



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 4(1):85-96

Energy Management in Microgrids Using Compensators, Energy Storage Systems, Demand Response, and Integration of Renewable Energies

Hamid Hematian¹, *Ph.D. Student*, Mohammad Tolou Askari¹, *Assistant Professor*, Meysam Amirahmadi¹, *Assistant Professor*, Mahmoud Samiei Moghaddam², *Assistant Professor*, Majid Babaeinik¹, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

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

Abstract:

This article examines the challenges of energy management in microgrids, considering the uncertainties associated with renewable energy sources, dynamic demand, and the presence of various devices such as batteries, distributed generation sources, and electric vehicles. The article introduces a complex optimization model designed for microgrid operations. This model focuses on mitigating the challenges of integrating power electronic generation units, managing demand within microgrids, and incorporating small-scale renewable energy sources. The goal of this model is to minimize various costs associated with energy losses, electricity purchases, load reduction, distributed generation operations, and battery costs over a 24-hour period. Simulations conducted on a test system demonstrate that the proposed model is effective, achieving up to a 20% reduction in microgrid operational costs. This approach provides an effective framework for enhancing the flexibility and efficiency of microgrid energy management, and the findings indicate that it outperforms comparative methods by a margin of at least 8%, demonstrating its effectiveness in improving critical indices in the microgrid system.

Keywords: Microgrid, Battery, Demand side management, Renewable energy sources.

Received: 24 March 2024

Revised: 03 June 2024

Accepted: 28 June 2024

Corresponding Author: Dr. Mohammad Tolou Askari, askari@iau.ac.ir

DOI:





مقاله پژوهشی

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

مدیریت انرژی ریزشبه‌ها با استفاده از جبران‌کننده‌ها، ذخیره‌سازها، پاسخ تقاضا و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر

حمید همتیان^۱، دانشجوی دکتری، محمد طلوع عسکری^۱، استادیار، میثم امیراحمدی^۱، استادیار، محمود سمیعی مقدم^۲، استادیار، مجید بابایی نیک^۱، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- گروه مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

چکیده: این مقاله به بررسی چالش‌های مدیریت انرژی در ریزشبه می‌پردازد، با توجه به عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع تجدیدپذیر، تقاضای پویا و وجود دستگاه‌های متنوع مانند باتری‌ها، منابع تولید توزیع‌شده، و وسایل نقلیه الکتریکی. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی پیچیده معرفی شده است که برای عملیات ریزشبه طراحی شده است. این مدل به کاهش چالش‌های ادغام واحدهای تولید الکترونیکی قدرت، مدیریت تقاضا در ریزشبه‌ها، و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس کوچک تمرکز دارد. هدف این مدل کاهش هزینه‌های مختلف مرتبط با تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، عملیات منابع تولید پراکنده، و هزینه باتری در ۲۴ ساعت است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی یک سیستم آزمایشی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی موثر بوده و تا ۲۰ درصد کاهش هزینه عملیاتی ریزشبه را داراست. این رویکرد یک چارچوب موثر برای تقویت انعطاف‌پذیری و افزایش کارایی مدیریت انرژی ریزشبه فراهم می‌کند، و یافته‌ها نشان می‌دهند که با حداقل حاشیه ۸ درصد، بهتر از روش‌های مقایسه‌ای عمل می‌کند و کارایی آن در افزایش شاخص‌های حیاتی در سیستم ریزشبه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبه، باتری، مدیریت سمت تقاضا، منابع انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸

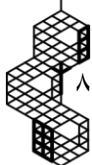
نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد طلوع عسکری، askari@iau.ac.ir

DOI:



چشم انداز انرژی جهانی در حال تغییری دگرگون کننده است و ریزشبهه ها به عنوان نقطه کانونی در پیگیری راه حل های انرژی پایدار، انعطاف پذیر و غیرمتمرکز ظاهر شده اند. ریزشبهه ها، سیستم های انرژی محلی و اغلب به هم پیوسته، یک راه امیدوارکننده برای برآوردن نیازهای در حال تحول جوامع، صنایع و زیرساخت های حیاتی هستند. با این حال، یکپارچه سازی و مدیریت موفق منابع انرژی متنوع در ریزشبهه ها چالش های بزرگی را ایجاد می کند که توسط عدم قطعیت های ذاتی مرتبط با منابع تجدیدپذیر، الگوهای نوسان تقاضا، و ادغام تعداد زیادی از دستگاه ها، از جمله باتری ها، منابع تولید توزیع شده، وسایل نقلیه الکتریکی تشدید می شود. و دستگاه های جبرانی در میان این چشم انداز پیچیده، این مقاله به دنبال رسیدگی به مسائل مبرمی است که مانع مدیریت بهینه انرژی ریزشبهه می شود. تمرکز اصلی به سمت توسعه یک مدل پیچیده بهینه سازی روز آینده است که به صراحت برای عملیات ریزشبهه^۱ (MG) طراحی شده است. این مدل برای هدایت و کاهش چالش های ناشی از ادغام واحدهای تولید مبتنی بر الکترونیک قدرت، ماهیت غیرقابل پیش بینی تقاضا در ریزشبهه ها و ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس کوچک طراحی شده است.

در [۱]، یک مدیریت توان دینامیکی تطبیقی^۲ (ADPM) و تئوری اجزای متقارن آنی پیشرفته^۳ (EISCT) برای رسیدگی به چالش ها در ریزشبهه های باتری PV-معرفی شده اند، و مسائلی مانند کیفیت ضعیف برق و ناپایداری شبکه را کاهش می دهند. در [۲]، یک چارچوب جریان توان هارمونیک بهینه^۴ (OHPF) برای برنامه ریزی روزانه یک ریزشبهه متصل به شبکه ارائه شده است که به مسائل کیفیت توان (PQ) ناشی از الکترونیک قدرت و بارگذاری نامتعادل می پردازد. در [۳]، یک بهینه سازی دو هدفه مبتنی بر چارچوب^۵ MINLP برای افزایش انعطاف پذیری ریزشبهه با استفاده از مفهوم توان به هیدروژن پیشنهاد شده است که عملیات مستقل را ممکن می سازد. در [۴]، یک چارچوب عملیات قوی قابل تنظیم کاملاً غیرمتمرکز برای شبکه های توزیع فعال با ریزشبهه های چندگانه (MMG)^۶ پیشنهاد شده است که به استقلال و ناهمگنی عوامل فردی می پردازد. در [۵]، یک رویکرد بازی Stackelberg برای به اشتراک گذاری انرژی ریزشبهه قوی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در انرژی تجدیدپذیر، سیستم های ذخیره سازی، و مصرف بار، پیشنهاد شده است. در [۶]، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) برای مکان یابی بهینه، انتخاب فناوری و عملکرد سیستم های ذخیره انرژی باتری^۷ (BESS) در ریزشبهه ها، با در نظر گرفتن تولید پراکنده متغیر و تقاضای انرژی با استفاده از روشی با Chu پیشنهاد شده است. الگوریتم ژنتیک موازی و بیضلی^۸ (PGLB). در [۷]، یک روش عملیات کم کربن برای ریزشبهه ها پیشنهاد شده است که به چالش انتشار کربن بالا با توجه به واحدهای جفت انرژی-کربن مانند ژنراتورهای توزیع شده و بارهای صنعتی می پردازد. در [۸]، نویسندگان یک رویکرد تخصیص بهینه خازن در ریزشبهه های جزیره ای با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)^۹ پیشنهاد کردند. در [۹]، نویسندگان یک استراتژی عملیات اقتصادی کم کربن برای ریزشبهه های انرژی یکپارچه چندگانه (IEMS) بر اساس یک مدل بازی دولایه Stackelberg پیشنهاد کردند. در [۱۰]، نویسندگان یک چارچوب اصلاحی زمان بندی مبتنی بر داده ها را برای عملکرد ریزشبهه های ایزوله تحت سلطه منابع تجدیدپذیر که با ذخیره سازی باتری فصلی ترکیبی یکپارچه شده اند، توسعه دادند. در [۱۱]، نویسندگان یک مدل عملیات اقتصادی کم کربن نظیر به نظیر (P2P)^{۱۰} چند ریزشبهه ای را بر اساس تئوری چانه زنی نش با در نظر گرفتن هماهنگی سه شکل انرژی (الکتریسیته، گرما و گاز)، عدم قطعیت در هر دو ایجاد کردند. طرف منبع و بار، و اهداف عملیات کم کربن. در [۱۲]، یک مدل دو مرحله ای از نظر توزیع قوی برای طراحی و بهره برداری بهینه سیستم های چند ریزشبهه جزیره ای (MMG) با استفاده از روش مبتنی بر تولید ستون و محدودیت (CCG)^{۱۱} پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۳]، استفاده پیشنهادی از پلت فرم های دیجیتال برای خودکارسازی ارزیابی قابلیت اطمینان ریزسیستم ها در حوزه فناوری های انرژی مدرن شامل استفاده از روش های یادگیری ماشین با دو الگوریتم است که برای تجزیه و تحلیل شاخص های رژیم و ارزیابی قابلیت اطمینان طراحی شده اند. در [۱۴]، یک مدل محدب مبتنی بر داده برای عملکرد ریزشبهه های هیبریدی AC/DC (HMs) با مبدل های دو طرفه (BDCs) با استفاده از روش تقریب حداقل مربعات با توابع وزن مبتنی بر داده برای خطی کردن رفتار بازده BDC پیشنهاد شده است. در [۱۵]، یک رویکرد برنامه ریزی و بهره برداری ریزشبهه اختصاصی، به ویژه برای پشتیبانی از یک شبکه توزیع (DN) با ذخیره سازی هیدرولیک پمپ شده (PHS) پیشنهاد شده است. در [۱۶]، یک مدل بهینه سازی توان ریزشبهه متصل به شبکه مبتنی بر ادغام ریزشبهه و وسایل نقلیه الکتریکی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام چند ذره متقاطع تطبیقی (ACM-PSO) پیشنهاد شده است. در [۱۷]، پتانسیل ناشناخته ریزشبهه های چند انرژی (MEMG) به عنوان نیروگاه های مجازی (VPP) در بازارهای





خدمات کمکی (AS) با استفاده از تئوری بازی Stackelberg و پاسخ تقاضای یکپارچه (IDR) پرداخته شده است. در [۱۸]، یک استراتژی مبتنی بر قیمت برای هماهنگی فنرهای الکتریکی (ES) در ریزشبه‌ها پیشنهاد شده است که بر مزایای اقتصادی بارهای هوشمند تمرکز دارد. در [۱۹]، یک رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه تصادفی برای عملکرد و هماهنگی بهینه‌ها (EHs)، منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)، و وسایل نقلیه الکتریکی پلاگین (PEVs) در ریزشبه‌های هوشمند ارائه شده است. در [۲۰]، ادبیات گسترده‌ای در مورد مدیریت انرژی سیستم‌های کنترل ریزشبه‌ها بررسی شده و چالش‌ها در کنترل کلی و عملیات پایدار مورد بحث قرار گرفته است. در [۲۱] الگوریتمی مبتنی بر تولید ستون و محدودیت برای حل مسائل بهینه‌سازی دو سطحی ارائه شده است. در [۲۲] از الگوریتم تولید ستون و محدودیت برای حل مسائل غیر قطعی در برنامه‌ریزی سیستم قدرت استفاده شده است. در [۲۳] و [۲۴] بهینه‌سازی مقاوم ریزشبه‌ها با در نظر گرفتن عوامل محیطی و شرایط آب و هوایی بررسی شده است. در [۲۵] یک مدیریت انرژی دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی ریزشبه‌ها تحت عدم قطعیت در بهره‌برداری ارائه شده است. در [۲۶] یک مدیریت انرژی چند هدفه برای بهینه‌سازی ریزشبه‌های برقی حرارتی ارائه شده است. در [۲۷] یک مبدل دو ورودی جدید با کلیدزنی نرم برای سیستم‌های هیبرید انرژی سبز پیشنهاد شده است.

انگیزه مقاله در پرداختن به چالش‌های پیچیده مرتبط با مدیریت انرژی ریزشبه‌ها، به ویژه در زمینه مربوط به منابع تجدیدپذیر، الگوهای تقاضای پویا، و مجموعه متنوعی از دستگاه‌های موجود در ریزشبه‌ها، از جمله باتری‌ها، منابع تولید توزیع شده، و دستگاه‌های جبران‌ساز نهفته است. نویسندگان نیاز به یک مدل بهینه‌سازی پیچیده را که به طور خاص برای عملیات ریزشبه طراحی شده است، برجسته می‌کنند. نویسندگان بر اهمیت پرداختن به یک عملکرد چندهدفه که هدف آن به حداقل رساندن هزینه‌های مختلف مربوط به تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، عملیات DG و هزینه‌های مربوط به باتری‌ها در یک دوره ۲۴ ساعته است، تأکید می‌کنند. نویسندگان اثربخشی مدل پیشنهادی و الگوریتم راه‌حل خود را از طریق شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده بر روی یک سیستم آزمایشی تأیید می‌کنند. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل توجهی در هزینه عملیاتی ریزشبه‌ها است، که از این ادعا حمایت می‌کند که رویکرد پیشنهادی کارایی مدیریت انرژی ریزشبه‌ها را افزایش می‌دهد در حالی که یک چارچوب موثر برای تقویت انعطاف‌پذیری سیستم ریزشبه‌ها ارائه می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه بین روش و رویکرد این مقاله با سایر مطالعات پیشین

تجدید پذیر	بار واکنشی	پاسخ به تقاضا	جبران کننده	ESS	چند هدفه	مدل	مرجع
✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	این مطالعه
✓	✓	-	-	✓	-	NLP	[۱]
✓	✓	✓	-	✓	✓	MILP	[۲]
✓	✓	-	-	-	✓	MINLP	[۳]
✓	✓	-	-	✓	✓	MIQP	[۴]
✓	-	✓	-	✓	-	MINLP	[۵]
-	-	-	-	✓	✓	MINLP	[۶]
✓	✓	-	-	✓	-	MILP	[۷]
-	✓	✓	✓	-	-	NLP	[۸]
✓	-	-	-	✓	-	NLP	[۹]
✓	-	-	-	✓	-	NLP	[۱۰]
✓	-	-	-	-	-	MINLP	[۱۱]
✓	-	-	-	-	-	MILP	[۱۲]
✓	-	-	-	✓	-	NLP	[۱۳]
✓	✓	-	-	-	-	LP	[۱۴]
✓	-	-	-	✓	-	NLP	[۱۵]
✓	-	-	-	✓	✓	NLP	[۱۶]
✓	-	✓	-	✓	✓	NLP	[۱۷]
✓	-	✓	-	✓	✓	MINLP	[۱۸]
✓	-	✓	-	✓	✓	NLP	[۱۹]



جدول (۱) تطبیق پذیری مدل پیشنهادی را نشان می دهد که از سایر مطالعات از نظر پرداختن به چالش های مختلف و ترکیب طیف گسترده ای از اجزا برای عملکرد بهینه ریزشبهک بهتر عمل می کند.

این مقاله با پرداختن به یک شکاف تحقیقاتی خاص و پیشنهاد یک مدل بهینه سازی پیچیده، کمک قابل توجهی به حوزه عملیات ریزشبهک می کند. در اینجا مشارکت ها و توضیحات کلیدی آمده است:

- این مقاله یک فرمول دقیق برای مدیریت انرژی ریزشبهک پیشنهاد می کند که جنبه های مختلفی از جمله استفاده بهینه باتری، استفاده از جبران کننده، و توزیع استراتژیک منابع تولید پراکنده را پوشش می دهد.
- مدل پیشنهادی دارای یک تابع چند هدفه با هدف به حداقل رساندن هزینه های مختلف مربوط به تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، عملیات تولید پراکنده و هزینه های باتری/خودروی الکتریکی است. این نشان دهنده یک رویکرد جامع برای مدیریت انرژی ریزشبهک است.
- ساختار مدیریت انرژی ریزشبهک ها دقیقاً از طریق یک برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مدل سازی شده است. این نشان دهنده سطح بالایی از جزئیات و دقت در نمایش پیچیدگی های عملیات ریزشبهک است.

در بخش های بعدی این مقاله، مدل سازی پیشنهادی را ارائه می کنیم و سپس روش شناسی حل مسئله را توضیح می دهیم. متعاقباً نتایج شبیه سازی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهیم و در نهایت ضمن ارائه پیشنهادهایی برای جهت گیری های تحقیقاتی آینده، نتیجه گیری می کنیم.

۲- مدل بهینه سازی پیشنهادی

مسئله بهینه سازی ارائه شده بر مدیریت جامع انرژی ریزشبهک، با در نظر گرفتن عواملی مانند عملکرد بهینه باتری، استفاده از جبران کننده، و توزیع منابع تولید پراکنده (DG) متمرکز است. هدف عملکرد چند هدفه به حداقل رساندن هزینه های مرتبط با تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، عملیات DG و هزینه باتری در یک دوره ۲۴ ساعته است. این مدل معادلات و نابرابری های مختلفی را شامل می شود که نشان دهنده تعادل توان واقعی و راکتیو، محدودیت های استفاده از شبکه بالادستی، محدودیت های مدیریت سمت تقاضا، ملاحظات بار انعطاف پذیر، تنظیمات توان اکتیو و راکتیو، محدودیت های ولتاژ، مدل سازی سیستم ذخیره سازی انرژی، محدودیت های عملیاتی برای منابع تجدیدپذیر، محدودیت های خازن و راکتور شنت، و تنظیمات بهینه برای تغییر تپ در ترانس (OLTC) و تنظیم کننده ولتاژ مرحله (SVR). این فرمول همچنین برای کاهش بارهای فعال و راکتیو، محدودیت های نرخ شیب دار برای DG ها و مدل سازی بهینه برای شارژ و دشارژ باتری به حساب می آید.

در مسئله بهینه سازی ارائه شده، جنبه های مختلفی از مدیریت انرژی ریزشبهک در نظر گرفته شده است، از جمله شارژ و دشارژ باتری بهینه، استفاده موثر از جبران کننده، جبران کننده رگولاتور ولتاژ مرحله ای (SVR) و تغییر تپ ترانس OLTC، مدیریت منابع تولید پراکنده (DG). علاوه بر این، مدل تغییرات بار را در نظر می گیرد. تابع چند هدفه که توسط معادله (۱) تعریف شده است، به دنبال به حداقل رساندن چندین عامل است: هزینه تلفات انرژی در ۲۴ ساعت، هزینه های خرید برق از شبکه بالادست، هزینه های کاهش بار، هزینه های عملیات DG، و هزینه های عملیاتی باتری.

$$\begin{aligned} \min \sum_{nm \in B} \sum_{t \in T} c_t^{loss} R_{nm} (F_{nm,t}^p + F_{nm,t}^q) T + \sum_{t \in T} c_t^{sub} (P_t^{sub} + Q_t^{sub}) \\ + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{shed} (D_{n,t}^{p,shed} + D_{n,t}^{q,shed}) + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{DG} (P_{n,t}^{DG}) \\ + \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c_t^{ess} (P_{n,t}^{ess,ch} + P_{n,t}^{ess,dis}) \end{aligned} \quad (1)$$



جدول (۲): واژه‌نامه

مجموعه و شاخص	
N	مجموعه ای از گره های شبکه، نمایه شده توسط n .
B	مجموعه ای از خطوط شبکه، نمایه شده توسط nm .
T	مجموعه ای از ساعت در روز، نمایه شده توسط t .
M	مجموعه نرخ گام برای OLTC و SVR، نمایه شده توسط m .
Ω^{OLTC}	قرار دادن باس OLTC در سیستم قدرت.
Ω^{SVR}	قرار دادن باس SVR در سیستم قدرت.
	پارامترها
R_{nm}, X_{nm}	مقاومت و راکتانس خط به ترتیب.
$\bar{F}_{nm,t}^q, \bar{F}_{nm,t}^p$	حداکثر جریان توان اکتیو و راکتیو خط به ترتیب.
c_t^{sub}	هزینه قدرت خرید از پست.
c_t^{shed}	هزینه تخلیه بار.
c_t^{loss}	هزینه تلفات برق
c_t^{DG}	هزینه عملیات DG.
c_t^{ess}	هزینه عملیات ESS
$D_{n,t}^{q,INI}, D_{n,t}^{p,INI}$	به ترتیب بار فعال و راکتیو اولیه شبکه.
$\bar{P}_{n,t,s}^{RE}$	توان خروجی واقعی منابع انرژی تجدیدپذیر در سناریوهای مختلف
ρ	ضریب توان تولید پراکنده
γ	درصد تغییر بار در برنامه مدیریت سمت تقاضا.
C_n^{ess}	ظرفیت باتری.
$\overline{soc}_n^{ess}, \underline{soc}_n^{ess}$	حداقل و حداکثر SOC باتری به ترتیب.
$\bar{Q}_n^{ShR}, \bar{Q}_n^{sc}$	حداکثر توان راکتیو SC و ShR به ترتیب.
$\nabla_{n,t,m}^{SVR}, \nabla_{n,t,m}^{oltc}$	نرخ ضربه زدن به ترتیب OLTC و SVR.
B_m, A_m	مجموعه ای از نرخ گام ها به ترتیب برای OLTC و SVR در نظر گرفته شده است.
	متغیرها
Q_t^{sub}, p_t^{sub}	توان واقعی و راکتیو پست.
$D_{n,t}^{q,DSM}, D_{n,t}^{p,DSM}$	تقاضای اکتیو و راکتیو به ترتیب در برنامه DSM تغییر کردند.
$P_{n,t}^{RE}$	توان عملیاتی منابع انرژی تجدیدپذیر
$P_{n,t}^{ess,dis}, P_{n,t}^{ess,cha}$	قدرت شارژ و دشارژ باتری به ترتیب.
$P_{n,t}^{DG}$	قدرت واقعی تولید پراکنده
$E_{n,t}^{ess}$	سطح انرژی باتری.
$\eta_{n,t}^{ess,dis}, \eta_{n,t}^{ess,cha}$	راندمان شارژ و دشارژ باتری به ترتیب.
$Q_{n,t}^{ShR}, Q_{n,t}^{sc}$	توان راکتیو SC و ShR به ترتیب.
	متغیرهای باینری
$Z_{n,t}$	وضعیت شارژ باتری
Y_{nm}	متغیر باینری کمکی برای پیکربندی مجدد
$\varphi_{n,t}$	وضعیت فعال SC با مقدار ۱ نشان داده می شود، در غیر این صورت، صفر است که نشان دهنده وضعیت فعال ShR است.
$\theta_{m,t}^{oltc}, \theta_{m,t}^{SVR}$	متغیرهای باینری اضافی برای مراحل SVR و OLTC.

معادلات (۲) و (۳) تعادل توان واقعی و راکتیو را در ریزشبه نشان می‌دهند. معادلات (۲) و (۳) سبب می‌شود تا تلفات توان اکتیو و راکتیو به حداقل برسد و تولید توان حقیقی و راکتیو با بار حقیقی و راکتیو متوازن باشد. این دو معادله از روابط حیاتی در بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت می‌باشد.

$$P_t^{sub} + P_{n,t}^{ess,dis} - P_{n,t}^{ess,cha} + \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^p - \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^q + P_{n,t}^{DG} + P_{n,t}^{RE} + D_{n,t}^{p,shed} - D_{n,t}^{p,DSM} = 0 \forall n \quad (2)$$

$$\in N, t \in T, nm \in B$$



$$Q_t^{sub} + \sum_{nm \in B(n)} F_{nm,t}^q - \sum_{nm \in B(n)} F_{mn,t}^q + \rho \times P_{n,t}^{DG} + D_{n,t}^{q,shed} - D_{n,t}^{q,DSM} + Q_{n,t}^{sc} - Q_{n,t}^{ShR} = 0 \quad \forall n \in N, t \in T, b \in B \quad (3)$$

نابرابری های (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده محدودیت های استفاده از توان اکتیو و راکتیو از شبکه بالادستی است.

$$\underline{P}^{sub} \leq P_t^{sub} \leq \bar{P}^{sub} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\underline{Q}^{sub} \leq Q_t^{sub} \leq \bar{Q}^{sub} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

معادلات (۶) و (۷) محدودیت های کل بارهای فعال و راکتیو را در برنامه مدیریت سمت تقاضا مشخص می کند. این روابط نشان می دهد که در برنامه مدیریت سمت تقاضا، کل بار ریزش شبکه می تواند کمتر از بارهای اولیه شبکه باشد. در اصل، این نشان دهنده در نظر گرفتن بارهای انعطاف پذیر در این مطالعه است.

$$\sum_{n \in N} D_{n,t}^{p,DSM} \leq \sum_{n \in N} D_{n,t}^{p,INI} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} D_{n,t}^{q,DSM} \leq \sum_{n \in N} D_{n,t}^{q,INI} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

نابرابری های (۸) و (۹) به ترتیب میزان تغییر بار اکتیو و راکتیو را در طرح مدیریت سمت تقاضا بیان می کنند.

$$D_{n,t}^{p,INI} - D_{n,t}^{p,INI} \times \gamma \leq D_{n,t}^{p,DSM} \leq D_{n,t}^{p,INI} + D_{n,t}^{p,INI} \times \gamma \quad \forall n \in N, t \in T \quad (8)$$

$$D_{n,t}^{q,INI} - D_{n,t}^{q,INI} \times \gamma \leq D_{n,t}^{q,DSM} \leq D_{n,t}^{q,INI} + D_{n,t}^{q,INI} \times \gamma \quad \forall n \in N, t \in T \quad (9)$$

محدودیت های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب آستانه های عملکرد جریان توان اکتیو و راکتیو را در ریزش شبکه مشخص می کنند.

$$-\bar{F}_{nm,t}^p \leq F_{nm,t}^p \leq \bar{F}_{nm,t}^p \quad \forall t \in T, nm \in B \quad (10)$$

$$-\bar{F}_{nm,t}^q \leq F_{nm,t}^q \leq \bar{F}_{nm,t}^q \quad \forall t \in T, nm \in B \quad (11)$$

معادلات (۱۲) و (۱۳) به ترتیب محدودیت های ولتاژ را برای ریزش شبکه و شین مرجع تعریف می کنند. شایان ذکر است که ولتاژ در این مقاله مربعی است.

$$\underline{V}_n \leq V_{n,t} \leq \bar{V}_n \quad \forall n \in N, t \in T \quad (12)$$

$$V_{n,t} = 1 \quad \forall n = ref \quad (13)$$

معادله (۱۴) محدودیت در عملکرد توان واقعی از ژنراتورهای توزیع شده (DGs) را نشان می دهد.

$$\underline{P}_n^{DG} \leq P_{n,t}^{DG} \leq \bar{P}_n^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (14)$$

معادلات (۱۵) تا (۱۹) مدل سازی سیستم های ذخیره انرژی در ریزش شبکه را در بر می گیرد. معادله (۱۵) حد توان تخلیه را تعیین می کند، در حالی که معادله (۱۶) حد توان شارژ را مشخص می کند. معادله (۱۷) نشان دهنده سطح انرژی در باتری است، با معادله (۱۸) انرژی اولیه باتری را مشخص می کند. در نهایت، معادله (۱۹) محدودیت انرژی باتری را مشخص می کند.

$$0 \leq P_{n,t}^{ess,dis} \leq C_n^{ess} (1 - z_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{ess,ch} \leq C_n^{ess} (z_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (16)$$

$$E_{n,t+1}^{ess} = E_{n,t}^{ess} + P_{n,t}^{ess,ch} \eta^{ess,ch} - P_{n,t}^{ess,dis} \eta^{ess,dis} \quad \forall n \in N, t \in T, z \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$E_{n,t}^{ess} = 0 \quad \forall n \in N, t = 1 \quad (18)$$

$$\underline{soc}_n^{ess} C_n^{ess} \leq E_{n,t}^{ess} \leq \overline{soc}_n^{ess} C_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (19)$$

معادله (۲۰) مربع ولتاژ را در ریزش شبکه تعریف می کند که در یک چارچوب مدل سازی محدب نشان داده شده است.

$$V_{n,t} = V_{m,t} - \gamma (R_{nm} f_{nm,t}^p + X_{nm} f_{nm,t}^q) \quad \forall nm \in B, t \in T, n \in N \quad (20)$$

معادله (۲۱) حد عملیاتی را برای منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزش شبکه تعیین می کند که منابعی مانند باد و منابع فتوولتائیک (PV) را در بر می گیرد.

$$0 \leq P_{n,t}^{RE} \leq \bar{P}_{n,t}^{RE} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (21)$$



محدودیت های (۲۲) و (۲۳) به ترتیب محدودیت های عملیاتی خازن و راکتور شنت را در ریزشبه مشخص می کنند.

$$0 \leq Q_{n,t}^{SC} \leq \bar{Q}_n^{SC} \varphi_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \quad (22)$$

$$0 \leq Q_{n,t}^{ShR} \leq \bar{Q}_n^{ShR} (1 - \varphi_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \quad (23)$$

معادلات (۲۴) تا (۲۶) تعیین تنظیمات تپ OLTC و مرحله تغییرات تپ را نشان می دهد. به همین ترتیب، روابط (۲۷) تا (۲۹) برای تنظیم کننده ولتاژ مرحله ای (SVR) اعمال می شود. قابل توجه است که تپ OLTC بر شین مرجع ریزشبه تأثیر می گذارد، در حالی که تپ SVR بر ولتاژ بین دو گره تأثیر می گذارد.

$$V_{n,t} = 1 \times \nabla_{n,t,m}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M \quad (24)$$

$$\nabla_{n,t,m}^{oltc} = \sum_{m \in M} A_m \times \theta_{m,t}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \quad (25)$$

$$\sum_m \theta_{m,t}^{oltc} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$V_{n,t} = V_{m,t} \times \nabla_{n,t,m}^{SVR} - \gamma (R_{nm} F_{nm,t}^p + X_{nm} F_{nm,t}^q) \quad \forall n, m \in \Omega^{SVR}, t \in T, nm \in B \quad (27)$$

$$\nabla_{n,t,m}^{SVR} = \sum_{m \in M} B_m \times \theta_{m,t}^{SVR} \quad \forall n \in \Omega^{SVR}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \quad (28)$$

$$\sum_m \theta_{m,t}^{SVR} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (29)$$

معادلات (۳۰) و (۳۱) به ترتیب قطع بارهای فعال و راکتور در ریزشبه را نشان می دهند. حدود نرخ رمپ بالا و پایین برای ژنراتورهای پراکنده (DGs) به ترتیب در معادلات (۳۲) و (۳۳) ارائه شده است.

$$0 \leq D_{n,t}^{p,shed} \leq D_{n,t}^{p,DSM} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (30)$$

$$0 \leq D_{n,t}^{q,shed} \leq D_{n,t}^{q,DSM} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (31)$$

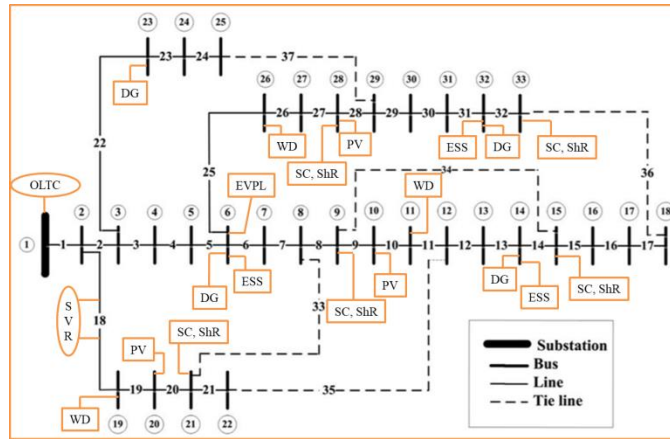
$$P_{n,t+1}^{DG} - P_{n,t}^{DG} \leq r^{up} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (32)$$

$$P_{n,t}^{DG} - P_{n,t+1}^{DG} \leq r^{dw} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (33)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

رویکرد و مدل پیشنهادی برای ارزیابی عملکرد زیرساخت ریزشبه ۳۳ شینه اجرا شده است. در شکل ۱، نمایش شماتیک ریزشبه اجزای کلیدی مانند سیستم‌های ذخیره انرژی، منابع تولید پراکنده و منابع انرژی تجدید پذیر را به نمایش می گذارد. قابل ذکر است که تغییرات تقاضای فعال و واکنش پذیر دارای حداکثر انحراف مجاز ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای این مطالعه، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی از نوع لیتیومی هستند که با راندمان عملیاتی ۹۵٪ مشخص می شوند. برای انجام شبیه‌سازی، ما از روش و مدل پیشنهادی پیاده‌سازی شده در جولیا استفاده کردیم و آن را با استفاده از ۱۰ Gurobi حل کردیم. ریزشبه ۳۳ گره نشان‌داده شده در شکل ۱ شامل ۳۲ خط است که بر حضور عناصر مختلف از جمله منابع فتوولتائیک (PV)، منابع باد تأکید می کند. (WD)، سیستم‌های ذخیره انرژی (ESS)، خازن‌های شنت (SC) و راکتورها (ShR)، ترانس (OLTC)، تنظیم‌کننده ولتاژ مرحله (SVR) و تولید پراکنده (DG) منابع. این تجزیه و تحلیل جامع ما را قادر می سازد تا بینش‌هایی را در مورد تعاملات پویا و عملکرد ریزشبه تحت سناریوهای مختلف به دست آوریم و زمینه را برای درک عمیق تری از ویژگی های عملیاتی آن و اثربخشی مدل پیشنهادی فراهم کنیم.





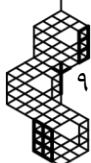
شکل (۱): شماتیک ریزشبه پیشنهادی

جدول (۳) نتایج حالت متصل به شبکه را از روش پیشنهادی در مقایسه با روش ۱ (بر اساس الگوریتم ژنتیک) در [۲۴] و روش ۲ (بر اساس الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات) در [۲۵] ارائه می دهد. تابع هدف، نشان دهنده هزینه کل، با روش پیشنهادی به حداقل می رسد و منجر به ۸۹۵۶۸ دلار می شود، در حالی که روش ۱ و روش ۲ هزینه های بالاتری به ترتیب ۹۶۵۲۶ دلار و ۹۳۹۱۶ دلار به همراه دارند. از نظر معیارهای انرژی، روش پیشنهادی به خرید انرژی ۰.۵۱ مگاوات ساعت دست می یابد که کمتر از روش ۱ (۰.۵۲۴ مگاوات ساعت) و روش ۲ (۰.۵۱۸ مگاوات ساعت) است. علاوه بر این، روش پیشنهادی تلفات (۰.۴۰۲ مگاوات ساعت)، قطع بار (۰.۲۹ مگاوات ساعت)، و انحراف ولتاژ (۰.۰۶۹ pu) را به طور موثرتری نسبت به روش های دیگر به حداقل می رساند. در نهایت، کارایی محاسباتی روش پیشنهادی در زمان CPU مشهود است که به ۵۱ ثانیه نیاز دارد، در حالی که روش ۱ و روش ۲ به ترتیب ۵۹ ثانیه و ۶۱ ثانیه مصرف می کنند. این نتایج در مجموع اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی را در بهینه سازی حالت متصل به شبکه ریزشبه نشان می دهد. نتایج جالبی که از جدول مشاهده می شود این است که روش پیشنهادی نه تنها هزینه های کمتری دارد، بلکه نیاز به خرید انرژی و تلفات نیز کمتری دارد. علاوه بر این، باعث کاهش بار بیشتری می شود که این می تواند نشان دهنده بهره وری بالاتر و افزایش قابلیت اطمینان سیستم باشد. این نتایج می توانند به توسعه و پیاده سازی روش پیشنهادی به عنوان یک استراتژی موثر در مدیریت انرژی در حالت متصل به شبکه کمک کنند.

جدول (۳): نتیجه حالت متصل به شبکه

	روش ۲ در [۲۵]	روش ۱ در [۲۴]	پیشنهاد شده
هدف (\$)	۹۳۹۱۶	۹۶۵۲۶	۸۹۵۶۸
خرید انرژی (MWh)	۰.۵۱۸	۰.۵۲۴	۰.۵۱
تلفات (MWh)	۰.۴۲۱	۰.۴۲۶	۰.۴۰۲
کاهش بار (MWh)	۰.۳۹۴	۰.۴۸۹	۰.۲۹
انحراف ولتاژ (pu)	۰.۰۶۹	۰.۰۷۱	۰.۰۶۹
زمان CPU (ثانیه)	۶۱	۵۹	۵۱

جدول (۴) نتایج حالت جزیره ای به دست آمده از طریق روش پیشنهادی را نشان می دهد که با روش ۱ در [۲۴] و روش ۲ در [۲۵] در تضاد است. تابع هدف، نشان دهنده هزینه کل، با روش پیشنهادی به حداقل می رسد و منجر به ۹۲۷۴۴ دلار می شود. در مقایسه، روش ۱ و روش ۲ هزینه های بالاتری به ترتیب ۹۹۵۹۵ دلار و ۹۷۲۵۰ دلار دارند. از نظر معیارهای انرژی، روش پیشنهادی به خرید انرژی صفر، تلفات (۰.۳۲۶ مگاوات ساعت) و کاهش بار (۱.۱۲۵ مگاوات ساعت) دست می یابد که اثربخشی آن را در تضمین خودکفایی انرژی در طول عملیات حالت جزیره ای نشان می دهد. در مقابل، روش ۱ و روش ۲ مقادیر غیر صفر را برای این معیارها نشان می دهند که نشان دهنده استفاده کمتر کارآمد از منابع در حالت جزیره ای است. روش پیشنهادی همچنان در به حداقل رساندن انحراف ولتاژ (۰.۰۶۱ pu) در طول حالت جزیره ای برتری دارد و از روش ۱ (۰.۰۶۴ pu) و روش ۲ (۰.۰۶۲ pu) بهتر عمل می کند. کارایی





محاسباتی روش پیشنهادی در زمان CPU منعکس می‌شود که به ۱۹۸ ثانیه نیاز دارد. در مقابل، روش ۱ و روش ۲ به ترتیب ۱۳۵ ثانیه و ۱۱۴ ثانیه مصرف می‌کنند. این نتایج مجموعاً اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی را در بهینه‌سازی حالت جزیره‌ای ریزشبکه برجسته می‌کند و بر قابلیت آن برای اطمینان از خودکفایی و قابلیت اطمینان در طول دوره‌های قطع از شبکه اصلی تأکید می‌کند. یکی از نتایج که از جدول برمی‌آید این است که در حالت جزیره، روش پیشنهادی به دلیل عدم نیاز به خرید انرژی، هزینه‌های کمتری دارد که این می‌تواند به شدت تأثیرگذار بر اقتصادی بودن سیستم باشد. همچنین، این روش باعث کاهش بار بیشتری نیز می‌شود که این امر می‌تواند نشان‌دهنده افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری سیستم در شرایط جزیره‌ای باشد. این نتایج می‌توانند به عنوان انگیزه‌بخش برای استفاده از روش پیشنهادی در سیستم‌های انرژی مستقل و مناطق جزیره‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

جدول (۴): نتایج حالت جزیره

	پیشنهاد شده	روش ۱ در [۲۷]	روش ۲ در [۲۶]
هدف (\$) (MWh)	۹۲۷۴۴	۹۹۵۹۵	۹۷۲۵۰
خرید انرژی (MWh)	۰	۰	۰
تلفات (MWh)	۰.۳۲۶	۰.۳۵۹	۰.۳۳۶
کاهش بار (MWh)	۱.۱۲۵	۲.۲۱	۱.۵۹
انحراف ولتاژ (pu)	۰.۰۶۱	۰.۰۶۴	۰.۰۶۲
زمان CPU (ثانیه)	۱۹۸	۱۳۵	۱۱۴

۴- نتیجه‌گیری

مدیریت انرژی ریزشبکه به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر، تقاضای پویا و طیف متنوعی از دستگاه‌ها، یک کار پیچیده و چالش برانگیز است. این مقاله یک مدل بهینه‌سازی روز آینده را پیشنهاد می‌کند که به طور خاص برای عملیات ریزشبکه طراحی شده است. این مدل به چالش‌های ناشی از ادغام واحدهای تولید مبتنی بر الکترونیک قدرت، ماهیت بار در ریزشبکه‌ها و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در مقیاس کوچک می‌پردازد. این ویژگی فرمول‌بندی‌های دقیقی برای مدیریت انرژی ریزشبکه، شامل استفاده بهینه باتری، استفاده از جبران‌کننده، و توزیع استراتژیک منابع تولید پراکنده (DG) دارد. هدف عملکرد چند هدفه به حداقل رساندن هزینه‌های مختلف مربوط به تلفات انرژی، خرید برق، کاهش بار، عملیات DG و هزینه باتری در ۲۴ ساعت است. شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده بر روی یک سیستم آزمایشی، اثربخشی مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند و کاهش قابل توجهی در هزینه عملیاتی ریزشبکه را نشان می‌دهد. رویکرد پیشنهادی یک چارچوب موثر برای تقویت انعطاف‌پذیری و افزایش کارایی مدیریت انرژی ریزشبکه ارائه می‌کند. یافته‌ها به طور قطعی نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی با حداقل حاشیه ۸ درصد از روش‌های قابل مقایسه بهتر عمل می‌کند و کارایی آن را در افزایش شاخص‌های حیاتی در سیستم ریزشبکه نشان می‌دهد.

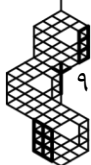
مراجع

- [1] V. Gali, P. K. Jamwal, N. Gupta, and A. Kumar, "An adaptive dynamic power management approach for enhancing operation of microgrid with grid ancillary services," *Renewable Energy*, vol. 219, no. 119413, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119413.
- [2] F. N. Budiman, M. A. Ramli, H. R. Boucekara, and A. H. Milyani, "Optimal scheduling of a microgrid with power quality constraints based on demand side management under grid-connected and islanding operations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, no. 109650, B, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109650.
- [3] V. Shahbazbegian, M. Shafie-Khah, H. Laaksonen, G. Strbac, and H. Ameli, "Resilience-oriented operation of microgrids in the presence of power-to-hydrogen systems," *Applied Energy*, vol. 348, no. 121429, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121429.





- [4] X. Chen, J. Zhai, Y. Jiang, C. Ni, S. Wang, and P. Nimmegeers, "Decentralized coordination between active distribution network and multi-microgrids through a fast decentralized adjustable robust operation framework," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 34, no. 101068, 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101068.
- [5] Ö. Erol, and Ü. B. Filik, "A Stackelberg game-based dynamic pricing and robust optimization strategy for microgrid operations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, no. 109574, B, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109574.
- [6] B. Cortés-Caicedo, L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, and R. I. Bolaños, "Optimization of BESS placement, technology selection, and operation in microgrids for minimizing energy losses and CO2 emissions: A hybrid approach," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, no. 108975, B, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108975.
- [7] Z. Li, B. Zhao, Z. Chen, C. Ni, J. Yan, X. Yan, X. Bian, and N. Liu, "Low-carbon operation method of microgrid considering carbon emission quota trading," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 379-387, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.03.045.
- [8] M. H. Parvaneh, M. H. Moradi, and S. M. Azimi, "The advantages of capacitor bank placement and demand response program execution on the optimal operation of isolated microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 220, no. 109345, 2023, doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109345.
- [9] Y. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Qiao, S. Jiao, Y. Cao, Y. Xu, M. Shahidehpour, and Z. Shan, "Carbon-oriented optimal operation strategy based on Stackelberg game for multiple integrated energy microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 224, no. 109778, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109778.
- [10] Z. Guo, W. Wei, J. Bai, and S. Mei, "Long-term operation of isolated microgrids with renewables and hybrid seasonal-battery storage," *Applied Energy*, vol. 349, no. 121628, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121628.
- [11] J. Xu, and Y. Yi, "Multi-microgrid low-carbon economy operation strategy considering both source and load uncertainty: A Nash bargaining approach," *Energy Reports*, vol. 263, no. 12571, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125712.
- [12] Z. Shi, T. Zhang, Y. Liu, Y. Feng, R. Wang, and S. Huang, "Optimal design and operation of islanded multi-microgrid system with distributionally robust optimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 221, no. 109437, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109437.
- [13] D. Krupenev, N. Komendantova, D Boyarkin, and D. Iakubovskii, "Digital platform of reliability management systems for operation of microgrids," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2486-2495, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.09.048.
- [14] Z. Liang, Z. Dong, C. Li, C. Wu, and H. Chen, "A Data-Driven Convex Model for Hybrid Microgrid Operation With Bidirectional Converters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, pp. 1313-1316, 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3193030.
- [15] O. M. Adeyanju, P. Siano, and L. N. Canha, "Dedicated Microgrid Planning and Operation Approach for Distribution Network Support With Pumped-Hydro Storage," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 7, pp. 8229-8241, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3216299.
- [16] L. Tang, E. Shang, X. Chen, L. Li, and S. Zou, "Optimization Effect Analysis of ACM-PSO Integrating Individual Adjustment and Cross Operation on Microgrid DG Technology," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 59954-59967, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3285276.
- [17] Y. Wang, Y. Li, Y. Cao, M. Shahidehpour, L. Jiang, Y. Long, Y. Deng, and W. Li, "Optimal Operation Strategy for Multi-Energy Microgrid Participating in Auxiliary Service," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 5, pp. 3523-3534, 2023, doi: 10.1109/TSG.2023.3250482.
- [18] D. A. Quijano, M. Vahid-Ghavidel, M. S. Javadi, A. Padilha-Feltrin, and J. P. S. Catalao, "A Price-Based Strategy to Coordinate Electric Springs for Demand Side Management in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 1, pp. 400-412, 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3188847.
- [19] G. Abdalnasser, A. Ali, M. F. Shaaban, and E. E. M. Mohamed, "Optimizing the Operation and Coordination of Multi-Carrier Energy Systems in Smart Microgrids Using a Stochastic Approach," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 58470-58490, 2023, doi: 10.1109/access.2023.3284311.
- [20] L. Ahmethodžić; M. Musić; S. Huseinbegović, "Microgrid Energy Management: Classification, Review and Challenges," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1425-1438, 2023, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.09150.





- [21] B. Zeng, and L. Zhao, "Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method," *Operations Research Letters*, vol. 41, no. 5, pp. 457-461, 2013, doi: 10.1016/j.orl.2013.05.003.
- [22] S. Dehghan, N. Amjady, and A. Kazemi, "Two-Stage Robust Generation Expansion Planning: A Mixed Integer Linear Programming Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 584-597, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2287457.
- [23] Y. Guo, and C. Zhao, "Islanding-Aware Robust Energy Management for Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1301-1309, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2585092.
- [24] Y. Qu, H. Wang, J. Wu, X. Yang, H. Yin, and L. Zhou, "Robust optimization of train timetable and energy efficiency in urban rail transit: A two-stage approach," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 146, no. 106594, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106594.
- [25] H. Kim, M. Kim, and J. Lee, "A two-stage stochastic p-robust optimal energy trading management in microgrid operation considering uncertainty with hybrid demand response," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, 106422, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106422.
- [26] E. Akhavan Maroofi, M. Samiei Moghaddam, A. Azarfar, R. Davarzani, and M. Vahedi, "Presenting a Multi-Objective Stochastic Integrated Energy Management Model in Electrical and Thermal Microgrids by Locating CHP and Battery Sources, Thermal Storage and Demand Side Management," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, pp. 62-82, 2024, doi: 10.30486/teees.2024.1999965.1106.
- [27] A. Abdulkadhim Issa, and M. H. Ershadi, "A New Soft Switching Two Input Converter for Hybrid Green Energy Systems," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, pp. 48-61, 2024, doi: 10.30486/teees.2024.2001875.1115.

¹ Micro-grid

² Adaptive dynamic power management

³ Theory of advanced instantaneous symmetric components

⁴ Optimal harmonic power flow

⁵ Mixed integer nonlinear programming

⁶ Multiple microgrids

⁷ Battery energy storage systems

⁸ Parallel genetic algorithm and beasley

⁹ Harmony search algorithm

¹⁰ Peer-to-Peer

¹¹ A column-and-constraint generation algorithm

