



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 1, 2024
pp. 25-40
Research Paper

Presenting a Differential Evolutionary Algorithm for Solving the Stochastic Problem of Reconfiguration of the Distribution Network and Optimal Allocation of Distributed Generation Units (Wind Turbine)

Hossein Lotfi¹, Mohammad Hasan Nikkhah², Mohammad Ebrahim Hajiabadi^{3*}

Ph.D., Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

MA, Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Abstract:

Reconfiguration of the distribution network as well as the optimal use of distributed generation resources in the distribution system are very effective methods to reduce losses and improve the voltage profile or in other words power quality in the electricity distribution system. In recent years, researchers have paid attention to the use of distributed production resources. The use of these resources has several advantages, the most important of which are the reduction of network losses and the increase of voltage stability. In this study, a differential evolutionary algorithm is presented to solve the desired optimization problem to reduce losses and bus voltage deviation. On the other hand, since the system load is always changing and is not constant, therefore, for the simulation results to be close to the real conditions of the distribution network, it is suggested in this study that the uncertainty of the consumption load should also be modeled and applied to the optimization problem. The mentioned problem has different discrete and continuous variables, which necessitates the use of algorithms that can search in discrete and continuous spaces. Therefore, to overcome this issue and apply different constraints to the problem, the differential evolutionary algorithm has been used. The mentioned method has been tested on a standard 33-bus test network and the results have been compared in three different scenarios. In the second and third scenarios, reconfiguration of the distribution network has been resolved in the absence/presence of scattered production units (wind turbines) respectively. The results of the proposed method have been compared with other references. The results show that the proposed differential evolutionary algorithm performs better than the other two algorithms and has achieved better results.

Keywords: Reconfiguration of Distribution network, Optimization, Losses, Distributed Generation Resources, Load Uncertainty.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/IJEE.2023.137925.1633>

ارائه یک الگوریتم تکاملی تفاضلی برای حل مسئله تصادفی بازآرایی شبکه توزیع و

اختصاص بهینه واحدهای تولید پراکنده (توربین بادی)

حسین لطفی^۱، محمد حسن نیکخواه^۲، محمد ابراهیم حاجی آبادی^{۳*}

۱- دکتری تخصصی گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

hossein_lotfi95@yahoo.com

۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

mh.nikkhah98@gmail.com

۳- دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

me.hajiabadi@hsu.ac.ir

چکیده: بازآرایی شبکه توزیع و همچنین، استفاده بهینه از منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع، روش‌های بسیار مؤثری برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ یا به عبارتی، کیفیت توان در سیستم توزیع برق است. محققان در سال‌های اخیر، به استفاده از منابع تولید پراکنده توجه داشته‌اند. استفاده از این منابع، مزایای متعددی دارد که از مهم‌ترین آنها کاهش تلفات شبکه و افزایش پایداری ولتاژ است. در این مطالعه، الگوریتم تکاملی تفاضلی برای حل مسئله بهینه‌سازی مدنظر با اهداف کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس ارائه شده است. همچنین، چون بار سیستم همواره در حال تغییر است و ثابت نیست، برای نزدیک‌بودن نتایج حاصل از شبیه‌سازی به شرایط واقعی شبکه توزیع، در این مطالعه پیشنهاد شده است عدم قطعیت بار مصرفی نیز مدلسازی شود و به مسئله بهینه‌سازی اعمال شود. مسئله مذکور دارای متغیرهای گسسته و پیوسته متفاوتی بوده که استفاده از الگوریتم‌های دارای قابلیت جستجو در فضاهای گسسته و پیوسته را ضروری کرده است. بنابراین، برای فائق‌آمدن بر این موضوع و اعمال قیود مختلف در مسئله از الگوریتم تکاملی تفاضلی استفاده شده است. روش مذکور روی شبکه تست ۳۳ باسه استاندارد آزمایش شده است و نتایج در سه مورد مختلف مطالعاتی باهم مقایسه شده‌اند. در موارد دوم و سوم به ترتیب بازآرایی شبکه توزیع در عدم حضور / حضور واحدهای تولید پراکنده (توربین بادی) حل شده است. نتایج روش پیشنهادی با نتایج سایر روش‌ها و مراجع مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی تکاملی تفاضلی در مقایسه با سایر روش‌های تکاملی به نتایج بهتری در کاهش تلفات و همچنین، بهبود پروفیل ولتاژ رسیده است.

واژه‌های کلیدی: بازآرایی شبکه توزیع، بهینه‌سازی، تلفات، منابع تولید پراکنده، عدم قطعیت بار

۱- مقدمه

توجهی از توان را هدر می‌دهد و هزینه‌های مالی زیادی را به شرکت‌های برق تحمیل می‌کند. در این میان، عمده تلفات شبکه برق به دلیل خرابی شبکه توزیع است. در کشور ما بیش از ۱۵ درصد از انرژی خالص تولیدشده توسط نیروگاه‌ها تنها در شبکه‌های توزیع تلف می‌شود. افزایش تلفات در سیستم توزیع برق که به دو بخش فشار متوسط و فشار ضعیف تقسیم می‌شود، معمولاً نتیجه عوامل متعددی از جمله سطح ولتاژ پایین و البته دامنه جریان بالا در طول

هر ساله، تلفات انرژی در شبکه‌های برق، مقادیر شایان

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

نام نویسنده مسئول: محمد ابراهیم حاجی آبادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، سبزوار، دانشگاه حکیم سبزواری،

گروه مهندسی برق

بسیاری برای بهبود این محدودیت‌ها معرفی شده‌اند. بررسی ادبیات نشان می‌دهد الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکامل مختلف برای حل اشکال مختلف بازآرایی شبکه توزیع استفاده شده‌اند که در ادامه بررسی می‌شوند.

مرجع [۴] مسئله بازآرایی شبکه توزیع را با استفاده از الگوریتم ریشه دونده ۱ حل کرده است. این الگوریتم از عملکرد ریشه برخی از گیاهان موجود در طبیعت الهام گرفته شده است. هدف این مقاله، به حداقل رساندن تلفات توان فعال، دستیابی به تعادل بار بین شاخه‌ها و دستیابی به تعادل بار بین فیدرها است. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی می‌تواند یک روش کارآمد برای بازآرایی شبکه توزیع با یک یا چند هدف خاص باشد. مرجع [۵] نشان می‌دهد چگونه می‌توان هم‌زمان هم منابع تولید پراکنده را مکان‌یابی کرد و هم شبکه را با استفاده از روش جدید بهینه‌سازی یادگیری مبتنی بر جستجو بازآرایی کرد. این الگوریتم برای بهبود همگرایی، دقت و کارایی روش استاندارد یادگیری آموزشی ۲ پیشنهاد شده است. هدف از بهینه‌سازی مسئله در این مقاله، به حداقل رساندن تلفات بهبود پروفیل ولتاژ است. روش پیشنهادی روی یک سیستم استاندارد ۳۳ شینه آزمایش شده است و نتایج نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی عملکرد مناسبی در رسیدن به جواب بهینه داشته است. الگوریتم ترکیبی جستجوی هارمونی ۳ و کلونی زنبورهای مصنوعی ۴ در مرجع [۶] برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و خازن‌ها ارائه شده است. روش پیشنهادی برای کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ روی شبکه‌های ۶۹ و ۱۱۸ باسه آزمایش شده است. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع به جواب‌های بهتری نسبت به دو الگوریتم جستجوی هارمونی و کلونی زنبورهای مصنوعی رسیده است.

در مرجع [۷] برای حل مشکل پیکربندی مجدد شبکه توزیع در حضور بهینه واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات، الگوریتم قالب لجن موازی ۵ ارائه شده و روی دو شبکه تست ۳۳ و ۶۹ باسه آزمایش شده است. در مرجع [۸]، الگوریتم ترکیبی ازدحام سالپ ۶ و تکاملی تفاضلی ۷ به منظور تخصیص بهینه پنلهای فتوولتائیک و

فیدرها، ساختار شعاعی، وجود عدم تعادل جریان فاز و درنهایت، انشعابات غیر مجاز هستند. راه‌های متعددی برای کاهش تلفات سیستم توزیع و بهبود پایداری ولتاژ وجود دارد؛ نظیر نصب خازن، استفاده از منابع تولید پراکنده، مدیریت مصرف برای پیک سایه، تنظیم سطح ولتاژ و بازآرایی فیدرهای شبکه توزیع [۱].

منابع تولید پراکنده می‌تواند مزایای متعددی را برای سیستم‌های قدرت از جمله بهبود کیفیت توان، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان فراهم کند. با تأمین مکرر توان اکتیو به محل بار و کاهش تلفات انتقال، به طور پیوسته پایداری ولتاژ و قابلیت اطمینان شبکه بهبود می‌یابد؛ با این حال، مکان این تجهیزات بسیار مهم است؛ زیرا انتخاب محل نصب نادرست منجر به افزایش هزینه و کاهش راندمان می‌شود [۲]. انواع منابع تولید پراکنده که می‌توانند برای جبران توان اکتیو و راکتیو به منظور به حداقل رساندن تلفات توان در شبکه‌های توزیع استفاده شوند، در [۳] بررسی شده‌اند. علاوه بر این، هدف این مطالعه، بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ تمام باس‌های شبکه با استفاده از یک روش فراابتکاری است.

۱-۱- مروری بر مطالعات گذشته

بازآرایی شبکه توزیع، ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش کاهش تلفات در سیستم توزیع است [۲]؛ بنابراین، برای بارها و منابع مختلف تولید پراکنده در سراسر شبکه، پیکربندی بهینه شبکه توزیع باید برای به حداقل رساندن تلفات و بهبود پایداری ولتاژ تعیین شود. با توجه به تعداد زیاد پیکربندی‌های ممکن برای یک شبکه توزیع و عدم امکان بررسی همه آنها، باید از یک روش بهینه‌سازی کاربردی برای پیشنهاد مناسب‌ترین پیکربندی برای به حداقل رساندن تلفات استفاده شود. روش‌های ریاضی، الگوریتم‌های بسیار دقیقی برای حل این مسائل بهینه‌سازی هستند؛ اما برخی از محدودیت‌ها نظیر پیوستگی و مشتق‌پذیری توابع هدف و ذات گسسته وضعیت سوئیچ‌ها باعث شده است محققین تمایل کمتری برای استفاده از این روش‌ها در حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع داشته باشند. به‌تازگی الگوریتم‌های اکتشافی و فراابتکاری

عبارت‌اند از به حداقل رساندن تلفات شبکه، به حداقل رساندن نقض ولتاژ باس‌ها و متعادل‌سازی بار در فیدرها است. در [۱۶]، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع نامتعادل در حضور منابع تولید پراکنده با اهداف کاهش تلفات و بهبود شاخص پایداری ولتاژ ارائه شده است. در [۱۷]، یک روش جدید برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن قیود حفاظتی ارائه شده است. در [۱۸] برای حل مسئله چندهدفه بازآرایی در شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده، از الگوریتم تطبیقی اجتماع ذرات استفاده شده است. توابع هدف در این مرجع شامل تلفات شبکه و انحراف ولتاژ باس‌ها است. در [۱۹]، یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر کاهش فضای جستجو برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع با اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ معرفی شده است. الگوریتم بهبودیافته باینری اجتماع ذرات به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان استفاده شده است [۲۰].

۲-۱- نوآوری مطالعه

بررسی مطالعات بالا نشان می‌دهد بیشتر محققان مسئله بازآرایی شبکه توزیع را در فضای بدون عدم قطعیت سیستم قدرت حل کرده‌اند که نمی‌تواند جواب‌های به‌دست‌آمده برای یک سیستم قدرت واقعی بهینه باشد. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع و مکان‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده به کارآمدترین شکل ممکن و در نتیجه، افزایش پایداری ولتاژ و کاهش تلفات است. در این مطالعه، اثر در نظر گرفتن عدم قطعیت لحاظ شده است. همچنین، روش تخمین نقطه‌ای برای مدلسازی پارامترهای عدم قطعیت استفاده شده است.

تکنیک‌های متعددی برای شناسایی واحدهای تولید پراکنده و همچنین، بازآرایی شبکه توزیع وجود دارند؛ با این حال، به دلیل پیچیدگی مشکلات سیستم توزیع ایجادشده توسط عواملی مانند وسعت و تنوع تجهیزات، پیچیدگی مدل و افزایش عدم قطعیت، رویکردهای بهینه‌سازی ریاضی اغلب قادر به یافتن راه‌حل‌های بهینه نیستند؛ در نتیجه، سعی

توربین بادی و همچنین، حل مسئله پیکربندی مجدد شبکه‌های توزیع شعاعی برای کاهش هزینه تلفات برق و بهبود قابلیت اطمینان ارائه شده است. اپراتورهای الگوریتم تکاملی تفصلی برای بهبود عملکرد الگوریتم ازدحام مرسوم سالپ برای جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی و افزایش سرعت همگرایی در دستیابی به راه‌حل بهینه جهانی استفاده می‌شوند. بازآرایی شبکه توزیع هم‌زمان با سوئیچینگ خازن در حضور ژنراتورهای بادی و پنل‌های خورشیدی در [۹] بهینه‌سازی شده است. در این مطالعه از الگوریتم‌های بازپخت شبیه‌سازی‌شده و درخت پوشا حداقل به‌منظور یافتن بهترین راه‌حل استفاده شده است. اهداف اصلی این مقاله، به حداقل رساندن تلفات برق و هزینه‌ها است.

در [۱۰]، از الگوریتم جستجوی تابو ۸ برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع استفاده شده است. در روش ارائه‌شده با استفاده از لیست ممنوعه متغیر با سایز سیستم و همچنین، حرکت تصادفی در جهت‌های ناشناخته فضای جستجو، کارایی روش نسبت به الگوریتم تابو متداول بهبود یافته است. در [۱۱] برای مشکل بازآرایی شبکه توزیع و جایابی خازن به‌منظور کاهش تلفات و حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز از الگوریتم بهبودیافته باینری اجتماع ذرات ۹ استفاده شده است. در [۱۲]، الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه برای حل مسئله مکانیابی واحدهای تولید پراکنده و بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است. در [۱۳]، به‌منظور بهینه‌سازی مسئله بازآرایی شبکه توزیع و مکانیابی واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در [۱۴]، الگوریتم رقابت استعماری برای مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. در [۱۵]، مسئله بازآرایی شبکه توزیع و به همراه جایابی خازن به‌صورت هم‌زمان در شبکه با هدف کاهش تلفات و نگه‌داشتن پروفیل ولتاژ در محدوده مجاز خود ارائه شده است. در این مرجع الگوریتم کارآمدی برای بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع بالانس و غیر بالانس توسط بازآرایی و جایابی هم‌زمان خازن ارائه شده است. اهداف مدنظر

مدلسازی عدم قطعیت برخلاف سایر مطالعات گذشته ارائه شده است که می‌تواند نتایج بهینه‌سازی را در فضای واقعی نشان دهد. یکی دیگر از ویژگی‌های این مطالعه، با توجه به جدول (۱)، بهبود پروفیل ولتاژ است که در مطالعات کمتری بررسی شده است.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است:

در بخش دوم، تعریف مسئله شامل متغیرهای مسئله، توابع هدف و قیود مسئله ارائه شده است. پنجمین بار احتمالاتی، روش بهینه‌سازی و استراتژی چندهدفه در بخش‌های سوم تا پنجم ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری در بخش‌های ششم و هفتم بیان شده‌اند.

شده است از رویکردهای فراابتکاری در این مقاله استفاده شود که روش‌های هوشمندی هستند. الگوریتم تکاملی تفاضلی در این مقاله برای به حداقل رساندن تلفات و انحراف ولتاژ باس، استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی برای برآورده کردن توابع هدف مسئله به صورت هم‌زمان از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است؛ زیرا در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به جای یک جواب بهینه با مجموعه‌ای از جواب‌ها (جبهه پارتو) روبه‌رو هستیم.

در جدول (۱)، کار انجام گرفته در این مطالعه با سایر مراجع مقایسه شده است. با توجه به جدول (۱)، واضح است در این مطالعه، علاوه بر ارائه استراتژی چندهدفه فازی در حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع و مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده، مدل ریاضی به‌منظور

جدول (۱): مقایسه کار انجام گرفته در این مطالعه با سایر مطالعات

مرجع	روش بهینه‌سازی	بازآرایی شبکه	مکانیابی تولید پراکنده	توابع هدف		بهبود پروفیل ولتاژ	استراتژی چندهدفه فازی	عدم قطعیت
				تلفات	انحراف ولتاژ باس			
[۴]	ریشه دونه	✓	×	✓	×	×	×	×
[۵]	یادگیری مبتنی بر جستجو	✓	✓	✓	×	×	×	×
[۶]	جستجوی هارمونی- زنبور عمل	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×
[۹]	بازپخت شبیه‌سازی شده	✓	×	✓	×	×	×	×
[۱۰]	جستجوی تابو	✓	×	✓	×	×	×	×
[۱۲]	جهش قورباغه	✓	✓	✓	×	×	×	×
[۱۴]	رقابت استعماری	✓	✓	✓	×	×	×	×
[۱۸]	تطبیقی اجتماع ذرات	✓	✓	✓	✓	×	✓	×
[۱۹]	مبتنی بر کاهش فضا جستجو	✓	×	✓	×	✓	×	×
[۲۰]	باینری اجتماع ذرات	✓	×	✓	×	×	×	×
مطالعه حاضر	تکاملی تفاضلی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

بازآرایی سیستم توزیع در حضور منابع تولید پراکنده (توربین بادی) عبارت‌اند از: باز یا بسته بودن کلیدها، تعداد، ظرفیت و مکان تولیدات پراکنده در شبکه توزیع که در رابطه زیر ارائه شده‌اند:

۲- تعریف مسئله پیشنهادی و چهارچوب آن

هدف از حل مسئله بهینه‌سازی در این مطالعه، انجام هم‌زمان بازآرایی شبکه توزیع و اختصاص بهینه واحدهای تولید پراکنده است. در واقع متغیرهای مسئله بهینه‌سازی

• محدودیت ایزوله شدن باس‌ها

بعد از انجام پیکربندی مجدد و انتخاب یک آرایش جدید، همه باس‌ها و گره‌ها در شبکه باید برقرار باشند و همواره از شبکه انرژی دریافت کنند. در واقع تمامی باس‌ها باید قادر باشند توان اکتیو و راکتیو را از شبکه دریافت کنند و تغذیه بارهای خود را بدون هیچ افت ولتاژی تأمین کنند. به عبارتی، همه بارها باید پس از پیکربندی مجدد به شبکه متصل بمانند و هیچ شبکه مجزای کوچکی تشکیل نشود. قید مربوط به شعاعی بودن شبکه از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$N_{branch} = N_{Bus} - N_{source} \quad (4)$$

N_{source} و N_{Bus} به ترتیب بیان‌کننده تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه هستند.

• محدودیت ولتاژ باس‌ها

ولتاژ تمامی باس‌ها بعد از پروسه پیکربندی مجدد، باید در محدوده پذیرفتنی (برای مثال، ۵ درصد) از ولتاژ نامی قرار بگیرند [۱۳-۱۲]؛ به همین دلیل، باید قید محدودکننده زیر را برای ولتاژ همه باس‌های شبکه در نظر گرفت:

$$V_{i,min} < V_i < V_{i,max} \quad (5)$$

• محدودیت جریان فیدرها

باید توجه داشت پس از پروسه پیکربندی مجدد، جریان جاری هر سکشن در فیدر در محدوده پذیرفتنی باشد و از حد مجاز تعریف شده کمتر یا بیشتر نباشد که باعث افت جریان یا اضافه جریان در فیدر می‌شود؛ به همین دلیل، این شرط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_{ij(min)} < I_{ij} < I_{ij(max)} \quad (6)$$

I_{ij} جریان گذرنده از فیدر متصل‌کننده باس‌های i و j است [۱۳-۱۲].

• محدودیت توان اکتیو تولیدی واحدهای تولید

پراکنده

اگر $P_{DG,i}^{max}$ و $P_{DG,i}^{min}$ به ترتیب محدوده پایین و

$$X = [Tie_1, Tie_2, \dots, Tie_{N_{Tie}}, SW_1, SW_2, \dots, SW_{N_{Tie}}, PDG_1, PDG_2, \dots, PDG_{N_{DG}}] \quad (1)$$

X بردار متغیرهای کنترلی مسئله است. N_{DG} تعداد منابع تولید پراکنده است. Tie_i بیان‌کننده وضعیت سوئیچ آم است. N_{tie} و SW_i به ترتیب بیان‌کننده شماره سوئیچ‌های بسته و تعداد سوئیچ‌های بسته هستند. PDG_i مقدار توان اکتیو واحد تولید پراکنده i است.

۱-۲- توابع هدف مسئله بهینه‌سازی

در این مطالعه، توابع هدف شامل کمینه کردن تلفات اکتیو شبکه و انحراف ولتاژ باس‌های شبکه‌اند.

• تلفات اکتیو شبکه

با توجه به اینکه در سیستم‌های توزیع خطوط به صورت خط کوتاه مدل‌سازی می‌شوند، ابتدا جریان هر شاخه، محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۲) تلفات کل سیستم محاسبه می‌شوند.

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^{Nb} R_i |I_i|^2 \quad (2)$$

که در آن N_b معرف تعداد خطوط شبکه است. R_i و $|I_i|$ به ترتیب مقاومت خط i ام و مقدار مؤثر جریان خط i ام هستند [۱۲].

• انحراف ولتاژ باس‌های شبکه

تابع هدف دوم که مربوط به انحراف ولتاژ باس‌های شبکه توزیع است، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$F_2(x) = \text{Max}_i |V_i - V_{rate}| \quad (3)$$

که در آن V_i و V_{rate} به ترتیب ولتاژ واقعی و نامی باس i ام هستند [۱۳].

۲-۲- قیود مسئله بهینه‌سازی

قیود مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع به شرح زیرند:

قطعیتهای زیادی وجود دارد که بیشتر آنها به دلیل الگوی تغییر ساختار در شبکه و همچنین، گسترش روزافزون ورود انرژیهای نو به شبکه رو به افزایش اند. چنین سیستمهای دارای پارامترهای احتمالاتی، پخش بار قطعی قادر نیست وضعیت دقیقی از آن سیستمها را نشان دهد؛ بنابراین، آنالیزهای احتمالاتی به عنوان راهکاری جذاب پیش رو قرار میگیرند. از آنجایی که شرایط سیستمهای قدرت به طور پیوسته (به دلایل متعددی مانند تغییر بار شینها، تغییر توان تولیدی توسط ژنراتورها، قطع خطوط و ...) در حال تغییرند، برای ارزیابی سیستم تحت شرایط متفاوت نیاز به اجرای پخش بارهای متعددی است.

پخش بار احتمالاتی یک ابزاری مناسب به منظور ارزیابی کارایی سیستمهای قدرت است که در محدوده کاری محتمل آن انجام می شود. با تعریف متغیرهای ورودی تصادفی پخش بار، امکان تعیین رفتار احتمالاتی متغیرهای خروجی فراهم خواهد شد. پخش بار احتمالاتی با تأمین اطلاعاتی در نقاط کاری متنوع سیستمهای قدرت، دارای کاربردهای وسیعی در زمینه مطالعات طراحی سیستمهای قدرت خواهد بود.

• روش تخمین نقطه‌ای

این روش همانند روش مونت کارلو از الگوی حل مشابه برای حل مسائل احتمالی استفاده می کند؛ با این تفاوت که در روش تخمین نقطه‌ای، بار محاسباتی بسیار کمتر است [۲۲-۲۱]. شایان ذکر است روش تخمین نقطه‌ای بر مشکلات مربوط به نداشتن دانش کامل درباره تابع توزیع احتمال فائق آمده است و این توابع را با استفاده از تنها چند گشتاور نخست آماری (میانگین، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی) تخمین می زنند. مراحل انجام پخش بار به روش تخمین نقطه‌ای به شرح زیر است:

گام اول: داده‌های پایه تمامی متغیرهای تصادفی را تهیه کنید.

گام دوم: با توجه به مقادیر چولگی و کشیدگی، سه پارامتر را تعریف کنید و سپس سه نقطه برای هر متغیر مشخص می شود.

بالای توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده تعریف شوند، آنگاه باید برای هر واحد تولید پراکنده شبکه توزیع شرط زیر برقرار باشد:

$$P_{DG,i}^{min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i}^{max} \quad (7)$$

• معادلات پخش بار

با افزایش نفوذ تولید پراکنده، شبکه توزیع از یک شبکه انفعالی که فقط بارها به آن متصل اند، به یک شبکه فعال شامل بارها و تولیدکنندگان، تغییر ماهیت می دهد. این امر نیازمند این است که در استراتژی تحلیل توزیع تغییراتی حاصل شود. یکی از ابزارهای مهم و اساسی برای تحلیل هر سیستم قدرت، چه در مرحله طراحی و برنامه‌ریزی و چه در مرحله بهره‌برداری، برنامه پخش بار است. یکی از چالش‌های اخیر در محاسبات پخش بار توزیع، نفوذ تولید پراکنده در شبکه توزیع است. در حضور تولیدات پراکنده، روش‌های متداول پخش بار برای سیستم توزیع دیگر کارایی ندارد و لازم است در این روش‌ها تغییراتی حاصل شود تا واحدهای تولید پراکنده که عموماً در شبکه توزیع به صورت گره‌های PV یا PQ مدل می شوند، در محاسبات وارد شوند. محاسبات پخش بار یکی از محاسبات کلیدی برای تعیین رفتار استاتیکی سیستم توزیع است. معادله پخش بار در روش نیوتون-رافسون برای هر باس داده شده از شبکه توزیع به قرار زیر است:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

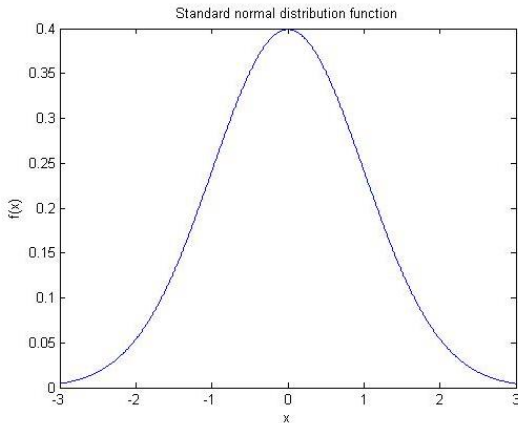
$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (9)$$

که در آن، V_i, V_j به ترتیب مقدار مؤثر ولتاژ باس‌های i ام و j ام هستند. δ_i, δ_j به ترتیب معرف زاویه ولتاژ باس‌های i ام و j ام هستند. θ_{ij}, Y_{ij} به ترتیب اندازه و زاویه عنصر سطر i ام و ستون j ام از ماتریس ادمیتانس شبکه هستند [۱۴-۱۳].

۳- پخش بار احتمالی

در سیستم‌های توزیع برق رسانی در سرتاسر جهان، عدم

هر لحظه از زمان به صورت پیوسته در حال تغییرند و به منظور مدل سازی این گونه تغییرات از تابع توزیع احتمالی به جای عدد ثابت استفاده می شود. در این مقاله از تابع توزیع نرمال برای مدل سازی بار در هر باس استفاده می شود.



شکل (۱): تابع توزیع چگالی احتمال

• مدل احتمالی توربین بادی

می توان منابع تولید پراکنده را بر طبق تکنولوژی به کاررفته به دو گروه تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر تقسیم بندی کرد؛ برای مثال، انرژی خورشید و باد از جمله منابع تولید پراکنده تجدیدپذیرند. همچنین، می توان به میکروتوربین به عنوان منابع تولید پراکنده تجدیدنپذیر اشاره کرد. در این مطالعه از یک توربین بادی به عنوان منبع تولید پراکنده تجدیدپذیر استفاده شده است. منحنی توان اکتیو تولیدی توربین بادی بر حسب سرعت باد در شکل (۲) زیر نمایش داده شده است [۱۱]. همچنین، رابطه توان بادی بر حسب سرعت باد از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ P_{WTr} \cdot \left(\frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \right)^3 & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WTr} & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (18)$$

v_{ci} سرعت بادی است که توربین در آن سرعت شروع به کار می کند. توان تولید شده در سرعت نامی v_r به مقدار نامی P_{WTr} می رسد. در سرعت v_{co} به منظور حفظ امنیت،

$$\gamma_{l1} = \frac{\gamma_{l3}}{2} + \sqrt{\gamma_{l4} - \frac{3}{4}\gamma_{l3}^2} \quad (10)$$

$$\gamma_{l2} = \frac{\gamma_{l3}}{2} - \sqrt{\gamma_{l4} - \frac{3}{4}\gamma_{l3}^2}, \gamma_{l3} = 0 \quad (11)$$

$$P_{pl} = \mu_{pl} + \gamma_{lk}\sigma_{pl} \quad (12)$$

گام سوم: به ازای سه نقطه به دست آمده از گام دوم برای هر متغیر، پخش بار قطعی، اجرا و نتایج پخش بار برای هر نقطه ذخیره می شوند.

$$P_{pl} = \mu_{pl} + \gamma_{lk}\sigma_{pl} \longrightarrow Z(l, k) \quad (13)$$

گام چهارم: اگر به حداکثر تعداد رسیده اید، برنامه را متوقف کنید. در غیر این صورت، به گام سوم بروید. گام پنجم: در این گام با استفاده از نتایج پخش بار و تعریف سه پارامتر دیگر، امید ریاضی مقادیر خواسته شده به دست می آید:

$$W_{lk} = \frac{-1^{3-k}}{\gamma_{lk}(\gamma_{l1} - \gamma_{l2})} \quad (14)$$

$$K = 1, 2. \quad (15)$$

$$W_{l3} = \frac{1}{m} - \frac{1}{\lambda_{l4} - \lambda_{l3}^2} \quad (16)$$

$$E[Z] = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^K W_{lk} Z(l, k) \quad (17)$$

l تعداد متغیرها (در این مقاله، تنها بار متغیر در نظر گرفته می شود؛ بنابراین، $m = 1$ خواهد بود). k تعداد نقاط (برای مثال، در مسئله ما سه نقطه ای است). $Z(l, k)$ نتایج پخش بار مطابق با هر متغیر و نقطه مربوطه است.

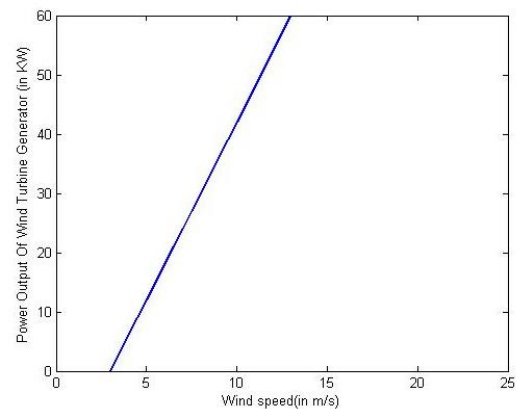
• مدل احتمالی بار مصرفی

بارها تا حد زیادی به فعالیت های بشری و پارامترهای زمانی وابسته اند. تغییرات در بارها به صورت پیوسته اتفاق می افتند و این گونه تغییرات همراه با عدم قطعیت است [۱۱]. در تئوری احتمالات، بارهای غیر قطعی می توانند به وسیله تابع چگالی احتمال تنظیم شوند که متناسب با رفتار بارها در لحظه باشد. به عبارت دیگر، در اجرای پخش بارهای قطعی، بارهای مصرفی بدون هیچ گونه تغییر و به صورت ثابت در نظر گرفته می شوند؛ اما در واقع بارها در

توربین بادی متوقف خواهد شد.

شایان ذکر است در این مطالعه، منبع تولید پراکنده به صورت شین‌های PQ، به شکل یک بار منفی در مطالعات پخش بار در نظر گرفته می‌شوند. توان راکتیو توربین بادی که به عنوان منبع تولید پراکنده تجدیدپذیر به شبکه نمونه متصل شده است، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{WT} = (0.5 + 0.04P_{WT}^2) \quad (19)$$



شکل (۲): منحنی توان تولیدی توربین بادی بر حسب سرعت باد

• مرحله اول: عملگر ارزش‌دهی

این الگوریتم، در ابتدا یک جمعیتی به اندازه مقادیر تصادفی^{۱۱} در محدوده مقادیر مسئله مدنظر ایجاد می‌کند.

• مرحله دوم: عملگر جهش

در مرحله دوم در ابتدا دو عضو از میان اعضای جمعیت به شکل تصادفی، انتخاب و مطابق با رابطه زیر با هم ادغام می‌شوند و عضو جدیدی را تولید می‌کنند.

$$V_i = X_i + \lambda \times (gbest - X_i) + F \times (X_{r1} - X_{r2}) \quad (20)$$

در رابطه بالا $gbest$ بهترین عضو جمعیت است و همچنین، X_{r1} و X_{r2} دو عضو دلخواه از جمعیت هستند و X_i نیز عضوی است که عملگر جهش روی آن انجام می‌شود. پارامترهای λ و F نیز سرعت همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کنند [۲۳]. معمولاً مقادیر این دو پارامتر در محدوده صفر تا دو در نظر گرفته می‌شوند.

• مرحله سوم: عملگر تقاطع (باز ترکیبی)^{۱۱}

در این مرحله متناظر با هر یک از ژن‌های عضو جهش‌یافته، یک عدد تصادفی در محدوده صفر و یک تولید می‌شود و سپس مطابق رابطه تعریف‌شده در زیر که عمل باز ترکیبی نامیده می‌شود، عضو جدید به وجود می‌آید:

$$U_{ij} = \begin{cases} V_{ij} & \text{Rand} \leq Cr \\ X_{ij} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه بالا U_{ij} بیان‌کننده ژن i ام از کروموزوم j ام و Cr نیز احتمال انجام باز ترکیب است که معمولاً مقدار آن بین صفر تا یک انتخاب می‌شود. فرایند این عمل در الگوریتم تکامل تفاضلی بسیار به الگوریتم ژنتیک شباهت دارد [۲۳]. در هر دو الگوریتم تعدادی از ژن‌های والد به فرزند منتقل می‌شوند و به همین دلیل، معمولاً در الگوریتم تفاضلی X_i والد اصلی و U_i را فرزند می‌نامند.

۴- الگوریتم تکاملی تفاضلی

استراتژی الگوریتم تکامل تفاضلی در تولید جمعیت‌های اولیه و تکامل نسل‌های بعدی و همچنین، نگاه به شایستگی توابع هدف، مانند الگوریتم ژنتیک است؛ با این حال، تفاوت‌هایی در چگونگی عمل ترکیب و جهش میان این دو الگوریتم مذکور وجود دارد [۲۴-۲۳]. در الگوریتم تکامل تفاضلی برخلاف الگوریتم ژنتیک، همه اعضا دارای شانس برابری به منظور انجام عمل ترکیب هستند و به بیانی دیگر شانس انتخاب شدن هر کروموزوم برای عمل ترکیب، از مقدار شایستگی آن مستقل است. از دیگر ویژگی‌های این الگوریتم داشتن حافظه است که اطلاعات جواب‌های مناسب را در جمعیت فعلی حفظ می‌کند. علاوه بر آن، تعداد کم پارامترهای کنترلی که وظیفه هدایت الگوریتم را برای دستیابی به پاسخ بهینه سراسری برعهده دارند، می‌تواند یکی دیگر از مزیت‌های الگوریتم تکامل تفاضلی به حساب آید. چهار مرحله اساسی در این الگوریتم به شرح زیر است:

• **مرحله چهارم: انتخاب**

در این مرحله، مقدار تابع هدف و والد با هم مقایسه می‌شوند. در صورتی که فرزند بهتر از والد باشد، فرزند جایگزین والد می‌شود و در غیر این صورت، همان والد به نسل بعد منتقل می‌شود. رابطه (۲۳-۳) بیان‌کننده انتخاب بین بردار سنجش و عضو هدف است.

$$V_{ij} = \begin{cases} U_{ij} & f(U_{ij}) \leq f(X_{ij}) \\ X_{ij} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

درنهایت، این روند ادامه پیدا می‌کند تا نسل جدید به تعداد (مقادیر تصادفی) NP برسد. سپس به همین صورت این روند تکرار می‌شود تا شرایط خاتمه حاصل شود. معمولاً معیار توقف الگوریتم می‌تواند بر مبنای ثابت ماندن تغییرات برانندگی بهترین جواب یا تکرار الگوریتم تا یک تعداد مشخص انتخاب شود [۲۴]. تعداد تکرار در الگوریتم ملاک اتمام برنامه قرار داده شده است و پس از انجام تعداد مشخصی اجرای برنامه، الگوریتم خاتمه می‌یابد.

• **قاعده کلی الگوریتم تکامل تفاضلی**

در اپراتور انتخاب الگوریتم ژنتیک، شانس انتخاب یک جواب به‌عنوان یکی از والدین وابسته به مقدار شایستگی آن است؛ اما در الگوریتم تکامل تفاضلی همه جواب‌ها دارای شانس مساوی برای انتخاب شدن هستند؛ یعنی شانس انتخاب شدن آنها وابسته به مقدار شایستگی آنها نیست. پس از اینکه یک جواب جدید با استفاده از یک اپراتور جهش خودتنظیم و اپراتور تقاطع تولید شد، جواب جدید با مقدار قبلی مقایسه می‌شود و در صورت بهبود، جایگزین می‌شود. برخلاف دیگر الگوریتم‌ها که اول عملگر تقاطع و سپس عملگر جهش انجام می‌شود، در این الگوریتم ابتدا عملگر جهش و سپس عملگر تقاطع، اعمال می‌شود تا بدین وسیله نسل جدید ایجاد شود. برای اعمال عملگر جهش از توزیع خاصی استفاده نمی‌شود؛ بلکه طول گام جهش برابر با مقدار از فاصله میان اعضای فعلی تعیین می‌شود. برای تولید جمعیت اولیه معمولاً از توزیع یکنواخت استفاده می‌شود تا اعضای جمعیت کاملاً به‌طور یکسان در فضا پخش شوند و در هر مرحله از الگوریتم این اعضا به

یکدیگر نزدیک می‌شوند و این همگرایی منجر به رسیدن به جواب بهینه خواهد شد. همچنین، باید توجه داشت تعداد زیاد اعضای جمعیت می‌تواند کمک مناسبی به یافتن جواب بهینه باشد. یکی دیگر از عوامل مهم در این الگوریتم، تعیین مقدار مناسب ضریب مقیاس است؛ به طوری که اگر این ضریب کوچک انتخاب شود، طول گام‌ها در عملگر جهش کوچک‌تر می‌شود و زمان بیشتری برای جستجو صرف می‌شود. همچنین، اگر ضریب مقیاس در الگوریتم تکامل تفاضلی بزرگ در نظر گرفته شود، باعث می‌شود این الگوریتم جواب‌های مناسب را در نظر نگیرد. پس باید در تعیین این ضریب دقت بسیار زیادی صورت گیرد. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۳) ارائه شده است.

۵- **رویکرد چندهدفه فازی**

در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه که اهداف با هم در تناقض‌اند، نمی‌توان از روش بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده کرد؛ زیرا ما با مجموعه‌ای از جواب‌ها روبه‌رو هستیم. در این مطالعه از استراتژی پارتو استفاده شده است. روش بهینگی بر مبنای تسلط پارتو برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه استفاده می‌شود. زمانی که شرایط زیر برقرار باشد، بردار X_1 بر X_2 غلبه می‌کند [۲۵]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (23)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (24)$$

از آنجا که توابع هدف در محدوده یکسان نیستند، مجموعه‌های فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ اجرا می‌شوند. در این رابطه تابع عضویت فازی μ_i برای هر تابع هدف به شرح زیر است:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(x) \leq f_i^{\min} \\ 0 & f_i(x) \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(x) \leq f_i^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

f_i^{\min} و f_i^{\max} بیان‌کننده حدود بالا و پایین تابع هدف هستند. این مقادیر با استفاده از بهینه‌سازی هر تابع هدف به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده برای هر عضو در مجموعه جواب‌ها از رابطه

(۲۶) به دست می آید:

$$N_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (26)$$

n و m به ترتیب اعداد راه حل های غیر غالب و توابع هدف هستند. β_k بیان کننده وزن k امین تابع هدف است و مقدار β_k بر اساس درجه اهمیت هر تابع هدف توسط اپراتور انتخاب می شود.

۶- نتایج شبیه سازی

در این قسمت، نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی تکاملی تفاضلی در پیکربندی مجدد در شبکه تست ۳۳ باسه شعاعی با هدف کمینه سازی تلفات شبکه و انحراف ولتاژ باس بررسی می شوند. الگوریتم های استفاده شده در نرم افزار متلب کدنویسی شده اند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه سازی با الگوریتم تکاملی تفاضلی در جدول (۲) ارائه شده اند. همچنین، به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از روش تکاملی تفاضلی با نتایج الگوریتم اجتماع ذرات در موارد دوم و سوم شبیه سازی مقایسه شده اند. پارامترهای جمعیت اولیه و حداکثر تعداد تکرار برای الگوریتم اجتماع ذرات به ترتیب برابر ۲۰ و ۱۰۰ هستند.

ارایش اولیه شبکه تست ۳۳ باسه [۲۶] استفاده شده در این مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. این شبکه دارای ۳۲ شین توزیع و یک شین فوق توزیع است، همچنین، مقدار بارهای اکتیو و راکتیو به شبکه به ترتیب kW ۲۳۰۰ و $kVAR$ ۱۸۰۰ است. برای تست و بررسی الگوریتم پیشنهادی، تابع هدف مسئله که بررسی کاهش تلفات قبل و بعد از پیکربندی مجدد یک شبکه توزیع در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن قیود مسئله است، روی شبکه آزمون پیاده سازی شده است. در بخش اول شبکه تست ۳۳ باسه و بدون اعمال پیکربندی مجدد شبکه، اجرا می شود و نتایج ولتاژ پخش بار احتمالاتی شامل تلفات توان شبکه مدنظر ارائه می شوند. سپس تأثیر تغییر پیکربندی شبکه در بهبود کیفیت توان شبکه توزیع ۳۳ باس بررسی می شود. به همین منظور، سه مورد شبیه سازی زیر بررسی می شوند:

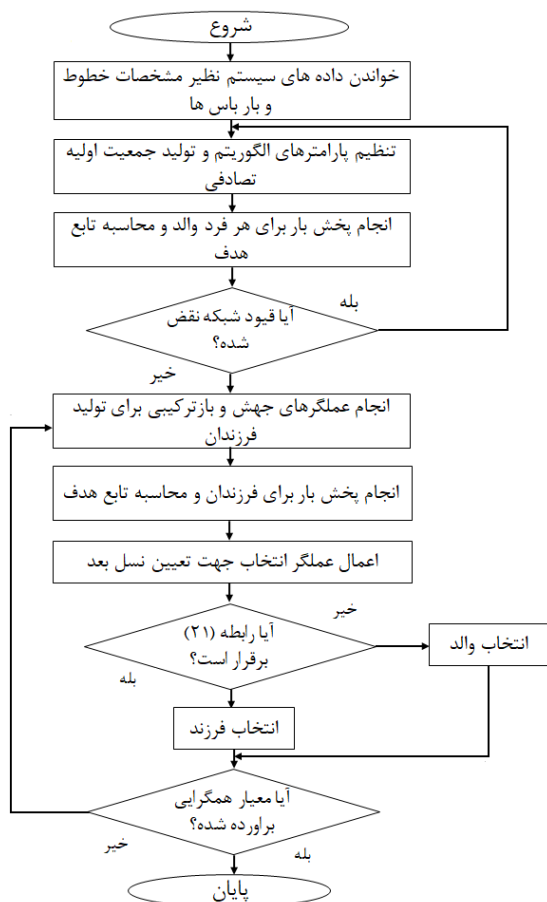
۱- شبکه تست ۳۳ باسه در حالت اولیه

۲- بازآرایی شبکه تست ۳۳ باسه

۳- بازآرایی شبکه تست ۳۳ باسه در حضور منبع تولید پراکنده (توربین بادی)

جدول (۲): مقادیر پارامترهای الگوریتم تکاملی تفاضلی

نماد	مفهوم	مقدار
$nVar$	تعداد متغیرها	۶
$nPop$	سایز جمعیت	۲۰
IT_{max}	حداکثر تعداد تکرار	۱۰۰
V_{min}	حداقل ولتاژ مجاز (پریونیت)	۰٫۹
V_{max}	حداکثر ولتاژ مجاز (پریونیت)	۱٫۰۵
I_{max}	حداکثر جریان حرارتی شاخه ها (آمپر)	۲۵۵



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله

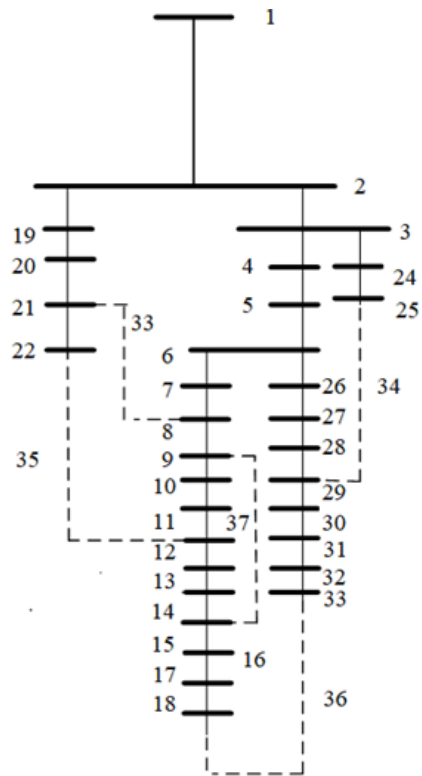
بهینه سازی

۲-۶- بازآرایی سیستم توزیع ۳۳ باسه

در این مورد، تأثیر تغییر پیکربندی شبکه در بهبود تلفات شبکه توزیع ۳۳ باس تحت عدم قطعیت‌ها بررسی شده است. به منظور بررسی تأثیر پیکربندی شبکه بر تلفات توان در این شبیه‌سازی از حضور واحدهای تولید پراکنده صرف نظر شده است. برای شبیه‌سازی قیود جزیره‌ای نبودن شبکه، شعاعی بودن شبکه، حداکثر و حداقل ولتاژ شین‌ها و حداکثر جریان حرارتی شاخه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. بدین منظور ابتدا با بستن تمامی کلیدهای شبکه ۵ حلقه ایجاد می‌شود؛ در نتیجه، برای دستیابی به هر پیکربندی مجاز، ۵ کلید از این شبکه باید باز شوند؛ بنابراین، متغیرهای الگوریتم تکامل تفاضلی ۵ است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند در صورت بسته‌بودن تمامی کلیدها به‌جز کلیدهای شماره ۳۷، ۳۲، ۹، ۱۴، ۷ تلفات توان از ۲۰۲/۷ کیلووات به ۱۴۰/۷۱ کیلووات کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند با استفاده از فرآیند پیکربندی مجدد بهینه شبکه توزیع ۳۳ باسه مفروض می‌توان به کاهش تلفات خطوط کمک کرد. در جدول (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در مقایسه با حالت اولیه و یک مرجع دیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج جدول (۳) واضح است انجام بازآرایی توسط روش پیشنهادی منجر به کاهش تلفات در حدود ۴۵ درصد در مقایسه با شرایط اولیه شبکه شده است.

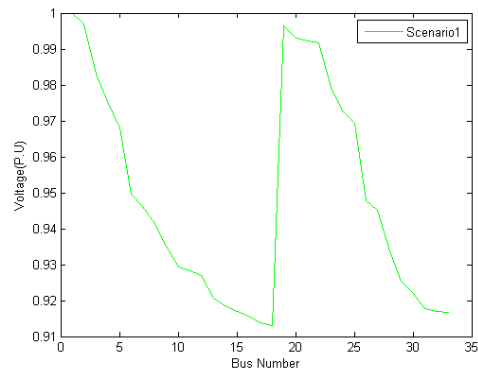
شکل (۶) پروفیل ولتاژ شبکه توزیع حاصل از روش پیشنهادی و همچنین، شکل (۷) همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی را نشان می‌دهد...



شکل (۴): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۳ باسه

۱-۶- سیستم توزیع ۳۳ باس در حالت اولیه

تلفات اکتیو و راکتیو شبکه آزمون بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و قبل از پیکربندی مجدد ۲۰۲/۷ کیلووات و ۱۳۵/۱ کیلو وار محاسبه شده است. همچنین، کمترین ولتاژ در واحد پرینیت برابر ۰/۹۱۱۰ است که متعلق به باس ۱۱۸ ام است. شکل (۵) پروفیل ولتاژ شبکه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است قبل از بازآرایی شبکه، افت ولتاژی حدوداً ۹ درصدی در شبکه توزیع رخ می‌دهد که خارج از حد مجاز آن است.



شکل (۵): پروفیل ولتاژ شبکه تست ۳۳ باسه

جدول (۳): مقایسه نتایج بهینه‌سازی تابع هدف تلفات

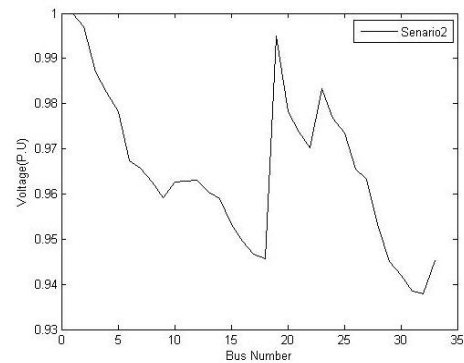
روش	تلفات توان اکتیو (kW)	تلفات توان راکتیو (kVAR)	سویچ‌های باز
حالت اولیه	۲۰۲/۷	۱۳۵/۱	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳
مرجع [۲۷]	۱۴۱/۴۲	-	۲۸-۳۲-۱۴-۹-۷
اجتماع ذرات	۱۴۱/۲۶	۱۰۳/۲۶	۳۷-۳۲-۱۴-۱۰-۷
روش پیشنهادی	۱۴۰/۷۱	۱۰۲/۴۲	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۷

۳-۶- بازآرایی سیستم توزیع ۳۳ باسه در حضور منبع تولید پراکنده

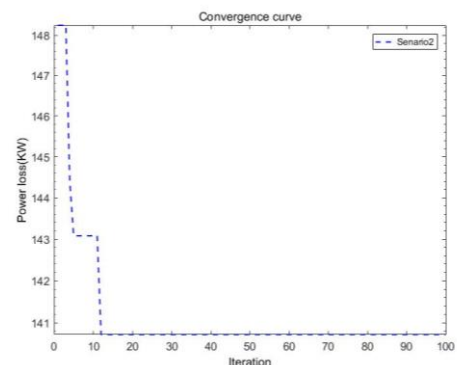
در این استراتژی، تأثیر تغییر پیکربندی مجدد شبکه در بهبود تلفات توان شبکه توزیع ۳۳ باسه در حضور واحدهای تولید پراکنده بررسی شده است؛ از این رو، قرار است در حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع یک توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی نیز مکانیابی شود. برای شبیه‌سازی قیود جزیره‌ای نبودن شبکه، شعاعی بودن شبکه، حداکثر و حداقل ولتاژ شین‌ها و حداکثر جریان حرارتی شاخه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، به منظور کاهش بار محاسباتی و مطابق با مرجع مدنظر، میانگین، مقدار بار پایه و انحراف معیار، ۰,۰۵ میانگین در نظر گرفته شدند. با بستن تمامی کلیدهای شبکه، ۵ حلقه ایجاد می‌شود. در واقع شبکه شعاعی به شبکه حلقوی تبدیل می‌شود. برای تبدیل دوباره شبکه به شعاعی و در نتیجه، برای دستیابی به آرایشی مجاز، ۵ سویچ از این شبکه باید باز شوند تا شبکه مجدداً به حالت شعاعی برگردد. علاوه بر آن، بهینه‌ترین مکان برای نصب منبع تولید پراکنده هم با الگوریتم تکامل تفاضلی محاسبه می‌شود؛ بنابراین، متغیرهای الگوریتم تکاملی تفاضلی در این حالت ۶ است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و قیود شبکه، پیکربندی مجدد شبکه به منظور کاهش تلفات انجام می‌شود، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند بسته‌بودن تمامی سویچ‌ها به جز سویچ‌های شماره ۳۷، ۳۲، ۹، ۱۴، ۷ تلفات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب به ۱۱۴/۷۶ کیلووات و ۸۶/۳۰ کیلووار کاهش می‌یابد. مکان توربین بادی در باس ۳۲ پیشنهاد شده است. این شبیه‌سازی نشان می‌دهد با پیکربندی مجدد بهینه شبکه توزیع ۳۳ باس مفروض می‌توان به کاهش تلفات خطوط کمک کرد. در این حالت کمترین ولتاژ ۰/۹۳۷۸ پرینیت است که مربوط به باس ۳۲ است. شکل (۸) پروفیل ولتاژ شبکه تست توزیع را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی به جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم اجتماع ذرات رسیده است؛ برای مثال، مقدار تلفات اکتیو و راکتیو حاصل از روش پیشنهادی در حدود یک کیلووات و یک کیلووار با نتایج حاصل از الگوریتم اجتماع ذرات تفاوت دارد و بهینه‌تر است.

در جدول (۴)، مقایسه‌ای بین نتایج بهینه‌سازی تابع حداقل انحراف ولتاژ حاصل از الگوریتم پیشنهادی و سایر روش‌ها انجام شده است. با توجه به نتایج جدول (۴) واضح است که الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه نسبت به روش اجتماع ذرات و مرجع [۲۸] به مقدار بهینه‌تری همگرا شده است.



شکل (۶): پروفیل ولتاژ شبکه تست در مورد دوم

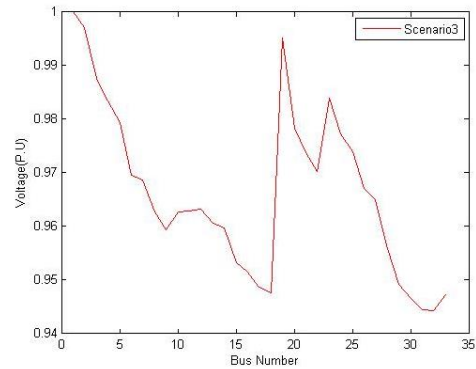


شکل (۷): همگرایی الگوریتم تفاضلی در مورد دوم

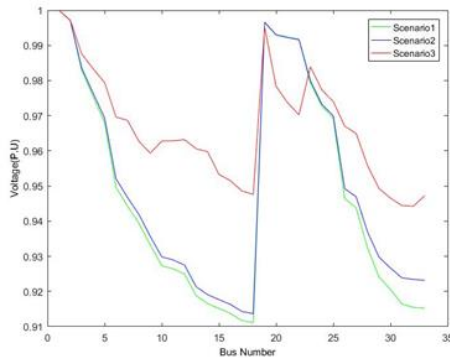
جدول (۴): مقایسه نتایج تابع هدف انحراف ولتاژ باس

روش	حداقل انحراف ولتاژ باس (p.u.)	سویچ‌های باز
حالت اولیه	۰,۰۶۹۵	۳۷-۳۶-۳۵-۳۴-۳۳
مرجع [۲۸]	۰/۰۶۱۵	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۶
اجتماع ذرات	۰/۰۶۱۵	۳۷-۳۲-۱۴-۹-۶
روش پیشنهادی	۰/۰۵۴	۲۸-۳۲-۱۴-۹-۷

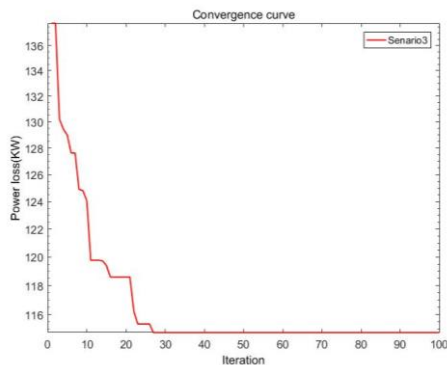
اجتماع ذرات دارد. با توجه به اینکه توابع هدف این مطالعه با هم در تناقض اند، نمی‌توان با مفهوم بهینه‌سازی تک‌هدفه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را حل کرد. به همین منظور، از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است. در شکل (۱۱)، جبهه بهینه پارتو مربوط به بهینه‌سازی دو هدفه حاصل از روش پیشنهادی تکاملی تفاضلی نشان داده شده است. همچنین، جواب مصالحه با رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل (۸): پروفیل ولتاژ شبکه تست در مورد سوم



شکل (۹): مقایسه پروفیل ولتاژ شبکه تست در موارد مختلف.



شکل (۱۰): همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی در مورد سوم

جدول (۵): مقایسه نتایج تابع تلفات در مورد سوم

مکان توربین بادی	سویچ‌های باز	تلفات توان راکتیو (kVAR)	تلفات توان اکتیو (kW)	روش پیشنهادی
-	۳۳-۳۴-۳۵ ۳۶-۳۷	۱۳۵/۱	۲۰۲/۷	حالت اولیه
-	۷-۹-۱۴ ۲۸-۳۲	-	۱۴۱/۴۲	مرجع [۲۷]
۲۹	۷-۱۴-۱۰ ۳۲-۳۷	۸۹/۴۱	۱۲۰/۵۵	اجتماع ذرات
۳۲	۷-۱۴-۹ ۳۲-۳۷	۸۶/۳	۱۱۴/۷۶	روش پیشنهادی

بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پیکربندی مجدد شبکه در حضور عدم قطعیت‌ها علاوه بر کاهش چشمگیر تلفات توان و بهره‌وری اقتصادی ناشی از آن، وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه را نیز بهبود می‌دهد. شکل (۹) پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ با سه در موارد مختلف مطالعاتی را نشان می‌دهد. پروفیل ولتاژ شبکه در حالت سوم، یعنی مکان‌یابی بهینه منابع توزیع پراکنده هم‌زمان با پیکربندی مجدد شبکه توزیع ۳۳ با سه در حضور عدم قطعیت‌ها به‌منظور بهینه‌سازی تلفات توان کل شبکه، وضعیت بهتری را نسبت به دیگر حالت‌ها به دست آورده است. شکل (۱۰) نمودار همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی در بهینه‌سازی تابع تلفات در این حالت را نمایش می‌دهد. در جدول (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در مقایسه با شرایط اولیه شبکه و سایر روش‌ها در حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع ارائه شده‌اند. بررسی نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد بازآرایی در حضور واحد بادی منجر به کمترین تلفات شده است؛ برای مثال، مقدار تلفات در مرجع [۲۷] که فقط مسئله بازآرایی در آن حل شده است، ۱۴۱/۴۲ کیلووات است؛ در حالی که مقدار تلفات پس از بازآرایی شبکه توزیع در حضور بهینه واحد بادی به ۱۱۴/۷۶ کیلووات رسیده است. همچنین، مقدار تلفات به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی پس از بازآرایی شبکه توزیع در حضور بهینه واحد بادی در حدود ۸۷ کیلووات در مقایسه با شرایط اولیه شبکه توزیع کاهش یافته است. همچنین، مقدار تلفات توان اکتیو و راکتیو حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با روش اجتماع ذرات به ترتیب در حدود ۳ کیلووات و ۶ کیلووات کمتر است که نشان از کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم

شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی تفاضلی و اجتماع ذرات به دست آمده‌اند. بر این اساس، عمده‌ترین دستاوردهای این مطالعه به شرح زیرند:

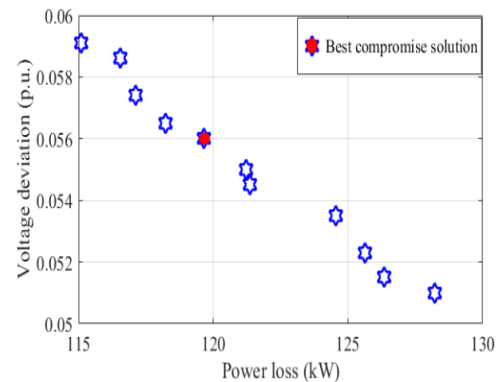
۱. انجام بازآرایی در سیستم توزیع موجب کاهش چشمگیر تلفات شبکه و انحراف ولتاژ شده است؛ برای مثال، مقدار تلفات حاصل از روش پیشنهادی در مورد دوم شبیه‌سازی در حدود ۶۲ کیلووات کمتر از شرایط اولیه شبکه (قبل از بازآرایی) شده است. همچنین، مقدار انحراف ولتاژ در حدود ۳۰ درصد نسبت به شرایط اولیه کاهش یافته است.

۲. انجام بازآرایی در حضور واحدهای تولید پراکنده (توربین بادی) مشابه با مورد قبلی، موجب کاهش تلفات بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود؛ به‌طور مثال، مقدار تلفات حاصل از روش پیشنهادی در مورد سوم به ترتیب در حدود ۷۰ و ۲۵ کیلووات کمتر از شرایط اولیه شبکه (قبل از بازآرایی) و مورد دوم شده است. بررسی پروفیل ولتاژ در شکل (۹) نشان از بهبود بیشتر پروفیل ولتاژ در مورد سوم است.

۳. روش الگوریتم تکامل تفاضلی در حل مسئله پیکربندی مجدد شبکه توزیع در قالب تک و چندهدفه در رسیدن به پاسخ‌های نزدیک بهینه، کارا است. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با الگوریتم اجتماع ذرات و سایر مطالعات در جداول ۳ تا ۵ و همچنین، شکل (۱۱) این ادعا را ثابت می‌کند.

مراجع

- [1] Duan Dong-Li, Ling Xiao-Dong, Wu Xiao-Yue, Zhong Bin. "Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on enhanced genetic algorithm". *Electr Power Syst Res*; Vol. 64: pp. 88-95, 2015.
- [2] Amini, Shiva, Sasan Ghasemi, and Jamal Moshtagh. "Distribution Feeder Reconfiguration Using PSO-GSA Algorithm in Presence of Distribution Generation Based on a Fuzzy Approach." *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol.12, pp.73-86, 2021.
- [3] S.Kansal,V.Kumar,B.Tyagi."Optimal placement of different type of DG sources indistribution networks".*IntJ Electr Power Energy System*. Vol. 53, pp. 752-760, 2013.
- [4] Thuan ThanhNguyen, Thang TrungNguyen, Anh



شکل (۱۱): جبهه بهینه پارتو حاصل از روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی دو هدفه

ا توجه به شکل (۱۱)، مقدار توابع هدف در جواب مصالحه که با رنگ قرمز مشخص شده، نزدیک به مقدار بهینه توابع هدف در جبهه‌های پارتو است و اختلاف چندانی ندارد که نشان از توانایی روش پیشنهادی در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه دارد. علاوه بر این، مقدار توابع هدف در جواب مصالحه مربوط به شکل (۱۱)، شامل تلفات و انحراف ولتاژ باس به ترتیب هفتاد و پنج و سی درصد نسبت به مقادیر اولیه قبل از بازآرایی کاهش یافته است.

۷- نتیجه‌گیری

با وقوع پیکربندی مجدد در سیستم‌های قدرت، به اهداف مختلفی توجه شده است. در این راستا، مطالعات فراوانی در سال‌های اخیر انجام شده و روش‌های گوناگونی در جهت پیکربندی مجدد شبکه پیشنهاد شده است. در این مطالعه، توابع هدف کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس شبکه توزیع در ساختار تصادفی پیشنهاد شدند. برای حل مسئله، الگوریتم تکاملی تفاضلی به منظور بهینه‌سازی استفاده شده است. همانند بسیاری از مسائل دیگر در برنامه‌ریزی سیستم قدرت، مسئله پیکربندی مجدد شبکه یک مسئله بهینه‌سازی با ابعاد بزرگ، غیرخطی و با متغیرهای گسسته و پیوسته است. متناسب با اندازه سیستم، تعداد پاسخ‌های محلی و حالت‌هایی که باید تحلیل شوند، ب شدت افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که روش‌های کلاسیک قادر به یافتن حل بهینه آن نیستند. در این مطالعه، سیستم تست نمونه ۳۳ باسه به منظور کاهش تلفات استفاده شده است. نتایج

- "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)", *Energy Reports*, Vol.1, pp. 116-122, 2015.
- [16] Roosta, A., H.-R. Eskandari, and M.-H. Khooban, "Optimization of radial unbalanced distribution networks in the presence of distribution generation units by network reconfiguration using harmony search algorithm". *Neural Computing and Applications*, Vol. 31, No. 11, pp. 7095-09, 2019.
- [17] V. Fathi, H. Seyedi and B. M. Ivatloo, "Reconfiguration of distribution systems in the presence of distributed generation considering protective constraints and uncertainties," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, Vol. 30, No. 5, pp. e12346, 2020.
- [18] Abdelaziz M. "Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size", *Elec Power Syst Res*, Vol.142, pp. 9-11, 2017.
- [19] Landeros, A., S. Koziel, and M.F. Abdel-Fattah, "Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol.7, No. 3, pp. 589-598, 2019.
- [20] Pegado, R., et al., "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO", *Electric Power Systems Research*, Vol. 169, pp. 206-213, 2019.
- [21] Niknam T, Kavousi Fard A, "Impact of thermal recovery and hydrogen production of fuel cell power plants on distribution feeder reconfiguration", *IET Gener Transm Distrib*, Vol.6, No.9, pp.831e43, 2012.
- [22] Chun-Lien S, Chan-Nan L, "two-point estimate method for quantifying transfer capability uncertainty", *IEEE Trans Power Syst*, Vol.20, pp.573e9, 2005.
- [23] M. Varadarajan and K. Swarup, "Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 30, No. 8, pp. 435-441, 2008.
- [24] W. Deng, S. Shang, X. Cai, H. Zhao, Y. Song, and J. Xu, "An improved differential evolution algorithm and its application in optimization problem," *Soft Computing*, Vol. 25, pp. 5277-5298, 2021.
- [25] H. Lotfi, "Optimal sizing of distributed generation units and shunt capacitors in the distribution system considering uncertainty resources by the modified evolutionary algorithm," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 13, No. 10, pp. 4739-4758, 2022.
- [26] Srinivasa Rao, R., Ravindra, K., Satish, K., Narasimham. S. V. L., "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power systems*, Vol. 28, No. 1, pp.317-325, 2013.
- [27] A.Uniyal,S.Sarang, "Optimal network reconfiguration and DG allocation using adaptive VietTruong, Quyen ThiNguyen, Tuan AnhPhung, "Multi-objective electric distribution network reconfiguration solution using runner-root algorithm", *Applied Soft Computing*, Vol. 52, pp. 93-108, 2017.
- [5] NeerajKanwar , NikhilGupta , K.R.Niazi, AnilSwarnkar, "An integrated approach for distributed resource allocation and network reconfiguration considering load diversity among customers" *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 7, pp. 37-46, 2016.
- [6] K.Muthukumar, S.Jayalalitha, "Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitors placement for power loss minimization in radial distribution networks", *Applied Soft Computing*, Vol. 52, pp. 1262-1284, 2017.
- [7] Wang, H.J., Pan, J.S., Nguyen, T.T. and Weng, S., "Distribution network reconfiguration with distributed generation based on parallel slime mould algorithm", *Energy*, Vol. 244, pp.123011, 2022.
- [8] Fathi, R., Tousei, B. and Galvani, S., "Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm", *Applied Soft Computing*, vol. 132, pp.109828, 2023.
- [9] Stojanović, B., Rajić, T. and Šošić, D., "Distribution network reconfiguration and reactive power compensation using a hybrid Simulated Annealing–Minimum spanning tree algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.147, pp.108829, 2023.
- [10] Mohammadi M, Rozbahani AM, Bahmanyar S. "Power loss reduction of distribution systems using BFO based optimal reconfiguration along with DG and shunt capacitor placement simultaneously in fuzzy framework", *J Cent South Univ*, Vol.24, pp. 24:90-103, 2017
- [11] Niknam T, Kavousi-Fard A, Aghaei J. "Scenario-based multi-objective distribution feeder reconfiguration considering wind power using adaptive modified particle swarm optimization", *IET Renew Power Gener*, vol.6, pp.236-47, 2012.
- [12] Siahbalaee, J., N. Rezanejad, and G.B. Gharehpetian, "Reconfiguration and DG Sizing and Placement Using Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol.47, pp. 1475-88. 2020
- [13] H. Lotfi, A. Azizivahed, A. A. Shojaei, S. Seyedi, and M. F. B. Othman, "Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration Along with Optimal Sizing of Capacitors and Distributed Generators Regarding Network Voltage Security," *Electric Power Components and Systems*, Vol.49, pp. 652-68, 2021.
- [14] M. Sedighizadeh, M. Esmaili, and M. Mahmoodi, "Reconfiguration of distribution systems to improve reliability and reduce power losses using Imperialist Competitive Algorithm," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 287-302, 2017.
- [15] R. Rajaram, K. Sathish Kumar and N. Rajasekar.

multiobjective distribution feeder reconfiguration", Energy Conversion and Management, Vol.50, No. 8, pp.2074–2082, 2009.

modified whale optimization algorithm considering probabilistic load flow", Electric Power Systems Research, Vol. 192, pp. 106909, 2020.

[28] Niknam T, "A new hybrid algorithm for

فهرست نمادها و پارامترها

R_i	مقاومت خط i ام	P_i, Q_i	توان اکتیو و راکتیو باس i ام
I_i	جریان خط i ام	V_i, δ_i	مقدار ولتاژ و زاویه ولتاژ باس i ام
N_{branch}	تعداد شاخه‌های شبکه	N_{source}	تعداد پست‌های شبکه
N_{Bus}	تعداد باس‌های شبکه	Y_{ij}, θ_{ij}	مقدار ادمیتانس و زاویه ادمیتانس بین شاخه‌های i و j
V_{ci}, V_{co}	حداقل و حداکثر سرعت توربین بادی	U_{ij}	بیان‌کننده ژن j ام از کروموزوم i ام
$V_{i,min}, V_{i,max}$	حداقل و حداکثر ولتاژ باس i ام	Cr	احتمال انجام بازترکیب
$I_{ij(min)}, I_{ij(max)}$	حداقل و حداکثر جریان بین فیدرهای i و j	X_i	عضوی که جهش بر روی آن انجام می‌شود
$P_{DG,i}^{min}, P_{DG,i}^{max}$	حداقل و حداکثر توان واحد i ام	$X_{r,2}, X_{r,1}$	دو عضو دلخواه از جمعیت
f_i^{max}, f_i^{min}	حداکثر و حداقل مقدار تابع	β_k	بیان‌کننده وزن k امین تابع هدف
μ_{pl}, σ_{pl}	میانگین و انحراف معیار		

¹ Runner Root

² Teaching-learning-based optimization

³ Harmony Search

⁴ Artificial bee colony

⁵ Parallel slime mould algorithm

⁶ Salp swarm algorithm

⁷ Differential evolutionary

⁸ Tabu Search

⁹ Particle swarm optimization

¹⁰ Number of Population

¹¹ Crossover