Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 56-71

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

Presenting a hybrid evolutionary algorithm for optimizing smart grids using load management in the presence of renewable energy sources and energy storage systems to the metro

Mohamad Hadi Rostamian[1], Ph.D. Student, Mohamad Hoseini Abardeh[2], Assistant Professor, Azita Azarfar[3], Assistant Professor, Nasrin salehi[4], Associted Professor

1- Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
2- Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
Email: m.hoseiniabarde@yahoo.com, (Corresponding author)
3- Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
4- Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Abstract:
In the optimization problems of intelligent distribution systems where there are many variables and parameters, providing an efficient algorithm that has the ability to converge and solve in large networks is one of the main challenges of researchers. In this paper, a compound integer quadratic optimization model for improving the performance of large-scale distribution network using demand-side management problem, energy storage system, battery-to-metro system, optimal control of OLTC and SVR tap-trans and distributed generation resources. Fossil and renewable are offered alongside capacitor and shunt reactors. The considered multi-objective function is a scenario-based stochastic model, which accurately models the uncertainties in renewable energy sources. According to the considered problems and also the model of large networks of 118 and 874 buses, most of the algorithms are not able to converge due to the existence of many variables. In this article, the optimal performance of the proposed hybrid evolutionary algorithm is shown on large distribution networks, which is able to reach global optimal solutions compared to similar algorithms.

Keywords: Load management, smart grid, evolutionary algorithm, battery, renewable energy.

Date of sending the article: 2023/06/17
Acceptance date of the article: 2023/09/12

Name of responsible author: Mohamad Hoseini Abardeh
Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۷۱-۵۶

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

ارائه یک الگوریتم تکاملی ترکیبی برای بهینه‌سازی شبکه‌های هوشمند با استفاده از مدیریت بار در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی به مترو

نوع مطالعه: پژوهشی

محمدهادی رستمیان [۱]، دانشجو دکتری، محمدحسینی ابرده [۱،*]، استادیار، آزیتا آذرفر [۱]، استادیار ، نسرین صالحی [۲]، دانشیار

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

چکیده: در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع هوشمند که متغیرها و پارامترهای زیادی وجود دارد، ارائه یک الگوریتم کارآمد که قابلیت همگرایی و حل در شبکه‌های بزرگ را داشته باشد از چالش‌های اصلی محققان می‌باشد. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای بهبود عملکرد شبکه توزیع در مقیاس بزرگ با استفاده از مسئله مدیریت سمت تقاضا، سیستم ذخیره انرژی، سیستم باتری به مترو، کنترل بهینه تپ ترانس OLTC و SVR و همچنین منابع تولید پراکنده فسیلی و تجدیدپذیر در کنار خازن و راکتورهای شنت ارائه شده است. تابع چند هدفه در نظر گرفته شده یک مدل تصادفی مبتنی بر سناریو است، که مدل دقیقی از عدم قطعیت‌های موجود در منابع انرژی تجدیدپذیر را مدل‌سازی می‌کند. با توجه به مسائل در نظر گرفته شده و همچنین مدل شبکه‌های بزرگ ۱۱۸ و ۸۷۴ باس اغلب الگوریتم‌ها به دلیل وجود متغیرهای زیاد قادر به همگرایی نمی‌باشد. در این مقاله عملکرد مطلوب الگوریتم تکاملی ترکیبی پیشنهادی بر روی شبکه‌های توزیع بزرگ نشان داده شده است، که قادر رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری نسبت به الگوریتم‌های مشابه می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدیریت بار، شبکه هوشمند، الگوریتم تکاملی، باتری، انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد حسینی ابرده
نشانی نویسنده‌ی مسئول: شاهرود- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در شبکه‌های توزیع برق امروزی به دلیل وجود وسایل متنوع برقی در ابعاد بزرگ مانند ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی، متروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر با چالش‌هایی جدی برای حفظ ولتاژ و کاهش تلفات روبرو است. وجود یک مدل بهینه‌سازی ریاضی کارآمد و بهینه که بتواند با در نظر گرفتن این ادوات ولتاژ را بهبود و تلفات سیستم را به همراه شاخص‌های دیگر شبکه بهبود بخشد از چالش‌های اصلی محققان در مطالعات بهره‌برداری سیستم توزیع می‌باشد. تا کنون روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای بهره‌برداری بهینه سیستم‌های توزیع ارائه شده است که هر کدام دارای نواقصی می‌باشد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است.

۱- ۲- مرور پیشینه

مقالات متعددی امروزه برای بهره‌برداری بهینه سیستم توزیع ارائه شده است، که هر کدام از آن‌ها از لحاظ نوع مدل و دستگاه‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی سیستم از نواقصی برخوردار می‌باشد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. در جدول طبقه‌بندی (۱) مقایسه‌ای بین این مقاله با مراجع مشابه انجام شده است. در این جدول به ترتیب نوع مدل-سازی، استفاده از خازن (SC) و راکتور شنت (ShR)، ترانس تغییر تپ (OLTC)، تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای (SVR)، سیستم باتری به مترو (B2S)، منابع تولید پراکنده (DG)، ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی (EV)، منابع انرژی تجدیدپذیر (RDG)، مدل تصادفی، مدیریت پاسخ تقاضا (DR)، سیستم ذخیره انرژی (ESS) و تابع چند هدفه (MO) مورد مقایسه قرار گرفته است. یک برنامه‌ریزی تصادفی با هدف بالابردن انعطاف‌پذیری سیستم توزیع با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و فسیلی به همراه باتری توسط (Trakas et al., 2018) ارائه شده است. یک مدل بهره‌برداری برای سیستم‌های توزیع با استفاده از برنامه پاسخ تقاضا و بازآرایی سیستم به منظور کاهش هزینه‌های پیک بار توسط (Gutiérrez et al., 2016) ارائه شده است. در (Agalgaonkar et al., 2015) یک مدل بهره‌برداری تصادفی با هدف کاهش تلفات و تعداد تغییرات تپ OLTC با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم توزیع واقعی را ارائه کرده‌اند. در (Essallah et al., 2020) یک مدل غیر خطی برای بهینه‌سازی سیستم توزیع با استفاده از منابع تولید پراکنده و بازآرایی با هدف کاهش تلفات و بهبود ولتاژ ارائه شده است. در(Zhang et al., 2021) یک استراتژی بهینه مبتنی بر یک مدل غیر خطی برای کنترل ولتاژ سیستم توزیع در حضور باتری و SVR و SC پیشنهاد شده است. در (Lu et al., 2021) یک مدل دو مرحله‌ای مقاوم برای بهره‌برداری بهینه سیستم توزیع با در نظرگرفتن خودروهای برقی با هدف کاهش قطع بار ارائه کرده‌اند. در (Yun et al., 2022) روشی را با استفاده از ترانس‌های تغییر تپ برای جلوگیری از اضافه ولتاژ ناشی از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع ارائه شده است. در (Ranamuka et al., 2019) نویسندگان با استفاده از ترانس OLTC و خازن‌های شنت روشی را برای کاهش ولتاژ حفاظتی (CVR) با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع PV در شبکه توزیع ارائه نمودند. در (Nawaz et al., 2021) یک مدل چند سطحی را برای بهره‌برداری همزمان شبکه انتقال و توزیع با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و منابع بادی پیشنهاد کرده‌اند. در (Ingalalli et al., 2022) نویسندگان یک استراتژی کنترلی بهینه برای حفظ ولتاژ در شبکه‌های توزیع نامتعادل ارائه کردند. در (Sarstedt et al., 2022) با استفاده از یک الگوریتم تکاملی و ابرداده روشی برای بهینه-سازی سیستم‌های توزیع با هدف افزایش سود و انعطاف-پذیری شبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری ارائه شده است. در (Kodaira et al., 2020) نویسندگان الگوریتمی را برای بهره‌برداری بهینه سیستم ذخیره انرژی در شبکه‌های توزیع به منظور کاهش پیک شبکه ارائه نمودند. در (Jafari et al., 2021) نویسندگان مدلی را برای اتصال خودروهای برقی به شبکه (V2G) و خودروهای برقی به مترو (V2S) به منظور کاهش هزینه انرژی کل سیستم ارائه نمودند. در (Stefan et al., 2020) مدلی برای اتصال باتری و PV به ایستگاه مترو (B2S) با هدف پایداری پخش بار شبکه توزیع ارائه شده است. در (Rohama et al., 2022) یک درگاه هاب انرژی برای ادغام منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، خودروهای برقی و مترو با هدف کاهش پیک

شبکه ارائه شده است. در (Elmetwaly et al., 2020) یک الگوریتم تکاملی برای بهینه‌سازی کیفیت توان ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن دستگاه‌های D-FACTS ارائه شده است. نویسندگان در (Abas et al., 2020) یک مدل ترکیبی شامل تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای، خازن و باتری را برای کاهش هارمونیک ولتاژ و جریان شبکه توزیع ارائه نمودند. در (Hamidi et al., 2019) یک رویکرد بهینه‌سازی چند-هدفه را برای جلوگیری از کاهش و افزایش ولتاژ در ریز شبکه‌ها با استفاده از دستگاه‌های FACTS پیشنهاد نموده است. در (Liu et al., 2014) نویسندگان مسئله مدیریت سمت تقاضا را برای بهینه‌سازی سیستم توزیع با هدف کاهش هزینه تراکم بار ارائه نمودند. در (Ghorbanian et al., 2021) روشی مبتنی بر تئوری بازی برای بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و هزینه انرژی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و مدیریت سمت تقاضا ارائه شده است. در (Hemmatpour et al., 2022) یک مدل غیرقطعی به منظور مدل‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای برقی با هدف حفظ ولتاژ مطلوب شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات ارائه شده است. در (Sakipour et al., 2022) نویسندگان مدلی مبتنی بر سیستم‌های ذخیره انرژی و جبران‌کننده توان راکتیو را برای حفظ پایداری ولتاژ در حضور مزارع بادی ارائه نموده‌اند. در (Ahmad Khan et al., 2022) به منظور جلوگیری از کاهش نوسانات ولتاژ در حضور نفوذ بالای منابع PV در شبکه توزیع نویسندگان استفاده از OLTC و باتری را نیز پیشنهاد نموده‌اند. در (Karimianfard et al., 2019) یک روش ابتکاری برای جایابی منابع تولید پراکنده اکتیو و راکتیو به منظور کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه‌های توزیع گوناگون ارائه شده است. در (Karimianfard et al., 2022) نویسندگان یک مدل تصادفی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب برای بهینه‌سازی سیستم قدرت در حضور سیستم‌های ذخیره-سازی انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین شبکه گاز طبیعی پیشنهاد کردند. در (Su et al., 2014) به بهبود کارایی انرژی در سیستم‌های مترو پرداخته است. در سیستم‌های مترو، بهینه‌سازی زمان‌بندی و استراتژی حرکت برای افزایش بهره‌وری انرژی مهم است. در (Xiong et al., 2017) یک الگوریتم یکپارچه ارائه شده است که با هماهنگی بهینه‌سازی زمان‌بندی و استراتژی حرکت، منجر به بهبود ۲۴ درصدی میانگین مصرف انرژی در یک روز می‌شود. همچنین محاسبات کمتر از ۲ ثانیه است که مناسب برای استفاده در کنترل زمان واقعی می‌باشد. در (Tang et al., 2023) مدلی برای مدیریت و کنترل متروها با استفاده از روش‌های مصنوعی و آزمایشات محاسباتی معرفی شده است. در این مدل، ابتدا یک پلتفرم برای درک و مدیریت وضعیت متروها ایجاد شده و سیستم‌های مصنوعی مترو طراحی و اعتبارسنجی شده است. سپس با استفاده از آزمایش‌های محاسباتی، الگوریتم‌های مدیریت و کنترل بهبود می‌یابند. این مدل پیشنهادی امکاناتی همچون نظارت به زمان واقعی، هشداردهی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی را بهبود می‌بخشد و در خطوط متروی سوژو، چین، با موفقیت آزمایش شده است. در (Yang et al., 2014) مدلی برای بررسی تأثیرات خرابی زمین و تاثیرات آن روی ترانسفورماتورها پیشنهاد شده است. مدل پیشنهاد شده اطلاعات مسیر حرکتی مترو و جریان‌های خنثی ثبت شده را تجزیه و تحلیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که فاصله و ترمز قطارها بر جریان‌های خنثی و ترانسفورماتورها تاثیر گذار است. همچنین، نزدیکی قطار به ایستگاه نیز باعث افزایش تأثیر آن بر جریان‌های خنثی می‌شود. در (Wang et al., 2014) جهت بهینه‌سازی جداول زمانی متروها، با تأکید بر بهره‌وری انرژی و کیفیت خدمات، یک مدل بهینه‌سازی ارائه شده است. این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک با رمزگذاری دودویی، برنامه‌ریزی هدف‌دوگانه‌ای را برای کنترل زمان توقف و توقف‌ها طراحی کرده است. مطالعه موردی با داده‌های عملیاتی خط متروی ییژوانگ در چین انجام شده و نشان می‌دهد که این مدل نسبت به جداول فعلی، منجر به صرفه‌جویی در انرژی تا ۸.۸۶٪ و کاهش زمان انتظار مسافران تا ۳.۲۲٪ می‌شود.

همانطور که با بررسی ادبیات پیشین و طبق جدول (۱) مشاهده شد، مدل ارائه شده در این مقاله نسبت به مقالات پیشین یک مدل کامل بوده که می‌تواند شاخص‌های در نظر گرفته شده در تابع هدف را نیز نسبت به مطالعات پیشین بهینه‌تر نماید. از طرفی دیگر الگوریتم ارائه شده در این مقاله قادر است بخوبی برای شبکه‌های بزرگ توزیع با هر تعداد متغیر و پارامتر کارآمد باشد.

جدول (۱): مقایسه این پژوهش با مطالعات پیشین

مراجع	مدل	روش	SC	ShR	OLTC	SVR	B2S	DG	EV	RDG	Stochastic	DR	ESS	MO
این مطالعه	MIQP	GA-MPSO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trakas 2018	MIQP	B&B	×	×	×	×	×	✓	×	✓	✓	×	✓	×
Gutiérrez 2016	MINLP	HA	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	×
Agalgaonkar 2015	MILP	CCO	✓	×	✓	✓	×	×	×	✓	✓	×	×	✓
Essallah 2020	MINLP	MPSO	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	×	×	✓
Zhang 2021	NP	JM	✓	×	✓	✓	×	×	×	×	×	×	✓	×
Lu 2021	MILP	IAO	×	×	×	✓	×	×	✓	×	✓	×	×	✓
Yun 2022	NP	UK	✓	×	✓	✓	×	✓	×	×	×	×	×	×
Ranamuka 2019	NP	VVC	✓	×	✓	×	×	×	×	✓	×	×	×	×
Nawaz 2021	MILP	ATC	×	×	×	×	×	✓	×	✓	×	×	×	✓
Ingalalli 2022	NP	HA	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	×	×	×	×
Sarstedt 2022	MILP	–	✓	×	✓	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×
Kodaira 2020	NP	–	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×
Jafari 2021	MILP	–	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	×
Stefan 2020	NP	–	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×	×	✓	×
Rohama 2020	NP	–	×	×	×	×	×	×	✓	✓	×	×	✓	×
Elmetwaly 2020	NP	–	✓	✓	×	×	×	✓	×	✓	×	×	✓	×
Abas 2020	NP	–	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	×	✓	✓
Hamidi 2019	MILP	–	✓	✓	✓	×	×	✓	×	✓	×	×	×	✓
Liu 2014	NP	–	×	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	✓
Ghorbanian 2021	MILP	–	×	×	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓	✓
Hemmatpour 2022	MINLP	–	×	×	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	×
Sakipour 2022	MINLP	–	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	✓	×	✓	×
Ahmad 2022	MINLP	–	×	×	✓	×	×	×	×	✓	×	×	✓	×
Karimianfard 2019	NP	HA	✓	×	×	×	×	✓	×	✓	×	×	×	×

۱- ۳- مشارکت و نوآوری

چالشی که امروزه شبکه‌های توزیع نسبت به دیگر بخش‌های قدرت با آن روبرو هستند وجود ادوات متنوعی مانند خودروهای برقی، متروهای برقی، منابع تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده فسیلی، باتری‌ها، ادوات D-FACTS مانند خازن و راکتورهای شنت، ترانس‌های OLTC، تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای SVR و وجود بارهای هوشمند در این شبکه می‌باشد، که اگر در یک مدل کامل و یکپارچه در نظر گرفته شود عملکرد شبکه دقیق‌تر و بهینه‌تر خواهد بود. به طور خلاصه می‌توان مشارکت‌های اصلی این مقاله را به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- ارائه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه شامل مدل‌سازی مسئله مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه باتری، بهره‌برداری بهینه منابع تولید پراکنده، بهره‌برداری بهینه خازن و راکتور شنت، تنظیم تپ ترانس OLTC و SVR، مدل‌سازی سیستم باتری به مترو با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای برقی.

۲- ارائه یک الگوریتم تکاملی ترکیبی برای حل بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع در مقیاس بزرگ.

۱- ۴- بخش‌های مقاله

در بخش بعدی مدل‌سازی پیشنهادی ارائه شده و سپس الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شده نیز تشریح می‌شود. در بخش سوم سیستم‌های استاندارد در نظر گرفته شده معرفی و نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود و در بخش نهایی نتیجه‌گیری از مقاله ارائه خواهد شد.

۲- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در این بخش مدل بهینه‌سازی پیشنهادی شامل تابع چند-هدفه و همچنین قیود مرتبط با مسئله ارائه می‌شود، سپس الگوریتم تکاملی ترکیبی نیز ارائه خواهد شد.

۲- ۱- تابع هدف

در این مقاله یک تابع چند هدفه برای بهینه‌سازی سیستم توزیع برای روزپیشرو در نظر گرفته شده است. رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع چند هدفه پیشنهادی می‌باشد. در اینجا اهداف در نظر گرفته شده به ترتیب برابر کاهش تلفات خط، کاهش هزینه خرید انرژی از ایستگاه، کاهش هزینه قطع بار اکتیو و راکتیو در برنامه مدیریت سمت تقاضا، کاهش هزینه قطع بار، کاهش هزینه آلایندگی واحدهای DG، کاهش انحراف ولتاژ شبکه، کاهش هزینه قطع توان شارژ ایستگاه-های شارژ خودروهای برقی و در آخر نیز کاهش قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. در این مقاله توان منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین توان شارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به صورت تصادفی و به روش مبتنی بر سناریو در نظر گرفته شده است. در این مقاله از روش ضرایب وزنی برای مدل‌سازی تابع چند هدفه استفاده شده است. در اینجا ω نشان‌دهنده ضریب وزنی برای هر یک از توابع هدف در نظر گرفته شده می‌باشد. شایان ذکر است که ضریب وزنی برای توابع با مقدار بزرگتر، اندازه کوچکتر و برای توابع با مقدار کوچکتر ضرایب وزنی بزرگتری در نظر گرفته شده است. این بدین منظور است که وزن هر یک از توابع هدف تقریبا برابر باشد تا به یک مقدار در مسئله بهینه‌سازی کاهش پیدا کند.

$$
\begin{aligned}
\min \omega_1 & \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} T\times r_b\left(\left(f_{b,t}^{p}\right)^2+\left(f_{b,t}^{q}\right)^2\right) \\
&+\omega_2\sum_{t\in T} c_t^p p_t^s + c_t^q q_t^s \\
&+\omega_3\sum_{n\in N}\sum_{t\in T}\alpha_p\left(d_{n,t}^{p}-D_{n,t}^{p}\right) \\
&+\alpha_q\left(d_{n,t}^{q}-D_{n,t}^{q}\right) \\
&+\omega_4\sum_{n\in N}\sum_{t\in T} c_n^r\left(o_{n,t}^{p}+o_{n,t}^{q}\right) \\
&+\omega_5\sum_{n\in N}\sum_{t\in T} c_n^e\left(p_{n,t}^{DG}\right)+\omega_6\sum_{n\in N}\sum_{t\in T}\left(\Delta_{n,t}\right) \\
&+\omega_7\sum_{s\in S}\sigma_s\left(\sum_{n\in N}\sum_{t\in T}\sum_{s\in S} c_n^{ev}\left(\hat{p}_{n,t,s}^{ev}-p_{n,t}^{ev}\right)\right. \\
&\left.+c_n^{re}\left(\hat{p}_{n,t,s}^{re}-p_{n,t}^{re}\right)\right)
\end{aligned}
\tag{۱}
$$

طبق رابطه (۱) به ترتیب n، b، t و s شاخص‌های شمارش باس، خط، زمان و سناریو می‌باشد و مجموعه آن‌ها به ترتیب با N، B، T و S نشان داده شده است. در اینجا r_b نشان-دهنده مقاومت خط، $f_{b,t}^{p}$ و $f_{b,t}^{q}$ به ترتیب برابر شار اکتیو و راکتیو خط می‌باشد. به ترتیب c_t^p و c_t^q برابر هزینه خرید توان حقیقی و راکتیو از ایستگاه فوق توزیع می‌باشد، که p_t^s و q_t^s به ترتیب برابر توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از ایستگاه می‌باشد. به ترتیب α_p و α_q برابر ضریب جریمه قطع بار اکتیو و راکتیو در برنامه مدیریت سمت تقاضا می-باشد. در اینجا $d_{n,t}^{p}$ و $D_{n,t}^{p}$ برابر بار اکتیو اولیه و بار اکتیو تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا می‌باشد، به همین ترتیب $d_{n,t}^{q}$ و $D_{n,t}^{q}$ برابر بار راکتیو اولیه و بار راکتیو تغییریافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا می‌باشد. به ترتیب $o_{n,t}^{p}$ و $o_{n,t}^{q}$ برابر قطع بار اکتیو و راکتیو شبکه و c_n^r برابر هزینه قطع بار می‌باشد. به ترتیب c_n^e و $p_{n,t}^{DG}$ برابر هزینه انتشار آلایندگی واحدهای تولیدپراکنده و توان این منبع می‌باشد. تابع انحراف ولتاژ نیز با $\Delta_{n,t}$ نشان داده شده است. در اینجا σ_s برابر احتمال هر سناریو می‌باشد. به ترتیب c_n^{ev} و c_n^{re} برابر هزینه قطع توان شارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، به همین ترتیب $\hat{p}_{n,t,s}^{ev}$ و $p_{n,t}^{ev}$ به ترتیب برابر توان واقعی مورد نیاز شارژ ایستگاه‌های شارژ خودرو برقی مبتنی بر سناریو و توان

شارژ مورد بهره‌برداری شده می‌باشد، همچنین $\hat{p}_{n,t,s}^{re}$ و $p_{n,t}^{re}$ به ترتیب برابر توان واقعی منابع انرژی تجدیدپذیر در هر سناریو می‌توان مورد بهره‌برداری منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. تولید هر سناریو به روش سناریو گسسته از طریق تابع توزیع تجمعی و نرمال بدست آمده است (Karimianfard et al., 2022).

۲- ۲- محدودیت‌های تعادل توان و بهره‌برداری در شبکه

رابطه (۲) و (۳) به ترتیب قیود مرتبط با تعادل توان اکتیو و راکتیو را در شبکه توزیع نشان می‌دهد. در این رابطه به ترتیب $p_{n,t}^{dis}$ و $p_{n,t}^{ch}$ توان دشارژ و شارژ باتری و η^{DG} برابر ضریب توان منابع تولید پراکنده می‌باشد. همچنین به ترتیب $q_{n,t}^{sc}$ و $q_{n,t}^{ShR}$ نشان‌دهنده توان راکتیو خازن و راکتور شنت می‌باشد.

$$p_t^s + p_{n,t}^{dis} + p_{n,t}^{DG} + o_{n,t}^{p} + p_{n,t}^{re} + \sum_{ij\in N} f_{ij,t}^{p} - \sum_{ji\in N} f_{ji,t}^{p} = D_{n,t}^{p} + p_{n,t}^{ev} + p_{n,t}^{ch} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲}$$

$$q_t^s + o_{n,t}^{q} + p_{n,t}^{DG}\eta^{DG} + q_{n,t}^{sc} + \sum_{ij\in N} f_{ij,t}^{q} - \sum_{ji\in N} f_{ji,t}^{q} = D_{n,t}^{q} + q_{n,t}^{ShR} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۳}$$

رابطه (۴) و (۵) به ترتیب محدودیت بهره‌برداری توان اکتیو و راکتیو از ایستگاه در هر ساعت می‌باشد، که $\hat{p}^s$ و $\hat{q}^s$ به ترتیب برابر حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل بهره‌برداری در هر ساعت می‌باشد. به همین ترتیب رابطه (۶) و (۷) به ترتیب حداکثر میزان بهره‌برداری توان اکتیو و راکتیو را در دوره زمانی مورد نظر نشان می‌دهد. در این روابط به ترتیب $\bar{p}^s$ و $\bar{q}^s$ نشان‌دهنده حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل بهره‌برداری در کل دوره زمانی در نظر گرفته شده می‌باشد. به ترتیب رابطه (۸) و (۹) قید شار اکتیو و راکتیو خطوط را نشان می‌دهد، که $\hat{f}_b^p$ و $\hat{f}_b^q$ به ترتیب برابر حداکثر توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط می‌باشد، همچنین γ_b نشان‌دهنده وضعیت خطوط شبکه می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده محدودیت بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده می‌باشد، که $\bar{p}_n^{DG}$ برابر حداکثر توان اکتیو این منابع است، که ι_n نشان‌دهنده وضعیت فعال بودن این منابع است. رابطه (۱۱) محدودیت بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهد که κ_n نیز وضعیت فعال بودن این منابع را نشان می‌دهد. در نهایت رابطه (۱۲) نشان‌دهنده محدودیت توان شارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی می‌باشد.

$$0 \le p_t^s \le \hat{p}^s \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۴}$$

$$0 \le q_t^s \le \hat{q}^s \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۵}$$

$$0 \le \sum_{t\in T} p_t^s \le \bar{p}^s \tag{۶}$$

$$0 \le \sum_{t\in T} q_t^s \le \bar{q}^s \tag{۷}$$

$$-\hat{f}_b^p \gamma_b \le f_{b,t}^p \le \hat{f}_b^p \gamma_b \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۸}$$

$$-\hat{f}_b^q \gamma_b \le f_{b,t}^q \le \hat{f}_b^q \gamma_b \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۹}$$

$$0 \le p_{n,t}^{DG} \le \bar{p}_n^{DG} \iota_n \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۰}$$

$$0 \le p_{n,t}^{re} \le \hat{p}_{n,t,s}^{re} \kappa_n \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \tag{۱۱}$$

$$0 \le p_{n,t}^{ev} \le \hat{p}_{n,t,s}^{ev} \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \tag{۱۲}$$

۲- ۳- مدیریت سمت تقاضا و محدودیت‌های قطع بار

رابطه (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر مقدار بار اکتیو و راکتیو شبکه پس از برنامه مدیریت سمت تقاضا می‌باشد، این روابط تضمین می‌کند که مجموع بارهای شبکه پس از برنامه مدیریت سمت تقاضا کوچکتر یا برابر مجموع بارهای اولیه شبکه باشد. رابطه (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات بار اکتیو و راکتیو را پس از برنامه مدیریت سمت تقاضا نشان می‌دهد. در اینجا ε برابر میزان درصد تغییرات بار یا جابه جایی بار در نظر گرفته شده در مسئله مدیریت سمت تقاضا می‌باشد. رابطه (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت حذف بار اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد.

$$\sum_{n\in N} D_{n,t}^{p} \le \sum_{n\in N} d_{n,t}^{p} \quad \forall t \in T \tag{۱۳}$$

$$\sum_{n\in N} D_{n,t}^{q} \le \sum_{n\in N} d_{n,t}^{q} \quad \forall t \in T \tag{۱۴}$$

$$d_{n,t}^{p} - d_{n,t}^{p} \times \varepsilon \le D_{n,t}^{p} \le d_{n,t}^{p} + d_{n,t}^{p} \times \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۵}$$

$$d_{n,t}^{q} - d_{n,t}^{q} \times \varepsilon \le D_{n,t}^{q} \le d_{n,t}^{q} + d_{n,t}^{q} \times \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۶}$$

$$0 \le o_{n,t}^{p} \le D_{n,t}^{p} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۷}$$

$$0 \le o_{n,t}^{q} \le D_{n,t}^{q} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۱۸}$$

۲- ۴- محدودیت‌های ولتاژ

رابطه (۱۹) نشان‌دهنده تعریف ولتاژ در شبکه توزیع می‌باشد. در این رابطه $v_{i,t}$ برابر ولتاژ مربعی باس شبکه و به ترتیب r_b و x_b مقاومت و راکتانس خطوط شبکه می‌باشد. رابطه (۲۰) محدودیت بهره‌برداری ولتاژ را نشان می‌دهد که $\overline{v}_n$ و $\underline{v}_n$ به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ در نظر گرفته شده می‌باشد. رابطه (۲۱) نشان‌دهنده ولتاژ در باس مرجع شبکه توزیع می‌باشد و رابطه (۲۲) تعریف انحراف ولتاژ باس شبکه می‌باشد، که به صورت خطی مدل شده است.

$$v_{i,t} = v_{j,t} - 2\left(r_b f_{b,t}^{p} + x_b f_{b,t}^{q}\right) \quad \forall ij \in B, t \in T \tag{۱۹}$$

$$\underline{v}_n \le v_{n,t} \le \overline{v}_n \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۰}$$

$$v_{n,t} = 1 \quad \forall n \in ref, t \in T \tag{۲۱}$$

$$v_{n,t} - 1 \le \Delta_{n,t} \ge 1 - v_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۲}$$

۲- ۵- سیستم ذخیره انرژی

روابط (۲۳) الی (۲۷) نشان‌دهنده باتری در شبکه توزیع می‌باشد. رابطه (۲۳) و (۲۴) به ترتیب برابر قید بهره‌برداری توان دشارژ و شارژ باتری است، که β_n و $z_{n,t}$ به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت باتری و وضعیت باتری می‌باشد. رابطه (۲۵) نشان‌دهنده انرژی موجود در باتری می‌باشد که $e_{n,t}$ نشان‌دهنده وضعیت انرژی و η^{ch} و η^{dis} به ترتیب برابر راندمان شارژ و دشارژ باتری است. رابطه (۲۶) محدودیت بهره‌برداری انرژی موجود در باتری را نشان می‌دهد و رابطه (۲۷) تضمین می‌کند که در ساعت اول هیچگونه انرژی اولیه در باتری وجود نداشته باشد.

$$0 \le p_{n,t}^{dis} \le \beta_n\left(1 - z_{n,t}\right) \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۳}$$

$$0 \le p_{n,t}^{ch} \le \beta_n\left(z_{n,t}\right) \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۴}$$

$$e_{n,t+1} = e_{n,t} + \eta^{ch} p_{n,t+1}^{ch} - \eta^{dis} p_{n,t+1}^{dis} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۵}$$

$$0 \le e_{n,t} \le \beta_n \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۲۶}$$

$$e_{n,t} = 0, p_{n,t}^{dis} = 0 \quad \forall n \in N, t = 1 \tag{۲۷}$$

۲- ۶- مدل‌سازی خازن و راکتور شنت

رابطه (۲۸) و (۲۹) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت بهره‌برداری از خازن و راکتور شنت می‌باشد. در این رابطه $\overline{q}_n^{sc}$ و $\overline{q}_n^{ShR}$ به ترتیب حداکثر توان راکتیو قابل بهره‌برداری خازن و راکتور شنت می‌باشد، همچنین $\varphi_{n,t}$ نشان‌دهنده وضعیت فعال بودن خازن شنت است، در صورتی که برابر با ۱ باشد، در غیر اینصورت صفر و نشان‌دهنده وضعیت فعال راکتیو شنت می‌باشد.

$$0 \le q_{n,t}^{sc} \le \overline{q}_n^{sc} \varphi_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \tag{۲۸}$$

$$0 \le q_{n,t}^{ShR} \le \overline{q}_n^{ShR}\left(1 - \varphi_{n,t}\right) \quad \forall n \in N, t \in T, \varphi \in \{0,1\} \tag{۲۹}$$

۲- ۷- مدل‌سازی ترانس OLTC و SVR

روابط (۳۰) الی (۳۵) مدل‌سازی ترانس OLTC و SVR را در شبکه نشان می‌دهد. در این روابط Ω^{OLTC} و Ω^{SVR} به ترتیب برابر مکان باس ترانس OLTC و مکان SVR در شبکه می‌باشد. به همین ترتیب M و m به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه و شاخص گام در نظر گرفته شده برای تپ OLTC و SVR می‌باشد. متغیرهای باینری $\theta_{m,t}^{oltc}$ و $\theta_{m,t}^{SVR}$ به ترتیب متغیر کمکی برای گام OLTC و SVR می‌باشد، به همین ترتیب A_m و B_m برابر مجموعه گام‌های در نظر گرفته شده برای OLTC و SVR می‌باشد، در نهایت $\nabla_{n,t,m}^{oltc}$ و $\nabla_{n,t,m}^{SVR}$ تپ ترانس OLTC و تپ SVR می‌باشد.

$$v_{n,t} = 1 \times \nabla_{n,t,m}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M \tag{۳۰}$$

$$\nabla_{n,t,m}^{oltc} = \sum_{m\in M} A_m \times \theta_{m,t}^{oltc} \quad \forall n \in \Omega^{OLTC}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \tag{۳۱}$$

$$\sum_{m} \theta_{m,t}^{oltc} \le 1 \quad \forall t \in T \tag{۳۲}$$

$$v_{i,t} = v_{j,t} \times \nabla_{n,t,m}^{SVR} - 2\left(r_b f_{b,t}^{p} + x_b f_{b,t}^{q}\right) \quad \forall ij \in \Omega^{SVR}, t \in T \tag{۳۳}$$

$$\nabla_{n,t,m}^{SVR} = \sum_{m\in M} B_m \times \theta_{m,t}^{SVR} \quad \forall n \in \Omega^{SVR}, t \in T, m \in M, \theta \in \{0,1\} \tag{۳۴}$$

$$\sum_{m} \theta_{m,t}^{SVR} \le 1 \quad \forall t \in T \tag{۳۵}$$

۲- ۸- مدل‌سازی باتری به مترو (B2S)

رابطه (۳۶) نشان‌دهنده باتری‌های نصب شده در کنار ایستگاه مترو را نشان می‌دهد، که علاوه بر وظیفه شارژ و دشارژ خودش وظیفه تامین توان مورد نیاز مترو را نیز دارد. در اینجا توان مورد نیاز مترو با $p_{n,t}^{sub}$ نشان داده شده است. رابطه (۳۷) تضمین می‌کند که توان مورد نیاز مترو برابر با بار مترو باشد. در اینجا $l_{n,t}^{sub}$ نشان‌دهنده بار مترو می‌باشد.

$$e_{n,t+1} = e_{n,t} + \eta^{ch} p_{n,t+1}^{ch} - \eta^{dis} p_{n,t+1}^{dis} - p_{n,t}^{sub} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۳۶}$$

$$p_{n,t}^{sub} = l_{n,t}^{sub} \quad \forall n \in N, t \in T \tag{۳۷}$$

در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جولیا نوشته شده است و با حل‌کننده Guobi حل شده است ارائه می‌شود.

۹-۲- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم PSO الگوریتمی برگرفته از شبیه‌سازی رفتار شکار پرندگان است که توانایی جستجوی راه حل بهینه سراسری مسائل پیچیده را دارد. هر ذره به عنوان یک ذره بدون حجم و جرم در فضای d بعدی در نظر گرفته می‌شود ، پرواز با سرعت معین در فضای جستجو و تنظیم دینامیکی این سرعت با توجه به تحلیل جامع تجربه پرواز فردی و جمعی و سپس به روز رسانی مکان فعلی جستجوی سراسری را تحت شرایط تناسب فردی انجام می‌دهد و با تولید مجموعه‌ای از ذرات با سرعت‌ها و موقعیت‌های تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود. در فرآیند جستجو، PSO باید به طور مداوم سرعت و موقعیت هر ذره را با ردیابی بهترین تجربه فردی و جمعی آن به روز کند. مدل اصلاح شده الگوریتم PSO پیشنهاد شده در این مطالعه می‌تواند، موقعیت‌های بد را در هر بار تکرار شناسایی نموده و در تکرار بعد از جستجوی آن‌ها بپرهیزد. این قابلیت این امکان را می‌دهد که موقعیت‌های خوب سریعتر شناسایی شده و همگرایی الگوریتم و همچنین یافتن نتایج بهینه سراسری دست یافتنی شود. این عبارت با تعریف جمله $(c_1^b r_2\left(\mathcal{X}_{mn}^k - \mathcal{B}_{mn}^k\right))$ در تابع به روزرسانی الگوریتم تعریف شده است. از طرفی دیگر بر خلاف مدل کلاسیک الگوریتم PSO که ضرایب وزنی و فاکتورهای آموزش به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود، در این مقاله با هر بار تکرار الگوریتم این ضرایب نیز به روز می‌شود تا از حرکت ذرات جمعی و فردی به سمت موقعیت‌های بهینه محلی جلوگیری شود. این امر سبب شده تا الگوریتم در جستجوی موقعیت‌های محلی گیر نکرده و بتواند جستجوی سراسری را به توجه به مولفه‌های فردی و جمعی انجام دهد. این به روزرسانی با روابط (۴۱) الی (۴۵) تعریف شده است.

$$\mathcal{F}_{mn}^k = 0, \mathcal{X}_{mn}^k = rand\{ss\} \tag{۳۸}$$

$$\mathcal{F}_{mn}^{k+1} = w\mathcal{F}_{mn}^k + c_1^g r_1\left(\mathcal{A}_{mn}^k - \mathcal{X}_{mn}^k\right) + c_1^b r_2\left(\mathcal{X}_{mn}^k - \mathcal{B}_{mn}^k\right) + c_2 r_3\left(\mathcal{D}_{mn}^k - \mathcal{X}_{mn}^k\right) \tag{۳۹}$$

$$\mathcal{X}_{mn}^{k+1} = \mathcal{X}_{mn}^k + \mathcal{F}_{mn}^{k+1} \tag{۴۰}$$

$$w = \begin{cases} w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times l_1(t), & t \\ 2w_{min} + 2(d - w_{min}) \times l_2(t), & t \end{cases} \tag{۴۱}$$

$$l_1(t) = e^{-30\times(t/t_{max})^{15}} \tag{۴۲}$$

$$l_2(t) = -\frac{t}{t_{max}} \tag{۴۳}$$

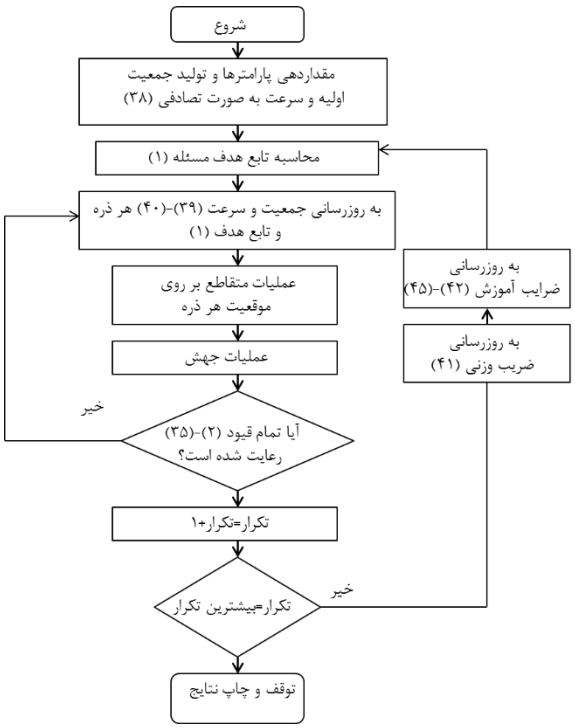
$$c_1^g(t) = \left(c_{1,start}^g - c_{1,end}^g\right) \times \tan\left(0.875 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.6}\right)\right) + c_{1,end}^g \tag{۴۴}$$

$$c_2(t) = \left(c_{2,start} - c_{2,end}\right) \times \arctan\left(2.8 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.4}\right)\right) + c_{2,end} \tag{۴۵}$$

رابطه (۳۸) مقدار اولیه سرعت ذره n و بعد m را در تکرار جریان k نشان می‌دهد. برای k=1، سرعت اولیه مطابق رابطه (۳۸) صفر است و موقعیت اولیه به طور تصادفی از فضای جستجو (SS) انتخاب می‌شود. رابطه (۳۹) رابطه به روز رسانی سرعت در تکرار

k+1 است. رابطه (۴۰) نیز موقعیت جدید ذرات را در تکرار k+1 نشان می‌دهد. در رابطه (۳۹)، r عدد تصادفی در محدوده {۰، ۱} می‌باشد. وزن اینرسی w از (۴۱) و روابط غیرخطی (۴۲) و (۴۳) محاسبه می‌شود، که t_{max} حداکثر تعداد تکرار می‌باشد. پارامترهای $c_1^g(t)$ و $c_2(t)$ به صورت پویا با استفاده از تابع مماس (۴۲) و (۴۵) تنظیم می‌شوند تا بین جستجوهای سراسری و محلی تعادل بهتری برقرار شود.

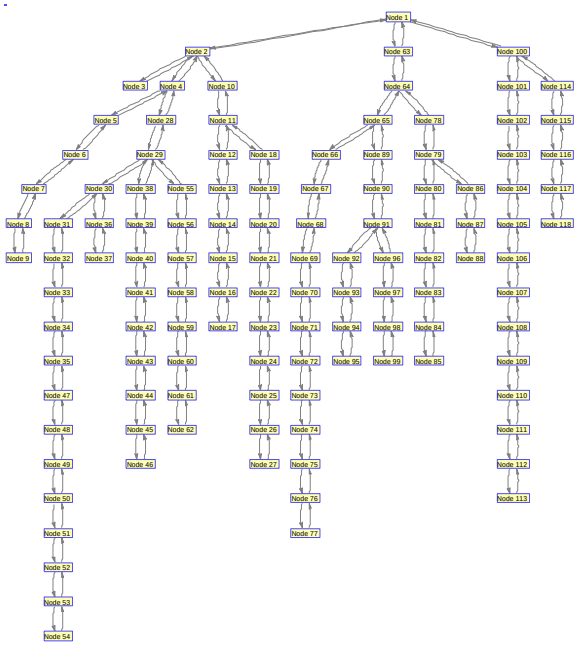
با این حال، مطالعات مربوطه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرار PSO، تنوع جمعیت ذرات به راحتی از بین می‌رود و در یک بهینه محلی قرار می‌گیرد. در این مقاله ایده ترکیب الگوریتم ژنتیک (GA) بر اساس الگوریتم اصلاح شده ازدحام ذرات (MPSO) برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در نظر گرفته شده است، تا عملیات متقاطع (cross) و جهش (mutation) را روی جمعیت انجام دهد که برای بهبود توانایی بهینه سراسری ذرات در MPSO مفید می‌باشد و باعث می‌شود الگوریتم از نقطه بهینه محلی خارج شود. الگوریتم GA مسئله‌ای را که باید حل شود در یک کروموزوم رمزگذاری می‌کند و با بهینه‌سازی عملیات انتخاب، متقاطع و جهش کروموزوم، راه حل بهینه را به دست می‌آورد. الگوریتم ترکیبی GA-MPSO تصادفی بودن GA و مزایای MPSO را در جستجوی دقیق نزدیک به ذره بهینه ترکیب می‌کند تا توانایی بهینه‌سازی سراسری را افزایش دهد. الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی GA-MPSO در شکل (۱) نشان داده شده است.



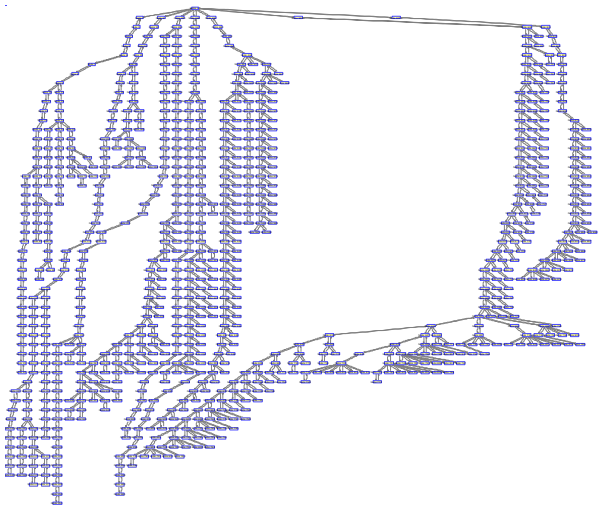
شکل (۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی GA-MPSO

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش سناریوهای در نظر گرفته شده برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی معرفی و نتایج شبیه‌سازی و صحت-سنجی درستی مدل پیشنهادی ارائه خواهد شد. بدین منظور شبکه استاندارد ۱۱۸ و ۸۷۴ شین برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است. برای بررسی مدل پیشنهادی دو سناریو بهره‌برداری در شرایط عادی و در شرایط خروج منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است. راندان باتری‌ها ۹۰ درصد و درصد تغییرات بار نیز ۱۰ دردصد در نظر گرفته شده است. ترانس OLTC بین پست و باس ۱ شبکه‌ها قرار دارد و تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای نیز در خط ۸۶ در شبکه ۱۱۸ و در خط ۵۱۱ ششبکه ۸۷۴ باس نصب شده است. شکل (۲) و (۳) شماتیکی از شبکه توزیع ۱۱۸ و ۸۷۴ باس بزرگ را نشان می‌دهد.



شکل (۲): شماتیک شبکه ۱۱۸ باس



شکل (۳) شماتیک شبکه ۸۷۴ باس

۱-۳- بهره‌برداری در شرایط عادی

در این حالت فرض شده است که تمام منابع تولید توان در شبکه‌ها نیز به درستی کار می‌کند. جداول (۲) و (۳) به ترتیب نتایج مربوط به بهره‌بردرای بدون خروج منابع در شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هیچگونه قطعی باری در شبکه‌ها در شرایط عادی وجود ندارد. تلفات توان به ترتیب برای شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس به ترتیب برابر ۱۱.۴، ۳۴.۳ مگاولت آمپر برای یک روز شده است. انحراف ولتاژ به ترتیب برابر ۰.۰۳۲ و ۰.۰۶۵ پریونیت برای شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس می‌باشد. به همین ترتیب توان منابع تولید پراکنده برای یک روز در شبکه ۱۱۸ باس برابر ۷۰ مگاولت آمپر و برای شبکه ۹۸۴ باس برابر ۱۱۳ مگاولت آمپر می‌باشد. مدت زمان حل مسئله به ترتیب برای شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس برابر ۸۷ و ۴۶۹ ثانیه شده است. دیگر مقادیر مثل آلایندگی، کمترین و بیشترین ولتاژ و همچنین توان‌های خازن و راکتورهای شنت نیز در جدول نشان داده شده است.

جدول (۲) مقایسه بهره‌برداری ۲۴ ساعته در شرایط عادی در شبکه ۱۱۸ باس

تلفات توان (MVA)	۱۱.۴
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۳۲
قطع بار (MVA)	۰
آلایندگی (T/m^2)	۳.۵
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۷۴
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۰۶
خرید انرژی (MVA)	۱.۴۸
حداکثر بهره‌برداری از DGها در ۲۴ ساعت (MVA)	۷۰
حداکثر بهره‌برداری از SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۲۲
حداکثر بهره‌برداری از ShRها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۳.۲۷
تابع هدف	۸۹۰۹
زمان (S)	۸۷

جدول (۳) مقایسه بهره‌برداری ۲۴ ساعته در شرایط عادی در شبکه ۸۷۴ باس

تلفات توان (MVA)	۳۴.۳
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۶۵
قطع بار (MVA)	۰
آلایندگی (T/m^2)	۵.۶
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۵
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۱۴
خرید انرژی (MVA)	۲.۲
حداکثر بهره‌برداری از DGها در ۲۴ ساعت (MVA)	۱۱۳
حداکثر بهره‌برداری از SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۲۲.۵
حداکثر بهره‌برداری از ShRها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱.۱۲
تابع هدف	۱۲۷۰
زمان (S)	۴۶۹

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نشان‌دهنده مقایسه‌ای بین بار در حالت اولیه و بار تغییریافته پس از مدیریت سمت تقاضا در حالت عادی برای شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس می‌باشد. مشاهده می‌شود که نمودار رنگ آبی بار اولیه و نمودرا رنگ نارنجی بار تغییریافته را نشان می‌دهد. در این تغییرات مشخص است که پیک بار در ساعات ۱۸، ۱۹ و ۲۰ پس از مدیریت سمت تقاضا نسبت به بار اولیه بسیار کاهش یافته است.

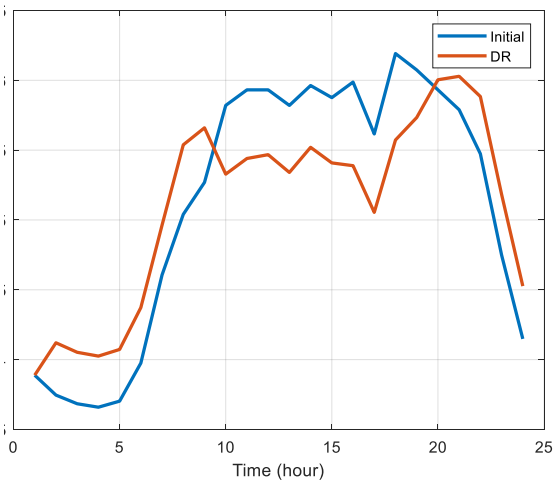
شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب خرید انرژی شبکه توزیع را از شبکه بالادست در ایستگاه در شبکه‌های ۱۱۸ و ۸۷۴ باس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به دلیل وجود منابع تولید پراکنده، منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری‌های ذخیره انرژی الکتریکی در ساعات ۱۰ الی ۱۳ برای شبکه ۱۱۸ باس و

ساعات الی ۱۳ و ۱۷ الی ۱۹ برای شبکه ۸۷۴ باس نیازی به خرید انرژی نبوده است.

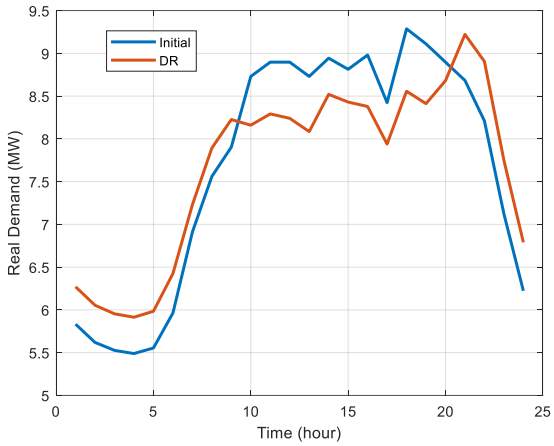
شکل‌های (۸) و (۹) نشان‌دهنده متوسط ولتاژ شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس در ۲۴ ساعت مختلف شبانه روز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات ولتاژ در طول ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده بین ۰.۰۳ پریونیت برای شبکه ۱۱۸ و ۰.۰۶ پریونیت برای شبکه ۸۷۴ باس است، که کمترین انحراف ولتاژ را نشان می‌دهد، که می‌توان دلیل آن را وابسته به دستگاه‌های D-FACTS مدل‌سازی شده در شبکه دانست.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیز به ترتیب وضعیت شارژ و دشارژ بهینه باتری‌های موجود در شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس را در حالت عادی نشان می‌دهد. در این شکل محور منفی نشان‌دهنده شارژ و محور مثبت y نشان‌دهنده دشارژ باتری می‌باشد. مشاهده می‌شود که در ساعات اولیه روز باتری شارژ و در ساعات پیک بار دشارژ شده است.

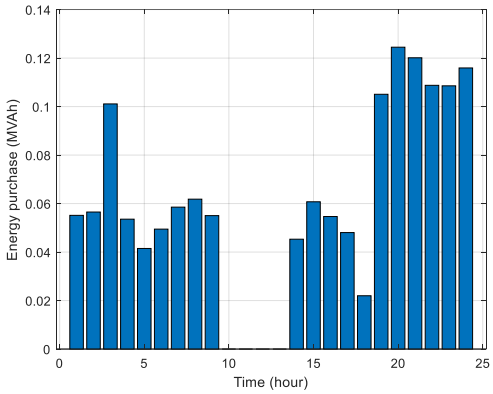
شکل (۱۲) وضعیت شارژ خودروهای برقی را در طول ۲۴ ساعت برای شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس نشان می‌دهد. وضعیت شارژ خودرهای برقی نیز ربطی به شبکه نداشته و صرفا رفتار مالکان خودروهای برقی را برای شارژ نشان می‌دهد.



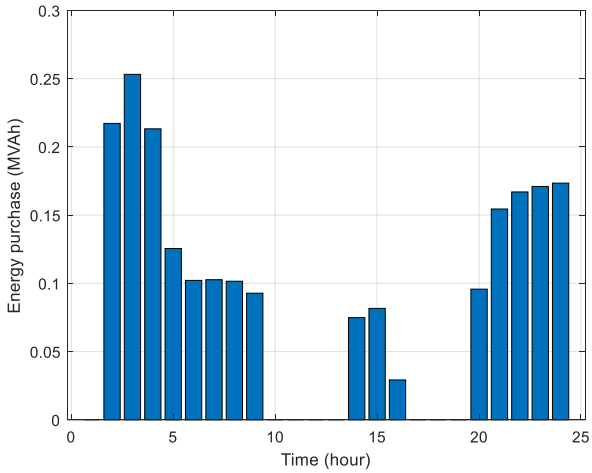
شکل (۴) مقایسه بار اولیه با بار تغییر یافته در مسئله پاسخ تقاضا در حالت عادی در شبکه ۱۱۸



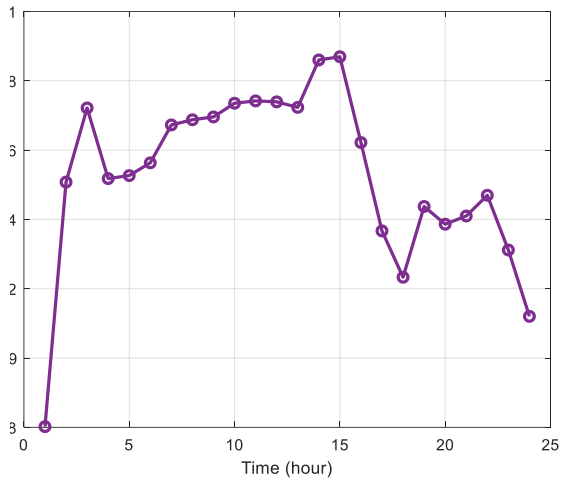
شکل (۵) مقایسه بار اولیه با بار تغییر یافته در مسئله پاسخ تقاضا در حالت عادی در شبکه ۸۷۴



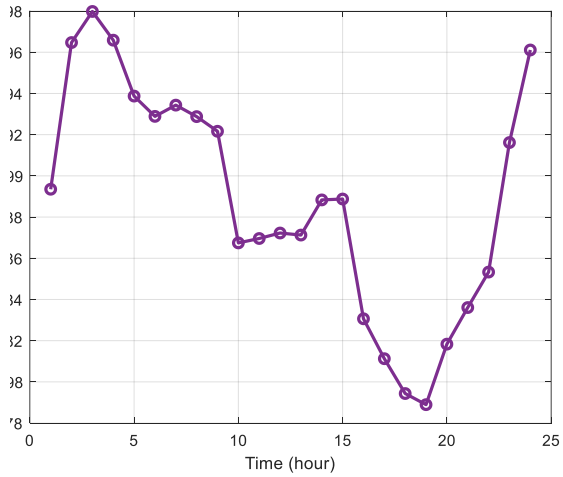
شکل (۶) خرید انرژی در حالت عادی در شبکه ۱۱۸ باس



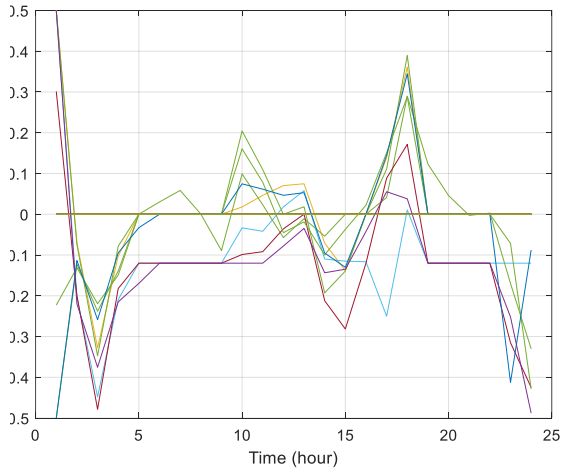
شکل (۷) خرید انرژی در حالت عادی در شبکه ۸۷۴ باس



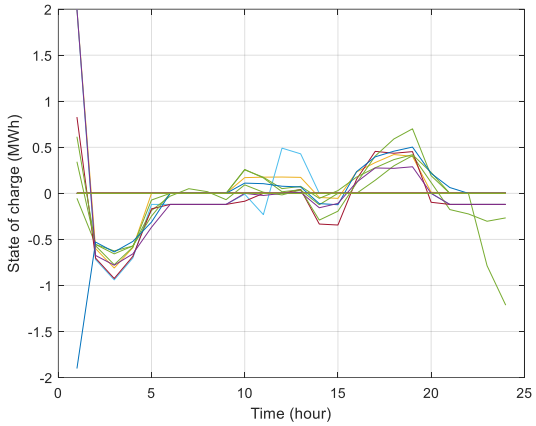
شکل (۸) متوسط ولتاژ شبکه ۱۱۸ باس در حالت عادی



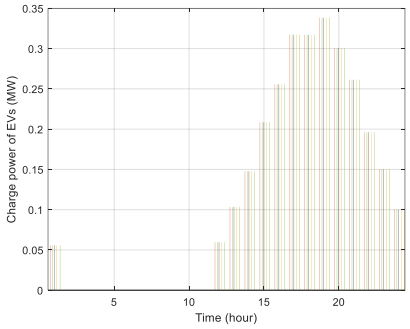
شکل (۹) متوسط ولتاژ شبکه ۸۷۴ باس در حالت عادی



شکل (۱۰) وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها در شبکه ۱۱۸باس



شکل (۱۱) وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها در شبکه ۸۷۴ باس



شکل (۱۲) وضعیت شارژ خودروهای برقی در شبکه ۳۳ و ۸۷۴ باس

۲-۳- بهره‌برداری با در نظر گرفتن وقوع خرابی

برای بررسی بهتر عملکرد مدل بهینه‌سازی در شرایط خرابی منابع چندین حالت دیگر نیز در نظر گرفته شده است. بدین منظور طبق روابط (۱۰) الی (۱۱) و متغیرهای باینری در نظر گرفته شده برای خطوط شبکه و وضعیت فعال بودن منابع تولید توان، با محدودیت بر روی این متغیرها رفتار شبکه را نیز با توجه به مدل پیشنهادی تجزیه و تحلیل می‌کنیم. در این شرایط بارپذیر شبکه را در حالت عادی فرض می‌کنیم. جدول (۴) و (۵) حالت‌های خروج واحد DG از شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس تجزیه و تحلیل شده است. طبق جدول (۴) و جدول (۵) مشاهده می‌شود که با خروج واحدهای تولید پراکنده تلفات و انحراف ولتاژ افزایش پیدا کرده است. همچنین نشان داده شده است که با خروج واحد تولید پراکنده در حدود ۱۳ مگاولت آمپر برای شبکه ۱۱۸ و مقدار ۱۰ مگاولت آمپر برای شبکه ۸۷۴ باس قطع بار خواهد

داشت. سایر شاخص‌های مهم هم با خروج واحدها نیز افزایش پیدا کرده است.

جدول (۴) مقایسه بهره‌برداری تحت وقوع خروج واحدهای تولید پراکنده در شبکه ۱۱۸ باس

	خرابی ۳ واحد تولید پراکنده
تلفات توان (MVA)	۱۳
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۲۹
قطع بار (MVA)	۱۳
آلایندگی (T/m^2)	۲.۲۵
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۷۴
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۰۳
خرید انرژی (MVA)	۳.۵
حداکثر بهره‌برداری از DGها در ۲۴ ساعت (MVA)	۴۵
حداکثر بهره‌برداری از SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱۲.۵
حداکثر بهره‌برداری از ShRها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱۶.۵
تابع هدف	۲۷۲۳۲
زمان (S)	۴۳۵

جدول (۵) مقایسه بهره‌برداری تحت وقوع خروج واحدهای تولید پراکنده در شبکه ۸۷۴ باس

	خرابی ۳ واحد تولید پراکنده
تلفات توان (MVA)	۱۳
انحراف ولتاژ (p.u)	۰.۰۲۹
قطع بار (MVA)	۱۰
آلایندگی (T/m^2)	۲.۲۵
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۷۴
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۰۳
خرید انرژی (MVA)	۳.۵
حداکثر بهره‌برداری از DGها در ۲۴ ساعت (MVA)	۴۵
حداکثر بهره‌برداری از SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱۲.۵
حداکثر بهره‌برداری از ShRها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱۶.۵
تابع هدف	۲۷۲۳۲
زمان (S)	۴۳۵

برای نشان دادن تاثیر باتری به مترو نیز فرض شده است که در شبکه هوشمند این مسئله وجود نداشته باشد. به عبارت دیگر یعنی شارژ و دشارژ بهینه برای سیستم باتری و مترو وجود ندارد. انتظار می‌رود که بدون شارژ و دشارژ بهینه سیستم باتری به مترو، شاخص‌های شبکه مانند تلفات و هزینه افزایش پیدا کند. همانطور که مشاهده می‌شود این مهم در شبکه ۱۱۸ و ۸۷۴ باس تحقق پیدا کرده است. در این مقایسه، متغیرهای مختلفی از جمله تلفات انرژی، انحراف ولتاژ، قطع بار، آلایندگی، حداقل و حداکثر ولتاژ، خرید انرژی، توان‌های DG وSC حداکثر توان راکتورها، تابع هدف و زمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول (۶) برای شبکه ۱۱۸ باس تلفات انرژی با استفاده از سیستم باتری به مترو کاهش یافته است. انحراف ولتاژ با نصب باتری مترو کمی کاهش یافته و از ۰.۰۲۴ به ۰.۰۲۳ پریونیت رسیده است. به همین ترتیب طبق جداول (۶) و (۷) تلفات در شبکه‌های ۱۱۸ و ۸۷۴ باس هم نسبت به حالت باتری به مترو افزایش یافته است، که این نشان از تاثیر بسزای سیستم باتری به مترو می‌باشد.

جدول (۶) مقایسه تاثیر سیستم باتری به مترو در شبکه ۱۱۸ باس

	بدون باتری به مترو	با باتری مترو
تلفات انرژی(MVAh)	۱۳.۶۸	۱۱.۴
انحراف ولتاژ(p.u)	۰.۰۳۸	۰.۰۳۲
قطع بار(MVA)	۰	۰
آلایندگی(kt)	۴.۲	۳.۵
حداقل ولتاژ(p.u)	۰.۹۶۱.	۰.۹۷۴
حداکثر ولتاژ(p.u)	۱.۰۰	۱.۰۰۶
خرید انرژی(MVAh)	۱.۴۱	۱.۴۸
حداکثر توان DGها در ۲۴ ساعت(MVA)	۶۲	۷۰
حداکثر توان SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۳۱	۲۲
حداکثر توان راکتورها در ۲۴ ساعت (MVAr)	۱.۵۴	۳.۲۷
تابع هدف	۱۰۶۷۰	۸۹۰۹
زمان(s)	۱۱۴	۸۷

جدول (۷) مقایسه تاثیر سیستم باتری به مترو در شبکه ۸۷۴ باس

با باتری مترو	بدون باتری به مترو	
۳۴.۳	۴۱.۱۶	تلفات انرژی(MVAh)
۰.۰۶۵	۰.۰۷۴	انحراف ولتاژ(p.u)
۰	۰	قطع بار(MVA)
۵.۶	۶.۷۲	آلایندگی(kt)
۰.۹۵	۰.۹۵	حداقل ولتاژ(p.u)
۱.۰۱۴	۱.۰۲۴	حداکثر ولتاژ(p.u)
۲.۲	۱.۷۶	خرید انرژی(MVAh)
۱۱۳	۹۰.۴	حداکثر توان DGها در ۲۴ ساعت(MVA)
۲۲.۵	۱۸.۵۴	حداکثر توان SCها در ۲۴ ساعت (MVAr)
۱.۱۲	۰.۹۷	حداکثر توان راکتورها در ۲۴ ساعت (MVAr)
۱۲۷۰	۱۶۵۱	تابع هدف
۴۶۹	۵۴۱	زمان(s)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع هوشمند مقیاس بزرگ با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی، خودروهای برقی، سیستم‌های باتری به مترو، دستگاه‌های D-FACTS مانند خازن و راکتور شنت، OLTC، SVR و مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد شد. یک تابع چند هدفه تصادفی شامل بهینه کردن ولتاژ، تلفات، هزینه خرید انرژی، آلایندگی و قطع بار نیز در نظر گرفته شد. شبکه‌های ۱۱۸ و ۸۷۴ شین برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی انتخاب شد. دو حالت بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری با خروج منابع تولیدی نیز در نظر گرفته شد، که در هر دو حالت برتری و عملکرد دقیق مدل پیشنهادی مشخص شد. به منظور ادامه راه این مقاله پیشنهادات زیر را می‌توان ارائه نمود:

۱- در نظر گرفتن شبکه گاز طبیعی در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به منظور صحت از عملکرد دقیق منابع تولید پراکنده گازی.

۲- مدل‌سازی شبکه انتقال و بازار برق برای افزایش سود رسانی شبکه توزیع و فروش مازاد انرژی به شبکه بالا دست.

References

مراجع

Trakas D. N. and Hatziargyriou N. D, (2018) "Optimal Distribution System Operation for Enhancing Resilience Against Wildfires," *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), pp. 2260-2271.

Gutiérrez-Alcaraz G, Tovar-Hernández J.H, Chan-Nan Lu, (2016) “Effects of demand response programs on distribution system operation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, pp. 230-237.

Agalgaonkar Y. P., Pal B. C. and Jabr R. A., (2015) "Stochastic Distribution System Operation Considering Voltage Regulation Risks in the Presence of PV Generation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(4), pp. 1315-1324.

Essallah. S, Khedher. A, (2020) “Optimization of distribution system operation by network reconfiguration and DG integration using MPSO algorithm,” *Renewable Energy Focus*, 34, pp. 37-46.

Zhang Y, Srivastava A. (2021) “Voltage Control Strategy for Energy Storage System in Sustainable Distribution System Operation.” *Energies*, 14(4):832.

Lu. X, Xia. S, Gu. W, Wing Chan. K, Shahidehpour. M, (2021) “Two-stage robust distribution system operation by coordinating electric vehicle aggregator charging and load curtailments,” *Energy*, 226, 120345.

Yun. S, Jung. J, (2022) “Analyzing temporary overvoltage by the non-islanding operation of distributed generation in multi-grounded neutral distribution system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 107822.

Ranamuka. D, Agalgaonkar. A.P, Muttaqi. K.M., (2019) “Conservation voltage reduction and VAr management considering urban distribution system operation with solar-PV,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, pp. 856-866.

Nawaz. A, and Wang. H, (2021) "Distributed stochastic security constrained unit commitment for coordinated operation of transmission and distribution system," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(4), pp. 708-718.

Ingalalli A. and Kamalasadan S., (2022) "A Novel Sequence-based Unified Control Architecture for Multiple Inverter Modes of Operation In Unbalanced Distribution System,"

Sakipour. R, Abdi. H, (2022) “Voltage stability improvement of wind farms by self-correcting static volt-ampere reactive compensator and energy storage,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 140, 108082.

Ahmad Khan. H, Zuhaib. M, Rihan. M, (2022) “Voltage fluctuation mitigation with coordinated OLTC and energy storage control in high PV penetrating distribution network,” *Electric Power Systems Research*, Volume 208, 107924.

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

Karimianfard. H, Haghighat. H and Zeng. B, (2022) "Co-Optimization of Battery Storage Investment and Grid Expansion in Integrated Energy Systems," *IEEE Systems Journal*, 16(4), pp. 5928-5938.

Su. S, Tang. T, Li. X, and Gao. Z, (2014) "Optimization of Multitrain Operations in a Subway System," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(2), pp. 673-684.

Xiong. G, Shen. D, Dong. X, Hu. B, Fan. D and Zhu. F, (2017) "Parallel Transportation Management and Control System for Subways," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7), pp. 1974-1979.

Tang .Z, et al., (2023) "Research on the Influence of Urban Subway on Neutral Current of High-Voltage Substations Along the Line Under Complex Environment," *IEEE Access*, 11, pp. 21912-21920.

Yang. X, Ning. B, Li. X, and Tang. T, (2014) "A Two-Objective Timetable Optimization Model in Subway Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), pp. 1913-1921.

Wang. W, et al., (2014) “A Novel Energy Management Strategy of Onboard Supercapacitor for Subway Applications With Permanent-Magnet Traction System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(6), pp. 2578-2588.

IEEE Transactions on Power Delivery, 38(2), pp. 1182 –1196.

Sarstedt. M, and Hofmann. L, (2022) "Monetarization of the Feasible Operation Region of Active Distribution Grids Based on a Cost-Optimal Flexibility Disaggregation," *IEEE Access*, 10, pp. 5402-5415.

Kodaira. D, Jung. W, and Han. S, (2020) "Optimal Energy Storage System Operation for Peak Reduction in a Distribution Network Using a Prediction Interval," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), pp. 2208-2217.

Jafari. M, Kavousi-Fard. A, Niknam. T, Avatefipour. O, (2021) “Stochastic synergies of urban transportation system and smart grid in smart cities considering V2G and V2S concepts,” *Energy*, 215, Part B, 119054.

Stefan Simoiu. M, Calofir. V, Fagarasan. I, Arghira. N and Stelian Iliescu. S, (2020) "Towards Hybrid Microgrid Modelling and Control. A Case Study: Subway Station," 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), pp. 602-607.

Rohama. A, Mohamed AAA, Rezk H, Al-Dhaifallah M, (2022) “DC Energy Hubs for Integration of Community DERs, EVs, and Subway Systems”, *Sustainability*, 14(3):1558.

Elmetwaly. A. H, Eldesouky. A. A and Sallam. A. A., (2020) “An Adaptive D-FACTS for Power Quality Enhancement in an Isolated Microgrid,” *IEEE Access*. 8, pp. 57923-57942.

Abas. N, Dilshad. S, Khalid. A, Saleem. M. S. and Khan. N, (2020) "Power Quality Improvement Using Dynamic Voltage Restorer," *IEEE Access*, 8, pp. 164325-164339.

Hamidi. A, Golshannavaz. S, and Nazarpour. D, (2019) "D-FACTS Cooperation in Renewable Integrated Microgrids: A Linear Multiobjective Approach," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1), pp. 355-363.

Liu. W, Wu. Q, Wen. F, and Østergaard. J, (2014) "Day-Ahead Congestion Management in Distribution Systems Through Household Demand Response and Distribution Congestion Prices," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), pp. 2739-2747.

Ghorbanian. M, Dolatabadi. S. H, and Siano. P, (2021) "Game Theory-Based Energy-Management Method Considering Autonomous Demand Response and Distributed Generation Interactions in Smart Distribution Systems," *IEEE Systems Journal*, 15(1), pp. 905-914.

Hemmatpour. M. H, Rezaeian Koochi. M. H, Dehghanian. P, Dehghanian. P, (2022) “Voltage and energy control in distribution systems in the presence of flexible loads considering coordinated charging of electric vehicles, *Energy*,” 239, Part A, 121880.