

مدیریت بهینه سمت مصرف در بارهای خانگی با در نظر گرفتن درجه حساسیت مصرف در حضور سیستم‌های فتوولتایک کوچک

محمود زاده باقری

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج (نویسنده مسئول)

Ma.zadehbagheri@iaau.ac.ir

رحیم ایلدارآبادی

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

r.ildar@hsu.ac.ir

چکیده

طرح‌های مدیریت انرژی خانگی^۱ (HEM) مشتریان مسکونی را متقاعد می‌سازند که در برنامه‌های پاسخ به تقاضا براساس قیمت^۲ (DR) مشارکت فعال داشته باشند. در این روش‌های HEM قیمت محور، زمان‌بندی کنترل-کننده برای مصرف انرژی دستگاه‌های خانگی در واکنش به سیگنال قیمت برق، اولویت‌های متعددی را در میان مشتریان به دنبال دارد. باوجوداینکه روش‌های مختلفی اخیراً برای استفاده از HEM پیشنهادشده، اولویت‌گذاری عملکرد دستگاه‌های قابل کنترل از منظر مشتری در HEM قیمت محور مشخص نشده است، و این موضوع نقطه‌ی تمرکز مقاله حاضر است. در این مقاله، بدین منظور ارزش کاهش بار^۳ (VOLL) هر دستگاه به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که اولویت اجرایی آن دستگاه را از منظر مشتری مطرح کند. با در نظر گرفتن VOLL دستگاه‌ها، تعرفه‌های برق و محدودیت‌های اجرایی وسایل، مسئله‌ی بهینه‌سازی برای کاهش انرژی مصرفی و قیمت‌های قابلیت اطمینان پیشنهادشده است. نتیجه‌ی HEM پیشنهادی زمان‌بندی بهینه‌ی تقاضا برای برق خانگی است. مطالعات عددی نشانگر کارایی روش HEM پیشنهادی در یک‌خانه‌ی هوشمند با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری‌های متفاوت براساس زمان متغیر است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۷/۱۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱/۲۲

کلمات کلیدی:

مدیریت بهینه،
حساسیت مصرف،
سیستم‌های فتوولتایک،
روش HEM

^۱. Home Energy Management

^۲. Demand Response

^۳. Value of Lost Load

10. Alayi

کنترل‌کننده‌ای را پیشنهاد می‌دهد که اوج مصرف را کاهش می‌دهد و هزینه‌ی برق را در حین حفظ حرارت مناسب سیستم‌های تهویه‌ی خانگی (HVAC) کم می‌کند. در (کون یوان^{۱۶} و دیگران، ۲۰۰۴) نوعی زمان‌بندی هوشمندانه بنا بر قیمت دریافتی انجام شده است. برنامه‌ریزی بهینه بنا بر روابط میان کاربران / مشتریان و شرکت در برنامه‌ی مصرف انرژی حاصل می‌گردد. در (کارلو آلوارز^{۱۷} و دیگران، ۲۰۰۴) مدل‌های محاسباتی ایجاد شده تا دستگاه‌های خانگی و مصرف آن‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی، قیمت کلی گاز و برق، تشعشعات، اوج مصرف و یا ترکیبی از این عوامل بررسی گردد. به علاوه مرجع (تندمانس^{۱۸} و دیگران، ۲۰۱۹) یک HEM بهینه‌ساز را به صورت محاسباتی متشکل از مجموعه‌ای از پیمان‌های فوتوولتائیک خورشیدی، یک توربین کوچک بادی، سیستم ذخیره‌ی انرژی، چرخ الکتریکی و مجموعه‌ای از دستگاه‌های قابل کنترل ایجاد نموده است. هدف کاهش هزینه‌های انرژی در قالب برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - انتگرال از دیدگاه مشتری است. در مجموع تحقیقاتی که در بالا عنوان شد از ایده‌ی داشتن HEM بهینه برای تسهیل اجرای برنامه‌های DR قیمت محور حمایت می‌کند. نه این تحقیقات و نه سایر تحقیقات مرتبط در زمینه‌ی برنامه‌های DR قیمت محور، مدلی را که در آن اولویت دستگاه‌های خانگی در روندهای بهینه‌سازی مطرح باشد ارائه نمی‌دهند. در این تحقیقات اهمیت تمامی دستگاه از منظر مشتریان یکسان بوده است، چیزی که همیشه نمی‌تواند واقعیت داشته باشد. در این مورد یک مدل HEM متشکل از اولویت دستگاه‌ها از منظر مشتری پیشنهاد شده تا اجرای برنامه‌های DR قیمت محور را تسهیل نماید. ابتدا دسته‌بندی‌های مختلفی از دستگاه‌های قابل کنترل مطرح شد. سپس تعرفه‌های TOU و IBR به عنوان محبوب‌ترین برنامه‌های مسکونی DR به صورت محاسباتی عرضه شد. از آنجایی که ارزش VOLL دستگاه‌های قابل کنترل نقش مهمی در روش پیشنهادی دارد، نحوه‌ی برآورد این ارزش‌ها با استفاده از کنترل‌کننده بنا بر اولویت‌های مشتری در این قسمت توضیح داده شدند. در نهایت مسئله‌ی بهینه‌سازی یعنی تابع هدف و محدودیت‌ها در فرمت MILP شرح می‌گردد.

۲- بیان مسئله

طرح‌های مدیریت انرژی خانگی (HEM)، مشترکین خانگی را به مشارکت فعال در برنامه‌های پاسخ به تقاضای (DR) مبتنی بر قیمت ترغیب می‌کند. در این روش‌های HEM مبتنی بر قیمت، یک کنترل‌کننده، مصرف انرژی لوازم خانگی قابل کنترل را در پاسخ به سیگنال قیمت انرژی الکتریکی، با توجه به تمایلات مختلف مشتری، برنامه‌ریزی می‌کند. در این مقاله استفاده از لوازم قابل کنترل را از دید مشتری اولویت‌بندی کرده و در HEM های مبتنی بر قیمت به کار خواهیم گرفت. برای این منظور ارزش بار ازدست‌رفته‌ی (VOLL) هر دستگاه را با توجه به دیدگاه مشتری و به منظور اولویت‌بندی آن‌ها تعیین می‌کنیم. با در نظر گرفتن VOLL لوازم خانگی، تعرفه‌های انرژی و محدودیت‌های عملیاتی هر دستگاه از مجموعه‌ی لوازم خانگی مشتری، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی جهت کمینه نمودن هزینه‌های انرژی و هزینه‌های قابلیت اطمینان مشتری تعریف خواهد شد. خروجی این HEM پیشنهادی برنامه‌ی زمان‌بندی بهینه‌ی کارکرد لوازم خانگی الکتریکی خواهد بود. در این راستا با استفاده از انواع قیمت‌گذاری‌های متغیر بازمان در مسئله، اثربخشی روش HEM پیشنهادی سنجیده خواهد شد. همچنین در این مطالعه تأثیر حضور خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدید پذیر را در برنامه مدیریت مصرف انرژی خانگی لحاظ خواهیم کرد.

۲-۱- اهداف تحقیق

۲-۱-۱- اهداف علمی

- تعیین تأثیر در نظر گرفتن اولویت‌های مشتری در برنامه‌های مدیریت انرژی خانگی.
- تعیین تأثیر در نظر گرفتن تعرفه‌های انرژی در برنامه‌های مدیریت انرژی خانگی.

۲-۱-۲- کاربردی

- کاهش هزینه‌های انرژی مشتری.
- کاهش تلفات انرژی در شبکه.
- هموارسازی منحنی بار مشتری و شبکه.
- کاهش پیک بار مشتری و شبکه.

۲-۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

^{۱۶}. Kun-Yuan

^{۱۷}. Carlo Alvarez

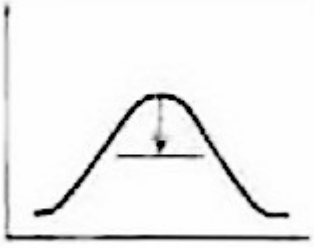
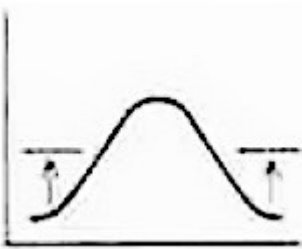
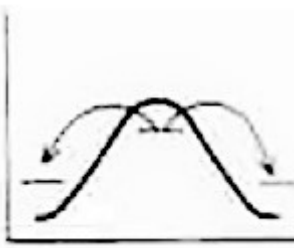
^{۱۸}. Tindemans

با رشد هر چه بیشتر مصرف انرژی الکتریکی، مسئله‌ی هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، هزینه‌های جاری جهت تأمین سوخت واحدهای تولیدی و هزینه‌های حملی جاری ناشی از تلفات انتقال و توزیع انرژی هرروز حادث می‌گردد. در این راستا برنامه‌های مدیریت مصرف انرژی خانگی و برنامه‌های پاسخ در سمت تقاضا می‌توانند تأثیر زیادی در تغییر رفتار مشتریان در جهت کاهش مصرف انرژی و مدیریت بهینه‌ی آن داشته باشند. این برنامه‌ها که در تحقیق حاضر به آن پرداخته می‌شود موجب کاهش پیک منحنی بار شبکه و در نتیجه عدم نیاز به توسعه‌ی سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی و نیز کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی الکتریکی گردد. بر این اساس تحقیق حاضر از ضرورت تحقیقاتی برخوردار است.

۳- مدیریت بار

فعالیت‌های مدیریت بار که منجر به کنترل رشد بار و تغییر شکل مناسب منحنی بار می‌شود. اهداف گوناگونی را دنبال می‌کند این فعالیت ممکن است به منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برطرف کردن محدودیت‌ها در ظرفیت تأمین انرژی الکتریکی ایجاد زمینه عرضه انرژی به صورت بهینه و اقتصادی، کاهش هزینه خدمات رسانی، بهبود ضریب بار، بهبود بازدهی و کارآیی سیستم و بهبود ضریب اطمینان سیستم پایه‌ریزی شده و اجرا گردیده است (رستگار^{۱۹} و دیگران، ۲۰۱۵). مدیریت بار به عنوان زیرمجموعه‌ای از مدیریت مصرف محسوب شده و صرفاً دربرگیرنده اعمالی است که توسط شرکت برق و یا توسط مشتریان در پاسخ به انگیزه‌های ایجاد شده به منظور برش پیک بار، پر کردن دره منحنی بار و یا جابجایی زمانی بار اجرا می‌شود. به طور کلی راهکارهای اجرایی برای حصول اهداف منحنی‌های بار در جدول (۱) آورده شده است (فرناندسا^{۲۰} و دیگران، ۲۰۱۴).

جدول ۱. راهکارهای اجرایی برای حصول اهداف منحنی‌های بار

ردیف	پیک سایی	نمونه منحنی بار	مثال اجرایی از راهکارهای سمت مصرف
۱	پیک سایی		• قطع بار (اعمال خاموشی) • کنترل مستقیم بار • تعرفه‌های زمانی
۲	دره زدایی		• ذخیره انرژی گرمایی • ذخیره سرما • تعرفه‌های فصلی • تعرفه‌های غیر پیک • تعرفه‌های زمانی
۳	جابجایی بار		• ذخیره انرژی گرمایی • ذخیره سرما • تعرفه‌های زمان • کنترل وسایل مصرف کننده (چرخش زمانی)

^{۱۹} Rastegar

^{۲۰} Fernandes

• سرویس اشتراک دیماند • قیمت‌گذاری برای قابلیت اعتماد متغیر • تعرفه‌های قطع بار		۴ انعطاف‌پذیر کردن منحنی بار
• ممیزی • وام کم‌بهره • سیستم‌های خورشیدی • مصرف انرژی کارا (بارانداز خوب) • تعرفه‌های صرفه‌جویی • تولید مشترک برق و گرما		۵ صرفه‌جویی راهبردی
• پمپ گرمایی • سیستم‌های دو سوخته • تعرفه‌های تشویقی • بارهای صنعتی الکتریکی • افزایش سهم بازار		۶ رشد بار راهبردی

۴- حضور سیستم‌های فتوولتاییک کوچک

طراحی سیستم‌های فتوولتاییک مستقل از شبکه به گونه‌ای است که باید مستقل از شبکه برق سراسری عمل نموده و قابلیت تغذیه بارهای مستقیم^{۲۱} (DC) و متناوب را دارا باشد (شفیعی^{۲۲} و دیگران، ۲۰۱۳). این واحدها مستقیماً به بار متصل می‌شوند و تمام بار را برخلاف سیستم‌های متصل به شبکه تأمین می‌نمایند. بنابراین برای طراحی این گونه واحدها، بایستی مدل بار و کل توان مورد نیاز بار در یک دوره شبانه‌روزی محاسبه شود و ظرفیت واحد و تعداد آرایه‌های فتوولتاییک بر این اساس محاسبه گردد. همچنین به دلیل عدم وجود شبکه برق سراسری، تمامی توان می‌بایستی از طریق سیستم فتوولتاییک تأمین شود. از آنجایی که سیستم فتوولتاییک قابلیت تولید پیوسته توان را ندارد (شب‌هنگام) و میزان تولید توان آن کاملاً به شرایط جوی وابسته هست (کاهش تولید در روزهای ابری و بارانی)، برای تغذیه مناسب و مطمئن بار باید واحد فتوولتاییک به سیستم ذخیره‌ساز انرژی مجهز شود. ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی به میزان مصرف بار در ساعت‌هایی که تولید وجود ندارد، بستگی دارد. زمانی که نور خورشید به سلول‌های پنل برخورد می‌کند، با یک سری فعال‌انفعالات شیمیایی انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود (شکل ۱). ولتاژ DC تولید شده توسط پنل به یک کنترل‌کننده وارد می‌شود که وظیفه این کنترلر این است که ولتاژ باتری‌ها را کنترل کند و نگهدار باتری‌ها از یک ولتاژ خاص کم یا زیاده‌تر شوند. همچنین این کنترلر وظیفه دارد که در زمان شب که پنل‌ها انرژی تولید نمی‌کنند اجازه دهد تا بار از باتری‌ها تغذیه کند. بعد از این که ولتاژ به باتری‌ها منتقل شد، برای اینکه بار یک واحد مسکونی از نوع مصرف AC است، یک اینورتر سر راه آن قرار می‌دهند تا ولتاژ DC تولید شده را به AC تبدیل کند (کون یوان^{۲۳} و دیگران، ۲۰۰۴) و در آخر هم از یک بریکر برای حفاظت بیشتر قرار می‌دهند تا در مواقع اتفاق یک حادثه مدار مجموعه را به حالت جزیره دریاورد.

^{۲۱}. Direct Current

^{۲۲}. Shafiee

^{۲۳}. Kun-Yuan



شکل ۱. مراحل نمایش داده شده تبدیل انرژی یک سیستم فتوولتایک خانگی

۵- روش تحقیق

۵-۱- برنامه‌های عرضه - تقاضا در شبکه‌ها هوشمند

در شبکه‌ها هوشمند، برنامه‌های عرضه - تقاضا (DR) نقش مهمی در فعال کردن کاربران نهایی برای توزیع عملکرد سیستم دارند. در این برنامه‌ها، طرح‌های سیستم توزیع عملیاتی به گونه‌ای است که تعرفه‌ی برق یا شاخصی از مصرف‌کنندگان نسبت به تغییر داوطلبانه در الگوی مصرف ایجاد می‌شود. از آنجایی که تقاضای مسکونی بخش مهمی از کل بار سیستم است، برنامه‌های مسکونی DR از منظر فعال سیستم مهم هستند. یکی از موانع در استفاده از برنامه‌های DR مسکونی نبودن اطلاع کافی مشتریان برای پاسخ به سیگنال‌های قیمت‌گذاری و محرک است. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی سیستم کنترلی است که به صورت خودکار به سیگنال‌های دریافتی با حل مسئله‌ی بهینه پاسخ می‌دهد و در کل به آن سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی (HEM) می‌گویند. برنامه‌ی HEM هزینه‌های مشتریان را کاهش می‌دهد و عاملی برای ترغیب آن‌ها در راستای مشارکت در برنامه‌های DR است. برونداد حل مسئله‌ی بهینه‌سازی HEM زمان‌بندی مصرف انرژی دستگاه‌های قابل کنترل است. علاوه بر دستگاه‌های قابل کنترل، فناوری‌های خودروهای الکتریکی ترکیبی (PHEV) در خانه‌های هوشمند به دلیل مزایای محیطی‌شان نفوذ خواهند یافت. از آنجاکه این خودروهای الکتریکی دارای باتری هستند که می‌تواند در سطوح مختلف توسط شبکه شارژ شود و برای بازگشت انرژی به شبکه تخلیه شود (وسیله‌ای برای انتقال به ظرفیت شبکه)، لازم است که PHEV را در روند مدیریت بار ترکیب نمود. از این‌رو حل مسئله‌ی HEM به برنامه‌های زمانی مصرف انرژی و زمان‌بندی شارژ و تخلیه‌ی PHEV ختم می‌گردد. مقالات متعددی بر روی مدل‌سازی و ساختار HEM متمرکز شدند. روش‌های پیشنهادی در این مقالات قیمت انرژی را برای مشتری در کنار حداکثر بار خانگی کاهش می‌دهد. به علاوه به منظور متقاعد ساختن مشتریان برای شرکت در برنامه‌های DR، راحتی مشتری در این برنامه‌ها مدنظر است. برخی تحقیقات مانند (یونا^{۲۴} و دیگران، ۲۰۱۴) مدل‌سازی ریاضیاتی از عدم رضایت مشتری علاوه بر قیمت انرژی ارائه کرده‌اند. مدل‌های عدم رضایت در این تحقیقات را می‌توان به دودسته تقسیم کرد: عدم رضایت در نتیجه‌ی زمان‌بندی و عدم رضایت در نتیجه‌ی وضعیت نامساعد انرژی. در سطح ابتدایی در صورت ایجاد تأخیر در استفاده از دستگاه‌ها به دلیل تغییر بار متحمل زیان می‌شوند، مانند ماشین لباسشویی و خشک‌کن. در دومین سطح به دلیل انحراف از وضعیت ایده آل انرژی، متحمل زیان می‌شوند مانند دمای خانه. برخی تحقیقات اولویتی را برای دستگاه به مشتری معرفی می‌کنند تا سطح دیگری از رضایت برای اجرای برنامه‌ی DR ایجاد شود. در تحقیقات (محسنیان راد^{۲۵} و دیگران، ۲۰۱۰) طرح DR کنترل مصرف مشتری در یک محدوده‌ی از قبل تعیین شده است. بنابراین اولویت دستگاه‌های قابل کنترل هم‌راستا با محدوده‌های دمایی و اجرایی در (هوبرت^{۲۶} و دیگران، ۲۰۱۲) هماهنگ شده تا مشخص گردد کدام دستگاه‌ها را در صورت استفاده از DR می‌توان خاموش کرد. با وجود اینکه مفهوم اولویت اجرایی هم‌راستا با این تحقیقات است، طرح‌های DR پیشنهادی برنامه‌های DR قیمت محور را در بر نمی‌گیرد. در مجموع می‌توان گفت که با وجود اینکه مفهوم پیشنهاد برنامه‌های بهینه‌سازی برای HEM و همچنین هماهنگی اولویت‌های اجرایی دستگاه‌های خانگی در DR قبلاً عنوان شده، مدل‌سازی اولویت‌های دستگاه‌ها در اجرای HEM براساس برنامه‌های قیمت دار در بررسی‌های پیشین مطرح نشده است. در این مقاله چارچوب قیمتی HEM طراحی شده تا اولویت اجرایی دستگاه‌های مختلف در مدل

^{۲۴}. Yoona

^{۲۵}. Mohsenian-Rad

^{۲۶}. Hubert

بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی باهم هماهنگ شود. به عنوان مثال یک‌خانه ممکن است دو دستگاه قابل کنترل داشته باشد و عملکرد یکی از آن‌ها برای مشتری مهم‌تر از دیگری باشد. مشتری باید میان این دستگاه‌ها در طرح HEM تمایز قائل شود. بدین منظور ارزش بار تأمین نشده^{۲۷} (VOLL) برای هر کدام بررسی می‌شود که بر طبق تعرفه‌های زمانی، زمان استفاده^{۲۸} (TOU) و نرخ بلوک‌های شیب^{۲۹} (IBR) خواهد بود. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن نسبت تعرفه‌های مختلف، مشتری ارزش اجرایی یک دستگاه را برآورد می‌سازد. درواقع ارزش VOLL دستگاه نشانگر اهمیت اجرای آن برای مقایسه در مقایسه با هزینه‌ی برق است. در نتیجه ارزش VOLL برای محاسبه‌ی قیمت قابلیت اطمینان روز بعد بکار می‌رود. بنابراین تابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌ی انرژی و هزینه‌های قابلیت اطمینان روز بعد است. برون‌داد HEM پیشنهادی زمان‌بندی تقاضای روز بعد خواهد بود. بنابراین دستاورد اصلی این تحقیق در نظر گرفتن اولویت اجرایی دستگاه‌ها در مدل HEM است که برای اجرای برنامه‌های DR قیمت محور طراحی شده است. اهمیت روش پیشنهادی افزودن سطح دیگری از رضایت مشتری و انعطاف‌پذیری به مدل‌های HEM قیمت محور خواهد بود.

۲-۵- حضور مصرف‌کنندگان در بازار انرژی

یکی از برجسته‌ترین اهداف تجدید ساختار در سیستم قدرت، تهیه امکان نظارتی جدید برای پخش برق برای به دست آوردن مزایای بلندمدت برای مصرف‌کنندگان بوده است. با این وجود در بسیاری از بازارها مصرف‌کنندگان تأثیر کمی در طراحی بازارهای الکتریسیته داشته و کمیته‌های متشکل از تولیدکنندگان، شرکت‌های انتقال و شرکت‌های توزیع، خرده‌فروش‌ها و رگولاتورها در اتخاذ تصمیمات دخیل هستند. یک دلیل روشن و قابل فهم نیز برای این وضعیت وجود دارد: بسیاری از مصرف‌کنندگان، به جز بعضی مصارف بزرگ، انگیزه اقتصادی برای شرکت فعال در مسائل پیچیده و وقت‌گیر ندارند. بسیاری از بازارهای موجود بازار برق شامل بازار روز پیش و چند بازار کوتاه‌مدت‌تری است که به بازارهای تنظیم یا تعادل مرسوم‌اند. بیشترین انرژی خریدوفروش در بازار مربوط به بازار روز پیش است و تنظیم نهایی مقدار انرژی در بازارهای تنظیم انجام می‌گیرد. در بازار روز پیش تولیدکنندگان انرژی، منحنی فروش انرژی خود را برای ساعت‌های مختلف به بازار پیشنهاد می‌دهند. هم‌زمان، خرده‌فروش‌ها و مصرف‌کنندگان انرژی نیز منحنی خرید خود را به بازار ارسال می‌کنند. همه این منحنی‌ها متشکل از بلوک‌های انرژی و قیمت است. بهره‌بردار بازار، پیشنهادهای خریدوفروش انرژی را از نهادهای مربوطه گرفته و بازار را تسویه می‌کند و قیمت تسویه انرژی برنامه‌ریزی شده خریداران و تولیدکنندگان انرژی اعلام می‌کند. اگر اپراتور سیستم، شبکه انتقال را در نظر نگیرد، قیمت حاصل از تسویه بازار یکسان خواهد بود ولی در صورت در نظر گرفتن شبکه، قیمت انرژی به صورت نقطه‌ای تعیین می‌شود. از ویژگی‌های مهم قیمت انرژی در خیلی از بازارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: متوسط و میانگین متغیر، ویژگی‌های فصلی، اثرپذیر بودن از تقویم روزانه، بی‌ثباتی بالا و ... (وانگ^{۳۰} و دیگران، ۲۰۱۵). با توجه به این ویژگی‌ها، پیش‌بینی دقیق قیمت انرژی سخت است. با این وجود، داشتن اطلاعات مربوط به قیمت انرژی برای همه نهادهای شرکت‌کننده در بازار، تعیین‌کننده است. به این دلیل، پیش‌بینی قیمت به عنوان یکی از موضوعات تحقیقاتی مطرح بوده (آدیکا^{۳۱} و دیگران، ۲۰۱۴) و همچنان مورد توجه است. برای یک بازه میان‌مدت باید مصرف‌کنندگان در مورد حضورشان در بازارهای مختلف و انعقاد قراردادهای دوجانبه برای مقابله با ریسک ناشی از قیمت متغیر بازار، تصمیم‌گیری کنند.

۵-۲-۱- هدف مصرف‌کنندگان از مشارکت در بازار

کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف‌کنندگان برای انرژی الکتریکی مصرفی خود، یکی از دلایل ایجاد بازارهای رقابتی الکتریسیته است. شرکت فعال‌تر طرف مصرف در بازار برق، باعث می‌شود که بازارهای برق، رقابتی‌تر و کارآمدتر شده و همچنین به جایابی بهینه منابع اقتصادی کمک می‌کند. هدف یک مصرف‌کننده از شرکت در بازارهای برق، کمینه کردن کل هزینه خرید انرژی است. موضوع این است که خرید را در بازارهای مختلف چگونه باید انجام داد و یا اینکه چگونه باید در بازارهای مختلف پیشنهاد خرید در عرضه نمود به طوری که با داشتن ریسک کمتر، هزینه کل خرید انرژی کمینه شود. از آنجایی که قیمت انرژی در بازارهای مختلف ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد و همچنین میزان ارائه انرژی از ارائه‌کنندگان خدمات انرژی نامعین است لذا نحوه خرید انرژی یک مسئله بهینه‌سازی با مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌هاست (آگنتیس^{۳۲} و دیگران، ۲۰۱۳). مسئله پیشنهادی از طرف مصرف‌کننده، درواقع یافتن مجموعه‌ای از میزان توان و هزینه

^{۲۷} Value Of Lost Load

^{۲۸} Time Of Use

^{۲۹} Inclining Block Rate

^{۳۰} Wang

^{۳۱} Adika

^{۳۲} Agnetis

آن است به طوری که هزینه خرید آن مصرف کننده، مینیم شود. در مواقعی که اطلاعات مربوط به سایر بازیگران بازار نامعلوم باشد پیچیدگی های اضافی هم در آن وجود خواهد داشت (گیامفی^{۳۳} و دیگران، ۲۰۱۳).

۵-۲-۲- راهبرد تأمین انرژی الکتریکی مصرف کنندگان بزرگ

ایجاد امکان پیشنهاد خرید برای مصرف کننده، یک راه انعطاف پذیر را برای تأمین پیک بار در یک برنامه ریزی تولید فراهم می کند. در یک محیط رقابتی، همان طور که بسیاری از شرکت های تولیدی واحدهای کم هزینه ولی کمی انعطاف پذیر و یا واحدهای گران قیمت ولی انعطاف پذیر را در بازار برق بهره برداری می کنند، مشتریان نیز می توانند از فرصت های موجود برای کاهش میزان انرژی مصرفی خود در ساعت های باقیمت بالا استفاده نمایند (صمدی^{۳۴} و دیگران، ۲۰۱۳). پیشنهاددهی طرف مصرف (DSB^{۳۵}) بیشتر برای مصرف کنندگان صنایع بزرگ که می توانند میزان انرژی مصرفی خود را کاهش یا انتقال دهند به دلیل قیمت پایین تر مفید است. DSB بر روی بازار خدمات جانبی، قراردادهای تغذیه، بازار لحظه ای، قراردادهای دوجانبه، قیود انتقال و توزیع و بازار متعادل کننده تأثیر بسزایی دارد. پیشنهاددهی مصرف کننده در بازار می تواند به دو شکل انجام گیرد، یکی پیشنهاد برای کل تقاضا را در برمی گیرد و دیگری شامل پیشنهاد برای تغییر تقاضای مورد نظر است. هر دو روش مهم است، چراکه فرصت هایی را برای طرف مصرف کننده جهت مدیریت میزان الکتریسیته مصرفی ایجاد می کند که بر روی کل مجموعه تأثیر می گذارد. پیشنهاد برای کل تقاضا به دو صورت می تواند انجام گیرد: اول اینکه مصرف کننده و ژنراتور می توانند برای مقدار مشخص انرژی باقیمت مشخص توافق نمایند که به آن قرارداد دوجانبه گفته می شود و دوم اینکه مصرف کنندگان می توانند مانند ژنراتورها، پیشنهاد خود برای کل تقاضا را در یک بازار یا بورس ارائه کنند. در پیشنهاد برای تغییر در میزان تقاضا، مصرف کننده میزان تغییر در تقاضای الکتریسیته خود را پیشنهاد می دهد. مثلاً می تواند جهت کمک به اپراتور سیستم انتقال در حفظ کیفیت تغذیه، میزان تقاضای خود را کاهش دهد. در حالت کلی تغییر در میزان تقاضا می تواند هم به صورت کاهشی و هم به صورت افزایشی باشد. بلوک تقاضا ممکن است پیشنهاد یک مصرف کننده منفرد مثل مشترک صنعتی یا گروهی از مصرف کنندگان کوچک تر نظیر مشترکین خانگی باشد (محمد^{۳۶} و دیگران، ۲۰۲۱).

۶- تابع هدف مسئله

اولین معیاری که هر مشتری در نظر می گیرد کاهش قیمت انرژی است. قیمت انرژی تابعی از تعرفه ی کاهش یافته ی زمانی و مصرف انرژی برق در هر گام زمانی خواهد بود. تابع هزینه ی زمانی خطی (EC) بنا بر TOU و تعرفه های IBR به ترتیب در معادلات زیر آورده شده است (هارتنر^{۳۷} و دیگران، ۲۰۱۷).

$$EC = \sum_{t \in T} \gamma(t) E(t) \quad (۱)$$

$$EC = \alpha \times El + \beta \times (E - \delta) , \quad E = \sum_{t \in T} E(t) \quad (۲)$$

جایی که t شاخص گام زمانی، T گستره ی زمانی برنامه ریزی است که در این مقاله یک روز در نظر گرفته شده، EC تابع هزینه ی انرژی، $E(t)$ مصرف انرژی برق خانگی در واحد زمانی t ، $\gamma(t)$ تعرفه ی TOU در گام زمانی t به صورتی است که در (۱) تعریف شده، E مصرف کل انرژی برق در یک روز، EI مصرف انرژی برق روزانه ی کمتر از آستانه ی δ و $(E - \delta)$ مصرف برق روزانه ی بیشتر از آستانه خواهد بود. مشخص است که EI باید کمتر یا برابر با آستانه ی δ باشد. قیمت مصرف انرژی کمتر و بیشتر از آستانه ی δ به ترتیب با تعرفه های α و β نشان داده می شود. علاوه بر هزینه ی انرژی، فرض بر این است که VOLL به عنوان شاخص اولویت اجرایی دستگاه های خانگی برای

^{۳۳}. Gyamfi

^{۳۴}. Samadi

^{۳۵} Demand Side Bidding (DSB)

^{۳۶}. Mohammed

^{۳۷}. Hartner

مشتری در روند HEM تصور می‌گردد. کنترل‌کننده باید برنامه‌ریزی عملیاتی دستگاه‌ها را براساس VOLL از قبل تعیین‌شده‌ی دستگاه و تعرفه‌ی برق مشخص کند. از آنجایی که قیمت قابلیت اطمینان (RC) تابعی از VOLL دستگاه‌هاست، این تابع به تابع هدف افزوده می‌گردد تا اولویت دستگاه‌ها در نظر گرفته شود. تابع قیمت قابلیت اطمینان به صورت ریاضیاتی این گونه نشان داده می‌شود:

$$RC = \sum_{a \in A} VOLL_a LE_a \quad (3)$$

جایی که a شاخص دستگاه‌ها و A مجموعه‌ای از دستگاه‌هاست. به علاوه $VOLL_a$ همان VOLL دستگاه a است که توسط مشتری براساس ارزش اجرای دستگاه نشان داده می‌شود LE_a افت انرژی دستگاه a خواهد بود. هر دستگاه قابل کنترل چه خاموش/ روشن چه تنظیم‌گر مصرف انرژی مشخصی در روز دارد. بنابراین اگر مصرف کل انرژی دستگاه a در روز کمتر از مصرف انرژی کل از پیش تعیین‌شده برای آن دستگاه باشد، تمایز میان مصرف انرژی به دست آمده و مصرف انرژی از قبل تعیین‌شده کاهش انرژی دستگاه a یعنی LE_a خواهد بود. بنابراین تابع هدف این گونه است:

$$\min COST = EC + RC \quad (4)$$

جایی که $COST$ هزینه‌ی کل مشتری در یک روز، EC قیمت انرژی مشتری و RC هزینه‌ی قابلیت اطمینان است. این بدان معنی است که نتایج HEM از حد وسط قیمت انرژی و قیمت قابلیت اطمینان مشتری به دست می‌آیند (نیکولتی^{۳۸} و دیگران، ۲۰۲۲).

۶-۱- قیود مسئله

در هر گام زمانی از مطالعات، مصرف انرژی برق خانگی مجموع مصرف دستگاه‌های قابل کنترل و غیرقابل کنترل است، که برابر با رابطه‌ی زیر هست:

$$E(t) = E^c(t) + E^{uc}(t) \quad (5)$$

جایی که $E^c(t)$ و $E^{uc}(t)$ به ترتیب تقاضای خانگی قابل کنترل و غیرقابل کنترل در گام زمانی t هستند. برآورد صحیح $E^{uc}(t)$ معمولاً مشخص فرض می‌شود. همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، در هر خانه دستگاه‌های قابل کنترل مانند ماشین لباسشویی، خشک‌کن لباس و ماشین ظرف‌شویی از نوع خاموش/روشن هستند. میزان مصرف انرژی سایرین همچون سیستم‌های سرمایشی/ گرمایشی و فناوری‌های خودروهای الکتریکی ترکیبی (PHEV^{۳۹}) در هر گام زمانی می‌توانند در نسبت مجاز مصرف انرژی کنترل شوند. با در نظر گرفتن J و k به عنوان مجموعه‌ی دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن و دستگاه‌های تنظیم‌کننده، معادلات به دست آمده محدوده‌های اجرایی دستگاه‌های قابل کنترل خواهند بود و چیزی شبیه به مدل‌های موجود در (کوریل^{۴۰} و دیگران، ۲۰۲۲) ایجاد می‌گردد.

$$\sum_{t \in AI_j} I_j(t) = U_j, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$E_j(t) = E_j I_j(t), \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$E_k^{min}(t) \leq E_k(t) \leq E_k^{max}(t), \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in AI_k \quad (8)$$

^{۳۸}. Nicoletti

^{۳۹} Hybrid Electrical Vehicles

^{۴۰}. Curiel

$$\sum_{t \in AI_j} E_k(t) = E_k, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

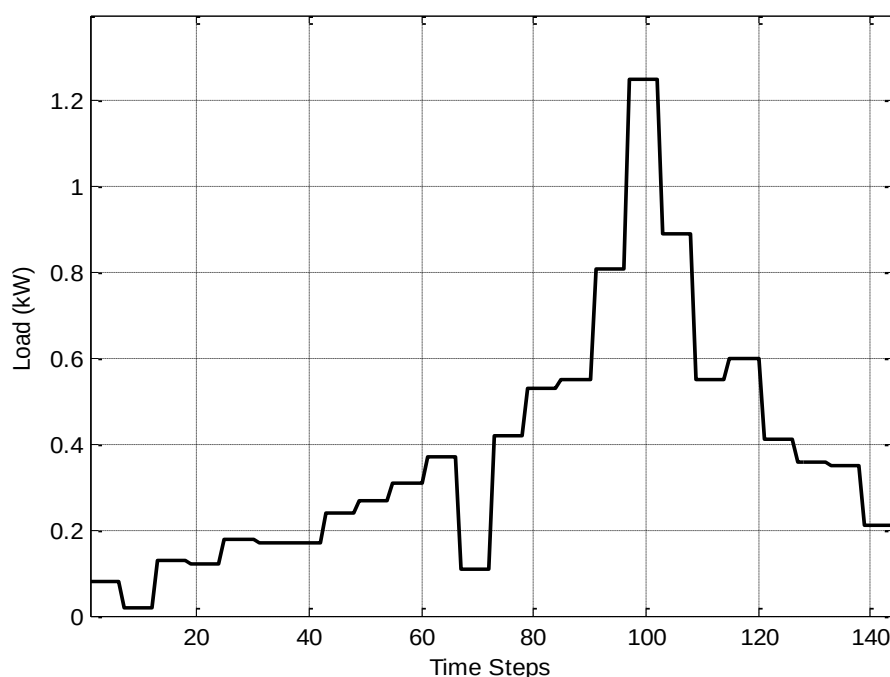
$$\sum_{k \in K} E_k(t) + \sum_{j \in J} E_j(t) = E^C(t), \quad \forall t \quad (10)$$

جایی که j و k شاخص‌های به ترتیب دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش / روشن و تنظیم‌کننده هستند. $I_j(t)$ یک متغیر دوگانه است، ۱ به معنی دستگاه برقی زام است که در زمان t روشن است. U_j زمان موردنیاز دستگاه j برای فعالیت مناسب خواهد بود. مصرف انرژی دستگاه j در ویژگی‌های دستگاه است. AI_k و AI_j به ترتیب فاصله‌ی مجاز برای عملکرد دستگاه‌های j و k می‌باشد، که هرکدام توسط مشتری تعیین می‌گردند. $E_j(t)$ و $E_k(t)$ به ترتیب مصرف انرژی برق دستگاه j و دستگاه k در گام زمانی t هستند. $E_k^{\max}(t)$ و $E_k^{\min}(t)$ به ترتیب حداقل و حداکثر سطح مجاز انرژی مصرفی دستگاه k (حداقل و حداکثر میزان شارژ برای PHEV) در زمان t محسوب می‌شوند. رابطه‌ی (۶) نشان می‌دهد که دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی ON/OFF نیازمند زمان اجرایی مشخص برای تکمیل وظیفه‌ی خود هستند و این زمان اجرا باید در فواصل زمانی مجاز (AI_j) اعمال شود. مصرف انرژی این نوع از دستگاه‌های قابل کنترل در هر گام زمانی در رابطه (۷) نشان داده شدند. مصرف انرژی دستگاه k در هر گام زمانی بیشتر از حداقل است و به مقدار حداکثر بنا بر (۸) نزدیک است. مقدار کلی مصرف انرژی دستگاه k در فاصله‌ی اجرایی مجاز باید مقداری مشخص (E_k) باشد. برای مثال انرژی واردشده به باتری PHEV باید باتری کاملاً شارژ شده را در زمان جدا کردن، ارائه دهد. این محدودیت به صورت ریاضیاتی در (۹) نشان داده شد. همان‌طور که در (۱۰) عنوان شد، مصرف انرژی قابل کنترل خانگی مجموع مصرف انرژی تمامی دستگاه‌های کنترل‌پذیر در مجموعه‌های J و K است. در نتیجه $E_k(t)$ و $E_j(t)$ نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی موجود در (۴) - (۱۰) هستند.

۷- شبیه‌سازی و نتایج

۷-۱- معرفی سیستم آزمون

در این بخش روش پیشنهادی HEM در خانه‌ای هوشمند با دستگاه‌های مختلف قابل کنترل و غیرقابل کنترل و یک PHEV بررسی شده است. در ابتدا، سه سطح از تعرفه‌ی TOU در HEM ترکیب می‌شود. سپس مسئله‌ی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تعرفه‌ی IBR حل شده است. انرژی و قیمت قابلیت اطمینان به عنوان نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی گزارش شده‌اند. همچنین بار خانگی پس از حل مسئله‌ی HEM با دو تعرفه‌ی زمانی ارائه می‌گردد. در این موارد، گام زمان بهینه‌سازی برابر با ۱۰ دقیقه فرض شده است. بنابراین محدوده‌ی زمانی ۱۴۴ گام زمانی خواهد بود. تقاضای خانگی غیرقابل کنترل نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.



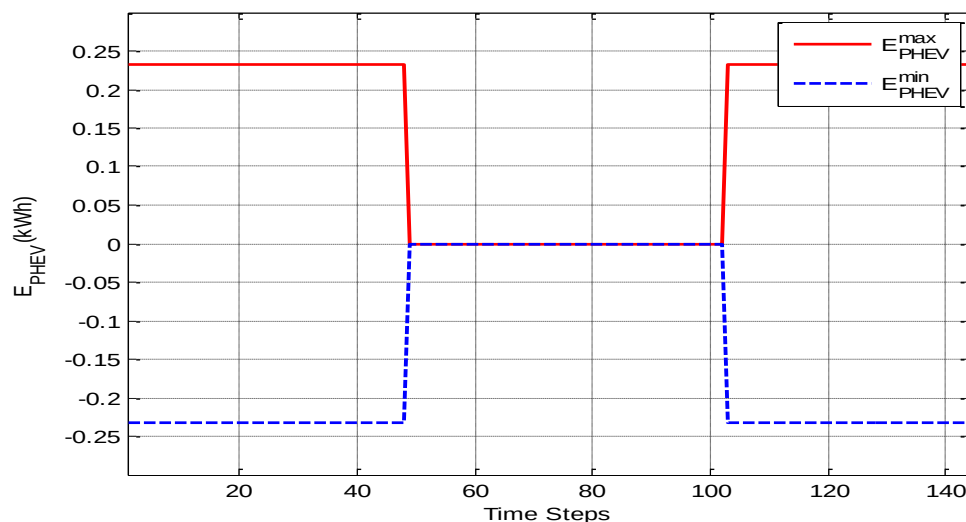
شکل ۲. تقاضای خانگی غیرقابل کنترل

خودرو PHEV به همراه ویژگی‌هایش در جدول ۲ و شکل ۳ توصیف شده است. در این جدول E_{PHEV}^{max} حداکثر نسبت شارژ/ تخلیه‌ی باتری PHEV است. به عبارت دیگر حداکثر مجاز برای شارژ و تخلیه‌ی باتری PHEV از طریق ساختار شارژ خانگی برابر با ۰/۲۳۳ کیلووات است. گنجایش ظرفیت انرژی باتری PHEV، PHE_0 اولین حالت شارژ باتری PHEV، PHE_f حالت نهایی شارژ باتری PHEV در روز و η_{ch}/η_{dch} کارایی شارژ/ تخلیه‌ی باتری PHEV هستند. توجه داشته باشید PHEV در آن فاصله‌ی زمانی که خارج از خانه قرار دارد ۵ کیلو وات ساعت انرژی مصرف می‌کند. باتری PHEV باید قبل از سفر کاملاً شارژ شود.

جدول ۲. مشخصات PHEV (سکو^{۴۱} و دیگران، ۲۰۱۱)

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	توان مصرفی در هر بازه زمانی	(kW)	۰/۲۳۳
۲	ظرفیت باتری	(kWh)	۷/۸
۳	شارژ اولیه باتری	(kWh)	۳/۹
۴	شارژ نهایی باتری خودرو	(kWh)	۳/۹
۵	بازده شارژ	-	۰/۸۸
۶	بازده دشارژ	-	۰/۸۸

^{۴۱}. SECO

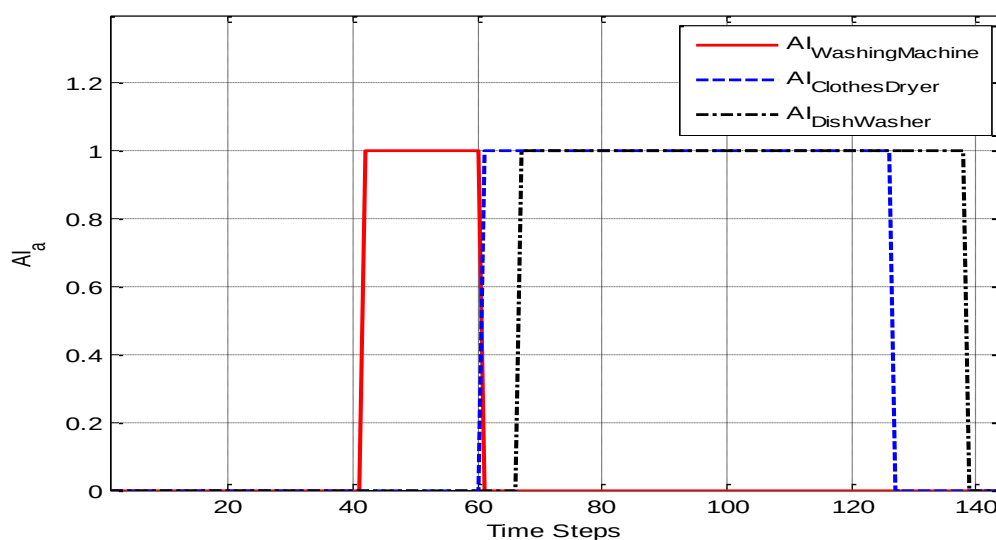


شکل ۳. مینیم و ماکزیمم PHEV

ماشین لباسشویی، ظرفشویی و خشک کن دستگاه های کنترل شده ی خاموش / روشن محسوب می شوند. جدول ۳ و شکل ۴ ویژگی های اجرایی این دستگاه ها را خلاصه می کند.

جدول ۳. داده های مربوط به دستگاه های کنترل شده ی خاموش / روشن (سکو^{۴۲} و دیگران، ۲۰۱۱)

ردیف	دستگاه	مجموع بازه های کارکرد لازم U_a	انرژی مصرفی در هر بازه زمانی $E_a(kWh)$	بازه های زمانی مجاز کار AI_a
۱	ماشین لباس شویی	۳	۰/۲۰۰	[۶۰, ۴۲]
۲	ماشین خشک کن	۵	۰/۲۰۵	[۱۲۶, ۶۱]
۳	ماشین ظرف شویی	۳	۰/۰۶۲۵	[۱۳۸, ۶۷]



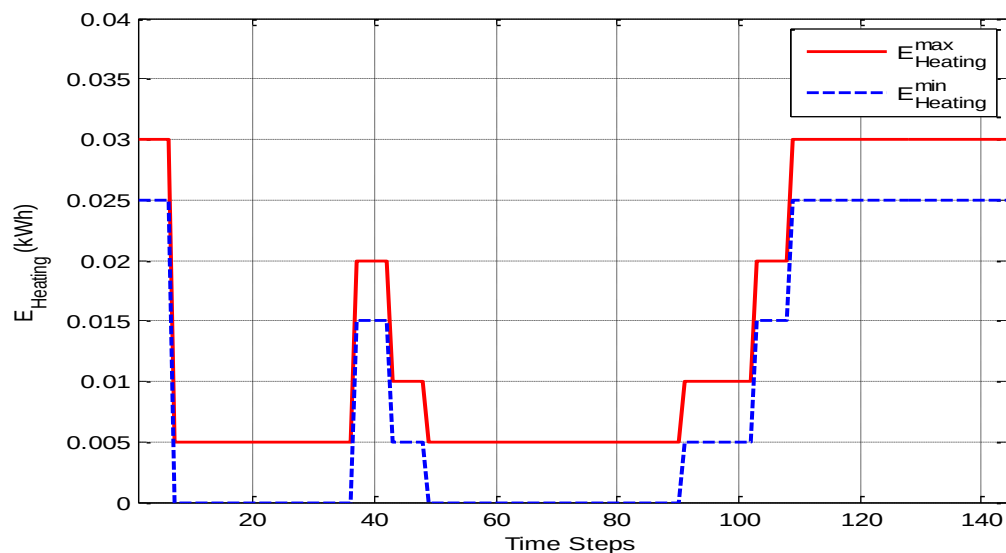
^{۴۲}. SECO

شکل ۴. مجموع بازه‌های کارکرد لازم ماشین لباسشویی، ماشین خشک‌کن و ماشین ظرفشویی

در مجموع میزان مصرف انرژی حرارتی در ساعات مختلف روز بعدی در جدول ۴ و شکل ۵ آورده شده‌اند. توجه داشته باشید که مصرف کلی انرژی سیستم گرمایشی برابر با ۲ کیلووات ساعت در روز فرض شده است.

جدول ۴. محدودیت‌های مصرف انرژی (kWh) سیستم گرمایشی در هر بازه زمانی

ردیف	بازه زمانی	حداکثر مصرف انرژی سیستم گرمایشی $E_{heating}^{max}$	حداقل مصرف انرژی سیستم گرمایشی $E_{heating}^{min}$
۱	[۱، ۶] و [۱۰۹، ۱۴۴]	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵
۲	[۳۷، ۴۲] و [۱۰۳، ۱۰۸]	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵
۳	[۴۳، ۴۸] و [۹۱، ۱۰۲]	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵
۴	[۷، ۳۶] و [۴۹، ۹۰]	۰/۰۰۵	۰



شکل ۵. ناحیه عملکرد PHEV

شاخص‌ترین عامل در فروش پیشنهادی VOLL دستگاه‌های کنترل شده است. در اینجا فرض بر آن است که اهمیت کار ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس همچون سایر دستگاه‌ها برای مشتری زیاد نبوده‌اند. از این رو اولویت‌های آن‌ها متوسط فرض می‌شود. برای سایر دستگاه‌ها، اولویت بالا است.

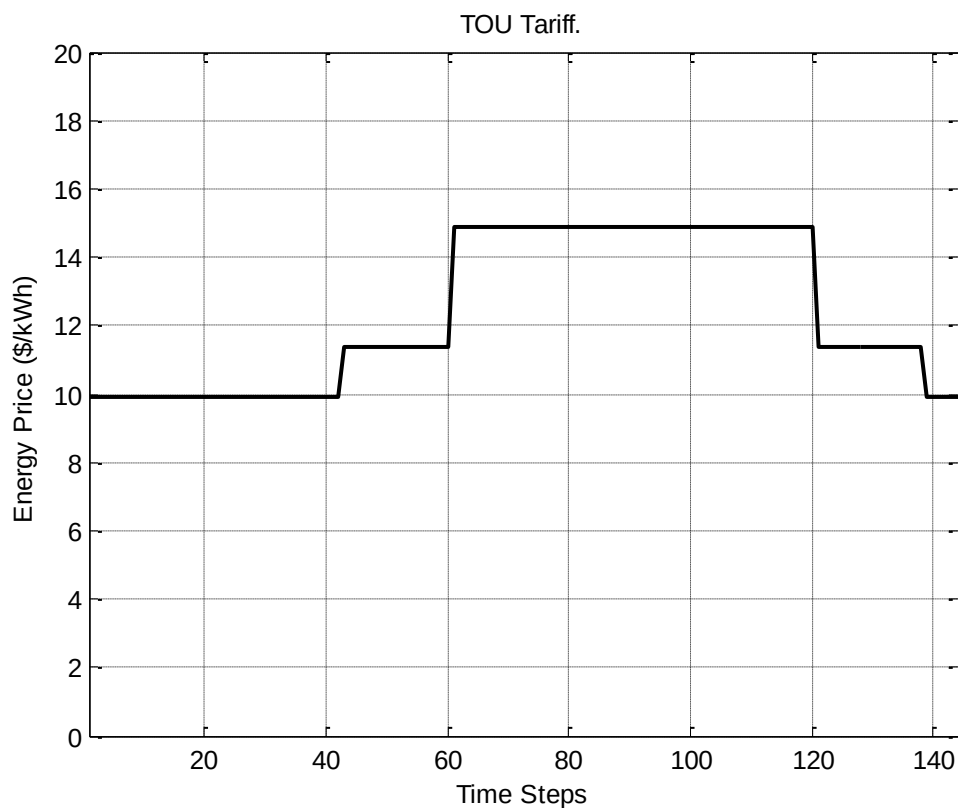
۲-۷- نمونه ۱: هماهنگی تعرفه‌ی TOU

در این مورد، قابلیت اطمینان و قیمت انرژی با در نظر گرفتن اینکه تعرفه‌ی کاهش یافته برای مشتری TOU سه پله مانند جدول ۵ و شکل ۶ است، به حداقل رسیده‌اند.

جدول ۵. تعرفه TOU

ردیف	بازه زمانی	مقدار گاما γ
۱	[۱، ۴۲] و [۱۳۹، ۱۴۴]	۹/۹

۱۱/۴	[۶۰, ۴۳] و [۱۳۸, ۱۲۱]	۲
۱۴/۹	[۱۲۰, ۶۱]	۳



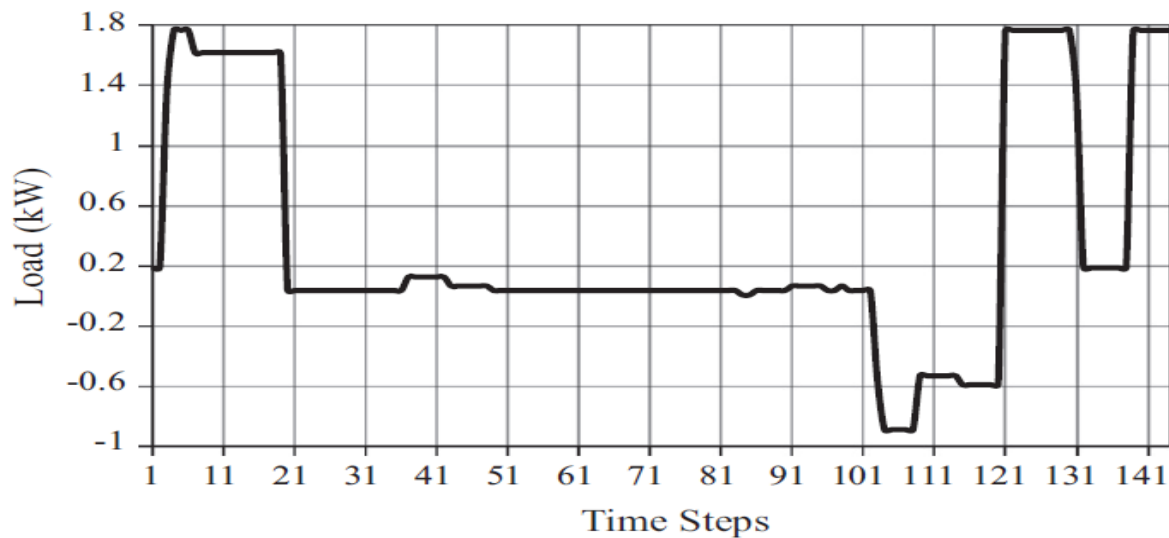
شکل ۶. نمودار TOU

قبل از استفاده از روش پیشنهادی بهتر است که مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون قیمت قابلیت اطمینان یعنی بدون در نظر گرفتن اولویت‌های مختلف برای دستگاه از منظر مشتری، حل شود. بدین منظور مقدار VOLL دستگاه‌ها یکسان و در مقدار بالا در نظر گرفته شده است. قیمت به‌دست آمده یعنی قیمت انرژی مشتری، ۲۲۴/۲ در این حالت خواهد بود. با توجه به اولویت‌های اجرایی دستگاه‌ها، بر طبق تعرفه‌ی TOU، مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس معادل ۱۰ دلار در هر کیلووات ساعت تنظیم شده که میان y_1 و y_3 است. قیمت انرژی نهایی و قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰۴/۹ و ۱۴/۲۵ هستند. بنابراین هزینه‌ی کل مشتری که از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی به دست می‌آید ۲۲۲/۲ است. این نشان می‌دهد که هزینه‌ی کل مشتری ممکن است با در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان در روند HEM کاهش یابد. بنابراین مشخص می‌گردد که روش HEM پیشنهادی بیشتر مشتری را راضی می‌کند، نه تنها با در نظر گرفتن اولویت‌های آن‌ها در برنامه‌ریزی بلکه با کاهش قیمت برقشان تا ۷/۵ درصد یعنی از ۲۲۴/۲ به ۲۰۷/۹. گام‌های زمانی عملکرد دستگاه قابل کنترل در جدول ۶ به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابل کنترل ارائه شده است.

جدول ۶. بازه‌های کاری مربوط به دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن

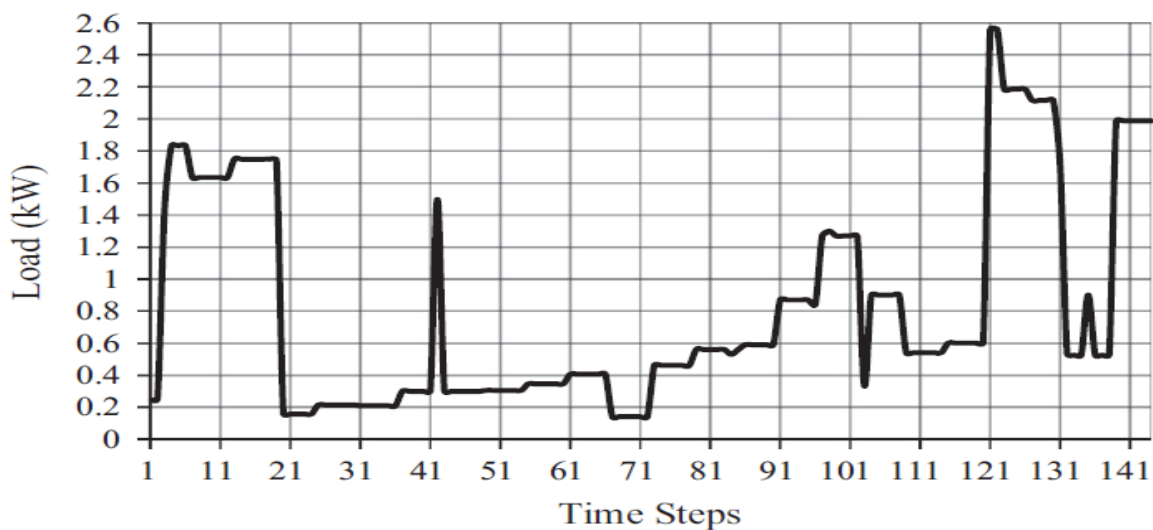
ردیف	دستگاه	با هزینه قابلیت اطمینان RC	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباسشویی	۴۲	[۴۴, ۴۲]
۲	ماشین خشک‌کن	-	[۱۲۶, ۱۲۳] ۱۲۱
۳	ماشین ظرفشویی	۱۲۵, ۱۲۴, ۱۲۲	[۱۰۸, ۱۰۶]

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده، از آنجایی که مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن کمتر از تعرفه‌های متوسط و پیک است، بهتر است که این دستگاه‌ها را در برخی زمان‌ها خاموش کرد. بنابراین ماشین لباسشویی تنها در زمان تعرفه‌ی غیر پیک روشن می‌شود و خشک‌کن نیز در تمامی گام‌های زمانی خاموش است. این گونه می‌توان قیمت قابلیت اطمینانی بیشتری داشت، گرچه موجب هزینه‌ی کلی کمتر نیز می‌شود. تقاضای کلی برق سیستم حرارتی و PHEV در شکل ۷ نشان داده شده است. بار منفی در این شکل ظرفیت بازگشت انرژی تخلیه شده در شبکه را نشان می‌دهد. این روند به صورت انتقالی به ظرفیت شبکه (V2G) طراحی می‌شود. از آنجایی که باتری PHEV در دو گام زمانی با تعرفه‌ی پایین شارژ شده، و در زمان تعرفه‌ی بالا تخلیه شده است، ظرفیت V2G تا حد زیادی قیمت انرژی مشتری را کاهش می‌دهد.



شکل ۷. تقاضای برق سیستم گرمایش و PHEV در مورد ۱

زمان بندی بهینه‌ی مصرف دستگاه‌های قابل کنترل با توجه به هزینه‌ی اعتباری موجب روند تقاضای خانوار به صورت شکل ۸ می‌گردد. این شکل نشان می‌دهد که بار پیک ۲/۵۵ کیلووات با تعرفه‌ی TOU در روند پیشنهادی HEM هماهنگ شده است. لازم به ذکر است که اوج تقاضای برق در خانه بدون سیستم HEM می‌تواند بیشتر از بار پیک به دست آمده در مورد ۱ باشد. برای مثال فرض کنید که در مورد بدون سیستم HEM در گام زمانی ۱۰۰، PHEV شارژ شده باشد، خشک‌کن کار کند، سیستم گرمایشی حداکثر انرژی مجاز را مصرف کند. خلاصه‌ی مصرف انرژی این دستگاه‌ها و تقاضای غیرقابل کنترل به پیک ۳/۰۵ کیلووات در گام زمانی ۱۰۰ می‌رسد که ۲۰ درصد بیشتر از نمونه‌ی ۱ است.



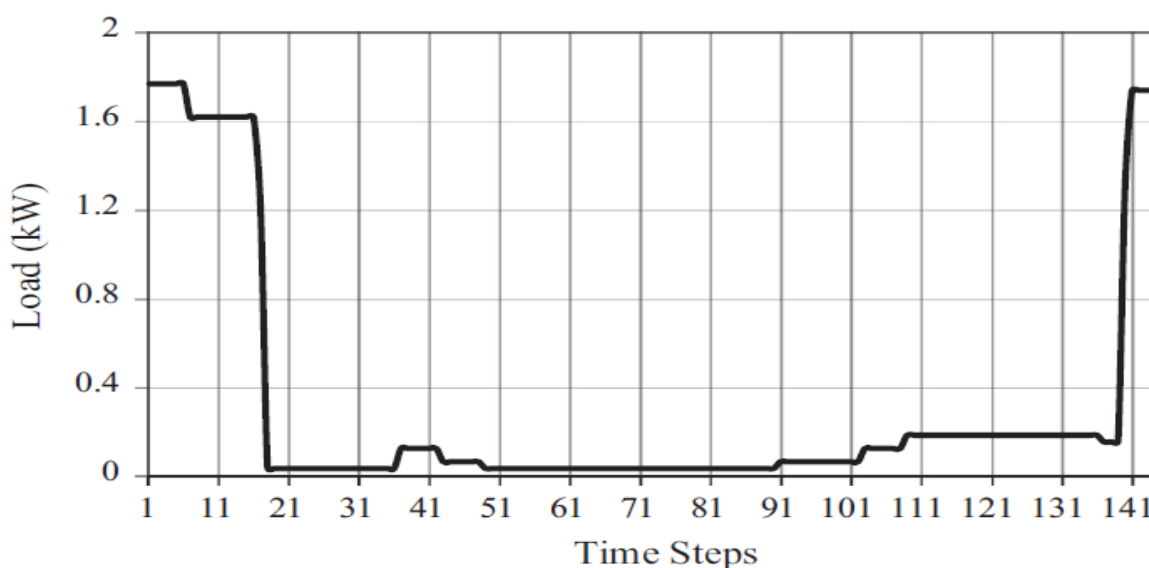
شکل ۸. تقاضای برق خانگی در مورد ۱

۳-۷- نمونه ۲: هماهنگی تعرفه‌ی IBR

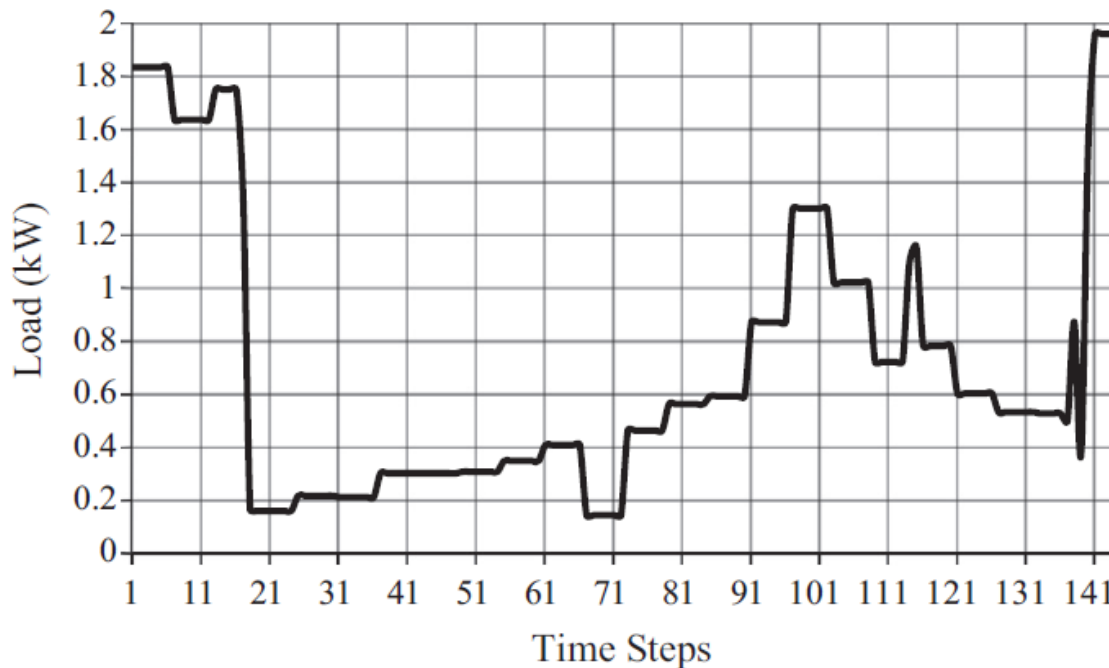
همچون مورد پیشین، این نمونه نیز در دو حالت به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان در تابع هدف مطالعه شده است. فرض بر این است که تعرفه‌ی IBR در مسئله‌ی بهینه‌سازی $\alpha = 9/9 \text{ ¢/kWh}$ ، $\beta = 14/9 \text{ ¢/kWh}$ و $\delta = 15 \text{ kWh}$ هماهنگ شده است. به عبارت دیگر تعرفه‌های مصرف روزانه‌ی برق کمتر و بیشتر از ۱۵ کیلووات ساعت به ترتیب ۹/۹ کیلووات ساعت (¢) و ۱۴/۹ کیلووات ساعت (¢) هستند. از این رو در حالت در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان، ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس برابر با ۱۰ کیلووات ساعت (¢) فرض شده که میان α و β است. VOLL سایر دستگاه‌ها در مقداری بیشتر از ۱۴/۹ کیلووات ساعت (¢) لحاظ می‌شوند. حل مسئله‌ی بهینه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت انرژی مشتری به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰۲/۳ و ۱۷۸ است. این نتیجه مشخص می‌کند که هماهنگی اولویت دستگاه‌ها می‌تواند موجب ۱۲ درصد قیمت پایین‌تر برای مشتری شود. به علاوه ۱۶/۳ سنت به عنوان قیمت قابلیت اطمینان در این مورد به مشتری اعمال می‌شود. با این حال قیمت کلی ۱۹۴/۳ است که کمتر از قیمتی است که قبل از لحاظ کردن اولویت‌های دستگاه‌ها به دست آمد. بنابراین در مورد ۲، کاهش هزینه‌ی کل با هزینه‌ی قابلیت اطمینان ۴ درصد است که کمی بیشتر از نمونه‌ی ۱ که ۱ درصد بوده، خواهد بود. این نشانگر کارایی قیمت‌گذاری IBR در مقایسه با تعرفه‌ی TOU از منظر مشتری است. لازم به ذکر است که مصرف انرژی روزانه‌ی خانگی به همراه و بدون قیمت قابلیت اطمینان در این نمونه برابر با ۱۸/۶۳ کیلووات ساعت و ۱۷/۰۱ کیلووات ساعت است. گام‌های زمانی اجرایی دستگاه‌های قابل کنترل و تقاضای برق مجموع سیستم گرمایشی و PHEV در مورد ۲، به ترتیب در جدول ۷ و شکل ۹ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده، از آنجایی که ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن کمتر از نسبت بالاتر (B) IBR و مصرف روزانه‌ی انرژی بیشتر از آستانه است، بهتر است که این دستگاه‌ها را در طول روز خاموش کرد. شکل ۹ مشخص می‌کند که PHEV در ساعات ابتدایی و انتهایی روز شارژ می‌شوند تا وضعیت شارژ از پیش تعیین شده را در زمان جدا کردن به دستگاه بدهند. برخلاف مورد پیشین بنا بر وجود قیمت‌گذاری IBR و به علت کارایی تبدیل باتری PHEV، نیازی نیست که باتری PHEV را در همان زمان تخلیه و مجدداً شارژ کرد. بنابراین باتری PHEV در هیچ گام زمانی بنا بر شکل ۹ دشارژ نمی‌شود.

جدول ۷. بازه‌های زمانی دستگاه‌های قابل کنترل روشن/خاموش در مورد ۲

ردیف	دستگاه	با هزینه قابلیت اطمینان RC	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباسشویی	-	۶۰، ۵۴، ۵۳
۲	ماشین خشک‌کن	-	۱۲۶، ۱۰۶، ۱۰۵، ۱۰۴، ۱۰۲
۳	ماشین ظرفشویی	۱۳۸، ۱۱۵، ۱۱۴	۱۳۸، ۱۱۵، ۱۱۴



شکل ۹. تقاضای برق مجموع سیستم گرمایش و PHEV در مورد ۲



شکل ۱۰. تقاضای برق خانگی در مورد ۲

تقاضا برای بار خانگی در مورد ۲ به همراه قیمت قابلیت اطمینان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که اوج بار خانگی ۱/۹۵ کیلووات است. مقایسه‌ی شکل‌های ۸ و ۱۰ مشخص می‌کند که در شرایط در نظر گرفتن RC، تعرفه‌ی IBR بیشتر تقاضا برای برق را در طول روز در مقایسه با تعرفه‌ی TOU نشان می‌دهد. بنابراین در مورد ۲ به اوج بار کمتری می‌رسیم. این نتیجه که ممکن است برای مشتریان جذاب نباشد، برای اپراتورهای سیستم توزیع خوش‌آیند است.

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله به منظور واکنش به قیمت دوره‌ای برق از اولویت‌های عملیاتی دستگاه‌ها از منظر مشتریان در مدل مدیریت مصرف خانگی برای رضایت بیشتر نزد مشتریان استفاده شد. بدین منظور اولویت عملیاتی یک دستگاه در ابتدا به عنوان VOLL آن دستگاه تفسیر گردید. سپس قیمت قابلیت اطمینان که تابعی از VOLL دستگاه قابل کنترل است به تابع هدف مسئله‌ی HEM افزوده شد. این تحقیق همچنین تأثیر هماهنگی تعرفه‌های TOU و IBR را در برنامه‌ی پیشنهادی HEM بر روی قیمت‌های مشتریان ارزیابی نمود. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهد که هماهنگی اولویت‌های دستگاه‌ها در رویه‌ی HEM می‌تواند موجب هزینه‌ی کمتر برای مشتری شود. نتایج همچنین مشخص می‌کند که هماهنگی تعرفه‌ی روزانه‌ی IBR در برنامه‌ی HEM با تعرفه‌ی TOU مقایسه شده و به قیمت کمتر و آستانه‌ی نزدیک‌تری می‌رسد که برای مشتریان و اپراتورهای سیستم توزیع خوش‌آیند است.

به محققینی که در آینده در مباحث مدیریت انرژی پژوهش می‌کنند پیشنهاد می‌شود:

- اثر مدیریت مصرف انرژی در عملکرد کل شبکه توزیع دیده شود.
- تأثیر مدیریت مصرف انرژی در کاهش تلفات شبکه سنجیده گردد.
- روش‌های مدیریت مصرف انرژی با روش‌های دیگر کاهش هزینه‌های جاری همچون بازآرایی شبکه، توسعه و بهینه‌سازی شبکه و اتصال منابع تولید پراکنده ترکیب و مقایسه گردد.
- تأثیر مدیریت مصرف انرژی در به تعویق افتادن عملیات توسعه شبکه موردبررسی قرار گیرد.

- [۱] **Shin, Jungwoo & Park, Yuri & Lee, Daeho**, (۲۰۱۸). "Who will be smart home users? An analysis of adoption and diffusion of smart homes," *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, vol. ۱۳۴(C), pages ۲۴۶-۲۵۳.
- [۲] **Pipattanasomporn M, Kuzlu M, Rahman S**, (۲۰۱۲). "An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۲;۳(۴):۷۱۶۶-۷۳.
- [۳] **Erick Alves, Santiago Sanchez, Danilo Brandao and Elisabetta Tedeschi**, (۲۰۱۹). "Open Access Article Smart Load Management with Energy Storage for Power Quality Enhancement in Wind-Powered Oil and Gas Applications", *Energies* ۲۰۱۹, ۱۲(۱۵), ۲۹۸۵.
- [۴] **Gyamfi S, Krumdieck S, Urmee T**, (۲۰۱۳). "Residential peak electricity demand response highlights of some behavior". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۳;۲۵:۷۱-۷.
- [۵] **Zipperer A, Aloise -Young PA**, (۲۰۱۳). "Electric energy management in the smart home: Perspectives on enabling technologies and consumer behavior". *Proceedings of the IEEE* ۲۰۱۳;۱۰۱(۱۱):۲۳۹۷-۴۰۸.
- [۶] **Soares A, Gomes A, Antunes CH**, (۲۰۱۴). "Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۴;۳۰:۴۹۰-۵۰۳.
- [۷] **N. Ganjei, F. Zishan, R. Alayi, H. Samadi, M. Jahangiri**, (۲۰۲۲). "Designing and Sensitivity Analysis of an off-grid hybrid wind-solar power plant with diesel generator and battery backup for the Rural Area in Iran", *Hindawi, Journal of Engineering*, Volume ۲۰۲۲.
- [۸] **R. Alayi, F. Zishan, M. Mohkam**, (۲۰۲۱). "A sustainable energy distribution configuration for microgrids integrated to the national grid using back-to-back converters in a renewable power system", *Electronics*, vol. ۱۰, no. ۱۵, p. ۱۸۲۶, ۲۰۲۱.
- [۹] **Kun-Yuan Huang, Yann-Chang Huang**, (۲۰۰۴). "Integrating direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services", *IEEE Trans on Power Systems*, Vol. ۱۹, No. ۳, August ۲۰۰۴.
- [۱۰] **Carlo Alvarez, Antonio Gabaldon, Angel Molina**, (۲۰۰۴). "Assessment and Simulation of the Responsive Demand Potential in End-User Facilities: Application to a University Customer", *IEEE TRANSACTIONS POWER SYSTEMS*, VOL. ۱۹, NO. ۲, ۲۰۰۴.
- [۱۱] **Tindemans, S. H., Bhavaraju, M., Lauby**, (۲۰۱۹). ۸۵۹-۲۰۱۸ - IEEE Standard Terms for Reporting and Analyzing Outage Occurrences and Outage States of Electrical Transmission Facilities. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8686400>.
- [۱۲] **Rastegar M, Fotuhi-Firuzabad M**. (۲۰۱۵). "Outage management in residential demand response programs" *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۵;۶(۳):۱۴۵۳-۶۲. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2338794>.
- [۱۳] **Fernandes F, Morais H, Valea Z, Ramos C**, (۲۰۱۴). "Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events", *Energy Build* ۲۰۱۴;۸۷(October):۵۹۲-۶۰۶.
- [۱۴] **Shafiee S, Fotuhi-Firuzabad M, Rastegar M**, (۲۰۱۳). "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۳):۱۳۵۱-۶۰.
- [۱۵] **Zhang D, Shahb N, Papageorgiou LG**, (۲۰۱۳). "Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid", *Energy Convers Manage* ۲۰۱۳;۷۴(October):۲۰۹-۲۲.
- [۱۶] **Yoona JH, Bladicka R, Novoselac A**, (۲۰۱۴). "Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity". *Energy Build* in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.002>.
- [۱۷] **Mohsenian-Rad AH, Wong VWS**, (۲۰۱۰). "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۰;۱(۳):۲۲۰-۳۱.
- [۱۸] **Hubert T, Grijalva S**, (۲۰۱۲). "Modeling for residential electricity optimization in dynamic pricing environments". *IEEE Trans Smart Grid Dec.* ۲۰۱۲;۳(۴):۲۲۴-۳۱.
- [۱۹] **Wang Ch, Zhou Y, Jiao B, Wang Y**, (۲۰۱۵). "Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system". *Energy Convers Manage* ۲۰۱۵;۱۰۲(September):۲۴۷-۵۷.
- [۲۰] **Adika CO, Wang Lingfeng**, (۲۰۱۴). "Autonomous appliance scheduling for household energy management". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۴;۵(۲):۶۷۳-۸۲.
- [۲۱] **Agneta A, de Pascale G, Detti P, Vicino A**, (۲۰۱۳). "Load scheduling for household energy consumption optimization". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۴):۲۳۶۴-۷۳.
- [۲۲] **Samadi P, Mohsenian-Rad H, Wong VWS, Schober R**, (۲۰۱۳). "Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption scheduling in smart grid. *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۲):۱۰۰۷-۱۶.
- [۲۳] **Mohammed, Nooriya A., and Ammar Al-Bazi**, (۲۰۲۱). "Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling." *Renewable Energy* ۱۶۴ (۲۰۲۱): ۵۰۹-۵۲۰.
- [۲۴] **S. Solaymani, S**, (۲۰۲۱). "A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran" *Sustainability*. ۲۰۲۱, ۱۳, ۷۳۲۸
- [۲۵] **Yonghong. M and Baixuan Li**, (۲۰۲۰). "Hybridized Intelligent Home Renewable Energy Management System for Smart Grids", *sustainability*, Issue ۱۰, ۱۲, ۲۱۱۷; doi:10.3390/su10202117, ۲۰۲۰.

- [۲۶] **H. T. Dinh, J. Yun, D. M. Kim**, (۲۰۲۰). "A Home Energy Management System With Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling," in IEEE Access, vol. ۸, pp. ۴۹۴۳۶-۴۹۴۵۰, ۲۰۲۰, doi: ۱۰.۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰.۲۹۷۹۱۸۹.
- [۲۷] **Hartner, Michael, et al**, (۲۰۱۷). "Optimal sizing of residential PV-systems from a household and social cost perspective: A case study in Austria." Solar Energy ۱۴۱ (۲۰۱۷): ۴۹-۵۸.
- [۲۸] **Nicoletti, Francesco, Mario Antonio Cucumo, and Natale Arcuri**, (۲۰۲۲). "Cost optimal sizing of photovoltaic-battery system and air-water heat pump in the Mediterranean area." Energy Conversion and Management ۲۷۰ (۲۰۲۲): ۱۱۶۲۷۴.
- [۲۹] **Curiel, José Adrián Rama, and Jagruti Thakur**, (۲۰۲۲). "A novel approach for direct load control of residential air conditioners for demand side management in developing regions." Energy ۲۵۸ (۲۰۲۲): ۱۲۴۷۶۳.
- [۳۰] **SECO**, (۲۰۱۱). The Infinite Power of Texas. Estimating PV system size and cost. SECO fact sheet, no. ۲۴; ۲۰۱۱. p. ۱-۴.

Optimal Management of the Consumption Side in Household Loads Considering the Degree of Consumption Sensitivity in the Presence of Small PV Systems

Mahmoud Zadehbagheri^{*}, Rahim Ildarabadi[†]

[†] Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Yasuj Branch, Yasuj , Iran

^{*}Department of Electrical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

*Corresponding Author: **Mahmoud Zadehbagheri** : Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

Abstract

Home Energy Management (HEM) programs convince residential customers to participate in price-based demand response (DR) programs actively. In these price-oriented HEM methods, controller timing for energy consumption of home appliances in response to the electricity price signal has multiple priorities among customers. Although, various methods have recently been proposed for the use of HEM, prioritizing the performance of controllable devices from the customer's perspective in price-oriented HEM has not been determined, and this issue is the focus of this paper. For this purpose, the value of lost load (VOLL) of each device is defined in such a way that it raises the implementation priority of that device from the customer's point of view. Considering the VOLL of the devices, electricity tariffs and implementation restrictions of the devices, the optimization problem is proposed to reduce the energy consumption and reliability prices. The result of the proposed HEM is the optimal timing of demand for household electricity. Numerical studies show the effectiveness of the proposed HEM method in an intelligent home considering different pricing based on variable time.

Keywords: Optimal Management, Consumption Sensitivity, Photovoltaic (PV) Systems, HEM Method.