
Multi-objective energy management of microgrids in the presence of D-FACTS devices and renewable energies using learning performance-based behavior algorithm

Mahyar Moradi¹, Mohamad Hoseini Abarde², Mojtaba Vahedi³, Nasrin Salehi⁴, Azita Azarfar⁵

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

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

³Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

⁴Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

⁵Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract:

The development of microgrids is progressing due to smart loads, renewable energy sources, energy storage systems and also the presence of electric vehicles (EV). The presence of such devices in microgrids may cause inconsistency in the microgrid, which leads to increased losses and changes in the voltage of microgrid buses. In this paper, a mixed integer quadratic programming (MIQP) model is presented for microgrid energy management in the presence of smart loads, renewable energy sources, electric vehicles and energy storage systems. Also, to prevent voltage changes and reduce losses, the Distributed Flexible Alternating Transmission System (D-FACTS) device has been used. A scenario-based multi-objective function is proposed to reduce power losses and voltage deviations, reduce power outages of renewable sources, and reduce environmental pollution caused by distributed generation with fossil fuel (DG) and finally reduce the microgrid load definitively to reduce the vulnerability of the system. In this paper, an innovative evolutionary algorithm called learner performance-based behavior (LPB) algorithm is proposed. The proposed model is implemented on a 33-bus microgrid and the results show that the proposed energy management with demand side management can reduce energy loss by 9% and voltage deviation by 10%.

Keywords: Microgrid, D-FACTS, renewable energies, energy storage system, electric vehicles

Date of sending: 2023/07/19

Acceptance date: 2023/10/11

Corresponding author's name: Mohamad Hoseini Abarde

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

مدیریت انرژی چند هدفه ریزشبه‌ها در حضور دستگاه‌های D-FACTS و انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده

نوع مطالعه: پژوهشی

مهیار مرادی^۱، دانشجو دکتری، محمدحسینی ابرده^{۱*}، استادیار، مجتبی واحدی^۱، استادیار، نسرین صالحی^۲، دانشیار، آریتا آذرفر، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

۲- دانشکده علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده: توسعه ریزشبه‌ها به دلیل بارهای هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی و همچنین وجود وسایل نقلیه الکتریکیⁱ در حال پیشرفت است. وجود چنین وسایلی در ریزشبه‌ها ممکن است باعث ناهماهنگی در ریزشبه شود که منجر به افزایش تلفات و تغییر در ولتاژ باس‌های ریزشبه شود. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مختلطⁱⁱ برای مدیریت انرژی ریزشبه در حضور بارهای هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر، وسایل نقلیه الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ارائه شده است. همچنین برای جلوگیری از تغییرات ولتاژ و کاهش تلفات از دستگاه سیستم انتقال متناوب منعطف توزیع شدهⁱⁱⁱ (D-FACTS) استفاده شده است. یک تابع چند هدفه مبتنی بر سناریو برای کاهش تلفات برق و انحرافات ولتاژ، کاهش قطع برق منابع تجدیدپذیر و کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید پراکنده با سوخت فسیلی^{vi} (DG) و در نهایت کاهش قطعی بار ریزشبه برای کاهش آسیب‌پذیری سیستم پیشنهاد شده است. در این مقاله، یک الگوریتم تکاملی نوآورانه به نام الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده (LPB) پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی بر روی یک ریزشبه ۳۳ شینه پیاده‌سازی شده است و نتایج نشان می‌دهد که مدیریت انرژی پیشنهادی با مدیریت سمت تقاضا می‌تواند تلفات انرژی را تا ۹ درصد و انحراف ولتاژ را تا ۱۰ درصد کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: ریزشبه، D-FACTS، انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ذخیره انرژی، وسایل نقلیه الکتریکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۴/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد حسینی ابرده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شاهرود- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها شبکه‌های منطقه‌ای کوچکی هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهند از شبکه‌های بالادستی جدا شده و تقاضای بار خود را با استفاده از منابع خود تأمین کنند. یک ریزشبکه مدرن می‌تواند تقاضای بار را به دلیل وجود منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا برآورده کند. پیشرفت فناوری در بحث سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها، امکان بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر را بیش از پیش فراهم کرده است زیرا این سیستم‌ها امکان ذخیره‌سازی در باتری‌ها را در زمان تولید مازاد و ورود به شبکه در صورت نیاز امکان‌پذیر می‌سازد. از جمله اینکه موضوع پاسخ به تقاضا می‌تواند یک مشکل برد-برد برای ریزشبکه و مشتریان باشد، به گونه‌ای که با تغییر تقاضای بار از ساعات اوج مصرف به ساعات غیر اوج مصرف، علاوه بر هموارسازی منحنی بار ریزشبکه و آوردن سود به ریزشبکه، هزینه‌های مشتریان را کاهش می‌دهد. با توجه به این نکات دغدغه اصلی ارائه یک مدیریت کارآمد و بهینه در کنار این منابع در ریزشبکه‌ها می‌باشد که در صورت عدم ارزیابی صحیح می‌تواند علاوه بر کاهش بار باعث افزایش هزینه و تلفات در سیستم شود. از این رو، در این مطالعه سعی بر آن است تا به تمامی مشکلات چالش برانگیز پردازش و مدلی کارآمد ارائه کنیم.

۱-۱- پیشینه تحقیق

در [۱]، یک الگوریتم دیفرانسیل برای حفاظت از ساختار جزیره و ریزشبکه‌های شعاعی تحت گسل‌های مختلف پیشنهاد شده است. در [۲]، روشی برای اعتبارسنجی سیستم‌های ریزشبکه هیبریدی جفت شده AC-DC با در نظر گرفتن

اعوجاج در منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در [۳]، یک طرح کنترل توزیع شده بهینه برای ریزشبکه DC برای به حداقل رساندن هزینه تولید و تنظیم ولتاژ شین ارائه شده است. در [۴] به بررسی عملکردهای چندگانه ذخیره انرژی هوای مایع در یک ریزشبکه هیبریدی تجدیدپذیر برای کربن زدایی فزاینده سیستم‌های انرژی توزیع شده می‌پردازد. مرجع [۵] یک ریزشبکه واسط اینورتر را مدل می‌کند که انواع مختلفی از بارها مانند بارهای ساکن و ماشین‌های القایی متقارن را توسط ژنراتورهای همزمان مجازی تأمین می‌کند. در مرجع [۶]، با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، یک استراتژی برنامه ریزی روزانه برای یک سیستم ذخیره انرژی در یک ریزشبکه ارائه شده است. هدف استراتژی زمان بندی به حداقل رساندن هزینه‌های پرداخت شده توسط مصرف‌کنندگان در یک ریزشبکه تحت قیمت گذاری پویا است. در [۷] به بررسی یک استراتژی هماهنگی جدید برای ریزشبکه‌های به هم پیوسته تک و چند ناحیه‌ای با استفاده از تکنیک مشتق مبتنی بر روتور مجازی اصلاح شده با بهینه‌سازی جایا می‌پردازد. در مرجع [۸]، روشی مبتنی بر عدم قطعیت‌های تولید برق و استفاده از ویژگی‌های ذخیره انرژی در کنترل فرکانس ریزشبکه ارائه شده است. در [۹]، یک مدل کنترل پیش‌بینی همراه با روش دروپ برای دستیابی به اشتراک بار و توزیع توان انعطاف‌پذیر بین منابع انرژی توزیع شده برای ریزشبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۰]، استراتژی‌های کنترل در ریزشبکه با مزایا و معایب تجزیه و تحلیل می‌شوند. علاوه بر این، بررسی جامع روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی و فنی، عدم قطعیت و نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر انجام شده است. در [۱۱]، الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس برای حل مسئله برنامه ریزی و بهره‌برداری ریزشبکه بهینه پیشنهاد شده است. یک تابع چند هدفه شامل هزینه‌های اقتصادی و زیست

محیطی برای یک سیستم ریزشبه در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۲]، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی با نام بهینه‌سازی جستجوی متغیر همسایگی ازدحام ذرات ترکیبی برای حل مشکل مدیریت انرژی ریزشبه ارائه شده است. در [۱۳]، کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبه با یک روش کنترل امپدانس مجازی تطبیقی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه با هدف توزیع متناسب توان ارائه شده است. مرجع [۱۴] ویژگی‌های فرکانس تولید پراکنده و مدل‌های توان پیشنهادی را بر اساس ویژگی‌های تنظیم فرکانس ریزشبه و مدل تولید پراکنده تحلیل می‌کند. در [۱۵]، دیدگاه‌های جدیدی در مورد کنترل توان برای ریزشبه‌های AC با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری و کارایی به طور همزمان ارائه شده است. در [۱۶]، یک روش جامع برای طراحی بهینه یک کلاس از ریزشبه‌های باتری-فتوولتائیک مسکونی برای تعیین تعداد بهینه باتری‌های اسید سرب و پانل‌های خورشیدی و مقدار بهینه عمق تخلیه بانک باتری پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۷]، یک بررسی جامع از سیستم مدیریت توان/انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی ریزشبه کشتی ارائه شده است و روندهای آینده سیستم مدیریت نیرو/انرژی در ریزشبه کشتی مورد بحث قرار می‌گیرد. در [۱۸]، یک روش توزیع بهینه‌سازی چند هدفه جدید برای بهینه‌سازی توان خروجی ژنراتورهای توزیع‌شده یک ریزشبه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی نیروی باد برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده، ارائه شده است. در [۱۹]، یک طرح کنترل هوشمند ولتاژ/فرکانس در ریزشبه‌های اولیه و ثانویه پیشنهاد شده است. در [۲۰]، یک تجارت انرژی مبتنی بر یک سیستم چند عاملی، پاسخ تقاضای انگیزشی، و نظریه بازی سلسله‌مراتبی استکلبرگ با تجزیه و تحلیل اهداف و استراتژی‌های بازی این شرکت‌کنندگان در یک ریزشبه خوشه‌ای پیشنهاد شده است. در [۲۱]، نسخه جدیدی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ برای طراحی

بهینه کنترل‌کننده ریزشبه ارائه شده است. یک الگوریتم کنترل بهینه توزیع شده در [۲۲] برای ریزشبه‌های DC ارائه شده است تا تلفات بهره‌برداری بلادرنگ را به حداقل برساند و تمام ولتاژهای شین را در محدوده‌های از پیش تعریف شده حفظ کند. در مرجع [۲۳]، یک الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر یک تصمیم‌فازی برای حل مسئله بهینه‌سازی اندازه برای ریزشبه‌ها پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴]، ابتدا یک مدل زمان‌بندی ریزشبه بهینه که پاسخ‌های تقاضا را در نظر می‌گیرد، ارائه می‌شود و سپس یک روش زمان‌بندی اقتصادی مبتنی بر بهینه‌سازی قوی روز آینده و کنترل پیش‌بینی نیز توسعه می‌یابد. در مرجع [۲۵]، روشی برای بهینه‌سازی کنترل ریزشبه‌ها با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته پیشنهاد شده است. در [۲۶]، تجزیه و تحلیل بر اساس توزیع وایبل برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم ریزشبه قدرت ایزوله پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۷]، یک رویکرد ریزشبه هوشمند برای کاهش اثر جزیره‌ای شدن شبکه و تغییر حالت متصل به شبکه در شبکه‌های بزرگ و ریزشبه‌ها پیشنهاد شده است. در [۲۸]، یک استراتژی برای کنترل ولتاژ و مدیریت شبکه و یک ریزشبه DC جزیره‌ای با منابع انرژی هیبریدی پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۹]، یک روش بهینه‌سازی موازی و توزیع شده برای مدیریت انرژی ریزشبه‌ها برای افزایش نرخ همگرایی بدون به خطر انداختن دقت بهینه پیشنهاد شده است که در آن عوامل محاسبات تبادل و به روز رسانی را به صورت موازی انجام می‌دهند. در مرجع [۳۰]، یک مدل توزیع چندهدفه اقتصادی بهینه برای یک ریزشبه خنک‌کننده و گرمایش ترکیبی بر اساس الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی بهبود یافته پیشنهاد شده است. در [۳۱] نویسندگان روش جدید بار زدایی چندهدفه برای کاهش قطعی برق و پایداری فرکانس در ریزشبه جزیره‌ای را با

حضور تولیدات پراکنده پیشنهاد کردند. در [۳۲] بهره‌برداری بهینه ریزشکه در حضور بلوک‌های حرارتی، تولیدات پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده جهت دستیابی به زمان‌بندی بهینه توان اکتیو، راکتیو و حرارتی عناصر مذکور در محیط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد پیشنهاد شده است. در [۳۳] یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برنامه‌ریزی اعداد صحیح درجه دوم مختلط به منظور بهره‌برداری بهینه از ریزشکه‌ها در شرایط بدترین خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است.

۱-۲- انگیزه تحقیق

با توجه به بررسی ادبیات، انگیزه‌هایی برای کار روی موضوع مدیریت انرژی ریزشکه وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. اولین انگیزه ارائه یک مدل بهینه‌سازی کارآمد برای بهره‌برداری و مدیریت انرژی در ریزشکه‌های جزیره‌ای است که علاوه بر تامین بار، شاخص‌های مهم ریزشکه را نیز بهبود می‌بخشد. مدل‌سازی باید برای روز آینده (۲۴ ساعت) باشد، منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی، مدیریت سمت تقاضا و منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه شارژ و دشارژ بهینه خودروهای الکتریکی و دستگاه‌های D-FACTS نیز باید مدل‌سازی شوند. در نهایت، ارائه یک تابع چند هدفه برای حل انواع شاخص‌ها مانند کاهش تلفات انرژی، انحراف ولتاژ و هزینه‌های کاهش بار و کاهش کاهش قدرت منابع انرژی تجدیدپذیر و انتشار واحدهای DG با سوخت فسیلی. انگیزه دیگری که باید در پشت ارائه مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شود، راه حل آن است. همانطور که می‌دانیم حل مدل‌های بهینه‌سازی یکی از چالش‌های اصلی اپراتورها است. هر چقدر هم که مدل بهینه‌سازی ارائه شده کامل و دقیق باشد، اگر روش مناسبی برای حل آن انتخاب نشود، نمی‌تواند به راه

حل‌های بهینه کلی یا مطلق دست یابد. در این تحقیق سعی شده است تا مدل بهینه‌سازی پیشنهادی را به گونه‌ای حل کنیم که بتوانیم از راه حل‌های بهینه جهانی ۱۰۰٪ مطمئن باشیم.

۱-۳- نوآوری تحقیق

سهم اصلی این مقاله به شرح زیر است:

(۱) ارائه الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده برای حل مسئله بهینه‌سازی چند-هدفه پیشنهادی.

(۲) ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر سناریو برای مدیریت بهینه انرژی در ریزشکه‌های جزیره‌ای برای روز آینده بر اساس برنامه‌ریزی درجه دوم اعداد صحیح مختلط که راه‌حل‌های بهینه جهانی را تضمین می‌کند.

(۳) با توجه به مسئله مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی، شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی، تولید پراکنده، منابع انرژی تجدیدپذیر، دستگاه‌های D-FACTS مانند رگولاتورهای ولتاژ، ترانس تغییر تپ تحت بار یا (OLTC)^{vi} و خازن‌ها و راکتورهای شنت در مدیریت بهینه انرژی ریزشکه‌ها.

۱-۴- سازماندهی تحقیق

در قسمت دوم مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه شده است، در قسمت سوم ریزشکه آزمایشی مورد نظر ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در قسمت آخر نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲- مدل پیشنهادی

یک ریزشکه معمولی را در نظر بگیرید که شاخص گره آن با n و مجموعه آن با N نشان داده شده است. شاخص خط

تقاضا و هزینه آن به ترتیب با $r_{n,t}$ و c^r نشان داده می‌شود. در نهایت σ_s احتمال هر سناریو را نشان می‌دهد و $\tilde{p}_{n,t,s}^r$ و $p_{n,t}^r$ به ترتیب برابر با توان انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده در هر سناریو و توان انرژی تجدیدپذیر بهره برداری شده هستند. در ریزشبه ψ_{ij}^r مقاومت خط ریزشبه است.

حد تعادل توان واقعی در ریزشبه با (۲) نشان داده شده است. در اینجا $p_{n,t}^{ch}$ و $p_{n,t}^{dis}$ به ترتیب نشان دهنده قدرت شارژ و دشارژ باتری هستند، $\tilde{d}_{n,t}^p$ برابر است با تقاضای واقعی تغییر یافته ریزشبه پس از برنامه پاسخگویی به تقاضا، و $p_{n,t}^{EV}$ برابر است با قدرت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی.

$$p_{n,t}^{DG} + p_{n,t}^r + p_{n,t}^{dis} - \tilde{d}_{n,t}^p - p_{n,t}^{ch} + \sum_{i \in N(n)} f_{ij,t}^p \quad (2)$$

$$- \sum_{j \in N(n)} f_{ij,t}^p + p_{n,t}^{EV} + r_{n,t}$$

$$= 0 \quad \forall n \in N, t \in T$$

محدودیت برابری توان راکتیو در یک ریزشبه نیز با رابطه (۳) نشان داده شده است. توان راکتیو DG ها با $q_{n,t}^{DG}$ و ضریب توان منابع تجدیدپذیر با γ نشان داده می‌شود. متغیر $\tilde{d}_{n,t}^q$ برابر است با تغییر تقاضای واکنشی ریزشبه پس از برنامه پاسخگویی به تقاضا. $q_{n,t}^{sc}$ و $q_{n,t}^{sr}$ به ترتیب نشان دهنده توان راکتیو تزریق شده و دریافتی از ریزشبه توسط خازن و راکتور شنت هستند.

$$q_{n,t}^{DG} + \gamma p_{n,t}^r - \tilde{d}_{n,t}^q + q_{n,t}^{sc} - q_{n,t}^{sr} - \sum_{i \in N(n)} f_{ij,t}^q \quad (3)$$

$$- \sum_{j \in N(n)} f_{ij,t}^q = 0 \quad \forall n$$

$$\in N, t \in T$$

حد ولتاژ گره های ریزشبه در (۴) نشان داده شده است. همچنین (۵) حد ولتاژ گره را که تنظیم کننده ولتاژ در آن قرار دارد نشان می‌دهد. نوار زیر بار به ترتیب حداکثر و حداقل

شبکه با ij و مجموعه آن با L نشان داده می‌شود. همانطور که بیان شد، رویکرد پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح درجه دوم مختلط بر اساس تابع چند هدفه تصادفی نشان داده شده در (۱) است. همانطور که مشاهده می‌شود، تابع هدف پیشنهادی از پنج بخش تشکیل شده است. بخش اول $(\psi_{ij}^r (f_{ij,t}^{p^2} + f_{ij,t}^{q^2}))$ برای کاهش تلفات برق ریزشبه است، بخش دوم $(\delta_{n,t})$ برای کاهش انحراف ولتاژ است، بخش سوم $(c^d p_{n,t}^{DG})$ برای کاهش انتشار DG است، بخش چهارم $(c^r r_{n,t})$ برای کاهش آسیب پذیری ریزشبه است. و بخش آخر $(\tilde{p}_{n,t,s}^r - p_{n,t}^r)$ کاهش قدرت منابع انرژی تجدیدپذیر است.

$$\min \omega_1 \sum_{ij \in L} \sum_{t \in T} T \times \psi_{ij}^r (f_{ij,t}^{p^2} + f_{ij,t}^{q^2}) \quad (1)$$

$$+ \omega_2 \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \delta_{n,t}$$

$$+ \omega_3 \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} c^d p_{n,t}^{DG}$$

$$+ \omega_4 \sum_{s \in S} c^r r_{n,t}$$

$$+ \omega_5 \sum_{s \in S} \sigma_s \left(\sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (\tilde{p}_{n,t,s}^r - p_{n,t}^r) \right)$$

در اینجا با توجه به مساوی نبودن اندازه توابع در نظر گرفته شده و ممکن است تأثیر تابعی با عدد بزرگتر بیشتر دیده شود، از روش وزن دهی ضرایب برای یکسان سازی اندازه توابع هدف استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که مجموعه تمام ضرایب وزنی $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$ برابر با ۱ است. ولتاژ گرهی ریزشبه با $v_{n,t}$ نشان داده می‌شود و جریان خط واقعی و راکتیو ریزشبه برابر است. به ترتیب با $f_{ij,t}^p$ و $f_{ij,t}^q$ نشان داده شده است. شاخص انحراف ولتاژ با $(\delta_{n,t})$ نشان داده می‌شود که برابر با $|1 - v_{n,t}|$ است. $p_{n,t}^{DG}$ برابر با قدرت منابع DG با سوخت فسیلی و c^d برابر با هزینه انتشار است. کاهش توان

معادلات (۱۴) و (۱۵) تغییرات بار فعال را نشان می‌دهند و معادلات (۱۶) و (۱۷) تغییرات بار راکتیو ریزشکه را در مسئله پاسخ تقاضا نشان می‌دهند. $d_{n,t}^q$ و $d_{n,t}^p$ به ترتیب تقاضاهای فعال و راکتیو اولیه ریزشکه (بدون تغییر) هستند. مقدار درصد مجاز تغییرات بار با τ نشان داده شده است.

$$\sum_{n \in N} \bar{d}_{n,t}^p = \sum_{n \in N} d_{n,t}^p \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$d_{n,t}^p - d_{n,t}^p \tau \leq \bar{d}_{n,t}^p \leq d_{n,t}^p + d_{n,t}^p \tau \quad \forall n \in N, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{n \in N} \bar{d}_{n,t}^q = \sum_{n \in N} d_{n,t}^q \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$d_{n,t}^q - d_{n,t}^q \tau \leq \bar{d}_{n,t}^q \leq d_{n,t}^q + d_{n,t}^q \tau \quad \forall n \in N, t \in T \quad (17)$$

مدل سازی سیستم ذخیره انرژی با معادلات (۱۸) تا (۲۱) مشخص شده است. قدرت تخلیه و شارژ باتری ها در (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است که x_n و $z_{n,t}$ به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت باتری و ظرفیت انرژی باتری هستند. نابرابری (۲۰) محدودیت انرژی در باتری را نشان می‌دهد و معادله (۲۱) انرژی موجود در هر ساعت باتری را نشان می‌دهد.

$$0 \leq p_{n,t}^{dis} \leq x_n z_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (18)$$

$$0 \leq p_{n,t}^{ch} \leq x_n (1 - z_{n,t}) \quad \forall n \in N, t \in T \quad (19)$$

$$0 \leq e_{n,t} \leq x_n \quad \forall n \in N, t \in T \quad (20)$$

$$e_{n,t} = e_{n,t-1} + p_{n,t}^{ch} \eta_n^{ess} - \frac{p_{n,t}^{dis}}{\eta_n^{ess}} \quad (21)$$

روابط (۲۲) تا (۳۳) مدل سازی EVs در ریزشکه را نشان می‌دهد. انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری ($e_{n,t}^{net-ev}$) در EV با توجه به راندمان هر باتری در (۲۲) نشان داده شده است. در رابطه (۲۲)، $p_{n,t}^{dis-ev}$ و $p_{n,t}^{ch-ev}$ به ترتیب برابر با دشارژ و توان شارژ باتری EV هستند، و همچنین η_n^{ev} راندمان شارژ باتری EV را نشان می‌دهد. معادله (۲۳) میزان توان تزریقی و

اندازه را نشان می‌دهند. $t_{n,t}^{vr}$ اندازه تب تنظیم کننده ولتاژ $(VR)^{vi}$ را نشان می‌دهد و N_{vr} برابر مجموعه گره‌هایی است که VR روی آنها نصب شده است. نابرابری (۶) حداقل و حداکثر تغییرات تب VR را نشان می‌دهد. بر این اساس، اندازه ولتاژ گره ای که OLTC در آن قرار دارد در رابطه (۷) و تغییرات آن در نابرابری (۸) نشان داده شده است. متغیر $t_{n,t}^{oltc}$ اندازه تب OLTC را نشان می‌دهد و N_{oltc} برابر با مجموعه گره‌هایی است که OLTC روی آنها نصب شده است.

$$\underline{v}_n \leq v_{n,t} \leq \bar{v}_n \quad \forall n \in N, t \in T \quad (4)$$

$$v_{n,t} = 1 \times t_{n,t}^{vr} \quad \forall n \in N_{vr}, t \in T \quad (5)$$

$$\underline{t}^{vr} \leq t_{n,t}^{vr} \leq \bar{t}^{vr} \quad \forall n \in N_{vr}, t \in T \quad (6)$$

$$v_{n,t} = 1 \times t_{n,t}^{oltc} \quad \forall n \in N_{oltc}, t \in T \quad (7)$$

$$\underline{t}^{oltc} \leq t_{n,t}^{oltc} \leq \bar{t}^{oltc} \quad \forall n \in N_{oltc}, t \in T \quad (8)$$

نابرابری های (۹) و (۱۰) به ترتیب محدودیت های بهره-برداری خازن ها و راکتورهای شنت را نشان می‌دهند.

$$\underline{q}^{sc} \leq q_{n,t}^{sc} \leq \bar{q}^{sc} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (9)$$

$$\underline{q}^{sr} \leq q_{n,t}^{sr} \leq \bar{q}^{sr} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (10)$$

نابرابری‌های (۱۱) تا (۱۳) به ترتیب محدودیت‌های بهره-برداری DG و منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهند.

$$\underline{p}^{DG} \leq p_{n,t}^{DG} \leq \bar{p}^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (11)$$

$$\underline{q}^{DG} \leq q_{n,t}^{DG} \leq \bar{q}^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (12)$$

$$0 \leq p_{n,t}^r \leq \bar{p}_{n,t,s}^r \quad \forall n \in N, t \in T \quad (13)$$

$$e_{n,t}^{ev} = e_{n,t-1}^{ev} - e_{n,t}^{net\,ev} - (1 - n_{n,t}^{ev})dr_{n,t}^{ev} \quad (27)$$

$$e_{n,t}^{ev} \leq e_{n,t}^{ev} \leq \bar{e}_{n,t}^{ev} \quad (28)$$

$$e_{n,t=1}^{ev} = e_{n,t=24}^{ev} \quad (29)$$

$$e_{n,t=1}^{net\,ev} = e_{n,t=24}^{net\,ev} \quad (30)$$

$$c_{n,t}^{ev} = n_{n,t}^{ev} \sum_{k=1}^K \beta_{n,k}^{ev} p_{n,t,k}^{ev} \quad (31)$$

$$n_{n,t}^{ev} (e_{n,t}^{ev} - e_{n,t-1}^{ev}) \geq - \sum_{k=1}^K p_{n,t,k}^{ev} \quad (32)$$

$$n_{n,t}^{ev} (e_{n,t}^{ev} - e_{n,t-1}^{ev}) \leq \sum_{k=1}^K p_{n,t,k}^{ev} \quad (32)$$

$$0 \leq p_{n,t,k}^{ev} \leq \bar{p}_{t,k}^{ev} \quad (33)$$

۳- الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله یک الگوریتم تکاملی جدید بنام الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده (LPB) برای حل مدل پیشنهادی انتخاب شده است. الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده یک الگوریتم تکاملی است که بر پایه رفتار و عملکرد یادگیرنده‌ها الهام گرفته است. الگوریتم LPB برای حل مسائل بهینه‌سازی طراحی شده است. در الگوریتم LPB، ابتدا جمعیتی از فارغ‌التحصیلان که به عنوان یادگیرنده‌ها در نظر گرفته می‌شوند، به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از پارامتری به نام احتمال تقسیم v_i ، درصدی از این یادگیرنده‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. سپس تابع برازندگی (فیتنس) هر یادگیرنده انتخاب شده محاسبه می‌شود و آنها مرتب می‌شوند. با توجه به فیتنس، یادگیرنده‌ها به دو گروه خوب و بد تقسیم می‌شوند. گروه خوب شامل یادگیرنده‌هایی است که عملکرد بهتری دارند (معدل بالاتر)، و گروه بد شامل بقیه یادگیرنده‌ها است. سپس، فیتنس یادگیرنده‌ها در جمعیت اصلی محاسبه و فیلتر می‌شود. یادگیرنده‌هایی که فیتنس آنها کمتر یا مساوی با بالاترین فیتنس در گروه بد است، به گروه بد منتقل می‌شوند. بقیه یادگیرنده‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروهی که فیتنس آنها کمتر یا مساوی با بالاترین فیتنس در گروه خوب است

دریافتی از یا به ریزشکه توسط EV ها را نشان می دهد که با مقدار شارژ و دشارژ باتری محاسبه می شود. وضعیت (SOC) در (۲۴) نشان داده شده است، که $I_{n,t}^{ch\,ev}$ و $I_{n,t}^{dis\,ev}$ به ترتیب وضعیت دشارژ و شارژ را نشان می دهد. همچنین $n_{n,t}^{ev}$ برابر است با وضعیت وسیله نقلیه به شبکه (V2G) اگر برابر با ۱ باشد خودرو به ریزشکه متصل است و در غیر این صورت جدا می شود. روابط (۲۵) و (۲۶) به ترتیب محدودیت قدرت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی را نشان می دهد، $\bar{p}_{n,t}^{ch\,ev}$ و $\bar{p}_{n,t}^{dis\,ev}$ به ترتیب برابر با حداقل و حداکثر توان شارژ EV ها و $\underline{p}_{n,t}^{dis\,ev}$ و $\bar{p}_{n,t}^{dis\,ev}$ برابر با حداقل و حداکثر توان دشارژ هستند. معادله (۲۷) وضعیت انرژی (SOE) را در باتری EV ها $e_{n,t}^{ev}$ نشان می دهد، که در آن $dr_{n,t}^{ev}$ نیاز انرژی EV ها را برای رانندگی نشان می دهد. معادله (۲۸) محدودیت ظرفیت انرژی باتری در خودروهای برقی را انجام می دهد که باید بین حداقل $e_{n,t}^{ev}$ و حداکثر $\bar{e}_{n,t}^{ev}$ باشد. روابط (۲۹) و (۳۰) انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری EV و انرژی موجود باتری EV در ساعات اول و آخر را در نظر می گیرند. معادلات (۳۱) تا (۳۳) منحنی های هزینه شارژ و دشارژ باتری های EV را نشان می دهد. در اینجا، $c_{n,t}^{ev}$ برابر هزینه بهره‌برداری EV ها و $\beta_{n,k}^{ev}$ برابر شیب قطعه k برای خطی کردن منحنی هزینه است و $p_{n,t,k}^{ev}$ برابر با توان قطعه k از EV ها است. در نهایت $\bar{p}_{t,k}^{ev}$ برابر با حداکثر توان در نظر گرفته شده برای قطعه k در خطی سازی است و همچنین k شاخص مقدار قطعات منحنی و K مجموعه آن است.

$$e_{n,t}^{net\,ev} = p_{n,t}^{dis\,ev} - \eta_n^{ev} p_{n,t}^{ch\,ev} \quad (22)$$

$$p_{n,t}^{ev} = p_{n,t}^{dis\,ev} - p_{n,t}^{ch\,ev} \quad (23)$$

$$I_{n,t}^{dis\,ev} + I_{n,t}^{ch\,ev} = n_{n,t}^{ev} \quad (24)$$

$$I_{n,t}^{ch\,ev} \underline{p}_n^{ch\,ev} \leq p_{n,t}^{ch\,ev} \leq I_{n,t}^{ch\,ev} \bar{p}_n^{ch\,ev} \quad (25)$$

$$I_{n,t}^{dis\,ev} \underline{p}_n^{dis\,ev} \leq p_{n,t}^{dis\,ev} \leq I_{n,t}^{dis\,ev} \bar{p}_n^{dis\,ev} \quad (26)$$

- و گروهی که فیتنس آنها بیشتر از بالاترین فیتنس در گروه خوب است. سپس تعدادی از یادگیرنده‌ها بر اساس تعداد مشخص شده توسط دپارتمان انتخاب می‌شوند. اگر تعداد یادگیرنده‌ها در گروه خوب و گروه کامل کمتر از تعداد مورد نیاز دپارتمان باشد، دپارتمان باید تصمیم بگیرد آیا باید یادگیرنده‌های دیگری را با عملکرد کمتر پذیرش کند یا خیر. اگر تصمیم بگیرند یادگیرنده‌های دیگری را پذیرش کنند، از گروه بد یادگیرنده‌های بیشتری انتخاب می‌شود. الگوریتم LPB با توجه به طراحی خاص خود و استفاده از رفتار و عملکرد یادگیرنده‌ها، قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی را دارد و در بسیاری از موارد نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های مقایسه‌ای مانند GA، DA و PSO ارائه می‌دهد.
- در زیر، شرحی از مدل ریاضی الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده (LPB) ارائه شده است:
- الف) تعریف متغیرها

- M - جمعیت فارغ‌التحصیلان (یادگیرنده‌ها)
- M_g - جمعیت خوب (یادگیرنده‌های با عملکرد بالا)
- M_b - جمعیت بد (یادگیرنده‌های با عملکرد پایین)
- M_p - جمعیت کامل (یادگیرنده‌های با عملکرد بسیار بالا)
- N - تعداد یادگیرنده‌های مورد نیاز توسط دپارتمان
- dp - احتمال تقسیم
- ب) مدل ریاضی الگوریتم پیشنهادی
- مرحله اول: تولید اولیه جمعیت
- جمعیت M به صورت تصادفی تولید می‌شود.

مرحله دوم: تقسیم جمعیت و محاسبه فیتنس

نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران سال سیزدهم شماره ۱ شماره پیاپی ۳۴ بهار ۱۴۰۳

همانطور که مشاهده می‌شود، خازن و راکتور موازی در گره‌های ۲، ۵، ۹، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۵ و ۳۱ واقع شده‌اند. تنظیم‌کننده ولتاژ واقع در گره ۱ و تنظیم‌کننده OLTC در گره ۱۸ نصب شده است. همچنین، ایستگاه خودروهای الکتریکی در گره‌های ۱۶ و ۲۹ قرار دارد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در گره‌های ۲، ۱۰، ۲۰، ۲۳ و ۳۰ قرار دارند، که از نوع لیتیومی با راندمان ۹۰ درصد می‌باشد. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک در گره‌های ۱۲، ۱۶، ۲۱، ۲۵ و ۲۹ قرار دارند. در نهایت، نیروگاه‌های سوخت فسیلی در گره‌های ۱، ۶، ۱۳، ۱۴، ۲۳ و ۳۲ نصب شده‌اند. برای نمایش مدیریت انرژی در ریزشکه مورد نظر، موارد زیر برای تحلیل در نظر گرفته می‌شوند.

مورد ۱: بدون در نظر گرفتن پاسخ به تقاضا.

مورد ۲: با در نظر گرفتن پاسخ به تقاضا و حداکثر ۵٪ تغییر بار.

مورد ۳: با در نظر گرفتن پاسخ به تقاضا و حداکثر ۱۰٪ تغییر بار.

مورد ۴: با در نظر گرفتن پاسخ به تقاضا و حداکثر ۲۰٪ تغییر بار.

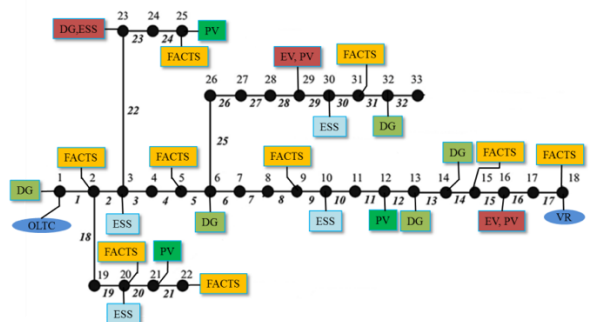
جدول (۱) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج هر مورد و تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های شبکه و ظرفیت منابع نشان داده شده است. نتایج به طور کلی نشان می‌دهد که تغییرات بار در مسئله پاسخ به تقاضا تأثیر قابل توجهی در بهبود شاخص‌های میکروگرید دارد. همچنین، باعث استفاده کمتر از منابع DG، باتری‌ها و دستگاه‌های D-FACTS می‌شود. یک نکته دیگر که می‌توان از نتایج جدول (۱) استنباط کرد، استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر با برنامه

LPB الگوریتمی است که با الهام گرفتن از فرآیند پذیرش فارغ‌التحصیلان از دبیرستان در دانشگاه و تغییراتی که یادگیرنده‌ها در رفتارهای تحصیلی خود باید انجام دهند تا عملکرد تحصیلی خود را در دانشگاه بهبود بخشند، طراحی شده است. با استفاده از فرآیندهایی مانند تقسیم جمعیت، محاسبه فیتنس و انتخاب یادگیرنده‌ها، LPB تلاش می‌کند تا بهترین جواب را در مسائل بهینه‌سازی ارائه دهد. این الگوریتم مزایایی مانند ترکیب بهره‌برداری و اکتشاف، قابلیت استفاده گسترده و سادگی در پیاده‌سازی را داراست. با این وجود، برای استفاده موثر از LPB در حل مسائل، تنظیمات و پارامترها به مسئله و استراتژی‌های مربوطه نیاز است.

در بخش بعدی نتایج مربوط به شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور نمایش اثربخشی مدل پیشنهادی در مدیریت بهینه انرژی در طول ۲۴ ساعت در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع DG، خازن‌ها و راکتورهای جانبی، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، OLTC و با در نظر گرفتن بارهای هوشمند همراه با خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره انرژی، ریزشکه ۳۳-باس مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۱) نمایش‌دهنده نمودار این ریزشکه است.



شکل (۱) ریزشکه ۳۳ گره پیشنهادی

پاسخ به تقاضا صورت گرفته است. به عبارت دیگر، مدیریت بار باعث استفاده حداکثر از منابع تجدیدپذیر می‌شود.

جدول (۱) مقایسه تأثیر پاسخ به تقاضا در ریزشبه ۳۳ گره در یک روز

	مورد ۱	مورد ۲	مورد ۳	مورد ۴
تلفات (kWh)	۲۸۶۰	۲۸۰۰	۲۷۵۰	۲۶۲۱
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۰۹۶	۰.۰۰۸۶	۰.۰۰۸۰	۰.۰۰۷۶
قطع بار (kWh)	۰	۰	۰	۰
آلایندگی (kg/kWh)	۱۶.۵	۱۶.۶	۱۶.۲	۱۵.۷
حداکثر تولید واحدها (kW)	۹۱۰	۹۱۲	۸۴۰	۸۰۰
حداکثر تولید خازن-ها (kVAr)	۴۸۰	۴۵۰	۴۲۰	۳۷۰
حداکثر تولید راکتورها (kVAr)	۲۳۰	۲۲۵	۲۳۰	۲۳۳
حداکثر ظرفیت باتری‌ها (kWh)	۲۷۳۲	۲۶۴۰	۲۵۶۰	۲۴۶۸
حداکثر تولید منابع تجدیدپذیر (MWh)	۲۵.۷۱	۲۵.۷۲	۲۵.۷۷	۲۵.۸۷

در مورد ۱، از دسترسی ۲۰۸۶ مگاوات ساعت برق در یک روز استفاده می‌شود. همچنین، انحراف ولتاژ برابر با ۰.۰۰۹۶ واحد برای یک دوره است و هیچ کاهش باری در این مورد وجود ندارد. آلایندگی DG هم برابر با ۱۶.۵ کیلوگرم/کیلووات ساعت است و ظرفیت حداکثر DG، خازن و راکتور شنت برابر با ۹۱۰ کیلووات، ۴۸۰ کیلووار و ۲۳۰ کیلووار می‌باشد. همچنین، ظرفیت انرژی حداکثر باتری در این مورد برابر با ۲۷۳۲ کیلووات ساعت است. در نهایت، مجموع برق استفاده شده از منابع تجدیدپذیر برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۵.۷۱ مگاوات است.

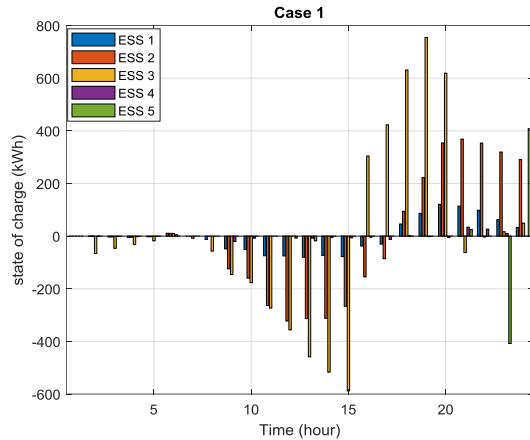
در مورد ۲، از دسترسی ۲۰۸ مگاوات ساعت برق در یک روز استفاده می‌شود. همچنین، انحراف ولتاژ برابر با ۰.۰۰۸۶ واحد برای یک دوره است و هیچ کاهش باری در این مورد وجود

ندارد. آلایندگی DG هم برابر با ۱۶.۶ کیلوگرم/کیلووات ساعت است و ظرفیت حداکثر DG، خازن و راکتور شنت برابر با ۹۱۲ کیلووات، ۴۵۰ کیلووار و ۲۲۵ کیلووار می‌باشد. همچنین، ظرفیت انرژی حداکثر باتری در این مورد برابر با ۲۶۴۰ کیلووات ساعت است. در نهایت، مجموع برق استفاده شده از منابع تجدیدپذیر برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۵.۷۲ مگاوات است. در این مورد، از نظر مقدار از دست رفته برق و انحراف ولتاژ، به ترتیب ۲ و ۱۰٪ بهبود نسبت به مورد ۱ داشته است.

در مورد ۳، از دسترسی ۲۰۷۵ مگاوات ساعت برق در یک روز استفاده می‌شود. همچنین، انحراف ولتاژ برابر با ۰.۰۰۸۰ واحد برای یک دوره است و هیچ کاهش باری در این مورد وجود ندارد. آلایندگی DG هم برابر با ۱۶.۰۲ کیلوگرم/کیلووات ساعت است و ظرفیت حداکثر DG، خازن و راکتور شنت برابر با ۸۴۰ کیلووات، ۴۲۰ کیلووار و ۲۳۰ کیلووار می‌باشد. همچنین، ظرفیت انرژی حداکثر باتری در این مورد برابر با ۲۵۶۰ کیلووات ساعت است. در نهایت، مجموع برق استفاده شده از منابع تجدیدپذیر برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۵.۷۷ مگاوات است. در این مورد، از نظر مقدار از دست رفته برق و انحراف ولتاژ، به ترتیب ۴ و ۱۶٪ بهبود نسبت به مورد ۱ داشته است.

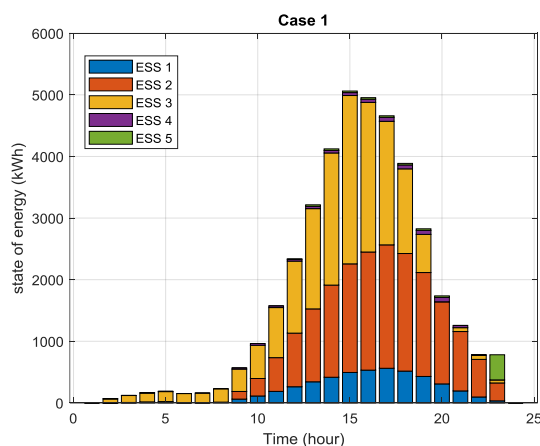
در مورد ۴، از دسترسی ۲۰۶۲ مگاوات ساعت برق در یک روز استفاده می‌شود. همچنین، انحراف ولتاژ برابر با ۰.۰۰۷۶ واحد برای یک دوره است و هیچ کاهش باری در این مورد وجود ندارد. آلایندگی ارات DG هم برابر با ۱۵.۷ کیلوگرم/کیلووات ساعت است و ظرفیت حداکثر DG، خازن و راکتور شنت برابر با ۸۰۰ کیلووات، ۳۷۰ کیلووار و ۲۳۳ کیلووار می‌باشد. همچنین، ظرفیت انرژی حداکثر باتری در این مورد برابر با ۲۴۶۸ کیلووات ساعت است. در نهایت، مجموع برق استفاده شده از منابع تجدیدپذیر برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۵.۸۷ مگاوات است. در این مورد، از نظر مقدار از

بار بالا وجود ندارد، شارژ می‌شوند و در ساعات اوج تخلیه می‌شوند. همچنین می‌توان گفت که شارژ و تخلیه بهینه باتری برای بهبود تابع هدف مسئله انجام شده است.



شکل (۳) وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها

شکل (۴) دقت عملکرد باتری و میزان انرژی در آن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح انرژی در باتری‌ها با شارژ افزایش یافت و در نهایت با تخلیه باتری‌ها کاهش یافت. باتری‌های شماره ۲ و ۳ که به ترتیب در گره‌های ۲۰ و ۳۰ قرار دارند، مسئول بخشی بزرگتر از ذخیره‌سازی انرژی هستند.

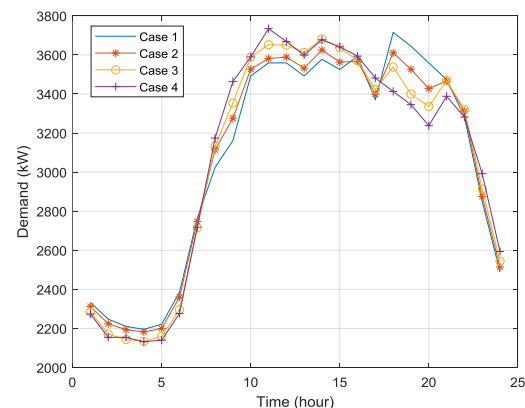


شکل (۴) وضعیت انرژی باتری‌ها

دست رفته برق و انحراف ولتاژ، به ترتیب ۸ و ۲۰٪ بهبود نسبت به مورد ۱ داشته است.

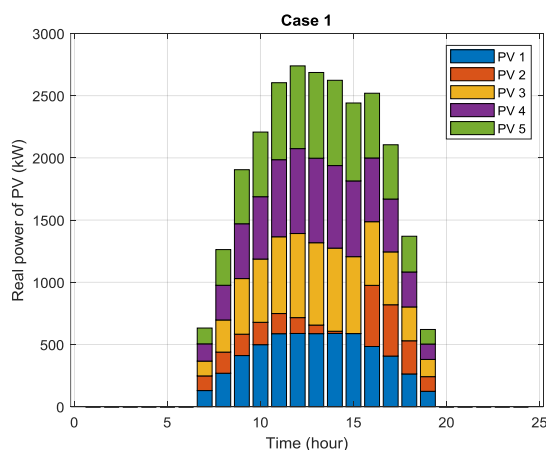
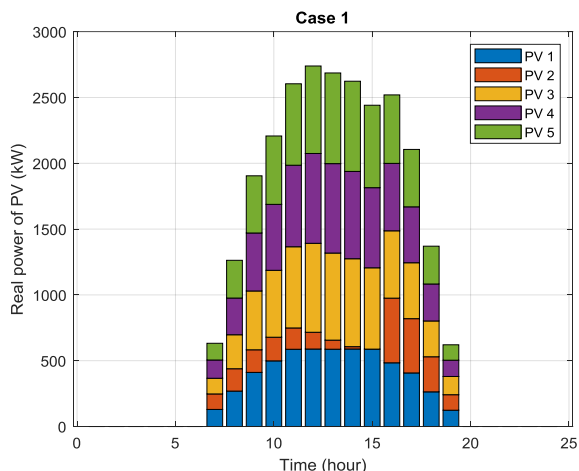
بطور کلی، نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در هماهنگی منابع موجود در ریزشکه همراه با برنامه پاسخ به تقاضا، بسیار موثر است و همچنین مشاهده می‌شود که در هیچ یک از موارد، هیچ گونه کاهش باری صورت نگرفته است.

شکل (۲) نمودار تقاضای روزانه در هر مورد را نشان می‌دهد. منحنی آبی تقاضای بار در مورد اول را نشان می‌دهد. در این مورد، هیچ پاسخ به تقاضا وجود ندارد و هرگز تغییر نکرده است. منحنی قرمز تقاضای بار در مورد دوم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توان بار بالا از ۳۷۰۰ به ۳۶۰۰ کیلووات با یک تغییر ۰.۵٪ کاهش یافته است. به همین شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش تغییرات بار، توان بار بالا در بازه زمانی ۱۸:۰۰ تا ۲۰:۰۰ کاهش یافته است. در نهایت، شکل (۲) عملکرد دقیق مدلسازی پاسخ به تقاضا را نشان می‌دهد.



شکل (۲) مقایسه برنامه پاسخ تقاضا در هر مورد

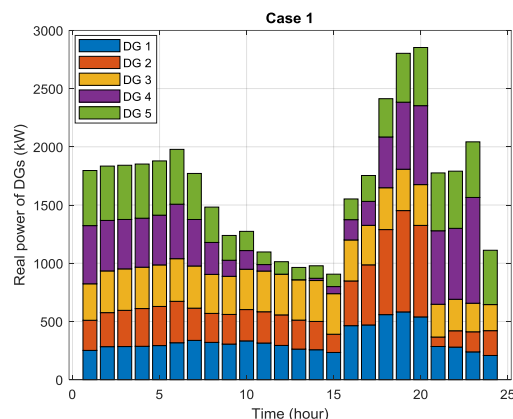
شکل (۳) وضعیت بهینه‌سازی شارژ و دشارژ باتری در مورد اول ریزشکه را نشان می‌دهد. در این شکل، محور عمودی منفی و مثبت به ترتیب نشان دهنده شارژ و تخلیه باتری است. مشاهده می‌شود که باتری‌ها در ابتدای روز هنگامی که



شکل (۶) وضعیت تولید منابع انرژی تجدیدپذیر در هر ساعت

شکل (۷) وضعیت بهینه‌سازی شارژ و دشارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این شکل، محور عمودی منفی نشان‌دهنده شارژ خودروهای الکتریکی و محور عمودی مثبت نشان‌دهنده تخلیه خودروهای الکتریکی است.

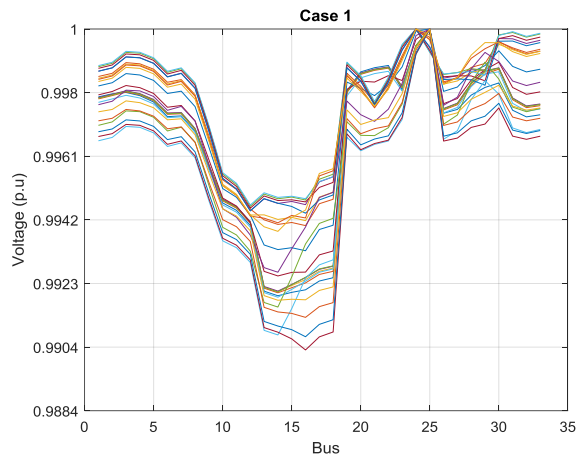
شکل (۵) توان واقعی هر DG ریزشبهه در هر ساعت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ساعاتی که منابع انرژی تجدیدپذیر (از ساعت ۷ صبح تا ۴ بعد از ظهر) در حال تولید هستند، تولید DGها کاهش یافته است تا آلودگی کاهش یابد.



شکل (۵) وضعیت تولید DGها در هر ساعت

شکل (۶) توان منابع انرژی تجدیدپذیر عملکردی را در مورد اول نشان می‌دهد. بیشترین میزان عملکرد از منابع انرژی تجدیدپذیر به ترتیب به شماره‌های ۵، ۱، ۴، ۳ و ۲ تعلق دارد. طبق جدول (۱)، بیشترین استفاده از منابع تجدیدپذیر در مورد ۴ است. طبق شکل (۶)، منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبهه تنها از ساعت ۷:۰۰ صبح تا ۷:۰۰ شب تولید می‌کنند. بنابراین، در طول این ساعات، تولید واحدهای DG بر اساس شکل (۵) کاهش یافته است.

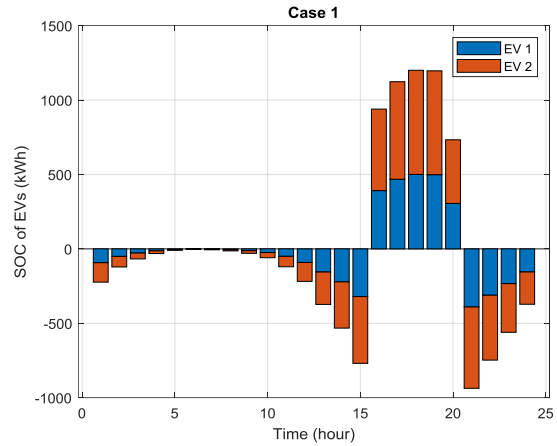
شکل (۹) ولتاژ گره‌های ریزشبه در هر ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، پایین‌ترین ولتاژ ریزشبه متعلق به گره شماره ۱۶ است که برابر با ۰٫۹۹۰۴ واحد ولتاژ نسبت به ولتاژ تحت نظارت (p.u) است و بالاترین ولتاژ متعلق به گره ۲۵ است که برابر با ۱ واحد p.u است. تغییرات ولتاژ در هر ساعت در هر گره نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بالاترین تغییرات ولتاژ مربوط به گره‌های ۱۴ تا ۱۸ است و کمترین تغییرات مربوط به گره‌های ۲۰ تا ۲۵ است.



شکل (۹) ولتاژ ریزشبه در هر ساعت

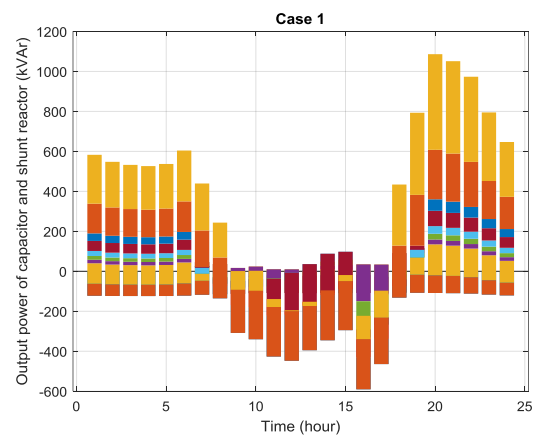
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی در ریزشبه‌ها عملکرد قابل قبولی دارد. به علاوه، هیچ قطع باری در ریزشبه رخ نداده است، که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی عملکرد خوبی در عملکرد ریزشبه‌های جزیره‌ای دارد.

به منظور نشان دادن برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی موجود کلاسیک نیز مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با الگوریتم‌های کلاسیک ژنتیک، ازدحام ذرات و جایا انجام شده است. در جدول (۲) نتایج مورد اول با الگوریتم‌های مشابه مقایسه شده است.



شکل (۷) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در هر ساعت

شکل (۸) توان مصرفی جبران‌کننده‌های توان برق تناوبی در ریزشبه را نشان می‌دهد. محور مثبت نشان دهنده تزریق توان برق تناوبی توسط خازن‌های جانبی و محور منفی نشان دهنده جذب توان برق تناوبی توسط راکتورهای جانبی در ریزشبه است. به علم است که در زمان‌هایی که تولید منابع تجدیدپذیر بالا و احتمال افزایش ولتاژ وجود دارد، راکتورهای جانبی توان برق تناوبی را جذب می‌کنند تا ولتاژ ریزشبه را کنترل کنند.



شکل (۸) توان خازن و راکتورهای شنت در مورد ۱

مقاله، منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت غیرقطعی و با روش مبتنی بر سناریو در تابع هدف مسئله مدلسازی شده‌اند. مدلسازی پیشنهادی با استفاده از الگوریتم تکاملی جدید بنام الگوریتم رفتار مبتنی بر عملکرد یادگیرنده که جواب‌های بهینه سراسری را تضمین می‌کند. ریزشبه استاندارد ۳۳ گره برای تحلیل انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل پیشنهادی در هماهنگی بهینه دستگاه‌های مختلف برای کاهش اتلافات، انحراف ولتاژ و همچنین کاهش قطع بار بسیار موثر است. برای ادامه این مطالعه، موارد زیر پیشنهاد می‌شوند:

۱. ارزیابی تأثیر نوسان قیمت برق در مدلسازی و بهبود استراتژی‌های مدیریت انرژی.
۲. توسعه مدل پیشنهادی به یک مدل بهینه‌سازی چند ناحیه‌ای برای ادغام و ترکیب چند ریزشبه.
۳. مدلسازی شبکه گاز در کنار ریزشبه و بررسی اثرات خرید گاز برای واحدهای DG مبتنی بر گاز.

مراجع

- [1] Abbas Langarizadeh, Saeid Hasheminejad, "A new differential algorithm based on S-transform for the micro-grid protection," *Electric Power Systems Research*, Volume 202, 107590, 2022.
- [2] C. Nagaraj, Reduction of power conversion losses in AC-DC coupled hybrid micro-grid under grid distorted voltage scenario," *Electric Power Systems Research*, Volume 210, 108101, 2022.
- [3] J. Peng, B. Fan and W. Liu, "Voltage-Based Distributed Optimal Control for Generation Cost Minimization and Bounded Bus Voltage Regulation in DC Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 106-116, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3013303.
- [4] Ting Liang, Paul A. Webley, Yi-Chung Chen, Xiaohui She, Yongliang Li, Yulong Ding, The optimal design and operation of a hybrid renewable micro-grid with the decoupled liquid air energy storage, *Journal of Cleaner Production*, Volume 334, 130189, 2022.
- [5] B. Pournazarian, R. Sangrody, M. Saedian, M. Lehtonen and E. Pouresmaeil, "Simultaneous Optimization of Virtual Synchronous Generators (VSG) Parameters in Islanded Microgrids Supplying Induction Motors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 124972-124985, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111015.

همانطور که بخوبی نشان داده شده است الگوریتم پیشنهادی هم از لحاظ جواب‌های بهینه و هم از لحاظ مدت زمان حل مسئله بهتر از روش‌های مشابه عملکرده است، که این مهم برتری الگوریتم پیشنهادی را در حل مسئله بهینه‌سازی ارائه شده نشان می‌دهد.

جدول (۲) مقایسه الگوریتم پیشنهادی با روش‌های دیگر در مورد مطالعاتی اول

الگوریتم پیشنهادی	GA	PSO	JAYA	
تلفات (kWh)	۲۸۶۰	۲۸۹۳	۲۸۸۴	۲۸۷۱
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۰۹۶	۰.۰۰۹	۰.۰۰۹	۰.۰۰۹
آلاینده‌گی (kg/kWh)	۱۶.۵	۱۷.۱	۱۶.۸	۱۷
زمان حل (ثانیه)	۲۱	۳۹	۴۱	۳۲

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای مدیریت روزانه انرژی در ریزشبه‌ها ارائه شد. یک تابع چند هدفه شامل کاهش کاهش بار، کاهش اتلاف توان، کاهش انحراف ولتاژ، کاهش انتشارات، و کاهش قطعی از منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شد. در مدل پیشنهادی، مسئله مدیریت سمت تقاضا نیز مورد ملاحظه قرار می‌گیرد تا مدیریت بهتر بار و انرژی در ریزشبه با حضور مجموعه‌ای از منابع تجدیدپذیر و فسیلی، سیستم‌های ذخیره انرژی و خودروهای الکتریکی انجام شود. مدیریت انرژی پیشنهادی شامل هماهنگی بهینه بین منابع تولید توزیع شده، منابع انرژی تجدیدپذیر، خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره انرژی، خازن‌ها و راکتورهای جانبی، تنظیم کننده‌های ولتاژ و OLTC با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا است. در این

- IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 1, pp. 578-590, March 2022, doi: 10.1109/JSYST.2020.3047673.
- [18] Sizhou Sun, Chenxi Wang, Yu Wang, Xuehua Zhu, Huacai Lu, "Multi-objective optimization dispatching of a micro-grid considering uncertainty in wind power forecasting," Energy Reports, Volume 8, Pages 2859-2874, 2022..
- [19] Arvin Ghasemi, Mostafa Sedighizadeh, Ahmad Fakharian, Mohammad Reza Nasiri, Intelligent voltage and frequency control of islanded micro-grids based on power fluctuations and communication system uncertainty, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 143, 108383, 2022.
- [20] X. Dong, X. Li and S. Cheng, "Energy Management Optimization of Microgrid Cluster Based on Multi-Agent-System and Hierarchical Stackelberg Game Theory," IEEE Access, vol. 8, pp. 206183-206197, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3037676.
- [21] M. A. Ebrahim, R. M. A. Fattah, E. M. M. Saied, S. M. A. Maksoud and H. E. Khashab, "Real-Time Implementation of Self-Adaptive Salp Swarm Optimization-Based Microgrid Droop Control," IEEE Access, vol. 8, pp. 185738-185751, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030160.
- [22] Z. Fan, B. Fan, J. Peng and W. Liu, "Operation Loss Minimization Targeted Distributed Optimal Control of DC Microgrids," IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 4, pp. 5186-5196, Dec. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3035059.
- [23] B. Cao, W. Dong, Z. Lv, Y. Gu, S. Singh and P. Kumar, "Hybrid Microgrid Many-Objective Sizing Optimization With Fuzzy Decision," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 28, no. 11, pp. 2702-2710, Nov. 2020, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.3026140.
- [24] L. Zhang, H. Zheng, Q. Hu, B. Su and L. Lyu, "An Adaptive Droop Control Strategy for Islanded Microgrid Based on Improved Particle Swarm Optimization," IEEE Access, vol. 8, pp. 3579-3593, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960871.
- [25] J. Zhang et al., "Multi-Time Scale Economic Scheduling Method Based on Day-Ahead Robust Optimization and Intraday MPC Rolling Optimization for Microgrid," IEEE Access, vol. 9, pp. 140315-140324, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3118716.
- [26] E.O. Amuta, S.T. Wara, A.F. Agbetuyi, B.A. Sawyerr, "Weibull distribution-based analysis for reliability assessment of an isolated power micro-grid system," Materials Today: Proceedings, 2022.
- [27] Bin Wang, Yupeng Sang, Dual-mode operation control of smart micro grid based on droop strategy," Energy Reports, Volume 8, 2022.
- [28] S. Pannala, N. Patari, A. K. Srivastava and N. P. Padhy, "Effective Control and Management Scheme for Isolated and Grid Connected DC Microgrid," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 6, pp. 6767-6780, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3015819.
- [29] Q. Li et al., "Parallel and Distributed Optimization Method With Constraint Decomposition for Energy Management of Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 6, pp. 4627-4640, Nov. 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3097047.
- [6] A. Raghavan, P. Maan and A. K. B. Shenoy, "Optimization of Day-Ahead Energy Storage System Scheduling in Microgrid Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," IEEE Access, vol. 8, pp. 173068-173078, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025673.
- [7] H. Abubakr et al., "Adaptive LFC Incorporating Modified Virtual Rotor to Regulate Frequency and Tie-Line Power Flow in Multi-Area Microgrids," IEEE Access, vol. 10, pp. 33248-33268, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161505.
- [8] Reza Sepehrzad, Soheyl Nakhaeisharif, Ahmed Al-Durra, Mehdi Allahbakhshi, Alireza Moridi, "Islanded micro-grid frequency control based on the optimal-intelligent lyapunov algorithm considering power dynamic and communication uncertainties," Electric Power Systems Research, Volume 208, 107917, 2022.
- [9] Y. Shan, J. Hu and H. Liu, "A Holistic Power Management Strategy of Microgrids Based on Model Predictive Control and Particle Swarm Optimization," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 8, pp. 5115-5126, Aug. 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3123532.
- [10] N. Salehi, H. Martínez-García, G. Velasco-Quesada and J. M. Guerrero, "A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids," IEEE Access, vol. 10, pp. 15935-15955, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.
- [11] T. -T. Nguyen, T. -K. Dao, T. -T. -T. Nguyen and T. -D. Nguyen, "An Optimal Microgrid Operations Planning Using Improved Archimedes Optimization Algorithm," IEEE Access, vol. 10, pp. 67940-67957, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3185737.
- [12] D. Dabhi and K. Pandya, "Uncertain Scenario Based MicroGrid Optimization via Hybrid Levy Particle Swarm Variable Neighborhood Search Optimization (HL_PS_VNSO)," IEEE Access, vol. 8, pp. 108782-108797, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999935.
- [13] Reza Sepehrzad, Mostafa Khojasteh Rahimi, Ahmed Al-Durra, Mehdi Allahbakhshi, Alireza Moridi, Optimal energy management of distributed generation in micro-grid to control the voltage and frequency based on PSO-adaptive virtual impedance method," Electric Power Systems Research, Volume 208, 107881, 2022.
- [14] M. Yang, J. Wang and J. An, "Day-Ahead Optimization Scheduling for Islanded Microgrid Considering Units Frequency Regulation Characteristics and Demand Response," IEEE Access, vol. 8, pp. 7093-7102, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963335.
- [15] W. Yuan, Y. Wang and Z. Chen, "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, Sept. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3080141.
- [16] M. Alramlawi and P. Li, "Design Optimization of a Residential PV-Battery Microgrid With a Detailed Battery Lifetime Estimation Model," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 2, pp. 2020-2030, March-April 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2965894.
- [17] P. Xie et al., "Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review,"

- [32] Sarlak M, Samimi A, Nikzad M, Salemi A H. Optimal Operation of Micro-Grid Including Electrical and Thermal Energies Considering Uncertainties of Generation and Consumption. *ieijqp* 2023; 12 (2) :12-25
- [33] Ghanaei N, et. al.. Bi-Level Optimization of Microgrids Considering Electric Vehicles under the Worst Conditions of Renewable Resource Output. *ieijqp* 2023;
- [30] JiaNan Shan, RenXiang Lu, "Multi-objective economic optimization scheduling of CCHP micro-grid based on improved bee colony algorithm considering the selection of hybrid energy storage system," *Energy Reports*, Volume 7, Supplement 7, Pages 326-341, 2021.
- [31] Eslami R. A new multi-objective load shedding method to reduce power outages and frequency stability in the islanded microgrid. *ieijqp* 2022; 11 (1) :70-81

^v Distributed generation (DG)

^{vi} On-load tap changing (OLTC)

^{vii} Voltage regulator (VR)

^{viii} division probability

ⁱ Electric vehicle (EV)

ⁱⁱ Mixed integer quadratic programming (MIQP)

ⁱⁱⁱ Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS)

^{iv}