بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع با توانایی تولید محلی در شبکه‌های هوشمند

سید ایمان ناظر کاخکی

اساتید راهنما:

دکتر محسن فرشاد

دکتر محمدرضا آقا ابراهیمی

تابستان ۱۳۹۲

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان‌نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

تقدیم

از گریه‌های نیمه شب کودکی تا مطالعات دم صبح جوانی، مادری داشته‌ام بی‌کران‌تر از دریا، گرم‌تر از خورشید و مهربان‌تر از باران.

این رساله، تنها فرصت کوتاهی است برای سپاسگذاری از او

و از برادرم که صبور است و حامی و خواهرانی که روشنایی و لبخند اند

و نیز دوستانی که همراه بودند و هم دل

سپاس بی پایان من برای مهربانی دریغ تک تکشان

باشد که با لطف همیشگی پذیرا باشند

تشکر و قدردانی

هیچ گام بلندی برداشته نمی شود بی آنکه چراغی از تجربه در پیش رو افروخته باشد من در این راه از راهنمایی و دانش اساتید بزرگواری بهره برده ام که سخاوتمندانه همراهم بودند اساتید راهنمایم جناب آقایان دکتر محسن فرشاد و دکتر محمدرضا آقا ابراهیمی و همچنین جناب آقای دکتر هادی صفری فارمد مسئول محترم مرکز تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق مشهد که مشتاقانه و دلسوزانه تجربیات علمی خویش را در اختیارم نهادند.

سپاس بی حد مرا پذیرا باشید...

سید ایمان ناظر کاخکی

تابستان ۱۳۹۲

چکیده

تولیدکنندگان برق، تامین‌کننده میزان تقاضای الکتریسیته در بازار عمده فروشی برق می‌باشند. این در حالی است که شرکت‌های برق، برق را با قیمت عمده فروشی از تولیدکنندگان خریداری می‌کنند و آن را با قیمت خرده فروشی به مصرف‌کنندگان می‌فروشند. از طرف دیگر قیمت بازار عمده فروشی در زمان خاصی در آینده کاملاً وابسته به میزان تقاضا و قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان می‌باشد. حال با ثابت درنظر گرفتن قیمت خرده فروشی، شرکت‌های برق با ریسک بالایی به‌دلیل جهش قیمت در بازار عمده فروشی در زمان بار پیک و یا هنگامیکه تعدادی ژنراتور از مدار خارج شوند، مواجه می‌شوند. در این حالت بارهای قابل قطع به عنوان یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در بازارهای برق تجدید ساختار یافته، توانایی مدیریت ریسک ناشی از جهش قیمت‌ها را به‌همراه دارند. از طرف دیگر پیش‌نیاز تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع، دست‌یابی به مقادیر دقیقی از بار پیش‌بینی شده در کوتاه‌مدت می‌باشد. از این‌رو در این پایان‌نامه هدف اصلی پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع در محیط شبکه‌های هوشمند می‌باشد. ابتدا چهار مدل پیشنهادی در مورد پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار معرفی و شبیه‌سازی می‌شوند که این مدل‌ها شامل دو مدل تک مرحله‌ای برای بازارهای برق ایران و Nord Pool و همچنین دومدل هایبریدی چند مرحله‌ای برای بازارهای برق استرالیا، کانادا و Nord Pool می‌باشند؛ که پیاده‌سازی تمامی این مدل‌ها بر روی بازارهای مورد مطالعه نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های مذکور در فرآیند پیش‌بینی بار در کوتاه‌مدت می‌باشند. سپس از نتایج این پیش‌بینی می‌توان در مورد استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع صحبت نمود. لذا برای پیاده‌سازی واقعی، شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد درنظر گرفته شده است که از طریق ۶ پست فوق توزیع با شبکه سراسری در ارتباط است و نزدیک به یک میلیون مشترک دارد. سناریوهای مختلفی در مورد حالت‌های مختلف به‌کارگیری بارهای قابل قطع مطرح شده است که سودآورترین سناریو برای شرکت‌های توزیع، حالتی است که تمامی بارهای قابل قطع در سبد توزیع انرژی شرکت برق درنظر گرفته شده باشد. حل این مساله با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی صورت گرفته است که در این پایان‌نامه از الگوریتم ژنتیک به‌دلیل قابلیت‌های بالای آن در حل مسایل بهنه‌سازی، بهره گرفته شده است.

کلید واژه‌ها: بارهای قابل قطع، برنامه‌ریزی تامین انرژی، پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار، تولید پراکنده و شبکه هوشمند

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۲
۱-۳- هدف از تدوین پایان‌نامه ۳
۱-۴- نوآوری تحقیق ۴
۱-۵- ساختار تحقیق ۴

فصل ۲- شبکه‌های هوشمند و پاسخگویی به تقاضا ۵
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- شبکه‌های برق فعلی ۶
۲-۳- شبکه‌های هوشمند ۷
۲-۳-۱- دلایل تمایل به هوشمندسازی شبکه ۹
۲-۳-۲- مزایای شبکه هوشمند نسبت به شبکه‌های برق فعلی ۱۰
۲-۳-۳ زیرساخت‌های شبکه هوشمند ۱۲
۲-۳-۴ تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند ۱۳
۲-۴- پاسخگویی بار ۱۵
۲-۴-۱- برنامه‌های پاسخگویی بار ۱۵
۲-۴-۲- مشارکت بار پاسخگو در بازار انرژی ۱۷
۲-۴-۳- مدل اقتصادی بار واکنشی ۱۷
۲-۵- نتیجه‌گیری ۱۸

فصل ۳- بارهای قابل قطع و تولیدات پراکنده ۱۹
۳-۱- مقدمه ۱۹
۳-۲- بار قابل قطع و تاثیرات آن در بازار برق ۱۹
۳-۳- برنامه‌ریزی تامین انرژی شرکت توزیع در حضور بارهای قابل قطع ۲۱
۳-۴- تولید پراکنده و تاثیر آن‌ها بر بازار برق ۲۲
۳-۴-۱- تعاریف تولید پراکنده ۲۲
۳-۴-۲ نقش عمده واحدهای تولید پراکنده در شبکه قدرت ۲۳
۳-۴-۳- علل رویکرد به واحدهای تولید پراکنده و مزیت‌های آن در مقایسه با نیروگاه‌های متمرکز ۲۴

۳-۵- ریسک در برنامه‌ریزی تامین انرژی شرکت توزیع ۲۸
۳-۶- نتیجه‌گیری ۲۹
فصل ۴- پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار (STLF) ۳۰
۴-۱- مقدمه ۳۰
۴-۲- کاربرد پیش‌بینی بار ۳۰
۴-۳- عوامل موثر بر الگوی بار ۳۱
۴-۴- دوره‌های مختلف پیش‌بینی بار ۳۲
۴-۵- پیش‌بینی کوتاه مدت بار ۳۳
۴-۵-۱- انواع روش‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار ۳۳
۴-۶- نتیجه‌گیری ۳۹
فصل ۵- پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و تعیین استراتژی بارهای قابل قطع ۴۰
۵-۱- مقدمه ۴۰
۵-۲- شرح مساله ۴۱
۵-۳- پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار ۴۲
۵-۳-۱- شاخص‌های ارزیابی دقت عملکرد مدل‌های پیش‌بینی ۴۲
۵-۳-۲- بازارهای مورد استفاده در مدل‌های پیش‌بینی ۴۲
۵-۳-۳- مدل‌های مختلف پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار ۴۴
۵-۳-۳-۱- پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار با استفاده از شبکه عصبی بهبود یافته بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و رقابت استعماری ۴۴
۵-۳-۳-۲- به‌کارگیری دو مدل پیشنهادی بر روی بازار دانمارک غربی و مقایسه دو مدل ۴۹
۵-۳-۳-۳- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و قیمت الکتریکی در شبکه‌های هوشمند ۵۵
۵-۳-۴- نتایج حاصل از اعمال مدل‌های پیش‌بینی ۵۹
۵-۳-۴-۱- نتایج شبیه‌سازی حالت اول ۵۹
۵-۳-۴-۲- نتایج شبیه سازی حالت دوم ۶۳
۵-۳-۴-۳- نتایج شبیه‌سازی حالت سوم ۶۵
۵-۴- تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع ۶۹
۵-۴-۱- تقسیم‌بندی بارهای صنعتی ۷۰
۵-۴-۲- مدلسازی به‌کارگیری بارهای قابل قطع ۷۳
۵-۴-۳- مطالعه موردی بر روی شبکه واقعی ۷۵
۵-۵- نتیجه‌گیری ۷۸
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۰
۶-۱- نتیجه‌گیری ۸۰
۶-۲- پیشنهادات ۸۱
فهرست مراجع ۸۳

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۸۷

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقایسه شبکه برق فعلی با شبکه هوشمند..... ۹
جدول ۲-۲: الگوهای واکنش بار..... ۱۶
جدول ۵-۱: نتایج شبیه‌سازی برای ۵۰ اجرای مجزا برای هر تکرار..... ۶۰
جدول ۵-۲: مقایسه عددی نتایج مدل عصبی پیشنهادی با شبکه عصبی مرسوم..... ۶۲
جدول ۵-۳: مقایسه مقادیر شاخص خطای MAPE برای پیش‌بینی بار سال ۱۳۸۸ بازار برق ایران..... ۶۲
جدول ۵-۴: نتایج معیارهای مختلف خطا برای مدلهای مختلف..... ۶۵
جدول ۵-۵: مقایسه معیارهای مختلف خطا در پیش‌بینی بار و قیمت اولیه و نهایی ۶ ماهه اول سال ۲۰۱۲ بازار برق انتاریو..... ۶۷
جدول ۵-۶: مقایسه معیارهای مختلف خطا در پیشبینی بار و قیمت اولیه و نهایی ۶ ماهه دوم سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا..... ۶۹
جدول ۵-۷: بازه زمانی هر کدام از تعرفه‌ها را برای مشترکین صنعتی..... ۷۱
جدول ۵-۸: فرآیندهای تولید روغن نباتی..... ۷۲
جدول ۵-۹: اطلاعات مربوط به خطوط انتقال شبکه نمونه..... ۷۶
جدول ۵-۱۰: اطلاعات تولید کنندگان عمده برق شبکه نمونه..... ۷۷
جدول ۵-۱۱: اطلاعات واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع برق نمونه..... ۷۷
جدول ۵-۱۲: اطلاعات واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع برق نمونه..... ۷۷
جدول ۵-۱۳: اطلاعات بارهای قابل قطع شرکت توزیع برق نمونه..... ۷۷
جدول ۵-۱۴: سود شرکت توزیع در سناریوهای مختلف..... ۷۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: ساختار سیستم قدرت فعلی ۷
شکل ۲-۲: عوامل موثر در شکل‌گیری مفهوم شبکه هوشمند ۱۰
شکل ۲-۳: روند سرمایه‌گذاری در سیستم‌های اندازه‌گیری ۱۴
شکل ۲-۴: تاثیر الاستیسیته بر تغییرات بار ۱۸
شکل ۳-۱: ساختار عمومی بازار برق ۲۲
شکل ۳-۲: سیستم قدرت با حضور واحدهای تولید پراکنده ۲۳
شکل ۳-۳: افزایش سالانه ظرفیت تولید انرژی و سهم تولید پراکنده [۳] ۲۵
شکل ۳-۴: نرخ استحصال انرژی از منابع مختلف ۲۸
شکل ۵-۱: فلوچارت الگوریتم استعماری ۴۷
شکل ۵-۲: مدل پیشنهادی شبکه عصبی بهبود یافته ۴۸
شکل ۵-۳: مدل پیشنهادی شبکه SVR بهبود یافته ۵۰
شکل ۵-۴: مدل پیشنهادی هایبریدی انفیس و عصبی ۵۲
شکل ۵-۵: فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری برای خوشه‌بندی ۵۴
شکل ۵-۶: همبستگی داده‌های بار و قیمت ماه فوریه سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا (منطقه NSW) ۵۶
شکل ۵-۷: منحنی داده‌های بار و قیمت روز ۱۳ ماه دسامبر سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا (منطقه VIC) ۵۷
شکل ۵-۸: مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی همزمان بار و قیمت در محیط شبکه‌های هوشمند ۵۷
شکل ۵-۹: تابع برازندگی بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی ۶۰
شکل ۵-۱۰: همگرایی بهترین جواب برای الگوریتم‌های GA، PSO و ICA ۶۰
شکل ۵-۱۱: پیش‌بینی بار روز ۸ اردیبهشت ۶۱
شکل ۵-۱۲: پیش‌بینی بار روز ۶ مرداد ۶۱
شکل ۵-۱۳: پیش‌بینی بار روز ۵ آبان ۶۱
شکل ۵-۱۴: پیش‌بینی بار روز ۹ بهمن ۶۱
شکل ۵-۱۵: پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار ۹ الی ۱۵ خرداد سال ۸۸ ۶۳
شکل ۵-۱۶: پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار ۷ الی ۱۳ آذر سال ۸۸ ۶۳
شکل ۵-۱۷: بهینه‌سازی وزن‌های شبکه SVR ۶۴
Error! Reference source not found. **Error!**

Bookmark not defined.
Error! Error! Reference source not found.
Bookmark not defined.
Error! Error! Reference source not found.
Bookmark not defined.
Error! Error! Reference source not found.
Bookmark not defined.
شکل ۵-۲۲: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۵ ژانویه سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۶۷
شکل ۵-۲۳: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۵ ژانویه سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۶۷
شکل ۵-۲۴: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۶۷
شکل ۵-۲۵: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۶۷
شکل ۵-۲۶: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۵ آگوست سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۶۸
شکل ۵-۲۷: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۵ آگوست سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۶۸
شکل ۵-۲۸: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۴ اکتبر سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۶۸
شکل ۵-۲۹: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۴ اکتبر سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۶۸
شکل ۵-۳۰: فرآیند تولید روغن نباتی ۷۲
شکل ۵-۳۱: دیاگرام تک خطی شبکه نمونه ۷۶
شکل ۵-۳۲: نمودار بار مصرفی در منطقه نمونه ۷۷
شکل ۵-۳۳: هزینه شرکت توزیع در سناریوهای مختلف ۷۹

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

دراقتصاد الکتریسیته، شرکت‌های تولیدکننده‌ی برق موظفند مصرف‌کننده‌های خود را با قابلیت اطمینان کافی، کیفیتی بالا و قیمت مناسب تغذیه نمایند. این در حالی است که بایستی به محدودیت‌هایی ازجمله حفظ محیط زیست، قرارداد با دیگر شرکا در سیستم‌های به هم پیوسته توجه نمایند. برای نیل به این اهداف باید از طرفی تجهیزات مورد نظر نیروگاه‌ها و شبکه‌های انتقال[۱] و توزیع، نحو بهینه مورد استفاده و بهره‌برداری[۲] قرار گیرند (کمینه‌سازی سرمایه‌گذاری درازمدت) و از طرفی دیگر، انرژی‌های اولیه‌ی موجود برای تولید برق (انواع سوخت‌ها، آب، ...) به طرز بهینه، مورد مصرف واقع شوند (کمینه‌سازی مخارج بهره‌برداری). در این چرخه، نقش شرکت‌های توزیع‌کننده‌ی برق از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از مسائل مهمی که شرکت‌های توزیع (DISCO)[۳] در محیط رقابتی هر روز با آن مواجه می‌باشند، برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی است. یک شرکت توزیع معمولاً با خرید انرژی از بازار عمده فروشی[۴]، تقاضای مشتریان (مصرف‌کنندگان[۵] نهائی) را تامین می‌نماید. با درنظر گرفتن بارهای قابل قطع[۶] (با توانایی تولید محلی انرژی برق)، شرکت توزیع دارای انتخاب‌ها و تعاملات بیش‌تری در بازار می‌باشد. در واقع شرکت توزیع می‌تواند علاوه بر تامین انرژی مورد نیاز از طریق بازار عمده فروشی، نسبت به تامین بخشی از انرژی مورد نیاز از طریق بارهای قابل قطع نیز اقدام نماید. شرکت‌های توزیع در برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی خود با دو مسئله غیرقطعی (یعنی تغییرات بار و نوسانات قیمت) روبرو می‌باشند که این مسائل، احتمال زیان ناشی از تصمیم ناصحیح شرکت توزیع برای برنامه‌ریزی تامین انرژی را به دنبال خواهند داشت و لذا شرکت‌های توزیع در برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی خود با مسئله حداکثر کردن سود در محیط مبتنی بر ریسک مواجه هستند.

از نقطه نظر زمانی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه در سیستم‌های قدرت درچند مرحله به شرح زیر انجام می پذیرد:

الف) برنامه‌ریزی درازمدت (۵ تا ۳۰ سال)

در برنامه‌ریزی درازمدت، با توجه به عوامل دخیل شامل: توان و ترکیب و طول عمر نیروگاه‌های موجود، توانایی‌های شبکه‌های انتقال و توزیع و بالاخره قراردادهای درازمدت برای تبادل انرژی الکتریکی با شرکا در سیستم به هم پیوسته، در مورد نوع، اندازه، محل احداث نیروگاه‌های جدید، نحوه‌ی گسترش شبکه و بالاخره بستن و یا تجدید نظر در قراردادها تصمیم‌گیری می‌شود.

---

[1] Transmission company
[2] Operation
[3] Distribution Company
[4] Wholesale
[5] Consumers
[6] Interruptible Load

ب) برنامه‌ریزی میان‌مدت (تا یک سال)

در برنامه‌ریزی میان‌مدت، با ملاحظه عوامل توان و ترکیب نیروگاه‌های موجود، میزان ذخیره‌ی سوخت، میزان آب ذخیره در مخزن‌ها و بالاخره قرارداد با شرکا، در مورد نحوه و زمان به‌کارگیری نیروگاه‌های حرارتی و آبی، تهیه‌ی سوخت، میزان تبادل انرژی الکتریکی با شرکا، زمان‌بندی بهینه برای بازرسی و بالاخره تعمیرات نیروگاه‌ها و شبکه تصمیم‌گیری می‌شود.

ج) برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت (یک روز تا یک هفته)

در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، با درنظر گرفتن قیود موجود و محدودیت‌ها و با استفاده‌ی حداکثری از انرژی و توان خریداری شده از شرکا، در مورد در مدار قرار گرفتن بهینه‌ی نیروگاه‌های خودی، به منظور کاستن هزینه‌ی سوخت تصمیم‌گیری می‌شود.

د) برنامه‌ریزی لحظه‌ای (چند دقیقه تا چند ساعت)

در برنامه‌ریزی لحظه‌ای، توزیع اقتصادی بار در بین نیروگاه‌های موجود در مدار و نیز کنترل توان-فرکانس مد نظر می‌باشد.

اطلاعات لازم برای انجام برنامه‌ریزی مرحله‌ای بهینه در سیستم‌های قدرت، توسط پیش‌بینی میزان مصرف بار الکتریکی در بازه‌های زمانی مورد اشاره، در دسترس قرار می‌گیرد. مصرف بار الکتریکی به صورت پیچیده و غیرخطی تابعی از پارامترهای متعددی از جمله شرایط آب و هوایی (یعنی درجه حرارت، مقدار رطوبت، روشنایی هوا و سرعت باد) می‌باشد. در ضمن، هر روز هفته، منحنی بار خاص خود را دارد. منحنی‌های مصرف بار در روزهای تعطیل و غیر تعطیل نیز از یکدیگر متمایز می‌باشند. در فصول مختلف سال نیز، با توجه به عوامل مختص هر فصل (از جمله: طول روز)، منحنی مصرف بار تغییر می‌کند. در طول زمان نیز با توجه به رشد جمعیت و رشد اقتصادی جامعه، میزان میانگین مصرف بار، به مرور افزایش یا بالعکس بر اثر بهینه شدن ابزارهای الکتریکی و یا اقدامات صرفه‌جویانه مصرف‌کنندگان عمده‌ی برق، کاهش می‌یابد. تغییر عادات مصرف‌کنندگان متاثر از مدیریت بار از سوی تولیدکنندگان انرژی الکتریکی و یا تغییر ساختار اقتصادی (کشاورزی، صنعتی، خانه‌داری، تجاری و ...) محل تغذیه و یا در کوتاه‌مدت عواملی مانند برنامه‌های تلویزیونی، نیز بر ساختمان اقتصادی بار موثر می‌باشند. پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت (STLF)[1] در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت نقش اساسی ایفا می‌کند، به‌طوریکه یکی از نیازهای مهم برای برنامه‌ریزی‌هایی همچون ورود و خروج واحدهای نیروگاهی (UC)[2]، تخصیص سوخت[3]، توزیع اقتصادی بار[4]، برنامه‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری (MS)[5] و ... می‌باشد.

۱-۲- تاریخچه

مدل‌های پیش‌بینی درصورتی موثر و کارآمد هستند که اطلاعات تاثیرگذار و دقیق به مقدار کافی در دسترس باشند؛ در حالیکه بیش‌تر این ورودی‌های مفید جهت پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار همواره در

[1] Short Term Load Forecasting
[2] Unit Commitment
[3] Fuel Allocation
[4] Economic Load Dispatch
[5] Maintenance Scheduling

دسترس نیستند. از طرفی حضور واحدهای تولیدی با عدم‌قطعیت بالا و تولید تصادفی، برقراری تعادل میان تولید و تقاضای مصرف سیستم را پیچیده می‌نماید [۱]. تاکنون متدهای زیادی جهت پیش‌بینی بار درکوتاه‌مدت ارائه شده است. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به سری‌های زمانی[۱] در [۲]، شبکه‌های عصبی (ANN)[۲] در [۳]، سیستم‌های استنتاجی فازی (FIS)[۳] در [۴] و ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)[۴] در [۵] نام برد. اما مدل‌های تک‌مرحله‌ای ممکن است قادر به نمایش صورت‌های مختلف یک سری زمانی نباشند. از این‌رو ایده‌ی به‌کارگیری مدل‌های ترکیبی چندمرحله‌ای در کاربردهای متنوع شامل پیش‌بینی قیمت و بار مطرح شده است. هدف پیش‌بینی ترکیبی چند مرحله‌ای ترکیب مدل‌های مختلف جهت بهبود صحت نهایی پیش‌بینی است. برای مثال می‌توان به کاربرد همزمان شبکه‌های عصبی مصنوعی با سیستم‌های خبره فازی در [۶] و همچنین ترکیب ARIMA[۵] خطی و NN غیرخطی که در یک فرآیند پیش‌بینی در [۷] جهت بهبود دقت پیش‌بینی در بازار برق[۶] استفاده شده است، نام برد.

در مقالات و مطالعات انجام شده این موضوع به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار داده شده است که عملکرد شرکت‌های توزیع در بازار در صورتی که تقاضا در بخش توزیع به صورت بالقوه موجود بوده، رفتار و تغییرات آن شناخته شده باشد و با درنظرگرفتن موارد جدید مانند واحدهای تولید پراکنده (DG)[۷] و بارهای قابل قطع، بهتر خواهد بود [۸]. رقابت‌گریزی شرکت‌های تولید انرژی در مواقع پرشدگی خطوط انتقال، یکی از مشکلات ذاتی بازارهای برق بوده که با رشد دائم تقاضا بدتر نیز می‌شود. این درحالی است که استفاده از منابع تولید پراکنده می‌تواند این مساله را تعدیل نماید [۹]. از طرفی دیگر در بازارهای برق تجدید ساختار یافته[۸]، بارهای قابل قطع نیز می‌توانند به عنوان ابزاری مناسب برای کاهش تقاضا در شرایط اضطراری عمل کنند [۱۰].

۱-۳-هدف از تدوین پایان‌نامه

دو موضوعی که در مطالعات بازار خرده فروشی و نقش شرکت‌های توزیع در بازار در سال‌های اخیر مطرح شده و به نظر می‌رسد که نیاز به بررسی بیش‌تری دارند عبارتند از: منابع تولید پراکنده و بارهای قابل قطع [۱۱، ۱۲]. با توجه به افق انتخابی برای این مطالعه و نیز اهمیت موضوعات فوق الذکر، بحث‌هایی نظیر بازار، کیفیت توان و قابلیت اطمینان، که در مقالات به آن‌ها اشاره شده است، کنار گذاشته و بر محورهای اشاره شده، یعنی بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده متمرکز شده و اشکالاتی را به مطالعات انجام شده وارد کرده و بارهای قابل قطع و منابع تولید پراکنده موررد بررسی قرار خواهند گرفت. در این پایان‌نامه، هدف، تدوین استراتژی تامین انرژی یک شرکت توزیع برق در محیط

[1] Time Series
[2] Artificial Neutral Networks
[3] Fuzzy Inference Systems
[4] Support Vector Machine
[5] Auto Regressive Integrated Moving Average
[6] Power Market
[7] Distributed Generation
[8] Deregulated Power Market

رقابتی شبکه‌های هوشمند (SG)[1]، با حضور بارهای قابل قطع (با توانایی تولید محلی انرژی برق) و با ملاحظه پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت می‌باشد.

۱-۴- نوآوری تحقیق

در محیط تجدید ساختار[2] و فضای رقابتی بازار برق، تاکنون توجه و مطالعه بیش‌تر بر روی بخش‌های تولید و سیستم‌های انتقال، و نیز مسائل مطرح شده در سمت عرضه معطوف بوده و به‌طور نسبی مطالعات و بررسی‌های کمتری در خصوص سیستم‌های توزیع و سمت تقاضا شده است. اخیراً، با پیشرفت بیش‌تر در مطالعات بازار برق، تحقیق در زمینه سیستم‌های توزیع و نقش آن‌ها در محیط تجدید ساختار و نیز مسائل مربوط به سمت تقاضا مانند پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار، پاسخ‌دهی بار، قیمت‌دهی سمت تقاضا و برنامه‌ریزی انرژی شرکت‌های توزیع مورد توجه و اهمیت بیش‌تری قرار گرفته است.

۱-۵- ساختار تحقیق

فصل دوم: در این فصل ابتدا شبکه‌های هوشمند معرفی شده و سپس اهمیت این شبکه‌ها و مزایای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز پاسخگویی به تقاضا (DR)[3] که یکی از مباحث مهم در این شبکه‌ها می‌باشد، به تفضیل توضیح داده می‌شود.

فصل سوم: به دلیل اهمیت بالای به‌کارگیری بارهای قابل قطع در محیط بازارهای تجدید ساختار یافته، عنوان فصل به این موضوع اختصاص یافته و این نوع بارها معرفی و توضیح داده می‌شوند؛ سپس برنامه‌ریزی تامین انرژی شرکت توزیع در حضور بارهای قابل قطع بیان می‌شود. در نهایت با مروری بر منابع تولید پراکنده فصل خاتمه می‌یابد.

فصل چهارم: از آنجایی تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع نیازمند پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار می‌باشد، در این فصل این مسئله بیان می‌شود و سپس انواع روش‌های این نوع پیش‌بینی توضیح داده می‌شود.

فصل پنجم: در این پایان‌نامه هدف اصلی پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار و تعیین استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع با توانایی تولید محلی در محیط شبکه‌های هوشمند می‌باشد، مدل‌های مختلفی که برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار پیشنهاد گردیده‌اند، شبیه‌سازی می‌شوند؛ سپس در مورد استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع توضیح داده می‌شود و در نهایت با ارائه نتیجه‌گیری فصل پایان می‌یابد.

فصل ششم: نتیجه‌گیری در مورد استراتژی به‌کارگیری بارهای قابل قطع با توانایی تولید محلی در محیط شبکه‌های هوشمند و پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار به همراه تحقیقات پیشنهادی در این فصل ارائه می‌شود.

---

[1] Smart Grid
[2] Restructuring
[3] Demand Response

فصل ۲–شبکه‌های هوشمند و پاسخگویی به تقاضا

۲–۱– مقدمه

حرکت به سمت هوشمندسازی شبکه‌های انتقال و توزیع نیروی برق را می‌توان یکی از تحولات اساسی در حوزه صنعت برق در دهه اخیر برشمرد. پس از حدود یک قرن از فعالیت دو صنعت برق و مخابرات در کنار یکدیگر و به عنوان دو صنعت حیاتی، امروزه ادغام بخشی از حوزه‌های خدمات این دو صنعت در قالب شبکه‌های هوشمند در حال تبلور است. استفاده از شبکه‌های مخابراتی و سیستم‌های مدیریت اطلاعات، در شبکه‌های برق آینده، افزایش کارایی و کاهش اتلاف انرژی را به همراه خواهد داشت. در راستای تحقق این هدف در صنعت برق، حرکت سریع در جهت توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی و جایگزینی سیستم‌های سنتی با سیستم‌های نوین در کلیه شئون اعم از اندازه‌گیری، نظارت، کنترل و مدیریت یک نیاز ضروری است [۱۳].

ایده‌ی بکارگیری شبکه‌های هوشمند با هدف رفع مشکلات شبکه‌های برق فعلی و مدیریت بهتر و کارآمدتر سیستم قدرت مطرح شده است. این شبکه‌ها امکان پایش کامل و کنترل لحظه به لحظه تجهیزات را برای شرکت‌های برق فراهم می‌کنند. انتظار می‌رود که ایجاد این شبکه‌ها کنترل و بهره‌برداری سیستم قدرت را بهبود ببخشد و امکان استفاده گسترده از تولیدات پراکنده را فراهم کند. شبکه هوشمند باید توانایی ترمیم خود و بازگشت سریع به شرایط مطلوب، با وجود خطاهای ایجاد شده را داشته باشد. همچنین شبکه هوشمند گردانندگان خود را در جهت یافتن راه‌های جدید جهت انجام مبادلات اقتصادی انرژی در سیستم قدرت، یاری خواهد کرد [۱۴].

ویژگی‌های شبکه‌های هوشمند مرتبط با سمت بار بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند (AMI)[1]، نمایشگرهای هوشمند[2] و کنترل‌کننده‌های هوشمند[3] از جمله مسایل سمت بار در این شبکه‌ها می‌باشد. با استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری پیشرفته میزان مصرف انرژی الکتریکی هر مصرف‌کننده در تمام زمینه‌ها در دسترس خواهد بود؛ بنابراین برخلاف سیستم‌های قدرت فعلی، مصرف‌کنندگانی هستند که در ساعاتی که قیمت برق بالا است، برق مصرف نمی‌کنند. سیستم‌های نمایشگر هوشمند، قیمت لحظه‌ای (SP)[4] برق را به اطلاع مصرف‌کنندگان می‌رسانند. این تکنولوژی به کمک سیستم‌های ارتباطی و در کنار AMI سبب بهبود شرایط برای اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار خواهد شد، چراکه با مطلع شدن از قیمت برق، مصرف‌کنندگان بیش‌تر در مصرف برق صرفه‌جویی خواهند کرد و یا مصرف خود را به ساعات دیگر منتقل خواهند نمود.

در این شبکه‌های نوظهور، استفاده از حسگرهای حساس به قیمت برق پایین، شرایط استفاده از کنترل‌گرهای هوشمند را فراهم کرده است. این کنترل‌گرها می‌توانند مصرف برق مشترکین را با توجه به

[1] Advanced Metering Infrastructure
[2] Smart Monitors
[3] Smart Controllers
[4] Spot Price

قیمت برق و تنظیمات مربوطه کنترل کنند که این گامی موثر در کنترل مصرف انرژی الکتریکی خواهد بود. این کنترل‌گرها در حالت محلی، بر طبق خواست مصرف‌کننده تنظیم خواهد شد و با توجه به قیمت برق و حسگرهای حساس به قیمت برق، در ساعاتی که قیمت برق بالا می‌باشد، مصرف برق مصرف‌کننده-ی مربوطه را (با توجه به تنظیمات از پیش انجام شده توسط خود مصرف‌کننده) کاهش خواهند داد. در حالت کلی، این کنترل‌گرها با هم در ارتباط خواهند بود و توسط یک سیستم سلسله مراتبی کنترل خواهند شد. خرده فروشان[1] ممکن است برای اینکه از میزان خطر خود بکاهند، خود کنترل این کنترل‌گرها را به عهده گیرند، حتی ممکن است بهره‌بردار سیستم، به منظور افزایش امنیت سیستم، از این کنترل‌کننده‌ها استفاده کند.

در اکثر بازارهای برق موجود سهم پاسخگویی بارها کم می‌باشد. در این بازارها تنها مصرف‌کنندگان بزرگ از شانس شرکت در بازار عمده فروشی به طور مستقیم برخوردار می‌باشند. مصرف‌کنندگان کوچک به دو دلیل توانایی شرکت در این بازارها را ندارند. دلیل اول اینکه لازمه‌ی شرکت مصرف‌کنندگان این است که می‌بایست همواره از قیمت برق در دوره‌های مختلف اطلاع داشته باشند. استفاده از چنین سیستم‌های اندازه‌گیری و ارتباطاتی در سیستم برق اخیر مستلزم صرف هزینه بالایی می‌باشد. این هزینه با سودی که از شرکت در بازار برای مصرف‌کنندگان کوچک حاصل می‌شود قابل جبران نخواهد بود. دلیل دوم اینکه تعداد این مصرف‌کنندگان بسیار زیاد می‌باشد، بنابراین اطلاعاتی که می‌بایست توسط بهره‌بردار سیستم جمع‌آوری و یا فرستاده شود بسیار بالا است. سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند و نمایشگرهای هوشمند در شبکه‌ی هوشمند می‌تواند راهکار مناسبی برای حل این مسئله محسوب شوند [۱۵، ۱۶].

چالش‌هایی از قبیل افزایش تقاضای انرژی، تغییرات جوی، فرسودگی تجهیزات شبکه، افزایش قیمت انرژی و افزایش وابستگی کشورها به واردات انرژی، از انگیزه‌های اصلی حرکت به‌سوی دستیابی به انرژی‌های پایدار، ایمن و قابل رقابت با منابع انرژی موجود به‌شمار می‌آید. به همین سبب سیاست‌گذاران در سراسر جهان در حال اجرای برنامه‌هایی برای افزایش بازدهی، امنیت و قابلیت اطمینان سیستم انتقال و توزیع برق با توسعه شبکه کنونی و حرکت به‌سمت شبکه هوشمند می‌باشند [۱۷].

در این فصل ابتدا شبکه‌های هوشمند معرفی شده و سپس اهمیت این شبکه‌ها و مزایای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز پاسخگویی به تقاضا که یکی از مباحث مهم در این شبکه‌ها می‌باشد، به تفضیل توضیح داده می‌شود.

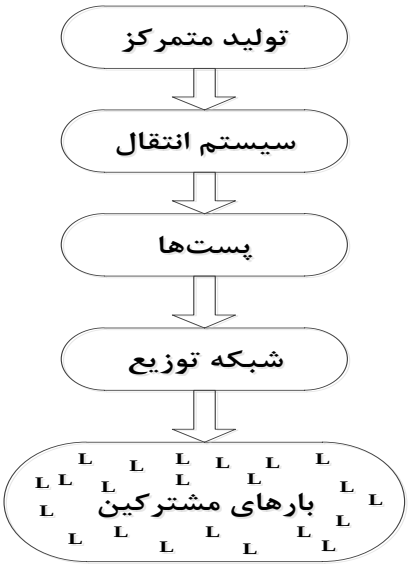
۲-۲-شبکه های برق فعلی

شبکه برق موجود، محصول گسترش شهرنشینی و توسعه سریع زیرساخت‌های گوناگون در بخش‌های مختلف جهان در قرن‌های گذشته می‌باشد. اگرچه شرکت‌های برق در مناطق متفاوتی قرار دارند، اما به-طور معمول از فناوری‌های مشابهی استفاده می‌کنند. با این حال، رشد سیستم برق، تحت تاثیر مسایل اقتصادی، سیاسی و جغرافیایی که برای هر شرکت منحصر به فرد می‌باشد، قرار گرفته است. با وجود چنین تفاوت‌هایی، کلیت ساختار سیستم قدرت موجود یکسان است. صنعت برق از آغاز با وجود مرز

[1] Retailers

مشخص بین قسمت تولید، انتقال و توزیع خود فعالیت می‌کرده و در نتیجه هر بخش اتوماسیون، تحول و دگرگونی متفاوتی را شکل داده است.

همان‌گونه که در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود، شبکه برق موجود یک سیستم کاملاً سلسله مراتبی است که در آن نیروگاه‌ها در بالای زنجیره، تحویل قدرت به بارهای مشتریان در پایین زنجیره را تضمین می‌کنند. این سیستم اساساً یک خط یک‌طرفه است که هیچ منبع اطلاعاتی زمان واقعی[1] در مورد نقاط پایانی در اختیار ندارد؛ بنابراین شبکه برق به منظور حفظ قابلیت اطمینان، به گونه‌ای برنامه‌ریزی و طراحی می‌شود تا بتواند حداکثر تقاضای پیش‌بینی شده را تحمل کند. در نتیجه از آنجایی که این اوج تقاضا تنها در کسری از ساعات روز رخ می‌دهد، سیستم مذکور ذاتاً غیر بهینه می‌باشد. علاوه بر این، یک افزایش بی‌سابقه تقاضای توان، توام با تاخیر در سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سیستم قدرت، پایداری سیستم را کاهش می‌دهد.



شکل ۲-۱: ساختار سیستم قدرت فعلی

۲-۳- شبکه‌های هوشمند

شبکه هوشمند، ترکیبی از شبکه الکتریکی، شبکه ارتباطی، نرم افزار و سخت افزار برای اندازه‌گیری، مانیتورینگ، کنترل و مدیریت تولید، انتقال، توزیع، ذخیره و مصرف انرژی می‌باشد. شبکه هوشمند با استفاده از تکنولوژی دیجیتال برای کنترل شبکه و انتخاب بهترین حالت پخش توان، باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و همچنین شفاف‌سازی در شبکه می‌شود [۱۸].

شبکه هوشمند در مفهوم اصلی آن سیستمی است که میان عملکردهایی که به‌صورت کاملاً خودکار فعالیت می‌کنند، از طریق استفاده از فناوری‌های مخابراتی[2] و کامپیوتر ارتباط برقرار می‌کند تا سیستمی با پاسخگویی سریع، عملکردی خودکار و با قابلیت اطمینان بالا بدست بیاید. این شبکه به‌صورت کاملاً

[1] Real Time
[2] Telecommunication Technology

هوشمند به‌طور پیوسته اطلاعات را از بخش‌های مختلف دریافت، همچنین به بخش‌های مختلف ارسال و نیز اقدام به تحلیل و پردازش این داده‌ها می‌کند. در این شبکه اطلاعات در بخش‌های گوناگون تولید، انتقال و توزیع و حتی مصرف‌کننده به گردش در می‌آید [۱۷]. در جدول ۲-۱ شبکه برق فعلی با شبکه هوشمند مقایسه گردیده است.

پایه و ستون فقرات شبکه هوشمند، زیرساخت مخابراتی قابل اعتماد، ایمن و قابل مدیریت براساس استانداردهای باز است که ارتباط بین المان‌های شبکه هوشمند را برقرار می‌سازد و در تصمیم‌گیری و ارسال اطلاعات و مقادیر به بهره‌برداران و تولیدکنندگان و مشترکانی که به این شبکه مخابراتی متصل هستند، مشارکت می‌کند [۳].

دلایل متعددی را برای ضرورت هوشمندسازی شبکه توزیع برمی‌شمارند. مهم‌ترین این دلایل - که انگیزه اصلی بیش‌تر شرکت‌های برق برای حرکت در مسیر هوشمندسازی شبکه بوده است - را می‌توان در سه عامل زیر خلاصه کرد [۱۴]:

- رشد شدید مصرف برق در سال‌های آتی و ضرورت به‌کارگیری مکانیسمی موثر برای مدیریت بار و مصرف
- مشکلات زیست محیطی و الزام کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] با توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر[2] و مولدهای پراکنده سرمایشی گرمایشی (CHP)[3]
- رشد روزافزون سهم خودروهای الکتریکی (EV)[4]

شبکه هوشمند به سیستمی گفته می‌شود که به شرکت توزیع برق امکان نظارت از راه دور و اعمال فرمان و کنترل تجهیزات شبکه را به صورت آنلاین می‌دهد؛ اما در اغلب موارد چنین تعریفی تصویری روشن از ویژگی‌های شبکه هوشمند نمی‌دهد؛ به‌خصوص که بسیاری از مواقع «اتوماسیون شبکه» و «هوشمندسازی شبکه» به‌جای یکدیگر به‌کار می‌روند و مرز بین آن‌ها مخدوش می‌شود. برای مثال، در اغلب موارد یکی از ویژگی‌های شبکه هوشمند را امکان جداسازی شبکه معیوب به‌منظور کاهش تعداد مشترکان خاموش و افزایش سرعت بازیابی شبکه می‌دانند؛ اما این امر با اتوماسیون شبکه نیز حاصل می‌شود و بسیاری از شرکت‌های توزیع دنیا، پیش از طرح مفهوم شبکه هوشمند در پایان دهه ۱۹۹۰، به آن دست یافته‌اند. با اتوماسیون شبکه توزیع می‌توان اطلاعات شبکه را از راه دور استخراج نمود. امکان جداسازی و فرمان برای قطع و وصل تجهیزات نیز وجود دارد اما شبکه هوشمند فراتر از این می‌باشد و می‌تواند با ایجاد ارتباط میان اجزای شبکه و مشترکین، به کمک نرم‌افزارهای هوشمند نسبت به بازیابی خودکار شبکه، پخش بار خودکار شبکه به‌منظور کاهش تلفات و استفاده بهینه از تجهیزات و... اقدام نماید. ویژگی دیگر شبکه هوشمند فراهم آوردن امکان اتصال مولدهای کوچک و بسیار کوچک (مولدهایی که در منازل و ساختمان‌های اداری وجود دارند) به شبکه توزیع می‌باشد.

[1] Greenhouse Gases
[2] Renewable Energies
[3] Combined Heat and Power
[4] Electric Vehicles