

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.50.9.0>
Research Article

Operation of Micro-Grid for Provide Clean Energy Constrained to System Optimal Reliability

Hosein Hasanshahi, Ph.D. Student, Mehdi Nafar, Assistant Professor, Mohsen Simab, Assistant Professor

Department of Electrical Engineering- Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
hoseinhasanshahi@miau.ac.ir, mnafar@miau.ac.ir, msimab@miau.ac.ir

Abstract

In this paper, the problem of micro-grid (MG) energy management in the presence of distributed generations (DGs) and active loads (ALs) considering operation, economic, pollution and reliability is presented. This scheme includes objective function that is minimized the summation of expected operation cost of MG and DGs, expected pollution cost and outage cost in the N-1 contingency. This problem is constrained to AC power flow equations, MG operation and reliability limits, and operation formulation of DGs and ALs including the demand response program (DRP) and battery. Also, this paper uses the stochastic programming to model uncertainties of load, energy price, renewable DGs (RDGs) generation power and Availability of MG Equipment. Then, to achieve unique reliable optimal solution, it uses hybrid solver of ant-lion optimizer (ALO) and crow search algorithm (CSA). Finally, by implementing of the proposed strategy on a standard MG and obtain numerical results, the capability of the scheme in improving technical and economic indices of the MG along with procuring clean and reliable energy is confirmed.

Keywords: clean energy supply, hybrid evolutionary algorithm, micro-grid operation, microgrid reliability

Received: 5 July 2021

Revised: 29 September 2021

Accepted: 27 November 2021

Corresponding Author: Dr Mehdi Nafar

Citation: H. Hasanshahi, M. Nafar, M. Simab, "Operation of micro-grid for provide clean energy constrained to system optimal reliability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 50, pp. 133-148, September 2022 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.50.9.0>

مقاله پژوهشی

بهره‌برداری ریزشبه در راستای تأمین انرژی پاک مقید به قابلیت اطمینان بهینه سیستم

حسین حسن‌شاهی، دانشجوی دکتری، دکتر مهدی نفر، استادیار، دکتر محسن سیماب، استادیار

گروه مهندسی برق - واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
hoseinhasanshahi@miau.ac.ir, mnafar@miau.ac.ir, msimab@miau.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسأله مدیریت انرژی ریزشبه (MG) در حضور تولیدات پراکنده (DGها) و بارهای اکتیو (ALها) با در نظر گرفتن شاخص‌های بهره‌برداری، اقتصادی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان ارائه می‌شود. این طرح دارای تابع هدفی برابر با کمینه‌سازی مجموع هزینه مورد انتظار بهره‌برداری MG و DGها، هزینه مورد انتظار آلودگی و هزینه خاموشی در شرایط وقوع پشامد N-1 است. این مسأله نیز مقید به معادلات پخش توان ac، محدودیت‌های بهره‌برداری و قابلیت اطمینان MG و فرمول‌بندی بهره‌برداری DGها و ALها شامل طرح پاسخ‌گویی بار (DRP) و باتری است. همچنین از برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، توان تولیدی DGهای تجدیدپذیر (RDGها) و دسترس‌پذیری تجهیزات MG استفاده می‌شود. سپس برای دست‌یابی به راه‌حل بهینه مطمئن با قابلیت پاسخ‌دهی یکتا، از حل‌کننده ترکیبی بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO) و الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) استفاده می‌گردد. در نهایت با اجرای طرح پیشنهادی بر روی یک MG استاندارد و استخراج نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف، قابلیت طرح مذکور در بهبود وضعیت شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی MG در کنار تأمین انرژی پاک با قابلیت اطمینان مطلوب مورد تأیید قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم تکاملی ترکیبی، بهره‌برداری ریزشبه، تأمین انرژی پاک، قابلیت اطمینان ریزشبه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۷/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی نفر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: مرودشت - کیلومتر ۳ بلوار مرودشت - تخت جمشید - دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت

۱- مقدمه

با افزایش روزافزون فناوری‌های دوست‌دار محیط زیست مانند تولیدات پراکنده^۱ (DGها) به‌خصوص DGهای تجدیدپذیر^۲ (RDGها) و بارهای اکتیو^۳ (ALها) مانند سیستم ذخیره‌سازی انرژی^۴ (ESS) و طرح پاسخ‌گویی بار^۵ (DRP)، انتظار می‌رود که درصد قابل توجهی از مصرف‌کننده‌گان انرژی الکتریکی در سیستم توزیع بتوانند توسط منابع محلی مذکور تغذیه شوند. این موضوع علاوه بر اینکه عامل مهمی برای تأمین انرژی پاک خواهد بود، همچنین با اجرای سیستم مدیریت انرژی^۶ (EMS) مناسب در شبکه با در نظر گرفتن هماهنگی دوطرفه منابع مذکور و اپراتور سیستم توزیع^۷ (DSO) می‌توان وضعیت شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه را بهبود داد. به عبارتی دیگر، در اثر مدیریت انرژی DGها و ALها محلی در سیستم توزیع تلفات انرژی شبکه و انحراف ولتاژ در باس‌های مختلف کاهش می‌یابد که این موارد بیانگر بهبود شاخص‌های بهره‌برداری شبکه است. علاوه بر این موارد، حضور منابع محلی در سطح سیستم توزیع باعث کاهش خاموشی‌های مصرف‌کننده‌گان این سیستم در برابر خطاهای داخلی تجهیزات شبکه خواهد شد. لذا انتظار می‌رود که با مدیریت انرژی مناسب این شبکه در حضور DGها و ALها بتوان قابلیت اطمینان آن در شرایط وقوع پیشامد N-1 ارتقاء داد.

در زمینه مباحث مدیریت انرژی و بهره‌برداری بهینه در سیستم توزیع و یا ریزشبه^۸ (MG) تحقیقات و کارهای مختلفی صورت گرفته است. در مرجع [۱]، نویسندگان برنامه‌ریزی و بهره‌برداری تصادفی شبکه توزیع قابل بازآرایی در حضور DGهای تجدیدناپذیر^۹ (NRDGها) جهت دستیابی به شبکه تاب‌آور در برابر زلزله و سیل را مدل‌سازی کرده‌اند. مسأله ارائه شده دارای تابع هدفی برابر با کمینه‌سازی هزینه تاب‌آوری شامل هزینه تعمیر و خاموشی و هزینه برنامه‌ریزی شامل هزینه‌های احداث تجهیزات و هزینه بهره‌برداری منابع و شبکه به‌منظور بهبود وضعیت اقتصادی و تاب‌آوری شبکه است. طرحی همانند مرجع [۱] نیز در مرجع [۲] در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی تصادفی-استوار برای طرح ارائه شده در مرجع [۱] در نظر گرفته‌اند. براساس نتایج به دست آمده در مرجع‌های [۱] و [۲] مشاهده می‌شود که جایابی بهینه منابع و تجهیزات شبکه در کنار مدیریت انرژی منابع سیستم توزیع قابل بازآرایی قادر است که تاب‌آوری صد درصد را برای شبکه به‌دست آورد. همچنین از قابلیت‌های دیگر مدیریت انرژی در سیستم توزیع دستیابی به شبکه منعطف در حضور RDGها است، که این موضوع در مرجع [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳] از باتری‌ها و پارکینگ خودروهای الکتریکی^۱ (EVها) به علت ثابت زمانی بسیار پایین آنها به عنوان منبع انعطاف‌پذیری استفاده شده است، به طوری که آنها توانسته‌اند انعطاف‌پذیری صد درصد برای شبکه توزیع را به‌دست آورند. در مرجع [۴] قابلیت مدیریت انرژی DGها و EVها در قالب هاب انرژی برای بهبود وضعیت بهره‌برداری شبکه‌های الکتریکی، گازی و حرارت مطرح شده است. این منابع با تغذیه محلی مصرف‌کننده‌گان انرژی قادرند تلفات انرژی شبکه‌های مذکور را کاهش دهند، و پروفیل ولتاژ، فشار و دمای صافتر برای این شبکه‌ها به‌دست آورند [۵].

قابل توجه است که عموماً مدل مسأله مدیریت انرژی یک شبکه به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی^۲ (NLP) و یا NLP عدد صحیح^۳ (MINLP) است. در مرجع‌های [۱] الی [۵] از روش تقریب خطی^۴ (LAM) یک مدل برنامه‌ریزی خطی^۵ (LP) و یا LP عدد صحیح^۶ (MILP) برای مسأله اشاره شده استخراج شده است، تا این‌که بتوانند راه‌حل بهینه را در کمترین زمان ممکن به‌دست آورند. ولی براساس گزارش مرجع‌های [۶] الی [۱۰]، خطای محاسباتی برای متغیرهای ولتاژ، توان و تلفات به ترتیب در حدود ۰/۵ درصد، ۲/۵ درصد و ۱۰ درصد است. بنابراین روش تقریب خطی در کنار مزیت پاسخ‌دهی سریع دارای عیب خطای محاسباتی بالا است.

در مرجع [۶] مدل‌سازی همزمان شاخص‌های بهره‌برداری و انعطاف‌پذیری MG در حضور RDGها، باتری‌ها و فنرهای برقی تحت مسأله مدیریت توان MG بیان شده است. براساس گزارش مرجع [۶]، سیستم کوپل باتری و فنر برقی علاوه بر قابلیت تنظیم انعطاف‌پذیری شبکه و مدیریت انرژی خود قادر به کنترل توان راکتیو سیستم و تنظیم ولتاژ باس‌های دارای بار حساس خواهد بود. در مرجع [۷] نیز با استفاده از استراتژی مدیریت توان در شبکه توزیع شامل پارکینگ EVها توانسته است که همزمان وضعیت شاخص‌های بهره‌برداری و کیفیت توان را ارتقاء دهد. در مرجع‌های [۶] و [۷] از روش‌های ریاضی^۹ (MAها) مانند CONOPT و IPOPT [۸] برای حل مسأله غیرخطی مدیریت انرژی و یا توان یک شبکه استفاده شده است. قابل توجه

است که براساس مرجع‌های [۶] و [۷]، راه‌حل بهینه به‌دست آمده از هر حل‌کننده متفاوت است، که این موضوع ناشی از معادله‌های غیرخطی و غیر محدب پخش توان AC^۱(AC-PF) است. در مرجع‌های [۹] الی [۱۱] نیز یک مدل NLP برای طرح پیشنهادی بیان شده است، که آنها از الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی^۹(NHEA) مانند بهینه‌سازی شیر مورچه^{۲۰}(ALO)، معادلات تفاضلی^۱(DE) و الگوریتم ژنتیک^۲(GA) استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج گزارش شده در مرجع‌های [۹] الی [۱۱]، این الگوریتم‌های برای دستیابی به راه‌حل بهینه نیاز به تکرار همگرایی بالایی دارند که متناسب با زمان محاسباتی بالا است. همچنین از نظر مطالعات آماری، این الگوریتم‌ها دارای انحراف معیار قابل توجهی در پاسخ‌دهی هستند، به طوری که پراکندگی پاسخ نهایی در تکرار چندباره حل مسأله بالا است.

در مرجع [۱۲] از الگوریتم تکاملی ترکیبی^۳(HEA) مبنی بر ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۴(GWO) و بهینه‌سازی مبنی بر آموزش و یادگیری^۵(TLBO) برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه ریزشکها استفاده شده است. در مرجع [۱۸] نیز از ترکیب الگوریتم‌های سینوس-کوسینوس^۶(SCA) و جستجوی کلاغ‌ها^۷(CSA) برای برنامه‌ریزی سیستم ترکیب جزیره‌ای استفاده شده است. در الگوریتم‌های ترکیبی استفاده شده در مرجع‌های [۱۲] و [۱۳]، ابتدا متغیرهای تصمیم‌گیری توسط یک الگوریتم بهنگام‌سازی میشوند، سپس الگوریتم دوم بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری را بر عهده دارد. براساس نتایج به‌دست آمده در مرجع‌های [۱۲] الی [۱۸]، الگوریتم‌های ترکیبی مذکور دارای راه‌حل بهینه‌تری نسبت به NHEAها هستند. در نهایت خلاصه کارهای صورت گرفته در تحقیقات مختلف در جدول (۱) گزارش شده است.

براساس پیشینه تحقیق و جدول (۱)، عمده‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی موجود در ارتباط با مدیریت انرژی شبکه توزیع و یا MG به شرح زیر است:

- در بیشتر تحقیقات بهبود وضعیت یک یا دو شاخص در مسأله مدیریت انرژی شبکه توزیع و یا MG مطرح بوده است. ولی توجه شود که ارتقاء یک شاخص تضمینی در بهبود وضعیت شاخص دیگر ندارد. به عنوان مثال، برای بهبود قابلیت اطمینان یک شبکه نیاز است که هزینه بهره‌برداری بیشتری صرف شود [۱،۲]. از این رو انتظار می‌رود که به منظور دستیابی به وضعیت بهینه همزمان شاخص‌های فنی (بهره‌برداری، قابلیت اطمینان و موارد دیگر)، اقتصادی و زیست محیطی نیاز به مدل‌سازی همزمان این شاخص‌های در مسأله مدیریت انرژی یک سیستم باشد. این موضوع در کمتر تحقیقاتی مانند مرجع [۱۲] در نظر گرفته شده است.

Table (1): Summary of work done in the research background

جدول (۱): خلاصه کارهای انجام شده در پیشینه تحقیق

حل‌کننده	شاخص			مرجع
	زیست محیطی	قابلیت اطمینان	بهره‌برداری	
LAM	خیر	خیر	بله	[۶]
LAM	خیر	خیر	بله	[۷]
LAM	خیر	خیر	بله	[۸]
LAM	خیر	خیر	بله	[۹]
LAM	خیر	خیر	بله	[۱۰]
ریاضی	خیر	خیر	بله	[۱۱]
ریاضی	خیر	خیر	بله	[۱۲]
NHEA	خیر	خیر	بله	[۱۴]
NHEA	خیر	خیر	بله	[۱۵]
NHEA	خیر	خیر	بله	[۱۶]
HEA	بله	بله	بله	[۱۷]
HEA	بله	خیر	بله	[۱۸]
HEA	بله	بله	بله	طرح پیشنهادی

- مسأله مدیریت انرژی یک شبکه ذاتاً دارای مدل NLP و MINLP است. در برخی از تحقیقات مانند مرجع‌های [۱] الی [۵] از تکنیک تقریب خطی برای دستیابی به راه‌حل بهینه استفاده شده است. این روش دارای زمان محاسباتی پایین ولی خطای محاسباتی قابل توجهی است. مرجع‌های [۶] و [۷] از روش‌های ریاضی مانند CONOPT^۴ و IPOPT^۳ برای حل مسأله مذکور استفاده کرده‌اند، ولی پاسخ نهایی در هر حل‌کننده متفاوت است. برخی دیگر از تحقیقات مانند مرجع‌های [۹] الی [۱۱] از NHEA مانند GA برای حل مسأله اشاره شده استفاده کرده‌اند، ولی این حل‌کننده‌ها دارای زمان محاسباتی بالا و انحراف معیار بالا در پاسخ‌دهی هستند. ولی پیش‌بینی می‌شود که الگوریتم تکاملی ترکیبی (HEA) به علت استفاده از چندین فرآیند متفاوت برای بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری بتواند در تکرار همگرایی پایینی به راه‌حل بهینه دست یابد، به طوری که انحراف معیار پاسخ‌دهی آن پایین باشد. برای اثبات قابلیت‌های این روش میتوان به مقایسه GA بدون جهش/ با جهش اشاره کرد. به طوری که اگر فرآیند جهش به GA اضافه شود، حل مسأله نسبت به GA بدون جهش دارای نقطه بهینه‌تری است [۱۴]. حل مسأله با HEA در کمتر تحقیقاتی مانند مرجع‌های [۱۲] و [۱۳] در نظر گرفته شده است.

برای جبران شکاف‌های تحقیقاتی مطرح شده، این مقاله مدیریت انرژی MG در حضور DGها و ALها با در نظر گرفتن شاخص‌های فنی مانند بهره‌برداری و قابلیت اطمینان و زیست محیطی ارائه می‌شود. از این‌رو طرح مذکور کمینه‌سازی مجموع هزینه مورد انتظار بهره‌برداری MG و DGها، هزینه مورد انتظار آلودگی، و هزینه خاموشی در شرایط وقوع پیشامد N-1 برعهده دارد. همچنین قیود این مسأله شامل معادلات پخش توان AC (AC-PF) در MG، محدودیت‌های بهره‌برداری و قابلیت اطمینان MG، مدل DGها و ALها، یعنی DRP و باتری، است. علاوه بر این، این مسأله دارای عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، توان تولیدی RDG و دسترس‌پذیری تجهیزات MG است. در ادامه از برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود، به طوری که ابتدا مکانیزم چرخ رولت (RWM) تعداد بالایی سناریو تولید می‌کند و سپس روش برگشت همزمانی (SBM) به عنوان تکنیک کاهش سناریو تعداد مشخصی از سناریوهای تولید شده را انتخاب می‌کند. مسأله مذکور دارای مدل MINLP است که به منظور دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین از حل‌کننده ترکیبی بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO) و الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) استفاده می‌شود. در نهایت نوآوری‌های طرح پیشنهادی به- شرح زیر است:

- مدل‌سازی بهره‌برداری ریزشبه در حضور DGها و بارهای اکتیو جهت تأمین انرژی پاک با قابلیت اطمینان مطلوب؛
- دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی نهایی متناسب با اهداف بهره‌برداری شبکه که نیاز به زمان محاسباتی پایین به دلیل زمان اجرایی پایین خود دارد.
- مدل‌سازی تصادفی همزمان عدم قطعیت‌های توان تولیدی RDGها و دسترس‌پذیری تجهیزات شبکه در برابر شرایط وقوع پیشامد N-1.

در ادامه مقاله بدین صورت سازمان‌دهی می‌شود. فرمول‌بندی طرح پیشنهادی در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳، روند حل مسأله شامل الگوریتم تکاملی ترکیبی بیان می‌شود. در نهایت نتایج عددی و نتیجه‌گیری‌ها به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ ذکر می‌شود.

۲- فرمول‌بندی طرح پیشنهادی

۲-۱- مدل‌سازی مدیریت انرژی ریزشبه

در این بخش، مدل مسأله مدیریت انرژی ریزشبه در حضور DGها و ALها در جهت ارتقاء شرایط اقتصادی، آلودگی زیست محیطی، قابلیت اطمینان و بهره‌برداری سیستم بیان می‌شود. از این‌رو تابع هدف مسأله برابر با کمینه‌سازی مجموع هزینه مورد انتظار بهره‌برداری MG و NRDGها، هزینه آلودگی مورد انتظار و هزینه خاموشی حاصل از وقوع پیشامد N-1 است. همچنین طرح مذکور مقید به معادلات پخش توان بهینه AC (AC-OPF) شبکه، محدودیت‌های قابلیت اطمینان MG، مدل بهره‌برداری DGها و ALها است. بنابراین مسأله مذکور به صورت زیر فرمول‌بندی خواهد شد:

$$\min F = \sum_{w \in W} \rho_w \left(\sum_{t \in T} \left(\lambda_{t,w} P_{s,t,w}^U + \sum_{n \in N} \sum_{l \in L} \left(a_{n,l} + b_{n,l} P_{n,l,t,w}^{DG} + c_{n,l} (P_{n,l,t,w}^{DG})^2 \right) \right) \right) + \text{EIP} \cdot \sum_{w \in W} \rho_w \left(\sum_{t \in T} \left(\gamma_s P_{s,t,w}^U + \sum_{n \in N} \sum_{l \in L} \gamma_{n,l} P_{n,l,t,w}^{DG} \right) \right) + \text{VOLL} \cdot \sum_{w \in W} \rho_w \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} L_{n,t,w}^{NS} \quad (1)$$

منوط به:

$$L_{n,t,w}^{NS} + P_{n,t,w}^U + (P_{n,t,w}^{Bdis} - P_{n,t,w}^{Bch}) + P_{n,t,w}^{DR} + \sum_{l \in L} P_{n,l,t,w}^{DG} + \sum_{j \in N} I_{n,j} P_{n,j,t,w}^F = P_{n,t,w}^{RL} + P_{n,t,w}^{CL} + P_{n,t,w}^{IL} \quad \forall n, t, w \quad (2)$$

$$Q_{n,t,w}^U + \sum_{l \in L} Q_{n,l,t,w}^{DG} + \sum_{j \in N} I_{n,j} Q_{n,j,t,w}^F = Q_{n,t,w}^{RL} + Q_{n,t,w}^{CL} + Q_{n,t,w}^{IL} \quad \forall n, t, w \quad (3)$$

$$P_{n,j,t,w}^F = G_{n,j}^L (V_{n,t,w})^2 - V_{n,t,w} V_{j,t,w} (G_{n,j}^L \cos(\varphi_{n,t,w} - \varphi_{j,t,w}) + B_{n,j}^L \sin(\varphi_{n,t,w} - \varphi_{j,t,w})) \quad \forall n, j, t, w \quad (4)$$

$$Q_{n,j,t,w}^F = -B_{n,j}^L (V_{n,t,w})^2 + V_{n,t,w} V_{j,t,w} (B_{n,j}^L \cos(\varphi_{n,t,w} - \varphi_{j,t,w}) - G_{n,j}^L \sin(\varphi_{n,t,w} - \varphi_{j,t,w})) \quad \forall n, j, t, w \quad (5)$$

$$\varphi_{s,t,w} = 0 \quad \forall t, w \quad (6)$$

$$\sqrt{(P_{n,j,t,w}^F)^2 + (Q_{n,j,t,w}^F)^2} \leq S_{n,j}^{Fmax} \quad \forall n, j, t, w \quad (7)$$

$$\sqrt{(P_{s,t,w}^U)^2 + (Q_{s,t,w}^U)^2} \leq S_{n,j}^{Umax} \quad \forall t, w \quad (8)$$

$$V_n^{\min} \leq V_{n,t,w} \leq V_n^{\max} \quad \forall n, t, w \quad (9)$$

$$0 \leq I_{n,t,w}^{NS} \leq P_{n,t,w}^{RL} + P_{n,t,w}^{CL} + P_{n,t,w}^{IL} \quad \forall n, t, w \quad (10)$$

$$\sqrt{(P_{s,t,w}^U)^2 + (Q_{s,t,w}^U)^2} \leq S_{n,j}^{Umax} \quad \forall t, w \quad (11)$$

$$P_{n,l,t,w}^{DG} = P_{n,l}^{DGmax} \quad \forall n, l \in RES, t, w \quad (12)$$

$$-\xi_n^{RL} P_{n,t,w}^{RL} - \xi_n^{CL} P_{n,t,w}^{CL} - \xi_n^{IL} P_{n,t,w}^{IL} \leq P_{n,t,w}^{DR} \leq \xi_n^{RL} P_{n,t,w}^{RL} + \xi_n^{CL} P_{n,t,w}^{CL} + \xi_n^{IL} P_{n,t,w}^{IL} \quad \forall n, t, w \quad (13)$$

$$\sum_{t \in T} P_{n,t,w}^{DR} = 0 \quad \forall n, w \quad (14)$$

$$0 \leq P_{n,t,w}^{Bdis} \leq DR_n X_{n,t}^B \quad \forall n, t, w \quad (15)$$

$$0 \leq P_{n,t,w}^{Bch} \leq CR_n (1 - X_{n,t}^B) \quad \forall n, t, w \quad (16)$$

$$E_n^{\min} \leq E_n^{\text{ini}} + \sum_{r=1}^t \left(\eta_n^{\text{ch}} P_{n,r,w}^{\text{Bch}} - \frac{1}{\eta_n^{\text{dis}}} P_{n,r,w}^{\text{Bdis}} \right) \leq E_n^{\max} \quad \forall n, t, w \quad (17)$$

تابع هدف مسأله پیشنهادی در رابطه (۱) بیان شده است که دارای سه بخش است. عبارت اول در این رابطه بیانگر کمینه‌سازی مجموع هزینه مورد انتظار بهره‌برداری MG و NRDGها است، که هزینه بهره‌برداری MG برابر با هزینه خرید انرژی آن از شبکه بالادست براساس قیمت بازار انرژی است [۱]. از این‌رو در صورتی که متغیر P^U دارای مقدار مثبت (منفی) باشد، لذا عبارت اول تابع هدف در رابطه (۱) معرف هزینه خرید (درآمد فروش) انرژی MG است. علاوه بر این، از آنجا که متغیر P^U وابسته به توان شارژ و دشارژ ALها است، لذا هزینه بهره‌برداری ALها نیز در بخش اول تابع هدف برآورد می‌شود. در بخش دوم رابطه (۱)، کمینه‌سازی هزینه آلودگی مورد انتظار حاصل از دریافت انرژی از شبکه بالادست و NRDGها ارائه شده است. در این رابطه، ضریب آلودگی، یعنی γ ، برابر مجموع ضرایب آلودگی حاصل از آلاینده‌های NO_x ، SO_2 و CO_2 است [۲۰]. در ادامه، کمینه‌سازی هزینه خاموشی حاصل از پیشامد N-1 در شرایط وقوع خطای داخلی در تجهیزات MG متناسب با بخش سوم رابطه (۱) است [۲]. هزینه خاموشی در این رابطه برابر با حاصل ضرب ارزش بار از دست رفته $(VOLL)^{\text{v}}$ و انرژی مورد

انتظار تغذیه نشده^۴ (EENS) است. به علت اینکه در این مقاله کمینه‌سازی خاموشی مصرف‌کننده‌گان در برابر وقوع پیشامد N-1 به‌عنوان قابلیت اطمینان مطلوب سیستم در نظر گرفته میشود، هزینه خاموشی در بخش سوم رابطه (۱) به عنوان هزینه قابلیت اطمینان نیز در مقاله لحاظ می‌شود.

قیود AC-OPF برای MG در معادله‌های (۲) الی (۹) بیان شده است. رابطه‌های (۲) الی (۶) بیانگر معادلات پخش توان AC (AC-PF) هستند که به ترتیب تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس، (۳) و (۴)، توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط توزیع، و زاویه ولتاژ باس مرجع را مدل‌سازی کرده‌اند [۸]. قیده‌های (۷) الی (۹) نیز معرف محدودیت‌های بهره‌برداری MG شامل محدودیت ظرفیت خطوط و پست توزیع، (۷) و (۸)، و قید ولتاژ باس‌ها، (۹)، است [۶]. در این روابط فرض بر این است که MG از طریق پست توزیع متصل شده به باس مرجع به شبکه بالادست اتصال می‌یابد، پس متغیرهای P^U و Q^U برای باس‌های دیگر دارای مقدار صفر است. در نهایت محدودیت قابلیت اطمینان MG در قید (۱۰) در نظر گرفته شده است، که آن به محدودیت بار مصرفی خاموش شده در MG اشاره می‌کند [۲]. به علت اینکه EENS به‌عنوان شاخص قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است، و آن به L^{NS} وابسته است، پس قید (۱۰) به‌عنوان محدودیت قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، از آنجا که هدف ارتقاء قابلیت اطمینان در این مقاله کاهش EENS و یا بار خاموش شده است، بنابراین محدودیت L^{NS} مانند قید (۱۰) می‌تواند به‌عنوان محدودیت قابلیت اطمینان منظور شود.

مدل بهره‌برداری DGها و ALها در قیود (۱۱) الی (۱۷) ارائه شده است. روابط (۱۱) و (۱۲) مرتبط به عملکرد DGها در MG است، به طوری که قید (۱۱) اشاره به محدودیت ظرفیت این منابع دارد [۲]. رابطه (۱۲) نیز بیانگر میزان توان تولیدی RDGها است، که پارامتر P^{DGmax} وابسته به شرایط آب و هوایی مانند میزان تابع خورشید و سرعت باد است [۳]. علاوه بر این، مدل‌سازی دو نوع AL از قبیل DRP و باتری در این مسأله ارائه شده است. قیود (۱۳) و (۱۴) متناسب با عملکرد DRP مبنی بر تشویق است [۱۶]. در این نوع DRP فرض بر این است که مصرف‌کننده‌گان خانگی، تجاری و صنعتی قادر هستند که بخشی از انرژی مصرفی خود را در ساعت پیک بارشان (متناظر با قیمت انرژی بالا) به ساعات غیرپیک بارشان (قیمت انرژی پایین) شیف‌ت دهند. لذا انتظار می‌رود که مصرف‌کننده‌گان شرکت کرده در DRP پیشنهادی بتوانند هزینه انرژی خود را کاهش دهند، که این موضوع مشوق مناسبی برای آنها است. بنابراین، قید (۱۳) بیانگر محدودیت تغییرات توان DRP است، و رابطه (۱۴) تضمین می‌کند که انرژی مصرفی کاهش یافته مصرف‌کننده‌گان در ساعات پیک بار در ساعات غیر پیک توسط MG و منابع مختلف تأمین شود [۱۶]. در نهایت فرمول‌بندی باتری در رابطه‌های (۱۵) الی (۱۷) ذکر شده است که به ترتیب بیانگر محدودیت‌های نرخ دشارژ، نرخ شارژ، و انرژی قابل ذخیره در باتری هستند. در این روابط، متغیر باینری x^B معرف عملکرد شارژ و دشارژ باتری است، که آن از عملکرد همزمان شارژ/دشارژ باتری جلوگیری می‌کند [۳].

۲-۲- فرآیند حل

مسأله پیشنهادی رابطه‌های (۱) الی (۱۷) دارای مدل MINLP است. از این‌رو در این مقاله جهت جبران شکاف تحقیقاتی دوم در بخش ۱، الگوریتم ترکیبی ALO [۱۴] و CSA [۱۸] (ALO+CSA) جهت دستیابی به راه‌حل بهینه استفاده می‌شود. از آنجا که در این الگوریتم، متغیرهای تصمیم‌گیری در دو فرآیند کلی، یعنی ابتدا فرآیند ALO و سپس CSA، به‌نگام‌سازی می‌شوند، لذا انتظار می‌رود که آن بتواند یک راه‌حل بهینه مطمئن با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی به‌دست آورد. علاوه بر این توجه شود که ALO و CSA از الگوریتم قوی در حل مسائل پیچیده مهندسی هستند [۹-۱۸]، که انتظار می‌رود که ترکیب آنها در دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن و مطلوب بسیار مؤثر باشد. جزئیات بیشتر در ارتباط با قابلیت‌های الگوریتم مذکور در بخش ۴-۲-الف ارزیابی می‌شود.

برای حل مسأله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های تکاملی حتی الگوریتم یاد شده، متغیرهای مسأله به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول اشاره به متغیرهای تصمیم‌گیری دارد که آن برای طرح پیشنهادی شامل متغیرهای P^{DG} برای مجموعه L-RES، Q^{DG} ، p^{DR} ، x^B ، p^{Bdis} ، p^{Bch} و L^{NS} است که مقدار آنها توسط الگوریتم ALO+CSA براساس محدوده مجاز خودشان به ترتیب متناسب با $[0, S_{n,l}^{DGmax}]$ ، $[0, S_{n,l}^{DGmax}]$ ، رابطه (۱۳)، $\{0, 1\}$ ، رابطه‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۰) تعیین می‌گردد. دسته

دیگر دارای متغیرهای وابسته شامل P^{DG} برای مجموعه RES، P^U ، Q^U ، P^F ، Q^F و V و φ است. میزان P^{DG} برای مجموعه RES براساس قید (۱۲) محاسبه می‌شود، و دیگر متغیرهای وابسته مذکور توسط معادلات AC-PF، (۲)-(۶)، تعیین می‌شوند. این مقاله از روش پخش توان پسر-پیشرو [۱۹] برای حل AC-PF استفاده می‌کند. در این مقاله برای برآورد محدودیت‌های بهره‌برداری MG، (۷)-(۹)، محدودیت ظرفیت DG، (۱۱)، قید DRP، (۱۴)، و محدودیت انرژی قابل ذخیره در باتری، (۱۷)، از روش تابع جریمه استفاده می‌شود [۱۹]. شایان ذکر است که تابع جریمه برای قیود $a \leq b$ و $a=b$ به ترتیب برابر $\mu \cdot \max(0, a - b)$ و $\kappa \cdot (a - b)$ است که همانند رابطه (۱۸) برای قیود مذکور به تابع هدف اصلی (۱) اضافه می‌شوند [۱۹]. در ادامه توجه شود که $\mu \geq 0$ و $\kappa \in (-\infty, +\infty)$ معرف ضرایب لاگرانژ هستند. در نهایت رابطه (۱۸) تحت عنوان تابع برازندگی (FF) شناخته می‌شود [۱۹].

$$\begin{aligned} \min \quad FF = & F + \sum_{n,j,t,w} \mu_{n,j,t,w}^{sl} \max \left(0, \sqrt{(P_{n,j,t,w}^F)^2 + (Q_{n,j,t,w}^F)^2} - S_{n,j}^{Fmax} \right) + \sum_{t,w} \mu_{t,w}^{su} \max \left(0, \sqrt{(P_{s,t,w}^U)^2 + (Q_{s,t,w}^U)^2} - S_s^{Umax} \right) \\ & + \sum_{n,t,w} \left(\bar{\mu}_{n,t,w}^v \max(0, V_{n,t,w} - V_n^{max}) + \underline{\mu}_{n,t,w}^v \max(0, V_n^{min} - V_{n,t,w}) \right) \\ & + \sum_{t,w} \left(\bar{\mu}_{t,w}^{pu} \max(0, P_{s,t,w}^U - P_{s,t,l}^U - \varepsilon_F) + \underline{\mu}_{t,w}^{pu} \max(0, -\varepsilon_F - P_{s,t,w}^U + P_{s,t,l}^U) \right) \\ & + \sum_{n,l,t,w} \mu_{n,l,t,w}^{sd} \max \left(0, \sqrt{(P_{n,l,t,w}^{DG})^2 + (Q_{n,l,t,w}^{DG})^2} - S_{n,l}^{DGmax} \right) + \sum_{n,w} \kappa_{n,w}^{dr} \sum_{t \in T} P_{n,t,w}^{DR} \\ & + \sum_{n,t,w} \bar{\mu}_{n,t,w}^e \max \left(0, E_n^{ini} + \sum_{\tau=1}^t \left(\eta_n^{ch} P_{n,\tau,w}^{Bch} - \frac{1}{\eta_n^{dis}} P_{n,\tau,w}^{Bdis} \right) - E_n^{max} \right) \\ & + \sum_{n,t,w} \underline{\mu}_{n,t,w}^e \max \left(0, E_n^{min} - E_n^{ini} - \sum_{\tau=1}^t \left(\eta_n^{ch} P_{n,\tau,w}^{Bch} - \frac{1}{\eta_n^{dis}} P_{n,\tau,w}^{Bdis} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

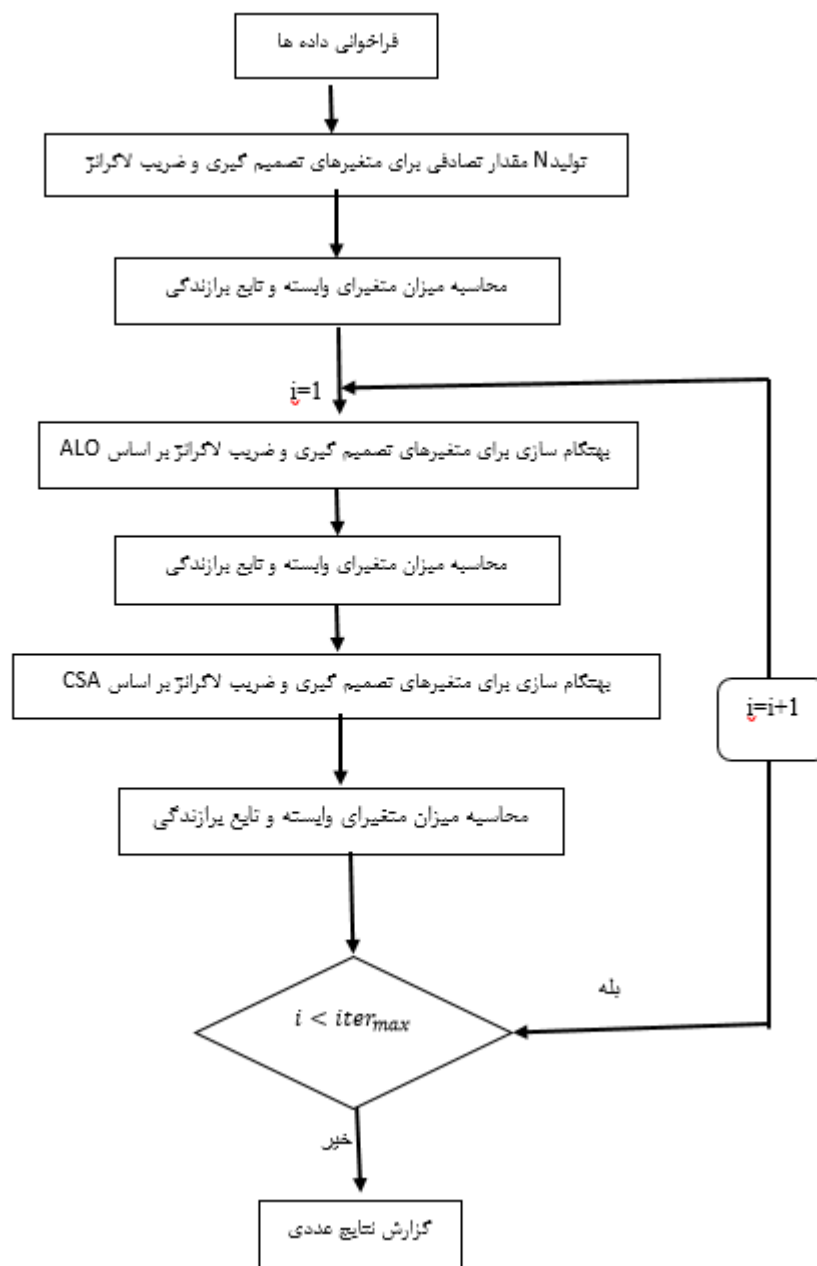
روند حل الگوریتم ALO+CSA برای طرح پیشنهادی به این صورت است که ابتدا این حل‌کننده به تعداد N که تحت عنوان اندازه جمعیت شناخته می‌شود، مقادیر تصادفی متغیرهای تصمیم‌گیری و ضرایب لاگرانژ براساس محدودیت مجاز خودشان تعیین می‌کند. سپس مقادیر متغیرهای وابسته از قید (۱۲) و روش پخش توان پسر-پیشرو محاسبه می‌شوند. در ادامه میزان تابع برازندگی برای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری براساس رابطه (۱۸) تعیین می‌شود. این مرحله به‌عنوان مرحله اولیه معرفی می‌شود. در مراحل بعد، بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری و ضرایب لاگرانژ توسط الگوریتم پیشنهادی براساس بهینه‌ترین مقدار تابع برازندگی در مرحله قبل انجام می‌شود، به طوری که ابتدا فرآیند ALO اجرا می‌شود و سپس فرآیند CSA انجام می‌شود. در این مراحل محاسبه متغیرهای وابسته و تابع برازندگی براساس تکنیک استفاده شده در مرحله اولیه است. در نهایت در این مقاله فرض بر این است که شرایط همگرایی بعد از تکرار مراحل بهنگام‌سازی متغیرهای تصادفی به تعداد مشخصی تحت عنوان itermax به دست می‌آید. در ادامه فلوچارت حل مسأله پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- نتایج عددی

۳-۱- مورد مطالعاتی

طرح پیشنهادی در این بخش بر روی ۶۹ MG با سه شعاعی [۲۰] اجرا می‌شود. این شبکه دارای توان و ولتاژ مبنای یک مگاوات-آمپر و ۱۲/۶۶ کیلوولت است، که مشخصات خطوط و پست توزیع بعلاوه داده‌های پیک بار در مرجع [۲۰] ارائه شده است. محدوده مجاز دامنه ولتاژ برابر [۱/۱، ۱/۹] پریونیت در نظر گرفته شده است. در این مقاله فرض بر این است که شبکه مذکور دارای سه نوع مصرف‌کننده خانگی، تجاری و صنعتی است. مصرف‌کننده‌گان صنعتی در باس‌های ۴۹، ۵۰ و ۶۱ قرار دارند و مصرف‌کننده‌گان تجاری در باس‌های ۱۱، ۱۲، ۲۱ و ۶۴ توزیع شده‌اند. دیگر باس‌ها نیز تنها دارای مصرف‌کننده‌گان خانگی هستند. پروفیل روزانه بار برابر با حاصل ضرب پیک بار و منحنی روزانه ضریب بار است، که آن برای مصرف‌کننده‌گان مذکور در شکل (۲-الف) ترسیم شده است [۲۱]. همچنین منحنی روزانه مورد انتظار قیمت انرژی به صورت شکل (۲-ب)

خواهد بود. علاوه بر این فرض بر این است که هر کدام از مصرف‌کننده‌گان صنعتی در باس‌های ۴۹ و ۵۰ دارای یک DG از نوع پیل سوختی^۵ (FC) با ظرفیت ۰/۳ مگاوات-آمپر هستند. مصرف‌کننده صنعتی در باس ۶۱ دارای دو DG از نوع FC و میکروتوربین^۶ (MT) به ترتیب با ظرفیت ۰/۸ مگاوات-آمپر و ۰/۷ مگاوات-آمپر است. هر مصرف‌کننده تجاری نیاز دارای DG از نوع فتوولتائیک^۷ (PV) با ظرفیت ۰/۲ مگاوات-آمپر است. در نهایت دو نوع DG از نوع سیستم بادی^۸ (WS) با ظرفیت ۰/۳ مگاوات-آمپر در باس‌های ۲۴ و ۶۳ قرار گرفته‌اند. توجه شود که پروفیل توان اکتیو تولیدی RDG برابر با حاصل ضرب ظرفیت آن و منحنی روزانه نرخ توان آن است، که این منحنی برای PV و WS در شکل (۲-ج) نشان داده شده است [۶]. مشخصات مرتبط با ضرایب تابع هزینه سوخت و آلودگی برای انواع مختلف DG اشاره شده در جدول (۲) بیان شده است.

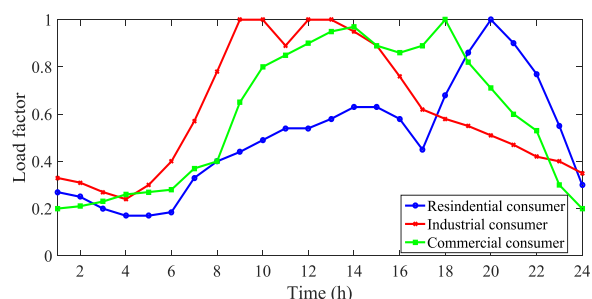


شکل (۱): فلوچارت روند حل مسأله پیشنهادی
Figure (1): Flowchart of the proposed problem solving process

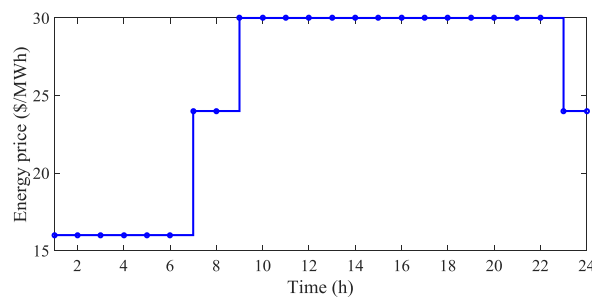
در این مقاله فرض بر این است که ضریب مشارکت مصرف‌کننده‌گان تجاری و خانگی در DRP پیشنهادی برابر ۴۰ درصد است، ولی بارهای صنعتی دارای ضریب مشارکت ۳۰ درصد در DRP مذکور هستند. این شبکه نیز دارای سه باتری در باس‌های ۱۰، ۲۴ و ۶۳ با ظرفیت ۲/۵ مگاوات-ساعت و راندمان شارژ/دشارژ ۹۵ درصد است. نرخ شارژ/دشارژ باتری برابر ۰/۵ مگاوات و حداقل انرژی و انرژی اولیه آن نیز به ترتیب برابر ۰/۲۵ مگاوات-ساعت و ۰/۲۵ مگاوات-ساعت است. همچنین ضرایب آلاینده‌گی NO_x ، SO_2 و CO_2 متناسب با دریافت انرژی از شبکه بالادست برای MG به ترتیب براساس مرجع [۲۰] برابر ۲/۲۹۵ کیلوگرم بر مگاوات-ساعت، ۹۲۱/۲۵ کیلوگرم بر مگاوات-ساعت و ۳/۵۸۳ کیلوگرم بر مگاوات-ساعت هستند. فرض شده است که FOR تجهیزات MG برابر ۱ درصد است. در نهایت RWM ۱۰۰۰ سناریو تولید می‌کند، که انحراف معیار برای عدم قطعیت‌های توان اکتیو RDGها برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. سپس SBM ۴۰ سناریو از سناریوهای تولید شده را انتخاب می‌کند. همچنین برای دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و سطح آلاینده‌گی پایین، قیمت‌های جریمه VOLL و EIP به ترتیب برابر ۱۰۰ دلار بر مگاوات-ساعت و ۰/۱ دلار بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نتایج عددی

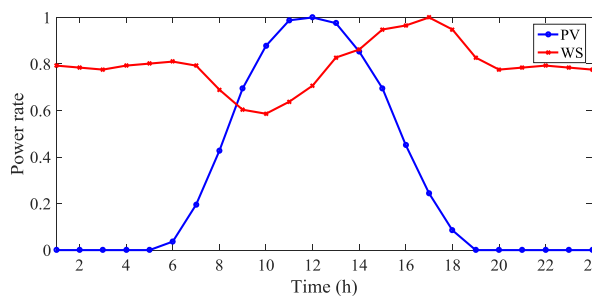
طرح پیشنهادی به همراه روند حل آن در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است، سپس نتایج عددی در ادامه گزارش می‌شود.



(الف) ضریب بار [۲۱]



(ب) قیمت انرژی



(ج) نرخ توان RESها [۶]

شکل (۲): منحنی روزانه مورد انتظار

Figure (2): Expected daily curve, (a) Load factor [21], (b) Energy Price, (c) Power Rate of RESs

Table (2): Specifications of scattered products

جدول (۲): مشخصات تولیدات پراکنده

DG	نوع	ضرایب آلودگی (کیلوگرم بر مگاوات-ساعت) [۲۰]			ضرایب تابع هزینه سوخت		
		NO _x	CO ₂	SO ₂	c (\$/MWh ²)	b (\$/MWh)	a (\$)
۱	FC	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۳	۱۰۵/۲۶	۰/۰۱	۱۸	۱۵۰
۲	MT	۰/۱۹۹۵	۰/۰۰۳۶	۷۲۳/۹۳	۰/۰۲	۲۱	۲۰۰
۳	PV	.	.	.	.	.	.
۴	WS	.	.	.	.	.	.

الف) بررسی قابلیت روند حل پیشنهادی: جدول (۳) نتایج همگرایی مسأله پیشنهادی توسط حل‌کننده تکاملی مانند معادلات تفاضلی (DE) [۱۵]، بهینه‌سازی مینی بر آموزش و یادگیری (TLBO) [۲۲]، ALO+CSA و ALO+CSA^۴، روش‌های ریاضی مانند BONMIN^۲، BARON^۴، DISOPT^۴، KNITRO^۴ و OQNLP^۴ [۲۳] را ارائه می‌دهد. در این الگوریتم‌های تکاملی، اندازه جمعیت و حداکثر تکرار همگرایی به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۰۰۰ هستند و دیگر پارامترهای تنظیم مرتبط با هر حل‌کننده براساس [۹، ۱۰، ۱۸، ۲۲] انتخاب شده است. برای حل مسأله با روش‌های ریاضی، مسأله مذکور در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز^۴ (GAMS) شبیه‌سازی می‌شود [۲۳]. سپس حل‌کننده‌های یاد شده برای حل آن استفاده می‌شوند. توجه شود که این حل‌کننده‌های دارای تولباکس در نرم‌افزار GAMS هستند [۲۸]، لذا نیازی به کدنویسی آن توسط کاربر نیست، که این موضوع خطای ناشی از کدنویسی کاربر را کاهش می‌دهد. همچنین به منظور محاسبه شاخص‌های آماری مانند انحراف معیار^۷ (SD) پاسخ‌دهی، حل مسأله توسط هر الگوریتم یاد شده ۲۰ بار تکرار شده است. در نهایت براساس این شکل مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی یعنی ALO+CSA توانسته است که کمینه‌ترین مقدار را برای هزینه‌های مورد انتظار بهره-برداری، آلودگی و خاموشی نسبت به دیگر الگوریتم‌های مذکور به دست آورد. به طوری آن براساس جدول (۳) نسبت به الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی بهترین نقطه را در کمترین تکرار همگرایی^۸ (CI) یعنی ۶۰۵ پیدا کرده است، که این تکرار همگرایی متناسب با کمترین زمان محاسباتی^۹ (CT) ممکن یعنی ۲۰۱/۳ ثانیه است. در صورتی که حل‌کننده‌های دیگر به زمان محاسباتی بیش از ۲۳۴ ثانیه برای دستیابی به بهترین راه‌حل در طرح پیشنهادی، (۱)-(۱۷)، نیاز دارند. علاوه بر این، الگوریتم ALO+CSA دارای SD برابر ۰/۹۷ درصد است، ولی دیگر الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی دارای انحراف معیار پاسخ-دهی بیش از ۱/۳۵ درصد هستند. پس این حل‌کننده دارای پراکندگی پایینی در پاسخ‌دهی نسبت به دیگر حل‌کننده‌های یاد شده است، که از این رو آن تقریباً دارای شرایط پاسخ‌دهی یکتا است. در مقایسه الگوریتم ALO+CSA و روش‌های ریاضی یاد شده، براساس جدول (۳) مشاهده می‌شود که روش‌های ریاضی دارای SD برابر صفر هستند، ولی ALO+CSA کمینه‌ترین (بهینه‌ترین) مقدار را نسبت به روش‌های حل ریاضی مذکور به دست می‌آورد. گرچه تکرار همگرایی در برخی از روش‌های ریاضی پایین‌تر از CI در ALO+CSA است، ولی زمان محاسباتی آنها نسبت به الگوریتم‌های تکاملی بسیار بالاتر است. علاوه بر این، برخی از روش‌های ریاضی مانند KNITRO و OQNLP توانایی دسترسی به راه‌حل بهینه را ندارند. اما توجه شود که در مسائل بهره‌برداری گام اجرایی عموماً برابر یک ساعت است، از این رو زمان محاسباتی از اهمیت ویژه‌ای در مسائل بهره‌برداری برخوردار است [۱۶-۴]. ولی این موضوع در روش‌های ریاضی مذکور براساس جدول (۳) قابل دست‌رسی نیست. بنابراین میتوان بیان کرد که الگوریتم ALO+CSA در این طرح پیشنهادی توانسته است راه‌حل بهینه‌تری را با شرایط مطلوب‌تر (سرعت همگرایی بالا و انحراف معیار پاسخ‌دهی پایین) نسبت به الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی و روش‌های ریاضی به دست آورد.

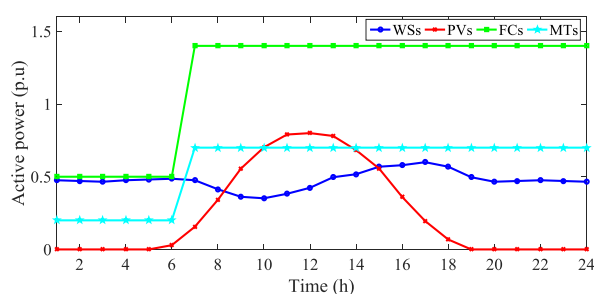
ب) ارزیابی عملکرد DGها و ALها در MG: منحنی روزانه مورد انتظار توان اکتیو و راکتیو DGها در شکل (۳) ارائه شده است. با مقایسه شکل‌های (۲-ج) و (۳-الف) و با توجه به داده‌های بخش ۴-۱، مشاهده می‌شود که PVها و WSها در کلیه ساعات شبیه‌سازی توان اکتیوی برابر با حداکثر ظرفیت خود متناسب با شرایط آب و هوایی به MG تزریق می‌کنند. زیرا که براساس جدول (۲)، ضرایب آلودگی و هزینه بهره‌برداری آنها برابر صفر است، لذا انتظار میرود که آنها توان اکتیو بالایی را به MG به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی تزریق کنند.

Table (3): The results of the optimal solution obtained by different algorithms

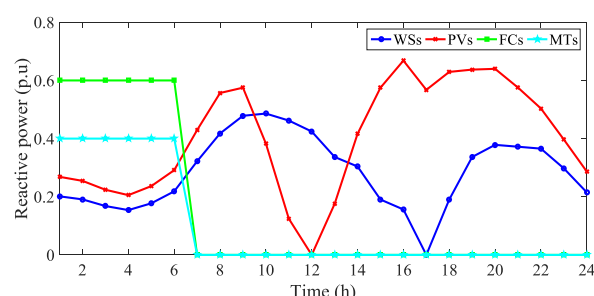
جدول (۳): نتایج راه‌حل بهینه به‌دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف

SD (%)	CT (sec)	CI	هزینه مورد انتظار (دلار)			الگوریتم
			خاموشی	آلودگی	بهره‌برداری	
۰/۹۷	۲۰۱/۳	۶۰۵	۲۷۲/۱	۴۸۱/۵	۸۷۹/۹	ALO+CSA
۱/۳۹	۲۳۴/۲	۶۴۹	۲۷۷/۳	۴۹۱/۴	۸۸۸/۱	ALO
۱/۵۴	۲۴۴/۷	۷۰۸	۲۸۰/۱	۴۹۸/۵	۸۹۵/۶	CSA
۲/۶۳	۲۹۱/۳	۹۳۱	۲۹۸/۴	۵۴۳/۱	۹۳۴/۴	TLBO
۳/۱۹	۳۱۵/۲	۹۸۷	۳۰۵/۷	۵۷۴/۴	۹۶۷/۷	DE
۰	۳۴۲/۵	۶۱۵	۲۹۳/۴	۵۰۷/۱	۹۱۱/۳	BARON
۰	۳۱۰/۸/۱	۵۸۳	۲۸۲/۳	۵۰۰/۲	۸۹۶/۵	BONMIN
۰	۳۶۷/۷	۶۳۲	۲۹۴/۱	۵۱۲/۷	۹۱۷/۶	DIOPT
عدم توانایی در دسترسی به راه‌حل بهینه						OQNLP
عدم توانایی در دسترسی به راه‌حل بهینه						KNITRO

همچنین کمیینه‌سازی EENS متناسب با این موضوع است که منابع محلی عهده دار تغذیه مصرف‌کننده‌گان شوند [۱]. از این رو جهت کمیینه‌سازی EENS یا هزینه خاموشی در شرایط وقوع پیشامد N-1 نیاز است که RDGها توان بالایی را به MG تزریق نمایند. علاوه بر این، در ساعات ۱۰:۰۰ الی ۶:۰۰ به علت اینکه قیمت انرژی خریداری شده از شبکه بالا دست براساس شکل (۲-ب) کمتر از قیمت سوخت FCها و MTها براساس جدول (۲) است، لذا NRDGها در این ساعات توان اکتیو پایینی را به MG جهت کمیینه‌سازی آلودگی زیست محیطی و خاموشی حاصل از وقوع خطای داخلی تجهیزات شبکه تزریق میکنند. اما در ساعات دیگر که قیمت سوخت NRDGهای مذکور کمتر از قیمت انرژی است، آنها توان اکتیوی برابر با حداکثر ظرفیت خود را به شبکه تزریق میکنند. این عملکرد FCها و MTها در ساعات ۷:۰۰-۲۴:۰۰ متناسب با کمیینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری، خاموشی و آلودگی است. براساس شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود که DGها در زمان‌هایی که دارای ظرفیت آزاد هستند، بخشی از آن را به تزریق توان راکتیو به MG اختصاص داده‌اند.



(الف) توان اکتیو DGها



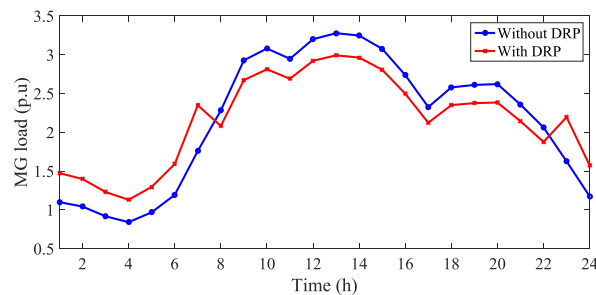
(ب) توان راکتیو DGها

شکل (۳): منحنی روزانه مورد انتظار

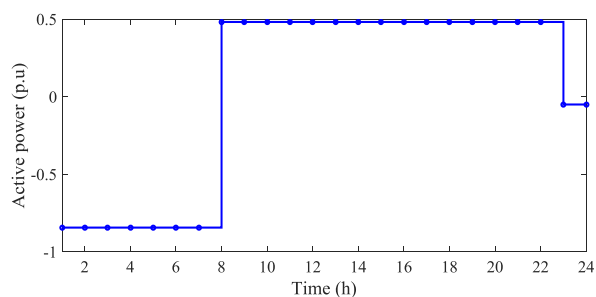
Figure (3): Expected daily curve, (a) Active power of DGs (b) Reactive power of DGs

به‌طوری که FCها و MTها در ساعات ۱:۰۰-۶:۰۰ به ترتیب در حدود ۰/۶ و ۰/۴ پریونیت توان راکتیو به MG تزریق می‌کنند. در این ساعات براساس شکل (۴)، ALها عملیات شارژ را انجام می‌دهند و توان اکتیو از MG دریافت می‌کنند. لذا انتظار می‌رود که در این ساعات افت ولتاژ بالایی در MG به وجود آید، که برای جبران این موضوع، NRDGها توان راکتیو قابل توجهی را به شبکه تزریق می‌کنند. اما RDGها عموماً در بیشتر ساعات شبیه‌سازی توان راکتیو به MG تزریق می‌کنند. این عملکرد متناسب با جبران افت ولتاژ ناشی از مصرف ALها و بارهای پسیو در MG است. در شکل (۴)، منحنی روزانه مورد انتظار عملکرد ALها مانند DRP و باتری‌ها ارائه شده است. براساس شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که کلیه بارهای خانگی، تجاری و صنعتی که در DRP پیشنهادی شرکت کرده‌اند، در ساعات ۱:۰۰-۷:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰ مصرف خود را افزایش می‌دهند. زیرا که قیمت انرژی براساس شکل (۲-ب) در این ساعات دارای مقدار پایینی است. ولی در دیگر ساعات که متناسب با ساعات پرباری است و قیمت انرژی براساس شکل (۲-ب) دارای مقدار بالا، ۳۰ دلار بر مگاوات-ساعت است، مصرف‌کننده‌گان مذکور در مد کاهش مصرف فعالیت میکنند. این نحوه مدیریت سمت تقاضا متناسب با کمینه‌سازی هرسه تابع هدف هزینه بهره‌برداری، آلودگی زیست محیطی و خاموشی MG است. علاوه بر این، عملکرد باتری‌های براساس شکل (۴-ب) نیز همانند عملکرد مصرف‌کننده‌گان مشارکت کرده در DRP پیشنهادی است. به‌طوری که آنها در ساعات ۱:۰۰ الی ۶:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰ عملیات شارژ را انجام می‌دهند تا اینکه انرژی مورد نیاز دشارژ در ساعات پرباری را به دست آورند.

(ج) بررسی وضعیت شاخص‌های فنی و اقتصادی MG: در این بخش، دو مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است که به ترتیب به نتایج مطالعات پخش بار MG (شبکه بدون DG و AL) در مورد اول و طرح پیشنهادی در مورد دوم اشاره دارند. نتایج شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی برای موارد مطالعاتی مذکور در جدول (۴) خلاصه شده است. براساس این جدول، طرح پیشنهادی توانسته است که شرایط اقتصادی MG را نسبت به مطالعات پخش بار شبکه در حدود ۲۲/۷ درصد $[(1137/7 - 879/9)/1137/7]$ بهبود دهد، یعنی هزینه بهره‌برداری در این شرایط ۲۲/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین وضعیت زیست محیطی و قابلیت اطمینان MG در مورد دوم نسبت به مورد اول به ترتیب در حدود ۲۹/۷ درصد و ۹۰/۳ درصد براساس جدول (۴) بهبود یافته است، که آن به ازای VOLL بیشتر از ۱۰۰ دلار مگاوات-ساعت و ELP بیشتر از ۰/۱ دلار بر کیلوگرم صادق است.



(الف) بار ریزشبکه



(ب) توان اکتیو باتری‌ها

شکل (۴): منحنی روزانه مورد انتظار

Figure (4): Expected daily curve, (a) Small network load (b) Active power of batteries

Table (4): Economic and technical results of MG

جدول (۴): نتایج اقتصادی و فنی MG

MOV (p.u)	MVD (p.u)	EL (MWh)	EENS (MWh)			سطح آلاینده‌گی (kg)			هزینه بهره‌برداری (دلار)	مورد مطالعانی
			VOLL=3 00 \$/MWh	VOLL=2 00 \$/MWh	VOLL=1 00 \$/MWh	EIP=0.3 \$/kg	EIP=0.2 \$/kg	EIP= 0.2 \$/kg		
۰	۰/۰۹۲	۵/۱۹	۲۸/۲	۲۸/۲	۲۸/۲	۶۸۵۲۸	۶۸۵۲۸	۶۸۵۲۸	۱۱۳۷/۷	اول
۰/۰۰۹	۰/۰۴۹	۳/۵۹	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۴۸۱۵۳	۴۸۱۵۳	۴۸۱۵۳	۸۷۹/۹	دوم

در زمینه شاخص‌های بهره‌برداری، تلفات انرژی مورد انتظار (EEL) و حداکثر افت ولتاژ (MVD) در این مورد نسبت به مورد اول به ترتیب در حدود ۳۰/۸ درصد و ۴۶/۷ درصد کاهش یافته‌اند. ولی حداکثر اضافه ولتاژ (MOV) در حدود ۰/۰۰۹ پریونیت در مورد مذکور نسبت به مطالعات پخش بار ایجاد می‌شود که مقدار آن کمتر از حد مجاز خود، یعنی ۰/۰۵ پریونیت است. بنابراین به‌طور متوسط ۳۸/۷۵ درصد وضعیت بهره‌برداری MG توسط طرح پیشنهادی نسبت به مورد اول ارتقاء می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله مدیریت انرژی ریزشکبه در حضور DGها و ALها را ارائه داد. به منظور مدل‌سازی شاخص‌های بهره‌برداری، زیست محیطی و قابلیت اطمینان MG، تابع هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری MG و NRDGها، آلودگی مورد انتظار و خاموشی حاصل از وقوع پیشامد N-1 را در نظر گرفت. این مسأله نیز مقید به معادلات AC-PF، محدودیت‌های بهره‌برداری و قابلیت اطمینان MG، مدل بهره‌برداری DGها و ALها است. در این طرح، برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های توان RDGها و دسترس‌پذیری تجهیزات MG استفاده شد. در ادامه از الگوریتم ALO+CSA به‌منظور دست-یابی به راه‌حل بهینه استفاده شد. در نهایت براساس نتایج عددی به‌دست آمده مشاهده گردید که الگوریتم مذکور قادر است بهینه‌ترین راه‌حل را در کمترین تکرار همگرایی و زمان محاسباتی نسبت به NHEAها به‌دست آورد، که این به معنی سرعت همگرایی بالای این حل‌کننده نسبت به NHEAها است. همچنین الگوریتم مذکور دارای انحراف معیار پاسخ‌دهی پایین در حدود ۰/۹۷ درصد است، که این موضوع به معنی برقراری وضعیت پاسخ‌دهی یکتا برای طرح پیشنهادی توسط الگوریتم ALO+CSA است. علاوه بر این، طرح پیشنهادی با مدیریت انرژی مناسب DGها و باتری‌ها و استفاده از سیستم مدیریت سمت تقاضا مبنی بر مدل DRP تشویقی توانسته است که شرایط اقتصادی، زیست محیطی، قابلیت اطمینان و بهره‌برداری را در یک MG به ترتیب در حدود ۲۲/۷ درصد، ۲۹/۷ درصد، ۹۰/۳ درصد و ۳۸/۷۵ درصد نسبت به مطالعات پخش بار MG ارتقاء دهد.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت استان فارس استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

ضمیمه

سمبل	اندیس‌ها و مجموعه‌ها
n, j, l, t, w	اندیس باس، باس، نوع DG
N, L, T, W, RES	مجموعه باس، نوع DG، زمان شبیه‌سازی، سناریو و نوع RDG
s	باس مرجع

متغیرها	سمبل
هزینه مورد انتظار بهره‌برداری MG و DGها (\$)	Cost
انرژی مورد انتظار تغذیه نشده (MWh)	EENS
آلودگی مورد انتظار (kg)	EM
تابع هدف و تابع برازندگی	F, FF
بار تغذیه نشده بر حسب پریونیت (p.u)	L ^{NS}
توان اکتیو شارژ و دشارژ باتری (p.u)	p ^{Bch} , p ^{Bdis}
توان اکتیو و راکتیو DG (p.u)	p ^{DG} , Q ^{DG}
توان اکتیو DRP (p.u)	p ^{DR}
توان اکتیو و راکتیو خط توزیع (p.u)	P ^F , Q ^F
توان اکتیو و راکتیو پست توزیع دریافتی از شبکه بالادست (p.u)	P ^U , Q ^U
دامنه (p.u) و زاویه (رادیان) ولتاژ	V, φ
متغیر باینری مربوط به عملکرد شارژ و دشارژ باتری	x ^B

ثابت‌ها	سمبل
ضرایب تابع هزینه سوخت به ترتیب بر حسب \$، \$/MWh و \$/MWh ²	a, b, c
سوسپتانس و رسانایی خط توزیع (p.u)	B ^L , G ^L
نرخ شارژ و دشارژ باتری (p.u)	CR, DR
انرژی اولیه باتری (p.u)	E ⁱⁿⁱ
حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در باتری (p.u)	E ^{min} , E ^{max}
ماتریس تلاقی باس و خط توزیع	I
بار اکتیو مصرف‌کننده تجاری، صنعتی و خانگی (p.u)	p ^{CL} , p ^{IL} , p ^{RL}
حداکثر توان اکتیو تولیدی RDG (p.u)	p ^{DGmax}
بار راکتیو مصرف‌کننده تجاری، صنعتی و خانگی (p.u)	Q ^{CL} , Q ^{IL} , Q ^{RL}
حداکثر ظرفیت DG (p.u)	S ^{DGmax}
حداکثر ظرفیت خط توزیع (p.u)	S ^{Fmax}
حداکثر ظرفیت پست توزیع (p.u)	S ^{Umax}
حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنه ولتاژ (p.u)	V ^{min} , V ^{max}
ارزش بار از دست رفته بر حسب \$/MWh	VOLL
قیمت تشویق زیست محیطی بر حسب \$/kg	EIP
ضریب آلودگی	γ
راندمان شارژ و دشارژ باتری	η ^{ch} , η ^{dis}
قیمت انرژی بر حسب \$/MWh	λ
احتمال رخداد سناریو	ρ
ضریب مشارکت مصرف‌کننده‌های تجاری، صنعتی و خانگی در DRP	ε ^{CL} , ε ^{IL} , ε ^{RL}

References

مراجع

- [1] A. Shahbazi, J. Aghaei, S. Pirouzi, M.R. Shafie-khah, J.P.S. Catalão, "Hybrid stochastic/robust optimization model for resilient architecture of distribution networks against extreme weather conditions", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 126, Article Number: 106576, March 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106576).
- [2] A. Shahbazi, J. Aghaei, S. Pirouzi, T. Niknam, M. Shafie-khah, J.P.S. Catalão, "Effects of resilience-oriented design on distribution networks operation planning", Electric Power Systems Research, vol. 191, Article Number: 106902, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106902).
- [3] S.A. Bozorgavari, J. Aghaei, S. Pirouzi, V. Vahidinasab, H. Farahmand, M. Korpås, "Two-stage hybrid stochastic/robust optimal coordination of distributed battery storage planning and flexible energy

- management in smart distribution network”, *Journal of Energy Storage*, vol. 26, Article Number: 100970, Sept. 2019 (doi: 10.1016/j.est.2019.100970)
- [4] H.R. Zafarani, S.A. Taher, M. Shahidehpour, “Robust operation of a multicarrier energy system considering EVs and CHP units”, *Energy*, vol. 192, Article Number: 116703, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116615).
- [5] K. Afrashi, B. Bahmani-Firouzi, M. Nafar, “IGDT-based robust optimization for multicarrier energy system management”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 45, pp. 1-15, March 2021 (doi: 10.1007/s40998-020-00356).
- [6] M.A. Norouzi, J. Aghaei, S. Pirouzi, T. Niknam, M. Lehtonen, “Flexible operation of grid-connected microgrid using ES”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 2, pp. 254-264, Nov. 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0483).
- [7] S. Pirouzi, J. Aghaei, T. Niknam, H. Farahmand, M. Korpås, “Exploring prospective benefits of electric vehicles for optimal energy conditioning in distribution networks”, *Energy*, vol. 157, pp. 679-689, Aug. 2018. (doi: 10.1016/j.energy.2018.05.195)
- [8] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modeling system to power system optimization", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, Feb. 1999 (doi: 10.1109/59.744462).
- [9] J.J. Das, D. Das, “Scenario-based multi-objective optimisation with loadability in islanded microgrids considering load and renewable generation uncertainties”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 5, pp. 785-800, April 2019 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5795).
- [10] L. Ma, N. Liu, J. Zhang, W. Tushar, C. Yuen “Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: A game theoretic approach”, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 1930-1942, Oct. 2016 (doi: 10.1109/TII.2016.2578184).
- [11] X. Li, R. Xia, “A dynamic multi-constraints handling strategy for multi-objective energy management of microgrid based on MOEA”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 138732-138744, 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2943201).
- [12] M. Roustaei, A. Kazemi, “Multi-objective stochastic operation of multi-microgrids constrained to system reliability and clean energy based on energy management system”, *Electric Power Systems Research*, vol. 194, Article Number: 106970, May 2021 (doi: 10.1186/s41601-019-0147).
- [13] Z. Yang, M. Ghadamyari, H. Khorramdel, S.M. Seyed Alizadehd, S. Pirouzi, M. Milani, F. Banihashemi, N. Ghadimi, “Robust multi-objective optimal design of islanded hybrid system with renewable and diesel sources/stationary and mobile energy storage systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, Article Number: 111295, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.rser.2021.111295).
- [14] S. Katoch, S.S. Chauhan, V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future”, *Multimed Tools and Applications*, vol. 80, pp. 8091–8126, 2021 (doi:10.1007/s11042-020-10139-6).
- [15] M. Nazari-Heris, S. Abapour, B. Mohammadi-Ivatloo, “Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 756-769, 2017 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.016)
- [16] A. Dini, S. Pirouzi, M.A. Norouzi, M. Lehtonen, “Grid-connected energy hubs in the coordinated multi-energy management based on day-ahead market framework”, *Energy*, vol. 188, Article Number: 11605, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116055).
- [17] A. Kavousi-Fard, A. Khodaei, “Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids”, *Energy*, vol. 111, pp. 653-663, 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2016.06.018)
- [18] A. Askarzadeh, “A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm”, *Computers and Structures*, vol. 169, pp. 1-12, June 2016 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106970).
- [19] M. Roustaei, A. Kazemi, “Multi-objective stochastic operation of multi-microgrids constrained to system reliability and clean energy based on energy management system”, *Electric Power Systems Research*, vol. 194, May 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106970).
- [20] M.Q. Duong, T.D. Pham, T.T. Nguyen, A.T. Doan, H.V. Tran, “Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems”, *Energies*, vol. 12, no. 1, pp. 1-25, Jan. 2019 (doi: 10.3390/en12010174).
- [21] S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou, K. Strunz, “A benchmark low voltage microgrid network”, *Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation*, pp. 1-8, Jan. 2005.
- [22] H.S. Gilla, B.S. Khehrab, A. Singhc, L.Kaur, “Teaching-learning-based optimization algorithm to minimize cross entropy for Selecting multilevel threshold values”, *Egyptian Informatics Journal*, vol. 20, pp. 11-25, 2019 (doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514174).
- [23] F.R. Zaro, S.J. Alqam, "Notice of violation of IEEE publication principles: solving dynamic load economic dispatch using GAMS optimization algorithm", *Proceeding of the IEEE/JEEIT*, pp. 866-871, Amman, Jordan, April 2019 (doi: 10.1109/JEEIT.2019.8717534).

1. Distributed generations (DGs)
2. Renewable distributed generations (RDGs)
3. Active loads (ALs)
4. Energy storage system (ESS)
5. Demand response program (DRP)
6. Energy management system (EMS)
7. Distribution system operator (DSO)
8. Micro-grid (MG)
9. Non-renewable distributed generations (NRDGs)
10. Hybrid stochastic-robust programming
11. Electric vehicles (EVs)
12. Non-linear programming (NLP)
13. Mixed integer non-linear programming (MINLP)
14. Linear approximation method (LAM)
15. Linear programming (LP)
16. Mixed integer linear programming (MILP)
17. Mathematical approaches (MAs)
18. AC power flow (AC-PF)
19. Non-hybrid evolutionary algorithms (NHEA)
20. Ant-lion optimizer (ALO)
21. Differential equations (DE)
22. Genetic algorithm (GA)
23. Hybrid evolutionary algorithm (HEA)
24. Grey wolf optimizer (GWO)
25. Teaching-learning-based optimization (TLBO)
26. Sine-cosine algorithm (SCA)
27. Crow search algorithm (CSA)
28. Constrained Optimization (CONOPT)
29. Interior point optimizer (IPOT)
30. Roulette wheel mechanism (RWM)
31. Simultaneous backward method (SBM)
32. AC optimal power flow (AC-OPF)
33. Value of lost load (VOLL)
34. Expected energy not supplied (EENS)
35. Fuel cell (FC)
36. Micro-turbine (MT)
37. Photovoltaic (PV)
38. Wind system (WS)
39. Crow search algorithm (CSA)
40. Ant-lion optimizer (ALO)
41. Branch and reduce optimization navigator (BARON)
42. Basic open-source nonlinear mixed integer programming (BONMIN)
43. Discrete optimization (DISOPT)
44. Nonlinear interior point trust region optimization (the "K" is silent) (KNITRO)
45. Optquest nonlinear programming (OQNLP)
46. General algebraic modeling system (GAMS)
47. Standard deviation (SD)
48. Convergence iterations (CI)
49. Computational time (CT)
50. Expected energy loss (EEL)
51. Maximum voltage droop (MVD)
52. Maximum over-voltage (MOV)