به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پاسخگویی بار زمان حقیقی در شبکه توزیع هوشمند

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

هادی انتظاری زارچ

استاد راهنما

دکتر غلامرضا یوسفی

استاد مشاور

دکتر محمدامین لطیفی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پاسخگویی بار زمان حقیقی در شبکه توزیع هوشمند

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

هادی انتظاری زارچ

استاد راهنما

دکتر غلامرضا یوسفی

استاد مشاور

دکتر محمدامین لطیفی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای هادی انتظاری زارچ

تحت عنوان

پاسخگویی بار زمان حقیقی در شبکه توزیع هوشمند

در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر غلامرضا یوسفی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمدامین لطیفی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمدعلی خسروی‌فرد

ضمن سپاس از خداوند متعال، بر خود لازم می‌دانم که از استاد گرامیم جناب آقای دکتر غلامرضا یوسفی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق، فروتنی و بدون هیچ چشم‌داشتی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، همچنین آقای دکتر محمد امین لطیفی که زحمت مشاوره من، در این پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

پدرم به استواری کوه

مادرم به زلالی چشمه

همسرم به صمیمیت باران

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ده
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
۱-۱ پیشگفتار ۲
۱-۲ پیشینه پژوهش ۶
۱-۳ اهداف و نوآوری پژوهش ۷
۱-۴ ساختار کلی پایان‌نامه ۹
فصل دوم: پاسخگویی بار
۲-۱ پیشگفتار ۱۰
۲-۲ مدیریت سمت تقاضا ۱۱
۲-۳ پاسخگویی بار ۱۳
۲-۴ انواع برنامه‌های پاسخگویی بار ۱۷
۲-۴-۱ برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت ۱۸
۲-۴-۲ برنامه‌های پاسخگویی بار تشویق محور ۲۲
۲-۵ نقش پاسخگویی بار در سیستم قدرت ۲۵
۲-۵-۱ پاسخگویی بار از دیدگاه مصرف‌کنندگان ۲۷
۲-۶ مزایای پاسخگویی بار ۲۹
۲-۷ جمع‌بندی ۳۱
فصل سوم: پاسخگویی بار در شبکه هوشمند
۳-۱ پیشگفتار ۳۲
۳-۲ شبکه برق سنتی ۳۳
۳-۳ شبکه هوشمند ۳۴
۳-۴ ضرورت‌های شبکه هوشمند ۳۵
۳-۵ هوشمندسازی شبکه قدرت ۳۷
۳-۶ پاسخگویی بار در شبکه هوشمند ۳۹
۳-۷ جمع‌بندی ۴۲
فصل چهارم: برنامه پاسخگویی بار زمان حقیقی پیشنهادی
۴-۱ پیشگفتار ۴۳
۴-۲ چارچوب کلی طرح پیشنهادی ۴۵
۴-۳ مدلسازی ریاضی ۴۵

۴-۳-۱ فرضیات مدل پیشنهادی ۴۶
۴-۳-۲ محاسبه تعرفه‌های بهینه خرده‌فروشی ۴۷
۴-۳-۳ الگوریتم پیشنهادی قیمت‌گذاری ۵۱
۴-۳-۴ مدل پیشنهادی پاسخگویی بار قیمت‌گذاری زمان حقیقی ۵۲
۴-۳-۵ الگوریتم پیشنهادی برنامه پاسخگویی بار شبکه‌گرا ۵۸
۴-۴ جمع‌بندی ۶۳
فصل پنجم: مطالعات عددی
۵-۱ مقدمه ۶۴
۵-۲ مطالعه اولیه شبکه ۶۵
۵-۳ فرضیات صورت گرفته در این پژوهش ۶۷
۵-۴ پیاده‌سازی مرحله اول الگوریتم ۶۸
۵-۵ پیاده‌سازی مرحله دوم الگوریتم ۸۳
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ نتیجه‌گیری ۹۱
۶-۲ پیشنهادات ۹۲
پیوست
پ-۱- اطلاعات شبکه ۹۴
مراجع ۹۶

فهرست علایم و نشانه‌ها

تغییر بار شین i (kWh)	Δd_i
ضریب ساعتی جمله اول تابع هزینه ($/kWh^2)	a_t
درآمد مشترک ناشی از مصرف انرژی ($)	$B(d(t))$
ضریب ساعتی جمله دوم تابع هزینه ($/kWh)	b_t
میزان تشویقی پرداختی از سوی شرکت برق در ساعت t ($)	C_Inc(t)
هزینه تلفات در ساعت t ($)	C_loss(t)
هزینه بهره‌برداری در ساعت t ($)	C_operation(t)
میزان بار کاهش یافته مرحله دوم پاسخگویی بار در هر ساعت (kWh)	Cur_load(t)
هزینه تأمین انرژی مورد تقاضا کل مصرف‌کنندگان در ساعت t ($)	$C_t(D_t)$
مقدار ساعتی جمله سوم تابع هزینه ($)	c_t
تقاضای کل مصرف‌کنندگان در ساعت t (kWh)	D_t
میزان بار مشترک قبل از شرکت در برنامه پاسخگویی بار در ساعت t (kWh)	$d_0(t)$
میزان تقاضای مشترکین شین i در تکرار kام برای ساعت t (kWh)	$d_i^k(t)$
میزان بار قابل قطع مشترکین شین i در برنامه کنترل مستقیم بار (kWh)	$d_i^{DLC}(t)$
میزان بار قابل کاهش مشترکین شین i در برنامه پاسخگویی بار زمان اضطراری (kWh)	$d_i^{EDRP}(t)$
کشش قیمتی تقاضا	E
کشش قیمتی تقاضا در ساعت t به قیمت انرژی در ساعت t'	$E(t,t')$
متغیر باینری پذیرش پیشنهاد کاهش بار مشترکین شین i در ساعت t	$I_{i,t}$
اندیس مجموعه شین‌های شبکه	i , j
میزان تشویقی پرداختی به مشترکین شین i در ساعت t به ازای هر کیلووات ساعت ($/kWh)	$inc_i(t)$
اندیس تعداد تکرار الگوریتم	k
میزان تلفات کل شبکه در ساعت t (kWh)	loss(t)
حداقل ساعت عدم شرکت مشترکین شین i در برنامه کنترل مستقیم بار (hour)	MDN_i
حداکثر ساعت قطع بار مشترکین شین i در برنامه کنترل مستقیم بار (hour)	MUP_i
ضریب وزنی حساسیت نسبی پروفیل ولتاژ شین i در ساعت t	$m_{1,i}^t$
ضریب وزنی حساسیت نسبی تلفات کل شبکه شین i در ساعت t	$m_{2,i}^t$
تعداد شین شبکه	N
توان اکتیو در شین i در ساعت t (kW)	P_t^i
توان راکتیو در شین i در ساعت t (kVAr)	Q_t^i
مطلوبیت مشترکین به ازای مصرف به میزان d(t) را در ساعت t ($)	$S(d(t))$

توان عبوری بین شین i و j در ساعت t (kVA)	S_{ij}^{t}
ظرفیت حرارتی شاخه بین شین i و j (kVA)	S_{ij}^{max}
ضریب حساسیت نسبی تلفات کل شبکه برای مصرف‌کنندگان شین i	$Sloss_{i}^{t}$
توان ظاهری تحویل شده توسط ترانسفورمر پست فوق توزیع در ساعت t (kVA)	S_{s}^{t}
حداکثر توان ظاهری پست فوق توزیع (kVA)	S_{s}^{max}
ضریب حساسیت نسبی پروفیل ولتاژ مصرف‌کنندگان شین i	SV_{i}^{t}
اندیس مجموعه ساعت‌های بهره‌برداری	t , l
دامنه ولتاژ در شین i در ساعت t (pu)	$\left\|V_{i}^{t}\right\|$
ولتاژ شین i در ساعت t (pu)	V_{i}^{t}
حداکثر دامنه مجاز ولتاژ در شین i (pu)	V_{i}^{max}
حداقل دامنه مجاز ولتاژ در شین i (pu)	V_{i}^{min}
ولتاژ مطلوب شرکت توزیع (pu)	V_{ref}
شاخص انحراف پروفیل ولتاژ در ساعت t	VDI(t)
نسبت هزینه بهره‌برداری به هزینه کل تأمین انرژی در ساعت t	X_{t}
اندازه ادمیتانس بین شین‌های i و j	$\left\|Y_{ij}\right\|$
متغیر باینری فراخوان مشترکین شین i برای شرکت در برنامه کنترل مستقیم بار در ساعت t	$Z_{i,t}$
شاخص میزان فشار مصرف‌کنندگان شین i	α_{i}^{t}
زاویه ولتاژ شین i در ساعت t	δ_{i}^{t}
زاویه ادمیتانس بین شین‌های i و j	θ_{ij}
قیمت برق قبل از شرکت مشترکین در برنامه پاسخگویی بار در ساعت t ($/kWh)	$\rho_{0}(t)$
قیمت برای مصرف‌کنندگان شین i در تکرار kام برای ساعت t ($/kWh)	$\rho_{i}^{k}(t)$
میزان تشویقی برای مشترکین شین i در ازای شرکت در برنامه کنترل مستقیم بار ($/kWh)	$\rho_{i}^{DLC}(t)$
قیمت درخواستی مشترکین شین i به ازای کیلووات ساعت کاهش بار پیشنهادی ($/kWh)	$\rho_{i}^{EDRP}(t)$
قیمت مرجع برای ساعت t ($/kWh)	$\rho_{s}(t)$
میزان پتانسیل پاسخگویی بار مصرف‌کنندگان شین i در ساعت t	ω_{i}^{t}

چکیده

با توسعه و پیشرفت شبکه‌های هوشمند، اجرای بهینه برنامه‌های پاسخگویی بار در بهره‌برداری و توسعه سیستم توزیع، اهمیت ویـژه‌ای یافتـه است. در این پایان‌نامه، روشی بهینه برای پاسخگویی بار زمان حقیقی شامل دو مرحله، برنامه بـازارگرا و برنامـه شـبکه‌گـرا، در یـک شـبکه توزیع هوشمند ارائه می‌شود. مرحله اول، شامل برنامه پاسخگویی بار قیمت زمان حقیقی می‌باشد که قیمت گره‌ای زمان حقیقی و میزان بـار ساعتی بهینه برای مصرف‌کنندگان در هر شین به صورت تعاملی بین مصرف‌کنندگان و شرکت برق تعیین می‌شود. بـرای تعیـین میـزان بـار مصرف‌کنندگان ، در پاسخ به قیمت انرژی در هر ساعت از مفهوم الاستیسیته قیمتی تقاضا استفاده شـده اسـت. در مرحلـه دوم، در صـورت عدم برقراری قیود بهره‌برداری، روشی برای اجرای بهینه برنامه‌های پاسخگویی بار زمـان اضـطراری بـار ارائـه شـده اسـت. در ایـن مرحلـه، شرکت برق با دریافت اطلاعات مشترکین به‌منظور کمینه‌سازی هزینه برقراری قیود شبکه، بهترین ترکیب از بـین پیشـنهادهای کـاهش و یـا قطع بار مشترکین را می‌پذیرد. بدون از دسـت رفـتن کلیـت مسـأله، از میـان برنامـه‌هـای پاسـخگویی بـار، در ایـن مرحلـه فقـط برنامـه‌هـای پاسخگویی بار اضطراری و کنترل مستقیم بار در نظر گرفته شده‌است. پیاده‌سازی روش ارائه شده در محیط نرم‌افزار Matlab برروی شـبکه توزیع ۳۳ باس و با لحاظ سناریوهای متفاوت بهره‌برداری، کارآمدی مدل پیشنهادی را نشان داده است.

کلمات کلیدی: ۱- پاسخگویی بار زمان حقیقی ۲- شبکه هوشمند ۳-قیمت‌گذاری گره‌ای زمان حقیقی

فصل اول
مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

وجود عواملی چون گسترش روزافزون تقاضای برق، کمبود منابع متداول تولید انرژی، گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، پاسخگویی بار[1] و تأکید بر حفظ محیط زیست موجب گسترش مفاهیم شبکه هوشمند[2] و شکل گرفتن چهره جدیدی از صنعت برق شده است [۱]. شبکه هوشمند، تعامل نسل جدیدی از فناوری‌های الکتریکی و مخابراتی می‌باشد که امکان ارتباط دوطرفه و استفاده از حسگرهای پیشرفته را به منظور بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سیستم، امنیت انتقال و مصرف توان فراهم می‌کند. از جمله این فناوری‌ها، کنترل‌کننده‌های هوشمند و خودکارو نرم‌افزارهای پیشرفته برای مدیریت داده‌ها و ارتباط دو طرفه بین شرکت برق و مشترکین می‌باشد [۲].

با پیشرفت و توسعه شبکه‌های هوشمند، انتظار می‌رود تعامل بین مشترکین و تأمین‌کنندگان انرژی بیش از پیش به‌کار گرفته شوند. با بهبود ارتباط میان مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان و افزایش انتخاب‌های مصرف‌کنندگان، مشارکت هرچه بیشتر مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار و استفاده بهینه ار منابع تولید پراکنده و انرژی‌های تجدیدپذیر امکان پذیر و به دنبال آن موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، تعویق در ساخت نیروگاه‌های جدید و هموار شدن منحنی بار میسر می‌شود [۱]. توانایی مدیریت مصرف

[1] Demand Response (DR)
[2] Smart Grid

انرژی توسط مشترکین در شبکه هوشمند، علاوه‌بر بهبود کارآیی و قابلیت اطمینان شبکه، امکان انطباق میزان تقاضا با تعرفه زمانی[۱] و تشویقی‌ها[۲] را فراهم می‌کند [۳].

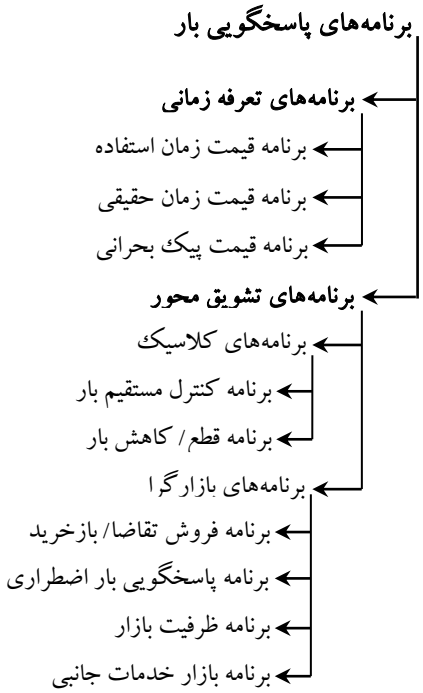
برای نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی واژه مدیریت سمت تقاضا[۳] توسط محققین EPRI[۴] به کار گرفته شد. مجموعه برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در بر گیرنده گستره‌ای از فعالیت‌هایی است که از ناحیه شرکت برق و یا دولت به‌منظور تغییر میزان و یا زمان مصرف برق مشترکین در جهت منافع مشترک جامعه، شرکت برق و مصرف‌کنندگان طراحی می‌شود. راهبردهای مدیریت سمت تقاضا باید به‌گونه‌ای باشند که سه گروه اصلی از مسائل را دنبال کنند. بر همین اساس برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا به سه دسته اصلی شامل برنامه‌های بازارگرا[۵]، برنامه‌های شبکه‌گرا[۶] و برنامه‌های محیط زیست محور[۷] تقسیم می‌شوند. برنامه‌های بازارگرا شامل راهبردهایی به منظور پاسخگویی به شرایط بازار برق در کوتاه مدت می‌باشند. مهمترین اهداف این دسته از برنامه‌ها کمینه‌سازی جهش قیمت برق به دلیل کمبود ظرفیت تولید و بیشینه‌سازی همزمان سود و رفاه اجتماعی می‌باشد. برنامه‌های شبکه‌گرا نیز شامل راهبردهایی هستند که منجر به کاهش تقاضا از شبکه برق می‌شوند، به‌گونه‌ای که قابلیت اطمینان سیستم در کوتاه مدت حفظ شده و در دراز مدت نیز نیاز به توسعه شبکه به تعویق افتد [۴].

پس از تجدیدساختار صنعت برق، برنامه‌های پاسخگویی بار، به عنوان یکی از روش‌های مدیریت سمت تقاضا، به دلایلی همچون کاهش پیک، جلوگیری از تغییرات سریع قیمت در بازار برق و افزایش بازده سیستم قدرت و بازار انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. طبق تعریف وزارت انرژی آمریکا[۸] به مدیریت و اصلاح رفتار مصرف‌کنندگان در زمان بالا رفتن قیمت انرژی و یا تهدید شدن قابلیت اطمینان شبکه پاسخگویی بار گفته می‌شود [۵].

برنامه‌های پاسخگویی بار را بر اساس عوامل انگیزش مصرف‌کنندگان برای اصلاح الگوی مصرف می‌توان به دو گروه اصلی برنامه‌های تعرفه زمانی[۹] و تشویق محور[۱۰] و چند زیر مجموعه تقسیم نمود (شکل ۱-۱) [۶]:

---

[1] Time-Based Price
[2] Incentive
[3] Demand Side Management (DSM)
[4] Electric Power Research Institute (EPRI)
[5] Market-Driven
[6] Network-Driven
[7] Environment-Driven
[8] U.S. Department of Energy (DOE)
[9] Time-Based Rate Programs
[10] Incentive-Based Programs



شکل ۱-۱ دسته‌بندی برنامه‌های پاسخگویی بار

در برنامه‌های تعرفه زمانی که با عنوان قیمت محور[1] نیز شناخته می‌شوند [۵] مصرف‌کنندگان با قیمت‌های متغیر با زمان که بر اساس هزینه انرژی الکتریکی در دوره‌های مختلف زمانی تعیین می‌شود، با خرده‌فروشان توافق می‌کنند. برنامه‌های تعرفه زمانی شامل برنامه قیمت‌گذاری زمان استفاده[2]، قیمت‌گذاری زمان حقیقی[3] و برنامه قیمت‌گذاری پیک بحرانی[4] می‌شود [۳]. این برنامه‌ها با پیشنهاد بالا در ساعت‌های پیک بار و قیمت پایین در ساعت‌های غیر پیک بار به‌دنبال هموار کردن منحنی بار و قیمت بازار می‌باشند [۶].

در برنامه‌های تشویق محور به منظور تشویق مصرف‌کنندگان به کاهش مصرف هنگام اعلام شرکت برق، به مصرف‌کنندگان پرداخت‌های ثابت و یا متغیر با زمان پیشنهاد می‌شود. مشارکت و پاسخ مشترکین در این برنامه‌ها داوطلبانه می‌باشد، اگرچه در برخی از این برنامه‌ها مشترکین در صورت فراخوانده شدن و عدم پاسخ، جریمه می‌شوند [۷]. برنامه‌های پاسخگویی بار تشویقی به دو بخش کلاسیک[5] و بازارگرا[6] تقسیم می‌شوند. این برنامه‌ها شامل برنامه‌های کنترل مستقیم بار[7]، قطع/کاهش بار[8]، فروش تقاضا/بازخرید[9]، پاسخگویی بار اضطراری[10]، بازار ظرفیت[11] و

[1] Price-Based Programs
[2] Time of Use Pricing (TOU)
[3] Real Time Pricing (RTP)
[4] Critical Peak Pricing (CPP)
[5] Classical
[6] Market Based
[7] Direct Load Control (DLC)
[8] Interruptible/Curtailable Service (I/C)
[9] Demand Side Bidding/Buyback (DB)
[10] Emergency Demand Response Program (EDRP)
[11] Capacity Market Program (CAP)

برنامه پاسخگویی بار خدمات جانبی[1] می‌باشد. مشترکین شرکت‌کننده در برنامه‌های تشویق محور کلاسیک معمولاً مبلغ تشویقی را به صورت کاهش در قبض و یا تعرفه‌های تشویقی دریافت می‌کنند. این برنامه‌ها معمولاً در ارتباط با پیک بحرانی هستند که این پیک بحرانی توسط شاخص‌های قابلیت اطمینان و یا بالا بودن قیمت بازار مشخص می‌شود [۶]. تأمین‌کننده انرژی نیز برای تعیین قیمت انرژی برای بازه زمانی پیش‌رو بر اساس پیشامدهای اتفاقی، توان مصرفی کل، پاسخ‌مصرف‌کنندگان نسبت به قیمت‌ها و بازار عمده‌فروش تصمیم‌گیری می‌کند [۸].

در این پایان‌نامه برنامه پاسخگویی بار شامل برنامه‌های پاسخگویی بار قیمت‌گذاری زمان حقیقی، پاسخگویی بار زمان اضطراری و کنترل مستقیم بار می‌باشد. قیمت‌گذاری زمان حقیقی برق، مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مناسب برای استفاده از وسایل برقی خود، هزینه‌های خود را کاهش دهند. یک سیستم مدیریت انرژی[2] می‌تواند به طور خودکار برنامه‌های پاسخگویی بار را براساس تنظیمات از پیش تعیین شده توسط مصرف‌کنندگان، اجرا نماید. سیستم مدیریت انرژی جریان پیوسته داده‌ها را پشتیبانی کرده و میزان مصرف مشترکین را کنترل می‌کنند. تصمیم‌گیری‌های هوشمند مصرف‌کنندگان برای اصلاح مصرف انرژی، بیشترین کاهش در مصرف انرژی با توجه به اولویت‌ها و سلایق مشترکین را تضمین می‌کند. بنابراین با به کار گیری فناوری‌های جدید درشبکه هوشمند، مشترکین بدون از دست دادن رفاه خود قادر به تغییر در شیوه مصرف می‌باشند. موفقیت در به کارگیری این برنامه به قابلیت ارتباط دو طرفه شبکه هوشمند به‌همراه کنترل‌کننده مدیریت انرژی نصب شده در سمت مشترکین بستگی دارد [۹].

در برنامه پاسخگویی بار اضطراری مشترکین بابت کاهش بار خود، در شروع حوادث اضطراری مبلغی به‌عنوان تشویقی دریافت می‌کنند. کاهش بار اختیاری بوده و اگر مشترکی انجام ندهد، جریمه نمی‌شود. میزان تشویقی می‌تواند بر حسب نوع حادثه و نوع مشترک متفاوت باشد [۳]. کنترل مستقیم بار امکان کنترل از راه دور تجهیزات الکتریکی مصرف‌کنندگان را جهت خاموش کردن و یا تعویق در زمان مصرف آن، فراهم می‌کند [۱۰]. این بارها معمولاً وسایل تهویه مطبوع و آبگرمکن‌ها می‌باشند. کنترل بار توسط کلید نصب شده در سمت مصرف‌کننده که با شرکت برق در ارتباط است، تحقق می‌یابد. در برخی موارد نیز شرکت برق برای انجام کنترل بار می‌تواند یک سیگنال کنترلی برای مشترک ارسال کند. برنامه‌های کنترل مستقیم بار بیشتر به مشترکین خانگی و تجاری کوچک توصیه می‌شود که معمولاً در یک زمان کوتاه قبل از قطع بار به مشترکین اطلاع داده خواهد شد [۱۱]. از طرفی باتوجه به خصوصیات بارهای صنعتی معمولاً این‌گونه بارها از هرگونه تعدیل باری اجتناب می‌کنند و برنامه کنترل مستقیم بار به ندرت برای بارهای صنعتی مناسب می‌باشد [۱۲].

---

[1] Ancillary Service Market Program (A/S)
[2] Energy Management System (EMS)

۱-۲ پیشینه پژوهش

در مرجع [۱۳] روشی برای اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است. در این مرجع، اولویت‌بندی برنامه‌ها از دید قانونگذار با در نظر گرفتن اهداف بهره‌بردار مستقل سیستم، شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان به عنوان بازیگران اصلی برنامه‌های پاسخگویی صورت می‌گیرد. در مرجع [۱۴] مدل جامعی برای تعیین میزان بهینه مصرف مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است. بر همین اساس، تعامل خرده‌فروش با مشترکین با استفاده از یکی از روش‌های یادگیری تقویتی (Q-Learning) مدلسازی شده است. در این مرجع، تنها برنامه پاسخگویی بار زمان حقیقی به‌صورت قیمت زمان حقیقی روز پیش‌رو[1] (DARTP)، در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۱۵] روش پاسخگویی بار زمان حقیقی ارائه شده است که AEP[2] به صورت یک بازار خرده‌فروشی بر روی هر فیدر شبکه توزیع اجرا کرده است. در مرجع [۱۶] نیز به چشم انداز صنعتی برای سیستم توزیع هوشمند و فناوری‌هایی که برای تحقیقات سیستم توزیع هوشمند می‌توان به‌کاربرد پرداخته است. مرجع [۱۷] نیز به بررسی زوایای مختلف پاسخگویی بار در یک شبکه هوشمند پرداخته است.

مرجع [۱۸] یک مدل بهینه‌سازی برای تطبیق مصرف ساعتی مشترکین بر قیمت‌های ساعتی با هدف بیشینه‌سازی مطلوبیت در شبکه هوشمند ارائه کرده است. در این مرجع با مدل مقاوم[3]، عدم قطعیت قیمت زمان حقیقی نیز مدل شده است. مرجع [۱۹] یک مدل پراکنده[4] برای پاسخگویی بار زمان حقیقی در شبکه هوشمند و به کارگیری آن در برنامه‌ریزی نرخ شارژ خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در این مرجع متغیر تمایل مصرف‌کنندگان به پرداخت هزینه برای مدلسازی سلیقه و اولویت مصرف‌کننده بکار گرفته شده است. در مرجع [۱۱] با معرفی تابع رفاه، تمایل مشترکین برای مصرف انرژی مدلسازی شده است. سپس مدل قیمت‌گذاری زمان حقیقی، با بکارگیری ارتباط بین تأمین‌کننده انرژی و اندازه‌گیر هوشمند مشترکین، برای تعیین میزان سطح بار بهینه مصرف‌کنندگان با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی ارائه شده است. در مرجع [۲۰] دو مدل پاسخگویی بار به‌منظور شکل‌دهی منحنی بار و برقراری تعادل انرژی تأمین شده و مصرف بررسی شده است. سپس مدلی برای تعیین قیمت تعادلی زمان حقیقی در یک بازار رقابتی در بستر یک شبکه هوشمند ارائه شده است. مرجع [۲۱] برای رفع تراکم شبکه هوشمند توزیع شامل خودروهای الکتریکی[5]، مدل قیمت‌گذاری قیمت نهایی محلی با قید پخش توان DC را معرفی کرده است. در مدل ارائه شده شرکت برق با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی به بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی کل سیستم قدرت پرداخته و قیمت نهایی محلی را تعیین می‌کند.

---

[1] Day-Ahead Real-Time Price (DARTP)
[2] American Electric Power (AEP)
[3] Robust
[4] Distribured
[5] Electrical Vehicle (EV)

۱-۳ اهداف و نوآوری پژوهش

در تحقیقات گذشته در زمینه قیمت‌گذاری زمان حقیقی در سطح خرده‌فروشی، جز موارد اندکی مانند مرجع [۲۱] که از پخش توان DC بهره گرفته است، اثر شبکه و متغیرهای بهره‌برداری شبکه از جمله تلفات شبکه در قیمت‌گذاری لحاظ نشده است و شرکت برق تمایزی برای مشترکین قائل نیست. در صورتی که مشترکین هر شین با توجه به میزان مصرف توان اکتیو و راکتیو و موقعیت مکانی خود در شبکه، سهم متفاوتی در تلفات شبکه، تضعیف پروفیل ولتاژ و هزینه شرکت برق دارند.

همچنین مدل‌های پاسخگویی بار قیمت زمان حقیقی مانند مراجع [۱۹] و [۱۱]، اصلاح الگوی مصرف برای ساعت فعلی و تنها با توجه به قیمت اعلام شده برای آن ساعت صورت می‌گیرد. در مدل‌هایی نیز که برای بازه زمانی ۲۴ ساعته بهینه‌سازی مصرف صورت می‌گیرد، مانند مرجع [۱۴]، قیمت زمان حقیقی به‌صورت قیمت زمان حقیقی روز پیش‌رو در نظر گرفته شده است. در صورتی که DARTP تنها روند تغییرات قیمت در آینده را بازگو می‌کند تا پیش‌بینی دقیق قیمت پیک بار و کم‌باری. از طرفی با افزایش منابع انرژی تجدید پذیر، خصوصاً توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی، عدم قطعیت قیمت‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین در مدل‌های ارائه شده مانند مراجع [۱۳] و [۱۴] که برای برنامه‌های تعرفه زمانی و تشویق محور در نظر گرفته شده است، مقیاس زمانی برنامه‌های پاسخگویی بار رعایت نشده است. در مدل پیشنهادی ترتیبی اتخاذ شده است تا مقیاس زمانی اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار رعایت شود.

میزان تأثیر کاهش بار مشترکین هر شین نیز بر متغیرهای شبکه متفاوت خواهد بود و از طرفی هر مصرف‌کننده‌ای با مصرف انرژی مطلوبیت متفاوتی کسب خواهد کرد. این بدین معنی است که مشترکین به ازای دریافت مبالغ تشویقی متفاوتی به کاهش بار خود ترغیب می‌شوند و با پیشنهاد یک قیمت برای مشترکین این امکان وجود دارد که مشترکی به صورت مؤثر به این قیمت پاسخ ندهد و یا این قیمت پیشنهاد شده به مشترک بیش از قیمت پیشنهادی خود مشترک برای کاهش بار باشد. همچنین با پیشنهاد تشویقی به مشترکین، شرکت برق باید منتظر واکنش مشترکین به این پیشنهاد و نتیجه آن باشد و با عدم قطعیت پاسخگویی بار و میزان آن مواجه خواهد شد. از این‌رو با توسعه شبکه هوشمند و تعامل میان مصرف‌کنندگان و تأمین‌کنندگان انرژی، طراحی مدل‌های تصمیم‌گیری جدید به‌منظور بهینه‌سازی این تعاملات و اجرای بهینه برنامه‌های پاسخگویی بار حائز اهمیت می‌باشد. اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در این پایان‌نامه در پاسخ به تغییرات قیمت گره‌ای زمان حقیقی[1] با هدف بیشینه‌سازی مطلوبیت مشترکین و نیاز به کاهش بار به‌منظور برقراری قیود بهره‌برداری همچون پروفیل ولتاژ شبکه و بارگذاری بیش از حد خطوط شبکه توزیع با هدف کمینه‌سازی هزینه تشویقی می‌باشد.

[1] Nodal Real Time Price

مدل پیشنهادی برای پاسخگویی بار قیمت زمان حقیقی، شامل دو بخش قیمت‌گذاری زمان حقیقی و پاسخگویی بار به قیمت زمان حقیقی می‌باشد که این دو بخش با یکدیگر در تعامل می‌باشند. در یک طرف شرکت برق با توجه به میزان تقاضای مشرکین، قیمت گره‌ای ساعت پیش‌رو را برای هر شین تعیین می‌کند. در روش قیمت‌گذاری پیشنهادی، ضرایب حساسیت نسبی تلفات کل شبکه، انحراف پروفیل ولتاژ شبکه و شاخص میزان فشار مصرف‌کنندگان هر شین بر شبکه معرفی می‌شود. منظور از فشار هر شین بر شبکه، میزان سهم مشترکین هر شین از تلفات شبکه و انحراف پروفیل ولتاژ شبکه از مقدار نامی می‌باشد. با تعریف شاخص میزان فشار هر شین بر شبکه، قیمت‌های گره‌ای برای مشترکین هر شین تعیین می‌شود. در دسترس بودن بارهای ساعتی برای شرکت برق و قیمت‌های ساعتی برای مشترکین به صورت زمان حقیقی، با وجود شبکه هوشمند امکان‌پذیر می‌باشد. در طرف دیگر، مشترکین هر شین نیز به قیمت اعلامی از سوی شرکت برق واکنش نشان داده و با اصلاح میزان بار ساعتی خود، مطلوبیت خود را، که برابر با اختلاف درآمد ناشی از مصرف انرژی و هزینه آن می‌باشد، بیشینه می‌کنند. به منظور اصلاح میزان بار مصرف‌کنندگان در پاسخ به تغییرات قیمت‌ها، از مفهوم کشش قیمتی تقاضا[1] استفاده شده است. خصوصیت مدل پاسخگویی بار پیشنهادی، بهینه‌سازی الگوی مصرف ساعت پیش‌رو با توجه به قیمت انرژی برای ساعت پیش‌رو و قیمت مورد انتظار برای ۲۳ ساعت آینده آن می‌باشد، به‌گونه‌ای که یک افق زمانی ۲۴ ساعته پیش‌رونده برای پاسخگویی بار زمان حقیقی در نظر گرفته می‌شود. در مدل پیشنهادی، بارهای مصرف‌کننده به دو دسته کشسان و غیر کشسان تقسیم شده‌اند. بارهای کشسان بارهای پاسخگویی هستند که با کاهش و جابجایی مصرف خود توانایی شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار را دارند و بارهای غیر کشسان بارهای ثابت مصرف‌کننده بوده و توانایی شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار را ندارند. سیستم‌های مدیریت انرژی، بر اساس تنظیمات مصرف‌کنندگان، به صورت خودکار قادر به اصلاح مصرف بر اساس قیمت دریافتی از سوی شرکت برق می‌باشد.

در صورت عدم برقراری قیود بهره‌برداری پس از اجرای برنامه پاسخگویی بار قیمت زمان حقیقی، مصرف‌کنندگان از سوی شرکت برق برای شرکت در برنامه پاسخگویی بار زمان اضطراری به منظور برقراری قیود فراخوانده می‌شوند. در این صورت برای اجرای بهینه برنامه پاسخگویی بار اضطراری، شرکت برق میزان بار قابل کاهش و میزان تشویقی به‌ازای این میزان کاهش بار را به کمک سیستم مخابراتی از مشترکین درخواست می‌کند. با دریافت این اطلاعات از مصرف‌کنندگان و با درنظر گرفتن قراردادهای برنامه پاسخگویی بار تشویقی دیگر، شرکت برق بهترین ترکیب از این پیشنهادات و قراردادها را برای برقراری قیود بهره‌برداری با حداقل هزینه تشویقی انتخاب می‌کند. همچنین شرکت برق در هنگام فراخوانی برای شرکت در برنامه کنترل مستقیم بار، قیود حداکثر ساعت قطع بار و حداقل ساعت عدم شرکت در برنامه کنترل مستقیم بار برای مشترکین دارای قرداد بررسی می‌کنند.

[1] Demand Price Elasticity

در نهایت با تعامل بین مشترکین و خرده‌فروش قیمت و میزان مصرف بهینه تعیین می‌شود. تحت این شرایط خرده‌فروش می‌تواند بر عدم قطعیت پاسخ مصرف‌کنندگان غلبه کرده و مصرف‌کنندگان نیز می‌توانند میزان مصرف خود را بر اساس قیمت‌های واقعی و تشویقی درخواستی تعیین کنند.

۱-۴ ساختار کلی پایان‌نامه

ساختار کلی پایان نامه به شرح ذیل می‌باشد:

در فصل دوم انواع مختلف برنامه‌های پاسخگویی بار و مزایای حاصل از اجرای آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌است. فصل سوم به مبحث شبکه هوشمند و پاسخگویی بار در شبکه هوشمند می‌پردازد. فصل چهارم به بیان الگوریتم پیشنهاد شده در این پژوهش اختصاص داده شده است و در فصل پنجم نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی بیان می‌شود. سرانجام نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادات در فصل ششم پایان‌نامه ارائه شده است.