

An Optimal Peer-to-Peer Energy Trading Framework for Networked DC Microgrids Considering Restriction of Power Losses

Arghavan Mohammadi, Navid Rezaei*, Mehrdad Gholami

Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
E-mails: arghavan.mohammadi@uok.ac.ir; n.rezaei@uok.ac.ir; m.gholami@uok.ac.ir
* means corresponding author

Short Abstract

DC microgrids are attaining more attraction in the smart grids on account of major characteristics such as reactive power removal, low power losses and high reliability, stability, controllability and energy efficiency. A suitable peer-to-peer (P2P) local electricity market is very essential to ensure the prosperity of networked DC microgrids in the sustainment of increasing penetration of renewable energy resources. The P2P energy trading provides a beneficial platform so that the peers including the distributed generators, end-use consumers and prosumers can buy or sell electrical energy directly with each other. This paper presents an optimization model of P2P energy trading for interconnected multiple DC microgrids coordinated via an energy management system (EMS) to maximize the total profit of participants. Each DC microgrid includes several photovoltaic arrays and wind turbines, residential loads, and electric vehicles (EVs). In the proposed framework, the permissible value of power losses is considered that reflects the limitation of power exchange between the peers and significantly influences the objective value.

Keywords

DC microgrid, Energy management system, Peer-to-peer energy trading, Permissible power losses, Smart grid.

1- Short Introduction (4-5 lines)

Nowadays, considering the growing ratio of distributed energy resources (DERs) and DC loads, DC microgrids are potentially more beneficial than AC microgrids due to their advantages. For example, DC microgrids have lower losses, higher reliability, higher efficiency, and easier connection, and do not require synchronization. In addition to the benefits provided by a DC microgrid, combining multiple DC microgrids and increasing energy sources to supply energy increases the system stability and reliability, and reduces energy costs and transmission lines power losses. This paper is conducted to DC-MMG energy management in home applications by considering the P2P energy trading structure, in order to utilization its benefits, and the profit tied to power losses.

2- Proposed Work and Methodology

In this paper, considering consumers as prosumers who are not only consumers but also producers, a scheme including four DC microgrids in residential applications is presented. In each of the microgrids, homes will be able to share energy using P2P paradigm with each other. Furthermore, all energy resources will be considered renewable and environmentally friendly. Unlike most previous references, this paper also examines system losses in order to minimize it and thus increase system efficiency. Modeling and formulation are mixed integer nonlinear programming (MINLP) and optimization is solved in the 24-hour horizon in GAMS software with DICOPT solver. One of the important advantages of this paper is the calculation of transmission losses and total losses of converters in the multi-MG system.

3- Conclusion (4-5 lines)

As regards that DC microgrids have recently come to the attention of the authors because of the benefits they provide, this paper modeled the energy management of multiple interconnected DC microgrids with the goal of profitability from power sales while also managing system power losses. Each DC microgrid contains the number of homes, each home is equipped with an electric vehicle, battery and solar panel. Four DC microgrids are interconnected and a total of 15 homes are considered. The main goal is to optimize the proposed DC-MMG profit function while the associated transfer and energy conversion losses are satisfied. To manage the associated losses an inequality is defined to limit the required losses. The optimization framework is tailored to calculating the transfer exchanges over a 24-hour scheduling time horizon.

4- References

1. Zolfaghari, M., et al., *Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. **136**: p. 107742.
2. Iqbal, S., et al., *A novel approach for system loss minimization in a peer-to-peer energy sharing community DC microgrid*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. **129**: p. 106775.
3. Gelani, H.E., et al., *AC vs. DC distribution efficiency: Are we on the right path?* Energies, 2021. **14**(13): p. 4039.

چارچوب بهینه تجارت انرژی نظیر به نظیر برای ریزشبه‌های DC به هم پیوسته با در نظر گرفتن محدودیت تلفات توان

ارغوان محمدی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق (قدرت و کنترل)، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

نوید رضائی

دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق (قدرت و کنترل)، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

مهرداد غلامی

استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق (قدرت و کنترل)، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده

ریزشبه‌های DC به دلیل ویژگی‌های قابل توجهی از جمله حذف توان راکتیو، تلفات کمتر توان و قابلیت اطمینان بالا، پایداری، کنترل پذیری و بهره‌وری انرژی، جذابیت بیشتری در شبکه‌های هوشمند دارا می‌باشند. یک بازار برق محلی مناسب به صورت نظیر به نظیر (P2P) برای اطمینان از پیشرفت ریزشبه‌های DC چندگانه به هم پیوسته در حفظ نفوذ فزاینده منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار ضروری می‌باشد. اشتراک انرژی P2P زیرساخت سودمندی را برای هم‌تایان، از جمله ژنراتورهای تولید پراکنده، مصرف‌کنندگان نهایی و پروژیه‌ها فراهم می‌کند که بتوانند به طور مستقیم با یکدیگر به تبادل انرژی الکتریکی بپردازند. این مقاله یک مدل بهینه‌سازی تجارت انرژی P2P برای ریزشبه‌های DC چندگانه به هم پیوسته، که به وسیله یک سیستم مدیریت انرژی (EMS) هماهنگ شده‌اند ارائه می‌کند؛ قیمت تبادل توان توسط EMS به گونه‌ای تعیین می‌شود که سود کل شرکت‌کنندگان را به حداکثر برساند. هر ریزشبه DC شامل چندین آرایه فتوولتائیک، توربین بادی، بارهای مسکونی و خودروی الکتریکی (EV) می‌باشد. در چارچوب پیشنهادی، مقدار مجاز تلفات توان در نظر گرفته شده است که منعکس‌کننده محدودیت تبادل توان بین هم‌تایان است که می‌تواند بر مقدار تابع هدف تأثیرگذار باشد. نتایج نشان می‌دهد که اگر تلفات توان مجاز ۱۰٪ افزایش یابد، سود کل حدود ۲۰٪ افزایش خواهد یافت.

کلمات کلیدی

ریزشبه DC، سیستم مدیریت انرژی، تجارت انرژی نظیر به نظیر، تلفات مجاز توان، شبکه هوشمند.

نویسنده مسئول: دکتر نوید رضائی

ایمیل نویسنده مسئول: n.rezaei@uok.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

۱- مقدمه

الکتريکی به کار برده شوند [۵]. علاوه بر مزایای ارائه شده توسط ریزشبه DC، ترکیب چندین ریزشبه DC و افزایش منابع انرژی برای تامین انرژی، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد و هزینه انرژی و تلفات توان خطوط انتقال را کاهش می‌دهد. با اتصال تمام ریزشبه‌ها به یکدیگر به عنوان یک ریزشبه چندگانه به هم پیوسته (Multi-MG) و ایجاد قابلیت همکاری و اشتراک انرژی در این شبکه‌ها، بستر مناسبی برای توزیع بهینه انرژی با استراتژی‌های مناسب یک سیستم مدیریت انرژی موثر ایجاد می‌شود [۶، ۷]. در نتیجه، با افزایش مبادلات توان بین آن‌ها، رقابت برای مشارکت در بازار محلی نیز افزایش می‌یابد، که می‌تواند منجر به سودآوری برای پروژیه‌ها و تلفات توان بیشتر مدیریت شده‌ای برای شبکه شود. لازم به ذکر است که با توجه به اشتراک انرژی P2P در بین همسایگان، تلفات توان و نیاز به ساخت بیشتر منابع تولید توان را می‌توان کاهش داد و می‌تواند منجر به مدیریت کارآمد انرژی شود. اشتراک انرژی نظیر به نظیر (P2P) تبادل انرژی منابع را بین مصرف‌کنندگان

امروزه، با توجه به نسبت روبه رشد منابع انرژی پراکنده و بارهای DC، ریزشبه‌های DC به دلیل مزایایی که ارائه می‌دهند به طور بالقوه از ریزشبه‌های AC مفیدتر می‌باشند [۱]. به عنوان مثال، ریزشبه‌های DC تلفات کمتر، قابلیت اطمینان بالاتر، راندمان بیشتر و اتصال آسان‌تری دارند و نیازی به همگام‌سازی ندارند. به‌ویژه، ریزشبه‌های DC به کنترل فرکانس و توان راکتیو نیز نیاز ندارند؛ که این امر، افزایش بهره‌وری سیستم مدیریت انرژی (EMS) را به دنبال دارد. EMS یک کنترل‌کننده محلی می‌باشد که توان منابع انرژی پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی (ESS) را با توجه به محدودیت‌های هر واحد کنترل، توزیع و متعادل می‌کند [۲]. بعلاوه، یک ریزشبه DC متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) است که از طریق مبدل‌ها به یکدیگر و ریزشبه متصل می‌شوند [۳]. مبدل‌ها بیشترین سهم را در کل تلفات توان شبکه DC دارند [۴]. ریزشبه‌های DC عمدتاً می‌توانند در ساختمان‌هایی با تولید انرژی تجدیدپذیر بالا، مراکز داده، کشتی‌ها، سیستم‌های کشتی و ایستگاه‌های شارژ خودروهای

تبدیل توان به اشتراک بگذارند؛ منتها بررسی از نظر هزینه و سودآوری در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته و سیستم مورد مطالعه صرفاً یک ریزشکه DC ایزوله می‌باشد. مرجع [۱۶] یک سیستم تجارت انرژی P2P را بر اساس بهینه‌سازی نظریه بازی چند هدفه برای یک ریزشکه خوشه‌ای برای یافتن ظرفیت مناسب تولیدات پراکنده پیشنهاد می‌کند. ساختار انتخاب شده از سه ریزشکه مختلف تشکیل شده است و هر ریزشکه می‌تواند ترکیبی از پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری‌ها باشد. مقاله [۱۷] از چندین نانو شبکه برای تشکیل یک ریزشکه DC در کاربردهای مسکونی به منظور ترکیب و ایجاد یک جامعه انرژی تجدیدپذیر استفاده کرده است. این مقاله تنها در مورد توزیع بین منابع و مصرف‌کنندگان صحبت می‌کند و هدف اصلی مقاله تامین بار از منابع است. در نهایت، مقاله [۱۸] یک رویکرد اشتراک‌گذاری توان با در نظر گرفتن انتشار آلاینده کم مبتنی بر تجارت برق سبز برای سیستم‌های چند ریزشکه‌ای متصل به هم منطقه‌ای ارائه شده است. تجارت انرژی در این مقاله به صورت تجارت نظیر به نظیر (P2P) در نظر گرفته شده و تمامی منابع توان به کار برده شده سبز می‌باشند. با این حال، در مطالعه انجام شده هزینه مطرح بوده و بررسی تلفات توان و محدودیت انتقال در نظر گرفته نشده است.

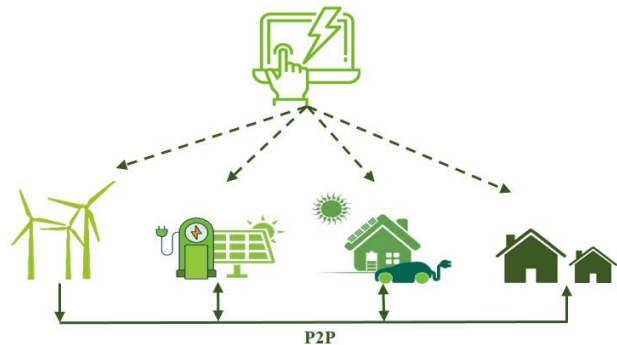
مقایسه مطالعات مختلف در مورد بهره‌وری و مدیریت انرژی ریزشکه‌های DC در جدول (۱) خلاصه شده است. با توجه به مطالعات انجام شده در جدول (۱) و مقایسه با مقاله حاضر، مشاهده می‌شود که در بسیاری از تحقیق‌ها به تلفات توان پرداخته نشده و یا به صورت محدود مورد بحث قرار گرفته است. بر همین اساس، تحقیق جدیدی در زمینه ریزشکه DC چندگانه (DC-MMG) وجود ندارد که سود را با تلفات توان با استفاده از ساختار اشتراک انرژی P2P تلفیق کرده باشد. همچنین یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها در ریزشکه‌های DC استفاده از خودروهای الکتریکی است که دارای مزایای فراوانی از جمله پیک‌سای و ذخیره‌سازی توان می‌باشد که در مقاله حاضر از وجود آن‌ها بهره جسته شده است.

جدول ۱- مقایسه مراجع

مرجع	خودروی الکتریکی	ریزشکه‌های چندگانه	در نظر گرفتن تلفات	تابع هدف
[۱۲]	X	X	X	کمینه هزینه
[۱۳]	X	X	X	کمینه هزینه
[۱۴]	X	X	X	توزیع بهینه توان برای BESS
[۱۵]	X	X	✓	کمینه تلفات
[۱۶]	X	✓	X	بیشینه سود
[۱۷]	X	X	X	تعادل تولید و توان
[۱۸]	✓	✓	X	کمینه هزینه
مقاله حاضر	✓	✓	✓	بیشینه سود با شرط تلفات مجاز

در این مقاله، با در نظر گرفتن مصرف‌کنندگان به عنوان مشترکینی که نه تنها مصرف‌کننده بلکه تولیدکننده نیز هستند، طرحی شامل چهار ریزشکه DC در کاربردهای مسکونی ارائه شده است. در هر یک از ریزشکه‌ها، خانه‌ها می‌توانند انرژی را با استفاده از الگوی P2P با یکدیگر به اشتراک بگذارند. تمام منابع انرژی سبز، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شوند. این مقاله همچنین تلفات سیستم را به منظور به حداقل رساندن آن و در نتیجه افزایش بهره‌وری سیستم بررسی می‌کند. قیمت مبادلات توان میان ریزشکه‌ها توسط سیستم مدیریت انرژی در هر ساعت به صورت متغیر در نظر گرفته شده

و یا پروژیه‌ها امکان‌پذیر می‌کند. در این مبادله توان، مازاد انرژی مصرف‌کنندگان بین همسایگان تقسیم می‌شود [۱۰-۸]. شکل (۱) شماتیک کلی اشتراک انرژی P2P را نشان می‌دهد که رابطه بین عناصر ریزشکه را به نمایش می‌گذارد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، پروژیه‌ها، مصرف‌کنندگان، ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی و سایر عناصر و منابع مانند توربین‌های بادی تحت کنترل مدیر ریزشکه می‌توانند توان را با یکدیگر مبادله کنند. مفهوم مبادلات انرژی P2P در زمینه انحصار انرژی خود یک نوع انقلاب محسوب می‌شود. اپراتورهای فعلی شبکه اغلب تمایلی به ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر به گونه‌ای که کاربر آن را مدیریت کند، ندارند؛ زیرا این امر حاشیه سود آن‌ها را کاهش می‌دهد. در حال حاضر، کاربران خانگی فقط می‌توانند توان را از PV خورشیدی پشت‌بام‌های خود به شبکه با قیمت‌های بسیار پایین (حدود یک پنجم تعرفه‌ها) بفروشند [۱۱]. این قیمت‌های پایین، دوره بازپرداخت تسهیلات انرژی‌های تجدیدپذیر خانگی را افزایش می‌دهد و از پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، بسیاری از تأسیسات انرژی تجدیدپذیر خانگی اغلب به طور ناکارآمد استفاده می‌شوند. برای مثال، خانوارهای همسایه علی‌رغم تغییرات زمانی در عرضه و تقاضای انرژی، مصرف خود را برای به حداکثر رساندن منافع انرژی متقابل خود هماهنگ نمی‌کنند. بنابراین، اجازه دادن به کاربران خانگی برای فروش توان به یکدیگر در مبادلات P2P و متعاقباً هماهنگ کردن استفاده از آن‌ها، نه تنها انگیزه پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌کند، بلکه بهره‌وری انرژی را نیز بهینه می‌کند [۱۱].



شکل ۱- شماتیک اشتراک انرژی P2P در ریزشکه

مطالعات زیادی در مورد مدیریت و بهره‌وری انرژی در ریزشکه‌های DC انجام شده است. مرجع [۱۲] به کنترل ولتاژ و استراتژی مدیریت انرژی سیستم توزیع ریزشکه DC متصل به شبکه و همچنین برای یک ریزشکه DC جزیره‌ای با منابع انرژی هیبریدی می‌پردازد. تابع هدف [۱۲] تک‌هدفه بوده و مدل بهینه‌سازی مدیریت انرژی بر اساس برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح ارائه شده است. مرجع [۱۳] یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی برای ریزشکه‌های دولایه (BMG) پیشنهاد می‌کند، که ادغام انواع مختلف بارها (AC و DC) و تولیدات پراکنده را تسهیل می‌کند. بسته به نوع، مکان و مشخصات بارهای ریزشکه و DGها، چارچوب برنامه‌نویسی به هر گره اجازه می‌دهد تا خود یک گره سراسری باشد. مرجع [۱۴] به موضوع توزیع بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی باتری (BESS) در حالت جریان مستقیم برای مدت ۲۴ ساعت می‌پردازد که هدف آن کاهش هزینه‌ها است. این مقاله از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) با استفاده از مدل بار نمایی وابسته به ولتاژ، و یک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تولید کوتاه‌مدت انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کند. در [۱۵]، یک ریزشکه DC با اشتراک P2P با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی شده است که به کاربران اجازه می‌دهد انرژی اضافی خود را از منابع انرژی پراکنده با حداقل تلفات سیستم از جمله تلفات توزیع و همچنین تلفات

پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۲-۱- پنل‌های خورشیدی

توان خروجی پنل‌های خورشیدی در خانه‌ها از رابطه (۱) به دست می‌آید. توان تولیدی پنل خورشیدی، پارامتری از میزان تابش خورشید، دمای هوا و مساحت سطح هر یک از پنل‌های موجود در هر یک از ریزشبه‌ها می‌باشد [۱۹ و ۲۰].

$$P_{PV}^{(pv,m,t)} = \eta_{PV}^{(pv,m)} \cdot S_{PV}^{(pv,m)} \cdot I_s^{(m,t)} [1 - 0.005(\theta_{OS}^{(m,t)} - 25)] \quad \forall m, \forall pv_m, \forall t \quad (1)$$

که در آن $\eta_{PV}^{(pv,m)}$ راندمان پنل برحسب درصد، $S_{PV}^{(pv,m)}$ مساحت سطح پنل برحسب مترمربع در ریزشبه m ام، $I_s^{(m,t)}$ میزان تابش خورشید در زمان t و ریزشبه m ام و $\theta_{OS}^{(m,t)}$ دمای هوای محیط در زمان t و در ریزشبه m ام می‌باشد.

کل توان تولیدی پنل‌های خورشیدی از دو بخش تشکیل شده است. اول توانی که برای تامین نیاز خود خانه به‌صورت بلادرنگ استفاده می‌شود و دوم توانی که مازاد بر مصرف بوده و در باتری‌ها ذخیره می‌شود. بنابراین معادله (۲) را خواهیم داشت.

$$P_{PV}^{(pv,m,t)} = \sum_{h_m \in H_m} P_{PV-L}^{(pv,m,h_m,t)} + \sum_{b_m \in B_m} P_{PV-B}^{(pv,m,b_m,t)} \quad \forall m, \forall pv_m, \forall t \quad (2)$$

بخشی از توان پنل خورشیدی است که برای تامین بار خانه‌ها و بخشی دیگر از توان پنل خورشیدی است که می‌تواند به باتری خانه منتقل و در آن ذخیره شود. بدیهی است که هر یک از این توان‌ها باید مقادیری بین صفر و کل توان PV مربوطه داشته باشند.

$$0 \leq P_{PV-L}^{(pv,m,t)} \leq P_{PV}^{(pv,m,t)} \quad \forall m, \forall pv_m, \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq P_{PV-B}^{(pv,m,t)} \leq P_{PV}^{(pv,m,t)} \quad \forall m, \forall pv_m, \forall t \quad (4)$$

۲-۲- باتری‌ها

انرژی و توان ذخیره شده در باتری در زمان t در رابطه (۵) به‌دست می‌آید [۲۱].

$$E_B^{(b_m,m,t)} = \begin{cases} E_B^{(b_m,m,t-1)} + \eta_{B,CH}^{(b_m,m)} \cdot P_{B,CH}^{(b_m,m,t)} - \frac{P_{B,DCH}^{(b_m,m,t)}}{\eta_{B,DCH}^{(b_m,m)}}, & t > 1 \\ E_{initial}^{(b_m,m)} + \eta_{B,CH}^{(b_m,m)} \cdot P_{B,CH}^{(b_m,m,t)} - \frac{P_{B,DCH}^{(b_m,m,t)}}{\eta_{B,DCH}^{(b_m,m)}}, & t = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{B,min}^{(b_m,m)} \leq E_B^{(b_m,m,t)} \leq E_{B,max}^{(b_m,m)} \quad \forall m, \forall b_m, \forall t \quad (6)$$

$$P_{B,min}^{(b_m,m)} \cdot u_{B,DCH}^{(b_m,m,t)} \leq P_{B,DCH}^{(b_m,m,t)} \leq P_{B,max}^{(b_m,m)} \cdot u_{B,DCH}^{(b_m,m,t)} \quad \forall m, \forall b_m, \forall t \quad (7)$$

$$P_{B,min}^{(b_m,m)} \cdot u_{B,CH}^{(b_m,m,t)} \leq P_{B,CH}^{(b_m,m,t)} \leq P_{B,max}^{(b_m,m)} \cdot u_{B,CH}^{(b_m,m,t)} \quad \forall m, \forall b_m, \forall t \quad (8)$$

$$u_{B,CH}^{(b_m,m,t)} + u_{B,DCH}^{(b_m,m,t)} \leq 1 \quad \forall m, \forall b_m, \forall t \quad (9)$$

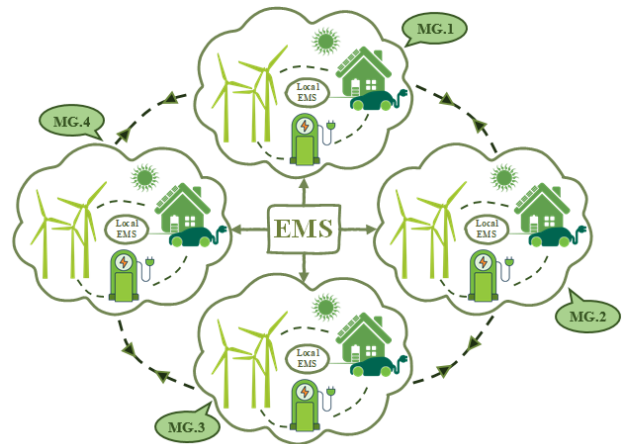
که در آن $E_B^{(b_m,m,t)}$ انرژی باتری در زمان t و ریزشبه m ام، $\eta_{B,CH}^{(b_m,m)}$ و $P_{B,DCH}^{(b_m,m,t)}$ به‌ترتیب راندمان شارژ و دشارژ باتری‌ها در هر ریزشبه و $P_{B,CH}^{(b_m,m,t)}$ و $P_{B,DCH}^{(b_m,m,t)}$ به‌ترتیب توان شارژ و دشارژ باتری در زمان t و ریزشبه m ام هستند.

و با توجه به شرایط سیستم به دست می‌آید. مدل‌سازی و فرمول‌بندی برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته عدد صحیح (MINLP) و بهینه‌سازی در افق ۲۴ ساعته در نرم‌افزار GAMS با حل‌کننده DICOPT انجام شده است. به‌طور کلی، سهم مقاله حاضر را می‌توان به شرح زیر برجسته کرد:

- ✓ بهبود برق‌رسانی سیستم به مصرف‌کنندگان به دلیل مدیریت بهینه مبادلات توان میان DC-MMG.
 - ✓ متغیر در نظر گرفتن قیمت تبادل توان و به حداکثر رساندن تابع سود DC-MMG مشروط به تلفات تبدیل و انتقال.
 - ✓ افزودن P2P به ساختار DC-MMG. که می‌تواند مصرف‌کنندگان بیشتری را برای مشارکت در تولید توان ترغیب کرده و در نتیجه نیاز به ساخت منبع متمرکز کاهش یافته و در پی آن تلفات انتقال کاهش می‌یابد.
- بقیه مقاله به این شرح می‌باشد. بخش دوم مدل‌سازی و فرمول‌بندی‌های مورد استفاده در این مقاله را توضیح می‌دهد. بخش سوم، تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از سیستم نمونه و تابع هدف را شرح می‌دهد و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش چهارم بیان می‌شود.

۲- مدل‌سازی سیستم و فرمول‌بندی مسئله

سیستم در نظر گرفته شده در این مقاله شامل چهار ریزشبه DC است که در شکل (۲) نشان داده شده است. هر یک از این ریزشبه‌ها شامل یک توربین بادی، یک ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی و چندین خانه است. تعداد خانه‌ها در ریزشبه‌ها متفاوت می‌باشد.



شکل ۲- سیستم پیشنهادی

در این مقاله هر خانه به عنوان یک پروژومر در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که تمام خانه‌ها توانایی تولید توان از طریق پنل‌های خورشیدی نصب شده بر روی پشت‌بام خانه‌ها را دارند. توان خروجی این پنل‌های خورشیدی پارامتری از دمای هوا، مساحت سطح پنل‌ها و تابش خورشید است. علاوه‌براین، هر خانه دارای یک سیستم ذخیره‌ساز باتری (BESS) و همچنین یک خودروی الکتریکی PHEV است. در هر یک از ریزشبه‌ها، یک سیستم مدیریت انرژی محلی وجود دارد که وظایف آن عبارتند از: برقراری تعادل بین توان مصرفی و تولیدی، امکان فروش توان مازاد بر نیاز خود ریزشبه برای کسب سود و همچنین خرید توان از ریزشبه‌های مجاور در صورت مواجهه با کمبود توان. علاوه، میان هر چهار ریزشبه، یک سیستم مدیریت انرژی متمرکز برای ارتباط منسجم بین آن‌ها ارائه شده است. این بدان معنی است که تمام ریزشبه‌ها همیشه به‌یکدیگر متصل هستند و نه تنها قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند به توسعه بازار محلی و سود بالقوه از فروش توان به یکدیگر منجر شوند. در ادامه به مدل‌سازی و فرمول‌بندی اجزای سیستم

$$0 \leq P_{EV,DCH}^{(ev_m,m,t)} \leq P_{EV,max}^{(ev_m,m)} \cdot u_{EV,DCH}^{(ev_m,m,t)} \quad (19)$$

$$u_{EV,CH}^{(ev_m,m,t)} + u_{EV,DCH}^{(ev_m,m,t)} \leq 1 \quad (20)$$

$$E_{EV,min}^{(ev_m,m,t)} \leq E_{EV}^{(ev_m,m,t)} \leq E_{EV,max}^{(ev_m,m,t)} \quad (21)$$

$$E_{EV}^{(ev_m,m,t)} - E_{EV,min}^{(ev_m,m,t)} \geq \eta_{EV,DCH}^{(ev_m,m)} \cdot \chi_D^{(ev_m,m)} \cdot D_{EV}^{(ev_m,m,t)} \quad (22)$$

$$E_{EV}^{(ev_m,m,t)} - E_{EV}^{(ev_m,m,t-1)} \leq \Delta_{EV}^{(ev_m,m,t)} \quad (23)$$

انرژی خودروی الکتریکی ev در ساعت t و ریزشبهه λ_m ، $P_{EV,DCH}^{(ev_m,m,t)}$ و $P_{EV,CH}^{(ev_m,m,t)}$ به ترتیب توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی ev در ساعت t و ریزشبهه λ_m ، $\chi_D^{(ev_m,m)}$ توان مصرفی باتری در هر کیلومتر مسافت، $D_{EV}^{(ev_m,m,t)}$ مسافت مورد نیاز هر EV ، $\eta_{EV,DCH}^{(ev_m,m)}$ و $\eta_{EV,CH}^{(ev_m,m)}$ راندمان شارژ و دشارژ باتری EV و در نهایت $\Delta_{EV}^{(ev_m,m,t)}$ رمپ مجاز برای تغییر سطح انرژی ذخیره شده در خودروی الکتریکی ev و ریزشبهه λ_m می‌باشد. معادلات (۲۳)–(۱۸) سایر قیود مربوط به خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد.

۲-۵ - تلفات و توان مبادله شده

مجموع تلفات در هر یک از ریزشبهه‌ها برابر است با تلفات ناشی از انتقال توان بین خانه‌ها و ایستگاه شارژ EV و تلفات ناشی از مبدل‌ها.

$$P_{LOSS}^{(m,t)} = P_{CONV}^{(m,t)} + P_{DIST}^{(m,t)} \quad \forall m, \forall t \quad (24)$$

که در آن $P_{DIST}^{(m,t)}$ تلفات توان انتقالی و $P_{CONV}^{(m,t)}$ تلفات مبدل است. تلفات توان انتقالی با رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$P_{DIST}^{(m,t)} = \left(\frac{P_{TRANS}^{(m,t)}}{V_{Grid}^{(m,t)}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_{Line}^{(l_m,m)}}{S_{Line}^{(l_m,m)}} \right) \cdot l_{Line}^{(l_m,m)} \quad (25)$$

که در آن $P_{TRANS}^{(m,t)}$ توان انتقالی در ریزشبهه است که می‌تواند شامل توان انتقال یافته از یک خانه به خانه دیگر، از توربین بادی به خانه و از توربین بادی به ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی که هر کدام فاصله خاص خود را دارند، باشد که با $l_{Line}^{(l_m,m)}$ نشان داده می‌شود و باید جداگانه محاسبه شود. $V_{Grid}^{(m,t)}$ ولتاژ توزیع در ریزشبهه‌ها، $\rho_{Line}^{(l_m,m)}$ مقاومت رسانای خط و $S_{Line}^{(l_m,m)}$ مساحت سطح هادی‌ها می‌باشد. مقادیر مرجع پارامترهای مذکور از مرجع [۱۵] اتخاذ شده است.

تلفات مبدل عمدتاً شامل سه نوع تلفات است: الف) تلفات کنترل الکترونیکی، ب) تلفات سوئیچینگ و ج) تلفات رسانایی که موارد الف) و ب) به توان خروجی مبدل بستگی دارد [۲۴]. تلفات مبدل را می‌توان به صورت زیر مدل کرد [۱۵]:

$$P_c = P_{1,c} + P_{2,c} + P_{3,c} \quad (26)$$

تلفات مربوط به $P_{1,c}$ مستقل از توان خروجی مبدل بوده و عمدتاً ناشی از مدار کنترل الکترونیکی در فن‌های مورد استفاده برای خنک‌کننده‌هایی است که لزوماً در مبدل‌ها وجود دارند. همچنین ممکن است مقداری تلفات هسته وجود داشته باشد که این نیز به توان خروجی بستگی ندارد، بلکه فقط به سیکل کاری، سطح ولتاژ خروجی و فرکانس سوئیچینگ بستگی دارد. $P_{2,c}$ مستقیماً با توان خروجی مبدل مرتبط است و عمدتاً ناشی از تلفات سوئیچینگ تقریباً خطی وابسته به جریان است. در نهایت تلفات $P_{3,c}$ تلفات وابسته به درجه دوم جریان است که عمدتاً به توان خروجی بستگی دارد. این تلفات معمولاً شامل تلفات اهمی برای عناصر مقاومتی، تلفات سلف برای عناصر سلفی و تلفات خازنی است. بسته به ماهیت تلفات، معادله (۲۷) را می‌توان با توان خروجی مبدل، یعنی P_0 به صورت زیر تخمین زد:

$$P_c = B_0 + B_1 \cdot P_0 + B_2 \cdot P_0^2 \quad (27)$$

که در آن B_0 تلفات ناشی از کنترل الکترونیکی مورد استفاده برای خنک کردن را نشان می‌دهد، $B_1 \cdot P_0$ نشان‌دهنده تلفات ناشی از سوئیچینگ است که مستقیماً به خروجی P_0 مربوط می‌شود و $B_2 \cdot P_0^2$ تلفات ناشی از رابطه درجه دوم خروجی P_0 را نشان می‌دهد. در این مقاله ترم سوم معادله (۲۷) به دلیل

باتری‌ها در ابتدای هر ساعت یک مقدار اولیه دارند که با $E_{initial}^{(b_m,m)}$ و $E_{min}^{(b_m,m)}$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار انرژی باتری هستند، $P_{min}^{(b_m,m)}$ و $P_{max}^{(b_m,m)}$ حداقل و حداکثر مقدار توان شارژ و دشارژ هستند. در نهایت، $u_{B,DCH}^{(b_m,m,t)}$ و $u_{B,CH}^{(b_m,m,t)}$ متغیرهای باینری شارژ و دشارژ باتری هستند.

۲-۳ - توربین‌های بادی

توان خروجی یک توربین بادی $P_W^{(w_m,m,t)}$ را می‌توان به عنوان تابعی از سرعت باد ($v_W^{(w_m,m,t)}$) با استفاده از معادله (۱۰) بیان کرد [۲۰ و ۲۲].

$$P_W^{(w_m,m,t)} = \begin{cases} 0, & v_W^{(w_m,m,t)} \leq v_{cut-in}^{(w_m,m)}, v_W^{(w_m,m,t)} \geq v_{cut-out}^{(w_m,m)} \\ P_{W,rated}^{(w_m,m)} \times \frac{v_W^{(w_m,m,t)} - v_{cut-in}^{(w_m,m)}}{v_{rated}^{(w_m,m)} - v_{cut-in}^{(w_m,m)}}, & v_{cut-in}^{(w_m,m)} < v_W^{(w_m,m,t)} < v_{rated}^{(w_m,m)} \\ P_{W,rated}^{(w_m,m)}, & v_{rated}^{(w_m,m)} \leq v_W^{(w_m,m,t)} \leq v_{cut-out}^{(w_m,m)} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $P_{W,rated}^{(w_m,m)}$ توان خروجی در سرعت نامی یا $v_{rated}^{(w_m,m)}$ است. $v_{cut-out}^{(w_m,m)}$ و $v_{cut-in}^{(w_m,m)}$ به ترتیب حداقل سرعت خطرناک برای توربین و حداقل سرعت تولید توان هستند.

توان تولیدی توربین بادی به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. اول، توانی که توسط توربین برای تغذیه خانه‌ها استفاده می‌شود و یا در باتری‌های خانه‌ها ذخیره می‌شود، و دوم، توانی که برای تامین توان مورد نیاز ایستگاه شارژ EV استفاده می‌شود.

$$P_W^{(w_m,m,t)} = \left(\sum_{h_m \in H_m} P_{W-H}^{(w_m,h_m,m,t)} \right) + P_{W-S}^{(w_m,m,t)}; \forall m, \forall w_m, \forall h_m, \forall t \quad (11)$$

بخشی از ظرفیت تولید توربین بادی است که به ایستگاه شارژ EV منتقل می‌شود و $P_{W-H}^{(w_m,h_m,m,t)}$ بخشی دیگر از ظرفیت تولیدی توربین می‌باشد که برای تامین نیاز خانه‌ها استفاده می‌شود. $P_{W-H}^{(w_m,h_m,m,t)}$ خود به دو قسمت تقسیم می‌شود: اول، $P_{W-L}^{(w_m,h_m,m,t)}$ توانی که مستقیماً برای تامین توان خانه‌ها استفاده می‌شود و دوم، $P_{W-B}^{(w_m,b_m,m,t)}$ توان مازاد بر مصرف است و باید در باتری ذخیره شود. پس معادله (۱۲) را خواهیم داشت.

$$\sum_{h_m \in H_m} P_{W-H}^{(w_m,h_m,m,t)} = \sum_{h_m \in H_m} P_{W-L}^{(w_m,h_m,m,t)} + \sum_{b_m \in B_m} P_{W-B}^{(w_m,b_m,m,t)} \quad \forall m, \forall w_m, \forall t \quad (12)$$

بدیهی است که هر توان باید بین مقدار معینی، یعنی، صفر و کل توان خروجی توربین باشد.

$$0 \leq P_{W-H}^{(w_m,h_m,m,t)} \leq P_W^{(w_m,m,t)} \quad \forall m, \forall w_m, \forall t \quad (13)$$

$$0 \leq P_{W-S}^{(w_m,m,t)} \leq P_W^{(w_m,m,t)} \quad \forall m, \forall w_m, \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq P_{W-L}^{(w_m,h_m,m,t)} \leq P_W^{(w_m,m,t)} \quad \forall m, \forall w_m, \forall h_m, \forall t \quad (15)$$

$$0 \leq P_{W-B}^{(w_m,b_m,m,t)} \leq P_W^{(w_m,m,t)} \quad \forall m, \forall w_m, \forall b_m, \forall t \quad (16)$$

۲-۴ - خودروهای الکتریکی

هر خانه یک خودروی الکتریکی از نوع PHEV دارد. این EV در ایستگاه-های شارژ در ریزشبهه‌ها شارژ می‌شوند و در صورت داشتن توان مازاد بر مصرف خود می‌توانند توان را به شبکه دشارژ کنند. ایستگاه‌های شارژ EV توسط PVهای روی سقف ایستگاه شارژ و همچنین توربین‌های بادی تامین می‌شوند. خودروهای الکتریکی با معادلات (۲۳)–(۱۷) مدل‌سازی می‌شوند [۲۳].

$$E_{EV}^{(ev_m,m,t)} = E_{EV}^{(ev_m,m,t-1)} + \eta_{EV,CH}^{(ev_m,m)} \cdot P_{EV,CH}^{(ev_m,m,t)} - \frac{P_{EV,DCH}^{(ev_m,m,t)}}{\eta_{EV,DCH}^{(ev_m,m)}} - \chi_D^{(ev_m,m)} \cdot D_{EV}^{(ev_m,m,t)}; \forall m, \forall ev_m, \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{EV,CH}^{(ev_m,m,t)} \leq P_{EV,max}^{(ev_m,m)} \cdot u_{EV,CH}^{(ev_m,m,t)} \quad (18)$$

ضریب کم آن حذف شده و معادله نهایی تلفات مبدل به صورت معادله (۲۸) در نظر گرفته شده است.

$$P_{CONV}^{(m,t)} = B_0 + B_1 \cdot \left\{ \sum_{pv_m \in PV_m} \left(\sum_{h_m \in H_m} P_{PV-L}^{(pv_m, h_m, m, t)} + \sum_{b_m \in B_m} P_{PV-B}^{(pv_m, b_m, m, t)} \right) + \sum_{w_m \in W_m} \left(P_{W-S}^{(w_m, m, t)} + \sum_{h_m \in H_m} P_{W-H}^{(w_m, h_m, m, t)} \right) \right\} \quad (28)$$

در نهایت توان انتقالی میان ریزشکبه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{EX}^{(m, \hat{m}, t)} = P_{EX, Load}^{(m, \hat{m}, t)} + P_{EX, Station}^{(m, \hat{m}, t)} \quad (29)$$

توان انتقالی میان ریزشکبه‌ها است که خود به دو قسمت تقسیم می‌شود. اول، $P_{EX, Load}^{(m, \hat{m}, t)}$ که برای تغذیه خانه‌ها در ریزشکبه‌ها استفاده می‌شود و دوم $P_{EX, Station}^{(m, \hat{m}, t)}$ که مستقیماً به ایستگاه‌های شارژ EV منتقل و در آنجا مصرف می‌شود.

۲-۶- تعادل توان

همیشه و در تمام ریزشکبه‌ها، تعادل توان باید در سیستم رعایت شود. مجموع توان تولیدی تمام منابع و توان دشارژ شده باتری‌ها و همچنین توان دشارژ شده خودروهای الکتریکی باید برابر با بار هر ریزشکبه، مقدار شارژ باتری-ها و خودروهای الکتریکی بعلاوه مجموع تلفات توان باشد. این امر در رابطه (۳۰) بیان می‌شود.

$$\sum_{m \in M} \left(\sum_{pv_m \in PV_m} P_{PV}^{(pv_m, m, t)} + \sum_{w_m \in W_m} P_W^{(w_m, m, t)} + \sum_{b_m \in B_m} P_{B, DCH}^{(b_m, m, t)} + \sum_{ev_m \in EV_m} P_{EV, DCH}^{(ev_m, m, t)} + \sum_{\substack{\hat{m} \in M \\ \hat{m} \neq m}} P_{EX}^{(m, \hat{m}, t)} \right) = \sum_{m \in M} \left(P_{LOSS}^{(m, t)} + \sum_{h_m \in H_m} L_E^{(h_m, m, t)} + \sum_{b_m \in B_m} P_{B, CH}^{(b_m, m, t)} + \sum_{ev_m \in EV_m} P_{EV, CH}^{(ev_m, m, t)} \right); \forall t \quad (30)$$

۲-۷- قید تلفات توان

$$\sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left(P_{LOSS}^{(m, t)} + \sum_{\substack{\hat{m} \in M \\ \hat{m} \neq m}} P_{LOSS, TR}^{(m, \hat{m}, t)} \right) \leq P_{LP} \quad (31)$$

این قید تضمین می‌کند که کل تلفات توان از یک مقدار معین تجاوز نمی‌کند. در رابطه (۳۱) P_{LP} مقدار مجاز تلفات توان در سیستم است. تعیین حد آن بر اساس ترجیح مدیر ریزشکبه، یعنی EMS است.

۲-۸- تابع هدف

به منظور به حداکثر رساندن سود کل حاصل از تجارت انرژی ریزشکبه‌های DC، تابع هدف به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Max.} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \left(\pi_E^t \cdot \sum_{\substack{\hat{m} \in M \\ \hat{m} \neq m}} P_{EX}^{(m, \hat{m}, t)} \right) \quad (32)$$

رویکرد این مقاله بر این واقعیت استوار است که ریزشکبه‌ها و به‌طور کلی صاحبان منابع می‌توانند توان اضافی خود را به ریزشکبه‌های دیگر بفروشند. تابع هدف سود مورد نظر در رابطه (۳۲) از دیدگاه صاحبان هر DG حاضر در ریزشکبه و به‌طور کلی برای ریزشکبه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. توابع هدف تعریف‌شده، با تمام قیود نابرابری و برابری، غیرخطی بودن مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. بنابراین مسئله بهینه‌سازی در قالب استاندارد بهینه‌سازی MINLP فرموله شده است.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- داده‌های سیستم

سیستم آزمون مورد مطالعه، سیستمی شامل ۴ ریزشکبه به‌هم پیوسته در قالب Multi-MG می‌باشد. این مدل مجموعاً شامل ۱۵ خانه می‌باشد. فاصله ریزشکبه‌ها از یکدیگر در جدول (۲) آورده شده است. همچنین، آرایش خانه‌های هر ریزشکبه در شکل (۳) نشان داده شده است. ولتاژ توزیع در ریزشکبه‌ها ۴۸ ولت و ولتاژ انتقال میان ریزشکبه‌ها ۴۰۰ ولت می‌باشد.

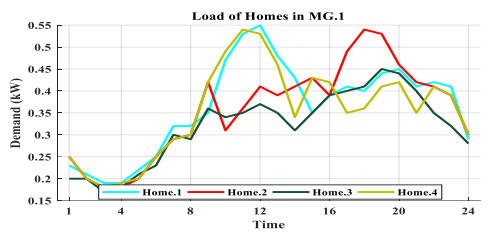
جدول ۲- فاصله ریزشکبه‌ها از یکدیگر

ریزشکبه	فاصله (متر)	ریزشکبه	فاصله (متر)
۲-۱	۱۵۰۰	۱-۳	۱۶۰۰
۳-۱	۱۶۰۰	۲-۳	۲۲۰۰
۴-۱	۲۰۰۰	۴-۳	۱۰۰۰
۱-۲	۱۵۰۰	۱-۴	۲۰۰۰
۳-۲	۲۲۰۰	۲-۴	۱۴۰۰
۴-۲	۱۴۰۰	۳-۴	۱۰۰۰

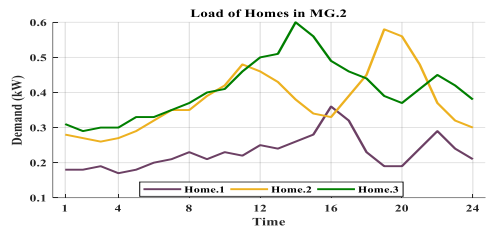
همانطور که قبلاً ذکر شده است، هر ریزشکبه به‌طور کلی شامل یک توربین بادی برای تمام خانه‌ها و یک ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی است. مجموع توان خروجی این توربین‌های بادی پارامتری از سرعت باد در هر ریزشکبه است. تعداد خانه‌های ریزشکبه اول تا چهارم به ترتیب ۴، ۳، ۳ و ۵ خانه است. مشخصات بار برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز برای یک روز خاص از هر خانه در ریزشکبه‌ها در شکل (۴) بر حسب کیلووات نشان داده شده است.

پروفیل‌های بار در شکل (۴) بدون در نظر گرفتن بار خودروهای الکتریکی می‌باشند و فقط میزان مصرف خانه‌ها را نشان می‌دهند. در هر ریزشکبه، خانه‌ها می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و تبادل توان را در قالب P2P انجام دهند. تمامی خانه‌های موجود در هر ریزشکبه و علاوه بر آن تمامی ریزشکبه‌ها توسط خطوط انتقال و سیستم مدیریت انرژی به یکدیگر متصل می‌شوند و با استفاده از فاصله آن‌ها می‌توان تلفات انتقال سیستم را محاسبه کرد. خانه‌ها و توربین-های بادی دارای مبدل‌های الکتریکی هستند و تلفات این مبدل‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه تلفات توان مجموع تلفات انتقال و تلفات مبدل است. ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی هر یک از ریزشکبه‌ها دارای پنل خورشیدی مخصوص به خود هستند و در هر ریزشکبه به توربین بادی متصل هستند. مسافت مورد نیاز خودروهای الکتریکی در شکل (۵) بر حسب کیلومتر نشان داده شده است. جداول (۳) و (۴) داده‌های خودروهای الکتریکی، توربین-های بادی و باتری‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

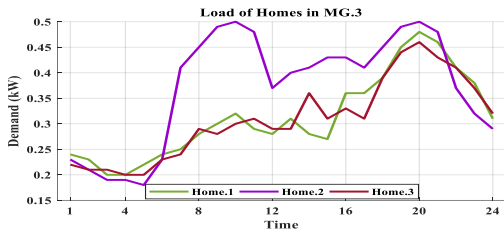
در نظر گرفته شده و مقادیر به دست آمده از آن در جدول (۶) قابل مشاهده است. در جدول (۶) مشاهده می‌شود که بیشترین قیمت مبادله توان در ساعت ۱۹:۰۰ رخ داده است که ساعت پیک بار شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این ساعت قیمت توان مبادله شده به ۰/۴۵ دلار رسیده است. در جدول (۶)، قیمت تبادل توان در ساعت‌هایی که مبادله توان انجام نشده است وارد نشده و مورد نظر قرار نگرفته‌اند. همچنین میزان توان مبادله شده میان ریزشکده‌ها به تفکیک ریزشکده‌ها و برحسب ساعت در جدول (۷) نشان داده شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که در هر ساعتی که مبادله توان صورت گرفته است، کدام ریزشکده فرستنده توان و کدامیک گیرنده آن بوده است. که در نهایت مقدار خالص توان انتقالی برابر با ۳۰۴/۹۸۹ کیلووات است که در شکل (۶) نیز قابل مشاهده می‌باشد.



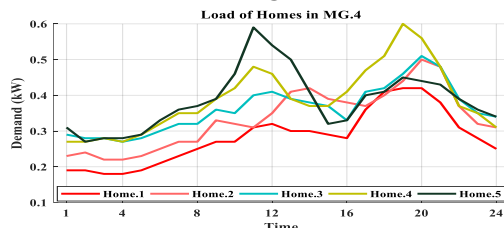
(الف)



(ب)



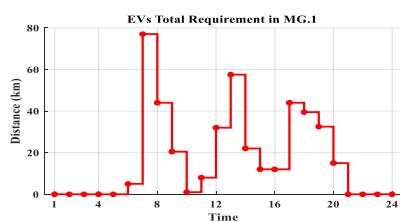
(ج)



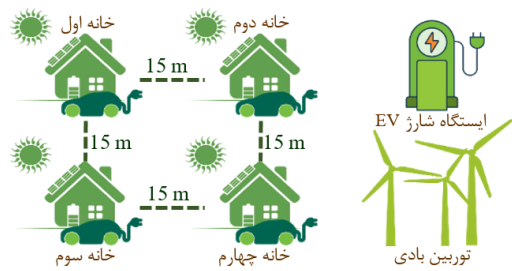
(د)

شکل ۴- پروفیل بار مصرفی هر ریزشکده (الف اول، ب دوم، ج)

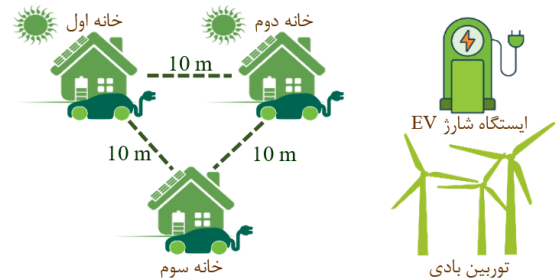
سوم، د چهارم



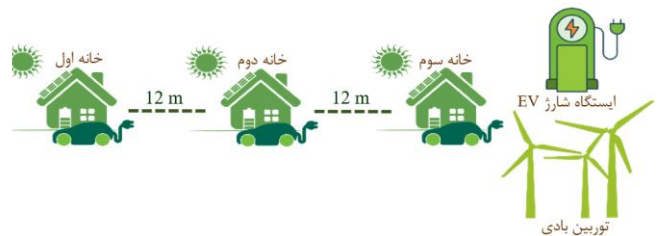
(الف)



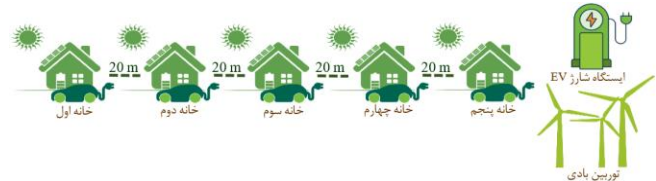
(الف)



(ب)



(ج)



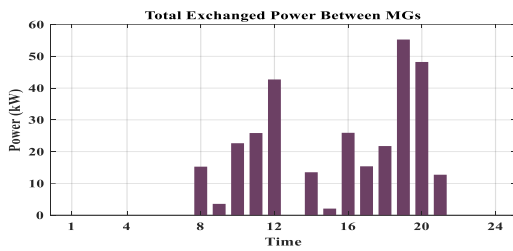
(د)

شکل ۳- آرایش خانه‌های موجود در هر ریزشکده (الف اول، ب دوم، ج سوم، د چهارم)

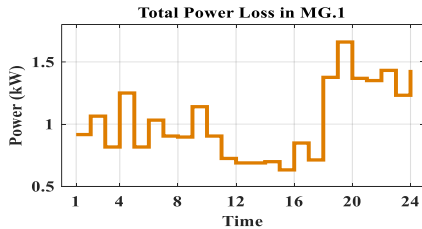
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

توان منتقل شده در داخل ریزشکده‌ها از نوع اشتراک P2P می‌باشد. بیشترین توان انتقالی مربوط به توربین بادی هر یک از ریزشکده‌ها به خانه‌ها برای تامین بار و یا تامین مورد نیاز در ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی است. جدول (۵) مجموع توان منتقل شده در داخل ریزشکده‌ها را برحسب ساعت نشان می‌دهد. واضح است که در ساعتی که پنل‌های خورشیدی وارد مدار می‌شوند و توان تولید می‌کنند، نسبت به زمانی که پنل‌ها تولید توان ندارند، شاهد کاهش میزان توان مبادله شده هستیم. این امر نشان می‌دهد که خانه‌ها و همچنین ایستگاه شارژ با داشتن پنل‌های خورشیدی خود توانسته‌اند بیشتر انرژی خود را تامین کنند.

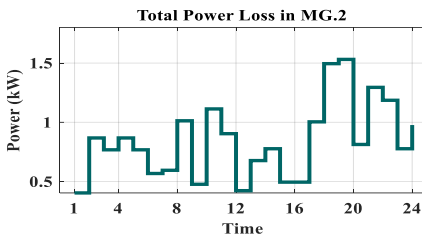
به‌طور کلی، تبادل توان ریزشکده‌ها با یکدیگر، همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در ساعت ۱۹:۰۰ و ۲۰:۰۰ در حداکثر مقدار خود قرار دارد. این ساعات پیک بار شبکه می‌باشد و میزان تبادل توان در داخل ریزشکده‌ها و همچنین تبادل کل ریزشکده‌ها با یکدیگر در این ساعات زیاد است که یکی از دلایل آن می‌تواند خارج شدن پنل‌های خورشیدی از مدار در نتیجه نبود نور خورشید باشد. در این مقاله قیمت مبادله توان بین ریزشکده‌ها به عنوان متغیر



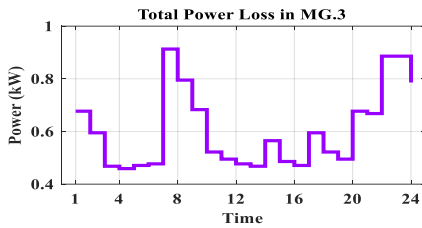
شکل ۶- توان مبادله شده میان ریزشبه‌ها



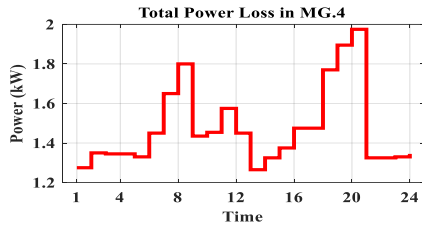
(الف)



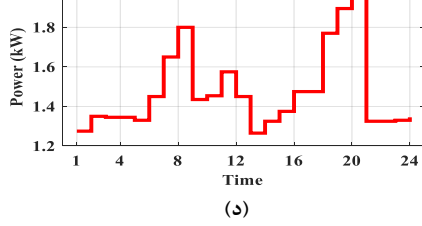
(ب)



(ج)

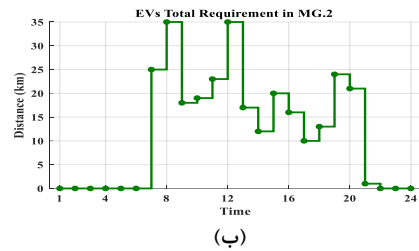


(د)

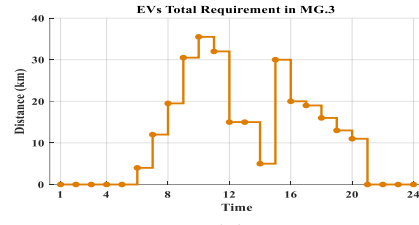


(د)

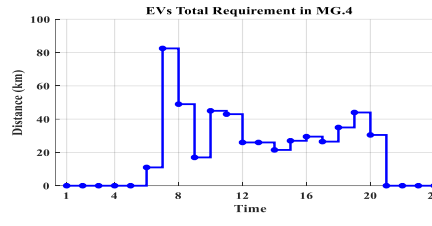
شکل ۷- تلفات کل هر ریزشبه (الف اول، ب دوم، ج سوم، د چهارم) می‌توان دریافت که در اکثر ریزشبه‌ها، زمانی که پنل‌های خورشیدی خانه‌ها در اوج ظرفیت تولیدی خود هستند، تلفات سیستم کاهش می‌یابد؛ زیرا در آن زمان‌ها مصرف‌کنندگان بیشتر توان پنل‌های خورشیدی خانه را مصرف می‌کنند و در نتیجه تبادل توان تا حدودی کاهش می‌یابد. همانطور که ذکر شد، تابع هدف، حداکثرسازی سود برای هر یک از ریزشبه‌ها می‌باشد. قیمت مبادله توان همانطور که قبلاً گفته شد متغیر در نظر گرفته می‌شود و در نهایت توسط EMS مرکزی به ریزشبه‌ها اعلام می‌شود. جدول (۹) مقادیر سود را در چندین حالت مختلف نسبت به تلفات نشان می‌دهد که



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵- فاصله مورد نیاز خودروهای الکتریکی در هر ریزشبه (الف اول، ب دوم، ج سوم، د چهارم)

جدول ۳- داده‌های خودروهای الکتریکی

پارامترهای EV				ریزشبه
$\chi_{d,m}$	Min. Energy	Max. Power	$\eta^{CH,DCH}$	
۰/۲ [kW]	۵ [kWh]	۵۰ [kW]	۹۰٪	۱
۰/۲ [kW]	۶ [kWh]	۶۰ [kW]	۹۰٪	۲
۰/۲ [kW]	۶ [kWh]	۶۰ [kW]	۹۰٪	۳
۰/۲ [kW]	۶ [kWh]	۶۰ [kW]	۹۰٪	۴

جدول ۴- داده‌های توربین‌های بادی و باتری‌ها

باتری‌ها		توربین‌های بادی		ریزشبه
ظرفیت	$\eta^{CH,DCH}$	Max. Power	Min. Power	
۵ [kW]	۹۵ [%]	۲/۹۲ [kW]	۰/۳ [kW]	۱
۱۰ [kW]	۹۵ [%]	۳/۰۱ [kW]	۰/۱۲ [kW]	۲
۱۰ [kW]	۹۵ [%]	۳/۰۵ [kW]	۰/۱۰ [kW]	۳
۵ [kW]	۹۵ [%]	۳/۱۴ [kW]	۰/۲۱ [kW]	۴

جدول (۸) مصرف توان و دشارژ خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. اولین هدف خودروهای الکتریکی تامین توان برای مسافت مورد نیاز آن‌ها می‌باشد. اما به دلیل اینکه خودروها از نوع PHEV هستند، می‌توان آن‌ها را به سیستم متصل کرده و در صورت توان، به شبکه دشارژ داشته باشند. اگر خودروی الکتریکی در حالت بی‌کاری قرار داشته باشد و باتری آن در شرایطی باشد که بتواند توان را دشارژ کند، می‌تواند نقش منبع توان برای ریزشبه را ایفا کند. در جدول (۸) مقادیر منفی نشان‌دهنده توان مصرفی برای مسافت مورد نیاز و مقادیر مثبت توان دشارژ شده به شبکه نمی‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که دشارژ EV عمدتاً در زمان اوج مصرف می‌تواند به کاهش تلفات شبکه کمک کند که یکی از محدودیت‌های مهم برای سیستم مورد مطالعه میزان تلفات است. مجموع تلفات شامل تمام تلفات موجود است، یعنی مبدل‌ها که بیشترین سهم در تلفات را تشکیل می‌دهند و همچنین تلفات انتقال. شکل (۷) مجموع تلفات هر ریزشبه را به طور جداگانه نشان می‌دهد.

۲۰٪ افزایش یابد. شکل (۸) مقادیر سود حالت سوم برای ریزشکته‌ها نشان می‌دهد. حداکثر سود معادل ۱۲۱/۹۲۰ دلار برای تمام ریزشکته‌ها در طول یک روز می‌باشد. بیشترین فروش توان و در نتیجه بیشترین سود، مربوط به ریزشکته چهارم و سپس ریزشکته دوم بوده است.

تعیین آن باید توسط سیستم مدیریت انرژی انجام شود. در حالت اول سیستم هیچ سودی کسب نکرده و حداقل تلفات آن ۷۴/۳۶۰ کیلووات است. حالت دوم میزان سود حاصل از رعایت تلفات توان مجاز را نشان داده و حالت سوم میزان سود را با افزایش دامنه مجاز تلفات توان نشان می‌دهد. با مقایسه آن‌ها می‌توان دریافت که با افزایش تلفات توان مجاز در حدود ۱۰٪، سود می‌تواند تا حدود

جدول ۵- مجموع توان منتقل شده در هر ریزشکته برحسب ساعت

زمان (ساعت)												
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ریزشکته اول (kW)
۰/۷۹	۰	۶/۲	۴/۹۲	۴/۰۳۹	۱/۹۲	۵/۲۱۱	۲/۰۹۶	۴/۰	۱/۱۹۴	۵/۲۷	۴/۲	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
۷/۵	۸/۶۴	۸/۴۸	۴/۰۶۹	۸/۰	۰/۳۷۸	۸/۵۶	۰	۰	۱/۴۸۴	۰/۸۲	۰	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ریزشکته دوم (kW)
۰/۳۳۸	۴/۴۶۴	۴/۸۲	۰	۱/۹۸	۰	۰	۰/۵	۱/۶۳۱	۱/۹	۱/۶	۰	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
۲/۵۱	۰	۵/۸۸	۴/۵	۰	۷/۰۴۴	۲/۲	۳/۹۵	۰	۰	۱/۲۴	۰	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ریزشکته سوم (kW)
۶/۷۱۷	۳/۱۴	۰/۶۳	۲/۱۱۲	۱/۲۱	۸/۵	۳/۳۶۶	۰/۳۴۲	۰	۰	۱/۶۴	۲/۳۵	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
۵/۵۷۸	۹/۱	۸/۷	۷/۹۹	۰	۸/۸۶۲	۲/۸۵	۰	۰	۳/۱۲	۱/۰۶۵	۰	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ریزشکته چهارم (kW)
۳/۱۲	۵/۸۶	۱۰	۴/۷	۹/۱۲۴	۰	۷/۵	۸/۲۷۴	۵/۱۶۹	۰	۴/۴۲۱	۵/۲۵	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
۳/۶۲	۲/۴۸۶	۰	۴/۱۲۶	۸/۲۱۳	۱۰/۱۹۱	۱۰	۶/۲۵۹	۱۰	۷/۱۹۸	۴/۵۵	۱/۰۵	

جدول ۶- قیمت مبادله توان میان ریزشکته‌ها

زمان (ساعت)								قیمت (\$/kW)	
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۱۳	-	-	-	-	-	-	-		
۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹		
۰/۲۵	۰/۱	۰/۱۷	-	۰/۳۹	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱		
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷		
-	-	-	۰/۲	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۲۷		

جدول ۷- توان مبادله شده میان ریزشکته‌ها به تفکیک هر ریزشکته

زمان (ساعت)												ریزشکته (kW)	
۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۱	۱۰	۹		۸
۴/۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	۵/۲۲	-	-	-	۲ به ۱
-	-	-	۸/۱۹	-	-	-	-	-	-	-	۳/۵۷	-	۳ به ۱
۸/۳۹	-	-	-	-	-	۲/۰۹	-	۱۴/۷۸	-	-	-	-	۴ به ۱
-	۹/۸۱	۱۱/۸۲	-	-	-	-	-	-	-	۹/۶۵	-	-	۱ به ۲
-	-	۱۷/۱۳	-	-	-	-	-	-	-	۴/۵۷	-	۶/۹۱	۳ به ۲
-	۱۲/۱۸	-	۱۳/۵۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴ به ۲
-	۱۰/۵۴	-	-	-	۱۴/۴۵	-	۵/۲۱	-	-	-	-	-	۱ به ۳
-	-	-	-	۷/۹	-	-	-	۱۱/۶۴	-	-	-	-	۲ به ۳
-	۱۵/۶۸	-	-	-	-	-	-	۱۶/۲۹	-	-	-	-	۴ به ۳
-	-	۷/۰۱	-	۷/۴۹	-	-	-	-	-	۸/۴۴	-	-	۱ به ۴
-	-	-	-	-	۱۱/۴۸	-	۸/۳۱	-	۷/۰۲	-	-	-	۲ به ۴
-	-	۱۹/۳۳	-	-	-	-	-	-	۱۳/۶۲	-	-	۸/۳۷	۳ به ۴

جدول ۸- مجموع توان خالص خودروهای الکتریکی در هر ریزشبه

زمان (ساعت)											
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
ریزشبه اول (kW)											
-۱/۱۵۶	-۰/۹۱۳	۴/۰۲۶	-۳/۷	-۸/۸	-۱۲/۶	۰/۱۲۱	۰	۰	۰	۰	۰/۲۱۱
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳
۰	۲/۱۰۶	۰	-۰/۸۰۶	-۲/۴۳۱	-۵	-۷/۹	-۸/۸	-۱/۴۱۵	-۲/۴	-۳/۱۶۵	-۱۱/۵
ریزشبه دوم (kW)											
-۵	-۱/۳۲۳	-۲/۱۲۳	-۳/۶	-۷	-۳/۶۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳
۰	۰	۰/۲۷۴	-۰/۲	-۴/۲	-۴/۸	۱/۵۳۷	-۰/۹۴۲	-۳/۲	-۴	-۱/۸۸۳	-۲/۴
ریزشبه سوم (kW)											
-۳	-۶/۴	-۶/۰۸۱	-۶/۱	-۳/۹	-۲/۴	-۰/۸	۱/۰۶۳	۰	۰	۰	۰
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳
۰	۰/۸۶۷	۰/۵۹۸	۰	-۲/۲	-۲/۶	-۱/۲۲۷	-۳/۸	-۲/۸۵۵	-۵/۵۶۱	-۱	-۲/۸۰۳
ریزشبه چهارم (kW)											
-۵/۲	-۷/۰۲۹	-۹	-۰/۵۳۹	-۷/۲	-۱۷/۵	-۲/۲	۰	۰	۰	۰	۱/۶۸۸
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳
۰	۰/۸۶۴	۱/۶۳۴	۲/۲۱۸	-۳/۷۰۲	-۸/۶۵۹	-۷	-۵/۳	-۵/۵۵۷	-۵/۴	-۴/۳	-۵/۲

جدول ۹- مقایسه مقادیر سود و تلفات در حالت‌های مختلف

سود (\$)	تلفات توان (kW)	حالت
-	۷۴/۳۶۰	۱- کمترین تلفات توان
۹۷/۵۷۰	۸۵/۴۶۷	۲- مقدار سود با توجه به تلفات مجاز
۱۲۱/۹۲۰	۹۴/۷۴۱	۳- بیشینه سود

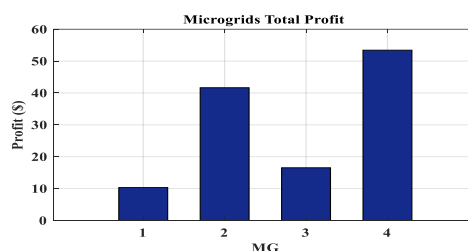
در ادامه تجزیه و تحلیل حساسیت سود و تلفات نسبت به تغییرات قیمت در یک ساعت خاص از مطالعه بررسی شده است. شکل (۹) گویای این تحلیل می‌باشد. در این تحلیل، قیمت مبادلات توان میان ریزشبه‌ها به میزان ۰/۰۲ دلار به صورت پلکانی افزایش می‌یابد و هدف ارزیابی تلفات و سود سیستم در ریزشبه‌ها با فرض افزایش تدریجی قیمت مبادلات توان است. شکل (۹) نشان می‌دهد که افزایش قیمت ۰/۰۲ دلاری منجر به افزایش سود و همچنین تلفات خواهد شد؛ اما از تکرار ششم به بعد میزان توان مبادله شده تغییری نخواهد کرد زیرا ظرفیت تعادل شبکه به حداکثر خود رسیده است و دیگر تمایلی برای خرید توان وجود ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

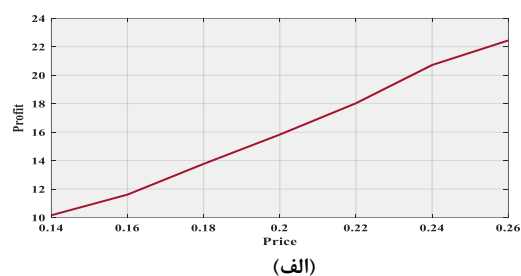
با توجه به اینکه ریزشبه‌های DC اخیراً به دلیل مزایایی که ارائه می‌کنند مورد توجه نویسندگان قرار گرفته‌اند، این مقاله مدیریت انرژی ریزشبه‌های DC چندگانه به هم پیوسته را با هدف سودآوری از فروش توان و در عین حال مدیریت تلفات توان سیستم مدل‌سازی کرده است. هر ریزشبه DC شامل تعدادی خانه است، هر خانه مجهز به خودروی الکتریکی، باتری و پنل خورشیدی است. چهار ریزشبه DC به هم متصل هستند و در مجموع ۱۵ خانه در نظر گرفته شده است. هدف اصلی بهینه‌سازی تابع سود پیشنهادی DC-MMG در حالی است که تلفات انتقال و تبدیل انرژی مربوطه برآورده می‌شود. برای مدیریت تلفات مرتبط، قید نابرابری برای محدود کردن مقدار تلفات مورد نیاز تعریف شده است. چارچوب بهینه‌سازی برای محاسبه مبادلات توان در افق زمانی برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته طراحی شده است.

دستاوردهای این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

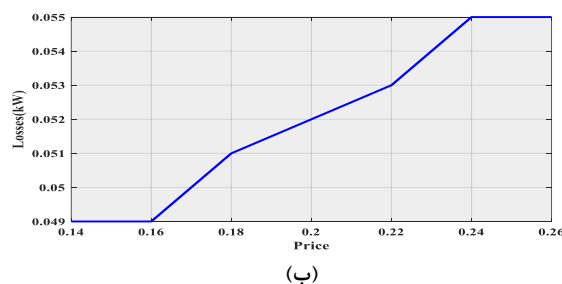
- ✓ تلفات تبدیل و انتقال را در نظر گرفته و در محدوده مجاز محدود شده‌اند تا از تلفات بیش از حد در سیستم جلوگیری شود،
- ✓ فراهم نمودن شرایطی برای مشارکت فعالان در تامین توان و کسب سود از فروش برق،
- ✓ مدیریت بهینه انرژی ریزشبه‌های DC و بهبود تامین توان مصرف-کنندگان با بکارگیری DC-MMG،
- ✓ با توجه به نتایج، افزایش ۱۰ درصدی حد مجاز تلفات توان باعث افزایش



شکل ۸- سود حاصل از تبادل توان در حالت سوم



(الف)



(ب)

شکل ۹- تحلیل حساسیت، (الف) نسبت سود به قیمت، (ب) نسبت تلفات توان به قیمت

حدود ۲۰ درصدی سود خواهد شد.

مراجع

- [13] Pannala, S., et al., *Effective control and management scheme for isolated and grid connected DC microgrid*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020. **56**(6): p. 6767-6780.
- [14] Montoya, O.D., et al., *Economic dispatch of BESS and renewable generators in DC microgrids using voltage-dependent load models*. Energies, 2019. **12**(23): p. 4494.
- [15] Iqbal, S., et al., *A novel approach for system loss minimization in a peer-to-peer energy sharing community DC microgrid*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. **129**: p. 106775.
- [16] Ali, L., et al., *A peer-to-peer energy trading for a clustered microgrid-Game theoretical approach*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. **133**: p. 107307.
- [17] Barone, G., et al., *A Renewable Energy Community of DC Nanogrids for Providing Balancing Services*. Energies, 2021. **14**(21): p. 7261.
- [18] Gao, H., et al. (2023). "Green electricity trading driven low-carbon sharing for interconnected microgrids." Journal of Cleaner Production: 137618.
- [19] Shirazi, E. and S. Jadid, *Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via HEMDAS*. Energy and Buildings, 2015. **93**: p. 40-49.
- [۲۰] تورج قناطر، غلامحسین ریاحی دهکردی، گئورگ قره‌پتیان، «طراحی بهینه یک سیستم ترکیبی شامل منابع بادی و خورشیدی همراه با باتری به‌عنوان ذخیره‌ساز»، سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق F-15-AAA-0000، آبان ماه ۱۳۹۴.
- [21] Molu, R. J. J., et al. (2023). "Optimization-based energy management system for grid-connected photovoltaic/battery microgrids under uncertainty." Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 8: 100464.
- [22] Doshi, K. and V. Harish, *Analysis of a wind-PV battery hybrid renewable energy system for a dc microgrid*. Materials Today: Proceedings, 2021. **46**: p. 5451-5457.
- [23] Rezaei, N., et al., *Economic energy and reserve management of renewable-based microgrids in the presence of electric vehicle aggregators: A robust optimization approach*. Energy, 2020. **201**: p. 117629.
- [24] Kolar, J.W., et al. *Extreme efficiency power electronics*. in *2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*. 2012. IEEE.
- [1] Zolfaghari, M., et al., *Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. **136**: p. 107742.
- [2] Raya-Armenta, J.M., et al., *Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **149**: p. 111327.
- [3] Baros, D., et al., *Wireless power transfer for distributed energy sources exploitation in DC microgrids*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018. **10**(4): p. 2039-2049.
- [4] Gelani, H.E., et al., *AC vs. DC distribution efficiency: Are we on the right path?* Energies, 2021. **14**(13): p. 4039.
- [5] Fotopoulou, M., et al., *State of the art of low and medium voltage direct current (Dc) microgrids*. Energies, 2021. **14**(18): p. 5595.
- [6] Zargar, R.H.M. and M.H. Yaghmaee, *Energy exchange cooperative model in SDN-based interconnected multi-microgrids*. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021. **27**: p. 100491.
- [۷] احسان احمدی، نوید رضائی، «برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌های متصل به هم با استفاده از سیستم مدیریت انرژی توزیع شده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۰، شماره ۴، صفحات ۱۴۶۳-۱۴۷۴، ۱۳۹۹.
- [8] Peck, M.E., *Blockchain World-Do you need a blockchain? This chart will tell you if the technology can solve your problem*. IEEE Spectrum, 2017. **54**(10): p. 38-60.
- [9] Long, C., et al., *Feasibility of peer-to-peer energy trading in low voltage electrical distribution networks*. Energy Procedia, 2017. **105**: p. 2227-2232.
- [10] Morstyn, T., et al., *Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants*. Nature Energy, 2018. **3**(2): p. 94-101.
- [11] Cui, S., Y.-W. Wang, and J.-W. Xiao, *Peer-to-peer energy sharing among smart energy buildings by distributed transaction*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019. **10**(6): p. 6491-6501.
- [12] Zia, M.F., et al. *Energy management system for an islanded renewables-based DC microgrid*. in *2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. 2020. IEEE.