$P_{D-M\ m,t}^M$
توان راکتیو تبدالی بهینه بین ریزشبه m ام و شبکه توزیع پایه در ساعت t ام، از دید ریزشبه m ام	$Q_{D-M\ m,t}^M$
ولتاژ گره مشترک بین ریزشبه m ام و شبکه توزیع پایه در ساعت t ام، از دید ریزشبه m ام	$V_{D-M\ m,t}^M$
توان اکتیو تبدالی بهینه از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه، ارسالی برای ریزشبه m ام	$P_{D-M\ m,t}^{D*}$
توان راکتیو تبدالی بهینه از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه، ارسالی برای ریزشبه m ام	$Q_{D-M\ m,t}^{D*}$
ولتاژ بهینه گره مشترک از دید بهره‌بردار شبکه توزیع پایه، ارسالی برای ریزشبه m ام	$V_{D-M\ m,t}^{D*}$
توان اکتیو تبدالی بهینه از دید ریزشبه m ام، ارسالی برای بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$P_{D-M\ m,t}^{M*}$
توان راکتیو تبدالی بهینه از دید ریزشبه m ام، ارسالی برای بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$Q_{D-M\ m,t}^{M*}$
ولتاژ بهینه گره مشترک از دید ریزشبه m ام، ارسالی برای بهره‌بردار شبکه توزیع پایه	$V_{D-M\ m,t}^{M*}$

پارامترها

ظرفیت ماکزیمم مبدل منبع تجدیدپذیر e ام	$S_{RE\ e}^{max}$
ظرفیت ماکزیمم مبدل باتری b ام	$S_{Bt\ b}^{max}$
انرژی مورد نیاز بار قابل جابجایی l ام	$E_{S\ l}$
راندمان باتری b ام	$\eta_{Bt\ b}$
متغیر دوگان قید آزادشده تبادل توان بین شبکه توزیع پایه و ریزشبه m ام در ساعت t ام	$\lambda_{m,t}$
پارامتر ترم جریمه قید آزادشده تبادل توان بین بهره‌بردار شبکه توزیع پایه و ریزشبه m ام در ساعت t ام	$\beta_{m,t}$

مخفف‌ها

بهره‌بردار شبکه توزیع	DSO
شبکه توزیع	Dis
شبکه بالادست (شبکه انتقال)	T

۱ طرح مسئله

۱-۱ مقدمه

با توجه به کاهش قیمت تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر، تغییرات ایجاد شده در الگوی مصرف مشترکین، ایجاد و افزایش ریزشکه‌ها، تعداد مشترکین فعال بیش از پیش افزایش داشته است. افزایش روز افزون مشترکین فعال ۱ در سیستم توزیع به عنوان یکی از عوامل موثر در ایجاد تغییرات در بهره‌برداری و کنترل این سیستم، به حساب می‌آید. این قشر از مشترکین با توجه به شرایطشان در زمینه پاسخگویی بار نیز فعالیت دارند. وجود اینگونه از مشترکین از یک طرف باعث کاهش اوج بار و شکل‌دهی بهتر به منحنی بار می‌گردد و از طرف دیگر نفوذ روز افزون آنها اقتصاد و قابلیت اطمینان سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱]. از جمله مشترکین فعال می‌توان به مصرف کنندگان پاسخگو، مصرف کنندگان دارای تولید اندک^۲ و ریزشکه‌ها^۳ اشاره کرد.

مصرف کنندگان پاسخگو^۴ همان مصرف کننده‌های سنتی انرژی الکتریکی‌اند، که با بهره‌مندی از تکنولوژی در برابر تغییرات قیمت انرژی الکتریکی یا سیگنال‌های بهره‌بردار سیستم، در شرایط اضطراری عکس العمل نشان می‌دهند. به عبارت دیگر این مصرف کننده‌ها از پاسخگویی بار^۵ برای رسیدن به مزایای مادی (پرداخت

^۱ Proactive Customers

^۲ Prosumers

^۳ Microgrids

^۴ Responsive Consumers

^۵ Demand Response

(پرداخت بهای کمتر برای انرژی) بهره می‌برند. مصرف کنندگان دارای تولید اندک، همان مصرف کنندگان عادی هستند، که با به خدمت گرفتن منابع انرژی پراکنده بخشی از بار محلی خود را تأمین می‌کنند. آنها با بهره‌گیری از توان تولیدی خود علاوه بر کاهش بهای پرداختی انرژی الکتریکی میزان تولید مازاد خود را به شبکه می‌فروشند. از جمله این منابع انرژی می‌توان به سیستم‌های ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده اشاره کرد [۲].

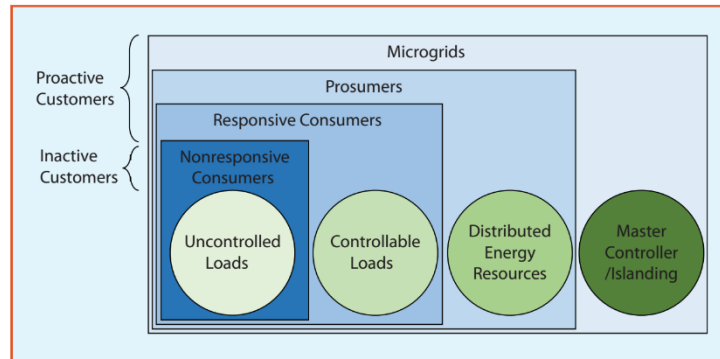
امروزه با پیشرفت تکنولوژی توجه به تولیدات با ظرفیت اندک که حامی محیط زیست نیز می‌باشند، افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر افزایش استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر با بازدهی بالا مفاهیم جدیدی را ایجاد کرده است، که ریزشبکه‌ها یکی از این مفاهیم می‌باشند [۳]. تولید محلی ریزشبکه‌ها نه تنها به نفع مشترکین محلی آنها است، بلکه با توجه به کاهش پراش در خطوط در انتقال و توزیع و امکان انجام هر چه بهتر پخش بار بین منابع موجود در شبکه، برای کل سیستم قدرت مزایایی را به همراه خواهد داشت. علاوه بر اینها استفاده از ریزشبکه‌ها این امکان را می‌دهد که از استراتژی‌های متفاوتی، برای مدیریت بارها بهره برد [۴]. از جمله این مزایا می‌توان به بهبود قابلیت اطمینان^۱ و تاب‌آوری^۲، کاهش آلودگی، کاهش هزینه‌های ارتقاء سیستم و افزایش بازدهی، کاهش هزینه انرژی، بهبود کیفیت توان و قابلیت کارکرد به صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه اشاره کرد [۵]. همچنین ریزشبکه‌ها می‌توانند در حوزه خدمات جانبی نیز فعالیت داشته باشند [۶]. در عین حال موانعی نیز بر سر راه رشد و افزایش روز افزون ریزشبکه‌ها وجود دارد، که بایستی مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال می‌توان به کمبود سیاست‌های قانون‌گذاری و عدم وجود یک نهاد قانون‌گذار واحد اشاره کرد [۷].

شکل (۱-۱) شمای کلی از مشترکین مختلف انرژی الکتریکی در سطح توزیع را نشان می‌دهد [۲]. بهره‌بردار سیستم توزیع باید بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده، ریزشبکه‌ها و سایر مشترکین را هماهنگ و تبادلات با بهره‌بردار سیستم انتقال را نیز برنامه‌ریزی کند [۸]. بهره‌بردار یا کنترل کننده مرکزی ریزشبکه نیز وظیفه، بهره‌برداری و کنترل رضایت بخش منابع و بارهای ریزشبکه را، در هر دو حالت متصل به شبکه و جدا از

^۱ Reliability

^۲ Resiliency

شبکه، مبتنی بر ملاحظات اقتصادی و امنیتی به عهده دارد [۹]. لذا نیاز به یک برنامه‌ریزی هماهنگ، بین شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های متصل به آنها می‌باشد.



شکل ۱-۱: شمای کلی از مشترکین مختلف انرژی الکتریکی در سطح توزیع [۲]

۲-۱ برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌های آن

همانطور که گفته شد، به منظور ایجاد هماهنگی بین شبکه‌های توزیع و ریزشبکه‌ها نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی توأمان شبکه توزیع و ریزشبکه‌های آن می‌باشد. در این راستا مسئله برنامه‌ریزی به دو صورت متمرکز و غیر متمرکز صورت می‌گیرد.

• برنامه‌ریزی متمرکز

در این ساختار برنامه‌ریزی سیستم توسط یک نهاد مرکزی صورت می‌گیرد. که در شبکه‌های توزیع معمولاً این نهاد مرکزی بهره‌بردار شبکه می‌باشد. نهاد مرکزی به کلیه اطلاعات بارها و ژنراتورها دسترسی دارد. از جمله معایب این روش می‌توان به انعطاف‌پذیری کم آن برای اضافه کردن اجزاء جدید به سیستم، حجم بالای محاسبات، آسیب‌پذیر بودن در برابر حملات سایبری و عدم حفظ حریم خصوصی و اطلاعات مشترکین اشاره کرد.

• برنامه‌ریزی غیر متمرکز

در این ساختار بهره‌بردار شبکه توزیع و هر ریزشبکه به عنوان یک عامل تصمیم گیرنده مستقل و مجزا عمل می‌کنند. اگرچه این نهادها جداگانه تصمیم‌گیری می‌کنند اما تصمیم یک نهاد بر تصمیم نهاد دیگر تاثیر گذار است. به عبارت دیگر برنامه‌ریزی بهینه با تبادل اطلاعات به صورت تکراری بین نهادهای گوناگون (بهره‌برداران شبکه توزیع و ریزشبکه‌ها) صورت می‌گیرد. از جمله مزایای این روش می‌توان به کاهش زمان

محاسبات به واسطه امکان حل موازی مسئله هر یک از ریزشبکه‌ها، ایمنی بیشتر در برابر حملات سایبری نسبت به روش‌های متمرکز و حفظ حریم شخصی مشترکین اشاره کرد.

۳-۱ انگیزه و ضرورت انجام طرح

با گسترش واحدهای تولید پراکنده، بارهای فعال و ریزشبکه‌ها، در نظر گرفتن ریزشبکه‌ها و منابع آنها در برنامه‌ریزی سیستم‌های توزیع ضروری می‌باشند. در نظر گرفتن ریزشبکه‌ها در برنامه‌ریزی سیستم توزیع ابعاد بهینه‌سازی را بالا می‌برد و ضمن افزایش زمان بهینه‌سازی، حریم خصوصی اطلاعات ریزشبکه‌ها را نقض می‌کند. بعلاوه اهداف بهره‌بردار توزیع و بهره‌برداران ریزشبکه‌ها الزاماً یکسو نبوده، این امر برنامه‌ریزی متمرکز را سخت می‌نماید.

برنامه‌ریزی متمرکز نیاز به تبادل حجم بالایی از اطلاعات داشته و به بستر مخابراتی پر هزینه نیازمند است. همچنین قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی متمرکز در قبال حوادث، از قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی غیر متمرکز کمتر است. لذا ضروری است که روشی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع ارائه شود که با تبادل حداقل اطلاعات هر بخش بتواند برنامه‌ریزی خود را انجام دهد و نتیجه برنامه‌ریزی‌های غیر متمرکز به نتیجه برنامه‌ریزی متمرکز همگرا گردد. در این پایان‌نامه یک روش غیر متمرکز برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع ارائه می‌گردد که ویژگی‌های فوق را داشته باشد.

۴-۱ تعریف مسئله

در مسئله پیش رو سیستم مورد مطالعه دارای یک یا چند شبکه توزیع است که هر کدام دارای چندین ریزشبکه بوده که از نقاط مختلف به شبکه توزیع متصل می‌باشند. هر شبکه توزیع و ریزشبکه‌های متصل به آن، شامل بارهای جابجاپذیر، بارهای قابل قطع، بارهای ثابت، تولیدات پراکنده قابل برنامه‌ریزی، تولیدات پراکنده غیر قابل برنامه‌ریزی و سیستم ذخیره انرژی است. در ساختار مذکور بهره‌بردارهای ریزشبکه‌ها و شرکت‌های توزیع با همکاری با یکدیگر به دنبال حداقل کردن هزینه کل شبکه توزیع (شبکه توزیع پایه و ریزشبکه‌ها) و به دست آوردن برنامه بهینه بارها، تولیدات پراکنده قابل برنامه‌ریزی و سیستم‌های ذخیره انرژی خود می‌باشند. بهره‌بردار هر شبکه توزیع به منظور تأمین بار خود و ریزشبکه‌های متصل به آن، با شبکه انتقال بالادست خود در ارتباط می‌باشند. این بهره‌بردار با توجه به پیش‌بینی که از قیمت توان شبکه بالادست خود در ساعات مختلف دارد، به خرید توان مورد نیازش می‌پردازد. دو ساختار مختلف برای شبکه