Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity P.P 72-87

Vol. 12/ No. 4/ Winter 2024 ISSN 2322-2344 EISSN 2717-1639

Optimal Operation of Microgrids Using bi-Level Evolutionary Algorithm in the Presence of Uncertain Renewable Energy Resources

Saeid Shakeri Nia[1], Ph.D. Student, Abbas Fattahi Meyabadi[2], Assistant Professor, Mojtaba Vahedi[3], Assistant Professor, Nasrin Salehi[4], Associate Professor, Mahmoud Samiei Moghaddam[5], Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
2- Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
3- Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran. Email: fattahi@hut.ac.ir, (Corresponding author)
4- Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
5- Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran. Samiei352@yahoo.com

Abstract:

With the increasing penetration of renewable energy sources such as wind and photovoltaic generation in future microgrids, challenges arise due to variable weather conditions. In this paper, a model is proposed to optimize the performance of microgrids under the worst-case scenario of renewable energy source failures using a bi-level optimization. In the upper-level problem, optimization is carried out in terms of energy loss reduction, load shedding in the load management program, as well as optimal charging and discharging of energy storage systems. The lower-level problem considers maximizing the utilization of renewable energy. A bi-level optimization solution method is proposed, which involves binary variables at both levels and is solved using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). The proposed model and algorithm are implemented using the Julia programming language. The performance of the model is examined under various conditions using a 33-bus microgrid, and the optimization results demonstrate the optimal performance of the microgrid under the worst-case scenario of renewable energy source failures.

Keywords: Microgrid ,Demand-side management ,Optimization ,Renewable resources ,Energy storage system ,Evolutionary algorithm

Date of sending the article: 2023/07/07
Acceptance date of the article: 2023/09/30

Name of responsible author: Abbas Fattahi Meyabadi
Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۸۷-۷۲

Vol. 12 / No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها با استفاده از الگوریتم تکاملی دو سطحی در حضور قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر

نوع مطالعه: پژوهشی

سعید شاکری نیا [۱]، دانشجوی دکتری، عباس فتاحی می آبادی[۲*]، استادیار، مجتبی واحدی[۱]، استادیار، نسرین صالحی[۳]، دانشیار، محمود سمیعی مقدم[۴]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود ، ایران
۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران
۳- دانشکده علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۴- - دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

چکیده:

با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر مانند تولید بادی و فتوولتائیک در ریزشبکه آینده، به دلیل شرایط آب و هوایی متغیر، چالش‌هایی پدید می‌آید. در این مقاله، مدلی برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه تحت شرایط بدترین حالت خرابی منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از بهینه‌سازی دو سطحی ارائه شده است. در مساله سطح بالا، بهینه‌سازی از دیدگاه کاهش اتلاف انرژی و قطع بار در برنامه مدیریت بار، همچنین شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی صورت گرفته است. مساله سطح پایین بیشینه کردن قطعی انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. روشی برای حل مساله بهینه‌سازی دو سطحی ارائه شده که شامل متغیرهای باینری در هر دو سطح است که توسط یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک غیر غالب (NSGA II) حل شده است. مدل و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جولیا پیاده‌سازی شده است. با استفاده از یک ریزشبکه ۳۳ باس، عملکرد مدل در شرایط مختلف مورد بررسی و نتایج بهینه‌سازی بهینه عملکرد ریزشبکه تحت شرایط بدترین خرابی منابع انرژی تجدیدپذیر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد خروج بدترین قطع منابع تجدیدپذیر به ترتیب تلفات انرژی تا ۹ درصد افزایش می‌یابد، همچنین مقایسه روش پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌ها برتری روش پیشنهادی را در مدت زمان حل مسئله و همچنین شاخص‌های مهم ریزشبکه نشان داد.

کلمات کلیدی: ریزشبکه، مدیریت سمت تقاضا، بهینه‌سازی، منابع تجدیدپذیر، سیستم ذخیره انرژی، الگوریتم تکاملی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر عباس فتاحی می آبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : همدان، دانشگاه صنعتی همدان

لغتنامه

شاخص و مجموعه ها

N	مجموعه گره های ریزشبکه با شاخص n
H	مجموعه دوره زمانی با شاخص h
B	مجموعه خطوط ریزشبکه با شاخص b
S	مجموعه سناریوها با شاخص s

پارامترها

$x_b r_b$,	مقاومت و راکتانس خط
$c_h^q c_h^p$,	هزینه قطع بار حقیقی و راکتیو در برنامه مدیریت بار
$d_{n,h}^q d_{n,h}^p$,	بار حقیقی و راکتیو اولیه ریزشبکه
σ_s	احتمال هر سناریو
$p_{n,h,s}^r$	توان منابع تجدید پذیر در هر سناریو
ρ	ضریب توان منابع
τ	مقدار درصد تغییرات بار
$\overline{f}_{b,h}^q \overline{f}_{b,h}^p$,	حداکثر شار توان حقیقی و راکتیو خط
$\overline{P}_n^{DG}$	حداکثر توان منابع
$\overline{X}_n$	حداکثر ظرفیت باتری
$\eta_n^{dis} \eta_n^{ch}$,	راندمان شارژ و دشارژ باتری
$\underline{p}_n^{ch} \overline{p}_n^{ch}$,	حداکثر و حداقل توان شارژ باتری
$\underline{p}_n^{dis} \overline{p}_n^{dis}$,	حداکثر و حداقل توان دشارژ باتری
$soc_n^{max} soc_n^{min}$,	حداقل و حداکثر سطح انرژی در باتری
M	عدد بزرگ
A	تعداد خروج منابع در نظر گرفته شده

متغیرها

$f_{b,h}^q f_{b,h}^p$,	شار توان حقیقی و راکتیو خط
$D_{n,h}^q D_{n,h}^p$,	بارهای اکتیو و راکتیو تغییر یافته
$P_{n,h}^r$	توان بهره برداری شده از منابع تجدید پذیر
$P_{n,h}^{DG}$	توان حقیقی منابع تجدیدپذیر
$p_h^{dis} p_h^{ch}$,	توان شارژ و دشارژ باتری
$v_{n,h}$	ولتاژ مربعی ریزشبکه
$e_{n,h}$	سطح انرژی باتری

متغیرهای باینری

$z_{n,h}$	وضعیت شارژ و دشارژ باتری
α_n	وضعیت فعال بودن منابع انرژی تجدیدپذیر

۱ مقدمه

منابع اصلی انرژی توزیع شده در ریزشبکه‌ها به طور معمول از توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک تشکیل می‌شوند. با این حال، این منابع به نوسانات شرایط آب و هوایی حساس هستند که ممکن است منجر به کاهش تولید قدرت یا قطعی کامل آن‌ها شود. به عبارت دیگر، هرگونه تغییر در تولید توان از این منابع یا قطعی ناگهانی آن‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی بر بهره‌برداری بهینه ریزشبکه تأثیر بگذارد. بنابراین، چالش اساسی برای اپراتورهای ریزشبکه، توسعه یک مدل بهره‌برداری بهینه است که با مشکلات احتمالی قطعی یا کاهش منابع انرژی تجدیدپذیر محاسبه شده است. انگیزه پشت این مطالعه، رسیدگی به مسئله بهره‌برداری بهینه ریزشبکه در شرایط بدترین حالت است، در حالی که منابع انرژی تجدیدپذیر با خطر قطعی مواجه هستند. با چنین شرایطی ریز شبکه می‌تواند نقاط آسیب‌پذیر را برای بهبودهای بیشتر شناسایی کند.

۱-۱ مرور پیشینه تحقیق

در (Zhao et al., 2022) یک مدل پخش بار بهینه را پیشنهاد کرده‌اند که از روش ضریب لاگرانژ برای کاهش دروپ ولتاژ در ریزشبکه‌های AC استفاده می‌کند. در (Vilaisarn et al., 2022)، مدلی که از شرایط بهینه کاروش-کوهن-تاکر (KKT) استفاده می‌کند را به عنوان روشی برای کاهش تلفات بهره-برداری در ریزشبکه‌های DC پیشنهاد کرده است. در (Khoubseresht et al., 2023) یک بررسی جامع از روش‌های مختلف بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و کنترل برای ریزشبکه‌های DC انجام شده است که اهداف مطالعاتی مختلفی را در بر می‌گیرد. در (Bui et al., 2019) یک رویکرد مبتنی بر نظریه بازی با هدف به حداکثر رساندن سود ریزشبکه‌ها در بازارهای برق ارائه کرده است. در (Bui et al., 2018) یک رویکرد پیشنهادی از یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر بهینه‌سازی ارشمیدس برای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی و افزایش سود ریزشبکه پیشنهاد می‌کند. در (Karimianfard et al., 2019) یک الگوریتم اکتشافی به عنوان راه حلی برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن انواع منابع تولید پراکنده با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های اقتصادی پیشنهاد شده است. در (Wang et al., 2021) رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای بهینه‌سازی عملیات بلادرنگ ریزشبکه‌های چند انرژی با هدف دستیابی به عملکرد بهینه پیشنهاد شده است. در (Zhang et al., 2021) چارچوبی مبتنی بر یک مدل بهینه‌سازی تصادفی یکپارچه برای بهره‌برداری مشترک و نگهداری در یک محیط چند ریزشبکه با هدف افزایش انعطاف‌پذیری پیشنهاد شده است. در (Yuan et al., 2021) یک رویکرد مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای توانمندسازی ساختمان‌ها برای مشارکت در افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبکه با استفاده از هم افزایی بین ریزشبکه و سیستم‌های مدیریت ساختمان پیشنهاد شده است. در (Li et al., 2022) یک روش عمومی مبتنی بر پخش بار AC برای بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها با ترکیب منابع انرژی توزیع شده، با هدف کاهش تلفات برق ارائه شده است. در (Vilaisarn et al., 2022) یک استراتژی عملکرد بهینه شده دو سطح با هدف افزایش مزایای اقتصادی و کاهش خطرات بهره‌برداری در ریزشبکه‌ها ارائه شده است. در (Hosseini et al., 2021) روشی با استفاده از یادگیری عمیق برای کاهش بارگذاری بار در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است. در (Shokouhmand et al., 2022)، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چند مرحله‌ای مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای عملکرد ریزشبکه‌های تحت عدم اطمینان از شرایط جزیره ارائه شده است. در (Fallahi et al., 2021) یک رویکرد مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل قوی توزیع شده برای ریزشبکه‌های چند جزیره، با هدف کاهش اثرات منفی خروجی انرژی تجدید پذیر نامشخص ارائه شده است. در (Kheradmand et al., 2021) یک الگوریتم کنترل جدید برای کنترل موثر پیچیدگی‌های مرتبط با سطح بالای توان PV و ادغام سیستم ذخیره انرژی در ریزشبکه‌های جزیره ایجاد شده است. این الگوریتم با هدف بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه، به طور خاص هدف قرار دادن هزینه‌های بهره‌برداری

پیشنهاد شده است. در (Pan et al., 2023)، یک مرور کلی ارائه شده است که موضوعات متنوعی از جمله برنامه‌ریزی بهینه تولید، مدیریت تقاضا، محدودیت‌های سوخت و انتشار کربن و نقش اساسی بهینه‌سازی در بهره‌برداری ریزشبکه‌ها را پوشش می‌دهد. در (Karimianfard et al., 2022)، یک مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح جدید برای مدیریت انرژی کارآمد سیستم‌های ذخیره انرژی در مقیاس بزرگ، با در نظر گرفتن استراتژی‌های مدیریت سمت تقاضا برای به حداکثر رساندن کل سود سالانه معرفی شده است. در (Fan et al., 2021) یک رویکرد بهینه‌سازی چند منظوره بر اساس تکنیک‌های یادگیری عمیق برای برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های انعطاف‌پذیر ارائه شده است. این رویکرد از یک فرآیند بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای به حداقل رساندن هزینه‌های سوئیچینگ استفاده می‌کند، ضمن اینکه عملکرد کلی را به حداکثر می‌رساند. در (Chamana et al., 2022)، یک الگوریتم ژنتیکی نخبه‌گرا برای هماهنگی بهینه دستگاه‌های حفاظت در شبکه‌های توزیع که شامل منابع انرژی توزیع شده و ریزشبکه‌ها هستند، پیشنهاد شده است، که هدف کاهش تأثیر وقفه‌های ریزشبکه و هزینه‌های بهره‌برداری است. در (K-bidi et al., 2022)، یک مدل مبتنی بر برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح جدید برای فعال کردن عملکرد مؤثر ریزشبکه‌های سه فاز، با تمرکز خاص در دستیابی به انرژی بهینه و تعادل بار پیشنهاد شده است. در (Lee et al., 2021) یک رویکرد چند لایه که از تکنیک‌های پخش بار بهینه استفاده می‌کند با تأکید ویژه‌ای بر ترکیب سیستم‌های ذخیره انرژی برای عملکرد بهتر ریزشبکه‌ها ارائه شده است. علاوه بر این، در (Al-Ismail 2021) یک فرمول تصادفی مبتنی بر برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح به عنوان یک رویکرد نوآورانه برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌ها، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی مرتبط با توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع پاسخ تقاضا معرفی شده است. این روش‌های پیشرفته استراتژی‌هایی را برای بهینه‌سازی ریزشبکه، پرداختن به چالش‌های مختلفی از جمله تعادل بار، ذخیره انرژی و مدیریت عدم اطمینان، برای بهبود کارآیی، تاب آوری و پایداری آن‌ها ارائه می‌دهد. در (MansourLakouraj et al., 2022)، یک رویکرد نوآورانه مبتنی بر برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌های چند انرژی، با تمرکز خاص بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و در عین حال تأثیرات زیست محیطی ارائه شده است. این رویکرد از تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته استفاده می‌کند تا عملکرد کارآمد و پایدار ریزشبکه‌ها را حفظ کند. در (Hai et al., 2023)، با در نظر گرفتن شارژ وسایل نقلیه برقی به عنوان یک عامل اصلی، یک استراتژی سه سطحی برای عملکرد بهینه تصادفی ریزشبکه‌ها ارائه شده است. این استراتژی با هدف افزایش مقاومت در برابر عدم قطعیت‌های مرتبط با الگوهای شارژ وسیله نقلیه الکتریکی و درج آن‌ها در برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبکه پیشنهاد شده است. در (Wang et al., 2022)، یک طرح مدیریت انرژی سلسله مراتبی مبتنی بر چند عامل برای ریزشبکه‌ها در مورد توان انعطاف‌پذیر و پاسخ تقاضا بر اساس برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح ارائه شده است. در (Jia et al., 2021)، یک مدیریت انرژی چند مرحله‌ای برای یک ریزشبکه ترکیبی با ذخیره فتوولتائیک و هیدروژن بر اساس برنامه‌ریزی درجه دوم ارائه شده است. در (Mehrasa et al., 2023)، نویسندگان یک رویکرد قوی برای مدیریت انرژی ریزشبکه مسکونی با منابع تجدید پذیر، باتری‌ها و مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد کرده‌اند. در مطالعه (Salehi et al., 2022)، یک استراتژی مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل مختلط برای مدیریت انرژی ریزشبکه‌های متصل به شبکه، با توجه به باتری، دیزل ژنراتور و سیستم‌های فتوولتائیک ارائه شده است. در (Nguyen et al., 2022)، یک استراتژی معاملاتی داخلی برای مدیریت بهینه انرژی در ساخت ریزشبکه‌ها با سیستم‌های خنک‌کننده، گرمایشی و توان ترکیبی با هدف بهبود یک تابع چند هدفه پیشنهاد شده است. در (Akulker et al., 2023)، نویسندگان یک استراتژی کنترل بهینه را برای ریزشبکه متصل به شبکه ولتاژ ضعیف با یک واحد PV و سیستم ذخیره انرژی ارائه داده‌اند تا پاسخ پویا ریزشبکه را بهبود بخشند. در (Harasis et al., 2021)، یک رویکرد بهینه برنامه‌ریزی انرژی برای ریزشبکه با وسایل نقلیه برقی بر اساس قیمت بازار برق برای مدیریت مؤثر پخش بار و شارژ/دشارژ وسایل نقلیه برقی در ریزشبکه پیشنهاد شده است. در (Singh

et al., 2022)، یک روش بهینه‌سازی تحلیلی برای ادغام منابع فتوولتائیک، توربین‌های بادی و سیستم‌های ذخیره انرژی بـرای بهبود ولتاژ و تلفات ریزشبکه ارائه شده است. در (Reiz et al., 2022)، نویسندگان یک روش یادگیری تقویت را برای برنامـه-ریزی باتری پیشنهاد کرده‌انـد تـا اهـداف کـاربر را در مـدیریت انرژی ریزشبکه بهینه کنند. جدول (۱) برای نشان دادن برتـری و تفاوت این مطالعه در مقایسه با مطالعات اخیر ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه بین مدل پیشنهادی با مقالات مشابه

	مدیریت سمت تقاضا	قطع منابع تجدیدپذیر	باتری	چندهدفه	الگوریتم حل	مدل سطح پایینی	مدل سطح بالایی
این مقاله	✓	✓	✓	✓	تکاملی	MILP	MIQP
Zhao 2022	✓	×	×	✓	تکاملی	تک سطحی (NLP)	
Vilaisarn 2022	×	×	×	×	یادگیری-Q	تک سطحی (NLP)	
Khoubseresht 2023	×	×	✓	×	تکاملی	تک سطحی (NLP)	
Bui 2019	×	×	✓	✓	تکاملی	تک سطحی (NLP)	
Bui 2018	×	×	×	✓	×	تک سطحی(NLP)	
Karimianfard 2019	×	×	✓	✓	برنامه‌ریزی پویا	LP	LP
Wang 2021	×	×	✓	✓	تجزیه بندرز	LP	MILP
Zhang 2021	×	×	✓	×	×	تک سطحی (MILP)	
Yuan 2021	×	×	×	×	لیاپانوف	تک سطحی (MIQP)	
Li 2022	✓	×	✓	✓	سلسله مراتبی	LP	MILP
Vilaisarn 2022	✓	✓	✓	✓	دوگانگی قوی	LP	MIQP
Hosseini 2021	×	×	✓	✓	دوگانگی قوی	LP	LP
Shokouhmand 2022	×	×	✓	✓	تئوری بازی	تک سطحی (LP)	
Fallahi 2021	×	×	✓	✓	L-shaped	LP	MILP
Kheradmand 2021	×	×	✓	✓	تئوری بازی	LP	LP
Pan 2023	×	×	✓	✓	تئوری بازی	LP	LP
Karimianfard 2022	×	×	✓	✓	پخش بار بهینه توزیع شده	تک سطحی(MINLP)	
Fan 2021	×	×	✓	✓	تکاملی	تک سطحی (NLP)	
Chamana 2022	×	×	✓	✓	×	تک سطحی(MINLP)	
K-bidi 2022	✓	×	✓	✓	×	تک سطحی (MILP)	
Lee 2021	×	×	✓	×	×	تک سطحی(MILP)	
Al-Ismail 2021	×	×	✓	✓	یادگیری عمیق	تک سطحی (NLP)	
MansourLakouraj 2022	✓	×	✓	×	ابتکاری	تک سطحی(MINLP)	
Hai 2023	✓	×	×	✓	خوشه‌بندی	تک سطحی (NLP)	
Wang 2022	✓	×	✓	✓	مونت کارلو	تک سطحی(MILP)	
Jia 2021	✓	×	✓	✓	ابتکاری	تک سطحی(NLP)	
Mehrasa 2023	×	×	✓	✓	ابتکاری	تک سطحی(MILP)	
Salehi 2022	×	×	✓	✓	تکاملی	تک سطحی (MILP)	
Nguyen 2022	×	×	✓	×	×	تک سطحی(MIQP)	
Akulker 2023	✓	×	✓	✓	ابتکاری	تک سطحی (MILP)	
Harasis 2021	×	×	×	×	ابتکاری	تک سطحی (NLP)	
Singh 2022	✓	×	✓	✓	تکاملی	NLP	MILP

۱-۲ انگیزه اصلی تحقیق

تحقیق حاضر به منظور تحلیل ریزشبکه‌های جزیره‌ای با در نظر گرفتن برنامه مدیریت سمت تقاضا و سیستم ذخیره‌سازی انرژی در مواقعی که بدترین قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر رخ می‌دهد، با هدف ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه انجام شده است. این مدل به منظور افزایش مقاومت ریزشبکه در برابر بدترین قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش احتمال قطعی بار ارائه شده است. علاوه بر این، یکی از چالش‌های اصلی این تحقیق، توسعه الگوریتمی برای حل مدل دو سطحی عدد صحیح مختلط پیشنهادی است. این الگوریتم با استفاده از روش‌های تکاملی توسعه داده شده است، زیرا مدل دو سطحی پیشنهادی با شرایط KKTو دوگانگی قوی، قابل تبدیل به یک مدل یک سطحی نیست. در این تحقیق، الگوریتم تکاملی ارائه شده برای حل مدل پیشنهادی، کارایی و کاربردی بالایی دارد.

۱-۳ نوآوری تحقیق

در این مطالعه سعی شده است تا سهم قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی ریزشبکه داشته باشد. در ابتدا، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی اعداد صحیح مختلط مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مختلط برای بهره‌برداری ریزشبکه بهینه پیشنهاد شده است. این مدل بدترین قطع منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظر می‌گیرد که باعث می‌شود ریزشبکه در برابر قطع‌های غیرمنتظره انعطاف‌پذیر باشد. ثانیا، یک الگوریتم تکاملی برای حل مسائل چالش برانگیز اعداد صحیح مختلط دو سطحی که دارای متغیرهای باینری در هر دو سطح هستند، توسعه داده شده است. این الگوریتم به طور خاص برای حل مدل بهینه‌سازی پیشنهادی طراحی شده است و یک رویکرد عملی برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط به طور کلی ارائه می‌دهد. در نهایت، این مطالعه عملکرد بهینه منابع تولید پراکنده، مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه را در نظر گرفته است. این عوامل نقش مهمی در عملکرد کارآمد یک ریزشبکه ایفا می‌کنند و این مطالعه رویکردی جامع برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه جزیره‌ای ارائه کرده است. به طور کلی، مشارکت‌های این مطالعه پیامدهای قابل توجهی برای بهره‌برداری و مدیریت ریزشبکه‌ها به ویژه در مواجهه با قطع منابع انرژی تجدیدپذیر دارد.

۱-۴ شکاف مطالعاتی

با توجه به مرور پیشینه ارائه شده، تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی ریزشبکه‌های انرژی تحت شرایط بدترین حالت خرابی منابع انرژی تجدیدپذیر اهمیت دارند. این تحقیقات به دنبال توسعه راهکارهای بهینه‌سازی جهت کاهش تلفات انرژی، حفظ پایداری شبکه، و بهبود بهره‌وری منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشند. شکاف‌های مطالعاتی بعضا در مدل‌سازی دقیق، روش‌های بهینه‌سازی، استفاده از داده‌های واقعی، ترکیب با تکنولوژی‌های تازه‌تر، جنبه‌های اقتصادی و سیاستی، و مقیاس‌پذیری و تطبیق‌پذیری مشخص می‌شوند. این تحقیقات باعث بهبود پایداری و کارایی ریزشبکه‌های انرژی تجدیدپذیر در آینده می‌شوند.

۱-۵ سازماندهی مقاله

در بخش بعدی مقاله مدل پیشنهادی ارائه و به طور کامل شرح داده خواهد شد. بخش سوم سیستم پیشنهادی معرفی و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود. بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری مقاله ارائه و به منظور ادامه راه این مطالعه چندین پیشنهاد ارائه می‌شود.

۲. مدل‌سازی پیشنهادی

مدل دو سطحی اعداد صحیح مختلط به یک مسئله سطح بالایی و یک مسئله سطح پایینی تقسیم می‌شود که در زیر به تفصیل ارائه شده است و فرمول‌بندی و اهداف هر مسئله را مشخص می‌کند. در این پژوهش، مدل بهینه‌سازی دو سطحی اعداد صحیح مختلط به عنوان محور اصلی مطرح شده است، که پس از آن، روشی بر پایه الگوریتم تکاملی مورد استفاده برای حل مسئله شرح داده شده است. مدل دو سطحی اعداد صحیح مختلط به یک مسئله سطح بالایی و یک مسئله سطح پایینی تقسیم می‌شود که در زیر به تفصیل شرح داده شده است و فرمول‌بندی و اهداف هر مسئله مشخص شده است. در سطح

بالایی، مسئله بهینه‌سازی اعداد صحیح مختلط شامل بهره‌برداری بهینه منابع تولید پراکنده، مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه باتری در ریزشبکه را بررسی می‌کند. در سطح پایینی، مسئله بهینه‌سازی اعداد صحیح مختلط مربوط به بهینه‌سازی در ریزشبکه است که بدترین حالت قطعی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر را در نظر می‌گیرد. در ادامه، الگوریتمی تکاملی ارائه شده است که برای حل مسائل دو سطحی اعداد صحیح مختلطی که دارای متغیرهای باینری در هر دو سطح هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مسائل بهینه‌سازی دو سطحی، دو سطح اصطلاحا به عنوان "سطح بالا" و "سطح پایین" شناخته می‌شوند. این دو سطح به منظور نمایش دو سطح تصمیم‌گیری در یک مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سطح بالا (Upper Level) به عنوان سطحی تعریف می‌شود که متغیرهای تصمیم‌گیری از آن به عنوان ورودی به مسئله بهینه‌سازی دو سطحی می‌آیند. به عبارت دیگر، این سطح مرتبط با تصمیم‌گیری‌هایی است که توسط تصمیم‌گیران برای کنترل یک سیستم یا فرآیند انجام می‌شود. در مقابل، سطح پایین (Lower Level) به عنوان سطحی تعریف می‌شود که مسئله بهینه‌سازی اصلی در آن حل می‌شود و متغیرهای تصمیم‌گیری سطح بالا به عنوان پارامترهای ورودی به این مسئله در نظر گرفته می‌شوند. این سطح مرتبط با تاثیر تصمیمات گرفته شده در سطح بالا بر عملکرد سیستم یا فرآیند است.

انتخاب اینکه کدام سطح به عنوان سطح بالا و کدام سطح به عنوان سطح پایین در یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی استفاده شود، به توجه به مسئله مورد نظر و اهداف تصمیم‌گیری معین مسئله انجام می‌شود. معمولاً، سطح بالا برای تصمیماتی که توسط مدیران یا تصمیم‌گیران اصلی انجام می‌شود و تاثیر آنها بر عملکرد سیستم یا فرآیند بررسی می‌شود، انتخاب می‌شود. در عین حال، سطح پایین معمولاً برای مسائل بهینه‌سازی اصلی که بهینه‌سازی عملیاتی در سیستم یا فرآیند را نمایش می‌دهند، استفاده می‌شود.

مهمترین نکته این است که انتخاب صحیح بین سطح بالا و پایین به توجه به هدف کلی مسئله بهینه‌سازی و مدل‌های مورد استفاده در هر سطح اهمیت دارد تا بتوان بهینه‌سازی مناسبی انجام داد.

۲. ۱. مسئله سطح بالایی

در این مطالعه، مسئله سطح بالایی برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه در حضور منابع انرژی و برنامه مدیریت سمت تقاضا مورد تمرکز قرار گرفته است. به این منظور، در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی اعداد صحیح مختلط با برنامه‌ریزی درجه دوم ارائه شده که منابع ذخیره‌سازی انرژی، برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، تولیدات پراکنده و منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظر می‌گیرد. تابع چند هدفه ارائه شده برای مسئله سطح بالایی در رابطه (۱–الف) نشان می‌دهد که چهار عبارت باید به حداقل رسیده شوند. این عبارت‌ها به کاهش هزینه تلفات انرژی، کاهش هزینه خرید انرژی از شبکه بالا دست، کاهش قطع توان بار حقیقی و راکتیو ریزشبکه اشاره نمود، در اینجا رابطه (۱–الف) نشانگر تصمیمات بهره‌بردار برای بهینه‌سازی ریزشبکه می‌باشد. در اینجا تابع چند هدفه با استفاده از روش ضرایب وزنی نیز تعریف شده است. همانطور که مشاهده می‌شود w نشان‌دهنده وزن هر تابع می‌باشد. در این مقاله به دلیل برابر در نظر گرفتن اهمیت هر یک از توابع ضرایب وزنی نیز به صورت برابر در نظر گرفته شده است. معادلات (۱–ب) و (۱–پ) به ترتیب تعادل توان اکتیو و راکتیو را در ریزشبکه نشان می‌دهند، این معادلع تضمین برقراری تعادل بین بارهای ریزشبکه و سایر تولیدات موجود در ریزشبکه در هر باس می‌باشد. معادلات (۱–ت) و (۱–ث) به ترتیب حد کل بارهای اکتیو و راکتیو تغییر یافته در ریزشبکه را در برنامه مدیریت سمت تقاضا نشان می‌دهند، این معادلات تضمین می‌دهد که هیچگونه قطع باری پس از اجرای برنامه مدیریت سمت تقاضا در ریزشبکه وجود نداشته باشد. قیود (۱–ج) و (۱–چ) به ترتیب دامنه تغییرات بارهای اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد، این نامعادله‌ها حد بالا و پایین جابجایی بار را در برنامه مدیریت سمت تقاضا نشان می‌دهد. حدود جریان توان حقیقی و راکتیو خطوط به ترتیب با (۱–د) و (۱–ر) نشان داده شده است، این محدودیت‌ها تضمین می‌کند که در هر خط به

مقدار مجاز توان عبور کند. محدودیت ولتاژ گره ریزشبکه با (۱-س) نشان داده شده است، معمولا اندازه ولتاژ بین ۰.۹۵ الی ۱.۰۵ پریوینت در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ گره ریزشبکه طبق رابطه (۱-ص) به دست می‌آید، همانطور که مشاهده می‌شود این رابطه تقریب دقیقی از مدل غیرخطی محاسبه ولتاژ است که برای شبکه‌های توزیع استفاده می‌شود. حد بهره‌برداری تولید پراکنده با (۱-ط) نشان داده می‌شود، این معادله تضمین می‌کند که واحدهای تولید پراکنده در محدوده مجاز بهره‌برداری می‌شوند. محدودیت‌های شارژ و دشارژ باتری به ترتیب در روابط (۱-ع) و (۱-ف) نشان داده شده است، این روابط حد شارژ و دشارژ باتری را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که توان شارژ و دشارژ در محدوده مجاز باشد. وضعیت انرژی در باتری در رابطه (۱-ق) نشان داده شده است، این معادله سطح انرژی باتری را در هر ساعت نشان می‌دهد. معادله (۱-ک) محدودیت ظرفیت انرژی باتری را نشان می‌دهد، این معادله تضمین می‌کند کهسطح انرژی باتری از ظرفیت باتری فراتر نرود.

$$\min w_1 \sum_{b\in B}\sum_{h\in H} H \times r_b\left(f_{b,h}^{p\ 2}+f_{b,h}^{q\ 2}\right) + w_2\sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c_h^s\left(p_{n,h}^s+p_{n,h}^s\right) + w_3\sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c_h^p\left(d_{n,h}^p-D_{n,h}^p\right) + w_4\sum_{n\in N}\sum_{h\in H} c_h^q\left(d_{n,h}^q-D_{n,h}^q\right) \quad \text{(۱-الف)}$$

$$\sum_{nm\in N} f_{nm,h}^p-\sum_{mn\in N} f_{mn,h}^p+p_{n,h}^{dis}+P_{n,h}^r+P_{n,h}^{DG}-D_{n,h}^p-p_{n,h}^{ch}=0 \quad \text{(۱-ب)}$$

$$\sum_{nm\in N} f_{nm,h}^q-\sum_{mn\in N} f_{mn,h}^q+\rho P_{n,h}^r+\rho P_{n,h}^{DG}-D_{n,h}^q=0 \quad \text{(۱-پ)}$$

$$\sum_{n\in N} d_{n,h}^p=\sum_{n\in N} D_{n,h}^p \quad \forall h\in H \quad \text{(۱-ت)}$$

$$\sum_{n\in N} d_{n,h}^q=\sum_{n\in N} D_{n,h}^q \quad \forall h\in H \quad \text{(۱- ث)}$$

$$d_{n,h}^p-d_{n,h}^p\tau\le D_{n,h}^p\le d_{n,h}^p+d_{n,h}^p\tau \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ج)}$$

$$d_{n,h}^q-d_{n,h}^q\tau\le D_{n,h}^q\le d_{n,h}^q+d_{n,h}^q\tau \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-چ)}$$

$$-\overline{f}_{b,h}^p\le f_{b,h}^p\le\overline{f}_{b,h}^p \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-د)}$$

$$-\overline{f}_{b,h}^q\le f_{b,h}^q\le\overline{f}_{b,h}^q \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ر)}$$

$$0.9^2\le v_{n,h}\le 1.1^2 \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-س)}$$

$$v_{n,h}=v_{m,h}-2\left(r_b f_{b,h}^p+x_b f_{b,h}^q\right) \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ص)}$$

$$\underline{P}_n^{DG}\le P_{n,h}^{DG}\le\overline{P}_n^{DG} \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ط)}$$

$$\underline{p}_n^{ch} z_{n,h}\le p_{n,h}^{ch}\le\bar{p}_n^{ch} z_{n,h} \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ع)}$$

$$\underline{p}_n^{dis}\left(1-z_{n,h}\right)\le p_{n,h}^{dis}\le\bar{p}_n^{dis}\left(1-z_{n,h}\right) \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ف)}$$

$$e_{n,h}=e_{n,h-1}+p_{n,h}^{ch}\eta_n^{ch}-p_{n,h}^{dis}/\eta_n^{dis} \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ق)}$$

$$soc_n^{min}\overline{X}_n\le e_{n,h}\le soc_n^{max}\overline{X}_n \quad \forall h\in H, n\in N \quad \text{(۱-ک)}$$

معادلات (۱-الف) الی (۱-ک) معادلات سطح بالایی را نشان می‌دهد که مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح می‌باشد. در بخش بعدی مسئله سطح پایینی معرفی می‌شود.

۲. ۲. مسئله سطح پایینی

در مسئله سطح پایینی، به حداکثر رساندن قطعی منابع انرژی 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 پایین در (۲-الف) نشان داده شده است. محدودیت بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در

(۲–ب) نشان داده شده است. در اینجا α_n متغیر باینری مربوط به وضعیت منابع انرژی تجدیدپذیر است. اگر α_n برابر با ۱ باشد، انرژی تجدیدپذیر فعال است، در غیر این صورت، از ریزشبکه جدا می‌شود. A تعداد خاموشی واحدهای منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. در این مقاله طبق معادله (۲–ج) 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 به شکل روابط (۲–الف) تا (۲–ج) است.

$$\max \sigma_s \sum_{n\in N}\sum_{h\in H}\sum_{s\in S} p^r_{n,h,s} - P^r_{n,h} \quad \text{(۲– الف)}$$

$$0 \le P^r_{n,h} \le p^r_{n,h,s}\alpha_n \ \forall h \in H, n \in N, s \in S, \alpha_n \in \{0,1\} \quad \text{(۲–ب)}$$

$$\sum_{n\in N} \alpha_n = A \quad \text{(۲–ج)}$$

در نهایت مدل بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی به شکل روابط (۱) تا (۲) می‌باشد. روش حل مدل دو سطحی پیشنهادی در بخش بعدی توضیح داده شده است.

۲. ۳. الگوریتم پیشنهادی

در این بخش روش حل بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی شرح داده می‌شود. مسئله بهینه‌سازی چند هدفه دو سطحی زیر را در نظر بگیرید.

مسئله سطح بالایی:

$$\boldsymbol{\min f(x,y)} \quad (۳)$$

s. t.

$$\boldsymbol{g(x,y) \le 0} \quad (۴)$$

مسئله سطح پایینی:

$$\boldsymbol{\max h(x,y)} \quad (۵)$$

s. t.

$$\boldsymbol{p(x,y) \le 0} \quad (۶)$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم برای مسئله سطح بالایی، y بردار متغیرهای تصمیم برای مسئله سطح پایینی است، و $p(x,y)$و$g(x,y)$ محدودیت‌های سطوح بالایی و پایینی به ترتیب هستند. برای حل این مسئله با استفاده از یک الگوریتم تکاملی، می‌توانیم از نسخه اصلاح شده الگوریتم NSGA-II استفاده کنیم که یک الگوریتم محبوب برای حل مسائل بهینه–سازی چند هدفه است. که نحوه حل به شرح زیر می‌باشد.

۱– مقداردهی اولیه: ما با ایجاد یک جمعیت اولیه از راه حل‌های کاندید به طور تصادفی شروع می‌کنیم. هر راه حل کاندید یک جفت $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ است، که در آن $\boldsymbol{x}$ بردار متغیرهای تصمیم برای مسئله سطح بالایی و $\mathbf{y}$ بردار متغیرهای تصمیم برای مسئله سطح پایینی است. فرض کنید $\boldsymbol{N}$ اندازه جمعیت باشد. سپس، می توانیم بنویسیم:

$$\boldsymbol{P} = \{(\boldsymbol{x_1},\boldsymbol{y_1}),(\boldsymbol{x_2},\boldsymbol{y_2}),\dots,(\boldsymbol{x_N},\boldsymbol{y_N})\} \quad (۷)$$

۲– ارزیابی برازندگی: ما برازندگی هر راه حل کاندید را با حل مسئله سطح پایینی برای هر راه حل کاندید با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ارزیابی می‌کنیم. فرض کنید $\boldsymbol{L(x,y)}$ راه حل سطح پایینی برای راه حل کاندید $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ باشد. سپس، از $\boldsymbol{L(x)}$، برای ارزیابی برازندگی $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ با توجه به اهداف سطح بالایی که با $(\boldsymbol{f(x,y)})$ نشان داده می‌شوند، استفاده می‌کنیم. به طور خاص، ما جبهه پارتو اهداف سطح بالایی را برای هر راه حل کاندید با استفاده از الگوریتم NSGA-II محاسبه می‌کنیم. فرض کنید $\boldsymbol{S(x,y)}$ مجموعه‌ای از راه حل‌ها در جبهه پارتو برای $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ باشد. سپس، می‌توانیم بنویسیم:

$$\boldsymbol{L(x,y)} = \boldsymbol{argmax}\{\boldsymbol{h(x,y)} : \boldsymbol{p(x,y)} \le \boldsymbol{0}\} \quad (۸)$$

$$\boldsymbol{S(x,y)} = \boldsymbol{Pareto\ front\ of}\ \{\boldsymbol{f(x,y,L(x,y))}\}$$

۳– مرتب‌سازی غیرمسلط: ما یک مرتب‌سازی غیرمسلط جمعیت را برای شناسایی راه‌حل‌هایی انجام می‌دهیم که هیچ

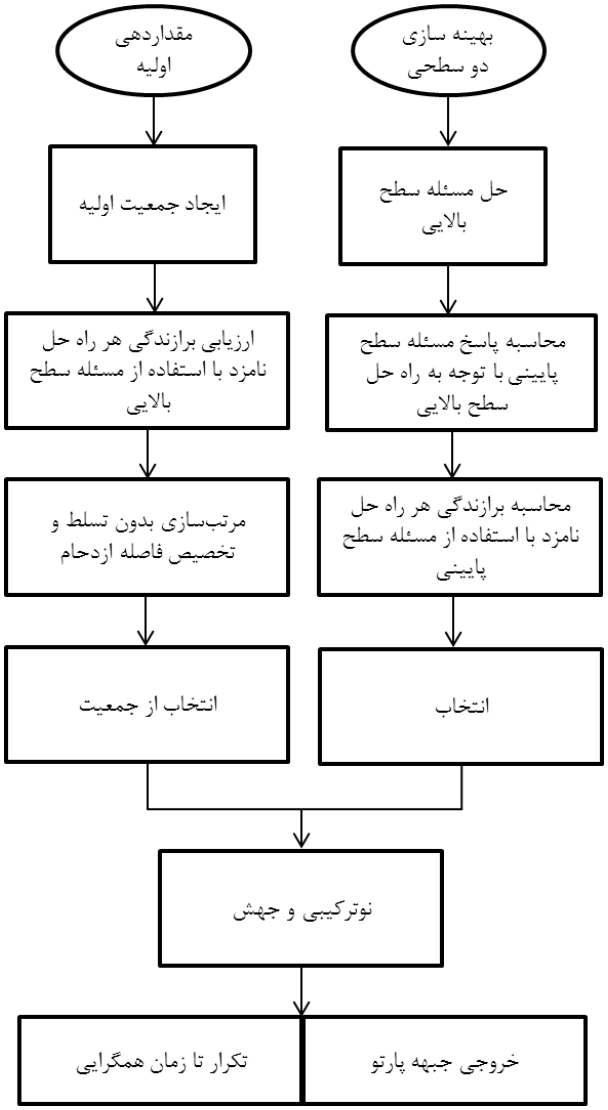
راه‌حل دیگری در جمعیت بر آن‌ها غالب نیست. ما هر راه‌حل را به یک جبهه اختصاص می‌دهیم، که در آن جبهه ۱ شامل راه‌حل‌های غیرمسلط، جبهه ۲ حاوی راه‌حل‌هایی است که تنها راه‌حل‌های جبهه ۱ بر آن‌ها غالب هستند و غیره. عدد جلوی جواب کاندید $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ را به صورت $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ نشان می‌دهیم.

۴- تخصیص فاصله ازدحام: ما برای حفظ تنوع به هر راه حل در هر جبهه یک اندازه‌گیری فاصله ازدحام اختصاص می‌دهیم. اندازه‌گیری فاصله ازدحام به عنوان مجموع فواصل بین راه حل‌های مجاور در امتداد هر هدف محاسبه می‌شود. فرض کنید $\boldsymbol{d}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{x}',\boldsymbol{y}')$فاصله بین راه حل‌های نامزد $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ و $(\boldsymbol{x}',\boldsymbol{y}')$در امتداد هر هدف باشد. سپس، می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم که در آن $\boldsymbol{k}$ شاخص هدف است:

$$\boldsymbol{d}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{x}',\boldsymbol{y}') = \boldsymbol{sum_k}\,(\boldsymbol{f_k}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \boldsymbol{f_k}(\boldsymbol{x}',\boldsymbol{y}')) \,/\, (\boldsymbol{max_k}\,\boldsymbol{f_k}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) - \boldsymbol{min_k}\,\boldsymbol{f_k}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})) \quad (۹)$$

۵- انتخاب: ما با انتخاب راه حل‌ها از جبهه‌ها بر اساس رتبه غیر غالب و فاصله ازدحام جمعیت جدیدی از راه حل‌های نامزد ایجاد می‌کنیم. به طور خاص، ما راه‌حل‌ها را از جبهه ۱ انتخاب می‌کنیم تا جمعیت کامل شود، و اطمینان حاصل می‌کنیم که جمعیت دارای مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های غیرمسلط است.

۶- عملگرهای ژنتیکی: ما عملگرهای ژنتیکی (به عنوان مثال، متقاطع و جهش) را برای جمعیت جدید اعمال می‌کنیم تا راه حل‌های نامزد جدید ایجاد کنیم. عملگرهای ژنتیکی با احتمال خاصی اعمال می‌شوند که می‌توان آن را برای تعادل تنظیم کرد.



شکل (۱): فلوچارت رویکرد پیشنهادی

در فلوچارت بالا، کادر "بهینه‌سازی دوسطحی" نشان‌دهنده مسئله بهینه‌سازی دو سطحی است که باید حل شود. روابط ریاضی بین مراحل مختلف و مسئله بهینه‌سازی دوسطحی به شرح زیر است:

-مقداردهی اولیه: جمعیت راه حل‌های کاندید را برای الگوریتم تکاملی اولیه کنید.

-ایجاد جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از راه حل‌های نامزد برای مسئله سطح بالایی ایجاد کنید.

-حل مسئله سطح بالایی: از مسئله سطح بالایی برای ارزیابی برازندگی راه حل‌های نامزد با حل مسئله سطح بالایی برای هر راه حل نامزد استفاده کنید.

-پاسخ مسئله سطح پایینی را با توجه به راه حل سطح بالایی محاسبه کنید: از راه حل سطح بالایی برای محاسبه پاسخ مسئله سطح پایینی برای هر راه حل نامزد استفاده کنید.

-مرتب‌سازی غیر غالب و تخصیص فاصله ازدحام: راه‌حل‌های نامزد را به مجموعه‌های غیرمسلط مرتب کنید و به هر راه‌حل در هر مجموعه فواصل ازدحام اختصاص دهید.

-برازش هر راه حل نامزد را با استفاده از مسئله سطح پایینی محاسبه کنید: از پاسخ مسئله سطح پایینی برای محاسبه برازندگی هر راه حل نامزد استفاده کنید.

-انتخاب از جمعیت: راه حل‌های نامزد برای نسل بعدی جمعیت را با استفاده از انتخاب جمعیت انتخاب کنید.

-نوترکیبی و جهش: با استفاده از عملگرهای ژنتیکی، مانند متقاطع و جهش، راه حل‌های کاندید جدیدی برای نسل بعدی ایجاد کنید.

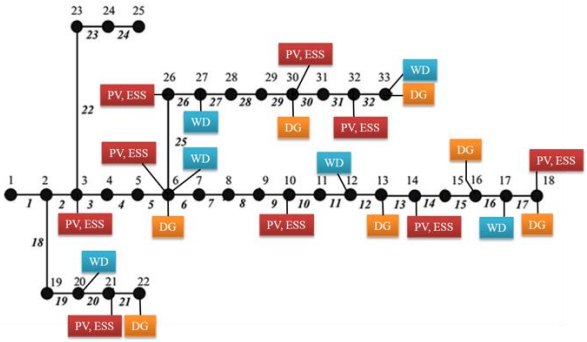
-تکرار تا همگرایی: مراحل بالا را تا زمان همگرایی تکرار کنید، یعنی تا زمانی که جبهه پارتو مسئله به اندازه کافی به خوبی بررسی شود.

-خروجی پارتو: خروجی جبهه پارتو مسئله، که شامل مجموعه‌ای از راه حل‌های غیر غالب است که مبادله بین اهداف مختلف مسئله را نشان می دهد.

در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

۳. نتایج عددی

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 گره‌های ۶، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۲۲، ۳۰ و ۳۳ نصب شده است. سیستم ذخیره انرژی و منابع PV به ترتیب در گره‌های ۳، ۶، ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۱، ۲۶، ۳۰ و ۳۲ و همچنین منبع بادی به ترتیب در گره‌های ۶، ۱۲، ۱۷، ۲۰، ۲۷ و ۳۳ قرار دارند. شکل (۲) شماتیک ریزشبکه پیشنهادی را نشان می دهد. محل هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی به همراه منابع فتوولتائیک در این شکل نشان داده شده است. سیستم‌های ذخیره انرژی از نوع لیتیوم با راندمان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. حداکثر توان شارژ و دشارژ ۱۰۰ کیلو وات و حداکثر ظرفیت باتری ۵۰۰ کیلووات ساعت است. انرژی اولیه باتری در ساعت اول برابر با ۲۰ کیلو وات در نظر گرفته می شود. حداقل و حداکثر SOC باتری ۱۰ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. حداکثر توان منابع تولید پراکنده ۱۰۰۰ کیلو وات و ضریب توان ۰.۸۵ می باشد. حداکثر ظرفیت منابع تجدیدپذیر بادی ۵۰۰ و فتوولتائیک برای هر واحد ۲۰۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): ریزشبکه ۳۳ باس پیشنهادی

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: بدون قطع منابع انرژی تجدیدپذیر.

مورد دوم: قطعی یک واحد انرژی تجدیدپذیر PV و یک واحد بادی.

مورد سوم: قطعی دو واحد انرژی تجدیدپذیر PV و دو واحد بادی.

مورد سوم: قطعی سه واحد انرژی تجدیدپذیر PV و سه واحد بادی.

جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی ها را در موارد مختلف در نظر گرفته نشان می‌دهد. به طور خلاصه، مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی در برابر بدترین موارد قطع منابع تجدیدپذیر مقاوم بوده است به طوری که در هیچ یک از موارد مورد مطالعه ریزش بار رخ نداده است. با توجه به نتایج جدول (۲)، تأثیر بدترین سناریوی قطع منابع تجدیدپذیر بر تلفات انرژی و ولتاژ گره‌ها و خرید انرژی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد بهینه

ریزشبکه در مسئله سطح بالایی باعث عدم قطع بار بـا مـدیریت بهینه شده است.

در حالت اول که محدودیتی در قطعی منابع انـرژی تجدیدپـذیر وجود ندارد، اتلاف انرژی برابر با ۰.۱۴۸ مگاوات و کمترین ولتاژ شبکه برابر با ۰.۹۷۵ p.u است. خرید انرژی برابر ۰.۷۷ مگـاوات می‌باشد.

در حالـت دوم، یـک واحـد PV و منـابع تجدیدپـذیر بـادی از ریزشبکه جدا می‌شوند. همانطور که مشاهده می شود، بر اسـاس مدل پیشنهادی، بدترین حالت قطـع منـابع تجدیدپـذیر در ایـن مورد برای PV برابر با گره ۱۸ و برای انرژی باد برابر با گره ۲۷ است. اتلاف انرژی، در این مـورد. ، برابـر بـا ۰.۱۵۰ مگـاوات و کمترین ولتاژ شبکه برابر با ۰.۹۷۴ p.u است.

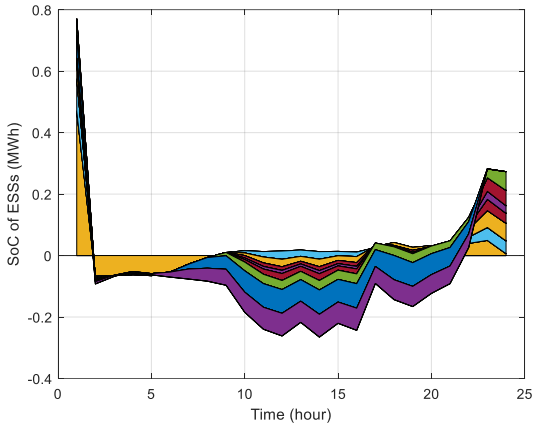
در حالـت سـوم، دو واحـد PV و منـابع تجدیدپـذیر بـادی از ریزشبکه جدا می‌شوند. همانطور که مشاهده می شود، بر اسـاس مدل پیشنهادی، بدترین حالت قطـع منـابع تجدیدپـذیر در ایـن حالت برای PV برابر با گره های ۱۰ و ۱۸ و بـرای انـرژی بـاد برابر با گره های ۲۷ و ۳۳ است. تلفات انرژی در این حالت برابر با ۰/۱۵۶ مگاوات و کمترین ولتـاژ شـبکه برابـر بـا ۰/۹۷۴ p.u است. انرژی خریداری شده در این حالت برابر بـا ۰.۸۶ مگـاوات برای یک دوره ۲۴ ساعته می‌باشد.

در حالـت چهـام، سـه واحـد PV و منـابع تجدیدپـذیر بـادی از ریزشبکه جدا می‌شوند. همانطور که مشاهده می شود، بر اسـاس مدل پیشنهادی، بدترین حالت قطـع منـابع تجدیدپـذیر در ایـن حالت برای PV برابر با گره های ۱۰ و ۱۸و۲۶ و برای انرژی باد برابر با گره های ۶ و ۲۷ و ۳۳ است. تلفات انرژی در این حالـت برابر با ۰/۱۶۱ مگاوات و کمترین ولتـاژ شـبکه برابـر بـا ۰/۹۷۳ p.u است. انرژی خریداری شـده در ایـن حالـت برابـر بـا ۰.۹۲ مگاوات برای یک دوره ۲۴ ساعته می‌باشد.

جدول (۲) مقایسه نتایج تعداد قطعی‌های منابع تجدیدپذیر در ریزشبکه ۳۳ گرهی

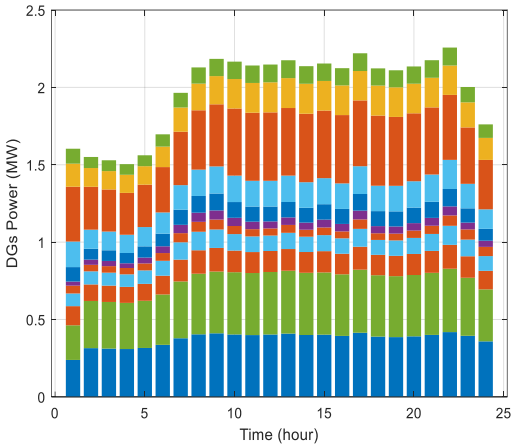
	مورد اول	مـورد دوم	مـورد سوم	مـورد چهارم
خرید انـرژی (مگـاوات ساعت)	۰.۷۷	۰.۸۱	۰.۸۶	۰.۹۲
تلفات انرژی (مگـاوات ساعت)	۰.۱۴۸	۰.۱۵۰	۰.۱۵۶	۰.۱۶۱
کمترین ولتاژ (پریونیت)	۰.۹۷۵	۰.۹۷۴	۰.۹۷۴	۰.۹۷۳
قطع بار (مگاوات)	۰	۰	۰	۰
قطع PV (گره)	–	۱۸	۱۰– ۱۸	۱۰– ۱۸–۲۶
قطع منبع بادی (گره)	–	۲۷	۲۷– ۳۳	۲۷– ۶– ۳۳
زمان حل مسئله (ثانیه)	۱۲	۴۸	۶۲	۷۲

در نهایت، نتایج شبیه‌سازی نشان داد کـه بـا توجـه بـه بـدترین قطعی منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، ریزشبکه با مدل پیشـنهادی از انعطاف‌پـذیری بـالایی برخـوردار بـوده و در هیچ‌یـک از قطعی‌های منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش بار رخ نـداده اسـت. نتایج نشان می‌دهـد کـه مـدل و روش پیشـنهادی می‌توانـد در بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با احتمال بدترین قطعی منابع انـرژی تجدیدپذیر مؤثر باشد.

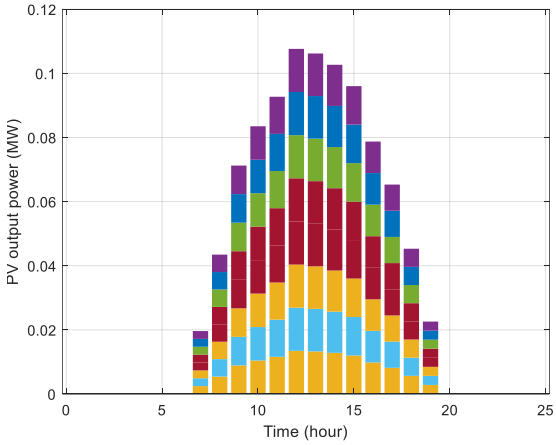


شکل (۳): شارژ و تخلیه بهینه سیستم های ذخیره انرژی در حالت اول

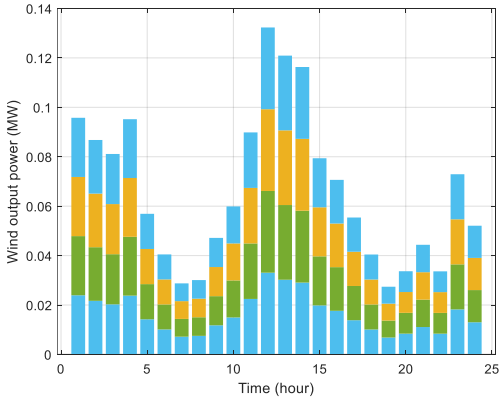
شکل (۳) شارژ و دشارژ بهینه باتری ها را نشان می دهد. محـور منفی عمودی نشان دهنده شارژ و محور مثبـت عمـودی نشـان دهنده تخلیه باتری ها است. همانطور که به نظر می رسد، اکثـر باتری ها در ساعات اولیه که انرژی ارزان است و در ساعات اوج مصرف تخلیه می شوند، شارژ می شوند. مشاهده می شـود کـه همه باتری های موجود در ریزشبکه رفتار یکسانی دارنـد، فقـط توان شارژ و دشارژ آنها متفاوت است.



شکل (۴): تولید واحدهای DG در مورد اول

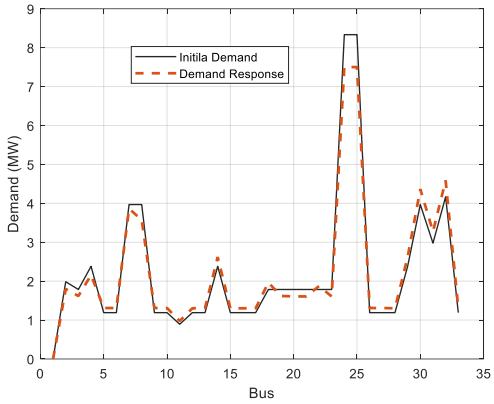


شکل (۵): تولید PV در حالت اول

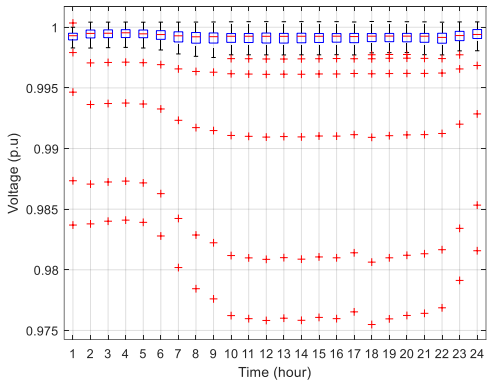


شکل (۶): تولید باد در حالت اول

شکل (۵) و (۶) به ترتیب تولید واحدهای PV و بـاد را در طـول روز نشان می دهد. در این شکل ها تولید هر واحد PV یا باد بـا رنگ متفاوتی نشان داده شده اسـت. همـانطور کـه مـی بینیـد، واحدهای PV فقط از ساعت ۶ صبح تا ۷ بعد از ظهر تولید مـی کنند. به همـین ترتیـب بیشـترین تولیـد در واحـدهای بـادی از ساعت ۱۱ صبح تا ۱۴ و کمترین میزان تولید از ساعت ۶ صـبح تا ۱۰ صبح و ۱۹ تا ۲۲ است. لازم به ذکر است که ایـن میـزان تولید برای واحدهای PV و بادی بـر اسـاس بـدترین سـناریوی تولید PV و منابع بادی است.



شکل (۷): مقایسه بین بارهای اولیه شبکه و بارهای اصلاح شده در حالت اول



شکل (۸): نمودار باکس تغییرات اندازه ولتاژ باس شبکه توزیع در طول روز در حالت اول

شکل (۷) مقایسه بین بارهای اولیه شبکه و بارهای تغییـر یافتـه در برنامه مدیریت سمت تقاضا را نشان می دهـد. همـانطور کـه مشاهده می شود در برنامه مدیریت سمت تقاضا پیک بار کاهش یافته و به ساعات غیر پیک منتقل شده است. در اینجا، منحنـی آبی بار تغییر یافته را در برنامه مدیریت سمت تقاضا نشـان مـی دهد، و منحنی نارنجی، بار اولیه ریزشبکه (بـدون تغییـر) اسـت.

این شکل عملکرد دقیق مدیریت سمت تقاضا را در کاهش پیک ریزشبکه نشان می دهد. در نهایت شکل (۸) ولتاژ باس های شبکه توزیع را در هر ساعت نشان می دهد. مشاهده می شود که بیشتر تغییرات ولتاژ در محدوده (۰.۹۹۶ تا ۱ **p.u**) است. این نشان می دهد که در مدل پیشنهادی، ولتاژ شبکه توزیع به خوبی در محدوده مجاز حفظ می شود.

در اینجا به منظور نشان دادن برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها جدول (۳) ارائه شده است. در این مقاله الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌های مشابه نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد روش پیشنهادی با روش تبدیل معادلات به **KKT** و روش تجزیه و بازفرمولنویسی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی در تمامی موارد نسبت به روش **KKT** و تجزیه برتری دارد. به طوری که خرید انرژی و تلفات کمترین مقدار را نسبت به روش‌های دیگر دارد. نکته دیگری که از این جدول می‌توان مشاهده نمود این است که، مدت زمان حل مسئله در روش پیشنهادی بسیار سریع‌تر از سایر روش‌های موجود است، که میتواند برای ریزشبکه‌های بزرگتر به کار برده شود.

جدول (۳) مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های موجود

	الگوریتم پیشنهادی	روش KKT	روش تجزیه
خرید انرژی (مگاوات ساعت)	۰.۷۷	۰.۷۹	۰.۷۸
تلفات انرژی (مگاوات ساعت)	۰.۱۴۸	۰.۱۵۰	۰.۱۴۹
کمترین ولتاژ (پریونیت)	۰.۹۷۵	۰.۹۷۲	۰.۹۷۴
زمان حل مسئله (ثانیه)	۱۲	۷۲	۲۳۱

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل دو سطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم اعداد صحیح مختلط (MIQP) برای عملکرد بهینه ریزشبکه‌ها در بدترین حالت قطع منابع انرژی تجدیدپذیر، که در مسئله سطح بالایی به حداقل رساندن اتلاف انرژی است، پیشنهاد شد. در مسئله سطح پایینی به حداکثر رساندن قطع منابع انرژی تجدیدپذیر مدلسازی شد. در سطح پایینی، بدترین تحقق انرژی های تجدیدپذیر و در سطح بالایی، بهره برداری بهینه از شبکه توزیع در بدترین حالت تحقق منابع تجدیدپذیر محقق می شود. یک روش مبتنی بر الگوریتم تکاملی ژنتیک غیر غالب برای حل مدل دو سطحی پیشنهادی در نظر گرفته شده است که از روش‌های مشابه قابل اعتمادتر است. ریزشبکه ۳۳ گرهی برای تحلیل مدل و روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است که دقت و عملکرد بهینه مدل و روش پیشنهادی را به اثبات رساند. به طور خلاصه، نتایج پس از شبیه‌سازی حالت‌های مختلف قطع منابع انرژی تجدیدپذیر نشان داد که:

الف) مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن بدترین حالت قطع منابع تجدیدپذیر، که منجر به کاهش آسیب‌پذیری سیستم (کاهش بار) می‌شود.

ب) با توجه به اینکه مدل پیشنهادی یک مدل بهینه‌سازی ریاضی از نوع MIQP است، بنابراین، راه‌حل‌های بهینه سراسری توسط الگوریتم پیشنهادی تضمین می‌شوند.

ج) با توجه به زمان کوتاه حل مسئله می توان از آن برای شبکه های بزرگتر و آنلاین استفاده کرد.

برای ادامه این مطالعه موارد زیر نیز توصیه می شود.

۱) در نظر گرفتن یک مدل چند سطحی برای بررسی تأثیر قطع منابع انرژی تجدیدپذیر در سطح ریزشبکه های چند منطقه ای؛

۲) در نظر گرفتن شبکه گاز و مدل سازی سیستم های توان به گاز (P2G) برای بررسی تبدیل انرژی مازاد به گاز و فروش به شبکه گاز طبیعی.

منابع

Zhao. Z, et al., (2022) "Distributed Robust Model Predictive Control-Based Energy Management Strategy for Islanded Multi-Microgrids Considering Uncertainty," IEEE Transactions on Smart Grid, 13(3), pp. 2107-2120.

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

Khoubseresht, O., Rajabinezhad, M., Mousazadeh Mousavi, S.Y., (2023) “An analytical optimum method for simultaneous integration of PV, wind turbine and BESS to maximize technical benefits”, IET Gener. Transm. Distrib. 00, 1– 21.

Bui. V, Hussain. A, Im. Y, Kim. H, (2019) “An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids,” Applied Energy, 239, pp. 536-548.

Bui. V. -H, Hussain. A and Kim. H. -M, (2018) “A Multiagent-Based Hierarchical Energy Management Strategy for Multi-Microgrids Considering Adjustable Power and Demand Response,” IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), pp. 1323-1333.

Karimianfard. H and Haghighat. H, (2019) "Generic Resource Allocation in Distribution Grid," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34(1), pp. 810-813.

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

Zhang. Z, Wang. Z, Wang. H, Zhang. H, Yang. W, and Cao. R, (2021) "Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm," IEEE Access, 9, pp. 15520-15529.

Yuan. W, Wang. Y, and Chen. Z, (2021) "New Perspectives on Power Control of AC Microgrid Considering Operation Cost and Efficiency," IEEE Transactions on Power Systems, 36(5), pp. 4844-4847.

Li. Z, Wu. L, Xu. Y, Moazeni. S, and Tang. Z, (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, 13(1), pp. 213-226.

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

Hosseini. S. M, Carli. R, and Dotoli. M, (2021) "Robust Optimal Energy Management of a Residential Microgrid Under Uncertainties on Demand and Renewable Power Generation," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 18(2), pp. 618-637.

Shokouhmand. E, Ghasemi. A, (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, 32, 100929.

Fallahi. F, Yildirim. M, Lin. J, and Wang. C, (2021) "Predictive Multi-Microgrid Generation Maintenance: Formulation and Impact on Operations & Resilience," IEEE Transactions on Power Systems, 36(6), pp. 4979-4991.

Kheradmand. S. S, Haghpanah. R, Yazdi. M. B, and Farsangi, M. M, (2021) "Two Mixed Logical Dynamical Real-Time Receding Horizon Control Schemes for Microgrids Operation Optimization," 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, pp. 302-306.

Pan. M, Xing. Q, Chai. Z, Zhao. H, Sun. Q, Duan. D, (2023) “Real-time digital twin machine learning-based cost minimization model for renewable-based microgrids considering uncertainty,”Solar Energy, 250, pp: 355-367.

Karimianfard. H, Salehizadeh. M. R, and Siano. P, (2022) "Economic Profit Enhancement of a Demand Response Aggregator Through Investment of Large-scale Energy Storage Systems," CSEE

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

Mehrasa. M, Sheikholeslami. A, Rezanejad. M, Alipoor. J, (2023) “Inertia augmentation-based optimal control strategy of a weak grid-connected microgrid with PV unit and energy storage system,” Journal of Energy Storage, 62, 106874.

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

Nguyen. T. -T, Dao. T. -K, Nguyen. T. -T. -T and Nguyen. T. -D, (2022) "An Optimal Microgrid Operations Planning Using Improved Archimedes Optimization Algorithm," IEEE Access, 10, pp. 67940-67957.

Akulker. H, Aydin. E, (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.

Harasis. S, Sozer. Y, and Elbuluk. M, (2021) "Reliable Islanded Microgrid Operation Using Dynamic Optimal Power Management," IEEE Transactions on Industry Applications, 57(2), pp. 1755-1766.

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

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

Journal of Power and Energy Systems, 8(5), pp. 1468-1476.

Fan. Z, Fan. B, Peng. J and Liu. W, (2021) "Operation Loss Minimization Targeted Distributed Optimal Control of DC Microgrids," IEEE Systems Journal, 15(4), pp. 5186-5196.

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

K-bidi. F, Damour. C, Grondin. D, Hilairet. M, Benne. M, (2022) “Multistage power and energy management strategy for hybrid microgrid with photovoltaic production and hydrogen storage,” Applied Energy, 323, 119549.

Lee. J, Lee. S, and Lee. K, (2021) "Multistage Stochastic Optimization for Microgrid Operation Under Islanding Uncertainty," IEEE Transactions on Smart Grid, 12(1), pp. 56-66.

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

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

Hai, T., Alazzawi, A. K., Zhou, J., and Muranaka, T. (2023). "Optimal Energy Scheduling of Microgrid With Electric Vehicles Based on Electricity Market Price." ASME. J. Energy Resour. Technol, 145(6), 061301.

Wang. C, Wang. A, Chen. S, Zhang. G and Zhu. B, (2022) "Optimal Operation of Microgrids Based on a Radial Basis Function Metamodel," IEEE Systems Journal, 16(3), pp. 4756-4767.