Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 2-17, 2023

An Energy Democracy Model for Energy Communities Based on the Prosumers' Preferences and Peer-to-Peer Energy Trading

Peyman Afzali[1], Masoud Rashidinejad[2*], Amir Abdollahi[3], Mohammad Reza Salehizadeh[4], Hossein Farahmand[5]

[1] *Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*
peymanafzali92@gmail.com
[2] *Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*
mrashidi@uk.ac.ir
[3] *Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*
a.abdollahi@uk.ac.ir
[4] *Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran*
salehizadeh@miau.ac.ir
[5] *Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*
hossein.farahmand@ntnu.no

Keywords:
energy democracy
peer-to-peer energy trading
prosumer' preferences
technical-economic-social strategy
energy community

Original Research Article

Paper History:
Received: 11/11/2021
Accepted: 29/08/2022

Abstract: One of the new concepts in line with the development and decentralization of smart grids is energy democracy. Energy democracy means possible, easy, and non-discriminatory access to energy for all consumers. The presence of smart buildings in the smart grid as prosumers that can both produce and consume clean energy can contribute to the development of decentralization and decarbonization in electricity industry. An energy community includes a set of energy users as well as energy resources and energy consumption. Prosumers can participate in peer-to-peer (P2P) energy trading through appropriate communication infrastructures and contribute to the energy supply of the energy community. In this paper, the problem of energy management of smart grids, including energy communities, was solved while promoting energy democracy for the presence of smart buildings in P2P energy trading and residential demand response programs. An energy democracy model for the set of energy users including prosumers and managers within energy communities was introduced according to the concept of users' preferences. In this paper, prosumers were classified into three flexible, economy-oriented, and community-oriented categories according to their preferences. Also, managers of energy communities were classified into two categories according to their preferences: managers with an interactive approach and managers with a non-interactive approach. The problem was solved by the CPLEX method in GAMS software. The results showed that the proposed approach improved energy democracy in the smart grid.

How to cite this article: Afzali, P., Rashidinejad, M., Abdollahi, A., Salehizadeh, M. R., Farahmand, H., "*An Energy Democracy Model for Energy Communities Based on the Prosumers' Preferences and Peer-to-Peer Energy Trading*", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 2-17, 2023.https://doi.org/10.22052/JEEM.2023.113709
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license.(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Introduction

One of the new concepts in the development and decentralization of smart grids is energy democracy. Energy democracy means possible, easy, and non-discriminatory access to energy for all consumers. The presence of smart buildings in the smart grid as prosumers that can both produce and consume clean energy can help develop decentralization and decarbonization in electricity industry. An energy community includes a collection of energy users as well as energy resources and demands. Self-generated end users with appropriate communication infrastructures can participate in peer-to-peer energy trading and help supply energy for the energy community. In this paper, the problem of smart grid energy management including energy communities was solved to promote energy democracy for the presence of smart buildings in residential demand response programs and peer energy trading. An energy democracy model was introduced for a set of energy users, including prosumers and managers within energy communities.

Materials and Methods

The proposed framework for smart grid energy management including energy communities is to perform energy scheduling according to prosumers' preferences and energy community managers' preferences. Each of the energy communities includes smart buildings. Energy planning of each smart building can be done by an energy management system. Each prosumer has the ability to trade energy through a peer-to-peer platform with its neighbors and to trade energy with the upstream grid through communication with the energy community manager. Every smart home appliance is divided into two categories: interruptible (such as washing machine, vacuum cleaner, etc.) and uninterruptible (such as lighting). Each prosumer can participate in the demand response program to reduce their interruptible load at peak times and receive incentives from distribution network operators. Furthermore, each prosumer can own a photovoltaic system and can meet their demands by self-consumption of the photovoltaic system or by purchasing energy from the upstream grid. Besides, additional energy can be sold to the upstream grid by contacting the energy community manager. The mixed integer linear programming (MILP) model of the optimal energy management problem for a smart grid consisting of several energy communities is solved by CPLEX in GAMS software.

Results

Energy democracy of end-users of smart grids depends on the value of prosumers' self-consumption, participation of prosumers in demand response programs, energy exchange with upstream network, energy exchange through peer-to-peer energy trading, charging and discharging electric vehicles in parking lots and energy exchange with other energy communities. The preference of prosumers within energy communities --depending on whether they are flexible, economy-oriented, or community-oriented-- as well as the preference of energy community managers --depending on whether they have an interactive or a non-interactive approach-- can affect energy democracy in smart grids. The results showed that the energy community manager No. 3, due to its non-interactive approach with other energy communities, preferred a larger share in charging and discharging electric vehicles inside its own electric vehicles' parking lot to supply energy related to its own energy community than energy community managers No. 2 and 3 that had an interactive approach. Furthermore, energy community No. 1 sold energy to energy communities No. 2 and 3 at 9 pm, when the peak load of energy communities occurred, and to energy community No. 2 at midnight. In general, the more the buildings and the energy communities could reduce their dependence on the upstream grid, the further energy could be supplied locally and theless pressure was applied to the upstream grid.

Discussion and Conclusion

This paper optimizes the energy management of a smart grid involving energy communities with the goal of maximizing energy democracy. In order to model energy democracy, prosumers were classified into three categories according to their preferences: flexible, economy-oriented, and community-oriented. Also, managers of energy communities were classified according to their preferences into two categories: managers with an interactive approach and managers with a non-interactive approach. The results showed that smart grid energy democracy depends on the amount of the available energy of photovoltaic systems for energy consumption or energy exchange such as self-consumption as well as the participation of prosumers in demand response programs, energy exchange with upstream network, energy exchange through peer-to-peer energy trading, charging and discharging electric vehicles, and the exchange of energy with other energy communities.

نشریه مهندسی و مدیریت انرژی
سال سیزدهم، شمارهٔ دوم/ تابستان ۱۴۰۲/ صفحه ۲ـ۱۷

یک مدل دموکراسی انرژی برای اجتماع‌های انرژی براساس ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید و تجارت انرژی همتا به همتا

پیمان افضلی[۱]، مسعود رشیدی‌نژاد[۲]*، امیر عبداللهی[۳]، محمدرضا صالحی‌زاده[۴]، حسین فرهمند[۵]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، peymanafzali92@gmail.com
[۲] استاد، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، mrashidi@uk.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، a.abdollahi@uk.ac.ir
[۴] استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران salehizadeh@miau.ac.ir
[۵] دانشیار، دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی برق، دانشگاه علوم و فناوری نروژ، تروندهایم، نروژ hossein.farahmand@ntnu.no

چکیده: یکی از مفاهیم جدید در راستای توسعه و غیرمتمرکزسازی شبکهٔ هوشمند، دموکراسی انرژی است. دموکراسی انرژی به‌معنای دسترسی ممکن، آسان و بدون تبعیض به انرژی برای تمام مصرف‌کننده‌هاست. حضور ساختمان‌های هوشمند در شبکهٔ هوشمند به‌عنوان مصرف‌کنندگان خودتولید که هم امکان مصرف و هم تولید انرژی پاک را دارند، می‌تواند به توسعهٔ غیرمتمرکزسازی و کربن‌زدایی در صنعت برق کمک کند. یک اجتماع انرژی شامل مجموعه‌ای از کاربران انرژی و همچنین منابع و مصارف انرژی است. کاربران انرژی خودتولید توسط زیرساخت ارتباطی مناسب می‌توانند در مبادلهٔ انرژی همتا به همتا شرکت کنند و به تأمین انرژی اجتماع انرژی کمک کنند. در این مقاله، مسئلهٔ مدیریت انرژی شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی در راستای توسعهٔ دموکراسی انرژی به‌منظور حضور ساختمان‌های هوشمند در تجارت انرژی همتا به همتا و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار خانگی حل شده است. یک مدل دموکراسی انرژی برای مجموعه کاربران انرژی شامل مصرف‌کنندگان خودتولید و مدیران درون اجتماع‌های انرژی براساس مفهوم ترجیحات کاربران معرفی شده است. در این مقاله، مصرف‌کنندگان خودتولید با توجه به ترجیحات خود به سه دستهٔ انعطاف‌پذیر، اقتصادمحور و اجتماع‌محور طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین، مدیران اجتماع‌های انرژی نیز با توجه به ترجیحات خود به دو دستهٔ مدیر با رویکرد تعاملی و مدیر با رویکرد غیرتعاملی طبقه‌بندی شده‌اند. مسئله توسط روش CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی دموکراسی انرژی را در شبکهٔ هوشمند بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:
دموکراسی انرژی
تجارت انرژی همتا به همتا
ترجیحات مصرف‌کنندهٔ خودتولید
راهبرد فنی-اقتصادی-اجتماعی
اجتماع انرژی

مقاله علمی‌پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

https://doi.org/10.22052/JEEM.2023.113709

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعات مرتبط با مشارکت مصرف‌کنندگان خودتولید[1] در تأمین انرژی محلی در شبکهٔ هوشمند، ترجیحات اجتماعی، اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی آن‌هاست. ترجیحات یک مصرف‌کنندهٔ خودتولید می‌تواند جنبه‌های غیرمالی داشته باشد. عوامل مختلفی بر شکل‌گیری ترجیحات و نگرش آن‌ها تأثیر می‌گذارد. ازطرف دیگر، وزن و اولویت این ترجیحات می‌تواند متفاوت باشد. با توجه به پتانسیل رو به رشد تجارت انرژی همتا به همتا (P2P) در میان خانه‌های هوشمند، مصرف‌کنندگان خودتولید می‌توانند برق مازاد خود را با همسایگان خود در بازار انرژی محلی معامله کنند، محرک‌های مشارکت در این طرح تجاری نیاز به مطالعه دارند. در مرجع [۱]، به نقش خانه‌های هوشمند در تأمین انرژی شبکه‌های هوشمند و مدیریت مصرف انرژی پرداخته شده است. در این مرجع، مسئلهٔ مدیریت بار خانگی برای چند خانهٔ هوشمند با وسایل خانگی معین با هدف کاهش هزینهٔ پرداختی مشترک و هزینهٔ بار ازدست‌رفته حل شده است. در مرجع [۲]، بهینه‌سازی انرژی برای ساختمان‌های هوشمند بر پایهٔ روش احتمالی تحلیل بازدهی مصرف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت انجام شده است. این مرجع حساسیت روش پیشنهادی را نسبت به تغییر شرایط آب‌وهوایی ارزیابی کرده است. تحقیقات اندکی در مورد نقش انگیزه‌های غیرمالی برای تجارت برق مازاد، به‌رغم نقش بالقوه مهم آن‌ها انجام شده است. در مرجع [۳]، ترجیحات تجارت برق با توجه به پارامترهای اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی براساس داده‌های نظرسنجی روی چندین مشتری تحلیل شده است. بر این اساس، این مرجع از منابع مرتبط با تجارت انرژی P2P، دانش و تجربهٔ قبلی محققان و همچنین ازطریق مصاحبه با مشتریان و کارشناسان، ویژگی‌هایی را استخراج کرده است. برخی از این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: آلودگی‌های محیط‌زیستی، ارتباط اجتماعی با شریک اجتماعی برق، قیمت فروش، بهبود بهره‌وری و خودکفایی. هریک از این ویژگی‌ها می‌توانند در سطوح مختلف ارزش متفاوتی داشته باشند.

در سال‌های اخیر، اصطلاح دموکراسی انرژی به‌ویژه درزمینهٔ پیشروی به‌سمت تولید کمتر آلودگی کربن که نیازمند بررسی مسائل محیط‌زیستی و تحولات گستردهٔ اجتماعی-اقتصادی-سیاسی است، محبوبیت بیشتری پیدا کرده است. در مرجع [۴]، به مروری بر مطالعات اجتماعی و تئوری‌های سیاسی درزمینهٔ دموکراسی انرژی پرداخته و اصول اتخاذ دموکراسی انرژی، مردم و ذی‌نفعان درگیر و همچنین تمرکز مادی و جغرافیایی دموکراسی انرژی بررسی شده است. برطبق این مرجع، دموکراسی انرژی مفهومی است که عمدتاً ناشی از جنبش‌های اجتماعی است. مفاهیم مختلفی در ارتباط با دموکراسی انرژی بیان شده است. یک ایدهٔ اولیه توسط یک گروه مستقر در برلین در سال ۲۰۱۲ منتشر شد [۵]. این مطالعه خواستار انتقال ۱۰۰٪ به‌سمت انرژی‌های تجدیدپذیر در سریع‌ترین زمان ممکن و اصلاح مالکیت در تولید انرژی است. با این نگرش، دسترسی به انرژی برق افزایش خواهد یافت. بااین‌حال، انرژی باید به‌گونه‌ای تولید شود که به محیط‌زیست آسیب وارد نشود. به‌طور خاص، این به‌معنای استفاده نکردن از سوخت‌های فسیلی، دموکراسی در تأمین انرژی و تغییر نگرش نسبت به مصرف انرژی است. در سال ۲۰۱۴، مفهوم دموکراسی انرژی در شهر بولون-بیلانکورت واقع در فرانسه ترویج شد [۶]. شهرداران بلومبرگ یک چشم‌انداز ابتکاری از دموکراسی انرژی ارائه دادند که مبتنی بر کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و ایجاد یک سیستم تشویقی به‌منظور تشویق شهروندان به کاهش مصرف انرژی خود بوده است. دموکراسی انرژی، دسترس‌پذیری برق و همچنین انعطاف‌پذیری انتخاب منبع انرژی را افزایش می‌دهد. توسعهٔ پایدار انرژی به رشد اقتصادی کمک خواهد کرد و در اقتصادهای نوظهور موجب اشتغال‌زایی می‌شود. تولید در مقیاس کوچک و یا تولید پراکندهٔ یک سازوکار کارآمد برای دموکراتیک کردن عرضه در بازار است. علاوه بر این، نوآوری‌های جدید در فناوری ساخت ذخیره‌سازهای مقیاس کوچک برای پیاده‌سازی در سطح مصرف‌کننده، انقلابی در این زمینه ایجاد کرده است [۷].

مطالعات بسیاری بر روی تجارت انرژی همتا به همتا تمرکز کرده‌اند. در مرجع [۸]، یک مدل تجارت انرژی همتا به همتا برای سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت پیل سوختی خانگی ارائه شده است. این مرجع مدیریت انرژی بهینه را در گروهی از خانه‌های دارای سیستم‌های ذکرشده به‌منظور افزایش خودکفایی و انعطاف‌پذیری این اجتماع محلی انجام داده است. مسئلهٔ بهینه‌سازی این سیستم تجارت بهینهٔ انرژی همتا به همتا به‌دلیل وابستگی غیرخطی توان و بازده گرما به توان خروجی پیل سوختی، غیرمحدب است. بنابراین، این مرجع یک روش خطی‌سازی برای محدب کردن مسئله ارائه داده است. در مرجع [۹]، یک مدل برای مدیریت انرژی همتا به همتا بهینه بین مصرف‌کنندگان خودتولید متصل به شبکهٔ دارای سیستم فتوولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی پیشنهاد شده

1. Prosumers

است. سیستم پیشنهادی شامل دو نوع مصرف‌کنندهٔ خودتولید مختلف است؛ یک مصرف‌کنندهٔ خودتولید خانگی که یک سیستم فتوولتائیک روی پشت‌بام خانهٔ خود به‌همراه قابلیت ذخیره کردن انرژی آن در سیستم ذخیره‌ساز انرژی دارد و دیگری مصرف‌کنندهٔ خودتولید تجاری دارای سیستم فتوولتائیک با قابلیت ردیابی دوگانه. مصرف‌کنندگان خودتولید ازطریق خطوط برق برای بهره‌برداری همتا به همتا به یکدیگر متصل‌اند. مدل توسعه‌یافته با به حداکثر رساندن استفاده از توان منابع انرژی تجدیدپذیر، هزینه‌های بهره‌برداری هر دو مصرف‌کنندهٔ خودتولید را به حداقل می‌رساند. در مرجع [۱۰]، تجارت انرژی همتا به همتا برای اجتماع‌های انرژی با سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در حضور ذخیره‌ساز خودروهای هیدروژنی بهینه‌سازی شده است. یک مدل قیمت تجارت انرژی همتا به همتای انفرادی برای هرکدام از اجتماع‌های انرژی ارائه شده است. مدیریت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از نوع زمان استفاده برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکهٔ بالادست انجام شده است. در مرجع [۱۱]، یک سیستم توزیع‌شده برای تجارت انرژی همتا به همتا بر پایهٔ فناوری بلاک‌چین با در نظر گرفتن شاخص عدالت طراحی شده است. در مرجع [۱۲]، طرح قیمت‌گذاری مناسب با حفظ حریم خصوصی شرکت‌کنندگان ارائه شده است. همچنین یک سازوکار قیمت‌گذاری حفظ حریم خصوصی برای تجارت انرژی همتا به همتا در یک ریزشبکه شامل اجتماعی از مصرف‌کنندگان ارائه شده است. تعدادی از مقالات به کاربرد تئوری بازی در مسئلهٔ تجارت انرژی همتا به همتا پرداخته‌اند. برای مثال، مرجع [۱۳] یک مدیریت اشتراک انرژی همتا به همتا بر پایهٔ تئوری بازی برای یک اجتماع ساختمان‌های انرژی به‌منظور ارتقای بهره‌وری انرژی ارائه داده است. ساختمان‌های انرژی دارای واحدهای قابل‌کنترل گرمایش و تهویهٔ هوا و همچنین منابع انرژی تجدیدپذیرند. در حالت تبادل انرژی همتا به همتا، ساختمان‌ها پروفایل‌های اشتراک‌گذاری انرژی خودشان و پرداخت‌های مربوط به آن‌ها را در اجتماع انرژی تعیین می‌کنند، درحالی‌که هم تعادل انرژی اشتراکی و هم تعادل پرداخت به انرژی برآورده شود. در مرجع [۱۴]، یک رویکرد تجارت انرژی همتا به همتا بر پایهٔ تئوری بازی برای ریزشبکه‌های مجازی در شبکه‌های هوشمند ارائه شده است. بر این اساس، سودآوری مصرف‌کنندگان خودتولید با مدل‌سازی تعاملات تجارت انرژی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در یک ریزشبکهٔ مجازی به‌صورت یک بازی استاکلبرگ که در آن تولیدکنندگان رهبری و مصرف‌کنندگان نیز پیروی می‌کنند، بهینه‌سازی شده است.

تعدادی از مطالعات بر روی فناوری بلاک‌چین و کاربرد آن در تجارت انرژی همتا به همتا تمرکز کرده‌اند. برای مثال، مرجع [۱۵] در راستای حرکت به‌سمت ایجاد ریزشبکه‌های پایدار، از بستر تجارت انرژی همتا به همتا بر پایهٔ فناوری بلاک‌چین بهره برده است. در این مرجع با اهداف بهینه‌سازی اقتصادی و محیط‌زیستی ریزشبکهٔ پایدار، از یک رویکرد ابتکاری استفاده شده که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک با مدل فازی است. همچنین، مرجع [۱۶] یک چهارچوب تجارت همتا به همتا بر پایهٔ فناوری بلاک‌چین با ادغام بازارهای انرژی و آلودگی کربن ارائه داده است. نقش نوظهور مصرف‌کنندگان خودتولید، چالش‌هایی برای تشخیص رفتارهای انتشار کربن آن‌ها و همچنین فرمول‌بندی طرح قیمت‌گذاری به وجود آورده است. چهارچوب پیشنهادی این مرجع، یک بستر غیرمتمرکز برای تبادل انرژی و حد مجاز تولید کربن معرفی می‌کند.

یکی از بسترهای جدید برای بهره‌برداری اقتصادی در ریزشبکه‌ها، مبادلهٔ انرژی در بین مصرف‌کنندگان خودتولید است که این مبادله می‌تواند به‌صورت همتا به همتا با سایر مصرف‌کنندگان خودتولید و یا با شبکهٔ بالادست باشد. انرژی تجدیدپذیر تولیدشده می‌تواند به‌صورت خودمصرفی، ذخیره و یا مبادله با سایرین مورد استفاده قرار گیرد [۱۷]. در مرجع [۱۸]، تعدادی مصرف‌کنندهٔ خودتولید دارای سیستم ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده و یک روش مبادلهٔ انرژی برای آن‌ها ارائه شده است. به این صورت که مصرف‌کنندگان برای تعادل توان ریزشبکه و به حداقل رساندن تلفات توان می‌توانند انرژی مازاد خود را با یکدیگر مبادله کنند که درنتیجه باعث کاهش ظرفیت استفاده از باتری و همچنین کاهش هزینه‌ها می‌شود. در مرجع [۱۹]، نشان داده است که مبادلهٔ انرژی همتا به همتا ازنظر اقتصادی نسبت به مبادلهٔ مستقیم با شبکهٔ بالادست بهتر است. یک بازار برق محلی برای مبادلهٔ انرژی همتا به همتا ارائه می‌شود و مصرف‌کنندگان خودتولید مسکونی میزان توان تولیدی و مصرفی خود را تعیین می‌کنند تا میزان پرداخت به قبض‌های برق و وابستگی به شبکهٔ بالادست را به حداقل برسانند. تشویق مصرف‌کنندگان خودتولید به تجارت همتا به همتا و استفاده از مزایای آن بستگی به معاملات مالی بین مصرف‌کنندگان خودتولید خریدار و فروشنده دارد؛ بنابراین، مدل‌های قیمت‌گذاری انرژی کاربردهای فراوانی دارند و بدون مدل قیمت‌گذاری انرژی مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دشوار است [۲۰]. در جدول (۱)، منابع مرورشده در این مقاله از منظر جنبه‌های فنی تفکیک و طبقه‌بندی شده‌اند و همچنین کار پیشنهادی در این مقاله با آن‌ها مقایسه شده است.

جدول (۱): تفکیک منابع مرورشده و مقایسهٔ کار پیشنهادی در این مقاله با آن‌ها

مرجع	تجارت انرژی همتا به همتا	برنامهٔ پاسخ‌گویی بار	عدم قطعیت	مدل قیمت‌گذاری انرژی	ترجیحات مصرف‌کنندگان	اجتماع انرژی	دموکراسی انرژی
[۱]	–	❋	–	–	–	–	–
[۲]	–	❋	❋	–	–	–	–
[۳]	❋	❋	–	–	❋	–	–
[۴–۷]	–	–	–	–	–	–	❋
[۸–۹]	❋	–	–	–	–	–	–
[۱۰–۱۲]	❋	❋	–	–	–	❋	–
[۱۳–۲۰]	❋	–	–	❋	–	–	–
این مقاله	❋	❋	❋	–	❋	❋	❋

با توجه به محوریت مطالعات انجام‌شده درزمینهٔ راهبرد فنی–اقتصادی–اجتماعی برای اجتماع انرژی و مدل‌سازی دموکراسی انرژی، به‌راحتی می‌توان به خلأهای تحقیقاتی زیر پی برد:

- فقدان مدلی جامع برای نشان دادن عوامل مؤثر بر دموکراسی انرژی کاربران نهایی انرژی در شبکهٔ هوشمند احساس می‌شود.
- در یک شبکهٔ هوشمند، به‌دنبال این هستیم که در شرایط پیک بار، کمترین فشار ممکن را به شبکهٔ بالادست وارد کنیم؛ بنابراین لازم است که یک ساختار غیرمتمرکز مناسب در سمت تقاضا ایجاد شود که در آن همهٔ کاربران نهایی انرژی بتوانند در تبادل انرژی مشارکت داشته باشند.
- در مطالعات قبلی، مدلی جامع و مناسب برای دموکراسی انرژی کاربران نهایی انرژی درون اجتماع‌های انرژی ارائه نشده است.

در این مقاله، برای رفع این خلأهای تحقیقاتی، یک بهینه‌سازی مدیریت انرژی جامع براساس ترجیحات کاربران نهایی انرژی و تجارت انرژی همتا به همتا برای یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی ارائه شده است که آن‌ها نیز شامل تعدادی ساختمان هوشمند هستند. این مقاله یک مدل جدید برای دموکراسی انرژی کاربران نهایی انرژی درون یک شبکهٔ هوشمند ارائه می‌دهد. شبکهٔ هوشمند مورد مطالعه شامل چند اجتماع انرژی، هر اجتماع انرژی نیز شامل چند ساختمان هوشمند و هر ساختمان شامل چندین واحد آپارتمانی است. مسئلهٔ مدیریت انرژی شبکهٔ هوشمند با هدف بیشینه‌سازی دموکراسی انرژی برای کاربران نهایی انرژی درون اجتماع‌های انرژی که هرکدام می‌توانند ترجیحات متفاوتی داشته باشند، بهینه‌سازی شده است. بنابراین، مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- در نظر گرفتن ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید که در دسته‌های انعطاف‌پذیر، اقتصادمحور و اجتماع‌محور طبقه‌بندی می‌شوند.
- در نظر گرفتن ترجیحات مدیران اجتماع انرژی که در دسته‌های مدیر با رویکرد تعاملی و مدیر با رویکرد غیرتعاملی طبقه‌بندی می‌شوند.
- تعریف یک مدل جامع برای دموکراسی انرژی کاربران نهایی انرژی درون اجتماع‌های انرژی.
- بررسی مسئله از جنبه‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی.
- بررسی تأثیر تجارت انرژی همتا به همتا، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ارتقای دموکراسی انرژی برای کاربران انرژی نهایی در شبکهٔ هوشمند.

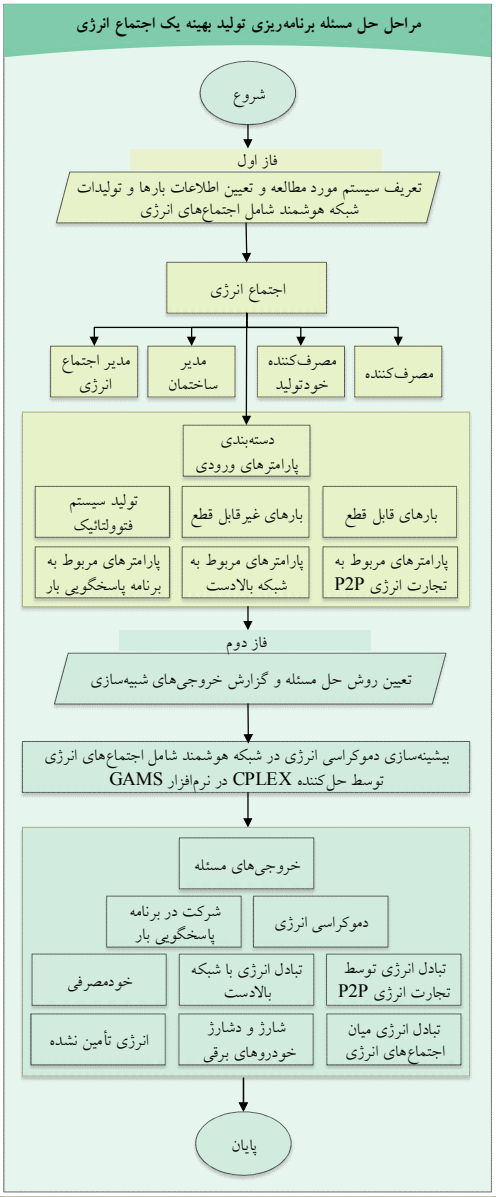
ساختار مقاله به شرح مقابل است: چهارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی انرژی در بخش ۲ پیشنهاد شده است. بخش ۳ در مورد فرمول‌بندی مسئله شامل معرفی تابع هدف و روابط مسئله است. شبکهٔ مورد مطالعه و نتایج عددی در بخش ۴ ارائه شده است. درنهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

۲. چهارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی انرژی

نمای کلی چهارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی انرژی شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی در شکل (۱) نشان داده شده است. افق زمانی مورد مطالعه، ۲۴ ساعت شبانه‌روز در نظر گرفته شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[1] (MILP) برای مسئلهٔ مورد مطالعه توسط روش CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. مسئله از دیدگاه بهره‌بردار یک ریزشبکهٔ

1. Mixed-Integer Linear Programming

هوشمند متشکل از اجتماع‌های انرژی که خود شامل ساختمان‌های هوشمند هستند، حل شده است.



شکل (۱): نمای کلی چهارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی انرژی ساختمان‌های هوشمند در یک اجتماع انرژی

برنامه‌ریزی انرژی هر ساختمان هوشمند می‌تواند توسط یک سیستم مدیریت انرژی انجام شود. هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید قابلیت تبادل انرژی ازطریق بستر همتا به همتا با همسایگان خود و تبادل انرژی با شبکهٔ اصلی ازطریق ارتباط با مدیر اجتماع انرژی را دارد. ازجمله المان‌های هریک از خانه‌های هوشمند می‌توان به لوازم خانگی که به دو دستهٔ قابل قطع (مانند ماشین لباسشویی، جاروبرقی و...) و غیرقابل قطع (مانند روشنایی) تقسیم‌بندی می‌شوند، اشاره کرد. هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید می‌تواند در برنامهٔ پاسخ‌گویی بار شرکت کند تا بار قابل قطع خود را در زمان پیک کاهش دهد و از شرکت‌های تجمیع‌کنندهٔ برنامهٔ پاسخ‌گویی بار یا اپراتور شبکهٔ توزیع مشوق دریافت کند. از سوی دیگر، هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید می‌تواند صاحب یک سیستم فتوولتائیک باشد و می‌تواند تقاضای خود را با خودمصرفی از سیستم فتوولتائیک یا خرید انرژی از شبکهٔ بالادست تأمین کند. علاوه بر این، انرژی اضافی را ازطریق ارتباط با مدیر اجتماع انرژی می‌توان به شبکهٔ بالادست فروخت.

۳. فرمول‌بندی مسئله

تابع هدف نشان داده‌شده در رابطهٔ (۱)، بیشینه کردن دموکراسی انرژی برای کاربران نهایی انرژی درون یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی شامل مصرف‌کنندگان خودتولید و مدیران اجتماع انرژی است و از چندین بخش تشکیل شده است. این بخش‌ها عبارت‌اند از: ترجیحات مصرف‌کنندهٔ خودتولید برای انجام خودمصرفی از سیستم فتوولتائیک، ترجیحات مصرف‌کنندهٔ خودتولید برای شرکت در تجارت انرژی همتا به همتا، ترجیحات مصرف‌کنندهٔ خودتولید برای شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، ترجیحات مدیر اجتماع انرژی برای تبادل انرژی با اجتماع‌های انرژی دیگر و یا با شبکهٔ بالادست و ترجیحات مدیر اجتماع انرژی برای شارژ و دشارژ خودروهای برقی درون پارکینگ خودروهای برقی اجتماع انرژی. بسته به اینکه مصرف‌کنندهٔ خودتولید از نوع انعطاف‌پذیر، اقتصادمحور و یا اجتماع‌محور باشد، ضریب ترجیحات مربوط به هرکدام از بخش‌های یادشدهٔ مرتبط با مصرف‌کنندهٔ خودتولید می‌تواند متفاوت باشد. همچنین برای مدیر اجتماع انرژی نیز بسته به اینکه رویکرد تعاملی و یا غیرتعاملی داشته باشد، ضریب ترجیحات مربوط به هرکدام از بخش‌های یادشدهٔ مرتبط با مدیر اجتماع انرژی می‌تواند متفاوت باشد.

$$f = \text{Max. ED}_t \qquad (۱)$$

$$= \sum_{m\in M}\sum_{b\in B}\sum_{u\in U}\left\{\begin{array}{l}\dfrac{\left(\begin{array}{l}PP^{\text{self}}_{u,b,m}\times P^{\text{self}}_{PV_{t,u,b,m}}\\ +PP^{\text{P2P}}_{u,b,m}\times P^{\text{s2n}}_{P2P_{t,u,b,m}}\end{array}\right)}{C^{max}_{u,b,m}}\\ +\dfrac{\left(PP^{\text{DR}}_{u,b,m}\times DR_{t,u,b,m}\right)}{ID_{t,u,b,m}}\\ +\dfrac{\left(\begin{array}{l}MP^{s2ec}_{m}\times P^{s2ec}_{EC_{t,m}}\\ +MP^{s2g}_{m}\times P^{\text{s2g}}_{PV_{t,u,b,m}}\end{array}\right)}{C^{max}_{m}}\\ +\dfrac{\left(MP^{EV}_{m}\times DCH^{EV}_{t,m}\right)}{DCH^{max}_{m}}\end{array}\right\}$$

$$ENS_{t,m}-\sum_{b\in B}\sum_{u\in U}\left(\begin{bmatrix}ID^{\text{after PV}}_{t,u,b,m}\\-DR_{t,u,b,m}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}P^{\text{s2g}}_{PV_{t,u,b,m}}\\-P_{ID_{t,u,b,m}}{}^{\text{bfg}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}P^{\text{s2n}}_{P2P_{t,u,b,m}}\\-P^{\text{bfn}}_{P2P_{t,u,b,m}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}P^{s2ec}_{EC_{t,m}}\\-P^{bfec}_{EC_{t,m}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}CH^{PEV}_{t,m}\\-DCH^{PEV}_{t,m}\end{bmatrix}\right)\le\sum_{b\in B}\sum_{u\in U}ID_{t,u,b,m} \quad (۲)$$

$$P^{\text{s2n}}_{P2P_{t,u,b,m}}\le x_{t,u,b,m}\times P^{\max}_{P2P_{t,u,b,m}} \quad (۳)$$

$$P^{\text{bfn}}_{P2P_{t,u,b,m}}\le y_{t,u,b,m}\times P^{\max}_{P2P_{t,u,b,m}} \quad (۴)$$

$$x_{t,u,b,m}+y_{t,u,b,m}\le 1 \quad (۵)$$

$$P^{\text{bfg}}_{t,u,b,m}=P_{ID_{t,u,b,m}}{}^{\text{bfg}}+P_{UID_{t,u,b,m}}{}^{\text{bfg}} \quad (۶)$$

$$P^{\text{bfg}}_{t,u,b,m}\ge UID_{t,u,b,m} \quad (۷)$$

$$P_{UID_{t,u,b,m}}{}^{\text{bfg}}=UID_{t,u,b,m} \quad (۸)$$

$$D_{t,u,b,m}=UID_{t,u,b,m}+ID_{t,u,b,m} \quad (۹)$$

$$ID^{\text{after PV}}_{t,u,b,m}=ID_{t,u,b,m}-P^{\text{self}}_{PV_{t,u,b,m}} \quad (۱۰)$$

$$P^{\text{self}}_{PV_{t,u,b,m}}\le P^{\text{product}}_{PV_{t,u,b,m}} \quad (۱۱)$$

$$P^{\text{s2g}}_{PV_{t,u,b,m}}\le P^{\text{s2g}}_{max} \quad (۱۲)$$

$$P^{\text{bfg}}_{t,u,b,m}\le P^{\text{bfg}}_{max} \quad (۱۳)$$

$$0\le P^{\text{s2n}}_{P2P_{t,u,b,m}}\le P^{\text{product}}_{PV_{t,u,b,m}}-P^{\text{self}}_{PV_{t,u,b,m}} \quad (۱۴)$$

$$0\le P^{\text{bfn}}_{P2P_{t,u,b,m}}\le ID^{\text{after PV}}_{t,u,b,m}-DR_{t,u,b,m} \quad (۱۵)$$

$$P^{\text{bfn}}_{P2P_{t,u,b,m}}\le P^{\text{available}}_{P2P_{t,m}} \quad (۱۶)$$

$$DR_{t,u,b,m}\le ID_{t,u,b,m} \quad (۱۷)$$

$$ID^{\text{after DR}}_{t,u,b,m}=ID_{t,u,b,m}-DR_{t,u,b,m} \quad (۱۸)$$

$$0\le CH^{EV}_{t,m}\le CH^{\max}\times i_{t,m} \quad (۱۹)$$

$$0\le DCH^{EV}_{t,m}\le DCH^{\max}\times j_{t,m} \quad (۲۰)$$

$$SOC_{t,m}=SOC_{t-1,m}+\left(\frac{CH^{EV}_{t,m}\cdot\eta^{EV}_{CH}}{E^{\max}_{PEV}}-\frac{DCH^{EV}_{t,m}}{E^{\max}_{PEV}\cdot\eta^{EV}_{DCH}}\right) \quad (۲۱)$$

$$SOC^{min}_{m}\le SOC_{t,m}\le SOC^{max}_{m} \quad (۲۲)$$

$$i_{t,m}+j_{t,m}\le 1 \quad (۲۳)$$

$$P^{s2ec}_{EC_{t,m}}\le z_{t,m}\times C^{max}_{EC_m} \quad (۲۴)$$

$$P^{bfec}_{EC_{t,m}}\le v_{t,m}\times C^{max}_{EC_m} \quad (۲۵)$$

$$z_{t,m}+v_{t,m}\le 1 \quad (۲۶)$$

انرژی تأمین‌نشده مربوط به هر اجتماع انرژی در رابطهٔ (۲) نشان داده شده است. درواقع انرژی تأمین‌نشده در هر اجتماع انرژی نمی‌تواند از میزان بار قابل قطع آن اجتماع انرژی بیشتر باشد. برنامهٔ پاسخ‌گویی بار، تبادل انرژی با شبکهٔ بالادست، تبادل انرژی در تجارت انرژی همتا به همتا، تبادل انرژی با اجتماع‌های انرژی دیگر و همچنین شارژ و دشارژ خودروهای برقی بر ارزش انرژی تأمین‌نشدهٔ اجتماع‌های انرژی تأثیر می‌گذارند. روابط (۳) تا (۵) برای اطمینان حاصل کردن از این هستند که توان فروخته‌شده و خریداری‌شده ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا از حداکثر حد مجاز تجاوز نکند و همچنین توسط متغیرهای دودویی تضمین می‌شود که انجام هر دوی آنها به‌طور هم‌زمان امکان‌پذیر نیست. روابط (۶) تا (۸) مربوط به توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست است. توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست شامل توان خریداری‌شده برای بارهای قابل قطع و غیرقابل قطع است که در (۶) نشان داده شده است. مجموع توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست باید برابر یا بیشتر از بار غیرقابل قطع باشد که در رابطهٔ (۷) نشان داده شده است؛ همچنین توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست برای بار غیرقابل قطع باید برابر با بار غیرقابل قطع باشد که در رابطهٔ (۸) نشان داده شده است تا اطمینان حاصل شود که بار غیرقابل قطع بدون هیچ عدم قطعیتی تأمین می‌شود.

تقاضای کل هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید شامل تقاضای قابل قطع و غیرقابل قطع است که توسط رابطهٔ (۹) مشخص شده است. روابط (۱۰) و (۱۱) مربوط به تقاضای قابل قطع و سازوکار خودمصرفی برای هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید است. سازوکار خودمصرفی برای هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید با سیستم فتوولتائیک خاص خود انجام می‌شود. روابط (۱۲) و (۱۳) مربوط به محدودیت‌های خرید انرژی از شبکه و فروش تولید سیستم فتوولتائیک به شبکه است. روابط (۱۴) تا (۱۶) مربوط به محدودیت‌های خرید یا فروش تولید سیستم فتوولتائیک ازطریق تجارت انرژی همتا به همتاست. روابط (۱۷) و (۱۸) مربوط به برنامهٔ پاسخ‌گویی بار است. میزان اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار برای هر مصرف‌کنندهٔ خودتولید نمی‌تواند بیشتر از بار قابل قطع آن مصرف‌کنندهٔ خودتولید باشد. در روابط (۱۹) تا (۲۰) به‌ترتیب محدودیت‌های مربوط به شارژ و دشارژ خودروهای برقی نشان داده شده است. در رابطهٔ (۲۱)، سطح شارژ خودروهای برقی در هر ساعت وابستهٔ سطح شارژ در ساعت قبل، راندمان شارژ و دشارژ و ظرفیت خودروهای برقی برای هریک از اجتماع‌های

انرژی معرفی شده است. رابطهٔ (۲۲) مربوط به حداقل و حداکثر میزان سطح شارژ خودروهای برقی است. رابطهٔ (۲۳) رابطهٔ منطقی بین متغیرهای باینری مربوط به شارژ و دشارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد که موجب می‌شود در هر ساعت یا شارژ، یا دشارژ و یا هیچ‌کدام اتفاق بیفتد؛ یعنی یک خودروی برقی در هر ساعت نمی‌تواند هم شارژ و هم دشارژ شود. روابط (۲۴) تا (۲۵) به‌ترتیب به حداکثر توانی که هر اجتماع انرژی می‌تواند به اجتماع‌های انرژی دیگر بفروشد و حداکثر توانی که هر اجتماع انرژی می‌تواند از اجتماع‌های انرژی دیگر خریداری کند، مربوط است. رابطهٔ (۲۶) نیز یک رابطهٔ منطقی است که بیان می‌کند در هر ساعت به‌طور همزمان امکان اینکه از اجتماع‌های انرژی دیگر هم انرژی خریده شود و هم فروخته شود وجود ندارد. اطلاعات مربوط به تقاضا و تولید هر خانهٔ هوشمند را می‌توان با زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) به مدیر اجتماع انرژی و سپس شرکت‌های تجمیع‌کننده یا شبکهٔ اصلی ارسال کرد. یک اجتماع انرژی می‌تواند شامل چندین ساختمان مسکونی هوشمند باشد. انرژی مازاد مصرف‌کنندگان در اجتماع انرژی را می‌توان ازطریق همتا به همتا در اجتماع انرژی یا به شبکهٔ بالادست فروخت. همچنین، کمبود انرژی مصرف‌کنندگان را می‌توان ازطریق همتا به همتا یا شبکهٔ بالادست خریداری کرد. ازطرف دیگر هر اجتماع انرژی یک پارکینگ خودروهای برقی دارد که می‌تواند در زمان‌های مناسب انرژی مورد نیاز اجتماع انرژی را تأمین کند. همچنین، اجتماع‌های انرژی نیز می‌توانند ازطریق ارتباط مدیران اجتماع‌های انرژی با یکدیگر تبادل انرژی داشته باشند.

سیستم مورد مطالعه یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی است. این اجتماع‌های انرژی می‌توانند تقاضای خود را به‌صورت غیرمتمرکز تأمین کند. هر اجتماع انرژی شامل چندین ساختمان و هر ساختمان شامل چندین واحد آپارتمان است. هر ساختمان دارای مدیر ساختمان و کل اجتماع انرژی دارای یک مدیر اجتماع انرژی است که مسئول مدیریت اطلاعات و تبادل ارتباطات است. نمای کلی مجتمع مسکونی مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) با استفاده از روش CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. واحدهای آپارتمانی ۱ تا ۳ متعلق به ساختمان شمارهٔ یک از اجتماع انرژی شمارهٔ یک، واحدهای آپارتمانی ۴ تا ۶ متعلق به ساختمان شمارهٔ دو از اجتماع انرژی شمارهٔ یک، واحدهای آپارتمانی ۷ تا ۹ متعلق به ساختمان شمارهٔ سه از اجتماع انرژی شمارهٔ دو، واحدهای آپارتمانی ۱۰ تا ۱۲ متعلق به ساختمان شمارهٔ چهار از اجتماع انرژی شمارهٔ دو، واحدهای آپارتمانی ۱۳ تا ۱۵ متعلق به ساختمان شمارهٔ پنج از اجتماع انرژی شمارهٔ سه و واحدهای آپارتمانی ۱۶ تا ۱۸ متعلق به ساختمان شمارهٔ شش از اجتماع انرژی شمارهٔ سه هستند.

مصرف‌کنندگان خودتولید موجود در واحدهای آپارتمانی این اجتماع‌های انرژی قادرند علاوه بر انجام خودمصرفی، مازاد انرژی خود را ازطریق همتا به همتا به همسایگان خود در ساختمان خود یا به ساختمان‌های مجاور در اجتماع انرژی یا ازطریق ارتباط با مدیر اجتماع انرژی به شبکهٔ بالادست بفروشند. همچنین، مدیر هر اجتماع انرژی می‌تواند با اجتماع‌های انرژی دیگر تبادل انرژی داشته باشد و همچنین در مورد شارژ و دشارژ خودروهای برقی درون پارکینگ خودروهای برقی هر اجتماع انرژی تصمیم‌گیری کند. مصرف‌کنندگان خودتولید می‌توانند کمبودهای تولید خود را نیز ازطریق این بسترها پوشش دهند. این مصرف‌کنندگان خودتولید دارای تقاضای قابل قطع و تقاضای غیرقابل قطع هستند که می‌توانند با شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تقاضای خود را کاهش داده، تشویقی دریافت کرده و سودآوری خود را افزایش دهند. هدف اصلی این است که با استفاده از فناوری‌های سیستم غیرمتمرکز انرژی مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر و فناوری‌های نوآورانه انرژی مانند تجارت انرژی همتا به همتا، دموکراسی انرژی درون شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی را براساس ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید و ترجیحات مدیران اجتماع انرژی افزایش دهیم.

حداقل سطح شارژ خودروهای برقی برابر صفر و حداکثر سطح شارژ خودروهای برقی برابر یک پریونیت فرض شده است؛ همچنین سطح شارژ اولیه و نهایی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

تقاضای قابل قطع و غیرقابل قطع هر ساختمان به‌ترتیب در شکل (۳ الف) و شکل (۳ ب) مشخص شده است. پیک تقاضای غیرقابل قطع در ساعت ۲۰ و ۲۱ رخ داده است. همچنین پیک تقاضای قابل قطع در ساعت ۳ تا ۵ رخ داده است.

ضریب ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید مختلف درون اجتماع‌های انرژی در جدول (۲) آورده شده است. مصرف‌کنندگان خودتولید شمارهٔ ۱، ۴، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ از نوع انعطاف‌پذیرند که تمایل بیشتری در شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دارند؛ مصرف‌کنندگان خودتولید شمارهٔ ۲، ۵، ۶،

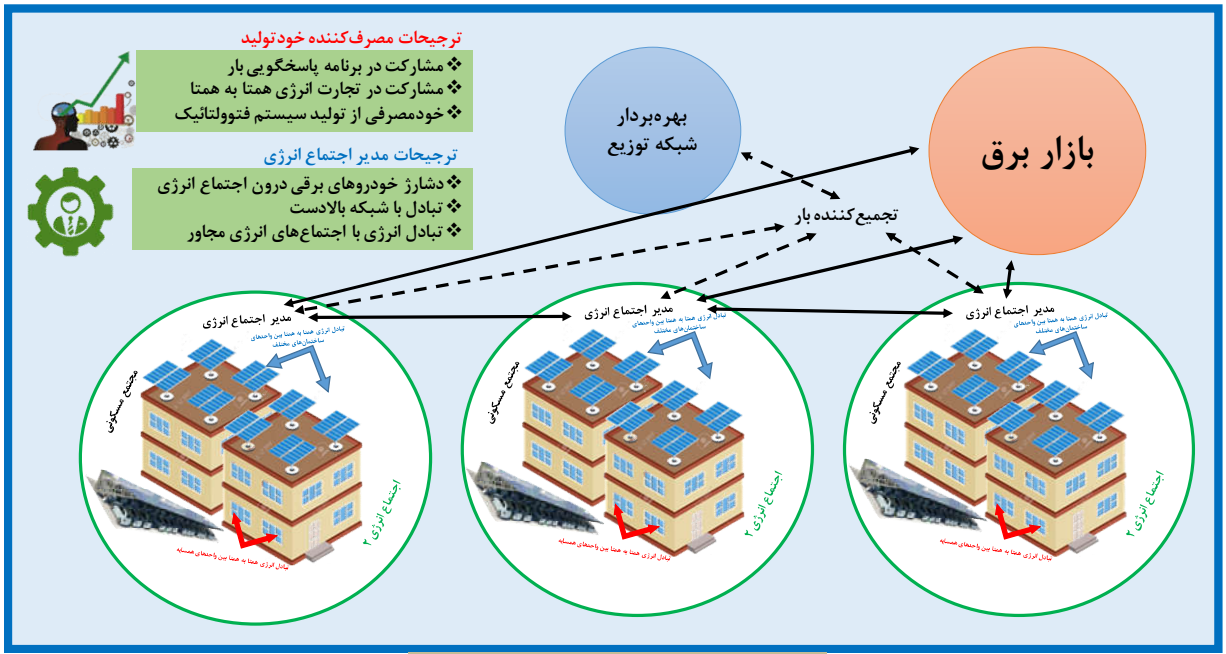
۱۱، ۱۵ و ۱۸ از نوع اجتماع‌محورند که تمایل بیشتری در شرکت در برنامه‌های اجتماعی همچون تجارت انرژی P2P دارند و مصرف‌کنندگان خودتولید شماره ۳، ۷، ۹، ۱۲، ۱۴ و ۱۷ از نوع اقتصادمحورند که تمایل بیشتری به انجام خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک خود دارند.

ضریب ترجیحات مدیران اجتماع‌های انرژی با رویکردهای مختلف در جدول (۳) آورده شده است. رویکرد مدیران اجتماع‌های انرژی ۱ و ۲ از نوع تعاملی و رویکرد اجتماع انرژی ۳ از نوع غیرتعاملی است. همان‌طور که در جدول‌های (۲) و (۳) دیده می‌شود، مجموع ضرایب ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید و مدیر اجتماع انرژی برابر ۱ خواهد بود.

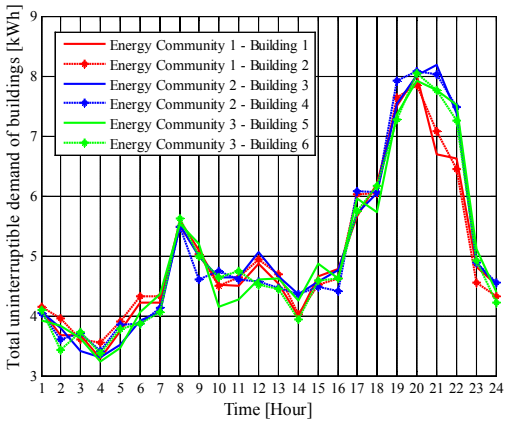
تأثیرات برنامهٔ پاسخ‌گویی بار و سازوکار خودمصرفی بر تقاضای هر ساختمان در شکل (۴) مشخص شده است. کل تولید سیستم‌های فتوولتائیک برای هر ساختمان اجتماع‌های انرژی در شکل (۴ الف) مشخص شده است. کل میزان خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک برای هر ساختمان اجتماع‌های انرژی در شکل (۴ ب) نشان داده شده است. در ساعت ۱۰، با توجه به اینکه مصرف‌کنندگان خودتولید ۱۲ و ۱۷ به‌ترتیب درون ساختمان‌های شمارهٔ ۴ و ۶ از نوع اقتصادمحورند و ضریب مربوط به انجام خودمصرفی برای آن‌ها بیشتر بوده است، تمایل به خودمصرفی داشته‌اند. شایان ذکر است که جواب مربوط به روش بهینه‌سازی با توجه به تغییرات بار و تولید در هر ساعت می‌تواند متفاوت باشد، ولی خودمصرفی نمی‌تواند در ساعاتی انجام شود که سیستم فتوولتائیک فاقد تولید باشد. همچنین مصرف‌کنندگان خودتولید ۵ و ۶ درون ساختمان شمارهٔ ۲ که از نوع اجتماع‌محورند، در ساعت ذکرشده هیچ میزان خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک خودشان نداشته‌اند؛ زیرا ضریب مربوط به خودمصرفی برای آن‌ها اندک بوده است. مجموع برنامهٔ پاسخ‌گویی بار انجام‌شدهٔ هر ساختمان اجتماع‌های انرژی در تمام ساعات در شکل (۴ ج) نشان داده شده است که حداکثر برنامهٔ پاسخ‌گویی بار انجام‌شده برای همهٔ ساختمان‌ها در ساعت ۵ بوده است؛ زیرا پیک تقاضای قابل قطع برای همهٔ ساختمان‌ها در ساعت ۵ رخ داده است.

کل تقاضای قابل قطع هر ساختمان اجتماع‌های انرژی با و بدون برنامهٔ پاسخ‌گویی بار در شکل (۴ د) نشان داده شده است. تقاضای قابل قطع همهٔ ساختمان‌ها پس از انجام برنامهٔ پاسخ‌گویی بار کاهش یافته است.

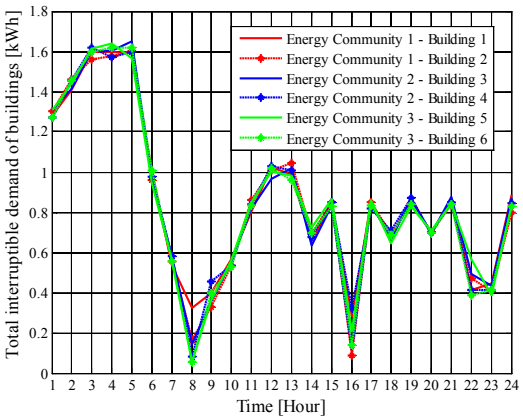
کل تقاضای قابل قطع هر ساختمان اجتماع‌های انرژی قبل و بعد از انجام خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک را می‌توان در شکل (۴ ه) مشاهده کرد. پس از انجام خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک، تقاضای قابل قطع ساختمان‌ها کاهش یافته است. توجه داشته باشید که تقاضای غیرقابل قطع باید بدون هیچ عدم قطعیتی ازطریق شبکهٔ بالادست تأمین شود.



شکل (۲): شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی

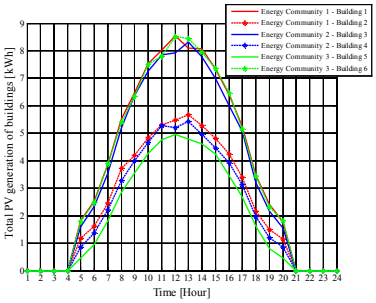


الف. کل تقاضای غیرقابل قطع

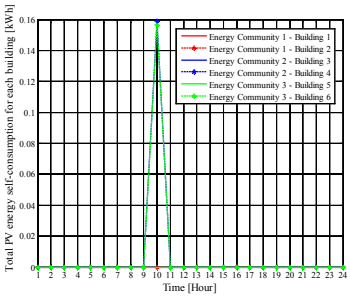


ب. کل تقاضای قابل قطع

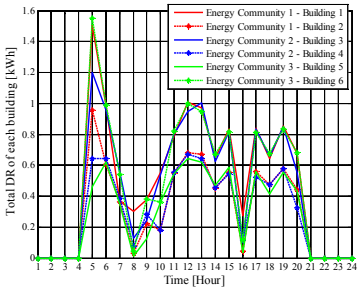
شکل (۳): کل تقاضای قابل قطع و غیرقابل قطع ساختمان‌ها



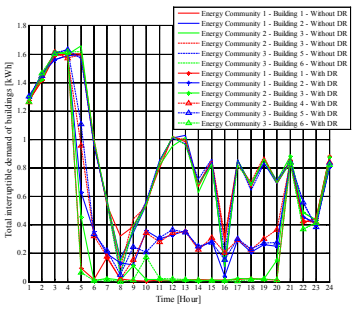
الف. کل تولید سیستم‌های فتوولتائیک برای هر ساختمان



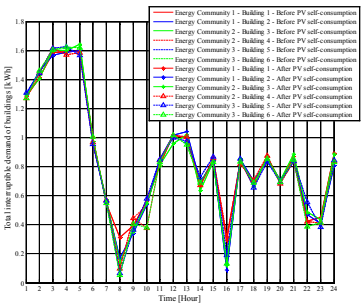
ب. کل خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک برای هر ساختمان



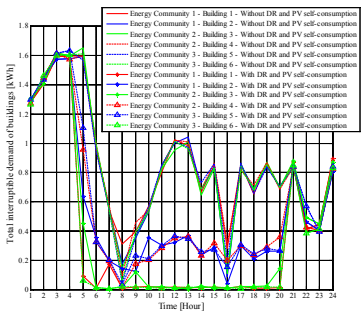
ج. کل برنامهٔ پاسخ‌گویی بار انجام‌شده برای هر ساختمان



د. کل بار قابل قطع ساختمان‌ها با و بدون انجام برنامهٔ پاسخ‌گویی بار



ه. کل بار قابل قطع ساختمان‌ها قبل و بعد از انجام خودمصرفی



و. کل تقاضای قابل قطع ساختمان‌ها با و بدون انجام برنامهٔ پاسخ‌گویی بار و خودمصرفی

شکل (۴): اثرات برنامهٔ پاسخ‌گویی بار و خودمصرفی روی تقاضای قابل قطع ساختمان‌ها

جدول (۲): ضریب ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید مختلف درون اجتماع‌های انرژی

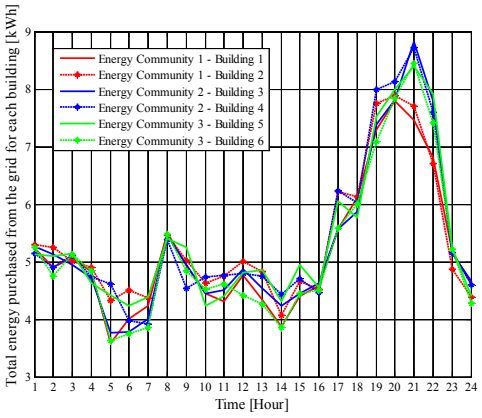
نوع مصرف‌کنندهٔ خودتولید	ضریب ترجیح مشارکت در DR	ضریب ترجیح مشارکت در P2P	ضریب ترجیح خودمصرفی
انعطاف‌پذیر	۰/۴	۰/۲	۰/۱
اقتصادمحور	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۴
اجتماع‌محور	۰/۲	۰/۴	۰/۱

جدول (۳): ضریب ترجیحات مدیران اجتماع‌های انرژی با رویکردهای مختلف

نوع رویکرد مدیر اجتماع انرژی	ضریب ترجیح دشارژ خودروهای برقی درون اجتماع انرژی	ضریب ترجیح تبادل با شبکهٔ بالادست	ضریب ترجیح تبادل انرژی با اجتماع‌های انرژی مجاور
رویکرد غیرتعاملی	۰/۳	۰	۰
رویکرد تعاملی	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲

کل تقاضای قابل قطع ساختمان‌های اجتماع‌های انرژی با و بدون برنامهٔ پاسخ‌گویی بار و خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک در شکل (۴ و) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴ و)، تقاضای قابل قطع همهٔ ساختمان‌های اجتماع‌های انرژی پس از انجام برنامهٔ پاسخ‌گویی بار و خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک کاهش یافته است.

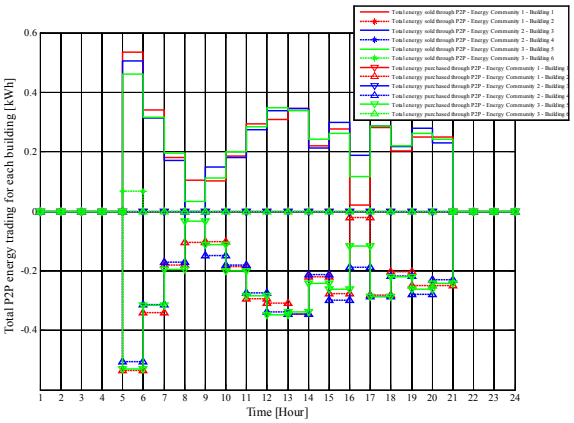
مجموع انرژی خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست برای هر ساختمان اجتماع‌های انرژی در شکل (۵) نشان داده شده است. حداکثر انرژی خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست مربوط به ساعاتی است که پیک تقاضای غیرقابل قطع رخ داده است.



شکل (۵): کل انرژی خریداری‌شده از شبکه برای هر ساختمان

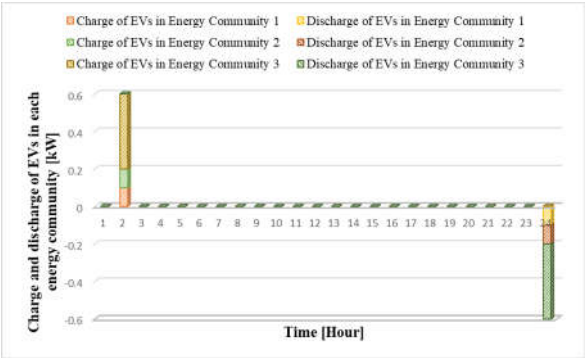
مقدار انرژی خریداری‌شده یا فروخته‌شده توسط سازوکار همتا به همتا برای هر ساختمان در شکل (۶) نشان داده شده است. تجارت انرژی همتا به همتا درون هریک از اجتماع‌های انرژی انجام می‌شود.

به‌طور کلی، هرچه ساختمان‌ها و اجتماع انرژی بتوانند وابستگی خود را به شبکهٔ بالادست کاهش دهند، انرژی بیشتر به‌طور محلی تأمین می‌شود و فشار کمتری به شبکهٔ بالادست وارد می‌شود.



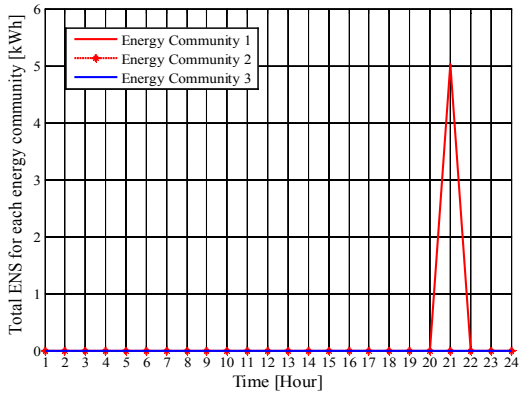
شکل (۶): کل تجارت انرژی همتا به همتا برای هر ساختمان

شارژ و دشارژ خودروهای برقی درون پارکینگ خودروهای برقی برای هر اجتماع انرژی در شکل (۷) نشان داده شده است. برطبق شکل (۷)، خودروهای برقی در هر اجتماع انرژی به‌دلیل نزدیک بودن الگوی بار آن‌ها، در ساعت کم‌باری یعنی ساعت ۲ شارژ، و طبق برنامه‌ریزی انرژی انجام‌شده در ساعت ۲۴ دشارژ شده‌اند. باید توجه داشت که مدیر اجتماع انرژی ۳ به‌دلیل داشتن رویکرد غیرتعاملی با اجتماع‌های انرژی دیگر، ترجیح داده است سهم بیشتری در شارژ و دشارژ خودروهای برقی داخل پارکینگ خودروهای برقی خودش برای تأمین انرژی مربوط به اجتماع انرژی خودش نسبت به سایر مدیران اجتماع انرژی ۱ و ۲ که رویکرد تعاملی دارند، داشته باشد.



شکل (۷): شارژ و دشارژ خودروهای برقی درون پارکینگ خودروهای برقی برای هر اجتماع انرژی

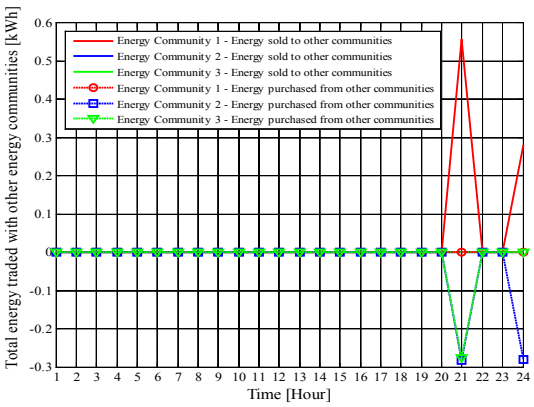
کل انرژی تأمین‌نشده مربوط به هر اجتماع انرژی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ساعت ۲۱ اجتماع انرژی شمارهٔ ۱ با مقداری ENS روبه‌رو شده است که در این ساعت پیک بار غیرقابل قطع اجتماع‌های انرژی رخ داده بود.



شکل (۸): کل ENS برای هر اجتماع انرژی

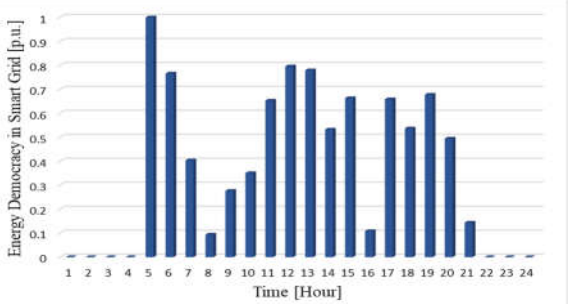
تبادل انرژی هر اجتماع انرژی با اجتماع‌های انرژی دیگر در شکل (۹) نشان داده شده است. برطبق شکل (۹)، اجتماع انرژی

شمارهٔ ۱ در ساعت ۲۱ که پیک بار اجتماع‌های انرژی رخ داده بود، به اجتماع‌های انرژی شمارهٔ ۲ و ۳ و همچنین در ساعت ۲۴ به اجتماع انرژی شمارهٔ ۲ انرژی فروخته است.



شکل (۹): تبادل انرژی میان اجتماع‌های انرژی درون شبکهٔ هوشمند

دموکراسی انرژی نرمالیزه‌شده در هر ساعت برای شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. دموکراسی انرژی کاربران نهایی شبکهٔ هوشمند به میزان خودمصرفی، مشارکت مصرف‌کنندگان خودتولید در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، مبادلهٔ انرژی با شبکهٔ بالادست، مبادلهٔ انرژی ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا، شارژ و دشارژ خودروهای برقی درون پارکینگ خودروهای برقی و مبادلهٔ انرژی با اجتماع‌های انرژی دیگر وابسته است. ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید درون اجتماع‌های انرژی بسته به اینکه از نوع انعطاف‌پذیر، اقتصادمحور و یا اجتماع‌محور باشند و همچنین ترجیحات مدیران اجتماع‌های انرژی بسته به اینکه رویکرد تعاملی و یا غیرتعاملی داشته باشند، می‌تواند بر دموکراسی انرژی در شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی تأثیرگذار باشد.



شکل (۱۰): دموکراسی انرژی نرمالیزه‌شده در هر ساعت برای یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی

۴. نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل دموکراسی انرژی برای یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی براساس ترجیحات مصرف‌کنندگان خودتولید و ترجیحات مدیر اجتماع‌های انرژی ارائه می‌دهد. هر اجتماع انرژی از چندین ساختمان هوشمند و هر ساختمان از چندین واحد آپارتمانی تشکیل شده است. مصرف‌کنندگان خودتولید در این واحدهای آپارتمانی می‌توانند خودمصرفی داشته باشند و همچنین ازطریق شبکهٔ بالادست یا بستر همتا به همت، انرژی را بفروشند یا خریداری کنند. مصرف‌کنندگان خودتولید یک تقاضای غیرقابل قطع دارند که باید از شبکهٔ بالادست خریداری شود و یک تقاضای قابل قطع دارند که می‌توان با مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار آن‌ها را کاهش داده و یا با سازوکار خودمصرفی، خرید ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا یا شبکهٔ بالادست آن‌ها را تأمین کرد. این مقاله مدیریت انرژی یک شبکهٔ هوشمند شامل اجتماع‌های انرژی را با هدف به حداکثر رساندن دموکراسی انرژی بهینه می‌کند. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مسئله با روش CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که دموکراسی انرژی کاربران نهایی شبکهٔ هوشمند به میزان توان در دسترس سیستم‌های فتوولتائیک جهت مصرف یا تبادل انرژی همچون انجام خودمصرفی و همچنین به مشارکت مصرف‌کنندگان خودتولید در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تبادل انرژی با شبکهٔ بالادست، تبادل انرژی ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا، شارژ و دشارژ خودروهای برقی و تبادل انرژی با اجتماع‌های انرژی دیگر وابسته است. مطالعهٔ آیندهٔ نویسندگان بر یک ساختار غیرمتمرکز در شبکهٔ هوشمند متمرکز خواهد بود.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره «۴۰۰۰۸۱۸» انجام شده است.

فهرست علائم

مجموعه‌ها

t	اندیس زمان
b	اندیس شمارهٔ ساختمان
u	اندیس شمارهٔ واحد آپارتمانی ساختمان
m	اندیس اجتماع انرژی

پارامترها

$ID_{t,u,b,m}$ بار قابل قطع

$UID_{t,u,b,m}$ بار غیرقابل قطع

$ID^{\text{allowable}}_{t,u,b,m}$ میزان مجاز بار قابل قطع

$P^{\max}_{P2P_{t,u,b,m}}$ حداکثر توانی که می‌تواند ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا مبادله شود.

$P^{\text{product}}_{PV_{t,u,b,m}}$ تولید توان سیستم فتوولتائیک

P^{s2g}_{max} حداکثر توانی که می‌تواند به شبکهٔ بالادست فروخته شود.

P^{bfg}_{max} حداکثر توانی که می‌تواند از شبکهٔ بالادست خریداری شود.

$P^{\text{available}}_{P2P_{t,m}}$ حداکثر توان در دسترس در هر اجتماع انرژی برای انجام تجارت انرژی همتا به همتا

$D_{t,u,b,m}$ کل تقاضای اجتماع انرژی

$CH^{\max}$ حداکثر شارژ خودروهای برقی

$DCH^{\max}$ حداکثر دشارژ خودروهای برقی

متغیرها

ED_t دموکراسی انرژی

$P^{\text{s2g}}_{PV_{t,u,b,m}}$ انرژی فروخته‌شده به شبکهٔ بالادست از تولید سیستم‌های فتوولتائیک

$P^{\text{bfg}}_{t,u,b,m}$ توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست

$DR_{t,u,b,m}$ مقدار بار کاهش‌یافته توسط برنامهٔ پاسخ‌گویی بار

$ID^{\text{after DR}}_{t,u,b,m}$ مقدار بار قابل قطع بعد از انجام برنامهٔ پاسخ‌گویی بار

$P^{\text{s2n}}_{P2P_{t,u,b,m}}$ توان فروخته‌شده به همسایگان ازطریق تبادل انرژی همتا به همتا

$P^{\text{bfn}}_{P2P_{t,u,b,m}}$ توان خریداری‌شده از همسایگان ازطریق تبادل انرژی همتا به همتا

$ENS_{t,m}$ انرژی تأمین‌نشده

$D^{\text{after PV}}_{t,u,b,m}$ بار قابل قطع بعد از انجام سازوکار خودمصرفی

$x_{t,u,b,m}$ متغیر باینری فروش انرژی ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا

$y_{t,u,b,m}$ متغیر باینری خرید انرژی ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا

$z_{t,m}$ متغیر باینری فروش انرژی به اجتماع‌های انرژی دیگر

$v_{t,m}$ متغیر باینری خرید انرژی از اجتماع‌های انرژی دیگر

$i_{t,m}$ متغیر باینری شارژ خودروهای برقی

$j_{t,m}$ متغیر باینری دشارژ خودروهای برقی

$P^{\text{bfg}}_{ID_{t,u,b,m}}$ توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست برای تأمین بار قابل قطع

$P^{\text{bfg}}_{UID_{t,u,b,m}}$ توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادست برای تأمین بار غیرقابل قطع

$CH^{PEV}_{t,m}$ میزان شارژ خودروهای برقی

$DCH^{PEV}_{t,m}$ میزان دشارژ خودروهای برقی

$SOC^{PEV}_{t,m}$ سطح شارژ (حالت شارژ) خودروهای برقی

$P^{\text{self}}_{PV_{t,u,b}}$ میزان خودمصرفی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک

$PP^{\text{self}}_{u,b,m}$ ضریب ترجیح مصرف‌کنندهٔ خودتولید جهت خودمصرفی از سیستم فتوولتائیک

$PP^{\text{DR}}_{u,b,m}$ ضریب ترجیح مصرف‌کنندهٔ خودتولید برای شرکت در برنامهٔ پاسخ‌گویی بار

$PP^{\text{P2P}}_{u,b,m}$ ضریب ترجیح مصرف‌کنندهٔ خودتولید برای فروش انرژی ازطریق تجارت انرژی همتا به همتا

MP^{s2ec}_{m} ضریب ترجیح مدیر اجتماع انرژی برای فروش انرژی به اجتماع‌های انرژی دیگر

MP^{s2g}_{m} ضریب ترجیح مدیر اجتماع انرژی برای فروش انرژی به شبکهٔ بالادست

MP^{EV}_{m} ضریب ترجیح مدیر اجتماع انرژی برای دشارژ خودروهای برقی درون اجتماع انرژی خود

مراجع

[1] Taghikhani, M. A., Mandegar Nik, M., "*Effect of smart homes in management and reduction of electrical energy consumption*", Energy Engineering and Management, Vol. 9, No. 2, pp. 74-85, 2019. (In Persian), https://doi.org/10.22052/9.2.74

[2] Bordbari, M. J., Rastegar, M., Seifi A., "*Optimization of building energy consumption considering uncertainties*", Energy Engineering and Management, Vol. 10, No. 2, pp. 26-39, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22052/10.2.7

[3] Ostadijafari, M., Dubey, A., and Yu, N., "*Linearized price-responsive hvac controller for optimal scheduling of smart building loads*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 4, pp. 3131–3145, 2020. https://doi.org/10.1109/TSG.2020 .2965559

[4] Veelen, B. V., and Horst, D. V. D., "*What is energy democracy? Connecting social science energy research and political theory*", Energy Research & Social Science, Vol. 46, pp. 19–28, 2018. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.010

[5] "*Energy democracy*", [Online]. Available: https://ipfs.io/ipfs/QmXoypizjW3WknFiJnKLwHCn L72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/Energy_democracy.html. [Accessed: 13-Sep-2019].

[6] "*What is energy democracy*", [Online]. Available: http://energie-demokratie.de/what-is-energy-democracy. [Accessed: 13-Sep-2019].

[7] "*From Darkness to Light: The Five 'Ds' can Lead the Way*", [Online]. Available: https://www.infosys.com/insights/age-possibilities/Documents/darkness-to-light.pdf. [Accessed: 13-Sep-2019].

[8] Nguyen, D.H., and Ishihara, T., "*Distributed peer-to-peer energy trading for residential fuel cell combined heat and power systems*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 125, pp. 106533, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020. 106533

[9] Kusakana, K., "*Optimal peer-to-peer energy management between grid-connected prosumers with battery storage and photovoltaic systems*", Journal of Energy Storage, Vol. 32, pp. 101717, 2020. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101717

[10] Liu, J., Yang, H. and Zhou, Y., "*Peer-to-peer energy trading of net-zero energy communities with renewable energy systems integrating hydrogen vehicle storage*", Applied Energy, Vol. 298, pp. 117206, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2021.117206

[11] Esmat, A., de Vos, M., Ghiassi-Farrokhfal, Y., Palensky, P. and Epema, D. "*A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology*", Applied Energy, Vol. 282, pp. 116123, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2020.116123

[12] Umer, K., Huang, Q., Khorasany, M., Afzal, M. and Amin, W., "*A novel communication efficient peer-to-peer energy trading scheme for enhanced privacy in microgrids*", Applied Energy, Vol. 296, pp. 117075, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117075

[13] Cui, S. and Xiao, J.W., "*Game-based peer-to-peer energy sharing management for a community of energy buildings*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 123, p.106204, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106204

[14] Anoh, K., Maharjan, S., Ikpehai, A., Zhang, Y. and Adebisi, B., "*Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: a game-theoretic approach*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 2, pp. 1264-1275, 2019. https://doi.org/ 10.1109/TSG.2019.2934830

[15] Tsao, Y.C. and Thanh, V.V., "*Toward sustainable microgrids with blockchain technology-based peer-to-peer energy trading mechanism: A fuzzy meta-heuristic approach*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 136, pp. 110452, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110452

[16] Hua, W., Jiang, J., Sun, H. and Wu, J., "*A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets*", Applied Energy, Vol. 279, pp. 115539, 2020. https://doi.org/10.1016/ j.apenergy.2020.115539

[17] Rathnayaka, A.D., Potdar, V.M., Hussain, O. and Dillon, T. December., "*Identifying prosumer's energy sharing behaviours for forming optimal prosumer-communities*", In 2011 International Conference on Cloud and Service Computing, IEEE, pp. 199-206, 2011. https://doi.org/10.1109/CSC.2011.6138520

[18] Zhu, T., Huang, Z., Sharma, A., Su, J., Irwin, D., Mishra, A., Menasche, D. and Shenoy, P., April., "*Sharing renewable energy in smart microgrids*", ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS), IEEE, pp. 219-228, 2013. https://doi.org/10.1145/2502524.2502554

[19] Rao, B. H., Arun, S. L., & Selvan, M. P., "*Framework of locality electricity trading system for profitable peer-to-peer power transaction in locality electricity market*", IET Smart Grid, Vol. 3, No. 3, pp. 318-330, 2020. https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0131

[20] Tushar, W., Saha, T. K., Yuen, C., Smith, D., & Poor, H. V., "*Peer-to-peer trading in electricity networks: an overview*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 4, pp. 3185-3200, 2020. https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657