

Reconfiguration with multi-objective approach in distribution networks using MOEA/D optimization algorithm and multi-criteria decision- making technique

Mahmoud Zadehbagheri¹, Omid Khanzadeh ²

¹ Department of Electrical Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran
ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, Gachsaran Branch, Islamic Azad University, Gachsaran, Iran
khanzadeh_omid@yahoo.com

Abstract

Energy distribution network is the latest interconnection between production and consumer. So, it seems to be of great importance. Several methods have been developed to improve network distribution efficiency. One of the most basic and most commonly used methods to increase the capacity of distribution network operation is the problem of network reconfiguration. One of the most basic and common methods to increase the performance capacity of the distribution network is the problem of network reconfiguring. Reconfiguration is one of the most basic and cost-effective solutions available to reduce distribution network losses. The reconfiguration of distribution networks is actually an optimization problem in which it is tried to achieve an optimal arrangement for the distribution network by using the se in the network, and as a result, a specific objective function is optimized. The reconfiguration of distribution networks is actually an optimization problem in which it is tried to achieve an optimal arrangement for the distribution network by using the existing switches in the network, as a result of which a specific objective function is optimized. In this paper, the topic of reconfiguration in distribution networks will be investigated. This issue will be investigated with two approaches of reducing the active losses of the distribution system and improving the voltage profile. This optimization problem is investigated in both single-objective and multi-objective methods. In the single-objective optimization and multi-objective optimization based on weighted coefficients, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is used. Also, the multi-objective optimization based on non-dominated responses will be investigated with the help of multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D). The simulation was done with MATLAB on the IEEE 33 bus system and the simulation results on this system confirm the proper aperformance of these algorithms.

Keywords: Reconfiguration, distribution system, active losses, voltage profile, Evolutionary optimization algorithm, MOEA/D.

Submit date: 2023/08/27
Accepted date: 2024/01/24

Corresponding author's name: Mahmoud Zadehbagheri

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

بازآرایی با رویکرد چند هدفه در شبکه های توزیع با استفاده از الگوریتم بهینه سازی MOEA/D و تکنیک تصمیم گیری چندمعیاره

نوع مطالعه : پژوهشی

محمود زاده باقری^{۱*}، استادیار گروه مهندسی برق، امید خانزاده^۱، دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق

۱- دانشکده فنی و مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

khanzadeh_omid@yahoo.com

چکیده:

شبکه توزیع انرژی آخرین رابط بین تولید و مصرف کننده می باشد. لذا به نظر می رسد که دارای اهمیت فراوانی باشد. روش های متعددی برای بهبود کارایی شبکه توزیع ایجاد شده است. یکی از اساسی ترین و رایج ترین روش ها برای افزایش ظرفیت عملکرد شبکه توزیع، مسئله تجدید پیکربندی شبکه توزیع می باشد. تجدید پیکربندی، یکی از اساسی ترین و باصرفه ترین راه حل های موجود جهت کاهش تلفات شبکه توزیع می باشد. تجدید پیکربندی شبکه های توزیع در واقع یک مسئله بهینه سازی است که در آن سعی می شود تا با استفاده از کلیدهای موجود در شبکه، آرایش بهینه ای برای شبکه توزیع حاصل شود که در نتیجه تابع هدف خاصی بهینه شود. در این مقاله به بررسی موضوع تجدید پیکر بندی در شبکه های توزیع پرداخته خواهد شد. این موضوع با دو رویکرد کاهش تلفات اکتیو سیستم توزیع و بهبود پروفیل ولتاژ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این مسئله بهینه سازی به دو صورت تک هدفه و چند هدفه بررسی می شود. در بخش بهینه سازی تک هدفه و بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر ضرایب وزن دار، از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات (PSO) استفاده می شود و بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر پاسخ های نامغلوب، به کمک الگوریتم بهینه سازی تکاملی مبتنی بر تجزیه (MOEA/D) بررسی خواهد شد. شبیه سازی با MATLAB بر روی سیستم ۳۳ شین IEEE انجام شد و نتایج شبیه سازی بر روی این سیستم موید عملکرد مناسب این الگوریتم ها می باشد.

واژه های کلیدی: تجدید پیکر بندی، سیستم توزیع، تلفات اکتیو، پروفیل ولتاژ، الگوریتم بهینه سازی تکاملی، بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر تجزیه^۱ (MOEA/D)

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۶/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۱۱/۲۲

نام نویسنده ی مسئول : دکتر محمود زاده باقری (Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir)

نشانی نویسنده ی مسئول : یاسوج- بلهار- دانشگاه آزاد اسلامی- دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

انرژی الکتریکی به جهت مزایای ویژه‌ای چون پاکیزگی، قابلیت تبدیل به سایر انرژی‌ها، قابلیت انتقال و کنترل آسان و نهایتاً، راندمان بالای تجهیزات مربوطه، سال‌هاست که به طور گسترده، در سطوح ولتاژ متنوعی مورد استفاده بشر قرار می‌گیرد. از زمانی که این انرژی، توسط بشر به خدمت گرفته شد، همواره تلفات انرژی الکتریکی به عنوان اصلی‌ترین عامل بازدارنده گسترش محدوده تحت پوشش شبکه‌های قدرت، مطرح بوده است. در این میان، بخش توزیع است که عمده تلفات شبکه قدرت را در خود متمرکز کرده و به این جهت عمده تلاش‌های انجام شده جهت کاهش تلفات در این بخش بوده است.

شبکه توزیع انرژی آخرین رابط بین تولید و مصرف کننده می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد که دارای اهمیت فراوانی باشد. بنابراین، روش‌های متعددی برای بهبود کارایی شبکه توزیع ایجاد شده است. یکی از اساسی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها برای افزایش ظرفیت عملکرد شبکه توزیع، مسئله تجدید پیکربندی شبکه توزیع می‌باشد. (Sousa et al., 2015). تجدید پیکربندی، یکی از اساسی‌ترین و باصرفه‌ترین راه‌حل‌های موجود جهت کاهش تلفات شبکه توزیع می‌باشد. در فیدرهای شبکه توزیع انرژی، دو نوع کلید وجود دارد که یکی در شرایط کار عادی بسته و دیگری در شرایط کار عادی باز می‌باشد. وضعیت باز یا بسته بودن این کلیدها به وسیله تجدید پیکربندی شبکه توزیع، جهت دست‌یابی به یک آرایش جدید به منظور برآورده شدن هدفهای مورد نظر از قبیل کاهش تلفات توان، تعادل بار، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود کیفیت توان و غیره مشخص می‌شود. مسئله تجدید پیکربندی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی غیر خطی با قیود چند گانه شناخته می‌شود. برخی از آرایشات به سبب تخطی از قیودی از قبیل شعاعی بودن شبکه، برق دار بودن همه گره‌ها و تخطی از قیود بهره برداری مثل محدوده مجاز برای ولتاژ و جریان، مجاز به انتخاب نیستند. (Huang et al., 2016).

در تجدید پیکربندی شبکه باید قیود بهره برداری آن نظیر حفظ ساختار شعاعی شبکه، تغذیه شدن تمام بارها، رعایت محدودیت اضافه بار خطوط و ترانسفورماتورها، محدودیت افت ولتاژ و هماهنگی طرح‌های حفاظتی رعایت گردد، در غیر این صورت آرایش حاصل شده قابل پذیرش نخواهد بود. در تجدید پیکربندی شبکه توزیع توابع هدف مختلفی در نظر گرفته می‌شوند که مهمترین و پرکاربردترین آنها کاهش تلفات و بهبود انحرافات ولتاژ می‌باشد. (Asrari et al., 2016). تجدید پیکربندی از ابتدا تحت عنوان یک مسأله بهینه‌سازی پیچیده، در بین محققان مطرح شد و روش‌های زیادی برای حل آن ارایه گردید که هر یک، چه از لحاظ سرعت و چه از لحاظ دقت در رسیدن به جواب بهینه با یکدیگر متفاوت بودند. همچنین امکان اجرای عملی برخی از این روش‌ها نیز در شبکه‌های توزیع واقعی، به جهت وسعت زیاد آنها وجود نداشت. به تدریج به واسطه پیشرفت سریع علوم رایانه در عرصه محاسبات مهندسی، نسل جدیدی از روش‌های بهینه‌سازی، تحت عنوان روش‌های فرااکتشافی، پا

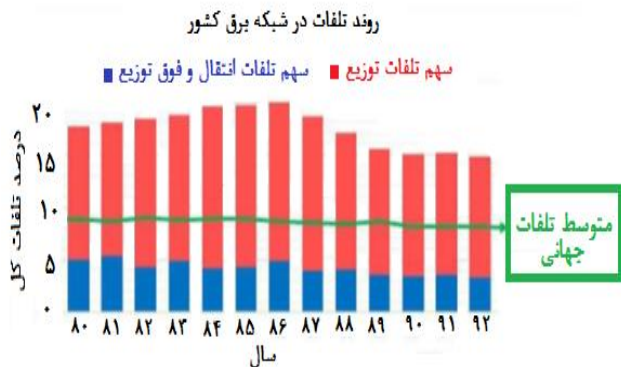
به عرصه گذاشتند و بدین ترتیب امکان مدلسازی دقیق ساختار شبکه توزیع فراهم گشت. به عنوان نمونه، امکان مدل‌سازی تغییرات لحظه‌ای بار و یا مدل‌سازی بارهای غیرخطی و نیز مدل‌سازی تولیدات پراکنده در شبکه فراهم شد که این امر موجب نیل به آرایش بهتری از شبکه در طول عملیات تجدید پیکربندی گردید. (Chanda et al., 2016).

تجدید پیکربندی شبکه‌های توزیع پیوندی دیرینه با تلفات شبکه دارد و از ابتدا برای کاهش تلفات مطرح شده است. بنابراین شناخت تلفات شبکه به فهم مسئله تجدید پیکربندی کمک می‌کند. تلفات در شبکه‌های برق به شکل‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که تا کنون بسیاری از آن‌ها شناخته شده و راه کارهای متعددی برای کاهش آن ارائه شده است. جهت کاهش تلفات تا کنون راه کارهای متعددی شناسایی و مورد آزمایش قرار گرفته است. این راهکارها عمدتاً شامل اقداماتی می‌باشد که باعث می‌گردد یک یا چند عامل تلفات کاهش پیدا کند و با دستیابی به فنون و نوآوری‌های جدید علمی و کشف پدیده و یا خواص جدیدی در مواد، مصالح و ... این راهکارها افزایش می‌یابد. از آنجایی که برخی از تلفات ناشی از تلفیق دو یا چند عامل می‌باشد لذا انجام و به کارگیری تعدادی از راهکارها می‌تواند اثر بخشی بیشتری برای کاهش تلفات داشته باشد. عمده تلفات شبکه‌های برق ناشی از مقاومت هادی‌های خطوط و تجهیزات شبکه‌های برق می‌باشد و از آنجایی که این مقاومت در اثر افزایش شدت جریان عبوری از خط و گرم شدن و هم‌چنین گرمای محیط و سایر عوامل افزایش می‌یابد، لذا یکی از عمده‌ترین روش‌های کاهش تلفات، کاهش میزان مقاومت هادی‌های خطوط و عوامل مرتبط با آن می‌باشد. مقاومت سلفی هم مانند مقاومت اهمی در شبکه‌های برق از عوامل تلفات می‌باشد و کاهش آن از طریق ایجاد تعادل بین حالت سلفی و خازنی شبکه از راهکارهای عمده کاهش تلفات می‌باشد. کاهش میزان نشتی جریان الکتریکی، مصرف داخلی تجهیزات و تأسیسات و خط‌های اندازه‌گیری از راهکارهای اصلی و عمده کاهش تلفات می‌باشد که تعدادی از آن‌ها به شرح زیر آمده است: (Gautam & Piya et al., 2020).

- تقسیم متعادل بارها بین فیدرهای خروجی پست‌های برق
- خازن‌گذاری در شبکه‌های فشار ضعیف
- کاهش میزان مقاومت الکتریکی هادی‌ها
- کاهش تلفات ناشی از مقرر ها
- خازن‌گذاری بر روی الکتروموتورها
- استفاده از ترانسفورمرهای جدید با هسته آمورف
- نصب منابع تولید پراکنده
- تجدید پیکربندی شبکه‌های توزیع

کاهش تلفات شبکه‌های برق حداقل در برنامه توسعه اقتصادی کشور مدّ نظر بوده و به عنوان یکی از وظایف اصلی واحد‌های ستادی صنعت برق و شرکت‌های برق تابعه و وابسته در نظر گرفته می‌شود و در راستای آن گروه‌ها، کمیته‌ها و ستاد‌های مختلفی برای کاهش تلفات تشکیل و موارد مربوط به کاهش تلفات را بررسی و تجزیه و تحلیل نموده و راه

تجدید پیکربندی شبکه های توزیع با هدف کاهش تلفات شبکه ها مطرح می شود. شکل ۲ روند کاهشی تلفات را در سال های اخیر نشان می دهد (Gao & Chen et al., 2016).



شکل ۲- روند تلفات در شبکه های توزیع و انتقال کشور

با توجه به رشد روز افزون مراکز صنعتی و افزایش جمعیت، میزان تقاضای انرژی برق از شبکه های توزیع رو به افزایش است که چالش هایی را برای بهره برداران، به همراه دارد و مهم ترین آن ها را می توان قابلیت اطمینان شبکه های توزیع، پایداری ولتاژ و افزایش قابلیت نصب و بهره برداری از منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع به حساب آورد. با این دیدگاه این مقاله مدل نوینی را بر مبنای تجدید پیکربندی شبکه های توزیع برای کاهش هزینه های ناشی از تلفات و بارهای از دست رفته، افزایش پایداری ولتاژ شبکه و افزایش قابلیت نصب منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع ارائه می کند که در ادامه به شرح مختصری از مسئله تجدید پیکربندی شبکه و طرح های ارائه شده جهت رسیدن به اهداف مذکور پرداخته شده است.

در شبکه های توزیع معمولاً کلیدهایی قرار داده می شود تا امکان تغذیه شین ها از مسیر های متفاوت ممکن شود. تجدید پیکربندی سیستم های توزیع به مفهوم تغییر در حالت این کلید ها به گونه ای است که هدف مورد نظر بهره بردار حاصل گردد. به دلیل وجود آرایش های متعدد برای شبکه های توزیع و هم چنین قیود فنی و اقتصادی جهت بهره برداری از شبکه، مسئله تجدید پیکربندی شبکه های توزیع یک مسئله پیچیده بهینه سازی می باشد که بهره برداران نیازمند ارائه روش های سریع و کارآمد جهت حل صحیح آن هستند.

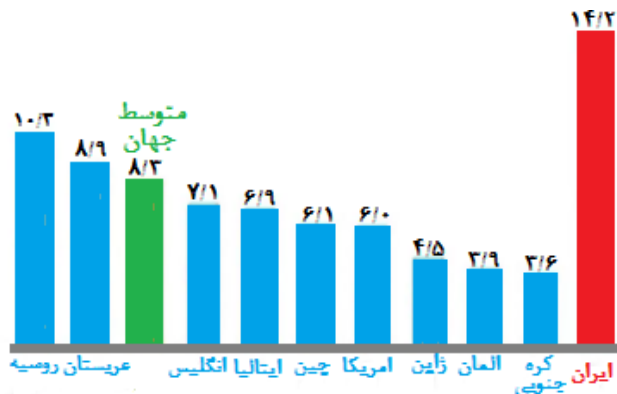
در این مقاله از روش بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر تجزیه MOEA/D (برای یافتن بهترین حالت ممکن تجدید پیکربندی شبکه استفاده شده است. خروجی این الگوریتم دسته جواب های نامغلوبی هستند که بایستی یکی از آنها به عنوان جواب نهایی انتخاب شود. تکنیک تصمیم گیری چند معیاره مبتنی بر ماتریس اولویت M^۲ (MCDM) به عنوان ابزار تصمیم گیری در این مقاله استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۳ شین IEEE آزمایش شده است.

کارهای مختلفی را تجزیه نموده اند افزایش هزینه های تولید، انتقال و توزیع نیروی برق، افزایش تقاضای مشترکین برای برق بیش تر، افزایش هزینه ها ومشکلات نگهداری و بهره برداری از شبکه های توزیع، وجود سیاست های انقباضی دولت، لزوم وارد شدن به بازار تجارت جهانی و وجود رقابت های فشرده و انجام کارها به صورت اقتصادی و افزایش بهره وری باعث شده است که سیاست های مربوط به کاهش تلفات ادامه داشته و اقدامات بیشتری در خصوص آن در حال انجام و برنامه ریزی برای آینده باشد. (Chen, C & Wang et al., 2015).

۱-۱- ضرورت اهمیت تجدید پیکربندی شبکه های

توزیع

در نمودار شکل ۱ میزان تلفات در شبکه های توزیع ایران و چندین کشور صنعتی جهان نشان داده شده است (Narimani et al., 2014).



شکل ۱- مقایسه میزان تلفات شبکه های توزیع کشور و چندین کشور صنعتی جهان

با توجه به شکل فوق تلفات در شبکه های توزیع ایران ۱۴ درصد از انرژی تولیدی را به خود اختصاص می دهد. بنابراین کاهش تلفات را می توان به عنوان یکی از فعالیت های بهینه سازی که موجب تعویق عملیات توسعه و احداث و تأمین سرمایه گذاری هنگفت مربوط به آن می شود مورد توجه قرار داد در همین راستا بحث ارزیابی اقتصادی و الویت بندی آن ها مطرح می شود، همان طور که اشاره شد تلفات توان در شبکه های توزیع در مقایسه با شبکه های انتقال دارای مقدار بیش تری است. لذا کاهش آن از اهمیت بیش تری برخوردار است. در سال های اخیر پژوهش های زیادی جهت کاهش میزان تلفات در شبکه های توزیع و انتقال صورت گرفته است که در شکل زیر می توان روند کاهشی میزان تلفات را مشاهده کرد. تجدید پیکربندی شبکه های توزیع به منظور کاهش تلفات یکی از قدرتمندترین و کم هزینه ترین روش های باشد زیرا بسیاری از روش ها نیازمند نصب و راه اندازی وسایل و تجهیزات جدید در شبکه های توزیع می باشند. این تجهیزات اضافه علاوه بر این که بار مالی برای شرکت ها دارند، ممکن است باعث خطاهای جدیدی در شبکه و اختلال در سرویس دهی به مشترکین شوند؛ بنابراین بحث

۱-۱- مروری بر مطالعات گذشتگان

بر اساس آمار اعلام شده حدود ۳۰ درصد از کل سرمایه‌گذاری صنعت برق به سیستم توزیع اختصاص می‌یابد. روند رشد شبکه‌های توزیع نیز - بخصوص در کشورهای در حال توسعه - بالا است. با این حال تکنولوژی فنی این بخش نسبت به تولید و انتقال بسیار پایین است. بنا به نظر اکثر صاحب‌نظران، سیستم توزیع از رشد کیفی پایینی برخوردار است و وجود عواملی نظیر طرح‌های غیرمهندسی، بالا بودن تلفات، نبود آمار و اطلاعات دقیق، عدم استفاده از ابزارهای مدیریتی نوین و ... از جمله دلایل اصلی عقب‌ماندگی آن است. امروزه با توجه به تمایل به بهبود وضعیت سیستم توزیع تلاش‌های زیادی در جهت بهینه‌سازی آن در ابعاد مختلف صورت می‌گیرد (Singh et al., 2023). پیشرفت علم ارتباطات و نیز کامپیوتر و بکارگیری آن در صنعت برق به عنوان ابزاری موثر در بهبود سیستم موجب شده تا شرکت‌های توزیع برق تلاش همه‌جانبه‌ای در جهت اتوماسیون توزیع انجام دهند. همواره تلفات بالاتر از حد استاندارد، از امتیازهای منفی شبکه‌های توزیع بوده و روش‌های زیادی نیز در جهت کاهش آن ارایه و اجرا شده است. از جمله تغییر آرایش سیستم به کمک نقاط مانور، که از روشهایی است که طی چند سال اخیر به آن توجه شده است. تغییر در آرایش سیستم از روش‌های موثر در بهبود شبکه است و با انتقال بار از روی فیدرهای با بار سنگین به فیدرهای با بار سبک حاصل می‌شود. در شرایط بهره‌برداری عادی از آن جهت کاهش تلفات و یا تعدیل بار بین فیدرها، و در شرایط بروز یک خطای دائمی جهت کاهش نواحی بی‌برق تا زمان رفع عیب می‌توان سود جست. نخستین بار مسئله تجدید پیکربندی توسط Back و Merlin در سال ۱۹۷۵ جهت کاهش تلفات توان اکتیو با یک روش ابتکاری انجام شد (Ma, S, et al., 2018). آنها این مسئله را به روش شاخه و کران^۳ حل نمودند ولی این روش دو مشکل داشت. اولاً همگرایی حل مسئله تضمین نمی‌شد و ثانیاً حجم محاسبات برای شبکه با ابعاد واقعی به شدت زیاد می‌گشت. در این روش بارها اکتیو فرض شده و با منبع جریان ثابت مدل می‌شوند همچنین از اختلاف زاویه بین ولتاژها صرف می‌گردد. این روش هیچ نوع قیدی از لحاظ بهره‌برداری برای مسئله در نظر نمی‌گیرد. در (Chen et al., 2016)، یک طرح بازآرایی بهینه مبتنی بر تعریف دینامیک برای مدیریت تراکم و کاهش تلفات خطوط در شبکه‌های توزیعی که تعداد زیادی خودرو الکتریکی دارند، ارائه شده است. در روش پیشنهادی، زمانیکه تعریف دینامیک در حال محاسبه است، همزمان بازآرایی شبکه از طریق برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته انجام می‌گیرد. این روش منجر به کمینه‌سازی هزینه انرژی و کاهش تعرفه دینامیک در مقایسه با تعرفه دینامیک بدون بازآرایی فیدر (FR) می‌باشد. حضور واحدهای تولید پراکنده که در چند سال اخیر، روند

گسترش آنها پیشرفت خوبی داشته است، سبب خواهد شد که مسئله بازآرایی شبکه دچار تغییراتی شود. در (S. Chen et al., 2016)، اثرات استفاده از واحدهای تولید پراکنده بر بازآرایی سیستم‌های توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن اهمیت کاهش افت ولتاژ و فلت ولتاژ در شبکه‌های توزیع، بازآرایی شبکه به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه فرمول بندی می‌شود که هدف آن کمینه کردن این تابع هدف می‌باشد. یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر Pareto برای مشخص کردن پیکربندی بهینه شبکه به کار رفته است. استفاده از پخش بار بهینه بر اساس شیوه تجزیه بندرز^۴ (BD)، روشی جدید و کارآمد جهت بازآرایی شبکه توزیع به حساب می‌آید که تابع هدف آن به حداقل رساندن تلفات توان اکتیو در خطوط و حفظ تعادل بار در بین فیدرها می‌باشد؛ منوط به قیودی همچون محدودیت ظرفیت شاخه‌ها، حداقل و حداکثر محدوده قدرت پست‌های توزیع و منابع تولید پراکنده، کمینه کردن انحراف ولتاژ شین‌ها و بهره‌برداری شعاعی از شبکه که باید حفظ شوند (Eldurssi et al., 2015). روش پیشنهادی دیگر^۵ (EICPO) می‌باشد. این روش با در نظر گرفتن نقاط بهینه محلی که در تلاش‌های قبل حاصل گردیده است، قادر به بهبود عمل جستجو برای یافتن پیکربندی بهینه می‌باشد. این نقاط بهینه محلی برای تولید ذرات جدید مد نظر قرار می‌گیرند (Wang, Y&Chen et al., 2015). روش تجزیه و تحلیل همبستگی خاکستری^۶ (GCRA)، برای ارضای توابع هدف مختلف نظیر تعادل بار، تلفات توان، درصد افت ولتاژ و تعداد عملیات‌های کلیدزنی در سیستم‌های توزیع به کار برده شده است (Yuan, 2016; C&Illindalet al., 2016). در (Yuan, W& Wang et al., 2016)، روشی دو مرحله‌ای و ابتکاری پیشنهاد شده است. در مرحله اول، هدف آن است که مسئله بازآرایی فیدر^۷ (FRC) بر اساس حساسیت تلفات توان اکتیو شبکه نسبت به امپدانس فیدرهایی که در آنها کلیدزنی رخ داده است، حل شود. نتایج بدست آمده، در مرحله دوم به کمک روش تبادل شاخه، پایش و بازبینی شده است. به طور مشابه، برخی از مراجع دیگر، از حساسیت‌ها نسبت به عمل کلیدزنی برای عملکرد بهتر عملیات FRC استفاده کرده‌اند. در (Wang et al., 2017)، یک مدل بهینه‌سازی مقاوم دو مرحله‌ای برای مسئله بازآرایی شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار ارائه شده است. مرحله اول به پیکربندی شبکه توزیع شعاعی اختصاص دارد و مرحله دوم با هدف پیدا کردن پخش بار بهینه ac شبکه تجدیدپیکربندی شده برای تحقق بار مورد تقاضا طراحی شده است. این مدل مقاوم دو مرحله‌ای با استفاده از الگوریتم نسل ستون و محدودیت حل شده است، جاییکه مسئله اصلی و زیرمسئله به صورت برنامه‌های مخروطی مرتبه دو عدد صحیح آمیخته فرمول بندی شده است.

در برخی از مقالات از روش‌های فراابتکاری در حل مسئله FRC استفاده شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- الگوریتم ژنتیک سریع با مرتب سازی نامغلوب^۸ (FNSGA)

(Shehadeh, Hisham et al., 2018).

- تجمع ذرات هیبریدی مبتنی بر شبکه عصبی تطبیقی^۹ (FAHPSO) (Fan M et al., 2022)، معادله حرکت کرم شب تاب^{۱۰} (FME) (A. M. Eldurssi et al., 2015)،

- الگوریتم جستجوی گرانشی^{۱۱} (Jing, Yuhao et al., 2023)،

- الگوریتم سیستم های ایمنی مصنوعی^{۱۲} (AIS) (Poudel et al., 2018). در مرجع (Panteli et al., 2016)، یک مدل بهینه سازی همه جانبه و کامل ارائه کرده است که بهینه سازی توان راکتیو و بازآرایی شبکه را با هدف کمینه کردن تلفات توان اکتیو و انحرافات ولتاژ، ترکیب کرده است. در این مدل، توان راکتیو واحدهای DG، جبران کننده های توان راکتیو، موقعیت تغییر دهنده تپ و وضعیت شاخه ها به صورت متغیرهای تصمیم گیری پیوسته و گسسته فرمول بندی شده است. مدل بهینه سازی سه فاز غیرمحدب اولیه^{۱۳} با استفاده از روش خطی سازی تکه ای خطی^{۱۴}، روش M بزرگ و آزادسازی مخروطی مرتبه دوم به یک مدل برنامه ریزی مخروطی مرتبه دوم عدد صحیح آمیخته^{۱۵} تبدیل شده است. در (Mousavizadeh & Haghifam et al., 2018)، پخش بار به صورت خطی مدل شده است تا بتوان قیود ظرفیت خطوط و ولتاژ شین ها را در مدل لحاظ نمود. قیود شعاعی بودن توپولوژی در (Poudel et al., 2018)، همان هایی هستند که در (L. Isac Silva et al., 2016) در نظر گرفته شده اند. برنامه ریزی دینامیکی یک مسئله پیچیده را با شکستن آن به چندین زیرمسئله حل می کند. جواب های بدست آمده از زیرمسئله ها با یکدیگر ترکیب شده تا جواب بهینه کلی حاصل شود. در ارتباط با حل زیرمسئله ها هیچگونه محدودیتی وجود ندارد.

مرجع (Zhang, B&Dehghaniaet al., 2017)، از برنامه ریزی دینامیکی برای حل مسئله FRC یک شبکه نمونه در یک شرایط بهره برداری مشخص استفاده کرده است. در روش ارائه شده، ابتدا فرض بر آن است که تمام کلیدها باز هستند و هر عمل باز شدن کلید به عنوان یک زیرمسئله در نظر گرفته شده است. در یک دوره زمانی کوتاه، شرایط عملکردی شامل بار و توان تولیدی واحدها، مطابق با یک الگوری مشخص تغییر می کند؛ در حالیکه توپولوژی شبکه ثابت است. برای در نظر گرفتن این تغییرات، یک استراتژی معمول که در آن تنها بار پیک تجزیه و تحلیل می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. این روش برای آن است که حاشیه عملکردی کافی برای سایر شرایط بهره برداری وجود داشته باشد. برنامه ریزی دینامیکی هر یک از شرایط بهره برداری را به عنوان یک زیرمسئله در نظر می گیرد و جوابی را پیدا می کند که با کل دوره زمانی مطابقت داشته باشد (Ye, Q&Wang, Z et al., 2023). در (Liu, D et al., 2023)، از الگوریتم بهینه سازی فاخته برای پیدا کردن بهترین پیکربندی شبکه استفاده شده است. بنابر ادعای نویسندگان این مقاله، این روش به دلیل داشتن تعداد کمتری متغیر کنترلی، کارآمدتر می باشد. تابع هدف مسئله در این مطالعه، کمینه کردن تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بوده است.

در (C. Lee et al., 2015)، یک چهارچوب بهینه سازی برای کمینه کردن انرژی تلفاتی سالیانه در شبکه توزیع از طریق بازآرایی شبکه پیشنهاد شده است. این چهارچوب اطلاعات سالیانه واقعی را برای بارهای اکتیو و راکتیو مصرفی، پروفیل DG ها در نظر می گیرد و از الگوریتم خوشه بندی فازی C میانگین (FCM) برای دسته بندی این اطلاعات به دسته های مرتبط استفاده می کند. با استفاده از این چهارچوب، یک پیکربندی بهینه توسط الگوریتم GA به دست آمده و در طول سال ثابت باقی می ماند. این پیکربندی بر اساس اطلاعات سالیانه بدست آمده و به این دلیل که با توجه به اطلاعات سالیانه بوده است، سبب خواهد شد که تلفات انرژی سالانه کمینه شود. علاوه بر این، این روش به بهره بردار این امکان را می دهد که با استفاده از یک مجموعه پیکربندی از پیش تعیین شده که در طول سال تغییر می کند، تلفات شبکه را کمینه سازد.

مرجع (Lavorato et al., 2012)، به بررسی شناخت و استفاده از الگوهای تکراری سالانه بار و تولید DG ها در یک فرمول بندی جدید برای بازآرایی شبکه توزیع برق پرداخته است. بررسی و مطالعه ای که نشان می دهد استفاده از این الگوها سبب خواهد شد که انرژی تلف شده سالانه کاهش یابد. این روش در مقایسه با روش های بازآرایی استاندارد مبتنی بر بهینه سازی در زمان اوج مصرف، منجر به تلفات انرژی سالانه کمتری خواهد شد. مطالعات نشان می دهد که این بهبود زمانی نمود بیشتری خواهد داشت که مقایسه در یک دوره زمانی بلند مدت انجام شود. در تابع هدف مسئله چند قید جریمه در نظر گرفته شده است. یک عبارت مربوط به شعاعی بودن شبکه است (تعداد شاخه ها یکی کمتر از تعداد شین ها باشد). عبارت دوم و سوم جریمه مربوط به ولتاژ شین ها از حد بالا و پایین مجاز می باشد (Alonso et al., 2015).

۲- فرمول بندی مسئله

مسئله تجدید پیکربندی در شبکه قدرت، همانگونه که پیش تر نیز عنوان شده است یک مسئله بهینه سازی است. در این بخش، توابع هدف و محدودیت های مسئله به صورت زیر ارائه می شود:

۲-۱- تابع هدف

در این مقاله تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ شین های شبکه به عنوان توابع هدف مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شده اند.

• حداقل سازی تلفات توان اکتیو

یکی از توابع هدف مهم در مسئله مورد مطالعه، کمینه کردن مقدار تلفات توان اکتیو است که به صورت زیر بیان می شود:

$$\text{Minimize } P_{\text{Loss}} = \sum_{k \in NE} g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، N_E تعداد شاخه‌های سیستم (تعداد خطوط)، g_k کنداکناس خط k بین خط i ام و j ام، V_i و V_j ولتاژ شین i ام و j ام و θ_{ij} اختلاف فاز بین شین‌های i ام و j ام است.

• حداقل سازی انحراف ولتاژ شین ها

بهبود پروفیل ولتاژ سیستم، از جمله مهمترین اهداف امنیتی در شرایط کاری نرمال سیستم قدرت است. این موضوع برای بارهای حساس به ولتاژ، بسیار حائز اهمیت است. در صورتی که ولتاژ شین ها به عنوان قید در نظر گرفته شود، غالباً ولتاژهای بدست آمده، به مقدار کران بالای محدوده مجاز (مقدار حداکثر) میل می کنند. این سبب خواهد شد که سیستم قدرت در هنگام وقوع پیشامدها، رزرو مورد نیاز برای فراهم کردن توان راکتیو را نداشته باشد. یکی از روش‌های مؤثر برای جلوگیری از وقوع این وضعیت این است که انحراف مطلق ولتاژ تمام شین ها از مقدار مطلوبشان به عنوان یک تابع هدف انتخاب شود. کمینه کردن مقدار انحراف ولتاژ تمام شین ها سبب بهبود پروفیل ولتاژ خواهد شد. در این حالت، سیستم قدرت با امنیت بالاتری عمل کرده و همچنین کیفیت سرویس دهی افزایش خواهد یافت. از این رو، برای حل مشکل فوق میزان انحراف ولتاژ شین ها از مقدار قابل قبول به عنوان یک تابع هدف در نظر گرفته می شود. این تابع هدف به صورت بیان می شود:

$$\text{Minimize } TVD = \sum_{i \in N_L} |V_i - V_i^{ref}| \quad (2)$$

جایی که V_i ولتاژ شین i ام، V_i^{ref} ولتاژ مطلوب در شین i ام، TVD مقدار انحراف ولتاژ کل سیستم قدرت و N_L تعداد شین‌های بار سیستم است (Nguyen et al., 2015).

۲-۲- قیود مسئله

قیود مسئله به دو دسته قیود تساوی و قیود نامساوی تقسیم‌بندی می‌شود، که قیود تساوی همان قیود بار هستند و قیود نامساوی قیود مربوط به وضعیت کلیدها و قیود عملیاتی که شامل ولتاژ شین بارها و بارگذاری خطوط و غیره است، می‌باشند (Esmailian et al., 2015).

• قیود تساوی

قیود تساوی یا قیود بار معادلات پخش بار می باشند که می توان آن ها را به صورت زیر بیان نمود:

$$P_{G_i} - P_{D_i} = V_i \sum_{j=1}^{N_j} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = V_i \sum_{j=1}^{N_j} V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

• قیود نامساوی

قیود نامساوی قیود مربوط به ژنراتورها، خازن ها و قیود عملیاتی که هر یک به شرح زیر می‌باشند. (Tahboub et al., 2015).

- حداقل توان خروجی پست یا ژنراتور

$$\sum_{k \in \phi_i} OUTS_k^p \geq \sum_{t \in \psi_p} S_{t,p}^{\min} \cdot y_t^p \quad \forall p \in N_g \quad (5)$$

در این رابطه Ψ_p مجموعه ترانسفورماتورها یا ژنراتورهای متصل به شین p ، متغیر تصمیم‌گیری برای متصل نمودن ترانسفورماتور یا ژنراتور t به شین p و N_g مجموعه شین‌های PV شبکه هستند.

- حداکثر توان خروجی پست یا ژنراتور

$$\sum_{k \in \phi_i} OUTS_k^p \leq \sum_{t \in \psi_p} S_{t,p}^{\max} \cdot y_t^p \quad \forall p \in N_g \quad (6)$$

در این رابطه $S_{t,p}^{\max}$ بیشینه توان محقق شده برای خط l متصل به شین p است.

- شرط عملکرد شعاعی شبکه

خط بین دو شین می‌تواند در دو جهت شارش توان داشته باشد اما در عملکرد سیستم تنها یکی از جهت وجود دارد.

$$\sum_{l \in \phi_i} IN\omega_l^i \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

که در این رابطه ω_l^i متغیر تصمیم‌گیری برای متصل نمودن خط l به شین i می‌باشد.

- تعادل کلی توان در شبکه

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in \phi_i} OUTS_k^i \leq \sum_{p \in N} \sum_{t \in \psi_p} S_{t,p}^{\max} \cdot y_t^p \quad \forall p \in N_g \quad (8)$$

- حدود توان اکتیو خروجی

$$y_t^p \cdot p_t^{\min} \leq p_t^p \leq y_t^p \cdot p_t^{\max} \quad \forall p \in N_g, \forall t \in \psi_p \quad (9)$$

که در این رابطه $p_t^{\min}$ حداقل توان اکتیو خروجی ژنراتور یا ترانسفورماتور t و $p_t^{\max}$ حداکثر توان اکتیو خروجی ژنراتور یا ترانسفورماتور t می‌باشند.

- حدود توان راکتیو خروجی

$$y_t^p \cdot Q_t^{\min} \leq Q_t^p \leq y_t^p \cdot Q_t^{\max} \quad \forall p \in N_g, \forall t \in \psi_p \quad (10)$$

- حدود ولتاژ شین ها

$$V_{n_{\min}} \leq V_{n_i} \leq V_{n_{\max}} \quad \forall n \in N \quad (11)$$

- حدود زاویه شین ها

$$-\pi \leq \delta_n \leq \pi \quad \forall n \in \left\{ \frac{N}{n_s} \right\}, \quad \delta_{ns} = 0; \quad ns : swingbus \quad (12)$$

که در این رابطه δ_{ns} زاویه شین اسلگ و برابر صفر می‌باشد.

- حدود تپ ترانسفورماتورها

$$RT_{in}^{\min} \leq rt_{in} \leq RT_{in}^{\max} \quad \forall n, i \in N; (in) \in \psi_i \quad (13)$$

که در این رابطه RT_{in} متغیر پیوسته بیانگر تپ ترانسفورماتور، حداقل تپ ترانسفورماتورها و $RT_{in}^{\max}$ حداکثر تپ ترانسفورماتورها می‌-

باشند (Zhang et al., 2007).

- محدودیت بارگذاری خطوط

$$S_l^i \leq S_{l,i}^{\max} \cdot \omega_l^i \quad \forall l \in \varphi_l, \forall i \in N \quad (14)$$

۳- روش پیشنهادی

کلیدهای متعددی که در شبکه وجود دارند نقش بسزایی در مدیریت ساختار شبکه برای نیل به شکل بهینه، که همان کاهش تلفات و یا کاهش انحرافات ولتاژ است ایفا می کنند. بازآرایی، ساده ترین و کم هزینه ترین روش برای تامین اهداف ذکر شده می باشد. تحلیل شبکه به منظور قطع یا وصل بودن هر سوئیچ می بایست بدون خطا و متناسب با محدودیت های شبکه انجام گیرد. با توجه به گسترش شبکه های توزیع و پیچیده تر شدن ارتباطات در این شبکه ها و تعدد پارامترها، استفاده از تکنیک های هوشمند اجتناب ناپذیر است.

این بخش به بررسی روش پیشنهادی جهت بازآرایی در سیستم های توزیع اختصاص دارد. در شبیه سازی ها از دو الگوریتم تجمع ذرات یا همان کوچ پرندگان در بهینه سازی تک هدفه و از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه تکاملی مبتنی بر تجزیه در بخش چندهدفه استفاده خواهد شد. شبکه مورد مطالعه شبکه ۳۳ شین توزیع است که تمامی مقالات موجود در زمینه بازآرایی از همین شبکه استفاده کرده اند و روش پیشنهادی خود را روی آن تست نموده اند. در ادامه ابتدا به معرفی شبکه مورد نظر پرداخته می شود سپس نتایج بهینه سازی تک هدفه ذکر می شود و در پایان نتایج شبیه سازی چندهدفه بیان می شود.

۳-۱- الگوریتم بهینه سازی چندهدفه تکاملی مبتنی

بر جداسازی (MOEA/D)

ساختار یک مسئله بهینه سازی m هدفه به صورت رابطه (۱۵) می باشد (Wang et al., 2013):

$$\begin{aligned} \text{Min } F(x) &= (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \\ \text{s.t. } h(x) &= 0 \\ g(x) &< 0 \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن x متغیر تصمیم گیری، $f_i(x)$ تابع هدف i ام، $h(x)$ بیانگر قیود تساوی و $g(x)$ قیود نامساوی مسئله بهینه سازی می باشد.

در اغلب بهینه سازی های چندهدفه، با توجه به اینکه برخی توابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند و یکدیگر را نقض می نمایند، بنابراین هیچ نقطه ای به صورت همزمان تمامی اهداف را کمینه نمی کند و باید آنها را متعادل نمود. بهترین مصالحه و تنظیم در بین اهداف تحت عنوان بهینه-سازی Pareto تعریف می گردد. در بهینه سازی Pareto در پایان همواره یک دسته از پاسخ های خوب نامغلوب حاصل می شود که آن را جبهه Pareto (PF) نامگذاری می کنند. بیشتر مسائل بهینه سازی چندهدفه

دارای تعداد زیادی و یا حتی بی نهایت بردارهای بهینه ی پارتو می باشند. اگر به دست آوردن تمامی PF غیرممکن نباشد، اما بسیار زمانگیر خواهد بود. از سمتی دیگر، تصمیم گیر (بهره بردار سیستم قدرت) علاقه ای به داشتن تعداد بسیاری بردارهای بهینه ی پارتو ندارد زیرا در این صورت با مسئله ای ازدیاد اطلاعات روبه رو می گردد. بنابراین، تعداد بسیاری از الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه وجود دارند تا بتوان به کمک آن، تعدادی بردار مدیریت پذیر بهینه ی پارتو را یافت نمود که به صورت یکدست در PF توزیع گردیده اند و بنابراین نماینده های خوبی از تمامی فضای PF می باشند

در بیشتر الگوریتم های تکاملی چند هدفه مانند NSGAI (NSGAI) و MOEA، هیچ گونه تجزیه ای وجود ندارد. این الگوریتم ها با مسئله بهینه سازی چند هدفه به عنوان یک کل رفتار می کنند و با هیچ راه حل جداگانه ای و مسئله ای بهینه سازی اسکالر خاصی مرتبط نمی باشند. در MOEA/D، پاسخ بهینه ی پارتو به یک مسئله MOP تحت شرایط معمولی، می تواند یک پاسخ بهینه به یک مسئله بهینه سازی اسکالر باشد که در چنین مسئله ای، هدف به صورت تجمیعی از f_i می باشد. بنابراین، تقریب زنی PF می تواند به تعدادی از زیرمسائل بهینه سازی هدف اسکالر تجزیه گردد. چندین متد برای ایجاد تابع هدف تجمیعی موجود می باشد که محبوب ترین آنها شامل متد جمع وزنی و Tchebycheff می باشد. در این مقاله از روش Tchebycheff استفاده می شود که رابطه آن به شرح زیر می باشد (Wang et al., 2013):

$$\text{Min } g(x|\lambda, z^*) = \text{Max}_{1 \leq i \leq m} (\lambda_i |f_i(x) - z_i^*|) \quad (16)$$

که $z_i^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T$ پاسخ مرجع می باشد و $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$ و $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ که در آن $i = 1, 2, \dots, m$. به منظور تولید مجموعه ای از بردارهای بهینه ی پارتو باید از بردارهای وزنی مختلف λ در مسئله بهینه سازی اسکالر استفاده شود. بنابراین در این الگوریتم و این مقاله تعداد بردارهای λ برابر با تعداد جمعیت اولیه (N) الگوریتم تکاملی انتخاب شده است. روش کار الگوریتم بدین صورت می باشد که MOEA/D صریحاً مسئله بهینه سازی را به N زیرمسئله بهینه سازی اسکالر تجزیه می کند و این زیرمسائل را به صورت همزمان و با تکامل جمعیتی از پاسخ ها حل می نماید. در هر نسل، جمعیت متشکل از بهترین پاسخ های یافت شده تاکنون (از زمان شروع اجرای الگوریتم) برای هر زیرمسئله می باشد. روابط همسایگی در بین این زیرمسائل بر پایه ی فاصله های بین بردارهای ضرایب تجمیعی تعریف می شوند. اگر T را برابر با تعداد همسایگی برای هر پاسخ در نظر بگیریم آن مجموعه از بردارهای وزنی که کمترین فاصله را از یکدیگر دارند در یک همسایگی قرار می گیرند. پاسخ های بهینه برای زیرمسائل همسایه بسیار مشابه می باشند. هر زیرمسئله در MOEA/D و با استفاده از اطلاعات زیرمسئله ی مجاورش بهینه می گردد. MOEA/D دارای پیچیدگی محاسباتی کمتری در هر نسل نسبت به NSGAI می باشد. به طور کلی، MOES/D نسبت به NSGAI از نظر

عملکردی و از دیدگاه کیفیت پاسخ برتری دارد (Zhou, W et al., 2023).

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

الگوریتم به صورت زیر عمل می‌نماید:

ورودی‌های الگوریتم:

توابع هدف $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$

N : تعداد زیرمسایل موردنظر در MOEA/D

توزیع یکنواخت از N بردار وزنی $\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^N$

T : تعداد بردارهای وزنی در همسایگی هر بردار وزنی

خروجی: PF تخمینی (EPF)

گام (۱) مقداردهی اولیه

گام (۱.۱) مقدار $EP = \emptyset$ قرار دهید.

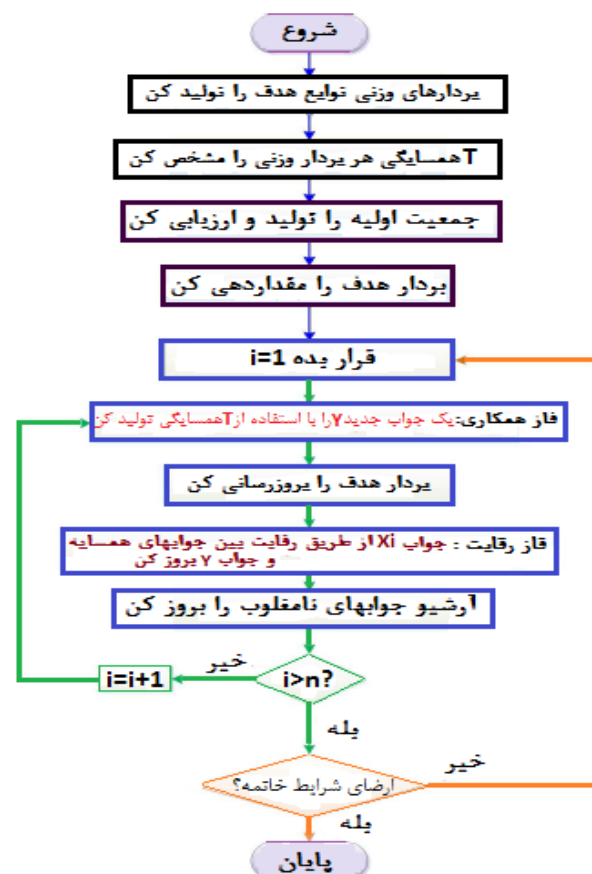
گام (۲.۱) فاصله‌ی اقلیدسی بین هر دو بردار وزنی را حساب نموده و

سپس T عدد نزدیک‌ترین بردار به هر بردار وزنی را معین می‌شود. برای

هر $i = 1, \dots, N$ مقدار $B(i) = \{i_1, \dots, i_T\}$ مشخص می‌شود به گونه

ای که $\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_T}$ عدد از نزدیک‌ترین بردارهای وزنی به λ^i می-

باشند (Wang et al., 2013).



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

گام (۳.۱) یک جمعیت تصادفی اولیه از $x^1, \dots, x^N$ تشکیل می‌شود.

سپس مقدار $F(x^i)$ محاسبه می‌شود.

گام (۴.۱) $Z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T$ تعیین می‌شود.

گام (۲) به روزرسانی: برای هر $i=1, \dots, N$ مراحل زیر انجام می‌شود:

گام (۱.۲) بازتولید: به صورت تصادفی دو اندیس k و l از $B(i)$ انتخاب

می‌شوند و سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیک (تقاطع و جهش) یک

پاسخ جدید از x^k و x^l به نام y تولید می‌گردد.

گام (۲.۲) مقدار Z^* آپدیت می‌شود. برای هر $j = 1, 2, \dots, m$ ، اگر

$z_j < f_j(y)$ باشد سپس $z_j = f_j(y)$.

گام (۳.۲) پاسخ‌های همسایه آپدیت شود: برای هر اندیس $j \in B(i)$

اگر $g(y|\lambda^j, Z^*) < g(x^j|\lambda^j, Z^*)$ ، سپس $x^j = y$ و $F(x^j) = F(y)$.

گام (۴.۲) آپدیت EPF: تمامی بردارهایی را که $F(y)$ بر آنها غالب

گردیده از EPF حذف می‌شوند. اگر هیچ برداری در EPF بر $F(y)$ غالب

نگردید $F(y)$ را به EPF اضافه شود.

گام (۳) معیار پایان: اگر شرط پایان برقرار است، الگوریتم متوقف می‌شود

و EPF در خروجی در چاپ می‌شود در غیر این صورت به گام ۲ مراجعه

می‌گردد (Civanlar et al., 2008).

۲-۳- تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره MCDM

پس از تعیین یک دسته از جواب‌های نامغلوب، بهره بردار سیستم، با

استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، بهترین پاسخ

را تعیین و به سیستم اعمال می‌کند. این تکنیک به صورت کامل در

[۳۴] شرح داده شده است. با ۳ تابع هدف و n پاسخ بهینه نامغلوب،

پاسخ‌ها با استفاده از معادلات رتبه بندی می‌شوند و سرانجام، پاسخ با

رتبه یک به سیستم اعمال می‌شود:

$$r_i = \sum_{j=1}^3 w_j a_{ijn} \quad (17)$$

که $r_1, \dots, r_n$ رتبه نهایی پاسخهای نامغلوب $A_1, \dots, A_n$ (جدول ۱) می

باشند. $w_1, \dots, w_3$ به ترتیب بیانگر اهمیت نسبی توابع هدف f_1, f_2 و

f_3 هستند. مقدار نرمالایز شده a_{ij} می‌باشد و از رابطه (۱۸)

بدست می‌آید:

$$a_{ijn} = \Gamma(a_{ij} - a_{wj}) / (a_{bj} - a_{wj}) + 1 \quad (18)$$

منظور از نرمالایز شده، قرارگیری مقادیر a_{ijn} در بازه $[1, 100]$ می‌باشد.

بدین منظور $\Gamma = 99$ فرض می‌شود. a_{bj} و a_{wj} به ترتیب بهترین و

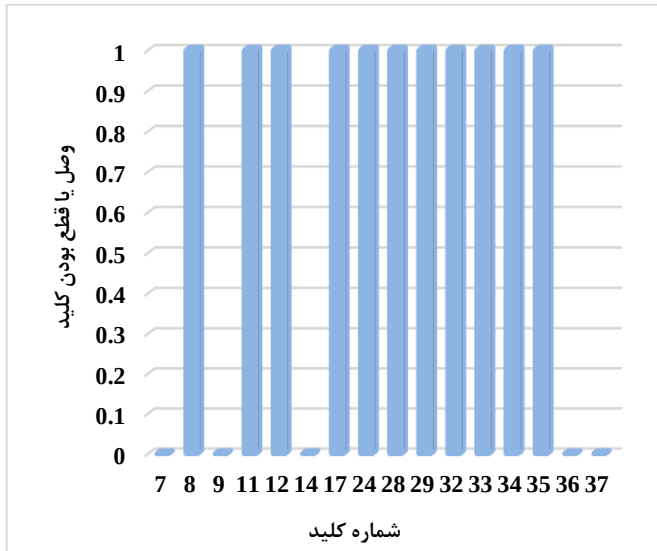
بدترین مقدار تابع هدف f_i می‌باشد (Z. Tian et al., 2016).

جدول ۱- یک دسته از جواب‌های نامغلوب

	f_1	f_2	f_3
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
...	...	...	...
A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}

این خطوط این امکان را به ما می دهد تا بازآرایی در شبکه های توزیع با رویکردهای مختلف امکان پیاده سازی داشته باشد (Civanlar et al., 1988).

لازم به ذکر است تمامی شبیه سازی ها در محیط MATLAB انجام شده است.



شکل ۵- کلیدهای شبکه با رویکرد کاهش تلفات

در جدول ۵ محل کلیدها در شبکه توزیع ۳۳ شینه نمایش داده شده است. لازم به ذکر است کلیدزنی باید در شبکه توزیع به گونه ای انجام شود تا حالت شعاعی بودن شبکه دستخوش تغییر نشود. یعنی سیستم ما به یک شبکه حلقوی تبدیل نگردد. این امر به دلیل حفظ عملکرد درست سیستم حفاظتی در شبکه های توزیع می باشد. برای این کار از خطوط مانور موجود در شبکه کمک گرفته می شود. همانگونه که در جدول مشاهده می شود تعداد کلیدها برابر با ۱۶ است که با دقت در شکل ۴ مشخص است که ۴ کلید انتهایی بر روی خطوط مانور قرار دارند.

جدول ۵- محل کلیدها در شبکه توزیع ۳۳ شینه

شماره کلید	۷	۸	۹	۱۱	۱۲	۱۴	۱۷	۲۴
خط	۷-۸	۸-۹	۹-۱۰	۱۱-۱۲	۱۲-۱۳	۱۴-۱۵	۱۷-۱۸	۲۴-۲۵
شماره کلید	۲۸	۲۹	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷
خط	۲۸-۲۹	۲۹-۳۰	۳۲-۳۳	۲۱-۸	۱۵-۹	۲۲-۱۲	۱۸-۲۳	۲۵-۲۹

۵- شبیه سازی و نتایج

۵-۱- بهینه سازی تک هدفه با رویکرد کاهش تلفات

اکتوی سیستم توزیع

هدف این حالت کاهش تلفات اکتیو در سیستم توزیع است. شبیه سازی ها به کمک الگوریتم تجمع ذرات انجام شده است. جمعیت اولیه در الگوریتم برابر با ۴۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

...	...	...	...
A_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}

برای تعیین w_j ابتدا باید ماتریس اولویت (جدول ۲) را شکل داد. در این ماتریس $m_{ii} = 1$ و $m_{ij} = 1/m_{ji}$ می باشند. درایه m_{ij} بیانگر این موضوع می باشد که تابع هدف f_i ارزشی m_{ij} برابر تابع هدف f_j دارد. بعنوان مثال اگر m_{23} برابر با ۳ فرض شود اهمیت تابع هدف f_2 سه برابر تابع هدف f_3 می باشد. مقدار w از رابطه زیر به دست می آید (Rohman et al., 2023).

$$Mw = \lambda_{\max} w \quad (19)$$

که $\lambda_{\max}$ مقدار ویژه بیشینه ماتریس اولویت M و w بردار ویژه مربوط به این مقدار ویژه می باشد.

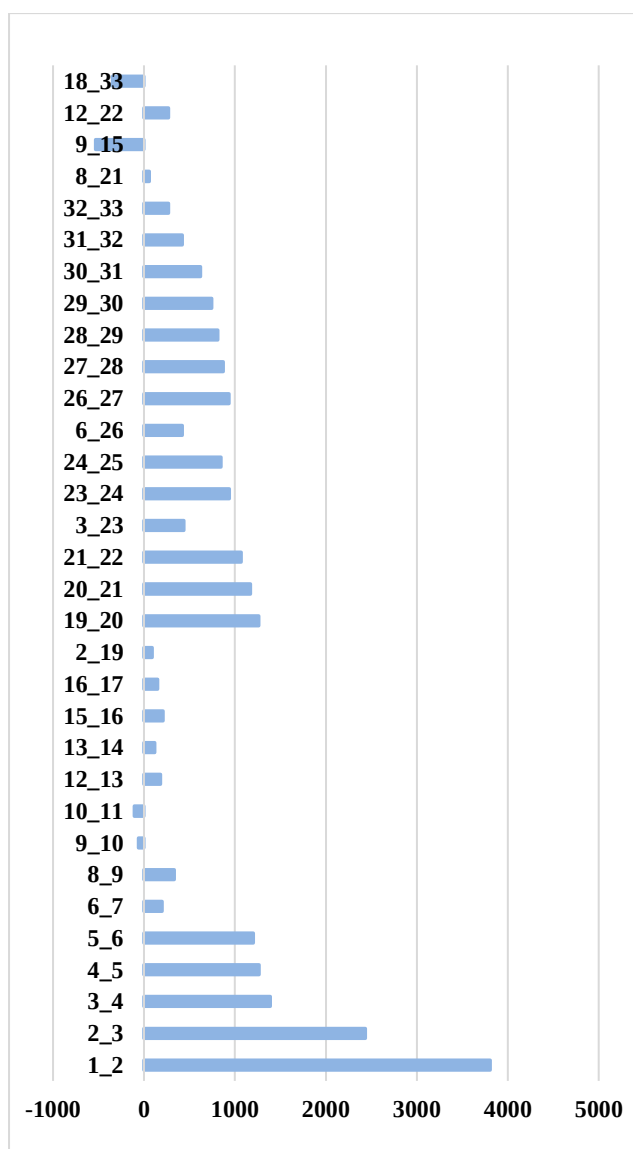
جدول ۲- ماتریس اولویت M

	f_1	f_2	f_3
f_1	m_{11}	m_{12}	m_{13}
f_2	m_{21}	m_{22}	m_{23}
f_3	m_{31}	m_{32}	m_{33}

۴- مورد مطالعاتی

۴-۱- سیستم توزیع ۳۳ شین استاندارد IEEE

سیستم توزیع ۳۳ شینه استاندارد IEEE در شکل ۴ (پیوست) نشان داده شده است. این سیستم متداولترین سیستم توزیع تحقیقاتی که اکثر مطالعات حوزه توزیع بر روی آن انجام شده است. لذا مقاله نیز جهت بررسی تاثیر بازآرایی در شبکه های توزیع از این استفاده می شود. همانگونه که در شکل ۴ (پیوست) مشاهده می شود این سیستم ۳۳ شین دارد که شین شماره ۱ آن به عنوان شین در نظر گرفته می شود. بار حقیقی و راکتیو کل شبکه به ترتیب مگاوات و ۱/۸ مگاوار می باشد. ولتاژ عملکردی این شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت می باشد. در جدول ۳ (پیوست) مشخصات خطوط این شبکه اعم از مقاومت، راکتانس و سوسپتانس خطوط آورده شده است. همچنین مشخصات بارهای موجود در این سیستم نیز در جدول ۴ (پیوست) آورده شده است. محدوده مجاز تغییر ولتاژ ژنراتورها بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ مشخص است که در شبکه توزیع تعدادی خط مانور به صورت نقطه چین در نظر گرفته می شود.



شکل ۶- توان اکتیو جاری در خطوط با رویکرد کاهش تلفات بر حسب کیلووات

شکل ۵ حالت باز و بسته بودن کلیدها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می شود کلیدهای شماره ۷، ۹، ۱۴، ۳۶ و ۳۷ باز است. با بررسی کلیدها مشخص می شود که هیچ حلقه ای در سیستم توزیع ایجاد نشده است. بنابراین شرط شعاعی بودن شبکه برقرار است. در جدول ۶ مقدار تلفات و شاخص انحراف ولتاژ سیستم توزیع در این سناریو نمایش داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می شود به کمک بازآرایی با رویکرد کاهش تلفات هم تلفات اکتیو سیستم نسبت به حالت پایه (جدول ۵) کاهش یافته است و هم شاخص انحرافات ولتاژ سیستم کاهش خوبی داشته است. توان اکتیو، توان راکتیو و تلفات توان اکتیو در خطوط مختلف شبکه در بازآرایی با رویکرد کاهش تلفات سیستم توزیع به ترتیب در شکل های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است.

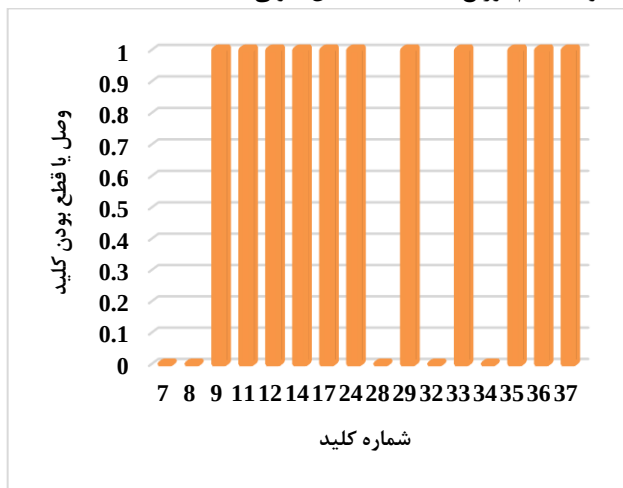
جدول ۶- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد کاهش تلفات

تلفات اکتیو (MW)	شاخص انحرافات ولتاژ (PU)
۰/۰۹۳۴۳۷	۰/۸۳۲۴۵۴

شکل ۸- تلفات توان اکتیو در خطوط با رویکرد کاهش تلفات بر حسب کیلووات

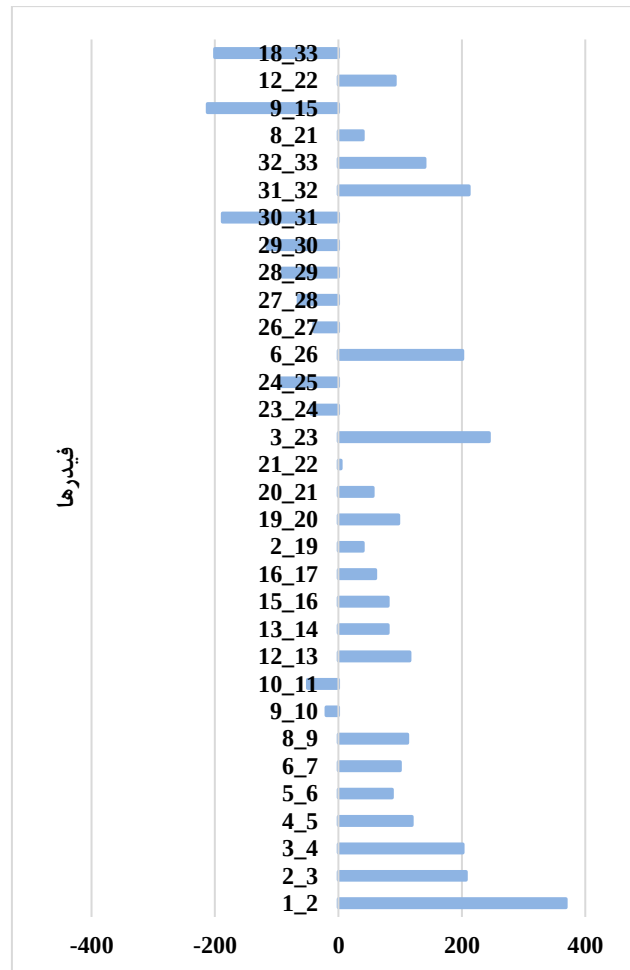
۵-۲- بهینه سازی تک هدفه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم توزیع

هدف این حالت بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم توزیع است. شبیه سازی ها به کمک الگوریتم تجمع ذرات انجام شده است. جمعیت اولیه در الگوریتم برابر با ۴۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ حالت باز و بسته بودن کلیدها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می شود کلیدهای شماره ۷، ۸، ۲۸، ۳۲ و ۳۴ باز است. با بررسی کلیدها مشخص می شود که هیچ حلقه ای در سیستم توزیع ایجاد نشده است. بنابراین شرط شعاعی بودن شبکه برقرار است. در جدول ۷ مقدار تلفات و شاخص انحراف ولتاژ سیستم توزیع در این سناریو نمایش داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می شود به کمک بازآرایی با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ، هم انحرافات ولتاژ سیستم نسبت به حالت پایه (جدول ۵) کاهش یافته است و هم تلفات اکتیو سیستم توزیع ۳۳ شینه کاهش خوبی داشته است.

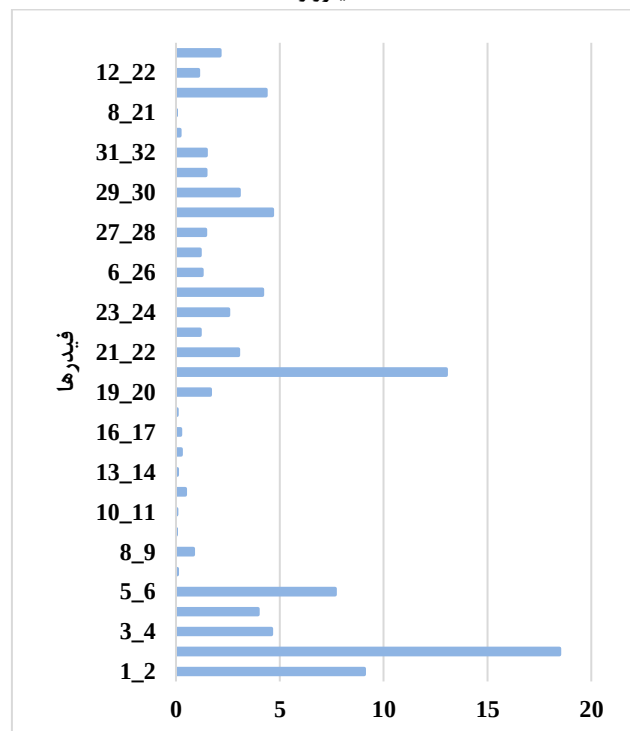


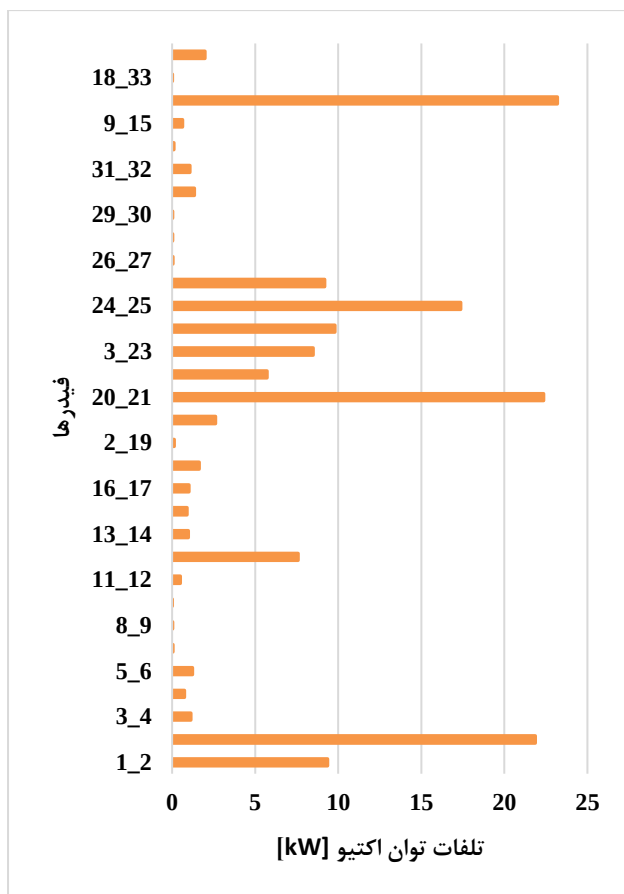
شکل ۹- کلیدهای شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ

جدول ۷- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ



شکل ۷- توان راکتیو جاری در خطوط با رویکرد کاهش تلفات بر حسب کیلووات





شکل ۱۱- تلفات توان اکتیو در خطوط با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ بر حسب کیلووات

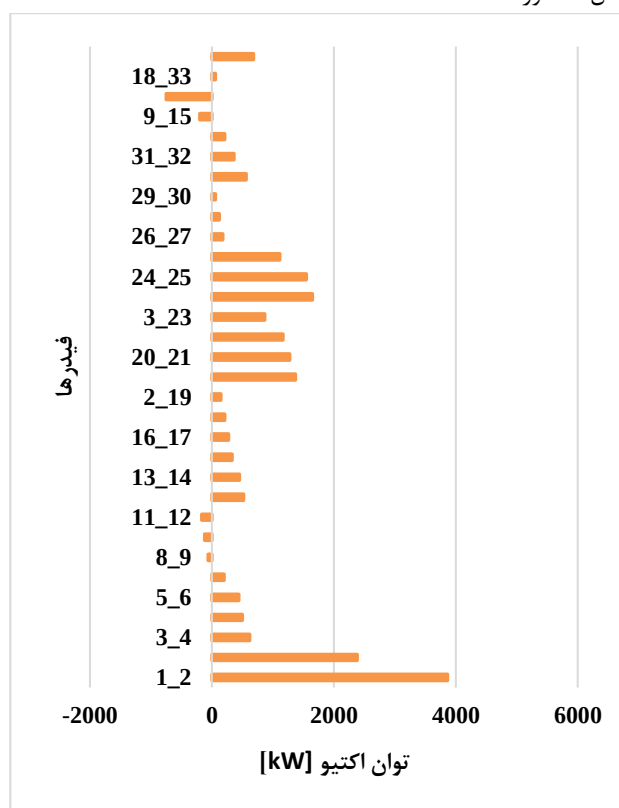
۳-۵- بهینه سازی چندهدفه به روش ضرایب وزندار با

رویکرد کاهش همزمان تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ

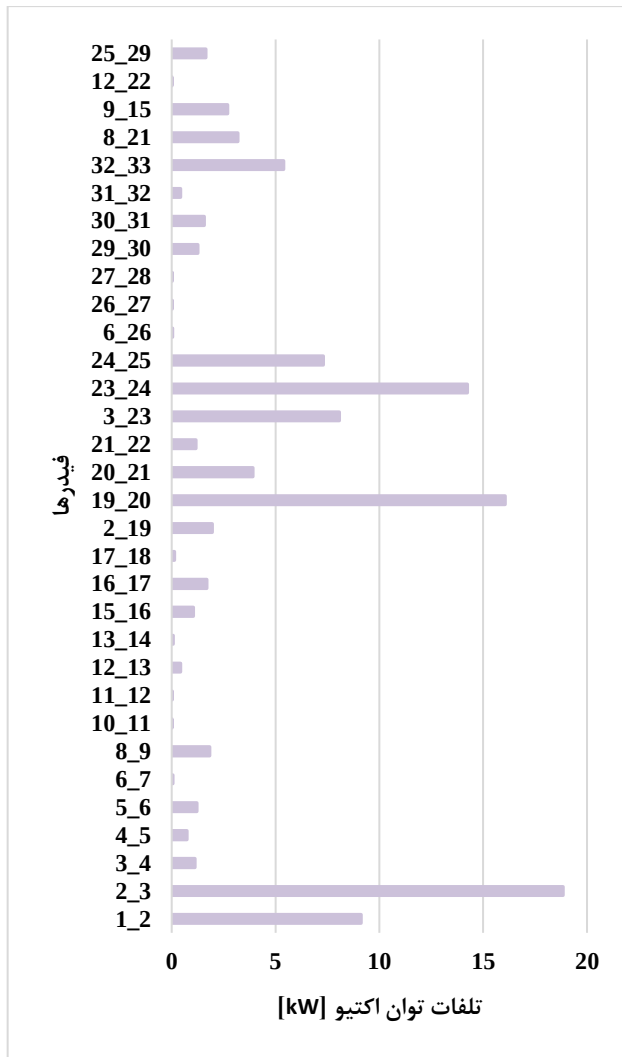
هدف این حالت بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات به صورت همزمان در سیستم توزیع است. برای این کار از روش ضرایب وزندار استفاده می شود. وزن دو تابع هدف با یکدیگر مساوی و برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شده است. شبیه سازی ها به کمک الگوریتم تجمع ذرات انجام شده است. جمعیت اولیه در الگوریتم برابر با ۴۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ حالت باز و بسته بودن کلیدها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می شود کلیدهای شماره ۷، ۹، ۱۴، ۲۸ و ۳۲ باز است. با بررسی کلیدها مشخص می شود که هیچ حلقه ای در سیستم توزیع ایجاد نشده است. بنابراین شرط شعاعی بودن شبکه برقرار است. در جدول ۸ مقدار تلفات و شاخص انحراف ولتاژ سیستم توزیع در این سناریو نمایش داده شده است.

تلفات اکتیو (MW)	شاخص انحرافات ولتاژ (PU)
۰/۱۵۱۱۵۰	۰/۴۵۴۳۵۵

مقایسه نتایج بازآرایی با رویکرد کاهش تلفات با حالت بازآرایی با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ (دو جدول ۶ و ۷) مشخص می شود در هر دو حالت مقدار تلفات و شاخص انحرافات ولتاژ سیستم بهبود پیدا کرده است. اما میزان بهبود تلفات در حالت اول و میزان بهبود انحرافات ولتاژ در شبیه سازی ها با رویکرد دوم بیشتر است و این امر نیز بدیهی می باشد. زیرا در هر حالت، شاخصی که به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است بهبود بیشتری می یابد. همچنین میزان توان اکتیو عبوری از خطوط در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین مقدار تلفات هر خط نیز در شکل ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۰- توان اکتیو جاری در خطوط با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ بر حسب کیلووات

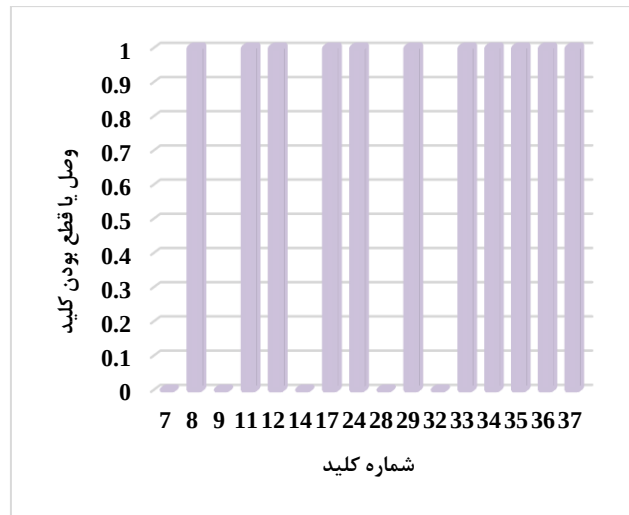


شکل ۱۳- تلفات توان اکتیو در خطوط با رویکرد همزمان کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بر حسب کیلووات

جدول ۹- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع به کمک الگوریتم PSO

شاخص انحرافات ولتاژ شبکه (PU)	تلفات اکتیو (MW)	رویکرد
۰/۸۳۲۴۵۴	۰/۰۹۳۴۳۷	کاهش تلفات
۰/۴۵۴۳۵۵	۰/۱۵۱۱۵۰	بهبود پروفیل ولتاژ
۰/۵۹۰۵۱۲	۰/۱۰۵۳۱۷	رویکرد همزمان

در ادامه و در شکل ۱۴ (پیوست)، به ولتاژ همه شین ها در سه سناریو بهینه سازی با رویکرد کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و سناریوی همزمان نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود ولتاژ تمامی شین ها در محدوده مجاز ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونیت قرار



شکل ۱۲- کلیدهای شبکه با رویکرد همزمان کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ

جدول ۸- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد همزمان کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ

تلفات اکتیو (MW)	شاخص انحرافات ولتاژ (PU)
۰/۱۰۵۳۱۷	۰/۵۹۰۵۱۲

در شکل ۱۳ تلفات توان اکتیو در خطوط با رویکرد همزمان کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بر حسب کیلووات نمایش داده شده است. در جدول ۹ شاخص های مختلف شبکه برای سناریوهای مختلف آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود مقدار تلفات از سناریو اول (کاهش تلفات) بیشتر و از سناریو دوم (بهبود پروفیل ولتاژ) بهتر است. همچنین مقدار انحراف ولتاژ نیز از سناریو اول بهتر و از سناریو دوم بدتر می باشد. یعنی نتایج حاصل فی مابین دو سناریو قبل قرار گرفته و این به دلیل احتساب ضریب وزنی ۰.۵ برای هر یک از توابع هدف می باشد.

برابر کاهش انحرافات ولتاژ برای بهره بردار سیستم ارزش دارد و جدول ۱۱ بیانگر عکس این موضوع است.

جدول ۱۰- ماتریس اولویت M با رویکرد کاهش تلفات

	f_1	f_2
f_1	۱	۵
f_2	۰.۲	۱

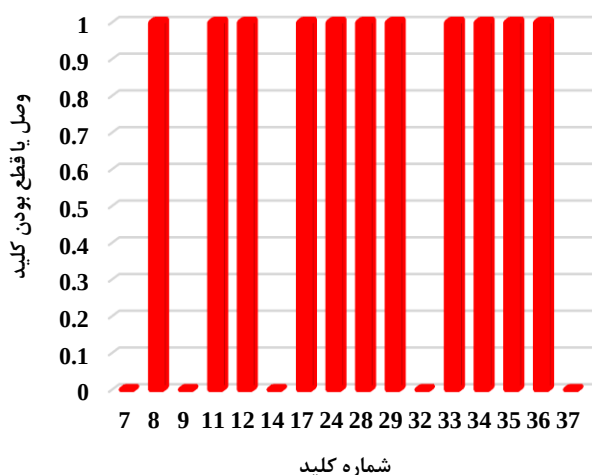
جدول ۱۱- ماتریس اولویت M با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ

	f_1	f_2
f_1	۱	۰.۲
f_2	۵	۱

در ادامه جواب های حاصل از بهینه سازی چندهدفه با رویکرد کاهش تلفات و کاهش انحرافات ولتاژ نمایش داده شده است.

الف) کاهش تلفات توان اکتیو سیستم توزیع

در شکل ۱۶ حالت باز و بسته بودن کلیدها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می شود کلیدهای شماره ۷، ۹، ۱۴، ۳۲ و ۳۷ باز است. با بررسی کلیدها مشخص می شود که هیچ حلقه ای در سیستم توزیع ایجاد نشده است. بنابراین شرط شعاعی بودن شبکه برقرار است. در جدول ۱۲ مقدار تلفات و شاخص انحراف ولتاژ سیستم توزیع در این سناریو نمایش داده شده است.



شکل ۱۶- کلیدهای شبکه با رویکرد کاهش تلفات اکتیو

در جدول ۱۲ مقدار تلفات و مقدار شاخص انحرافات ولتاژ نمایش داده شده است.

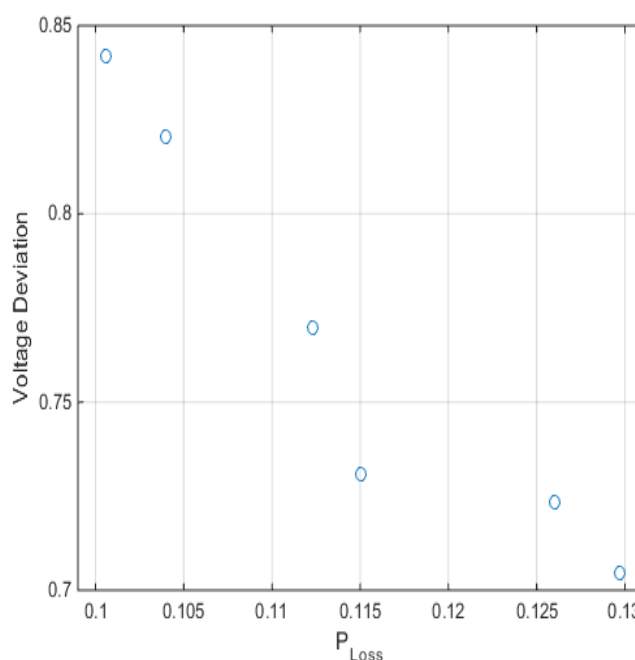
جدول ۱۲- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد کاهش تلفات اکتیو

پارامتر	تلفات (kW)	انحراف ولتاژ (PU)
مقدار	۰.۱۰۴۲۱	۰.۸۲۰۳۹

گرفته است. همچنین بهترین پروفیل ولتاژ مربوط به سناریو کاهش انحرافات ولتاژ می باشد.

۴-۵- بهینه سازی چندهدفه به کمک الگوریتم بهینه سازی تکاملی مبتنی بر جداسازی

در این بخش به شبیه سازی چندهدفه سیستم توزیع جهت تعیین یک آرایش ایده ال پرداخته می شود. در بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر پاسخ های نامغلوب بر خلاف روش ضرایب وزنی، به جای یک پاسخ خوب، مجموعه ای از جواب های نامغلوب و بهینه حاصل می شود. در این قسمت برای حل مسئله بهینه سازی چندهدفه از الگوریتم بهینه سازی تکاملی مبتنی بر تجزیه و جداسازی (MOEA/D) استفاده می شود. جمعیت اولیه در این الگوریتم برابر با ۴۰ و تعداد تکرار نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. تعداد همسایگی برای هر پاسخ عدد ۵ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در شکل ۱۵ نمایش داده شده است که بیانگر ۶ پاسخ بهینه نامغلوب در جبهه پارتو تخمینی برای الگوریتم MOEA/D می باشد.



شکل ۱۵- پارتو تخمینی توسط الگوریتم MOEA/D

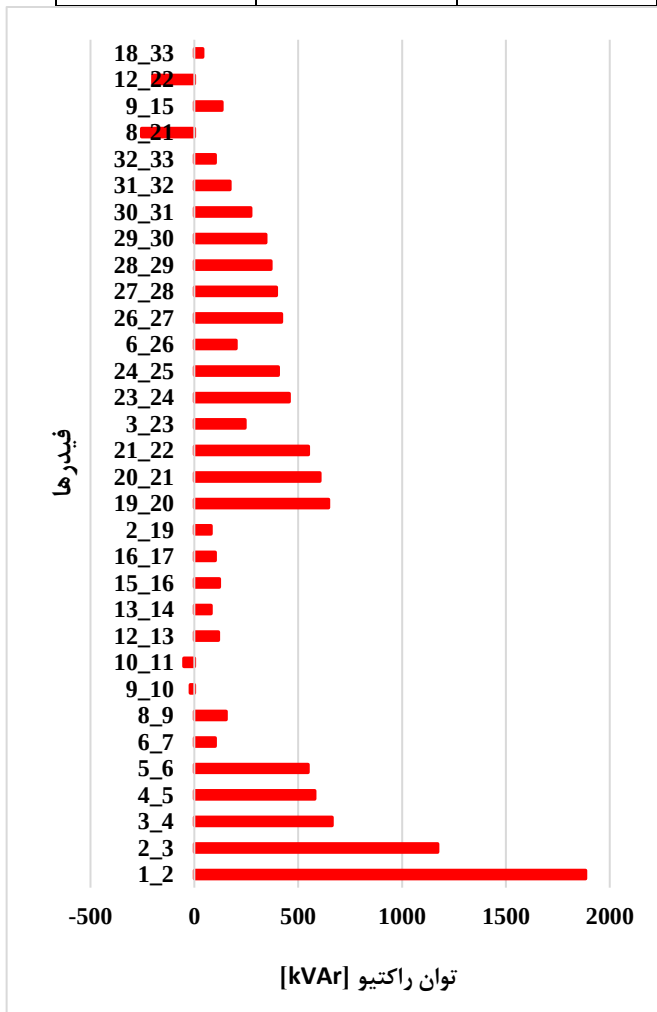
حال بهره بردار سیستم توزیع می تواند به کمک تکنیک تصمیم گیری چند معیاره که در فصل سوم به صورت کامل بیان شد با توجه به شرایط بهترین پاسخ را از میان پاسخ های موجود در جبهه پارتو تخمینی انتخاب و به سیستم توزیع ۳۳ شینه اعمال کند. برای این کار لازم است تا دو ماتریس اولویت بر مبنای کاهش تلفات و کاهش انحرافات ولتاژ در ابتدای کار توسط بهره بردار سیستم تعریف شود. فرض شده است که این دو ماتریس، توسط بهره بردار به صورت آنچه در جداول ۱۰ و ۱۱ آمده است تعریف شود. جدول ۱۰ بیانگر این موضوع است که تابع هدف تلفات ۵

سیستم توزیع در این سناریو نمایش داده شده است. مقدار توان اکتیو، توان راکتیو و تلفات توان اکتیو در خطوط مختلف سیستم توزیع ۳۳ شینه به ترتیب در شکل های ۲۱ تا ۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۱۳- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد بهبود

پروفیل ولتاژ

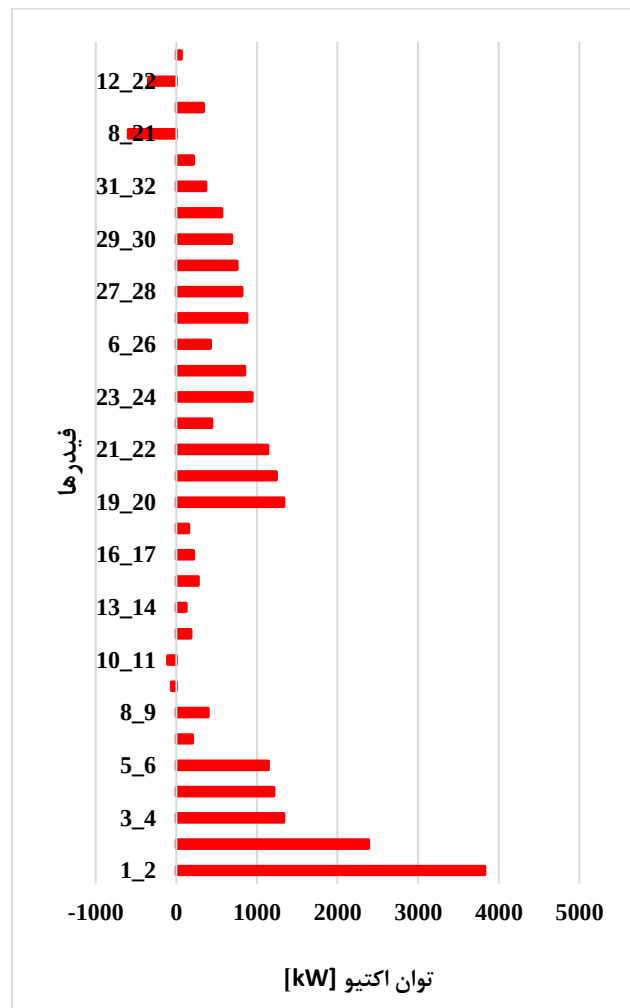
پارامتر	تلفات	انحراف ولتاژ
مقدار	۰.۱۲۶۴۱	۰.۷۲۳۲۱



شکل ۱۸- توان راکتیو جاری خطوط شبکه با رویکرد بهبود تلفات اکتیو

این پاسخ از پاسخ بهینه سازی تک هدفه با رویکرد کاهش تلفات، مقدار تلفات بدتر اما مقدار انحرافات ولتاژ بهتری دارد. این امر به دو دلیل روی داده است که عبارتند از الف) استفاده از الگوریتم MOEA/D به جای PSO و ب) استفاده از ماتریس اولویت کاهش تلفات. چون دو الگوریتم MOEA/D و PSO مبتنی بر اعداد تصادفی اولیه برای تعریف جمعیت اولیه می باشند و همچنین عملگرهای این دو الگوریتم (سرعت در PSO و جهش و ترکیب در MOEA/D) تصادفی می باشند وجود این تفاوت ها بدیهی می باشد.

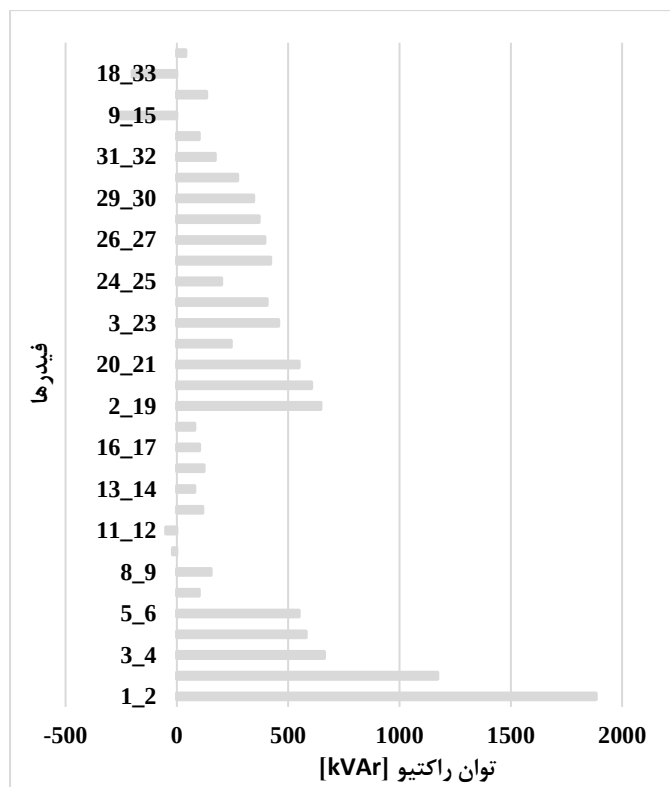
مقدار توان اکتیو، توان راکتیو و تلفات توان اکتیو در خطوط مختلف سیستم توزیع ۳۳ شینه به ترتیب در شکل های ۱۷ تا ۲۰ نشان داده شده است.



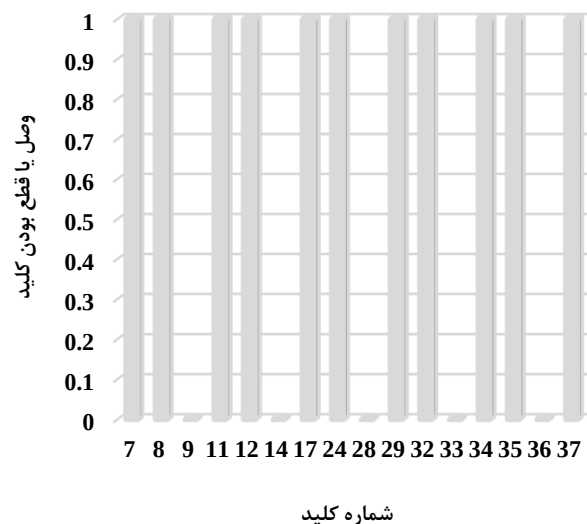
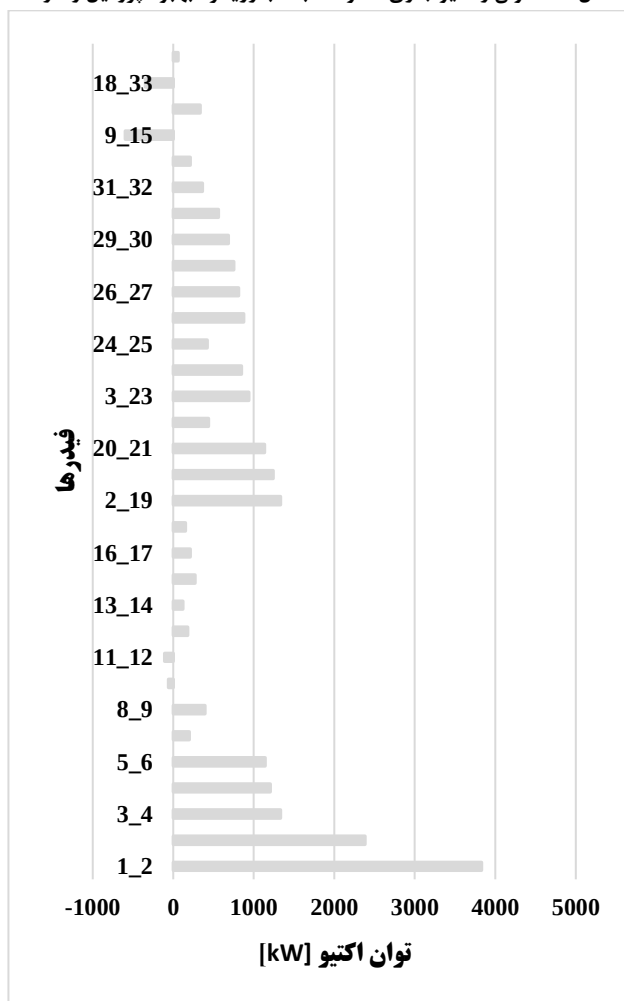
شکل ۱۷- توان اکتیو جاری خطوط شبکه با رویکرد بهبود تلفات اکتیو

ب) بهبود پروفیل ولتاژ سیستم توزیع

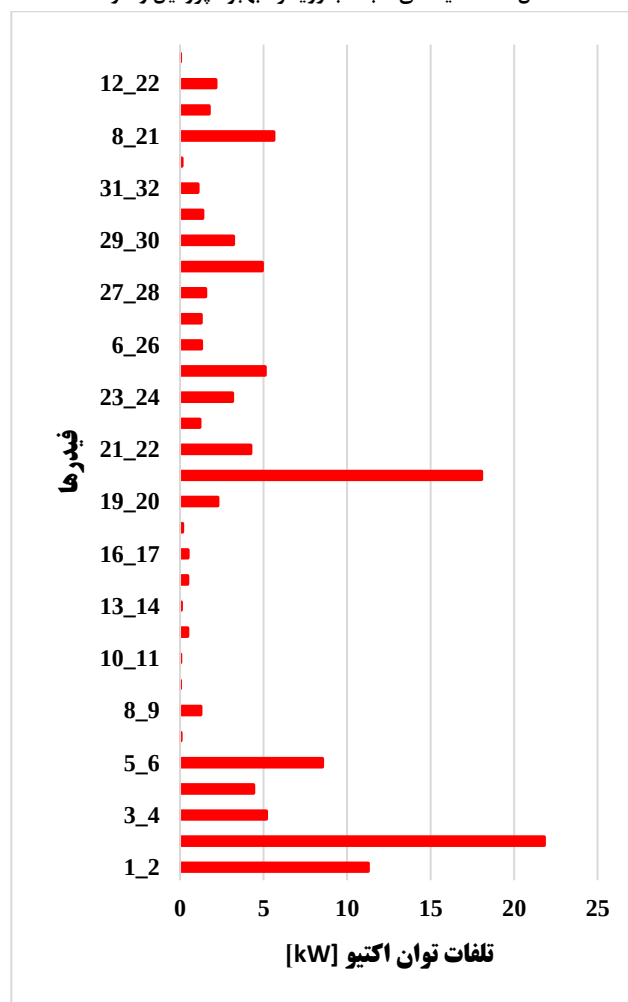
در شکل ۱۹ حالت باز و بسته بودن کلیدها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می شود کلیدهای شماره ۹، ۱۴، ۲۸، ۳۳ و ۳۶ باز است. با بررسی کلیدها مشخص می شود که هیچ حلقه ای در سیستم توزیع ایجاد نشده است. بنابراین شرط شعاعی بودن شبکه برقرار است. در جدول ۱۳ مقدار تلفات و شاخص انحراف ولتاژ



شکل ۲۱- توان راکتیو جاری خطوط شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ



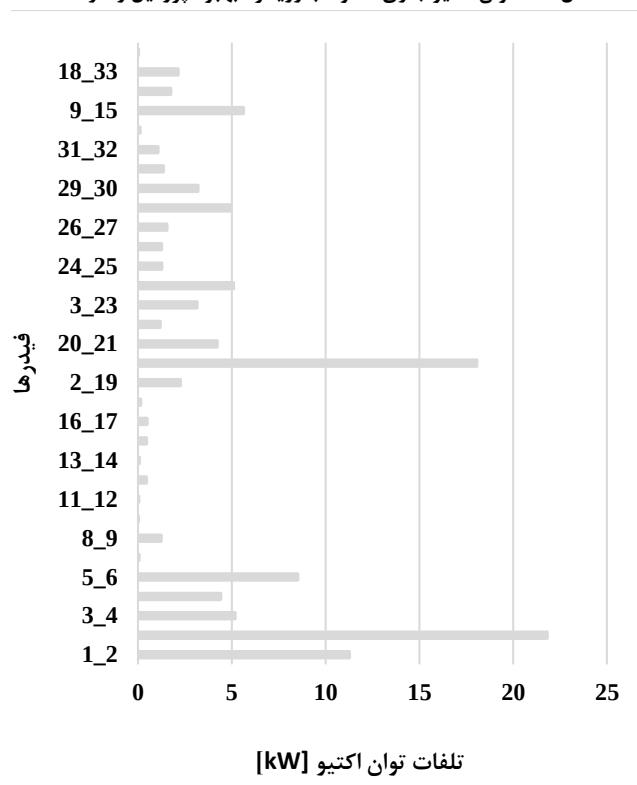
شکل ۱۹- کلیدهای شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ



شکل ۲۰- تلفات توان اکتیو خطوط شبکه با رویکرد بهبود تلفات اکتیو

دو رویکرد کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ به کمک الگوریتم MOEA/D نمایش داده شده است. در شکل ۲۴، پروفیل ولتاژ سیستم توزیع نیز برای این دو رویکرد نمایش داده شده است.

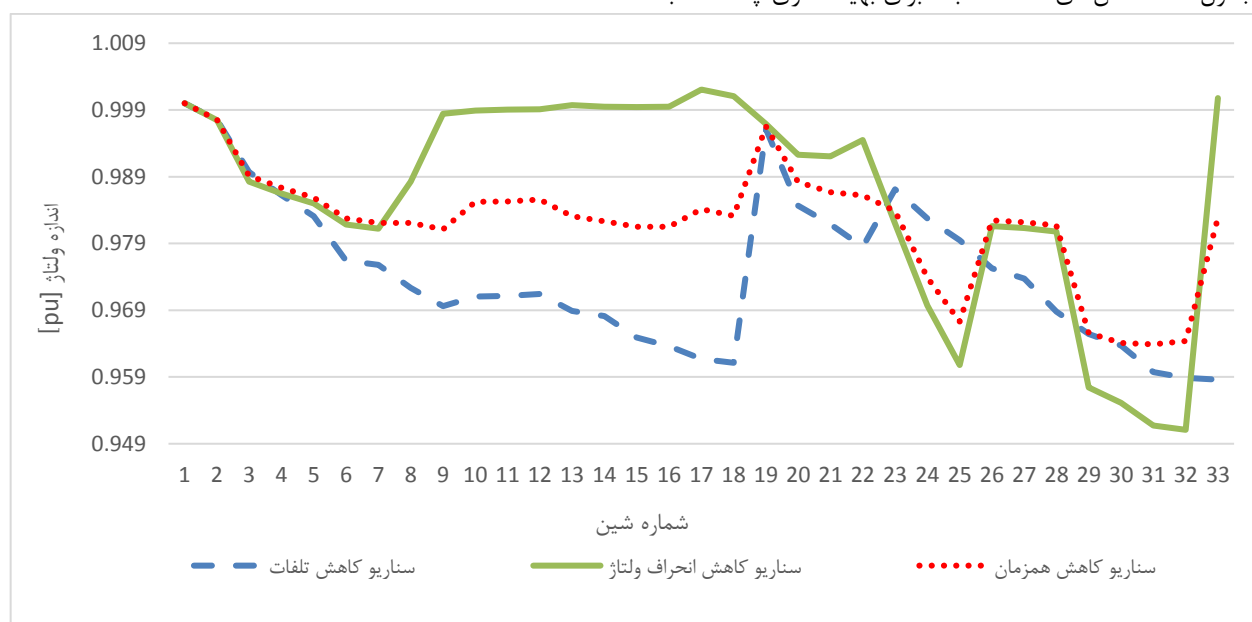
شکل ۲۲- توان اکتیو جاری خطوط با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ



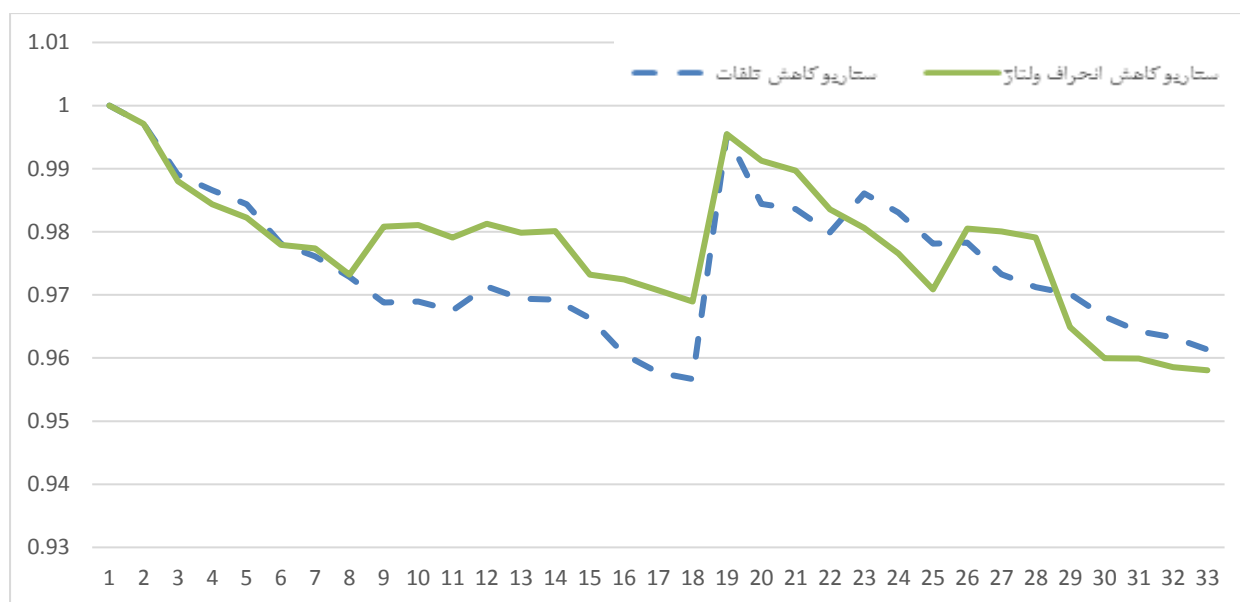
جدول ۱۴- تلفات و انحرافات ولتاژ سیستم ۳۳ شین توزیع با رویکرد کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ

سناریو	تلفات (MW)	مجموع انحرافات ولتاژ شبکه (PU)
کاهش تلفات	۰/۱۱۲۳۶۳	۱/۰۷۵۰۶۹
بهبود پروفیل ولتاژ	۰/۱۱۹۸۹۳	۱/۰۶۴۰۶۹

شکل ۲۳- تلفات توان اکتیو خطوط شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ در جدول ۱۴ شاخص های مختلف شبکه برای بهینه سازی چندهدفه با



شکل ۱۴- پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شین در سناریوهای مختلف به کمک الگوریتم PSO



شکل ۲۴- پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شین در سناریوهای مختلف به کمک الگوریتم MOEA/D

۶- نتیجه گیری

های نامغلوب از الگوریتم بهینه سازی MOEA/D استفاده شد. شبیه سازی ها در محیط MATLAB و بر روی سیستم ۳۳ شینه توزیع IEEE پیاده شد.

نتایج حاصل از این مقاله به شرح زیر می باشد:

• به دلیل غیرخطی بودن سیستم توزیع و همچنین پیچیدگی زیاد این شبکه ها، حل مسائل بهینه سازی در سیستم توزیع به کمک روش های مبتنی بر ریاضیاتی با مشکلاتی مواجه است و ممکن است پاسخ بهینه حاصل نشود. لذا در این مقاله از الگوریتم های بهینه سازی تصادفی PSO و MOEA/D استفاده شد.

• در حل مسئله بازآرایی سیستم های توزیع به شکل تک هدفه، دو رویکرد کاهش تلفات اکتیو و کاهش انحرافات ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از آنها بیانگر این موضوع است که بهبود زیادی با عمل بازآرایی در سیستم توزیع نسبت به حالت پایه ایجاد می شود.

• همچنین به کمک الگوریتم PSO، مسئله بهینه سازی به صورت چندهدفه و به کمک ضرایب وزندار مورد بررسی قرار گرفت. ضریب وزنی دو تابع هدف در این بخش با یکدیگر برابر فرض شد. نتایج این بخش نیز حاکی از آن بود که پاسخ بدست آمده، مابین نتایج حاصل از دو بهینه سازی تک هدفه با دو رویکرد کاهش تلفات و بهبود انحرافات ولتاژ بود. زیرا وجود ضرایب وزنی یکسان موجب می شود تا هر دو تابع تا حدودی بهینه شوند.

• بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر پاسخ های نامغلوب نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله در این بخش، وجود یک دسته از پاسخ های بهینه ناملوب می باشد که این امکان را به بهره بردار سیستم توزیع می دهد تا با توجه به شرایط، به کمک تکنیک تصمیم گیری

همواره در مسیر استفاده انرژی از تولید تا محل مصرف بخشی از آن به صورت تلفات به هدر می رود. قسمتی از این تلفات در هنگام تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی در نیروگاه ها رخ می دهد که این تلفات با شاخص راندمان شناخته می شود. یعنی هر چه راندمان در نیروگاه ها بالاتر باشد سیستم از تلفات کمتری برخوردار است. در صنعت برق انرژی تولید شده در نیروگاه ها از طریق شبکه انتقال و توزیع در اختیار مصرف کنندگان قرار می گیرد و بخش دیگری از انرژی در طول این مسیر به هدر خواهد رفت. در صد تلفات انرژی در بخش انتقال حدود ۴.۴ و در بخش توزیع حدود ۱۷.۵ اعلام شده که بر این اساس در سال ۸۷ مقدار تلفات در بخش توزیع ایران برابر ۳۴۲۲۰ میلیون کیلووات ساعت با ارزش ریالی ۲۸۴۷۱ میلیارد ریال خواهد بود. انرژی تلف شده در بخش توزیع تلفاتی را در بخش انتقال و تولید نیز به همراه خواهد داشت. لذا ارزش هر کیلووات ساعت انرژی تلف شده در بخش توزیع بیش از دو بخش دیگر خواهد بود. این امر موجب شد تا در سال های اخیر اقداماتی جهت کاهش تلفات شبکه های توزیع انجام شود. یکی از راهکارهای موثر در کاهش تلفات و همچنین کاهش خاموشی ها در شبکه های توزیع تجدید پیکر بندی این شبکه ها می باشد که هزینه بسیار کمی را نیز به دنبال دارد. لذا در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته شد. برای تجدید پیکر بندی شبکه های توزیع در این مقاله دو تابع هدف در نظر گرفته شد. تابع هدف اول کاهش تلفات اکتیو سیستم توزیع و تابع هدف دوم بهبود پروفیل ولتاژ می باشد. این دو تابع هدف به دو روش تک هدفه و چند هدفه مورد بررسی قرار گرفتند. در بخش تک هدفه و بهینه سازی چندهدفه به روش ضرایب وزندار از الگوریتم PSO استفاده شد و در بخش بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر پاسخ

- در حل مسئله بهینه سازی بهتر است توابع هدف دیگری مانند افزایش پایداری ولتز، میزان قطعی بار مشترکین و ... در نظر گرفته شود.

- از الگوریتم MOEA/D و سایر الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه مانند MOPSO و ... برای حل مسائل بهینه سازی مختلف در سیستم توزیع و انتقال استفاده شود.

- مسئله برنامه ریزی تولید در حضور بارهای نامعین (عدم قطعیت در بار) مورد بررسی قرار گیرد.

چند معیاره مبتنی بر ماتریس M، بهترین پاسخ را تعیین و به سیستم اعمال کند.

* در تمامی سناریوهای مورد بررسی در این مقاله (چه تک هدفه و چه چند هدفه)، مقدار ولتاژها در محدوده مجاز ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونت قرار گرفت.

پی شهنهاداتی که جهت کارهای آتی می توان ارائه داد به شرح زیر می باشد:

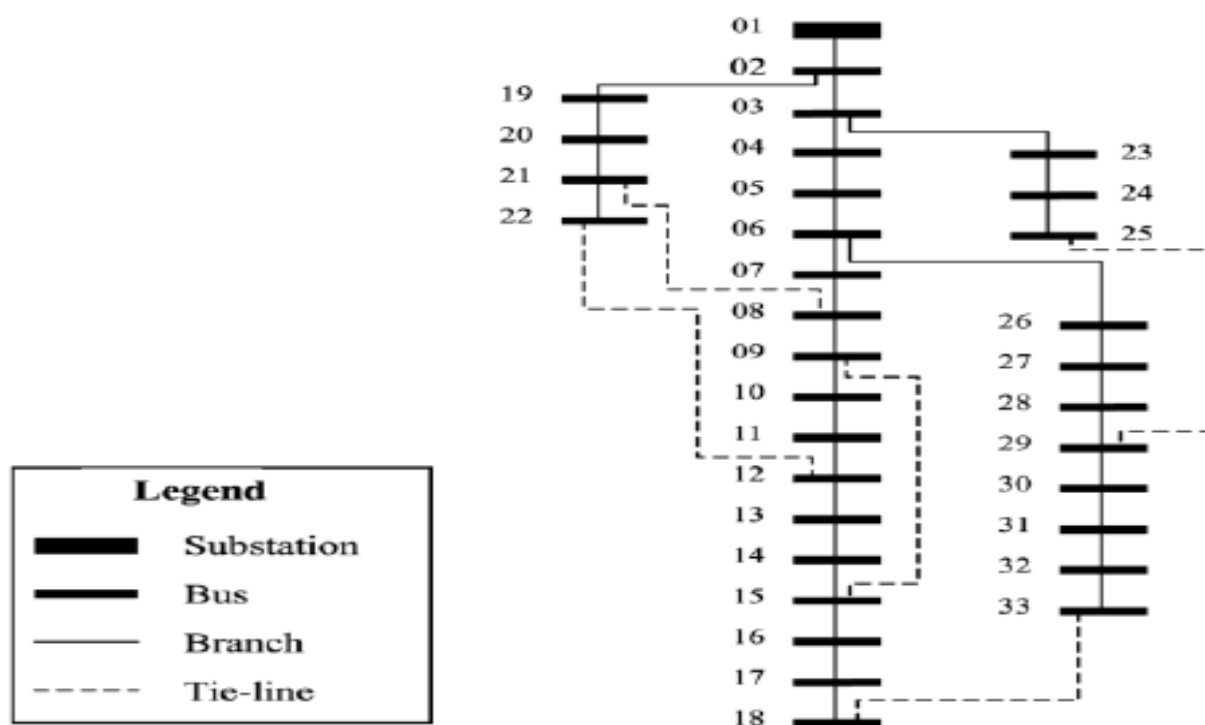
- مسئله بازآرایی در سیستم های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده، خانها و خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گیرد تا یک مسئله برنامه ریزی جامع برای سیستم های توزیع قلمداد شود.

مراجع

- A. M. Eldurssi and R. M. O'Connell, (2015). "A Fast Nondominated Sorting Guided Genetic Algorithm for Multi-Objective Power Distribution System Reconfiguration Problem," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 2, pp. 593-601, March
- Ma, S., Chen, B., & Wang, Z. (2016). Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 1442-1451.
- Ma, S., Su, L., Wang, Z., Qiu, F., & Guo, G. (2018). Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events. IEEE Transactions on power systems, 33(5), 4842-4853.
- Liu, D., Bai, T., Deng, M., Huang, Q., Wei, X., & Liu, J. (2023). A parallel approximate evaluation-based model for multi-objective operation optimization of reservoir group. Swarm and Evolutionary Computation, 78, 101288.
- Mousavizadeh, S., Haghifam, M.-R., & Shariatkhah, M.-H. (2018). A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources. Applied energy, 211, 443-460.
- Jing, Yuhao, et al.(2023). "Cooperative Deployment Multi-Objective Optimization Approach for High-Resolution Multi-Airship Earth-Observation Coverage Network." IEEE Transactions on Network Science and Engineering .
- L. Isac Silva, E. Antonio Belati and I. Chaves Silva Junior, (2016). "Heuristic Algorithm for Electrical Distribution Systems Reconfiguration Based on Firefly Movement Equation," IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 752-758, Feb.
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015b). Operational resilience assessment of power systems under extreme weather and loading conditions. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1-5, Denver, USA.
- Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziargyriou, N. D. (2016). Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(6), 2913-2922.
- Poudel, S., & Dubey, A. (2018). Critical load restoration using distributed energy resources for resilient power distribution system. IEEE Transactions on power systems, 34(1), 52-63.
- Chen, L., Cao, L. L., Wen, Y. M., Chen, H., & Jiang, S. L. (2023). A knowledge-based NSGA-II algorithm for multi-
- T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, and R. Castro, (2015) "A multi-objective optimization of the active and reactive resource scheduling at a distribution level in a smart grid context," Energy, vol. 85, pp. 236-250.
- Fan M, Chen J, Xie Z, Ouyang H, Li S, Gao L. (2022) Improved multi-objective differential evolution algorithm based on a decomposition strategy for multi-objective optimization problems. Sci Rep. 2022 Dec 7;12(1):21176. doi: 10.1038/s41598-022-25447-7.
- S. Huang, Q. Wu, L. Cheng and Z. Liu, (2016) "Optimal Reconfiguration-Based Dynamic Tariff for Congestion Management and Line Loss Reduction in Distribution Networks," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, pp. 1295-1303, May 2016.
- A. Asrari, T. Wu and S. Lotfifard, (2016). "The Impacts of Distributed Energy Sources on Distribution Network Reconfiguration," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 2, pp. 606-613, June . doi: 10.1109/TEC.2015.2514191
- Chanda, S. & Srivastava, A. K. (2016). Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid 7 (6), 2859-2868
- Shehadeh, Hisham A., Mohd Yamani Idna Idris, Ismail Ahmady, Roziana Ramli, and Noorzaily Mohamed Noor. (2018). "The Multi-Objective Optimization Algorithm Based on Sperm Fertilization Procedure (MOSFP) Method for Solving Wireless Sensor Networks Optimization Problems in Smart Grid Applications" Energies 11, no. 1: 97.
- Chen, C., Wang, J., Qiu, F., & Zhao, D. (2015). Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(2), 958-966.
- Gao, H., Chen, Y., Xu, Y., & Liu, C.-C. (2016). Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(6), 2837-2848.
- Gautam, P., Piya, P., & Karki, R. (2020). Resilience assessment of distribution systems integrated with distributed energy resources. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 12(1), 338-348.
- Liu, X., Shahidehpour, M., Li, Z., Liu, X., Cao, Y., & Bie, Z. (2016). Microgrids for enhancing the power grid resilience in extreme conditions. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(2), 589-597.

- Generation Profiles," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.30, no.4, pp.1677-1685, Aug. 2015
- T. T. Nguyen and A. V. Truong, "Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 68, pp. 233-242, Jun. 2015.
- Alonso, F.R.; Oliveira, D.Q.; Zambroni de Souza, A.C., "Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration," IEEE Transactions on Power Systems, vol.30, no.2, pp.840-847, March 2015
- M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, pp. 172-180, 2012.
- Z. Tian, W. Wu, B. Zhang and A. Bose, "Mixed-integer second-order cone programming model for VAR optimisation and network reconfiguration in active distribution networks," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 8, pp. 1938-1946, 5 19 2016.
- C. Liu, S. Mehrotra and Z. Bie, "Robust Distribution Network Reconfiguration," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 836-842, March 2015.
- objective hot rolling production scheduling under flexible time-of-use electricity pricing. Journal of Manufacturing Systems, 69, 255-270.
- Wang, X., Li, Z., Shahidehpour, M., & Jiang, C. (2017). Robust line hardening strategies for improving the resilience of distribution systems with variable renewable resources. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10(1), 386-395.
- Wang, Y., Chen, C., Wang, J., & Baldick, R. (2015). Research on resilience of power systems under natural disasters—A review. IEEE Transactions on power systems, 31(2), 1604-1613.
- Yuan, C., Illindala, M. S., & Khalsa, A. S. (2016). Modified Viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency. IEEE Transactions on Power Delivery, 32(1), 310-319.
- Singh, J., Fatima, S., & Chauhan, A. S. (2023). Multi-Objective Travel Route Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 11(3), 785-794.
- Zhou, W., Liu, Y., Li, M., Wang, Y., Shen, Z., Feng, L., & Zhu, Z. (2023). Dynamic Multi-Objective Optimization Framework With Interactive Evolution for Sequential Recommendation. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence.
- Rohman, F. S., Muhammad, D., Zahan, K. A., & Murat, M. N. (2023). Operation and Design Optimisation of Industrial Low-Density Polyethylene Tubular Reactor for Multiple Objectives Using an Evolutionary Algorithm-Based Strategy. Process Integration and Optimization for Sustainability, 1-18.
- Zhang, Qingfu, and Hui Li. (2007) "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition." IEEE Transactions on evolutionary computation 11.6: 712-731.
- Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C., & Zeng, B. (2016). Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters. IEEE Transactions on Smart Grid, 7(6), 2817-2826.
- Zhang, B., Dehghanian, P., & Kezunovic, M. (2017). Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(1), 535-545.
- Ye, Q., Wang, Z., Zhao, Y., Dai, R., Wu, F., & Yu, M. (2023). A clustering-based competitive particle swarm optimization with grid ranking for multi-objective optimization problems. Scientific Reports, 13(1), 11754.
- Tahboub, A.M.; Pandi, V.R.; Zeineldin, H.H., "Distribution System Reconfiguration for Annual Energy Loss Reduction Considering Variable Distributed

پیوست ها



شکل ۴- سیستم ۳۳ شینه توزیع استاندارد IEEE

جدول ۳- مشخصات خطوط در سیستم توزیع ۳۳ شین IEEE

شین ابتدایی	شین انتهایی	مقاومت خط (pu)	راکتانس خط (pu)
1	2	0.061906	0.029324
2	3	0.307595	0.156668
3	4	0.228357	0.115052
4	5	0.237778	0.121104
5	6	0.510995	0.441115
6	7	0.116799	0.386085
7	8	0.44386	0.146685
8	9	0.642643	0.61705
9	10	0.651378	0.461705
10	11	0.122664	0.040555
11	12	0.233598	0.077242
12	13	0.915922	0.720634
13	14	0.337918	0.444796
14	15	0.36874	0.328185
15	16	0.465635	0.340039
16	17	0.80424	1.073775
17	18	0.456713	0.358133
2	19	0.102324	0.097644
19	20	0.938508	0.845668
20	21	0.255497	0.298486
21	22	0.442301	0.584805

3	23	0.281515	0.192356
23	24	0.560285	0.442425
24	25	0.559037	0.437434
6	26	0.126657	0.064514
26	27	0.17732	0.090282
27	28	0.660737	0.582559
28	29	0.501761	0.437122
29	30	0.316642	0.161285
30	31	0.607953	0.60084
31	32	0.193729	0.225799
32	33	0.212759	0.330805

جدول ۴- توان های مصرفی در هر شین از سیستم توزیع ۳۳ شینه مدنظر

توان اکتیو مصرفی (MW)	توان راکتیو مصرفی (MVar)	شماره شین
۰	۰	۱
۰/۱	۰/۰۶	۲
۰/۰۹	۰/۰۴	۳
۰/۱۲	۰/۰۸	۴
۰/۰۶	۰/۰۳	۵
۰/۰۶	۰/۰۲	۶
۰/۲	۰/۱	۷
۰/۲	۰/۱	۸
۰/۰۶	۰/۰۲	۹
۰/۰۶	۰/۰۲	۱۰
۰/۰۴۵	۰/۰۳	۱۱
۰/۰۶	۰/۰۳۵	۱۲
۰/۰۶	۰/۰۳۵	۱۳
۰/۱۲	۰/۰۸	۱۴
۰/۰۶	۰/۰۱	۱۵
۰/۰۶	۰/۰۲	۱۶
۰/۰۶	۰/۰۲	۱۷
۰/۰۹	۰/۰۴	۱۸
۰/۰۹	۰/۰۴	۱۹
۰/۰۹	۰/۰۴	۲۰
۰/۰۹	۰/۰۴	۲۱
۰/۰۹	۰/۰۴	۲۲
۰/۰۹	۰/۰۹	۲۳
۰/۴۲	۰/۲	۲۴
۰/۴۲	۰/۲	۲۵
۰/۰۶	۰/۰۲۵	۲۶
۰/۰۶	۰/۰۲۵	۲۷
۰/۰۶	۰/۰۲	۲۸
۰/۱۲	۰/۰۷	۲۹

۰/۲	۰/۱	۳۰
۰/۱۵	۰/۰۷	۳۱
۰/۲۱	۰/۱	۳۲
۰/۰۶	۰/۰۴	۳۳

زیر نویس ها

¹ Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition

² Multiple-criteria decision-making

² Branch and Bound

⁴ Benders Decomposition

⁵ Benders Decomposition

⁶ Grey Correlation Analysis

⁷ Feeder reconfiguration

⁸ fast, non-dominated sorting genetic algorithm

⁹ fuzzy adaptive inference-based hybrid PSO algorithm

¹⁰ Firefly Movement Equation

¹¹ gravitational search

¹² Artificial Immune Systems

¹³ non-convex three-phase optimisation

¹⁴ piecewise linearisation

¹⁵ Mixed-integer second-order cone programming

¹⁶ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm