DOR: 20.1001.1.24234931.1400.8.2.2.8

سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، ص ص ۱۱- ۲۰

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۰

کاربرد یک روش چندهدفه کاربرمحور جهت مدیریت انرژی در خانه هوشمند با حفظ حریم مصرف‌کنندگان

روزبه امیدوار[۱]، محمد تبریزیان[۲]، حمیدرضا شاهمیرزاد [۱*]

۱- کارشناس ارشد، مهندسی برق-قدرت، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه برق-قدرت، دانشکده مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* تهران، ۱۸۱۵۱۶۳۱۱۱، hr.shahmirzad@gmail.com

چکیده

موضوع مدیریت انرژی در خانه های هوشمند از نظر نحوه ایجاد توازن بین حریم خصوصی کاربران وکاهش هزینه‌های انرژی، در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا در این مقاله، یک رویکرد چند هدفه کاربرمحور، که هزینه‌های انرژی را کمینه و رعایت حریم خصوصی مصرف‌کننده را بیشینه سازد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش یک خانه هوشمند مجهز به سیستم مدیریت انرژی، مولد فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی (باتری)، لوازم خانگی هوشمند و پاسخگو به قیمت برق در نظر گرفته شده است که این مجموعه توانایی تزریق توان الکتریکی به شبکه‌ی بالادست را نیز دارد. این چارچوب به یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه منتهی می‌شود که در آن دو هدف فوق‌الذکر به صورت دو بعد مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای حل مسئله، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات(PSO) استفاده شده است که از جستجوی تصادفی برای برنامه‌ریزی لوازم خانگی و کنترل باتری‌ها بر مبنای کاربرد لوازم انعطاف‌پذیر در خانه‌های هوشمند استفاده می‌کند. مطالعات موردی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه انرژی در حدی منطقی و قابل قبول، حریم خصوصی کاربران را نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای رعایت و ارضا نماید. در نهایت نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است که کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: مدیریت انرژی، خانه هوشمند، بهینه‌سازی، حریم خصوصی مصرف‌کننده

Application of a Multi-Objective User-Centric Method to Energy Management in Smart Home Considering Consumer Privacy

Rouzbeh Omidvar, Mohammad Tabrizian, Hamidreza Shahmirzad*

Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1815163111 Tehran, Iran, hr.shahmirzad@gmail.com

Received: 17 March 2020 Accepted: 10 November 2020

Abstract

This paper investigates smart home energy management in consideration of tradeoffs between residential privacy and energy costs. A multi-objective approach that minimizes energy costs and maximizes privacy protection is proposed. This approach leads to a multi-objective optimization problem in which the two objectives addressed in separate dimensions. PSO algorithm that employs a stochastic search used for power scheduling of home appliances and uses deterministic battery control developed accordingly. The proposed approach can avoid some drawbacks faced by conventional weighted-sum methods for multi-objective optimization. Simulations reveal that the proposed approach can maintain a reasonable energy cost while robustly preserving user privacy at a sensible level, finally the numerical results shown and analyzed.

Keywords: Energy Management, Smart Home, Optimization, Consumer Privacy

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

با ظهور سامانه‌های پایش(مانیتورینگ) زمان واقعی و انتقال اطلاعات، مدیریت سمت تقاضا و فن‌آوری اینترنت اشیاء، رفته رفته شبکه های قدرت هوشمند به عنوان نسل جدیدی از سیستم های قدرت جایگزین شبکه های قدرت سنتی شده اند. یکی از مهم ترین ویژگی هایی که شبکه های هوشمند را از نسل های گذشته آن متمایز کرده است، قابلیت این شبکه‌ها در کنترل موثر میزان مصرف توان به منظور تحقق اهداف صرفه جویی در مصرف انرژی است. به همین خاطر، انتظاراتی که از شبکه های هوشمند به وجود آمده، استانداردهای امنیت و حریم خصوصی را نیز بالاتر برده است. روش‌های معدودی برای ملاحظه حریم خصوصی شبکه‌ی هوشمند وجود دارد. یکی از رایج ترین روش‌ها، تغییر دادن الگوهای عادی مصرف برق با استفاده از منابع مختلف است. همچنین واحدهای ذخیره یا برداشت انرژی از محیط را می توان برای پوشش دادن میزان مصرف توان به کار گرفت.

مطالعات بسیاری به منظور برقراری نوعی تعادل بین این دو عامل انجام شده است. روش مجموع وزن‌دار رایج ترین روش برای ترکیب نمودن اهداف مربوط به حریم خصوصی و اهداف مربوط به هزینه ها به صورت یک تابع هدف واحد است اما اغلب فرض بر آن است که قابلیت کنترل پذیری محدود لوازم خانگی، ارائه‌ی الگوریتم های کارآمد را تسهیل می‌کند. در خصوص معاوضه‌ی حریم خصوصی مسکونی با هزینه های انرژی، بیشتر رویکردهای موجود با دو مسئله‌ی جدی مواجه شده اند، اول اینکه لوازم خانگی موجود در خانه های هوشمند اغلب توان مصرفی معین و سطح مشخصی از انعطاف پذیری در زمان استفاده را دارند که برای کارایی هوشمند آنها الزامی است و دوم ترکیب نمودن اهداف مربوط به حریم خصوصی و هزینه ها به صورت یک هدف واحد با استفاده از روش مجموع وزن دار می تواند مشکل افرین شود. روش پیشنهادی در این مقاله انواع مختلفی از لوازم خانگی را بررسی می کند که عبارتند از لوازم غیرقابل انعطاف و غیر قابل تغییر، لوازم انعطاف پذیر و لوازم قابل تغییر. در همین راستا یک مسئله‌ی بهینه سازی چند هدفه[1] (MOP) فرمول بندی می شود که معیار هزینه و معیار حریم خصوصی را در ابعاد مختلفی در بر می‌گیرد. پس از حل مسئله بهینه سازی چند هدفه، در این مرحله می توان یک سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر باتری ها را ایجاد کرد و بر اساس آن میزان مصرف توان لوازم خانگی را تعیین نمود. در الگوریتم ترکیبی حاصله، یک روش جستجوی تصادفی برنامه‌ی مصرف برق لوازم خانگی انعطاف پذیر و قابل تغییر را در پاسخ به قیمت برق و تابع واریانس حریم خصوصی تعیین می کند و به مجموعه ای از راه حل های بهینه پارتو منتهی می‌گردد. برنامه ریزی نهایی برای لوازم خانگی از روی راه‌حلی تعیین خواهد شد که فاصله خود با یک راه حل ایده آل برابر ساس یک مرز پارتو تقریبی، یا به عبارت دیگر تصویر یک مجموعه بهینه پارتو تقریبی با استفاده از توابع هدف را به حداقل برساند.

۲- مرور پیشینه تحقیق

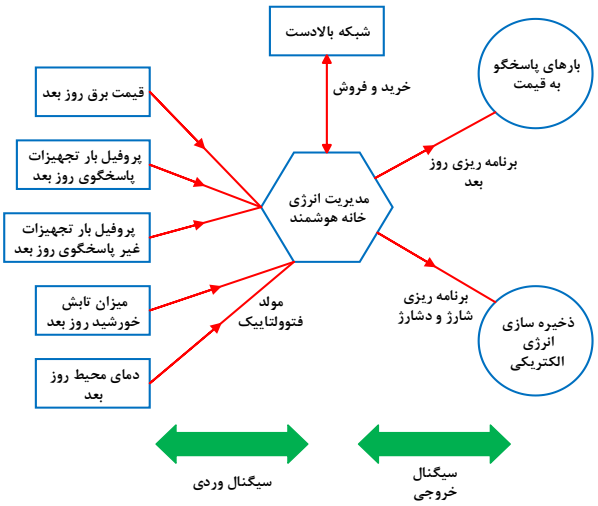
در مرجع [۱] طرح زمان‌بندی بهره‌برداری برای تغذیه‌ی الکتریکی و مصرف‌کنندگان مجهز به سیستم مدیریت انرژی خانه[2] (HEMS) و سیستم مدیریت انرژی ساختمان[3] (BEMS) از طریق مدیریت انرژی در هر خانه ارائه شده است. در مرجع [۲] برنامه‌ریزی انرژی یک خانه که شامل گرمایش خورشیدی، تهویه هوا و سیستم گرم‌کن آب است در فضای قیمت‌دهی زمان حقیقی، مطالعه شده است. هدف کمینه‌سازی هزینه الکتریکی تأمین بار مورد نظر است. در این مرجع انواع بارهای مختلف با مشخصه‌های متفاوت در جزئیات مدل‌سازی، دینامیک حرارتی و عدم قطعیت قیمت لحظه‌ای برق و تابش خورشید در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳] برای رسیدن به یک جدول زمان‌بندی بهینه برای مدیریت انرژی خانه هوشمند، جمع‌بندی نتایج حاصل از چندین مقاله علمی در زمینه بهره‌برداری خانه هوشمند را مدل‌سازی و تحلیل کرده است. در مرجع [۴] الگوریتم بهینه‌سازی عقاب‌های طلایی را ارائه کرده و به کمک آن مسئله‌ی توسعه‌ی منابع انرژی‌های تجدید پذیر را تحلیل کرده است. مرجع [۵] کشورهای عضو اتحادیه اروپا را به عنوان نمونه مورد بررسی قرار داده که بیش از ۲۸٪ مصرف برق آنها مربوط به بخش خانگی است. این گزارش مصرف انرژی الکتریکی تا قبل از سال ۲۰۰۶ را در برخی کشورها مورد ارزیابی قرار داده است. در مرجع [۶] بر اساس مطالعات انجام گرفته و تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدیریت انرژی در خانه هوشمند فعالیت‌های گسترده انجام شده از ابتدای دهه ۹۰ میلادی تشریح شده است. این فعالیت‌ها شامل وضع استانداردهای اجباری و اختیاری برای طراحی و ساخت تجهیزات و مقدار انرژی مصرفی است. در مرجع [۷] نیز با توجه به نحوه استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و همچنین منابع انرژی تجدیدپذیر برای مصرف در بخش خانگی، مطالعه متنوع و گسترده‌ای صورت گرفته است. در مرجع [۸] موضوع استفاده از دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی شامل باتری‌ها و خودروهای الکتریکی در مدیریت بارهای خانگی مطرح شده است. در مرجع [۹] روشی برای پایش و کنترل نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در زمینه مدیریت انرژی خانگی ارائه شده است. در مرجع [۱۰] نحوه طراحی ظرفیت مناسب منابع انرژی تجدیدپذیر برای ساختمان‌های بزرگ و همچنین روند مدیریت انرژی و بهره‌برداری از این منابع تجدیدپذیر بررسی شده است. در مرجع [۱۱] الگوریتمی مبتنی بر روش مرتب‌سازی برای برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی در ابعاد بزرگ ارائه شده است. در مرجع [۱۲] الگوریتمی برای بهبود برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی با در نظر گرفتن ویژگی‌های رفتار انسانی ارائه شده است. در مرجع [۱۳] به برنامه‌ریزی هم‌زمان تجهیزات خانگی و منابع تجدیدپذیر (شامل خودرو برقی و سیستم فتوولتائیک) با الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی تجمع ذرات[4] (PSO) پرداخته است. در مرجع [۱۴] برنامه‌ریزی هم‌زمان تجهیزات خانگی و خودروی الکتریکی با روش برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح تحلیل شده است. در مرجع [۱۵] یک سیستم عامل توزیع شده برای مدیریت تجهیزات خانگی از طریق یک شبکه بی‌سیم ارائه شده است. در مرجع [۱۶] برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی با در نظر گرفتن ترکیب قیمتی زمان-حقیقی و تعریف بلوکی برای کاهش نسبت متوسط به پیک مصرف ارائه شده است. در مرجع [۱۷] کنترل بهینه دستگاه‌های تهویه مطبوع با در نظر گرفتن قیمت زمان-حقیقی برق و پیش‌بینی دمای بیرون همراه با پاسخگوئی بار مطرح شده است. در مرجع [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی چند هدفه غیرخطی آمیخته با عدد صحیح جهت کاربرد بهینه انرژی در یک‌خانه هوشمند بکار گرفته شده است که علاوه بر کاهش هزینه انرژی مصرفی مشترکین، یک برنامه‌ریزی بهینه در استفاده از تجهیزات خانگی ارائه شده است. در مرجع [۱۹] مقالات علمی گذشته در زمینه‌ی مدیریت انرژی خانه هوشمند به‌صورت هدفمند مرور و مقایسه شده است، در این مرجع چندین روش مدل‌سازی نظیر بهینه‌سازی ریاضی، مدل کنترل پیشگویانه، کنترل ابتکاری و ... برای حصول برنامه بهره‌برداری مناسب و رسیدن به تصمیمات صحیح تولید و مصرف، ارائه شده است. در مرجع [۲۰] برنامه‌ریزی

[1] Multi-Objective Optimization
[2] Home energy management system
[3] Building energy management system
[4] Particle swarm optimization

زمان حقیقی بهره‌برداری از وسایل خانگی در سیستم مدیریت انرژی منازل مورد بررسی قرارگرفته است. در مرجع [۲۱] یک مدل سیستم مدیریت انرژی خانه‌ها به‌منظور کنترل باتری‌های الکتریکی متصل به سلول‌های خورشیدی ارائه گردیده و کارآمدی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۲۲] مدیریت سمت تقاضا در یک ریزشبکه ساختمانی تجاری با ادغام منبع خورشیدی، سیستم مدیریت انرژی باتری و خودروهای برقی متصل به شبکه بررسی شده است. در مرجع [۲۳] هدف مطالعه، بررسی تمایز بین انواع ساختمان‌های مسکونی در کشور سنگاپور و ارائه یک مدل ریاضی برای بیان و مدلسازی پروفیل بار در هر نوع ساختمان است. در مرجع [۲۴] یک الگوریتم ابتکاری برای بهینه‌سازی استفاده یکپارچه از منابع مسکونی چندگانه با در نظر گرفتن مجموعه بزرگی از مکانیسم‌های مدیریت ارایه شده است. در مرجع [۲۵] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه روز-پیش برای سیستم مدیریت انرژی ساختمان تحت تقاضای بار از نوع زمان- استفاده پیشنهاد شده است که در آن منبع انرژی خورشیدی با دیگر منابع تولید با هدف بهینه‌سازی اقتصادی و رفاه ساکنین ادغام شده است. در مرجع [۲۶] مدل دینامیکی جدیدی برای مدیریت انرژی خانه‌ها ارائه شده است که قادر به ادغام بارها و منابع دینامیکی در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری است. مرجع [۲۷] تاکید بر این نکته دارد که مدل های قیمت گذاری برق در زمان واقعی به طور بالقوه می تواند منجر به مزیت های اقتصادی و زیست محیطی در مقایسه با نرخ های ثابت فعلی شود. در مرجع [۲۸] چشم‌اندازی از پیشرفت های نظری اخیر در برنامه ریزی چندسطحی تحت عدم قطعیت، در طراحی یک سیستم مستقل با منابع انرژی تجدید پذیر ارائه شده است. مرجع [۲۹] یک نمونه کتاب راهنمای مهندسی فتوولتائیک است که به مشکلات عملی در ارزیابی و راه‌اندازی سیستم توان فتوولتائیک به‌ویژه در خانه‌های هوشمند پرداخته است. در مرجع [۳۰] نحوه کنترل وسایل خانگی هوشمند به عنوان بخشی از فرآیند اتوماسیون منازل پیشنهاد و شبیه سازی شده است. مرجع [۳۱] موضوع نحوه رعایت حریم خصوصی مصرف‌کنندگان را در فرآیند مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند مطرح و مدل‌سازی نموده و کاربرد روش‌های جدید بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیکی[۱] (GA) و تبرید شبیه سازی شده[۲] (SA) برای حل مساله مدیریت انرژی در نظر گرفته شده است. . در مرجع [۳۲] از روش بهینه سازی ازدحام ذرات برای تحلیل مدیریت انرژی در خانه‌های هوشمند استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مدل پیشنهادی مراجع فوق الذکر، هزینه برخی تجهیزات فرعی نظیر ذخیره سازهای انرژی الکتریکی، سلول‌های خورشیدی و ... لحاظ نگردیده که در این مقاله این موضوع نیز در کنار سایر هزینه‌ها در نظر گرفته شده است.

۳- مدل پیشنهادی

یکی از اهداف عمده در مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند، ملاحظه برخی سازش‌ها و مصالحات بین حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان مسکونی و کاهش هزینه‌های انرژی است. در اینجا یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی و بیشینه‌سازی حفظ حریم خصوصی مصرف-کنندگان پیشنهاد می گردد. روش یاد شده در نهایت به یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه با دو هدف در ابعاد جداگانه تبدیل می‌شود. برای حل این مسئله، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که کارایی مطلوبی در کمینه‌سازی توابع ریاضی دارد برای جستجوی تصادفی و زمان‌بندی توان تجهیزات خانگی استفاده شده است. سیستم مدیریت انرژی خانه هوشمند بر مبنای اطلاعات ورودی‌هایی از قبیل قیمت برق روز بعد، دمای محیط و ... که از شبکه توزیع بالادست، اطلاعات محیطی و پیش‌بینی مصرف روز بعد بارهای پاسخگو و غیر پاسخگو دریافت می‌کند، برنامه روز بعد انواع تجهیزات خانه مفروض (شامل واحدهای فتوولتائیک، ذخیره‌ساز و...) را ارائه می‌کند. ارتباطات و برهم کنش‌های موجود در این فرایند در شکل (۱) ترسیم شده است.



شکل ۱ شمای کلی سیستم مدیریت انرژی در یک خانه هوشمند

در پژوهش این مقاله یک خانه هوشمند مجهز به سیستم مدیریت انرژی، مولد فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی[۳] (باتری)، لوازم خانگی هوشمند و پاسخگو به قیمت برق در نظر گرفته شده است. لوازم الکتریکی خانگی به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول غیر قابل برنامه‌ریزی‌اند و بنابراین پاسخگو به قیمت‌های زمان متغیر برق نیستند و به همین دلیل زمان استفاده و میزان مصرف آن‌ها غیر قابل تغییر است، از جمله این بارها می توان به روشنایی، تلویزیون و رایانه اشاره نمود. دسته دوم لوازم هوشمند بوده که زمان عملکرد آن‌ها قابل جابه‌جایی و میزان مصرفشان نیز قابل تغییر است، از جمله این تجهیزات ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و خشک‌کن لباس است. خانه های هوشمند از نوع متصل به شبکه فرض شده و می‌توانند با آن به تبادل انرژی تحت قیمت بازار برق بپردازند. سیستم مدیریت انرژی با توجه به قیمت‌های پیش‌بینی شده به برنامه‌ریزی زمان استفاده از تجهیزات خانگی (بارهای پاسخگو[۴])، زمان شارژ و تخلیه‌ی منابع ذخیره‌ساز انرژی و همچنین زمان و مقدار خرید/فروش، از/به شبکه‌ی بالادست می‌پردازد. سیستم مدیریت انرژی زمان‌های بهره‌برداری لوازم هوشمند را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کند که هزینه انرژی الکتریکی در افق زمانی مورد نظر کمینه شده و حریم خصوصی مصرف‌کنندگان آن نیز حفظ شود. در خانه های هوشمند مورد نظر به دلیل وجود ذخیره‌ساز و مولد فتوولتائیک، امکان فروش انرژی به شبکه توزیع بالادست نیز وجود دارد که می‌تواند هزینه بهره‌برداری از خانه هوشمند را به میزان قابل توجهی کاهش داده و یا حتی موجب سودآوری در برخی مواقع نیز گردد.

۳-۱- مدل‌سازی سیستم ذخیره سازی انرژی الکتریکی از نوع باتری

[۱] Genetic Algorithm
[۲] Simulated Annealing
[۳] Energy storage
[۴] Responsible

سیستم ذخیره‌سازی اشاره به یک مجموعه باتری دارد که می‌تواند انرژی الکتریکی را ذخیره کند و به وسایل دیگر یا حتی به شبکه اصلی هنگامی که نیاز باشد، تحویل دهد. بدیهی است که باتری نمی‌تواند به‌صورت همزمان در هر دو حالت شارژ و تخلیه باشد بنابر این:

$$x_t^{Bn} + x_t^{Bp} \leq 1 \quad (۱)$$

اگر E_0^B انرژی اولیه ذخیره شده در باتری باشد، میزان انرژی ذخیره شده در باتری تا دوره‌ی t از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$E_t = E_0^B \sum_{m=1}^{t-1} \left(E^{Bp}.x_t^{Bp} - E^{Bn}.x_t^{Bn} \right), t \in [1,24] \quad (۲)$$

رابطه‌ی (۳) تضمین می‌کند که مقدار دشارژ در هر دوره کمتر از مقدار شارژ در دسترس باتری باشد. چون میزان کل انرژی ذخیره شده در باتری محدود است.

$$E^{Bn} x_t^{Bn} \leq E_t \quad (۳)$$

انرژی ذخیره شده در باتری در هرلحظه از زمان باید بین حداقل و حداکثر مجاز خود باشد. محدودیت ظرفیت باتری با نامعادله (۴) بیان می‌شود.

$$E_0^B \leq E_0^B + E^T \leq E^{max,B} \quad (۴)$$

۲-۳- مدل‌سازی سیستم برق خورشیدی(فتوولتائیک)

مولد فتوولتائیک سیستمی است که نور خورشید را مستقیما به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان الکتریکی مولد، تابعی از شدت تابش نور خورشید و دمای محیط است. برای این منظور توان ماژول‌های مولد را در شرایط آزمایش استاندارد اندازه‌گیری نموده و سپس به کمک رابطه (۵) در شرایط مختلف محاسبه می‌کنند[۲۸, ۲۹].

$$P_{PVt} = P_{STC} \frac{G_{INCt}}{G_{STC}} [1 - K(T_{Ct} - T_r)] \quad (۵)$$

۳-۳- محدودیت‌های بهره برداری لوازم خانگی هوشمند

اگر عملکرد تجهیز هوشمند jام را بتوان به i فرآیند مجزا تقسیم نمود، بردار X_{ijt} (بیانگر وضعیت عملکرد) را به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$X_{ijt} = [x_{i,j,1}, x_{i,j,2}, \dots \dots, x_{i,j,T}] \quad (۶)$$

معادله (۶) بیانگر محدودیت زمانی بهره‌برداری وسیله j است، که توسط بهره‌بردار مشخص می‌شود، بدون اینکه آسایش وی تحت تأثیر قرار گیرد. افزایش این بازه منجر به پاسخ بهتری از حل مسئله می‌شود اما می‌تواند رفاه بهره‌بردار را تحت تأثیر قرار دهد، پس فرایند iام تجهیز jباید در این بازه دقیقا یک‌بار انجام شود. این قید در رابطه‌ی (۷) نشان داده شده است[۲۷].

$$\sum_{t=t_j^{st}}^{t_j^{et}} X_{ijt} = 1 \quad (۷)$$

برای عملکرد صحیح دستگاه هوشمند لازم است ترتیب فرآیندهای هر تجهیز هوشمند مطابق پروفیل بار آن صورت گیرد. نامعادله (۸) این محدودیت را بیان می‌کند. به‌عنوان مثال فرایند خشک‌کن برای ماشین لباس‌شویی باید بعد از فرایند شستن لباس انجام شود:

$$\left[\sum_{t2=t1+1}^{T} t_2 . x_{i+1,j,t_2} - \sum_{t_1=1}^{T} t_1 . x_{ij,t_1} \right] \geq \Delta t \quad (۸)$$

نامساوی نشان داده شده در رابطه‌ی (۹) نیز حداکثر زمان وقفه مجاز بین فرآیندهای متوالی دستگاه هوشمند را مدل می‌کند. پارامتر $T_{off-Pr_{i,j}}$ حداکثر وقفه مجاز بین فرآیند i و i+1 مربوط به تجهیز هوشمند j را نشان می‌دهد:

$$\left[\sum_{t2=t1+1}^{T} t_2 . x_{i+1,j,t_2} - \sum_{t_1=1}^{T} t_1 . x_{ij,t_1} \right] . \Delta t \leq T_{off-P_{rij}} \quad (۹)$$

برای جلوگیری از وقوع تراکم توان در شبکه توزیع، حداکثر توان جذب شده از شبکه را می‌توان محدود نمود. محدودیت مذکور با توجه به قرارداد مشتری و شرکت برق، تنظیم شده و عموما به‌صورت متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود. مطابق این محدودیت که در رابطه‌ی (۱۰) بیان شده، مجموع توان مصرفی تجهیزات هوشمند و غیرهوشمند در هر بازه زمانی باید از مقدار توان ماکزیمم مجاز قابل جذب از شبکه بیشتر نشود:

$$\left[P_{nr_t} + \sum_i \sum_j P_{r_{i,j,t}} . X_{i,j,t} \right] \leq P_t^{max} \quad (۱۰)$$

کل انرژی مصرفی لوازم غیر پاسخگو نیز از رابطه (۱۱) در دوره t محاسبه می‌شود:

$$\left[P_{nr_t} + \sum_i \sum_j P_{r_{i,j,t}} . X_{i,j,t} \right] \leq P_t^{max} \quad (۱۱)$$

۴-۳- مدل‌سازی نحوه فروش انرژی

انرژی که قرار است به شبکه برق تزریق شود از طریق مولد فتوولتائیک و یا توسط باتری‌ها تأمین می‌گردد. میزان فروش انرژی در دوره‌ی زمانی t با در نظر گرفتن فقط ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی از رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید[۳۰]:

$$P_{nr_t} = \sum_{k=1}^{Nnr} P_{k,t} \quad (۱۲)$$

فروش انرژی با در نظر گرفتن هر دو عامل مولد فتوولتائیک و باتری نیز طبق رابطه (۱۳) چنین بیان می‌شود:

$$E_t^s = \eta^{B'} (E^{Bn}.x_t^{Bn}) - (1 - \eta^B)(E^{Bp}.x_t^{Bp}) + P_{PVt} \quad (۱۳)$$

که حداکثر توان دریافت شده از شبکه در دوره‌ی t طبق رابطه (۱۴) بیان می شود:

$$P_{nr_t} + \sum_i \sum_j P_{r_{i,j,t}} . X_{i,j,t} + (1 - \eta^B)(E^{Bp}.x_t^{Bp}) - \eta^{B'} (E^{Bn}.x_t^{Bn}) - P_{PVt} \leq P_t^{max} \quad (۱۴)$$

۵-۳- ملاحظه هزینه سرمایه گذاری

در اکثر مطالعات انجام شده پیرامون مسئله‌ی مدیریت انرژی خانه هوشمند، هزینه لوازم و تجهیزات فرعی در نظر گرفته نمی‌شود و این درحالی است که هزینه این قبیل وسایل در مقایسه با سایر تجهیزات قابل ملاحظه است. در اینجا میزان هزینه سالیانه و روزانه مربوطه با روابط (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است[31]:

$$Ann_cost = \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \times Inst_{cost} \quad (۱۵)$$

$$day_cost_i = \frac{Ann_cost_i}{365} \quad (۱۶)$$

۶-۳- تابع هدف

تابع هدف سیستم مدیریت انرژی، به‌صورت کمینه‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری از خانه هوشمند برای مدت یک روز طبق رابطه (۱۷) بیان می‌شود:

$$min\left\{cost=\sum_{t=1}^{T}c_t\times\Delta t\left(P_{nr_t}+\sum_i\sum_j P_{r_{ijt}}\times X_{ijt}-E_t^S\right)+\sum_{i=1}^{Ni}day_cost_i\right\} \quad (۱۷)$$

تابع هدف مسئله با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و مولد فتوولتائیک نیز مطابق رابطه (۱۸) قابل بیان است:

$$cost=\sum_{t=1}^{T}c_t\times\Delta t\begin{pmatrix}-\eta^{B'}\left(E^{Bn}.x_t^{Bn}\right)+(1-\eta^B)\left(E^{Bp}.x_t^{Bp}\right)\\-P_{PVt}+P_{nr_t}+\sum_i\sum_j P_{r_{ijt}}\times X_{ijt}\end{pmatrix}+\sum_{i=1}^{Ni}day_cost_i \quad (۱۸)$$

عبارت آخر مربوط به هزینه الکتریسیته به‌صورت زیر می‌باشد که در واقع هزینه‌ی مصرف توان در یک منزل مسکونی است:

$$P^h=P_{HA}^h+S(h) \quad (۱۹)$$

در رابطه‌ی فوق که P^h بیانگر توان مصرفی در بازه های زمانی را نشان میدهد، P_{HA}^h که مصرف کل توان همه انواع تجهیزات خانگی است به شکل رابطه (۲۰)و S(h) که تابع شارژ و دشارژ است به صورت رابطه (۲۱) بیان می‌شود:

$$\sum P_a^h+\sum P_b^h+\sum P_c^h \quad (۲۰)$$

$$S(h)=S^+(h)-S^-(h)$$
$$S^+(h)=max\{S(h),0\}$$
$$S^-(h)=-min\{S(h),0\} \quad (۲۱)$$

سرانجام تابع هدف مربوط به هزینه توان الکتریکی و تابع هدف بیانگر حفظ حریم مصرف کنندگان به صورت زیر بیان می‌شود که هدف کمینه کردن آنهاست[31]:

$$F_{cost}=\sum_{h=\xi}(P^h\times\Delta h)\times\lambda^h \quad (۲۲)$$

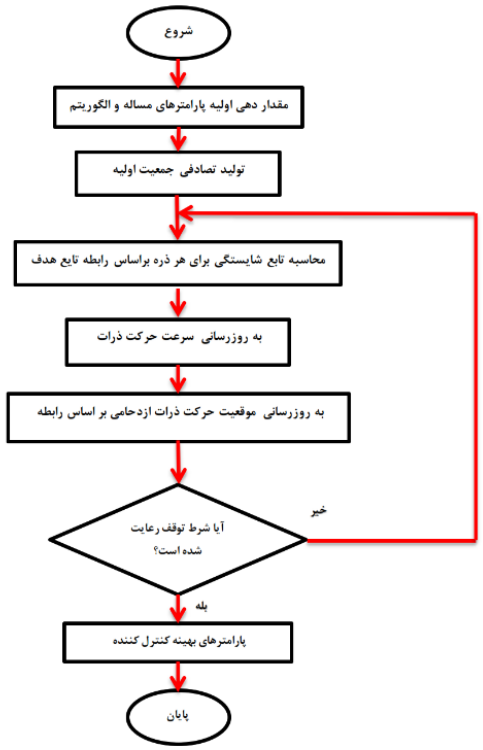
$$F_{privacy}=\frac{1}{|\xi|}\sum_{h\in\xi}(P^h)^2-\left(\frac{1}{|\xi|}\sum_{h\in\xi}P^h\right)^2 \quad (۲۳)$$

که در رابطه (۲۳)، ξ بیانگر شاخص مجموعه بازه های زمانی، P^h توان مصرفی در بازه های زمانی می‌باشد.

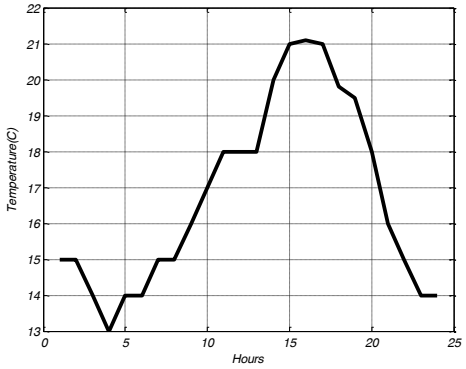
در مورد نحوه تلفیق توابع هدف، لازم به ذکر است که از روش متداول مجموع ضرایب وزنی برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. پس از حل مسئله بهینه‌سازی حاصله، مقادیر انرژی فروخته شده به شبکه در هرلحظه از زمان، انرژی ذخیره شده در باتری، هزینه‌ی بهره‌برداری از مجموعه در طول روز، انرژی مصرفی هر تجهیز هوشمند در هر دوره و شاخص حفظ حریم خصوصی به همراه مقادیر باینری x_t^{Bn} و x_t^{Bp} و $x_{i,j,t}$ (بیانگر عملکرد باتری و لوازم هوشمند) به دست می‌آید.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

با توجه به مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبلی، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مکانیزم بهینه‌سازی برای بهبود هزینه و مدیریت مصرف انرژی تجهیزات هوشمند و همچنین بهبود حریم خصوصی مصرف‌کنندگان در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و خروجی‌های حاصل از آن با لینک نمودن این نرم‌افزار و نرم‌افزار Excel استخراج شده است. داده‌های ورودی که برای حل این مساله حایز اهمیت است، قیمت برخط برق شبکه بالادست و داده‌های مربوط به واحدهای انرژی تجدیدپذیر نظیر میزان تابش نور خورشید که منبع تغذیه اصلی سیستم‌های فتوولتاییک است در نظر گرفته شده است. آخرین پارامتر نیز دمای محیط است. داده‌های مربوط به قیمت برخط برق شبکه‌ی بالادست، دمای محیط و میزان تابش نور خورشید در طول یک روز به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.



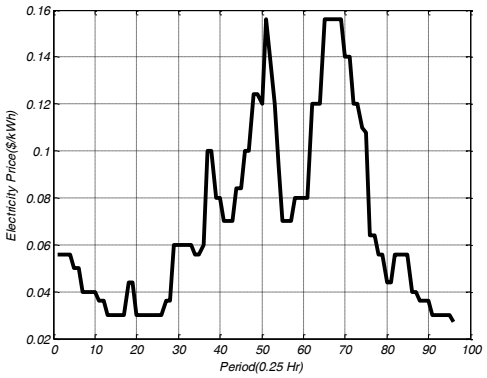
شکل ۲ فلوچارت کلی الگوریتم پیشنهادی بر اساس *PSO*



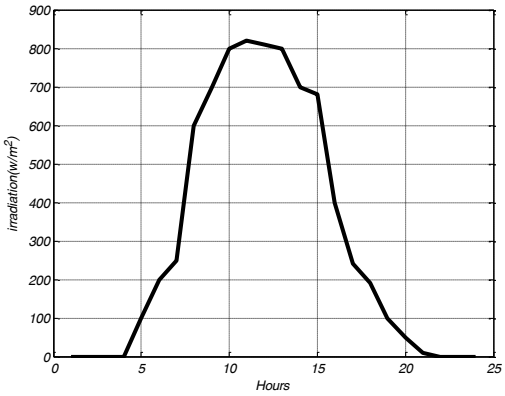
شکل ۳ نمودار تغییرات دمای محیط

اطلاعات مربوط به لوازم غیرپاسخگو (توان مصرفی و مدت زمان) در جدول۱ و اطلاعات مربوط به لوازم هوشمند و مدت زمان استفاده آنها نیز در جدول۲ ارائه شده است.

در شکل ۶ پروفیل بار پاسخگو به قیمت برق نشان داده شده است. نتایج مربوط به مدیریت انرژی خانه هوشمند که شامل توان تولیدی واحد فتوولتاییک، توان مصرفی بارهای غیر پاسخگو به قیمت برق، توان مبادله شده توسط سیستم ذخیره ساز انرژی (باتری) و توان کل مصرفی خانه هوشمند است در شکل های ۷ تا ۱۱ آورده شده است که محور افقی نمودارها بر اساس بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای(ربع ساعته) در نظر گرفته شده و ۲۴ ساعت شامل ۹۶ بازه ۱۵ دقیقه‌ای است.



شکل ۴ نمودار هزینه ساعتی برق در شبکه بالادست



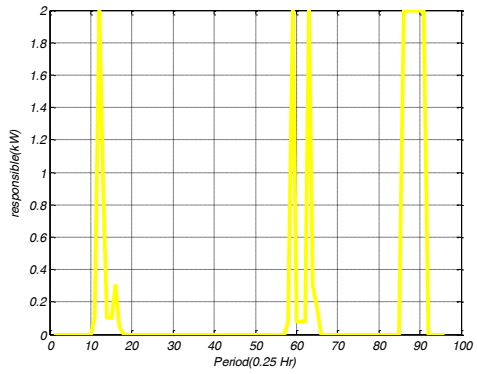
شکل ۵ نمودار میزان تابش انرژی خورشیدی

جدول ۱ اطلاعات لوازم غیر پاسخگو به قیمت برق

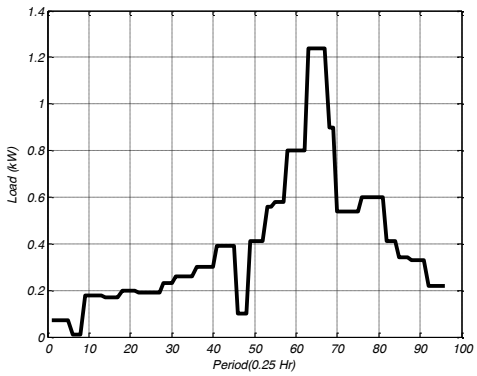
لوازم	ساعات استفاده شده در روز	توان مصرفی (W)
فن	۸	۱۰۰
قهوه‌ساز و چای‌ساز	۰/۳	۳۶۰
کامپیوتر خانگی	۲	۷۵
مانیتور	۲	۱۵۰
سیستم روشنایی	۵	۶۰
ماکروویو	۰/۵	۱۳۰۰
رادیو	۴	۸۰
یخچال	۹	۶۰۰
تلویزیون	۸	۳۰۰
جاروبرقی	۰/۲	۳۶۰
ویدئو	۸	۲۵

جدول ۲ اطلاعات لوازم هوشمند مورد استفاده

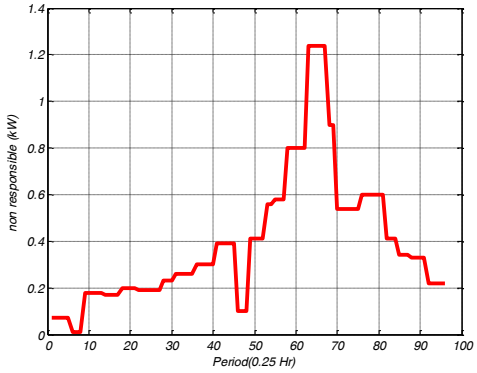
	ماشین لباس‌شوئی	ماشین ظرف‌شوئی	خشک‌کن
زمان شروع	۲:۴۵	۱۳:۳۰	۰۰:۰۰
زمان پایان	۶:۳۰	۱۸:۴۵	۲۴:۰۰
P1(w)	۱۰۰	۸۰	۲۰۰۰
P2(w)	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
P3(w)	۹۰۰	۸۰	۲۰۰۰
P4(w)	۱۰۰	۸۰	۲۰۰۰
P5(w)	۱۰۰	۸۰	۲۰۰۰
P6(w)	۳۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
P7(w)	۵۰	۳۰۰	–
P8(w)	–	۱۵۰	–



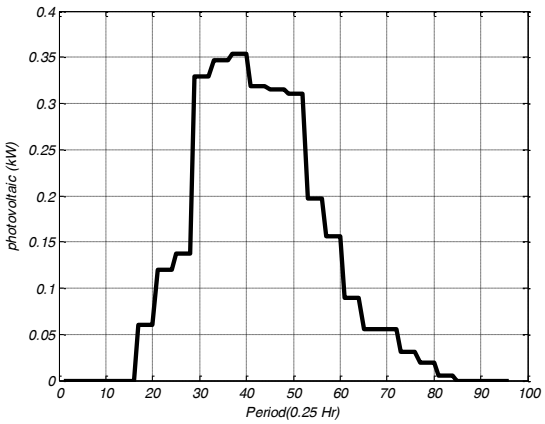
شکل ۶ پروفیل بار پاسخگو به قیمت برق در خانه هوشمند



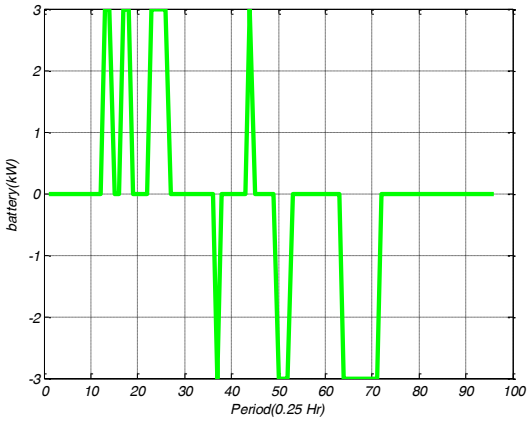
شکل ۷ توان مصرفی بارهای غیر پاسخگو به قیمت برق در خانه هوشمند



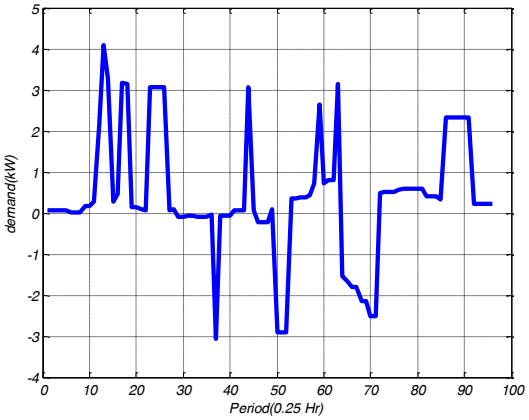
شکل ۸ توان تولیدی واحد فتوولتاییک در خانه هوشمند



شکل۹ توان مصرفی بارهای پاسخگو به قیمت برق در خانه هوشمند



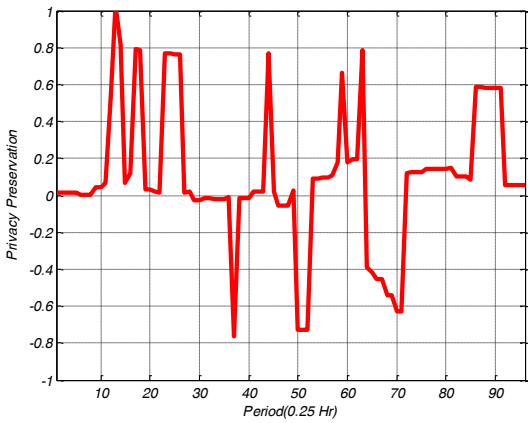
شکل۱۰ توان مصرفی یا تولیدی باتری در خانه هوشمند



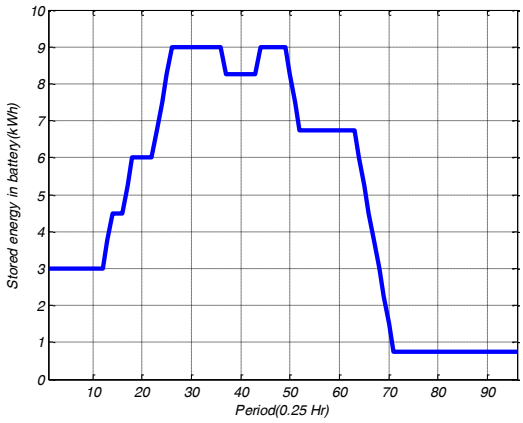
شکل۱۱ توان کل موردنیاز در خانه هوشمند

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌توان گفت که در ساعات اولیه روز که مصرف بارهای غیر پاسخگو و همچنین قیمت برق کم است، باتری در چند مرحله شارژ شده و همچنین یکی از بارهای غیر پاسخگو نیز در این ساعات وارد شبکه شده است. پس از آن در حدود ظهر تابش خورشید به حد بیشینه خود می‌رسد و همین امر موجب می‌شود که تولید سلول‌های خورشیدی نیز به سطح قابل توجهی برسد و تقریبا همه بار الکتریکی خانه را پوشش دهد. در این ساعات به دلیل وقوع اوج(پیک) اولیه قیمت برق، سیستم مدیریت انرژی که در اینجا به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی کاهش هزینه و حفظ حریم خصوصی مصرف-کنندگان در نظر گرفته شده است، موجب شده که باتری دشارژ شود و علاوه بر تأمین بار الکتریکی خانه، به شبکه نیز توان تزریق کند. سپس فرآیندهای مربوط به بارهای پاسخگو با توجه به قیودشان یکی پس از دیگری انجام می‌شود. ملاحظه می‌گردد که در لحظات پیک بار که همزمان با پیک قیمت برق نیز هست، باتری بطور کامل تخلیه شده است.

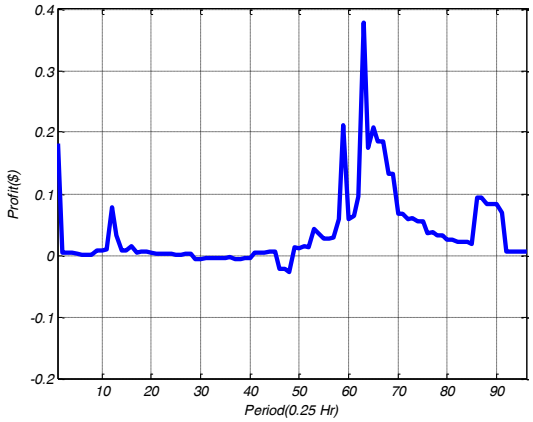
پروفیل شاخص حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان نیز در شکل ۱۲ ارائه شده است که در آن در ساعاتی که اندازه(قدر مطلق) شاخص مربوط به حفظ حریم خصوصی کمتر باشد، حریم خصوصی مصرف‌کنندگان بهتر رعایت شده است. منحنی‌های مربوط به انرژی ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری نیز در شکل ۱۳ آورده شده است. در شکل ۱۴ سود حاصل از مبادله انرژی خانه با شبکه بالادست نمایش داده شده است. علامت منفی در این شکل به معنی هزینه است و ملاحظه می‌گردد که در برخی ساعات و مخصوصا در ساعات اوج مصرف سود کل مثبت بوده است.



شکل ۱۲ توزیع پروفیل شاخص حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان برای یک دوره ۲۴ ساعته در خانه هوشمند



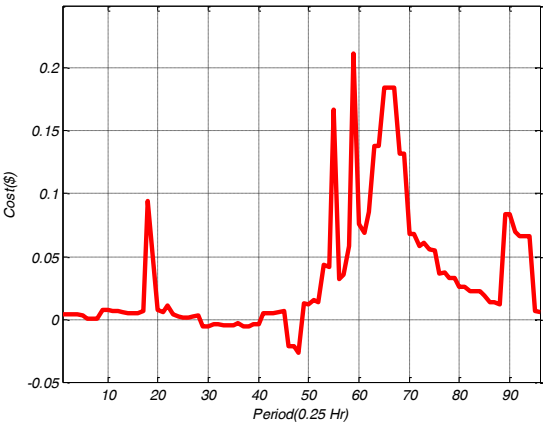
شکل ۱۳ انرژی ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری برای یک دوره ۲۴ ساعته در خانه هوشمند



شکل ۱۴ سود حاصل از مبادله انرژی الکتریکی توسط خانه هوشمند با شبکه بالا دست در یک دوره ۲۴ ساعته

فراهم کردن زیرساخت‌های لازم برای تبدیل یک خانه معمولی به یک خانه هوشمند مستلزم صرف هزینه‌های قابل توجهی است که در برخی از مطالعات این مهم در نظر گرفته نمی‌شود. این درحالیست که در یک مطالعه فنی–اقتصادی برای رسیدن به نتیجه‌ای صحیح باید هزینه سرمایه‌گذاری نیز لحاظ شود. از آنجایی که این هزینه بصورت عدد ثابتی به تابع هزینه اضافه می‌شود، لذا در جزئیات نتایج شبیه‌سازی لوازم خانه هوشمند تأثیری ندارد و صرفا مقدار هزینه نهایی بهره‌برداری را افزایش می‌دهد.

در صورتی که هزینه سرمایه‌گذاری اولیه هیچ یک از لوازم جانبی مذکور از جمله سلول‌های خورشیدی، مبدل‌تکفاز و باتری درنظر گرفته نشود، هزینه بهره‌برداری در طول روز به‌صورت شکل ۱۵ خواهد بود. ملاحظه می‌گردد که با فرضیاتی که بیان شد کابرد تجهیزات فوق‌الذکر در خانه هوشمند حتی با لحاظ هزینه سرمایه گذاری همچنان سودآور بوده و کاملا اقتصادی است. به عنوان نمونه در شبیه‌سازی انجام شده اگر هزینه سرمایه گذاری با احتساب هزینه تعمیر و نگهداری تا حدود ۲۰۰۰ دلار در نظر گرفته شود، هزینه روزانه خانه هوشمند نزدیک به صفر می‌شود و فقط از حالت درآمدزایی خارج می‌شود.



شکل ۱۵ هزینه بهره‌برداری از خانه هوشمند در طول روز بدون در نظر گرفتن سلول‌های خورشیدی، مبدل‌تکفاز و سیستم ذخیره‌ساز باتری

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، هدف ارائه مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از یک خانه هوشمند شامل بارهای پاسخگو، سلول‌های خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی بود که در آن کاهش هزینه و حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان به عنوان شاخص‌های اصلی در نظر گرفته شده است. مبانی مربوط به اهمیت ساختمان‌های هوشمند و موضوع مدیریت انرژی در خانه هوشمند بررسی گردید و مدل‌های ریاضی آن ارائه شد و مزایای کابرد آنها از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی بیان گردید. مدل ریاضی جهت برنامه‌ریزی بهره‌برداری از خانه هوشمند در افق یک شبانه‌روز بر اساس شاخص‌های هدف شامل کاهش هزینه و حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان ارائه گردید. سپس ساختار خانه هوشمند مورد مطالعه معرفی شده و به مدل‌سازی هر یک از اجزاء و معرفی قیود مربوطه پرداخته شد. در پایان به منظور ارزیابی کارامدی روش پیشنهادی یک مطالعه موردی صورت گرفت و نتایج عددی حاصله، بررسی و ارزیابی گردید، همچنین هزینه بهره‌برداری از خانه هوشمند در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به تجهیزات جانبی(سلول‌های خورشیدی، مبدل تکفاز و باتری) ارزیابی شد که در هر دو حالت نتایج بدست آمده اقتصادی بودن استفاده از این تجهیزات را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله می‌توان گفت که سلول‌های خورشیدی با تأمین مقدار قابل توجهی از انرژی الکتریکی مورد نیاز روزانه از یک سو و از سوی دیگر باتری با جابجایی انرژی الکتریکی از ساعات کم بار و کم قیمت به ساعات اوج بار و اوج قیمت موجبات سودآوری را فراهم نموده و بنابراین استفاده از سیستم مدیریت انرژی و تجهیزات هوشمند، موجب سودآوری مالک ساختمان نیز خواهد شد. در صورتی که بخواهیم از جانب بهره‌بردار سیستم توزیع انرژی الکتریکی به این مسئله توجه کنیم باید تجمیع تعداد قابل توجهی از خانه‌های هوشمند و رفتار کلی آنها در کنار یکدیگر مورد مطالعه قرارگیرد. همچنین علاوه بر مسائل اقتصادی باید به برخی چالش‌های حفاظتی و نیز ملاحظات فنی توجه خاصی معطوف شود. پیشنهاد یک روش بهینه‌سازی کارا و قدرتمند، نحوه مدل‌سازی مشخصات و محدودیت‌های فنی و اقتصادی ساختمان و همچنین نحوه لحاظ کردن بارهای شبکه از مواردی است که در این مقاله تشریح گردید که می‌تواند در تحقیقات علمی و کاربردی آینده مورد استفاده قرار گیرد. برای ادامه این پژوهش، پیشنهادات مختلفی نظیر ملاحظه عدم قطعیت برای عوامل مختلف مانند بار شبکه و ...، در نظر گرفتن سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و پیل‌های سوختی و نیز استفاده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری و فراابتکاری مناسب جهت طراحی و بهره‌برداری ساختمان‌های سبز و هوشمند به‌ویژه ساختمان‌های انرژی صفر، قابل ارائه است.

۶- فهرست علائم و نمادها

B_P	شارژ باتری
B_n	دشارژ باتری
$X_t^{B_p}$	متغیر حالت شارژ باتری
$X_t^{B_n}$	متغیر حالت دشارژ باتری
E_0^B	انرژی اولیه ذخیره شده در باتری (W)
E^{B_p}	نرخ ثابت شارژ باتری
E^{B_n}	نرخ ثابت دشارژ باتری
E_t	انرژی ذخیره شده در باتری (W)
$E^{max,B}$	ظرفیت سیستم ذخیره ساز (W)
G_{INC}	میزان تابش خورشید (w/m^2)
G_{STC}	تابش خورشید در شرایط استاندارد(w/m^2)
k	ضریب دمای توان مولد فتوولتائیک

P_{STC}	حداکثر توان مولد فتوولتائیک در شرایط استاندارد(W)
T_{CT}	دمای محیط (°C)
T_r	دمای مرجع مولد فتوولتائیک (°C)
P_{pvt}	توان تولیدی مولد فتوولتائیک (W)
X_{ij}	وضعیت عملکرد وسیله هوشمند
t_j^{st}	زمان شروع کار وسیله هوشمند (t)
t_j^{et}	زمان اتمام کار وسیله هوشمند (t)
$T_{off-P_{rij}}$	حداکثر زمان وقفه مجاز (t)
P_t^{max}	ماکزیمم توان(W)
P_{rij}	مجموع توان مصرفی تجهیزات هوشمند (W)
P_{nr_t}	مجموع توان مصرفی تجهیزات غیرهوشمند (W)
$P_{k,t}$	توان تجهیز غیر هوشمند (W)
η^B	راندمان تبدیل AC به DC ذخیره ساز
$\eta^{B'}$	راندمان تبدیل DC به AC ذخیره ساز
r	نرخ بهره سالیانه
Ann_cost	هزینه سالیانه ($)
$Inst_cost$	هزینه اولیه احداث ($)
n	عمر مفید
day_cost_i	هزینه روزانه تجهیز ($)
E_t^S	میزان انرژی تزریقی به شبکه
T	بازه زمانی برنامه ریزی روز بعد
P^h	توان مصرفی کل ساختمان (W)
P_{HA}^h	توان مصرفی لوازم خانگی (W)
P_a^h	توان مصرفی وسایل انعطاف پذیر و جابه حایی پذیر (W)
P_b^h	توان مصرفی وسایل انعطاف پذیر (W)
P_c^h	توان مصرفی وسایل جابه حایی پذیر (W)
$S_{(h)}$	تابع شارژ و دشارژ باتری (W)
$S^+(h)$	تابع شارژ باتری (W)
$S^-(h)$	تابع دشارژ باتری (W)
F_{cost}	تابع هزینه توان الکتریکی
$F_{privacy}$	تابع حریم خصوصی مصرف کنندگان

۷- مراجع

[1]S. Lee, B. Kwon, and S. Lee, "Joint energy management system of electric supply and demand in houses and buildings," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 29, pp. 2804-2812, 2014.

[2]H. T. Nguyen, D. T. Nguyen, and L. B. Le, "Energy management for households with solar assisted thermal load considering renewable energy and price uncertainty," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 6, pp. 301-314, 2015.

[3] H.-C. Sun and Y.-C. Huang, "Optimization of power scheduling for energy management in smart homes," *Procedia engineering,* vol. 38, pp. 1822-1827, 2012.

[4] M. Braham, T. Miller, A. E. Duerr, M. Lanzone, A. Fesnock, L. LaPre, *et al.*, "Home in the heat: dramatic seasonal variation in home range of desert golden eagles informs management for renewable energy development," *Biological Conservation,* vol. 186, pp. 225-232, 2015.

[5] M. Santamouris, C. Cartalis, A. Synnefa, and D. Kolokotsa, "On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review," *Energy and Buildings,* vol. 98, pp. 119-124, 2015.

[6] A. B. Haney, T. Jamasb, L. M. Platchkov, and M. G. Pollitt, "Demand-side management strategies and the residential sector: lessons from international experience," *The Future of Electricity Demand: Customers, Citizens and Loads,* 2010.

[7] P. Du and N. Lu, "Appliance commitment for household load scheduling," *IEEE transactions on Smart Grid,* vol. 2, pp. 411-419, 2011.

[8] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Transactions on power systems,* vol. 25, pp. 371-380, 2010.

[9] X. Guan, Z. Xu, and Q.-S. Jia, "Energy-efficient buildings facilitated by microgrid," *IEEE Transactions on smart grid* ,vol. 1, pp. 243-252, 2010.

[10]N. Batista, R. Melício, J. Matias, and J. Catalão, "Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid," *Energy,* vol. 49, pp. 306-315, 2013.

[11]K .M. Tsui and S.-C. Chan, "Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 3, pp. 1812-1821, 2012.

[12]Z. Hong, P. Li, and W. Jingxiao, "Context-aware scheduling algorithm in smart home system," *China Communications,* vol. 10, pp. 155-164, 2013.

[13]M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner, and I. F. MacGill, "Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 1, pp. 134-143, 2010.

[14]M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier, and M. F. Uddin, "Smart microgrids: Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 5, pp. 239-250, 2014.

[15]A. Sleman and R. Moeller, "SOA distributed operating system for managing embedded devices in home and building automation," *IEEE Transactions on Consumer Electronics,* vol. 57, 2011.

[16]Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin, and K.-B. Song, "An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 4, pp. 1391-1400, 2013.

[17]Y.-Y. Hong, J.-K. Lin, C.-P. Wu, and C.-C. Chuang, "Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 3, pp. 1603-1610, 2012.

[18]A. Anvari-Moghaddam, H. Monsef, and A. Rahimi-Kian, "Optimal smart home energy management considering energy saving and a comfortable lifestyle," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 6, pp. 324-332, 2015.

[19]M. Beaudin and H. Zareipour, "Home energy management systems: A review of modelling and complexity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 45, pp. 318-335, 2015.

[20]Z. Wu, S. Zhou, J. Li ,and X.-P. Zhang, "Real-time scheduling of residential appliances via conditional risk-at-value," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 5, pp. 1282-1291, 2014.

[21]Y. Iwafune, T. Ikegami, J. G. da Silva Fonseca Jr, T. Oozeki, and K. Ogimoto, "Cooperative home energy management using batteries for a photovoltaic system considering the diversity of households," *Energy Conversion and Management,* vol. 96, pp. 322-329, 2015.

[22]Y. Wang, B. Wang, C.-C. Chu, H. Pota, and R. Gadh, "Energy management for a commercial building microgrid with stationary and mobile battery storage," *Energy and Buildings,* vol. 116, pp. 141-150, 2016.

[23]L. Chuan and A. Ukil, "Modeling and validation of electrical load profiling in residential buildings in Singapore," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 30, pp. 2800-2809, 2015.

[24]A. Soares, Á. Gomes, C. H. Antunes, and C. Oliveira, "A Customized Evolutionary Algorithm for Multiobjective Management of Residential Energy Resources," *IEEE Transactions on Industrial Informatics* ,vol. 13, pp. 492-501, 2017.

[25]F. Wang, L. Zhou, H. Ren, X. Liu, S. Talari, M. Shafie-khah, *et al.*, "Multi-objective optimization model of source-load-storage synergetic dispatch for building energy system based on TOU price

demand response," *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2017.

[26]O. Elma, A. Taşcıkaraoğlu, A. T. İnce, and U. S. Selamoğulları, "Implementation of a dynamic energy management system using real time pricing and local renewable energy generation forecasts," *Energy,* vol. 134 ,pp. 206-220, 2017.

[27]A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," *IEEE transactions on Smart Grid,* vol. 1, pp. 120-133, 2010.

[28]E. Gavanidous and A .Bakirtzis, "Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods," *IEEE Transactions on Energy Conversion,* vol. 7, pp. 42-48, 1992.

[29]F. Lasnier, *Photovoltaic engineering handbook*: Routledge, 2017.

[30]S. Nistor, J. Wu ,M. Sooriyabandara, and J. Ekanayake, "Cost optimization of smart appliances," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, 2011, pp. 1-5.

[31]H.-H. Chang, W.-Y. Chiu, and C.-M. Chen, "User-centric multiobjective approach to privacy preservation and energy cost minimization in smarthome,"IEEE Syst. J., vol. 13, no. 1, pp. 1030–1041, Mar. 2019.

[32]J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*, ed: Springer, 2011, pp. 760-766.