Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity P.P 74-84

Vol. 12/ No. 3/ Fall 2023 ISSN 2322-2344 EISSN 2717-1639

Bi-Level Optimization of Microgrids Considering Electric Vehicles under the Worst Conditions of Renewable Resource Output

Niki Ghanaei[1], Mahmoud Samiei Moghaddam[2, *], Esmaeil Alibeiki[3], Nasrin Salehi[4], Reza Davarzani[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

[2] Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

samiei352@yahoo.com(**Corresponding author**)

[3] Department of Electrical Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul Branch, Iran

[4] Department of Basic sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract

In this paper, a two-level optimization model of mixed quadratic integer programming (MIQP) is presented in order to optimally operate microgrids under worst-case output conditions of renewable energy sources. This two-level model is divided into two high-level and low-level problems. In the high-level problem, the goal is to reduce energy loss and load shedding in the demand response program, optimal charging and discharging of electric vehicles and energy storage systems. In the low-level problem, the objective is to maximize the power outage of renewable energy sources. In this model, a new method for solving the optimization problem is proposed, which is based on the reformulation of the problem to Karush-Cohen-Tucker (KKT) optimality conditions. For the analysis, a 33 bus microgrid is considered. The simulation results show that the proposed model maintains the flexibility of the network in the worst output conditions of renewable energy sources and no load interruption occurs in the network.

Keywords: microgrid, renewable energy sources, electric vehicles, demand response program, multi-level optimization.

Submit date: 2023/03/08
Accepted date:2023/06/17

Corresponding author name: Mahmoud Samiei Moghaddam
Corresponding author's Address: Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۸۴-۷۴

Vol. 12 / No. 3/ Fall 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

بهینه‌سازی دو سطحی ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن خودروهای برقی تحت بدترین شرایط خروج منابع تجدیدپذیر

نیکی غنایی [۱]، دانشجو دکتری، محمود سمیعی مقدم[2*]، استادیار، اسمیل علی بیکی[3]، استادیار، نسرین صالحی[4]، دانشیارِ، رضا داورزنی[۱] ، استادیار

نوع مطالعه: پژوهشی

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۲- دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران
۳- دانشکده مهندسی برق، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول ، ایران
۴- دانشکده علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود ، ایران

چکیده: در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برنامه‌ریزی اعداد صحیح درجه دوم مختلط (MIQP) به منظور بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها در شرایط بدترین خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. این مدل دو سطحی به دو مسئله سطح بالا و پایین تقسیم شده است. در مسئله سطح بالا، هدف کاهش اتلاف انرژی و قطع بار در برنامه پاسخ تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه وسایل نقلیه الکتریکی و سیستم‌های ذخیره انرژی است. در مسئله سطح پایین، هدف بیشینه‌سازی قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر است. در این مدل، روشی جدید برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد شده است که بر مبنای بازفرمولنویسی مسئله به شرایط بهینگی کاروش-کوهن-تاکر (KKT) استوار است. برای تجزیه و تحلیل، یک ریزشبکه ۳۳ باس در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در شرایط بدترین خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر، انعطاف‌پذیری شبکه را حفظ می‌کند و هیچ قطع باری در شبکه رخ نمی‌دهد.

واژه های کلیدی: برنامه پاسخ تقاضا، بهینه‌سازی چند سطحی، خودروهای برقی، ریزشبکه، منابع انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان ، ایران

۱- مقدمه

در ریزشبکه‌ها، اکثر منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین‌های بادی یا فتوولتائیک هستند. به همین دلیل، احتمال قطع توان این منابع به دلیل ناپایداری شرایط جوی وجود دارد. این موضوع باعث تغییرات در توان تولیدی منابع و حتی قطع کامل آنها می‌شود، که به طور مستقیم تأثیری بر بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها دارد. بنابراین، چالش اصلی برای اپراتورهای ریزشبکه، پیاده‌سازی یک مدل بهره‌برداری بهینه است که با در نظر گرفتن قطع یا کاهش توان منابع تجدیدپذیر، بهره‌برداری بهینه را تضمین کند. انگیزه اصلی این مطالعه در برخورد با مسئله بهره‌برداری بهینه در شرایط بدترین قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها است. این نوع بهره‌برداری در نهایت ریزشبکه را در شرایط بدترین وضعیت مقاوم می‌کند و نقاط آسیب‌پذیر ریزشبکه را شناسایی می‌کند. مراجع (Yuan et al., 2021) و (Fan et al., 2021) با (Al-Ismail, 2021) به بررسی و بهبود بهره‌برداری ریزشبکه‌ها می‌پردازند. در (Yuan et al., 2021) یک مدل پخش بار بهینه را برای کاهش دروپ زیر ریزشبکه **AC** ارائه می‌دهد، در حالی که در (Fan et al., 2021) یک مدل مبتنی بر شرایط بهینه **KKT** را برای کاهش تلفات انرژی ریزشبکه **DC** معرفی می‌کند. به علاوه، در (Al-Ismail, 2021) به بررسی جامع بهره‌برداری ریزشبکه **DC** و روش‌های برنامه‌ریزی و کنترل می‌پردازد. مراجع (Jia et al., 2021) و (Nguyen et al., 2022) به همراه (Wang et al., 2022) به بهبود سود و هزینه‌های ریزشبکه‌ها می‌پردازند. در (Jia et al., 2021) یک رویکرد مبتنی بر تئوری بازی‌ها را برای بهینه‌سازی سود ریزشبکه‌ها در بازار برق ارائه می‌دهد. همچنین، در (Nguyen et al., 2022) یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر بهینه‌سازی ارشمیدس را برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه‌ها برای کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش سود معرفی می‌کند. در (Wang et al., 2022) یک الگوریتم اکتشافی برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن انواع منابع تولید پراکنده را برای کاهش هزینه‌های اقتصادی پیشنهاد می‌دهد. مراجع (Li et al., 2022) و (Fallahi et al., 2021) با (Chamana et al., 2022) به بهینه‌سازی زمان و نگهداری ریزشبکه‌ها می‌پردازند. در (Li et al., 2022) یک رویکرد مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا را برای بهره‌برداری بهینه زمان واقعی ریزشبکه‌ها بر اساس اطلاعات ورودی و نیازهای کاربران ارائه می‌دهد. در (Fallahi et al., 2021) یک روش بهینه‌سازی چند هدفه را برای بهره‌برداری ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف ارائه می‌دهد. در (Chamana et al., 2022) به تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر بهره‌برداری ریزشبکه‌ها می‌پردازد و راهکارهایی برای بهینه‌سازی و بهبود عملکرد ارائه می‌دهد. مراجع (Jabr et al., 2022) و (Zhang et al., 2021) با (Wang et al., 2021) به بهبود عملکرد ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت می‌پردازند. در (Jabr et al., 2022) الگوریتمی را برای بهره‌برداری بهینه و کاهش عدم قطعیت در ریزشبکه‌های توزیع ارائه می‌دهد. همچنین، در (Zhang et al., 2021) یک استراتژی بهره‌برداری بهینه را برای بهبود منافع اقتصادی و کاهش ریسک در ریزشبکه‌های پیشنهاد می‌دهد. در ضمن، (Wang et al., 2021)یک روش مبتنی بر یادگیری عمیق **Q** را برای کاهش قطعیت بار در ریزشبکه‌ها ارائه می‌دهد.

مراجع (Lee et al., 2021) و (Zhao et al., 2022) با (Harasis et al., 2021) به بهره‌برداری از ریزشبکه‌های جزیره‌ای و استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌پردازند. در (Lee et al., 2021) یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چند مرحله‌ای برای بهره‌برداری ریزشبکه‌ها تحت عدم قطعیت ارائه می‌دهد. در (Zhao et al., 2022) یک رویکرد مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل قوی توزیع شده را برای کاهش اثرات نامطلوب خروج انرژی تجدیدپذیر نامشخص پیشنهاد می‌دهد. همچنین، در (Harasis et al., 2021) یک الگوریتم بهره‌برداری بهینه را برای ریزشبکه‌های جزیره‌ای با استفاده از منابع تجدیدپذیر و ذخیره انرژی ارائه می‌دهد. مراجع (Salehi et al., 2022) و (Masrur et al., 2022) با (Vilaisarn et al., 2022) به بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با استفاده از تکنولوژی‌های نوین می‌پردازند. در (Salehi et al., 2022) الگوریتمی را برای بهره‌برداری بهینه در ریزشبکه‌های هوشمند ارائه می‌دهد. همچنین، (Masrur et al., 2022) یک مدل بهره‌برداری بهینه را برای ریزشبکه‌های هوشمند با استفاده از اینترنت اشیاء ارائه می‌دهد. در (Vilaisarn et al., 2022) به بررسی بهره‌برداری و بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها با استفاده از تکنولوژی‌های نوین از جمله شبکه‌های ارتباطی بیسیم و شبکه‌های انرژی همگرا می‌پردازد. مراجع (Reiz et al., 2022) و (Vilaisarn et al., 2022) با (Singh et al., 2022) به بهینه‌سازی و استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی می‌پردازند. در (Reiz et al., 2022) یک رویکرد بهره‌برداری بهینه را برای ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره انرژی ارائه می‌دهد. همچنین، در (Vilaisarn et al., 2022) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌های سه فاز با هدف تعادل انرژی و بار پیشنهاد می‌دهد. در (Singh et al., 2022) نیز یک رویکرد چند لایه مبتنی بر جریان توان بهینه را برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره انرژی ارائه می‌دهد. مراجع (MansourLakouraj et al., 2022) و (Akulker et al., 2023) با (Shokouhmand et al., 2022) به بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن عوامل تصادفی می‌پردازند. در (MansourLakouraj et al., 2022) یک فرمول تصادفی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع پاسخ تقاضا پیشنهاد می‌دهد. در (Akulker et al., 2023) رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط را برای بهره‌برداری بهینه یک ریزشبکه چند

انرژی با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های عملیاتی و محیطی ارائه می‌دهد. در نهایت، در (Shokouhmand et al., 2022) یک استراتژی سه سطحی برای عملیات تصادفی بهینه ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن شارژ وسایل نقلیه الکتریکی برای افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبکه پیشنهاد می‌دهد. در (Zeng et al., 2014) و (Zeng & Zhao, 2013) یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر روش تولید ستون محدودیت برای حل مسائل بهینه‌سازی دو سطحی ارائه شده است. در (Jokar et al., 2022) نیز روشی مبتنی بر معادلات **KKT** برای تبدیل مسائل دو سطحی عد صحیح مرکب برای حل در نظر گرفته شده است. در (Rajamand, 2021) بهینه‌سازی ریزشبکه را با استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی را با استفاده از برنامه پاسخ تقاضا و الگوریتم تکاملی پیشنهاد کرده است. در (Artis et al., 2021) یک برنامه‌ریزی چندسطحی توسعه ریزشبکه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری در مقابل ریسک‌های لرزه‌ای ناشی از زلزله پیشنهاد شده است. در (Hosseini et al., 2021) یک مدیریت بهینه مصرف انرژی الکتریکی ساختمان‌های مسکونی در یک ریز شبکه با درنظرگرفتن اولویت بهره‌برداری از طریق زیرساخت اینترنت اشیا پیشنهاد کرده است.

در مقالات پیشین، خلا و شکاف مطالعاتی به معنای نقاط ضعف، نقاط تحقیق نشده و فضاهای خالی در دانش علمی می‌باشند که توسط مقاله جدید پر می‌شوند. این خلاها و شکاف‌ها به تحقیقات جدید امکان می‌دهند که توسعه‌ی علمی را پیش ببرند و نوآوری‌های جدید را معرفی کنند. مقاله حاضر برتری خود را در مقابل مقالات پیشین به دلیل موارد زیر نشان می‌دهد:

۱. مدل دو سطحی **MIQP**: از آنجایی که بیشتر مقالات قبلی در حوزه بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها، تنها به بهینه‌سازی سطح بالا متمرکز شده‌اند، استفاده از مدل دو سطحی **MIQP** در این مقاله نوآوری است. این مدل قابلیت بهینه‌سازی همزمان سطح بالا و پایین را دارد و بهبود قابل توجهی در بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها در شرایط بدترین خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد.

۲. روش بازفرمولنویسی **KKT**: در این مقاله، برای حل مسئله بهینه‌سازی، از روش بازفرمولنویسی مسئله به شرایط بهینگی **KKT** استفاده شده است. این روش نوآورانه و پیشرفته است و به نتایج بهتر و مطلوبی در حل مسئله منجر می‌شود. این روش بهبود قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد و قابلیت اعمال آن در سایر مسائل بهینه‌سازی مشابه را نیز به نمایش می‌گذارد.

۳. حفظ انعطاف‌پذیری شبکه و جلوگیری از قطع بار: نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است در شرایط بدترین خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر، انعطاف‌پذیری ریزشبکه را حفظ کند و قطع باری وجود نخواهد داشت. این ویژگی مهم مدل پیشنهادی را از سایر روش‌ها متمایز می‌کند و کاربردی بودن آن را در ریزشبکه‌ها تأیید می‌کند.

با ارائه این نقاط، مقاله حاضر می‌تواند بهترین راهکار و نتایج خود را در حوزه بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها ارائه کرده و بهبودهای قابل توجهی نسبت به مقالات پیشین داشته باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، می‌توان دریافت که استفاده بهینه از ریزشبکه‌ها در حضور منابع تجدیدپذیر بادی و فتوولتائیک یکی از چالش‌های اصلی محققان است. از آنجا که شرایط جوی همیشه یکسان نیست، منجر به تغییر در تولید و یا حتی قطع منابع تجدیدپذیر می‌شود. بنابراین، یک مدل ریاضی برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌ها در این مطالعه با در نظر گرفتن احتمال قطعی منابع تجدیدپذیر در بدترین حالت مورد بحث قرار می‌گیرد.

مشارکت‌های اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

الف) در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی با استفاده از برنامه‌ریزی اعداد صحیح درجه دوم مختلط، برای بهبود عملکرد ریزشبکه با در نظر گرفتن بدترین حالت قطع منابع انرژی تجدیدپذیر، پیشنهاد شده است. این مدل بهینه‌سازی به عنوان ابزاری مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه استفاده می‌شود.

ب) روشی بر پایه فرمول‌بندی مجدد با استفاده از شرایط بهینگی **KKT** نیز برای حل مسائل دو سطحی با متغیرهای باینری در هر دو سطح، ارائه شده است. این روش مبتنی بر شرایط بهینگی **KKT**، بهینه‌سازی دو سطحی را بهبود و به دست آوردن جواب‌های بهینه برای اینگونه مسائل را آسانتر می‌کند.

ج) در این مطالعه، بهره‌برداری بهینه از منابع تولید پراکنده، مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه سیستم های ذخیره‌سازی انرژی (**ESS**) و شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در ریزشبکه مدنظر قرار گرفته است. با بهره‌برداری بهینه از این منابع و مدیریت بهینه، عملکرد ریزشبکه بهبود یافته و از نظر بهره‌وری و پایداری به حداکثر رسیده است.

در بخش بعدی، مدل دو سطحی پیشنهادی و روش حل آن ارائه می‌شود. در بخش سوم نتایج عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای ادامه این تحقیق ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

در اینجا ابتدا مدل بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهادی ارائه شده و سپس روش مبتنی بر شرایط بهینگی KKT برای حل مسئله شرح داده می‌شود. در این مطالعه، مدل دو سطحی پیشنهادی به یک مسئله سطح بالایی و یک مسئله سطح پایینی تقسیم شده است که در زیر هر مسئله ارائه شده است.

۲-۱- مسئله سطح بالایی

مسئله سطح بالایی یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح درجه دوم مختلط برای عملکرد بهینه ریزشبکه با حضور سیستم‌های ذخیره

انرژی، برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، تولید پراکنده، وسایل نقلیه الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر است. تابع چند هدفه مسئله سطح بالایی در (۱) نشان داده شده است. در اینجا n، h، b و s به ترتیب نشانگرهای گره، زمان، خط و سناریو هستند. به طور مشابه، مجموعه آن‌ها به ترتیب برابر با N، H، B و S است. تابع چند هدفه پیشنهادی در مسئله سطح بالایی شامل کاهش چهار جمله است که به ترتیب برابر با کاهش هزینه تلفات انرژی، کاهش قطع بار اکتیو و راکتیو و در نهایت کاهش قطع برق ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی می‌باشد. r_b مقاومت خطوط را نشان می‌دهد، $f_{b,h}^p$ و $f_{b,h}^q$ به ترتیب جریان توان واقعی و راکتیو خطوط هستند. c_h^p برابر است با هزینه قطع بار واقعی در مدیریت سمت تقاضا و $d_{n,h}^p$ و $D_{n,h}^p$ به ترتیب برابر با بار واقعی اولیه و تغییریافته هستند. به طور مشابه، c_h^q برابر با هزینه قطع بار راکتیو در مدیریت سمت تقاضا و $d_{n,h}^q$ و $D_{n,h}^q$ به ترتیب برابر با بار راکتیو اولیه و جابجا شده هستند. σ_s برابر است با احتمال هر سناریو، $p_{n,h,s}^r$ و $P_{n,h}^r$ به ترتیب توان منابع تجدیدپذیر در هر سناریو و توان توزیع شده منابع تجدیدپذیر در ریزشبکه هستند. به طور مشابه، $p_{n,h,s}^{ev}$ و $P_{n,h}^{ev}$ به ترتیب توان شارژ ایستگاه‌های خودروهای الکتریکی در هر سناریو و توان شارژ ارسال شده آن‌ها در ریزشبکه هستند.

$$\min \sum_{b\in B}\sum_{h\in H} H\times r_b\left({f_{b,h}^p}^2+{f_{b,h}^q}^2\right) + \sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c_h^p\left(d_{n,h}^p-D_{n,h}^p\right) + \sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c_h^q\left(d_{n,h}^q-D_{n,h}^q\right) + \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{h\in H}\left(p_{n,h,s}^{ev}-P_{n,h}^{ev}\right)\right) \quad (۱)$$

معادلات (۲) و (۳) به ترتیب تعادل توان اکتیو و راکتیو را در ریزشبکه نشان می‌دهند. $P_{n,h}^{DG}$ برابر است با توان واقعی منابع تولید پراکنده و ρ نشان‌دهنده ضریب توان منابع تولید پراکنده است. توان شارژ و دشارژ باتری به ترتیب با p_h^{ch} و p_h^{dis} نشان داده می‌شود.

$$\sum_{nm\in N} f_{nm,h}^p-\sum_{mn\in N} f_{mn,h}^p+p_{n,h}^{dis}+P_{n,h}^r+P_{n,h}^{DG}-D_{n,h}^p-P_{n,h}^{ev}-p_{n,h}^{ch}=0 \quad (۲)$$

$$\sum_{nm\in N} f_{nm,h}^q-\sum_{mn\in N} f_{mn,h}^q+\rho P_{n,h}^r+\rho P_{n,h}^{DG}-D_{n,h}^q=0 \quad (۳)$$

معادلات (۴) و (۵) به ترتیب حد کل بارهای فعال و راکتیو تغییر یافته در ریزشبکه را نشان می‌دهد. قیود (۶) و (۷) به ترتیب دامنه تغییرات بارهای فعال و راکتیو را نشان می دهد. τ درصد تغییرات بار را نشان می‌دهد.

$$\sum_{n\in N} d_{n,h}^p=\sum_{n\in N} D_{n,h}^p \quad \forall h\in H \quad (۴)$$

$$\sum_{n\in N} d_{n,h}^q=\sum_{n\in N} D_{n,h}^q \quad \forall h\in H \quad (۵)$$

$$d_{n,h}^p-d_{n,h}^p\tau\le D_{n,h}^p\le d_{n,h}^p+d_{n,h}^p\tau \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۶)$$

$$d_{n,h}^q-d_{n,h}^q\tau\le D_{n,h}^q\le d_{n,h}^q+d_{n,h}^q\tau \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۷)$$

حدود جریان توان واقعی و راکتیو خطوط به ترتیب با (۸) و (۹) نشان داده شده است. $\overline{f}_{b,h}^p$ و $\overline{f}_{b,h}^q$ به ترتیب حداکثر جریان توان واقعی و راکتیو خطوط را نشان می‌دهند.

$$-\overline{f}_{b,h}^p\le f_{b,h}^p\le \overline{f}_{b,h}^p \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۸)$$

$$-\overline{f}_{b,h}^q\le f_{b,h}^q\le \overline{f}_{b,h}^q \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۹)$$

محدودیت ولتاژ گره ریزشبکه با (۱۰) نشان داده می‌شود، که در آن $v_{n,h}$ نشان‌دهنده ولتاژ مربعی گره ریزشبکه است.

$$0.9^2\le v_{n,h}\le 1.1^2 \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۰)$$

ولتاژ مربعی گره‌های ریزشبکه طبق رابطه (۱۱) به دست می آید. مقاومت و راکتانس خط با r_b و x_b نشان داده می‌شود.

$$v_{n,h}=v_{m,h}-2\left(r_b f_{b,h}^p+x_b f_{b,h}^q\right) \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۱)$$

حد بهره‌برداری تولید پراکنده با (۱۲) نشان داده شده است. حداکثر توان عملیاتی تولید پراکنده با $\overline{P}_{n,h}^{DG}$ نشان داده می‌شود.

$$0\le P_{n,h}^{DG}\le \overline{P}_{n,h}^{DG} \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۲)$$

محدودیت‌های شارژ و دشارژ **ESS** ها به ترتیب در روابط (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. در اینجا $z_{n,h}$ وضعیت شارژ **ESS** را نشان می‌دهد. وضعیت انرژی در باتری در رابطه (۱۵) نشان داده شده است. معادله (۱۶) محدودیت ظرفیت انرژی **ESS** را نشان می‌دهد، که در آن X_n ظرفیت **ESS** را نشان می‌دهد.

$$0\le p_{n,h}^{ch}\le p_{n,h}^{ch} z_{n,h} \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۳)$$

$$0\le p_{n,h}^{dis}\le p_{n,h}^{dis}\left(1-z_{n,h}\right) \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۴)$$

$$e_{n,h}=e_{n,h-1}+p_{n,h}^{ch}-p_{n,h}^{dis} \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۵)$$

$$0\le e_{n,h}\le X_n \quad \forall h\in H, n\in N \quad (۱۶)$$

معادله (۱۷) حد شارژ ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی در هر سناریو را نشان می‌دهد.

$$0\le P_{n,h}^{ev}\le P_{n,h,s}^{ev} \quad \forall h\in H, n\in N, s\in S \quad (۱۷)$$

معادلات (۱۸) تا (۴۰) مدل‌سازی خودرو الکتریکی در ریزشبکه را نشان می‌دهد. انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری $e_{n,h}^{net_ev}$ در خودروهای الکتریکی با توجه به کارایی هر باتری در (۱۸) نشان داده شده است. در رابطه (۱۸)، $p_{n,h}^{dis_ev}$ و $p_{n,h}^{ch_ev}$ به ترتیب برابر دشارژ و توان شارژ باتری خودروی الکتریکی هستند و همچنین η_n^{ev} نشان‌دهنده راندمان شارژ باتری وسیله نقلیه الکتریکی است. معادله (۱۹) میزان توان تزریقی و دریافتی از یا به ریزشبکه توسط وسایل نقلیه الکتریکی را نشان می‌دهد که با مقدار شارژ و دشارژ باتری محاسبه می‌شود. وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در (۲۰) نشان داده شده است که $I_{n,h}^{dis_ev}$ و $I_{n,h}^{ch_ev}$ وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را به ترتیب نشان می‌دهد و همچنین $n_{n,h}^{ev}$ برابر است با

وضعیت وسیله نقلیه به شبکه (**V2G**)، اگر برابر با ۱ باشد، وسیله نقلیه به ریزشبکه متصل است، در غیر این صورت، جدا می‌شود. روابط (۲۱) و (۲۲) به ترتیب محدودیت توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. $\underline{p}_n^{ch_ev}$ و $\overline{p}_n^{ch_ev}$ به ترتیب برابر با حداقل و حداکثر توان شارژ خودروهای برقی هستند و $\underline{p}_n^{dis_ev}$ و $\overline{p}_n^{dis_ev}$ به ترتیب برابر با حداقل و حداکثر توان دشارژ خودروهای الکتریکی می‌باشد. معادله (۲۳) وضعیت انرژی در باتری وسایل نقلیه الکتریکی ($e_{n,h}^{ev}$) را نشان می دهد، که $dr_{n,h}^{ev}$ نیاز انرژی وسایل نقلیه الکتریکی را برای رانندگی نشان می‌دهد. معادله (۲۴) محدودیت ظرفیت انرژی باتری در وسایل نقلیه الکتریکی را نشان می‌دهد که باید بین حداقل ($\underline{e}_{n,h}^{ev}$) و حداکثر ($\overline{e}_{n,h}^{ev}$) باشد. روابط (۲۵) و (۲۶) انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری خودروی الکتریکی و انرژی موجود باتری خودروی برقی را در ساعات اول و آخر در نظر می‌گیرد. معادلات (۲۷) تا (۲۹) منحنی‌های هزینه شارژ و دشارژ باتری خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهند. در اینجا، $c_{n,h}^{ev}$ برابر هزینه عملیاتی وسایل نقلیه الکتریکی و $\beta_{n,h}^{ev}$ برابر با شیب قطعه k ام برای خطی کردن منحنی هزینه است و $p_{n,h,k}^{ev}$ برابر است با توان قطعه k ام وسایل نقلیه الکتریکی و $\overline{p}_{h,k}^{ev}$ برابر با حداکثر توان در نظر گرفته شده برای قطعه k ام در خطی‌سازی است و همچنین K مجموعه آن است.

$$e_{n,h}^{net_ev} = p_{n,h}^{dis_ev} - \eta_n^{ev} p_{n,h}^{ch_ev} \quad (۱۸)$$

$$P_{n,h}^{ev} = p_{n,h}^{dis_ev} - p_{n,h}^{ch_ev} \quad (۱۹)$$

$$I_{n,h}^{dis_ev} + I_{n,h}^{ch_ev} = n_{n,h}^{ev} \quad (۲۰)$$

$$I_{n,h}^{ch_ev} \underline{p}_n^{ch_ev} \le p_{n,h}^{ch_{ev}} \le I_{n,h}^{ch_{ev}} \overline{p}_n^{ch_ev} \quad (۲۱)$$

$$I_{n,h}^{dis_ev} \underline{p}_n^{dis_ev} \le p_{n,h}^{dis_{ev}} \le I_{n,h}^{dis_{ev}} \overline{p}_n^{dis_ev} \quad (۲۲)$$

$$e_{n,h}^{ev} = e_{n,h-1}^{ev} - e_{n,h}^{net_{ev}} - \left(1 - n_{n,h}^{ev}\right) dr_{n,h}^{ev} \quad (۲۳)$$

$$\underline{e}_{n,h}^{ev} \le e_{n,h}^{ev} \le \overline{e}_{n,h}^{ev} \quad (۲۴)$$

$$e_{n,h=1}^{ev} = e_{n,h=24}^{ev} \quad (۲۵)$$

$$e_{n,h=1}^{net_ev} = e_{n,h=24}^{net_ev} \quad (۲۶)$$

$$c_{n,h}^{ev} = n_{n,h}^{ev} \sum_{k=1}^{K} \beta_{n,k}^{ev} p_{n,h,k}^{ev} \quad (۲۷)$$

$$n_{n,h}^{ev}\left(e_{n,h}^{ev} - e_{n,h-1}^{ev}\right) \ge -\sum_{k=1}^{K} p_{n,h,k}^{ev}, \quad n_{n,h}^{ev}\left(e_{n,h}^{ev} - e_{n,h-1}^{ev}\right) \le \sum_{k=1}^{K} p_{n,h,k}^{ev} \quad (۲۸)$$

$$0 \le p_{n,h,k}^{ev} \le \overline{p}_{h,k}^{ev} \quad (۲۹)$$

همانطور که مشاهده می‌شود معادلات (۲۷) و (۲۸) غیر خطی هستند. برای خطی کردن این دو معادله، از روش بزرگ **M** استفاده می‌کنیم. با تعریف یک متغیر جدید و یک پارامتر بزرگ **M**، محدودیت‌های جدیدی به مدل اضافه می‌کنیم. برای این منظور مدل خطی معادله (۲۷) به شرح زیر است. توجه داشته باشید که $\Omega_{t,n}$ حاصل ضرب دو عبارت $n_{n,h}^{ev}$ و $\sum_{k=1}^{K} \beta_{n,k}^{ev} p_{n,h,k}^{ev}$ را نشان می‌دهد.

$$c_{n,h}^{ev} = \Omega_{n,h} \quad (۳۰)$$

$$\Omega_{n,h} \le M \times n_{n,h}^{ev} \quad (۳۱)$$

$$\Omega_{n,h} \le \sum_{k=1}^{K} \beta_{n,k}^{ev} p_{n,h,k}^{ev} \quad (۳۲)$$

$$\Omega_{n,h} \ge \sum_{k=1}^{K} \beta_{n,k}^{ev} p_{n,h,k}^{ev} - \left(1 - n_{n,h}^{ev}\right) \times M \quad (۳۳)$$

$$\Omega_{n,h} \ge 0 \quad (۳۴)$$

همانطور که مشاهده می‌شود معادلات (۳۰) تا (۳۴) کاملاً خطی هستند و جایگزین معادله (۲۷) می‌شوند. به همین ترتیب و با همان روش می‌توان رابطه (۲۸) را با تعریف یک متغیر جدید و یک عدد بزرگ خطی کرد. به گونه ای که $\Psi_{n,h}$ برابر با متغیر جدید برای تعریف ضرب دو جمله ($e_{n,h}^{ev} - e_{n,h-1}^{ev}$) و $n_{n,h}^{ev}$ می‌باشد.

$$\Psi_{n,h} \ge -\sum_{k=1}^{K} p_{n,h,k}^{ev} \quad (۳۵)$$

$$\Psi_{n,h} \le \sum_{k=1}^{K} p_{n,h,k}^{ev} \quad (۳۶)$$

$$\Psi_{n,h} \le n_{n,h}^{ev} \times M \quad (۳۷)$$

$$\Psi_{n,h} \le \left(e_{n,h}^{ev} - e_{n,h-1}^{ev}\right) \quad (۳۸)$$

$$\Psi_{n,h} \ge \left(e_{n,h}^{ev} - e_{n,h-1}^{ev}\right) - \left(1 - n_{n,h}^{ev}\right) \times M \quad (۳۹)$$

$$\Psi_{n,h} \ge 0 \quad (۴۰)$$

همانطور که ارائه شد، معادلات (۱) تا (۴۰) مسئله سطح بالایی هستند. متغیر مشترک بین مسئله سطح بالایی و مسئله سطح پایینی، توان منابع انرژی تجدیدپذیر است ($P_{n,h}^{r}$).

۲-۲- مسئله سطح پایینی

در مسئله سطح پایینی، به حداکثر رساندن قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر برای بوجود آوردن حالت بدترین خروج منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. با مدل‌سازی مسئله سطح پایینی، شبکه با بدترین حالت قطع منابع انرژی تجدیدپذیر اداره می‌شود. تابع هدف مسئله سطح پایینی در (۴۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش قطعی برق منابع انرژی تجدیدپذیر در مسئله سطح پایینی فرموله شده است.

$$\max \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} p_{n,h,s}^{r} - P_{n,h}^{r} \quad (۴۱)$$

محدودیت بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در (۴۲) نشان داده شده است. در اینجا α_n متغیر باینری مربوط به وضعیت منابع انرژی تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. اگر α_n برابر با ۱ باشد، انرژی تجدیدپذیر فعال است، در غیر این صورت، از ریزشبکه جدا شده است. A تعداد خروج واحدهای منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. در این مقاله تعداد خاموشی‌های مختلف نیز در نظر گرفته شده است که در قسمت نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

مشاهده می‌شود که مدل سطح پایینی در قالب روابط (۴۱) تا (۴۳) می باشد. رابطه (۴۳) تضمین می‌دهد که تعداد قطع واحدهای تجدیدپذیر دقیقا برابر با همان مقداری باشد که در نظر گرفته شده است و قرار است آسیب‌پذیری ریزشبکه تحت چنین شرایطی بررسی گردد. برای مثال اگر مقدار $\mathbf{A}$ در معادله (۴۳) برابر ۵ در نظر گرفته شود، قطعا ۵ واحد تجدیدپذیر می‌بایست در ریزشبکه فعال باشد. اگر این مقدار به عدد یک کاهش پیدا کند تنها یک واحد تجدیدپذیر در ریزشبکه فعال خواهد بود.

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{P^r_{n,h}} \le \boldsymbol{p^r_{n,h,s}\alpha_n}\ \forall \boldsymbol{h} \in \boldsymbol{H}, \boldsymbol{n} \in \boldsymbol{N}, \boldsymbol{s} \in \boldsymbol{S}, \boldsymbol{\alpha_n} \in \{\mathbf{0},\mathbf{1}\} \tag{۴۲}$$

$$\sum_{\boldsymbol{n}\in\boldsymbol{N}} \boldsymbol{\alpha_n} = \boldsymbol{A} \tag{۴۳}$$

۳-۲- روش حل مسئله

مسئله بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی به شکل کلی معادلات (۴۴) تا (۴۷) است که رابطه (۴۴) تابع هدف مسئله سطح بالایی و (۴۵) قیود آن است و رابطه (۴۶) تابع هدف مسئله سطح پایینی و (۴۷) قیود مربوط به آن را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}\min \sum_{b\in B}\sum_{h\in H} H \times r_b\left({f^p_{b,h}}^2 + {f^q_{b,h}}^2\right) &+ \sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c^p_h\left(d^p_{n,h} - D^p_{n,h}\right) \\ &+ \sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c^q_h\left(d^q_{n,h} - D^q_{n,h}\right) \\ &+ \sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{h\in H}\left(p^r_{n,h,s} - P^r_{n,h}\right) + \sum_{n\in N}\sum_{h\in H}\left(p^{ev}_{n,h,s} - P^{ev}_{n,h}\right)\right)\end{aligned} \tag{۴۴}$$

$$s.t.\ (2) - (17) \tag{۴۵}$$

$$\max \sum_{n\in N}\sum_{h\in H}\sum_{s\in S} p^r_{n,h,s} - P^r_{n,h} \tag{۴۶}$$

$$s.t.\ (18) - (40) \tag{۴۷}$$

همانطور که مشاهده شد مدل دو سطحی (۴۴)-(۴۷) در هر دو سطح دارای ساختار ترکیبی باینری است که برای حل آن به صورت زیر عمل می‌کنیم که از (Jokar et al., 2022) به دست می‌آید. شکل (۱) رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن بدترین قطع منابع انرژی تجدیدپذیر، مسئله را حل می‌کند. در سطح اول بهره‌برداری بهینه ریزشبکه با در نظر گرفتن بدترین قطع منابع تجدیدپذیر در سطح دوم انجام می‌شود. طبق این شکل اهداف هر سطح و متغیرهای تصمیم بدست آمده نشان داده شده است. این فلوچارت مراحل اصلی رویکرد بهینه‌سازی دو سطحی را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن بدترین قطع منابع انرژی تجدیدپذیر، بهبود عملکرد سیستم را هدف قرار می‌دهد.

شکل (۱): فلوچارت رویکرد پیشنهادی برای بدترین شرایط احتمالی در مسئله SCUC

برای حل مدل بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی (۴۴) الی (۴۷)، متغیرهای باینری در مسئله سطح پایینی را به فرم محدودیت‌های (۴۸) و (۴۹) تبدیل می‌کنیم. با این کار متغیرهای باینری به متغیرهای پیوسته تبدیل شده و به راحتی می‌توان مسئله سطح پایینی را به فرم معادلات **KKT** تبدیل نمود و به مسئله سطح بالایی اضافه نمود.

$$\boldsymbol{\alpha_n} - \boldsymbol{\alpha_n^2} = \mathbf{0}\ \ \forall \boldsymbol{n} \in \boldsymbol{N} \tag{۴۸}$$

$$\mathbf{0} \le \boldsymbol{\alpha_n} \le \mathbf{1}\ \ \forall \boldsymbol{n} \in \boldsymbol{N} \tag{۴۹}$$

همانطور که مشاهده می‌شود متغیر باینری $(\boldsymbol{\alpha_n})$ به متغیر پیوسته با شرایط (۴۸) و (۴۹) تبدیل شده است. به عبارت دیگر متغیرهای باینری به صورت دو محدودیت (۴۸) و (۴۹) تعریف شده است تا بتوانیم فرم استاندارد معادلات **KKT** را بسازیم و آن را به مسئله سطح بالایی اضافه کنیم. در نهایت مسئله سطح پایینی به یک مدل درجه دوم بدون متغیر باینری تبدیل خواهد شد که به راحتی توسط مجموعه معادلات (۵۰) الی (۵۶) و روش بزرگ **M** به معادلات **KKT** تبدیل می‌شود، که پس از تبدیل مجموعه معادلات مانند مجموعه‌ای از محدودیت‌ها به مسئله سطح بالایی اضافه خواهد شد.

روش حل مسائل بهینه‌سازی با استفاده از معادلات شرایط بهینگی **KKT** یک روش رایج در بهینه‌سازی است که برای حل مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌ها و متغیرهای باینری استفاده می‌شود. معادلات **KKT** شرایطی هستند که برای دستیابی به جواب بهینه در مسئله بهینه‌سازی با متغیرهای باینری، باید برقرار باشند.

روش حل با استفاده از معادلات **KKT** بر اساس ایجاد یک سیستم معادلات برای شرایط بهینگی **KKT** است. این شرایط شامل سه بخش اصلی هستند:

۱. شرط ثبات (**Stationarity Condition**):

این شرط می‌گوید که برای دستیابی به جواب بهینه، گرادیان تابع هدف باید در نقاطی که محدودیت‌های نامساوی برقرار هستند، صفر شود. به طور ساده‌تر، در نقاط بهینه، هیچ تغییری در تابع هدف رخ نمی‌دهد، روابط (۵۰) و (۵۱).

۲. شرط امکان‌پذیری (**Feasibility Condition**):

این شرط مربوط به محدودیت‌های مسئله است و می‌گوید که برای دستیابی به جواب بهینه، باید محدودیت‌های نامساوی و مساوی رعایت شود. به عبارت دیگر، جواب بهینه باید در دامنه قابل قبول تمام محدودیت‌ها قرار بگیرد. (روابط ۵۲ الی ۵۴)

۳. شرط مستقلیت خطی (**Linear Independence Condition**):

این شرط بیانگر استقلال خطی برخی از گرادیان‌های محدودیت‌ها است. برای دستیابی به جواب بهینه، باید برخی از گرادیان‌ها مستقل خطی باشند، به این معنی که نباید بتوان یکی از گرادیان‌ها را به عنوان ترکیب خطی دیگران نمایش داد. (روابط ۵۵ و ۵۶)

روش حل با استفاده از معادلات **KKT** برای حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای باینری به عنوان یک روش قوی و کارآمد شناخته می‌شود و در حل مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌ها و متغیرهای باینری کاربرد فراوانی دارد.

$$\boldsymbol{L(x,\lambda,\mu) = f(x) - \sum_{j=1}^{k} \lambda_j (0 - h_j(x)) - \sum_{i=1}^{m} \mu_j (0 - g_j(x))} \quad (۵۰)$$

$$\boldsymbol{\nabla f(x) - \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_{i=1}^{m} \mu_i \nabla g_i(x) = 0} \quad (۵۱)$$

$$\boldsymbol{h_j(x) = 0} \quad (۵۲)$$

$$\boldsymbol{g_i(x) \geq 0} \quad (۵۳)$$

$$\boldsymbol{\mu_i(x) \geq 0} \quad (۵۴)$$

$$\boldsymbol{\mu_i \leq M(1-\alpha_i) \ \ \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{big number}} \quad (۵۵)$$

$$\boldsymbol{g_i \leq M(\alpha_i) \ \ \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{big number}} \quad (۵۶)$$

۳- شبیه‌سازی

در این مقاله ریزشبکه ۳۳ گره برای تحلیل روش و مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. ریزشبکه پیشنهادی دارای ۳۳ باس و ۳۲ خط است و منابع تولید پراکنده در گره های ۹، ۱۸، ۲۲ و ۳۰ نصب شده است. سیستم ذخیره انرژی و PV به ترتیب در گره‌های ۳، ۶، ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۱، ۲۶، ۳۰ و ۳۲ و همچنین منبع بادی در گره‌های ۶، ۱۲، ۱۷، ۲۰، ۲۷ و ۳۳ نصب شده است. ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی به ترتیب در گره‌های ۸، ۱۷ و ۲۸ قرار دارند. سیستم‌های ذخیره انرژی از نوع لیتیوم با راندمان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی و نشان دادن تأثیر تعداد قطعی منابع تجدیدپذیر در بدترین حالت، موارد زیر در نظر گرفته شده است.

مورد اول؛ بهره‌برداری عادی

مورد دوم؛ خروج پنج واحد PV و بادی

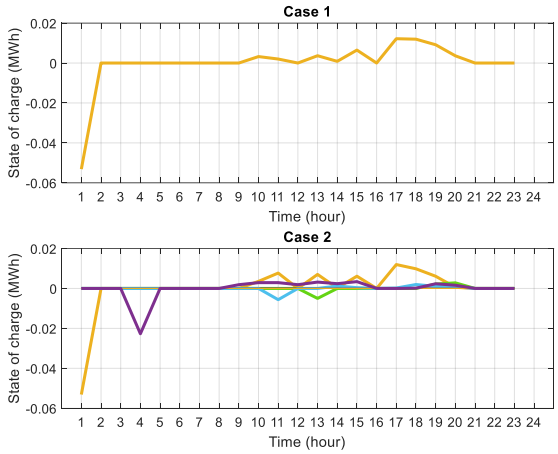
جدول (۱) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در اینجا دو مورد مختلف در نظر گرفته شده با هم مقایسه شده است تا تاثیر بدترین خروج واحدهای انرژی تجدیدپذیر روی ریزشبکه مشاهده گردد. همانطور که مشاهده می‌گردد تلفات انرژی در حالت بهره‌برداری عادی و بدون خروج واحدهای تجدیدپذیر برابر با ۸۲ کیلووات ساعت بوده است، این در حالی است که تلفات انرژی در مورد دوم با در نظر گرفتن بدترین خروج واحدهای تجدیدپذیر برابر با ۱۴۶ کیلووات ساعت شده است. این نشان می‌دهد که تلفات انرژی در مورد دوم نزدیک به ۷۸ درصد افزایش یافته است، که این مهم نشان‌دهنده تاثیر خروج بدترین واحدهای تجدیدپذیر را در شبکه نشان می‌دهد. با مدل پیشنهادی می‌توان بهترین بهره‌برداری از ریزشبکه را تحت بدترین خروج واحدهای تجدیدپذیر داشت. به همین ترتیب حداقل ولتاژ در مورد اول برابر با ۰.۹۸۱۲ پروینیت و در مورد دوم به ۰.۹۷۱۵ پریونیت کاهش داشته است. در هیچ موردی ریزشبکه قطع بار نداشته که این نشان از عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی است. پیک بار در هر دو مورد برابر با ۲۴۵ کیلووات بوده است. در مورد دوم خروج منابع PV به ترتیب در باس‌های ۱۴، ۲۱، ۲۶، ۳۰ و ۳۲ بوده است. به همین ترتیب خروج واحدهای بادی برابر با باس‌های ۶، ۱۲، ۱۷، ۲۷ و ۳۲ می‌باشد. تولید کل منابع DG در مورد اول برابر با ۳۸.۵ مگاوات بوده که در مورد دوم به دلیل خروج واحدهای تجدیدپذیر به ۴۲.۸ مگاوات افزای پیدا کرده است. به همین ترتیب تولید کل منابع PV در مورد اول برابر با ۲.۶۳ مگاوات بوده که پس از خروج در مورد دوم برابر با ۱.۰۳ مگاوات شده است. برای منابع بادی هم نیز در مورد اول بدون خروج برابر با ۳.۶ مگاوات بوده که در مورد دوم به ۵۰۹ کیلووات رسیده است. ظرفیت باتری‌های ریزشبکه نیز در مورد اول برابر ۸۳۰ کیلووات ساعت بوده که برای مورد دوم برابر با ۱.۰۵ مگاوات شده است. در پایان مشاهده می‌شود که با ایجاد محدودیت در مدل پیشنهادی زمان حل مسئله نیز حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

جدول (۱) مقایسه نتایج موردهای مختلف در ریزشبکه ۳۳ باس

	مورد اول	مورد دوم
تلفات انرژی (MWh)	۰.۰۸۲	۰.۱۴۶
حداقل ولتاژ (p.u)	۰.۹۸۱۲	۰.۹۷۱۵
قطع بار (MW)	۰	۰
پیک بار (MW)	۰.۲۴۵	۰.۲۴۵
خروج PV (گره)	-	۱۴ ۲۱ ۲۶ ۳۰ ۳۲
خروج منبع بادی (گره)	-	۶ ۱۲

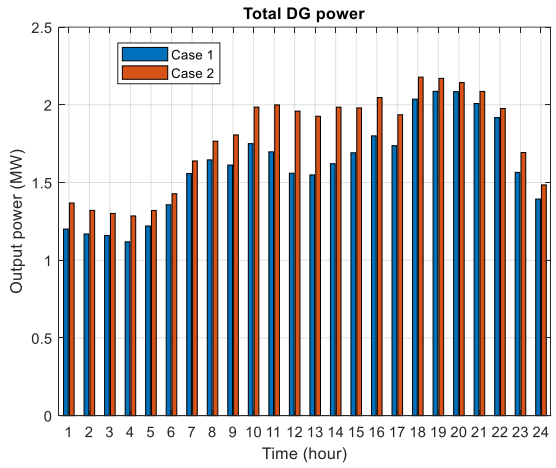
		۱۷
		۲۷
		۳۳
تولید کل DGها (MW)	۳۸.۵	۴۲.۸
تولید کل PV ها (MW)	۲.۶۳	۱.۰۳
تولید کل منابع بادی (MW)	۳.۶	۰.۵۰۹
ظرفیت باتری‌ها (MWh)	۰.۸۳	۱.۰۵
زمان حل	۴۷	۶۵

شکل (۲) شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه را برای موردهای اول و دوم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ناحیه شارژ باتری‌های در محدود منفی y و ناحیه دشارژ در ناحیه مثبت y قرار دارد. مشخص است که اغلب باتری‌ها در هر دو مورد در ساعات اولیه روز شارژ و در زمان پیک دشارژ شده‌اند. نکته دیگری که می‌توان از این شکل استخراج نمود این است که در مورد اول تنها یک باتری فعال بوده است، این در حالی است که در مورد دوم با خروج منابع تجدیدپذیر تعداد ۴ واحد سیستم ذخیره‌سازی انرژی فعال شده است. لذا باتری‌ها ظرفیت بیشتری در مورد دوم دارند. در نهایت عملکرد دقیق مدل پیشنهادی بر روی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در این شکل برای دو مورد در نظر گرفته شده نشان داده شده است.



شکل (۲): مقایسه شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره-سازی انرژی

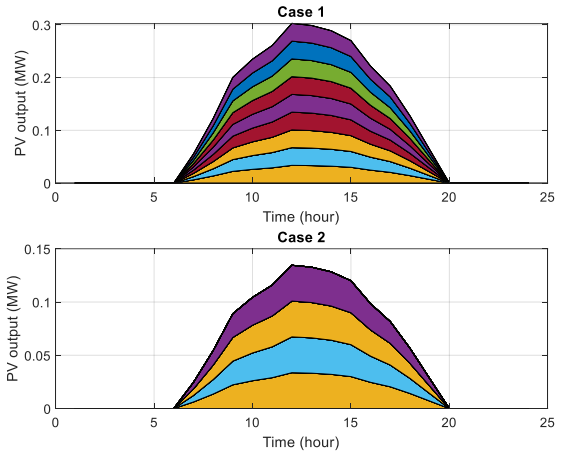
شکل (۳) مقایسه توان خروجی واحدهای DG در ریزشبکه را در مورد اول و دوم نشان می‌دهد. در اینجا بخوبی مشاهده می‌شود که پس از خروج واحدهای تجدیدپذیر از ریزشبکه وضیفه تولید آن‌ها را منابع DG بر عهده گرفته است، لذا تولید منابع DG در مورد دوم (نمودار میله‌ای قرمز رنگ) بیشتر از مورد اول شده است. به همین ترتیب در ساعات پیک بار نیز مقدار تولید این منابع بیشتر شده است. این شکل عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی را در قید تعادل بار در ریزشبکه نشان می‌دهد.



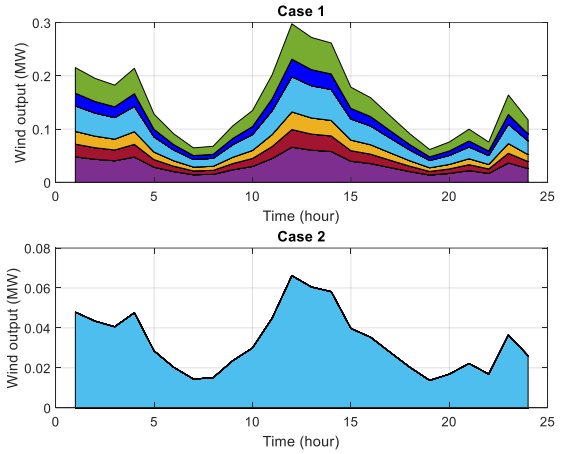
شکل (۳): مقاسیه توان خروجی DGها

شکل (۴) مقایسه‌ای بین توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر PV در مورد اول و دوم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در مورد اول تمام PVها تولید دارند و هیچ منبعی از ریزشبکه خارج نشده است، به همین جهت مقدار توان تولید شده این منابع در مورد اول بیشتر از مورد دوم می‌باشد. در مورد دوم با خروج پنج واحد انرژی تجدیدپذیر PV مقدار تولید توان از آن‌ها کاهش یافته و همانطور که مشاهده می-شود تعداد پنج واحد از این منابع طبق جدول (۱) دیگر تولید ندارند. این شکل صحت عملکرد مدل دو سطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد. از طرفی دیگر مشاهده می‌گردد که منابع تجدیدپذیر تنها از ساعت ۶ الی ۲۰ تولید توان در روز دارند.

شکل (۵) مقایسه‌ای بین توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر بادی در مورد اول و دوم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در مورد اول تمام منابع بادی تولید دارند و هیچ منبعی از ریزشبکه خارج نشده است، به همین جهت مقدار توان تولید شده این منابع در مورد اول بیشتر از مورد دوم می‌باشد. در مورد دوم با خروج پنج واحد انرژی تجدیدپذیر بادی مقدار تولید توان از آن‌ها کاهش یافته و همانطور که مشاهده می‌شود تعداد پنج واحد از این منابع طبق جدول (۱) دیگر تولید ندارند. این شکل صحت عملکرد مدل دو سطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که تولید این منبع وابسته به سرعت باد در طول روز می‌باشد.

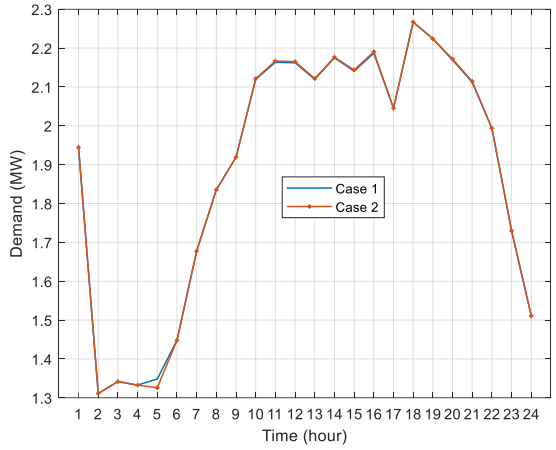


شکل (۴): مقایسه توان خروجی منابع تجدیدپذیر PV



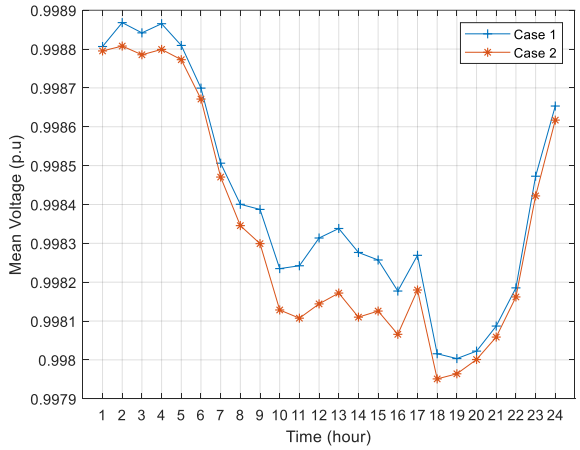
شکل (۵): مقایسه توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر بادی

شکل (۶) مقایسه‌ای بین تغییرات بار در مورد اول و دوم را نشان می‌دهد. در اینجا صحت عملکرد مدیریت سمت تقاضا نیز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با خروج واحدهای تجدیدپذیر از ریزشبکه در مورد دوم تغییرات تقاضا هم نیز در ساعات ۶ و ۱۱ الی ۱۶ انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد میزان تغییر تقاضا در ساعت ۶ بیشتر از ساعات دیگر است که بخوبی در شکل نشان داده شده است. لذا می‌توان بیان نمود که خروج منابع تجدیدپذیر می‌تواند بر روی تغییرات بار اثر گذار باشد.



شکل (۶): مقایسه تغییرات تقاضا در مورد اول و دوم

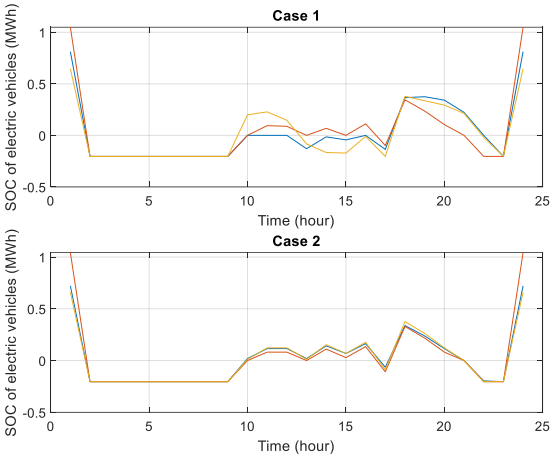
شکل (۷) مقایسه‌ای بین متوسط ولتاژ ریزشبکه در مورد اول و دوم انجام شده است. در اینجا تاثیر بسزای منابع تجدیدپذیر بر روی ولتاژ ریزشبکه بخوبی مشاهده می‌شود. همانطور که می‌بینیم در مورد اول (منحنی آبی رنگ) ولتاژ بسیار بالاتر از مورد دوم می‌باشد، لذا انحراف ولتاژ در مورد اول بسیار کمتر از مورد دوم می‌باشد. به عبارتی دیگر کمترین متوسط ولتاژ در مورد اول برابر با ۰.۹۹۸ پریونیت و حداکثر ولتاژ برابر با ۰.۹۹۸۹ پریونیت می‌باشد. این در حالی است که کمترین متوسط ولتاژ برای مورد دوم برابر با ۰.۹۹۷۹ پریونیت و بیشترین آن برابر با ۰.۹۹۸۸ پریونیت است. این شکل بخوبی تاثیر منابع تجدیدپذیر را بر روی انحرافات ولتاژ ریزشبکه نشان می‌دهد.



شکل (۷): مقایسه متوسط ولتاژ ریزشبکه ۳۳ باس در مورد اول و دوم

در شکل (۸) مقایسه‌ای بین شارژ و دشارژ بهینه خوردوهای برقی در ریزشبکه نشان داده شده است. در این شکل هم نیز محور منفی y نشان از ناحیه شارژ و محور مثبت y نشان از دشارژ خودروهای برقی می‌باشد. با مقایسه مورد اول و دوم می‌توان بیان نمود که خروج

واحدهای تجدیدپذیر از ریزشبکه تاثیر بسزایی در شارژ و دشارژ بهینه خوردوهای برقی دارد.



شکل (۸): مقایسه شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در مورد اول و دوم

در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی به دلیل نداشتن قطع بار در هر دو مورد در نظر گرفته شده، مدلی کارآمد برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن بدترین الت خروج منابع تجدیدپذیر می‌باشد. از طرفی دیگر نتایج بدست آمده نیز تاثیر خروج واحدهای تجدیدپذیر را بر روی مدیریت سمت تقاضا، تولید منابع DG، شارژ و دشارژ بهینه باتری و خودروهای برقی نیز نشان داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل دو سطح مبتنی بر برنامه‌نویسی درجه دوم مخلوط (MIQP) برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌ها در بدترین حالت قطع منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است، که در مسئله سطح بالایی به حداقل رساندن از تلفات انرژی و قطع بار و در مسئله سطح پایینی حداکثر خروج منابع انرژی تجدیدپذیر مدل‌سازی شده است. در سطح پایینی، بدترین حالت تحقق خروج واحدهای تجدیدپذیر حاصل می‌شود و در سطح بالایی، عملکرد بهینه ریزشبکه توزیع در بدترین حالت تحقق خروج منابع تجدیدپذیر صورت می‌گیرد. یک روش مبتنی بر اصلاح و تجزیه در نظر گرفته شده برای حل مدل دو سطح پیشنهادی ، که از روش مشابه قابل اطمینان تر است. میکروگرید ۳۳ گره برای تغییر و متغیر و شرایط بهینگی KKT برای حل مدل دو سطحی پیشنهادی ارائه شده است، که صحت و عملکرد بهینه مدل و روش پیشنهادی را اثبات می‌کند. به طور خلاصه، نتایج پس از شبیه‌سازی حالت‌های مختلف قطع منابع انرژی تجدیدپذیر به دست آمده نشان می‌دهد که الف) مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن بدترین حالت قطع منابع تجدیدپذیر، منجر به کاهش آسیب‌پذیری سیستم (کاهش بار) می‌شود و می‌تواند بهترین عملکرد بهینه را باتوجه به مسئله سطح بالایی فراهم کند. ب) با توجه به اینکه مدل پیشنهادی یک مدل بهینه‌سازی ریاضی از نوع MIQP است، بنابراین راه حل‌های بهینه سراسری توسط حل کننده Gurobi تضمین می‌شود. ج) با توجه به مدت کوتاه زمان حل مسئله، می‌توان از آن برای شبکه‌های بزرگتر و آنلاین استفاده کرد. برای ادامه این مطالعه ، موارد زیر نیز توصیه می‌شود.

۱) در نظر گرفتن یک مدل چند سطحی برای بررسی تأثیر قطع منابع انرژی تجدیدپذیر در سطح ریزشبکه‌های چند ناحیه‌ای.

۲) در نظر گرفتن شبکه گاز و مدل‌سازی سیستم‌های توان به گاز (P2G) برای بررسی تبدیل انرژی مازاد به گاز و فروش به شبکه گاز طبیعی.

مراجع

W. Yuan, Y. Wang and Z. Chen, (2021) "New Perspectives on Power Control of AC Microgrid Considering Operation Cost and Efficiency," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 5, pp. 4844-4847, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3080141.

Z. Fan, B. Fan, J. Peng and W. Liu, (2021) "Operation Loss Minimization Targeted Distributed Optimal Control of DC Microgrids," IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 4, pp. 5186-5196, doi: 10.1109/JSYST.2020.3035059.

F. S. Al-Ismail, (2021) "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review," IEEE Access, vol. 9, pp. 36154-36172, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062840.

Y. Jia, P. Wen, Y. Yan and L. Huo, (2021) "Joint Operation and Transaction Mode of Rural Multi Microgrid and Distribution Network," IEEE Access, vol. 9, pp. 14409-14421, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050793.

T. -T. Nguyen, T. -K. Dao, T. -T. -T. Nguyen and T. -D. Nguyen, (2022) "An Optimal Microgrid Operations Planning Using Improved Archimedes Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 67940-67957, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3185737.

C. Wang, A. Wang, S. Chen, G. Zhang and B. Zhu, (2022) "Optimal Operation of Microgrids Based on a Radial Basis Function Metamodel," IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 3, pp. 4756-4767, doi: 10.1109/JSYST.2021.3130760.

Z. Li, L. Wu, Y. Xu, S. Moazeni and Z. Tang, (2022) "Multi-Stage Real-Time Operation of a Multi-Energy Microgrid With Electrical and Thermal Energy Storage Assets: A Data-Driven MPC-ADP Approach," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 1, pp. 213-226, doi: 10.1109/TSG.2021.3119972.

F. Fallahi, M. Yildirim, J. Lin and C. Wang, (2021) "Predictive Multi-Microgrid Generation Maintenance: Formulation and Impact on Operations & Resilience," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 6, pp. 4979-4991, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3066462.

M. Chamana et al., (2022) "Buildings Participation in Resilience Enhancement of Community Microgrids: Synergy Between Microgrid and Building Management Systems," IEEE Access, vol. 10, pp. 100922-100938, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207772.

R. A. Jabr, (2022) "Economic Operation of Droop-Controlled AC Microgrids," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 4, pp. 3119-3128, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3130128.

Z. Zhang, Z. Wang, H. Wang, H. Zhang, W. Yang and R. Cao, (2021) "Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm," IEEE

generation method," Oper. Res. Lett., vol. 41, no. 5, pp. 457–461.

H. Jokar, B. Bahmani-Firouzi, H. Haes Alhelou, P. Siano, (2022) "Transmission and Distribution Substation Energy Management Considering Large-Scale Energy Storage, Demand Side Management and Security-Constrained Unit Commitment", IEEE Access, vol.10, pp.123723-123735.

Rajamand S. (2021) "Optimization and Investment of Energy Storage System Implementation and Demand Response Pattern for Microgrid Cost Reduction with Approach of Bee Colony Algorithm." ieijqp; 10 (1) :80-88.

Artis R, Shivaie M, Assili M. (2021) "Multi-Level Multi-Microgrid Expansion Planning to Enhance Resilience against Seismic Risks Arising from Earthquake" ieijqp; 10 (3) :85-96

hosseini S A, hojjat M, Azarfar A. (2021) "Optimal scheduling for the electrical energy consumption of residential buildings in a microgrid considering the priority of operation through IoT infrastructure" ieijqp; 10 (2) :88-95.

Access, vol. 9, pp. 15520-15529, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053122.

C. Wang, H. Yu, L. Chai, H. Liu and B. Zhu, (2021) "Emergency Load Shedding Strategy for Microgrids Based on Dueling Deep Q-Learning," IEEE Access, vol. 9, pp. 19707-19715, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055401.

J. Lee, S. Lee and K. Lee, (2021) "Multistage Stochastic Optimization for Microgrid Operation Under Islanding Uncertainty," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 1, pp. 56-66, doi: 10.1109/TSG.2020.3012158.

Z. Zhao et al., (2022) "Distributed Robust Model Predictive Control-Based Energy Management Strategy for Islanded Multi-Microgrids Considering Uncertainty," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 3, pp. 2107-2120, doi: 10.1109/TSG.2022.3147370.

S. Harasis, Y. Sozer and M. Elbuluk, (2021) "Reliable Islanded Microgrid Operation Using Dynamic Optimal Power Management," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 2, pp. 1755-1766, doi: 10.1109/TIA.2020.3047587.

N. Salehi, H. Martínez-García, G. Velasco-Quesada and J. M. Guerrero, (2022) "A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids," IEEE Access, vol. 10, pp. 15935-15955, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.

H. Masrur, M. Shafie-Khah, M. J. Hossain and T. Senjyu, (2022) "Multi-Energy Microgrids Incorporating EV Integration: Optimal Design and Resilient Operation," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 5, pp. 3508-3518, doi: 10.1109/TSG.2022.3168687.

Y. Vilaisarn, Y. R. Rodrigues, M. M. A. Abdelaziz and J. Cros, (2022) "A Deep Learning Based Multiobjective Optimization for the Planning of Resilience Oriented Microgrids in Active Distribution System," IEEE Access, vol. 10, pp. 84330-84364, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197194.

C. Reiz and J. B. Leite, (2022) "Optimal Coordination of Protection Devices in Distribution Networks With Distributed Energy Resources and Microgrids," IEEE Access, vol. 10, pp. 99584-99594, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3203713.

Y. Vilaisarn, M. Moradzadeh, M. Abdelaziz, J. Cros, (2022) "An MILP formulation for the optimum operation of AC microgrids with hierarchical control," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 137, 107674.

A. Singh, H. D. Nguyen, (2022) "A two-layer framework for optimal control of battery temperature and microgrid operation,"*Journal of Energy Storage*, Volume 50, 104057.

M. MansourLakouraj, M. Shahabi, M. Shafie-khah, João P.S. Catalão, (2022) "Optimal market-based operation of microgrid with the integration of wind turbines, energy storage system and demand response resources," Energy, Volume 239, Part B, 122156.

H. Akulker, E. Aydin, (2023) "Optimal design and operation of a multi-energy microgrid using mixed-integer nonlinear programming: Impact of carbon cap and trade system and taxing on equipment selections," Applied Energy, Volume 330, Part A, 120313.

E. Shokouhmand, A. Ghasemi, (2022) "Stochastic optimal scheduling of electric vehicles charge/discharge modes of operation with the aim of microgrid flexibility and efficiency enhancement," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 32, 100929.

B. Zeng and Y. An, (2014) "Solving bilevel mixed integer program by reformulations and decomposition," University of South Florida, Tech. Rep.

B. Zeng and L. Zhao, (2013) "Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint