



دانشکده مهندسی
گروه برق
پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

مدیریت سمت تقاضا توزیع یافته مبتنی بر برنامه‌ریز مصرف انرژی با برنامه‌ریزی تصادفی

استاد راهنما:
دکتر مجید علومی بایگی

استاد مشاور:
دکتر جعفر عبادی

نگارش:
سید سعید سید صادق زاده

تیر ۱۳۹۴

صورت جلسه دفاع

نسخه ۲: مخصوص آموزش

بسمه تعالی

برگه ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو: شماره دانشجویی: گروه آموزشی:
 رشته: گرایش: تاریخ دفاع: نام و نام خانوادگی استاد راهنما:
 عنوان پایان نامه:

	۳	۳	اجرام در تنظیم و تدوین مطالب، حسن نگارش و رعایت دستورالعمل
	۳		کیفیت تصاویر، اشکال و منحنی های استفاده شده
	۱۲	۱۲	بررسی تاریخچه موضوع و بیان سابقه پژوهش در موضوع
			اینتگر و نوآوری
			ارزش علمی و یا کاربردی
			استفاده از منابع و مؤخذ به لحاظ کمی و کیفی (به روز بودن)
			کیفیت نظرات و پیشنهادات برای ادامه تحقیق
	۳	۳	تسلط به موضوع و توانایی در پاسخگویی به سئوالات در جلسه دفاع
			نحوه ارائه (رعایت زمان، تنظیم موضوع، کیفیت ارائه پرسش و ...)
	۱۵	۱	مقاله مستخرج از پایان نامه که براساس دستورالعمل تهیه و به تأیید استاد راهنما رسیده و به همراه پایان نامه تحویل گردیده است
	—	۱	تحویل به موقع گزارش ها
	۱۸۸	۲۰	

استاد راهنما	دکتر محمد علی...	دانشیار	دکتر...	استاد مشاور	دکتر...
عضو دفاع ۱	دکتر...	استاد	دکتر...	عضو دفاع ۲	دکتر...
عضو دفاع ۲	دکتر...	استاد	دکتر...	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر...

جلسه دفاع با حضور هیئت داوران تشکیل و پایان نامه با اخذ نمره به عدد ... ا حروف ... با درجه ... رسیده

☐ بدون اصلاحات پذیرفته شد.

☐ با اصلاحات پذیرفته شد (دانشجو موظف است تا تاریخ ... 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

نم مدیر گروه

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

اظهارنامه

اینجانب سید سعید سید صادق‌زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله مدیریت سمت تقاضا توزیع یافته مبتنی بر برنامه ریز مصرف انرژی با برنامه ریزی تصادفی تحت راهنمایی آقای دکتر مجید علومی بایگی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد کرده‌ام.
- 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 بوده‌اند را در مقالات مستخرج از رساله رعایت کنم و در تمامی آنها نام استاد(ان) راهنما به عنوان نویسنده مسئول و نیز نام استاد(ان) مشاور و نشانی الکترونیکی دانشگاهی آنان را قید نمایم.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی داشته یا از آنها استفاده کرده‌ام، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق پژوهشی را رعایت نموده‌ام.

تاریخ: ۱۳۹۴/۵/۱



امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. 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.

کاغذ کمتر = درخت بیشتر

برای ساخت هر ۳۰۰۰ برگ کاغذ، یک درخت تنومند بریده می‌شود و هزاران کیلوگرم دی‌اکسیدکربن وارد هواکره می‌شود.

این پایان‌نامه بر روی دو سطح کاغذها نگاشته شده است تا زیستگاه ما، زمین، سبز بماند.



تقدیم بہ پدرم، کوہی استوار و حامی من در طول تمام زندگی؛

تقدیم بہ مادرم، سنگ صوری کہ الفبای زندگی بہ من آموخت؛

تقدیم بہ ہمسرم، کہ در سایہ ہمیاری و ہمدلی او بہ انجام این پایان نامہ نائل شدم؛

و تقدیم بہ استادم کہ نہ تنها علم، کہ بزرگواری و بزرگمنشی را بہ من آموخت.

چکیده:

یکی از مهمترین مشوق‌ها و مزایای پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند، امکان اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار و مدیریت سمت تقاضا جهت مصرف بهینه توان، صرفه جویی در هزینه‌ها و افزایش میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند باد) است. یک چارچوب پاسخگویی بار مطلوب در یک ریزشبکه باید دارای دو ویژگی زیر باشد: در گام اول، باید بتواند در عین حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان، از لحاظ اقتصادی برنامه‌ریزی تولید، خرید و فروش بهینه ارائه دهد. علاوه بر این، باید بتواند در برابر عدم قطعیت‌های سیستم، به‌ویژه عدم قطعیت تولیدات بادی، تا حد امکان مقاوم باشد. این پایان‌نامه در جهت رسیدن به دو هدف فوق گام برداشته است. در گام اول، یک چارچوب برای پاسخگویی بار با استفاده از تجهیزاتی به نام برنامه‌ریز مصرف انرژی (ECS) ارائه شده است. در چهار چوب پیشنهادی برنامه مصرف مصرف‌کنندگان، میزان تولید میکرو توربین گازی ریزشبکه و میزان خرید از بازار اصلی را با در نظر گرفتن میزان تولید بادی برای ۲۴ ساعت آینده به گونه‌ای مشخص می‌کند که هزینه ریزشبکه کمینه گردد. در چارچوب ارائه‌شده، حریم خصوصی مصرف‌کنندگان ریزشبکه حفظ می‌شود چراکه، بر خلاف روش‌های کنترل مستقیم بار، هر مصرف‌کننده برنامه‌ریزی مصرف خود را توسط ECS شخصی خود انجام می‌دهد و اطلاعات میزان و زمان مصرف را به یک کنترل‌کننده مرکزی ارائه نخواهد داد. روش ارائه‌شده همچنین تعاملات مصرف‌کنندگان را به کمک نظریه بازی‌ها مدل می‌نماید.

در گام بعدی، چارچوب پاسخگویی بار فوق جهت مقابله با عدم قطعیت در متغیرهای برنامه‌ریزی، به طور ویژه عدم قطعیت تولید بادی، تعمیم داده می‌شود. اکثر روش‌های متداول پاسخگویی بار در سیستم‌های قدرت رویکرد برنامه‌ریزی قطعی را در پیش گرفته‌اند؛ بدین معنا که عدم قطعیت پارامترهای ورودی برنامه‌ریزی مانند میزان تولید بادی در ۲۴ ساعت آینده را معلوم فرض کرده‌اند، حال آنکه پیش‌بینی چنین متغیرهای همواره با خطا همراه است. به‌طور کلی یک رویکرد مناسب جهت مقابله با عدم قطعیت در متغیرهای یک مسئله بهینه‌سازی، استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی است. بنابراین، در این پایان‌نامه، جهت کاهش اثرات نامناسب عدم قطعیت در میزان تولید بادی از برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی پاسخگویی بار استفاده شده است. در این روش برنامه‌ریزی بر اساس حداقل کردن امید ریاضی هزینه ریز شبکه روی سناریوهای ممکن انجام می‌پذیرد. بنابراین نیاز است سناریوهای مختلف بادی ۲۴ ساعت آینده ایجاد شود. بدین منظور از پیش‌بینی‌های احتمالی سرعت باد برای ایجاد سناریو استفاده شده است. جهت کاهش سناریوها به اندازه‌ای قابل قبول، از روش کاهش سناریو نیز استفاده می‌کنیم. روش ارائه‌شده را برای سه روز متفاوت با سه پروفایل تولید بادی مختلف شبیه‌سازی نموده و با برنامه‌ریزی قطعی مقایسه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از برتری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به برنامه‌ریزی قطعی است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریز مصرف انرژی، برنامه‌ریزی تصادفی، نظریه بازی‌ها، ریزشبکه، مدیریت تقاضا

فهرست مطالب

چکیده:	II
فهرست مطالب	III
فهرست شکلها	VI
فهرست جداول	IX
فصل نخست	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تعریف مسئله: پاسخگویی بار و شبکه‌های هوشمند	۱
۱-۱-۱ شبکه هوشمند و مزایای آن	۱
۲-۱-۱ مدیریت تقاضا	۲
۳-۱-۱ برنامه‌ریز مصرف انرژی ECS	۳
۴-۱-۱ ریزشبکه	۴
۵-۱-۱ نظریه بازی‌ها	۴
۶-۱-۱ برنامه‌ریزی تصادفی	۴
۲-۱ تعریف مسئله	۵
۳-۱ مرور ادبیات	۵
۱-۳-۱ برنامه‌ریزی پاسخگویی بار قطعی در شبکه‌های قدرت	۵
۲-۳-۱ روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی در شبکه قدرت	۷
۴-۱ نوآوری	۹
۵-۱ ساختار پایان‌نامه	۹
فصل دوم	۱۰
چهارچوب پاسخگویی بار، حالت قطعی	۱۰
۱-۲ روش‌های مدیریت مصرف	۱۱
۱-۱-۲ کنترل مستقیم بار	۱۱
۲-۱-۲ قیمت‌گذاری هوشمند	۱۱
۳-۱-۲ در نظر گرفتن تأثیرات متقابل مصرف‌کنندگان	۱۱
۲-۲ ویژگی‌های ریزشبکه موردبررسی	۱۵
۱-۲-۲ صورت مسئله	۱۵
۳-۲ مدل سازی حالت قطعی	۱۶
۱-۳-۲ برنامه‌ریزی متمرکز	۱۷
۲-۳-۲ برنامه‌ریزی توزیع شده	۱۸
۴-۲ منابع عدم قطعیت	۲۴

۲۴.....	۱-۴-۲ عدم قطعیت تولید توان بادی.....
۲۵.....	۲-۴-۲ طبقه‌بندی روش‌های پیش‌بینی تولید بادی.....
۲۷.....	فصل سوم.....
۲۷.....	برنامه‌ریزی پاسخگویی بار تصادفی سناریو محور.....
۲۷.....	۱-۳-۱ مبانی برنامه‌ریزی تصادفی.....
۲۹.....	۱-۳-۱ گسسته‌سازی.....
۳۰.....	۱-۳-۲ ایجاد و کاهش سناریو.....
۳۱.....	۱-۳-۳ کاهش سناریو.....
۳۱.....	۲-۳-۲ فرمول‌بندی به‌صورت برنامه‌ریزی تصادفی.....
۳۳.....	۳-۳-۲ شبیه‌سازی عددی عدم قطعیت تولید توان بادی.....
۳۵.....	۱-۳-۳ روش ایجاد پیش‌بینی‌های اسکالر.....
۳۸.....	۲-۳-۳ روش ایجاد پیش‌بینی احتمالی سرعت باد.....
۴۱.....	۴-۳-۲ تعریف حالت‌های مورد بررسی.....
۴۱.....	۱-۴-۳ برنامه‌ریزی قطعی با دانستن سرعت دقیق باد.....
۴۲.....	۲-۴-۳ برنامه‌ریزی قطعی با پیش‌بینی اسکالر تولید بادی (با خطا).....
۴۲.....	۳-۴-۳ برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی تابع چگالی احتمال توزیع سرعت باد.....
۴۳.....	۵-۳-۲ مشخصات ریزش‌بکه مورد بررسی.....
۴۳.....	۱-۵-۳ تولید توان (گازی و باد):.....
۴۵.....	۲-۵-۳ بازار برق (اتصال به شبکه اصلی):.....
۴۶.....	۳-۵-۳ مصرف‌کنندگان:.....
۴۹.....	۶-۳-۲ نتایج عددی.....
۴۹.....	۱-۶-۳ حالت ۱ (برنامه‌ریزی قطعی با اطلاعات کامل):.....
۵۲.....	۲-۶-۳ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی با خطای پیش‌بینی):.....
۶۲.....	۷-۳-۲ نتیجه‌گیری و مقایسه نتایج:.....
۶۷.....	فصل چهارم.....
۶۷.....	جمع‌بندی و پیشنهادات.....
۶۷.....	۱-۴-۱ خلاصه.....
۶۸.....	۲-۴-۲ نتایج:.....
۶۸.....	۳-۴-۳ پیشنهادات:.....
۶۹.....	مراجع.....
۷۲.....	پیوست یک.....
۷۲.....	روش کاهش سناریو.....
۷۲.....	یک-۱ فهرست علائم و اختصارات:.....

۷۲	یک-۲ پیشنهادی نظری
۷۴	یک-۳ الگوریتم‌ها
۷۶	یک-۳-۱ الگوریتم انتخاب پیشروی سریع
۷۸	پیوست دو
۷۸	پیش بینی احتمالی
۷۸	دو-۱ بررسی عمومی
۷۹	دو-۲ پیش‌بینی احتمالاتی توان بادی

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: استراتژی مدیریت تقاضا با تمرکز بر تعاملات جداگانه بین شرکت خدماتی و هر مصرف‌کننده [۴]..... ۱۲
- شکل ۲-۲: استراتژی مدیریت تقاضا برای شبکه‌ی هوشمند با تعاملات بین کاربران/مصرف‌کنندگان و شرکت خدماتی [۴]..... ۱۳
- شکل ۳-۲: بلوک دیاگرام یک شبکه هوشمند که شامل یک منبع توان، خط توزیع توان، مصرف‌کنندگان و شبکه محلی اطلاعات (LAN) است [۲۲]..... ۱۳
- شکل ۴-۲: منحنی نظری توان بادی به‌دست‌آمده از توربین بادی ۱/۵ مگاواتی VENSYS 77 که در نیروگاه بادی Beidaqiao II در ایالت گانزو در کشور چین نصب شده است [۲۷]..... ۲۶
- شکل ۱-۳: نمونه‌ای از یک درخت سه تنابیه ۳۰
- شکل ۲-۳: گسسته سازی تابع چگالی احتمال نرمال به هفت بخش ۳۰
- شکل ۳-۳: پیش‌بینی میزان تولید بادی برای یک ساعت خاص در ۲۴ ساعت آینده (الف) در نظر گرفتن پیش‌بینی به‌صورت قطعی (راست) (ب) در نظر گرفتن پیش‌بینی به‌صورت احتمالی (چپ) ۳۲
- شکل ۴-۳: رابطه میانگین خطای پیش‌بینی سرعت باد با افق پیش‌بینی [۳۷]..... ۳۵
- شکل ۵-۳: نتایج روش شبیه‌سازی پیش‌بینی برای مقدار واقعی ۱۰ و خطای پیش‌بینی ۱۰ درصد برای ۱۰۰۰ بار تکرار ۳۷
- شکل ۶-۳: میزان درصد خطای شبیه‌سازی برای مقدار هدف ۱۰ و خطای ۱۰ درصد به ازای تکرارهای متفاوت..... ۳۸
- شکل ۷-۳: داده‌های سرعت باد استفاده‌شده (ایستگاه کلگری در تاریخ ۶، ۸ و ۱۰ ژوئن ۲۰۱۴)..... ۴۴
- شکل ۲-۴: قیمت بازار برق در روز مورد بررسی ۴۶
- شکل ۹-۳: میزان بار غیرقابل برنامه‌ریزی (قرمز) و بار قابل برنامه‌ریزی (آبی)..... ۴۹
- شکل ۱۰-۳: حالت ۱ (اطلاعات کامل)، بار قابل برنامه‌ریزی (آبی) - بار غیرقابل برنامه‌ریزی (قرمز)..... ۵۰
- شکل ۱۱-۳: حالت ۱ (اطلاعات کامل)، میزان منابع توان مختلف در تامین توان ریزشبه - تولید گازی مورد انتظار (قرمز)، تولید بادی مورد انتظار (سبز) و خرید از بازار (آبی). مقادیر منفی: فروش به بازار ۵۱
- شکل ۱۲-۳: حالت ۱ (اطلاعات کامل)، میزان خرید (مثبت) و فروش (منفی) به بازار ۵۱
- شکل ۱۳-۳: حالت ۱ (اطلاعات کامل)، چگونگی تغییر میزان هزینه کل ریزشبه برای کل روز ۶ ژوئن ۵۲
- شکل ۱۴=۳: حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی با اطلاعات کامل)، بار برنامه‌ریزی‌شده - بار قابل برنامه‌ریز (آبی) - بار غیرقابل برنامه‌ریزی (قرمز)..... ۵۴

- شکل ۳-۱۵ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی)، میزان منابع توان مختلف در تامین توان ریزش‌بکه - تولید گازی مورد انتظار (قرمز)، تولید بادی مورد انتظار (سبز) و خرید از بازار (آبی). مقادیر منفی: فروش به بازار ۵۴
- شکل ۳-۱۶ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی)، میزان خرید و فروش به بازار برق ۵۵
- شکل ۳-۱۷ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی)، میزان تولید میکرو توربین گازی ریزش‌بکه: مقادیر برنامه‌ریزی شده (آبی) - مقادیر واقعی پیاده‌سازی شده (قرمز). تفاوت معناداری بین مقادیر برنامه‌ریزی شده و اعمال شده واقعی مشاهده می‌شود. ۵۵
- شکل ۳-۱۸ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی)، مجموع میزان تولید بادی و گازی در طول روز: برنامه‌ریزی شده (آبی)، پیاده‌شده واقعی (قرمز) ۵۶
- شکل ۳-۱۹ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی) میزان خرید توان از بازار، برنامه‌ریزی شده (آبی)، واقعی (قرمز) ۵۶
- شکل ۳-۲۰ حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی)، میزان جریمه بازار که به خاطر عدم پایبندی به میزان فروش (خرید) توان به ریزش‌بکه اعمال می‌شود. ۵۷
- شکل ۳-۲۱ حالت ۲، چگونگی تغییر میزان هزینه کل برنامه‌ریزی شده (محور افقی تکرار) ۵۷
- شکل ۳-۲۲ مقادیر واقعی سرعت باد (قرمز) و ۱۰۰۰ سناریوی ایجاد شده به روش شبیه‌سازی مونت کارلو ۵۹
- شکل ۳-۲۳ میزان میانگین خطای سناریوهای اولیه ایجاد شده به روش مونت کارلو (آبی) و میزان خطای هدف (قرمز) ۵۹
- شکل ۳-۲۴ ۱۰ سناریوهای تولید بادی نهایی (خطوط رنگی) به همراه مقدار واقعی تولید بادی (سیاه خط چین) ۶۰
- شکل ۳-۲۵ حالت ۳ (برنامه‌ریزی تصادفی)، بار برنامه‌ریزی شده - بار قابل برنامه‌ریزی (آبی) - بار غیرقابل برنامه ریزی (قرمز) ۶۰
- شکل ۳-۲۶ حالت ۳ (برنامه‌ریزی تصادفی)، میزان منابع توان مختلف در تأمین توان ریزش‌بکه - تولید گازی مورد انتظار (قرمز)، تولید بادی مورد انتظار (سبز) و خرید از بازار (آبی). مقادیر منفی: فروش به بازار ۶۱
- شکل ۳-۲۷ حالت ۳ (برنامه‌ریزی تصادفی)، میزان جریمه بازار که به خاطر عدم پایبندی به میزان فروش (خرید) توان به ریزش‌بکه اعمال می‌شود. ۶۱
- شکل ۳-۲۸ حالت ۳ (برنامه‌ریزی تصادفی)، چگونگی تغییر ارزش مورد انتظار هزینه کل برنامه‌ریزی شده ۶۲
- شکل ۳-۲۹ هزینه نهایی واقعی اجرای برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده توسط حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی) قرمز و حالت ۳ (روش پیشنهادی برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی احتمالی و کاهش سناریو) آبی - برای پروفایل سرعت باد ۶ ژوئن ۲۰۱۴ ۶۳
- شکل ۳-۳۰ هزینه نهایی واقعی اجرای برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده توسط حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی) قرمز و حالت ۳ (روش پیشنهادی برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی احتمالی و کاهش سناریو) آبی - برای پروفایل سرعت باد ۸ ژوئن ۲۰۱۴ ۶۳

شکل ۳-۳۱ هزینه نهایی واقعی اجرای برنامه‌ریزی‌های انجام شده توسط حالت ۲ (برنامه‌ریزی قطعی) قرمز و
حالت ۳ (روش پیشنهادی برنامه‌ریزی تصادفی با پیش‌بینی احتمالی و کاهش سناریو) آبی - برای پروفایل سرعت
باد ۱۰ ژوئن ۲۰۱۴ ۶۴

شکل دو - ۱ یک پیش‌بینی غیر پارامتری سرعت باد، مبتنی بر روش کرنل [۴۵] (مقادیر واقعی با خط سیاه نشان داده
شده است). ۸۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مشخصات میکرو توربین گازی مورد استفاده در ریز شبکه ۴۴
- جدول ۲-۳ میزان امید ریاضی خطای پیش بینی سرعت باد بر حسب درصد (برای حالت ۲ و ۳) ۴۴
- جدول ۳-۳ اسامی و ویژگی های تجهیزات قابل برنامه ریزی ۴۷
- جدول ۴-۳ بازه برنامه ریزی تجهیزات قابل برنامه ریزی ۴۷
- جدول ۵-۳ تعداد وسایل قابل برنامه ریزی ۱۰ مصرف کننده خاص (از بین ۱۰۰۰ مصرف کننده) ۴۸

فصل نخست

مقدمه

در این پایان‌نامه قصد داریم با استفاده از پتانسیل‌های «شبکه هوشمند»، جهت «مدیریت تقاضا» یک الگوریتم «پاسخگویی بار» برای یک «ریش‌بکه»، مبتنی بر «برنامه‌ریزی تصادفی» و «نظریه بازی‌ها» ارائه نماییم که به کمک «برنامه‌ریزهای مصرف انرژی»^۱ (ECS) قابل پیاده‌سازی هستند. در این فصل ابتدا با تعریف مفاهیم فوق آشنا می‌شویم. سپس مسئله موردنظر این پایان‌نامه دقیق‌تر تعریف می‌گردد. در گام بعد کارهای مشابه انجام‌شده در زمینه‌ی برنامه‌ریزی تولید و مصرف قطعی و تصادفی مرور می‌گردند. نهایتاً نوآوری‌های پایان‌نامه مرور خواهد شد.

۱-۱ تعریف مسئله: پاسخگویی بار و شبکه‌های هوشمند

۱-۱-۱ شبکه هوشمند و مزایای آن

شبکه‌ی هوشمند به عنوان یک سیستم فیزیکی-سایبری بزرگ مقیاس متصور می‌شود که می‌تواند با تجمیع تکنیک‌های پیشرفته از رشته‌های گوناگون از قبیل سیستم‌های قدرت، کنترل، مخابرات، پردازش سیگنال و شبکه‌سازی، مواردی همچون راندمان، قابلیت اطمینان، و استحکام^۲ شبکه‌های انرژی و توان را بهبود بخشد. شبکه‌ی هوشمند ذاتاً یک شبکه‌ی توزیع است که از گره‌های هوشمندی تشکیل شده است که می‌توانند به منظور تحویل پرراندمان توان و برق به مشتریان خود، به صورت خودگردان عمل کنند، ارتباط برقرار کنند و متقابلاً بر یکدیگر اثر

^۱ Energy consumption scheduler

^۲ robustness

بگذارند. این ماهیت نامتجانس شبکه‌ی هوشمند مشوقی است برای اتخاذ تکنیک‌های پیشرفته برای غلبه بر چالش‌های فنی گوناگونی که در سطوح مختلفی نظیر طراحی، کنترل و پیاده‌سازی وجود دارند[۱].

شبکه هوشمند یک قطعه کامپیوتری یا یک سیستم نرم‌افزاری نیست، بلکه بیشتر از آن یک مفهوم است. همان‌طور که نام آن دلالت می‌کند، شبکه هوشمند یک سیستم هوشمند تأمین انرژی برق است که ضمن پاسخ‌گویی به نیازهای مصرف‌کنندگان، به‌صورت مستقیم با آن‌ها ارتباط برقرار می‌کند. با وجود این‌که جنبه‌های زیادی در مفهوم شبکه هوشمند وجود دارد، اساساً شبکه هوشمند به سه مسئله مهم می‌پردازد:

- مدیریت مؤثر بار
- فراهم آوردن اتوماسیون بیشتر در فرآیند ترمیم و بازیابی پس از وقوع قطعی در شبکه برق
- ایجاد تعامل و تقابل بیشتر میان تأمین‌کنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی

مدیریت بار در شبکه هوشمند می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت برای تولید انرژی و دستیابی به بهره‌برداری بیشتر از تجهیزات موجود شود. همچنین، مدیریت بار باعث کاهش پیک مصرف نیز خواهد شد که در نتیجه نیاز به سرمایه‌گذاری تولید نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، شرکت‌های برق می‌توانند از میزان مصرف هر مشترک در هر زمان دلخواه آگاهی داشته باشند، زیرا شبکه هوشمند بین مشترکین مصرف برق و عرضه‌کننده‌های آن ارتباط برقرار می‌کند. همچنین تأمین‌کنندگان می‌توانند مشترکین را از قیمت برق مصرفی هر یک از تجهیزات الکترونیکی خود آگاه کنند. برای مثال مشترک می‌تواند از میزان هزینه روشن کردن سیستم تهویه ساختمان خود آگاه شود و بدین‌وسیله امکان مدیریت بهتر مصرف برای مصرف‌کننده و صرفه‌جویی فراهم خواهد شد. همچنین با استفاده از شبکه‌های هوشمند برق می‌توان مناطقی را که در معرض سوءاستفاده و دزدی جریان برق قرار گرفته‌اند را به‌خوبی تشخیص داد. با پیاده‌سازی شبکه هوشمند، سیستم برق بدون نیاز به دخالت انسان می‌تواند با تغییر شرایط سازگار شود. برای مثال اگر یک مدار به حداکثر حد گنجایش بار خود نزدیک شود، شبکه هوشمند می‌تواند به صورت خودکار، از وقوع شرایط اضافه بار^۱ و قطعی جلوگیری کند. به همین دلیل اصطلاحاً به شبکه هوشمند، شبکه خود بازیاب^۲ نیز گفته می‌شود[۲].

۱-۱-۲ مدیریت تقاضا

مدیریت تقاضا^۳ (DSM) متداولاً به برنامه‌هایی اطلاق می‌شود که توسط شرکت‌های برق برای کنترل مصرف انرژی در بخش مصرف‌کننده پیاده‌سازی می‌شود. این برنامه‌ها برای استفاده از انرژی موجود به‌صورتی با راندمان بالاتر به کار گرفته می‌شوند، بدون این‌که زیرساخت‌های جدیدی برای تولید و انتقال نصب شود. برنامه‌های مدیریت

^۱ Overloading

^۲ Self-Healing

^۳ Demand Side Management

تقاضا شامل برنامه‌های صرفه‌جویی در انرژی و راندمان آن، برنامه‌های جایگزین‌یابی برای سوخت، برنامه‌های واکنش تقاضا^۱ (DR) و برنامه‌های مدیریت بارهای خانگی یا تجاری می‌شوند[۳]. برنامه‌های مدیریت بار خانگی معمولاً دست کم با یکی از اهداف زیر انجام می‌شوند:

- کاهش مصرف
- انتقال مصرف به ساعات غیرپیک

برای رسیدن به هدف اول، کافی است مصرف‌کنندگان را به پیروی از الگوهای مصرف مبتنی بر کاهش انرژی تشویق نمود و ساختمان‌هایی با راندمان انرژی بیشتر را احداث کرد. با این حال، به راهکارهایی عملی نیز برای انتقال استفاده از وسایل پرمصرف خانگی به ساعات غیرپیک نیاز است تا بدین طریق نسبت پیک به میانگین^۲ (PAR) در تقاضای بار کاهش یابد. با محبوب شدن خودروهای الکتریکی هایبرید^۳ (PHEV)، پیش‌بینی می‌شود که وجود برنامه‌هایی برای انتقال زمانی بار حتی حیاتی‌تر و ضروری‌تر هم بشود؛ چراکه بیشتر این نوع خودروها برای یک مایل رانندگی به ۲۰۰ تا ۳۰۰ وات شارژ توان نیاز دارند. این خود حاکی از یک بار جدید مهم در سیستم توزیع موجود است. به خصوص این‌که این خودروها طی مدت‌زمانی که شارژ می‌شوند، می‌توانند میانگین بار خانگی را تقریباً دو برابر کرده و نسبت پیک به میانگین بالای کنونی را از این هم بدتر نمایند. علاوه بر این، چنانچه سیستم به‌خوبی تقویت نشده باشد، شرایط نامتعادل ناشی از تعداد رو به رشد خودروهای الکتریکی هایبریدی ممکن است باعث تنزل بیشتر کیفیت توان، بروز مشکلات ولتاژ، و حتی وارد کردن صدمه به تجهیزات شرکت خدماتی و مصرف‌کننده شود[۴].

۱-۳ برنامه‌ریز مصرف انرژی ECS

نیاز است برنامه‌ریزی مصرف مشترکان برق توسط سیستم‌های خودکار مانند برنامه‌ریزهای مصرف انرژی^۴ (ECS) انجام شود. هرکدام از مصرف‌کنندگان شبکه به دنبال برنامه‌ریزی بهینه مصرف خود با در نظر گرفتن شرایط شبکه هستند. بدین ترتیب لازم است مداوماً با شبکه ارتباط داشته و متناظر با تغییرات شبکه رفتار خود را تنظیم نمایند. از آنجاکه تنظیم نمودن رفتارهای مصرف‌کنندگان فرایندی وقت‌گیر و شاید پیچیده باشد، لازم است تجهیزاتی استفاده گردند که به‌صورت خودکار با شبکه در ارتباط بوده، اطلاعات لازم را دریافت نموده، و با توجه به خواسته‌های هرکدام از مصرف‌کنندگان، برنامه‌ریزی بهینه مصرف مصرف‌کنندگان را مشخص نماید. این‌گونه تجهیزات را ECS می‌نامند. هرکدام از مشترکین شبکه‌های قدرت لازم است یک ECS جداگانه داشته باشد که از یک سو بتواند با شبکه تبادل اطلاعات نموده و از سوی دیگر، با لحاظ کردن خواسته‌های هرکدام از مشترکان، بتواند با

^۱ Demand Response

^۲ Peak-to-Average

^۳ Plug-in Hybrid Electrical Vehicle

^۴ Energy consumption schedulers

تجهیزات مصرف‌کننده توان در تماس باشد و برنامه مصرف توان بهینه آن‌ها را تعیین نماید (برای جزئیات بیشتر رجوع شود به بخش ۲-۳-۱).

۴-۱-۱ ریزشبه

یک مفهوم مرتبط دیگر با شبکه‌های هوشمند، ریزشبه‌ها هستند که عموماً دارای مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره انرژی و بارها می‌باشد که می‌توانند به صورت متصل به شبکه اصلی (مثلاً با یک خط انتقال) و یا به صورت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به صورت تئوریک، ریزشبه می‌تواند دارای منافع زیادی هم برای مصرف‌کننده و هم برای شرکت‌های تولید برق باشد، از دید مصرف‌کننده ریزشبه قابلیت فراهم ساختن همزمان برق و حرارت، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای، بهبود کیفیت توان و کاهش هزینه‌های مصرف را دارد و از دید شرکت‌های برق به کارگیری ریزشبه‌ها پتانسیل کاهش دیماند مصرفی و بنابراین کاهش تسهیلات توسعه خطوط انتقال و علاوه بر آن عامل حذف نقاط اوج مصرف خواهد بود که در نتیجه از تلفات شبکه نیز کاسته می‌شود.

۵-۱-۱ نظریه بازی‌ها

انتظار می‌رود «نظریه بازی‌ها» یک ابزار تحلیلی کلیدی را در طراحی شبکه‌های هوشمند آتی و نیز سیستم‌های فیزیکی-سایبری بزرگ مقیاس تشکیل دهد. نظریه بازی‌ها یک چارچوب مفهومی و نیز یک چارچوب تحلیلی رسمی با مجموعه‌ای از ابزارهای ریاضی است که مطالعه‌ی تعاملات پیچیده بین بازیگران منطقی مستقل را امکان‌پذیر می‌سازد. چندین دهه است که از نظریه بازی‌ها در تعداد گسترده‌ای از رشته‌ها، از اقتصاد و سیاست گرفته تا روان‌شناسی، اتخاذ می‌شود. اخیراً نظریه بازی‌ها به ابزاری کلیدی در طراحی و تحلیل سیستم‌های ارتباطی تبدیل شده است [1]. در این پژوهش از نظریه بازی‌ها جهت برنامه‌ریزی پاسخگویی بار مصرف‌کنندگان استفاده نموده‌ایم.

۶-۱-۱ برنامه‌ریزی تصادفی

عموماً در برنامه‌ریزی پاسخگویی بار مدیریت مصرف با انواع مختلفی از عدم قطعیت در متغیرها یا پارامترهای مسئله مواجه هستیم. به عنوان مثال، برنامه‌های مدیریت مصرف به پارامتر میزان تولید بادی در چند ساعت آینده وابسته است. عموماً این پارامترها باید توسط الگوریتم‌های مختلف، پیش‌بینی گردند که بدین ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده قطعی نبوده یا به عبارت دیگر دارای عدم قطعیت و خطا هستند. غالب پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی پاسخگویی بار و مدیریت سمت مصرف بر اساس برنامه‌ریزی قطعی انجام گرفته‌اند و عدم قطعیت و خطای پیش‌بینی پارامترها لحاظ نشده‌اند. رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی می‌تواند برای مقابله با عدم قطعیت متغیرهای موجود در شبکه قدرت مناسب باشد. می‌توان به یک برنامه‌ریزی تصادفی به چشم یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دارای عدم قطعیت در مورد مقادیر برخی از پارامترها یا قیود یا تابع هدف نگاه کرد. در این صورت این پارامترها به جای این‌که

با مقادیر واحدی بیان شوند، توسط توزیع‌ها (در حالت تک تناوبه) یا فرآیندهای تصادفی (در حالت چند تناوبه) توصیف می‌گردند.

۲-۱ تعریف مسئله

در این پایان‌نامه قصد داریم یک چارچوب و الگوریتم پاسخگویی بار برای مصرف‌کنندگان حاضر در یک ریزشبکه تعریف نماییم. چارچوب پیشنهادشده بر اساس نظریه بازی‌ها است، بدین معنا که رفتار متقابل مصرف‌کنندگان بر یکدیگر لحاظ شده است. مصرف‌کنندگان میزان مصرف خود را به گونه‌ای جابجا می‌کنند که بدون ضربه خوردن به میزان رفاه و آرامش خود، هزینه کلی بهره‌برداری ریزشبکه و متعاقباً هزینه قبض برق خود کاهش یابد. ریزشبکه مدنظر دارای زیرساخت‌های شبکه‌های هوشمند می‌باشد بدین معنا که امکان اشتراک داده‌ها بین مصرف‌کنندگان وجود دارد. ریزشبکه مدنظر دارای توربین بادی است؛ بنابراین با مقداری عدم قطعیت در برنامه‌ریزی‌ها مواجه هستیم. بنابراین برنامه‌ریزی انجام‌شده بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور صورت گرفته است. الگوریتم ارائه‌شده به صورت توزیع‌شده تدوین شده است و بنابراین توسط تک تک مصرف‌کنندگان شبکه (به وسیله وسایل برنامه‌ریزی خودکار مصرف انرژی (ECS)) پیاده‌سازی می‌شوند.

۳-۱ مرور ادبیات

در این بخش پژوهش‌های مشابه انجام‌شده در دو بخش بررسی می‌شوند. ابتدا روش‌های ارائه‌شده جهت پاسخگویی بار که رویکردی قطعی داشته‌اند (بدین معنا که عدم قطعیت پارامترها یا متغیرها لحاظ نشده است) بررسی می‌شوند. سپس پژوهش‌های مرتبط را که رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی را لحاظ کرده‌اند مرور می‌نماییم.

۱-۳-۱ برنامه‌ریزی پاسخگویی بار قطعی در شبکه‌های قدرت

به منظور به حداقل رساندن مجموع بهای پرداختی بابت برق، مصرف‌کنندگان قیمت محور می‌توانند به قیمت‌های برقی که برحسب زمان متغیر هستند واکنش نشان داده و مصارف خود را به بازه‌هایی منتقل کنند که قیمت‌های برق نسبتاً پایین است. کار انجام‌شده در [۵] یک چارچوب برنامه‌ریزی انرژی را برای آن دسته از وسایل خانگی که در یک خانه به صورت خودکار و بهینه کار می‌کنند ارائه می‌دهد و درعین حال مصالحه‌ی بین حداقل قبض برق و حداکثر انتفاع مصرف‌کننده را در نظر می‌گیرد. مقاله [۶] در راستای پرداختن به مسئله‌ای مشابه با این مسئله‌ی مدیریت لوازم خانگی و مسکونی، برای تمام مصرف‌کنندگان یک مدل بهینه‌سازی را توسعه داد تا بتوانند در پاسخ به قیمت‌های برق متغیر با زمان، تصمیمات خود را بر طبق آن انجام دهند.

در مرجع [۷]، پیپاتاناسومپرون و همکارانش، توسعه‌های اخیر در سیستم‌های چند عاملی را بررسی کردند تا یک ریزشبکه هوشمند مبتنی بر PV را کنترل نمایند. در مرجع [۸] خودر و همکارانش در آزمایشگاه یک ریزشبکه هوشمند تجدیدپذیر را شبیه‌سازی کردند تا برای مدیریت هوشمند مصرف در هفته‌ی بعد (۶۷۲ بازه زمانی) در یک

محیط قطعی^۱، یک روش هوشمند را پیشنهاد کنند. حافظ و همکارانش در مرجع [۹] طرح بهینه، برنامه‌ریزی، اندازه‌گذاری و عملکرد یک ریزشبکه هوشمند مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر آبی را با هدف حداقل کردن هزینه شبکه در چرخه‌ی عمر آن، ارزیابی کردند. در مرجع [۱۰]، موریس و همکارانش بر پایه‌ی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب، رویکرد جدیدی را برای جانمایی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه هوشمند تجدیدپذیر پیشنهاد کردند. سیکالاکیس و همکارانش اثر تعاملی ریزشبکه هوشمند و شرکت برق بر یکدیگر به هنگامی که تابع هدف عبارت از کاهش مقدار کل توان تولید شده می‌باشد را بررسی کردند. چدید و همکارانش در مرجع [۱۱] به منظور کمینه‌سازی هزینه‌ی کلی یک ریزشبکه هوشمند بادی-خورشیدی-آبی، روش جدیدی را بر پایه‌ی برنامه‌ریزی خطی پیشنهاد کردند. نقش دستگاه‌های ذخیره‌کننده به منظور کاهش هزینه‌ی کلی ریزشبکه‌ی هوشمند توسط چاکرابورتی و همکارانش در مرجع [۱۲] بررسی شده است. در این مرجع از تکنیک برنامه‌ریزی خطی به عنوان ابزار بهینه‌سازی بهره‌گیری شده است. داکپا و همکارانش در مرجع [۱۳] به منظور ارزیابی مسئله‌ی مشارکت واحدها در یک ریزشبکه هوشمند شامل توربین بادی و دستگاه‌های ذخیره، یک روش مشارکت را ارائه کردند.

در اینجا یکی از معروفترین روشهای یقینی را که توسط آقای محسنیان راد در [۴] ارائه شده بررسی می‌کنیم.^۲ در این مقاله ساختاری بر اساس نظریه بازیها ارائه شده است که در آن مصرف‌کنندگان مصرف خود را با توجه به اطلاعات مصرف سایر مصرف‌کنندگان و تابع هزینه تامین توان شبکه تنظیم می‌کنند. علیرغم نوآوری‌های چشمگیر، این مقاله تولید بادی و اتصال شبکه به بازار برق اصلی را در مدل‌سازی خود لحاظ ننموده است. در مقاله [۴] به مدیریت تقاضا با رویکرد پویاتری نگاه شده است و تمام مصرف‌کنندگان علاوه بر شرکت برق، با یکدیگر نیز تعامل دارند به نحوی که طی برقراری یک بازی بین آنها، مصرف هر یک از وسایل خانگی آنها به طور بهینه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود.

هرچند که هر یک از این کارها مسئله‌ی ریزشبکه‌ی هوشمند را از یک منظر مهم مطالعه کرده‌اند، اما نقص اصلی همه‌ی آنها این است که فقط تحلیل قطعی را انجام داده‌اند. در حقیقت غافل ماندن از تأثیر عدم قطعیت می‌تواند بر برنامه‌ریزی کلی عملکرد تأثیرگذار باشد، به‌طوری‌که پاسخ بهینه‌ی نهایی شاید درواقع بهترین نقطه‌ی کار نباشد. از این حیث، نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر در بازار توان جدید، روش کار سیستم‌های قدرت را تغییر داده است. این وضعیت، ارزیابی مجدد روش‌های سستی را در یک محیط تصادفی جدید ضروری می‌سازد. به‌منظور پرداختن به تأثیر عدم قطعیت، بهره‌گیری از چارچوب‌های تصادفی می‌تواند مفید باشد.

¹ deterministic

^۲ در نهایت نتایج روش تصادفی خود را با روش قطعی ارائه شده در این مقاله مقایسه خواهیم نمود.