



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 4, 2025
pp. 11-36
Research Paper

Reconfiguration of Shipboard Power System Microgrids after Fault Isolation, Using Particle Swarm Optimization Algorithm

Mohammad Hossein Ahmadi Pishkouhi^{1*}, Arash Dehestani Kolagar², Mohammad Reza Alizadeh Pahlavani³

¹ Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³ Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

The reconfiguration of shipboard power systems after a fault is crucial for several reasons, including safety, reliability, operational continuity, and efficiency. This process helps prevent the spread of faults, ensures the maintenance of critical services on the ship, prevents incidents such as fires and explosions, and protects equipment. Additionally, fast system reconfiguration helps ensure continuity of operation and reduces maintenance costs. Therefore, such a reconfiguration is necessary to meet safety standards and reduce operating costs. In this paper, the restructuring of shipboard electric microgrids after the occurrence of a fault is investigated using the particle swarm optimization algorithm. The network under study is a zonal DC microgrid whose loads are divided into three critical, semi-critical, and non-critical categories. For each category of loads, penalty coefficients have been considered for not providing load energy. Due to the advantages of the particle swarm algorithm, such as simplicity of implementation, compatibility with different conditions, the possibility of applying various constraints, and the ability to respond to several simultaneous faults, this algorithm has been chosen to find the optimal arrangement of the shipboard electrical network. The performance of the system reconfiguration has also been investigated in four different scenarios. The results show that in all scenarios after the reconfiguration, the system returned to a stable state critical and semi-critical loads were provided as much as possible and the shedding of 1 MW of critical loads and 1 MW of semi-critical loads was prevented. These results confirm the effectiveness and efficiency of the proposed method in improving the stability and reliability of the shipboard power system after the occurrence of a fault.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Shipboard Power System Reconfiguration, Protection, Fault Isolation



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/ISEE.2025.142933.1706>

بازآرایی ساختار در ریزشبکه شناورها پس از جداسازی خطا، با استفاده از الگوریتم

بهینه‌سازی ازدحام ذرات

محمد حسین احمدی پیشکوهی^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

mohammadh.ahmadi97@gmail.com

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

a_dehestani@mut.ac.ir

۳- استاد، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

mr_alizadehp@mut.ac.ir

چکیده: بازآرایی سیستم قدرت شناور پس از وقوع خطا به دلایلی متعدد از جمله ایمنی، قابلیت اطمینان، استمرار عملیات و کارایی از اهمیت زیادی برخوردار است. این فرآیند از گسترش خطاها جلوگیری، خدمات حیاتی شناور را حفظ و از وقوع حوادثی مانند آتش‌سوزی و انفجار جلوگیری می‌کند و همچنین، به حفاظت از تجهیزات کمک می‌کند. بازآرایی سریع سیستم نیز به تداوم عملیات شناور یاری می‌رساند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، وجود چنین بازآرایی برای رعایت استانداردهای ایمنی و کاهش هزینه‌های عملیاتی ضروری است. در این مقاله، بازآرایی ساختار ریزشبکه‌های الکتریکی شناور پس از وقوع خطا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بررسی می‌شود. شبکه تحت مطالعه یک میکروشبکه DC ناحیه‌ای است که بارهای آن به سه دسته حیاتی، نیمه‌حیاتی و غیرحیاتی تقسیم شده‌اند. برای هر دسته از بارها، ضرایب جریمه‌ای برای عدم تأمین انرژی در نظر گرفته شده‌اند. به دلیل مزایای الگوریتم ازدحام ذرات از جمله سادگی اجرا، تطابق با شرایط مختلف، امکان اعمال قیود متنوع و قابلیت پاسخ‌گویی به چندین خطای هم‌زمان، این الگوریتم برای یافتن آرایش بهینه شبکه الکتریکی شناور انتخاب شده است. عملکرد بازآرایی سیستم نیز در چهار سناریوی مختلف بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد در تمامی سناریوها، پس از بازآرایی، سیستم به حالت پایدار بازگشته است و بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی تا حد امکان تأمین شده‌اند و از ریزش ۱ مگاوات بار حیاتی و ۱ مگاوات بار نیمه‌حیاتی جلوگیری شد. این نتایج اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی را در بهبود پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شناور پس از وقوع خطا تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات، بازآرایی ریزشبکه شناور، حفاظت، جداسازی خطا.

۱- مقدمه

سیستم‌ها در معرض طیفی وسیع از خطرات، از جمله اتصال کوتاه، اضافه‌بار و خطاهای اتصال به زمین هستند؛ بنابراین، ضروری است که این سیستم‌ها دارای یک حفاظت قابل اعتماد و مؤثر باشند تا از آسیب رسیدن به تجهیزات جلوگیری و ایمنی شناور و خدمه را تضمین کنند [۱]. طراحی و عملکرد مؤثر سیستم مدیریت خطا برای شبکه توزیع انرژی الکتریکی شناور همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. محدود کردن جریان خطا، تشخیص و آشکارسازی جریان خطا در شبکه برق شناور به دلیل

سیستم قدرت شناور (SPS)^۱ برق را برای ناوبری، ارتباطات، عملیات و سیستم‌های حیاتی تأمین می‌کند. این

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

نام نویسنده مسئول: آرش دهستانی کلاگر

نشانی نویسنده مسئول: تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

نزدیکی اجزای الکتریکی و فیزیکی داخل شناور و مقررات سخت‌گیرانه عملکرد و ایمنی، موضوعی چالش‌برانگیز در روند طراحی سیستم‌های حفاظتی است و برای کاهش اثرات مخرب بر روی تجهیزات شبکه برق شناور، سیستم حفاظتی باید در کمترین زمان ممکن به خطاها پاسخ دهد.

ریزشبه‌های شناور از منابع انرژی پراکنده متعددی (DER) تشکیل شده و به عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای افزایش قابلیت اطمینان، کارایی و پایداری سیستم‌های قدرت شناور پدید آمده‌اند؛ با این حال، پیچیدگی این شبکه‌های ترکیبی چالش‌های ویژه‌ای را در زمینه جداسازی خطا و بازآرایی شبکه به همراه دارد. جداسازی سریع و دقیق خطا برای جلوگیری از خرابی‌های آبخاری و تضمین ایمنی ریزشبه‌ها و محیط اطراف آن بسیار حیاتی است [۲].

پس از جداسازی خطا و اجزای معیوب از بقیه سیستم، مهم است که منبع تغذیه به‌سرعت توان را به بخش‌های آسیب‌دیده سیستم قدرت شناور با تنظیم آرایش سیستم بازگرداند تا قابلیت اطمینان سیستم بهبود یابد و از عملکرد ایمن و رضایت‌بخش سیستم اطمینان حاصل شود؛ این فرآیند بازآرایی شبکه نام دارد. مشابه سیستم‌های قدرت زمینی، در بازآرایی شبکه پس از خطا هدف اطمینان از بیشینه توان قابل تحویل به بارهای سیستم است [۳].

برای حل مسئله بازآرایی سیستم‌های قدرت، کارهای پژوهشی متعددی انجام شده‌اند. اهداف بازآرایی شبکه که در مقاله‌ها در نظر گرفته شده‌اند عبارت‌اند از:

- کاهش تلفات توان [۴]
- حفظ حاشیه‌های پایداری [۵]
- کمینه کردن عملیات کلیدزنی [۶]
- بیشینه کردن تعداد بارهای تغذیه‌شده [۷]

تلفات توان اکتیو در SPS در مقایسه با انواع دیگر سیستم‌های قدرت به دلیل شبکه توزیع درهم‌تنیده آن ناچیز در نظر گرفته می‌شود و بنابراین، کاهش تلفات توان اکتیو یک هدف حیاتی برای مسئله بازآرایی SPS نیست [۷]. تکنیک‌های بازآرایی یافت‌شده در مقاله‌ها عمدتاً بر اساس الگوریتم‌ها یا انواع مختلف کنترل منطقی هستند. بیشترین روش‌های بازآرایی به دو دسته اصلی تعلق دارند: سیستم‌های چند عاملی (MAS) [۳] و سایر روش‌ها (عمدتاً

روش‌های ریاضی و روش‌های مبتنی بر دانش). روش‌های مبتنی بر MAS عمدتاً در بازآرایی شبکه شناور استفاده می‌شوند؛ زیرا هر عامل می‌تواند به عنوان یک نهاد نرم‌افزاری فعال مدل‌سازی شود که یک جزء الکتریکی واحد را کنترل و با عوامل دیگر ارتباط برقرار می‌کند. عامل موجودی مستقل است که دارای هوش، واکنش‌پذیری و سازگاری است [۸]. عوامل تلاش می‌کنند تا اقدامات جداسازی خطا و بازیابی توان را انجام دهند، تعیین کنند کدام سوئیچ در سیستم باید بسته شود و کدام یک باید باز شود، بار حیاتی را به‌سرعت بازیابی کنند و تعداد عملیات کلید زنی را به حداقل برسانند. گفتنی است، رویکردهای مبتنی بر MAS فقط با سناریوهای تک‌خطا سروکار دارند. رفتار پویا که در آن چندین خطای هم‌زمان اتفاق می‌افتد، در مقاله‌ها وجود ندارد.

در بین روش‌های غیر-MAS، بیشترین استفاده از الگوریتم‌ها مبتنی بر روش‌های ریاضی و دانش‌بنیان است. روش‌های ریاضی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی و تقریب مربوط هستند. در [۹]، نویسندگان یک روش بازآرایی مبتنی بر تقریب محدب با پیچیدگی کم را در نظر می‌گیرند که در یافتن راه‌حل‌های بهینه مؤثر است. تابع توزیع تجمعی (CDF)^۹ توان تحویلی به بارها برای نمایش استحکام سیستم در برابر سناریوهای خطای تصادفی ارائه شده است. این روش یک مبادله بازآرایی بهینه بین بیشینه کردن توان تحویل و کمینه کردن تعداد اقدامات سوئیچینگ را پیدا می‌کند. علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل جداگانه حالت‌های سوئیچ دینامیکی میانی را در حالی که بازآرایی در حال انجام است، مشاهده می‌کند تا مبادله را برجسته‌تر نشان دهد.

یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌برداری از ریزشبه‌ها مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و خورشید است. در این راستا، [۱۰] از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات (MOPSO)^{۱۰} استفاده کرده است تا هزینه‌های عملیاتی و آلاینده‌ها را به طور هم‌زمان کاهش دهد. این مدل با بهره‌گیری از برنامه‌های پاسخ به تقاضا (DRPs)^{۱۱} و مکانیسم‌های قیمت‌گذاری پویا، به بهبود عملکرد کوتاه‌مدت

همچنین، تعاملات متقابل بین انرژی الکتریکی و حرارتی با استفاده از یک مدل یکپارچه برق و گاز بررسی شده‌اند. نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهد این روش می‌تواند به اپراتور ریزشبهه در شناسایی راه‌حل‌های بهینه برای تقویت تاب‌آوری سیستم قدرت در برابر رویدادهای شدید کمک کند.

در [۱۳]، نویسندگان چالش‌های امنیت و تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع فعال را بررسی می‌کنند. با توجه به افزایش رویدادهای غیرقابل پیش‌بینی و تأثیرات اقتصادی و اجتماعی آن‌ها، این مقاله مدلی را برای بهبود امنیت شبکه‌های توزیع فعال با استفاده بهینه از منابع ذخیره انرژی و برنامه‌های مدیریت مصرف ارائه می‌دهد. در این مدل، یک رویکرد سلسله‌مراتبی دومرحله‌ای توسعه داده شده است. در مرحله اول، تأثیر حوادث بر شبکه توزیع مدل‌سازی می‌شود و در مرحله دوم، اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای افزایش آمادگی سیستم و کاهش خسارت‌های ناشی از حوادث شدید اجرا می‌شوند. این اقدامات شامل استفاده از منابع تولید پراکنده، ذخایر انرژی و بارهای پاسخ‌گو می‌شوند. همچنین، برای بازگرداندن شبکه به حالت عادی پس از حادثه، روش تقسیم‌بندی شبکه به میکروگریدهای مستقل پیشنهاد شده است. برای مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از حوادث، بهینه‌سازی مقاوم برای دستیابی به نتایج واقعی‌تر به کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد این روش علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، امنیت مصرف‌کنندگان را در برابر حوادث شدید افزایش می‌دهد.

در انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی، باید در نظر داشت بعضی از مسائل به دلیل پیچیدگی ذاتی، نیازمند زمان محاسباتی بسیار زیادی برای حل هستند و با افزایش ابعاد مسئله (مانند تعداد متغیرها یا محدودیت‌ها)، زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های فراابتکاری در حل این مسائل کارآمد هستند. برای نمونه، در [۱۴] و [۱۵]، برای بهینه‌سازی زمان‌بندی فرود هواپیماها (ALP)^۹ که مسئله‌ای پیچیده محسوب می‌شود، از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^{۱۰}، سیستم ایمنی مصنوعی (IAIS)^{۱۱}، بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)^{۱۲}، الگوریتم ژنتیک (GA)^{۱۳} و

ریزشبکه‌ها کمک می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد ترکیب راهبردهای پاسخ به تقاضا با روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند به کاهش ۱۲/۵ درصدی هزینه‌ها، ۱۴/۳ درصدی آلایندگی‌ها و افزایش ۲۲/۷ درصدی استفاده از منابع تجدیدپذیر منجر شود. این رویکرد، علاوه بر بهبود بهره‌وری انرژی، تاب‌آوری ریزشبهه‌ها را در مواجهه با عدم قطعیت‌ها افزایش می‌دهد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند استفاده از منابع ذخیره‌سازی انرژی متحرک، مانند باتری‌های نصب‌شده روی وسایل نقلیه، می‌تواند به بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر رویدادهای شدید طبیعی کمک کند. این منابع به دلیل قابلیت جابه‌جایی، امکان ایجاد ریزشبهه‌های پویا را در زمان وقوع حوادث فراهم و از قطع بارهای بحرانی جلوگیری می‌کنند. برای مثال، در [۱۱]، مدل‌سازی دومرحله‌ای برای تخصیص بهینه این منابع و مدیریت آن‌ها در شرایط عادی و اضطراری ارائه شده است که در مرحله اول، بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری در این تجهیزات و در مرحله دوم، جابه‌جایی آن‌ها برای کاهش اثرات حوادث بررسی می‌شود. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند روش‌های احتمالی و برنامه‌ریزی دومرحله‌ای برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد شده است. این روش‌ها توانسته‌اند تأثیراتی مثبت بر کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت بازیابی شبکه در شرایط بحرانی داشته باشند.

در سال‌های اخیر، وقوع بلایای طبیعی شدید موجب آسیب‌هایی جبران‌ناپذیر به سیستم‌های قدرت شده است و توجه برنامه‌ریزان را به افزایش تاب‌آوری این سیستم‌ها جلب کرده است. در این راستا، [۱۲] با ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی دومرحله‌ای، برنامه‌ریزی تاب‌آوری محور را برای طراحی بهینه پنل‌های خورشیدی، میکروتوربین‌ها و باتری‌های متحرک در ریزشبهه‌های چندحاملی انرژی پیشنهاد می‌دهد. این چارچوب به صورت یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح مربعی (MIQP)^۸ فرموله شده است که در مرحله اول، تصمیم‌های سرمایه‌گذاری و در مرحله دوم، متغیرهای عملیاتی را بهینه می‌کند تا تاب‌آوری سیستم در برابر رویدادهای شدید افزایش یابد.

سپس، یک الگوریتم بهینه‌سازی (برای مثال، شاخه و کران باینری) برای تعیین بهترین آرایش که تقاضای انرژی بحرانی را برآورده می‌کند و تلفات را کمینه می‌کند، اعمال می‌شود. در [۲۰]، نویسندگان یک روش پیش‌بینی برای بازآرایی یک SPS ارائه می‌کنند که از داده‌های الکتریکی و جغرافیایی و تکنیک‌های پیشرفته استفاده می‌کند و اقدامات بازآرایی قبل از ضربه را به ترتیب برای بارهای حیاتی و غیرحیاتی تعیین می‌کند. این رویکرد احتمالی، احتمال آسیب مورد انتظار (EPOD)^{۱۹} را برای هر قطعه الکتریکی در یک شناور محاسبه می‌کند. علاوه بر این، یک روش اکتشافی از EPOD برای تعیین اقدامات کنترلی برای بازآرایی شبکه الکتریکی شناور برای کاهش آسیب به سیستم الکتریکی استفاده می‌کند.

نویسندگان [۲۱] و [۲۲] روشی را برای بازآرایی پویا پیشنهاد می‌کنند. آرایش بهینه به عنوان یک مسئله یادگیری به‌جای بهینه‌سازی صریح در نظر گرفته می‌شود. یادگیری تقویتی به عنوان رویکرد یادگیری استفاده می‌شود. الگوریتم ویژه‌ای که در اینجا استفاده می‌شود Qlearning است؛ یک الگوریتم یادگیری تقویتی بسیار محبوب که بر اساس برنامه‌نویسی پویاست. این روش خارج از سیاست از نظر تئوری به آرایش بهینه همگرا می‌شود. از آنجا که Qlearning یک رویکرد آنلاین است، می‌توان آن را در یک SPS واقعی مستقر کرد؛ جایی که الگوریتم نه فقط می‌تواند خود را با زمان تنظیم کند، بلکه در حضور محیط SPS غیرثابت، مجدداً سازگار می‌شود. روش پیشنهادی همچنین توالی صحیح عملیات سوئیچینگ را فراهم می‌کند که به بازآرایی بهینه در کوتاه‌ترین زمان ممکن منجر می‌شود.

در این مقاله، پس از معرفی انواع شبکه‌شناور از نظر نوع جریان و معماری و مقایسه آن‌ها، مسأله بازآرایی شبکه‌شناور تشریح و روش انتخابی معرفی و مسئله و تابع هدف بررسی می‌شود. در نهایت، یک شبکه‌شناور شبیه‌سازی شده، عملکرد عادی شناور و انواع سناریوهای خطا پیش از عملیات بازآرایی و پس از آن بررسی می‌شوند و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای توسعه پژوهش در این زمینه ارائه خواهند شد.

الگوریتم گرده‌افشانی گل‌ها (FPA)^{۱۴} استفاده شده است. این الگوریتم‌ها توانسته‌اند با ارائه راه‌حل‌های نزدیک به بهینه در زمان کوتاه، بر محدودیت‌های روش‌های دقیق غلبه کنند. به ویژه، در مطالعات اخیر، الگوریتم رقابت استعماری (ICA)^{۱۵} بهبودیافته برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس به کار گرفته شده است. این الگوریتم، با بهره‌گیری از راهبردهایی ویژه مانند ایجاد تعادل در استفاده از باندهای فرود و افزایش تنوع جمعیت، توانسته است عملکردی بهتر نسبت به سایر روش‌ها نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم‌ها می‌توانند در مسائل مشابه، مانند بازآرایی ساختار ریزشبکه‌ها پس از جداسازی خطا، کاربردی مؤثر داشته باشند.

کار در [۱۶] یک روش بهینه‌سازی برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای دستیابی به اهداف چندگانه بازآرایی، بیشینه کردن بار بازیابی شده و کمینه کردن تعداد عملیات سوئیچ ارائه کرد. شبکه‌شناور به صورت ناحیه‌ای با جریان DC شبیه‌سازی شده است، خطاهای ژنراتور در نظر گرفته شده‌اند و بازآرایی با استفاده از یک سیستم مدل‌سازی نرم‌افزاری برای بهینه‌سازی ریاضی در [۱۷] اجرا شده است که صحت و امکان‌سنجی روش پیشنهادی را اثبات می‌کند.

در [۱۸]، نویسندگان از یک الگوریتم تکامل دیفرانسیل بهبودیافته استفاده می‌کنند؛ ترکیبی از جمعیت اولیه‌سازی آشفته، بهبود راهبرد انتخاب نخبه‌گرای پارتو و عملگر جهش تطبیقی و مقاطع، که یک راه‌حل بهینه را به دست می‌آورد. نتایج به دست آمده با سایر الگوریتم‌ها از جمله (NSGA-II)^{۱۶}، (CADA)^{۱۷} و (DEMO)^{۱۸} مقایسه می‌شود که کارایی بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها در حل بازآرایی SPS نشان می‌دهد.

در [۱۹]، نویسندگان اندازه‌گیری امپدانس دینامیکی را به عنوان یک عنصر کلیدی در نظارت SPS در نظر می‌گیرند. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل یک سیستم قدرت شناور پویا با استفاده از امپدانس‌های سری و موازی معادل به ترتیب برای نشان دادن انتقال توان و توان بار مفید انجام می‌شود. امپدانس‌ها در زمان واقعی با استفاده از اندازه‌گیری جریان و ولتاژ در تغذیه خط محاسبه و به‌روز می‌شوند.

است که در آن‌ها تغییر ولتاژ، نسبت به سیستم‌های AC که در آن‌ها ترانسفورماتورها این کار را با کمترین تلفات انجام می‌دهند، دشوارتر است [۲۳].

۲-۲- انواع معماری شبکه شناور

بسته به حوزه‌های کاربرد، هر دو شبکه زمینی و SPS دارای معماری‌های توزیع متفاوتی خواهند بود. به طور کلی، سیستم توزیع شناور دارای سه نوع معماری مختلف است. این معماری‌ها شامل سیستم‌های توزیع شعاعی، سیستم‌های توزیع ناحیه‌ای و سیستم‌های توزیع حلقه‌ای هستند.

توزیع شعاعی یک معماری مرسوم است که توسط IEEE Std 1709-2010 توصیه شده و در ریزشبکه شناور اعمال شده است. آرایش این نوع معماری در شکل (۱) نشان داده شده است. به طور کلی، دو باس DC توان را بین مصرف‌کنندگان توزیع می‌کنند. منابع توان، از جمله ژنراتورها و سیستم‌های ذخیره انرژی، به طور متقارن توزیع می‌شوند و هر باس DC را تغذیه می‌کنند. پیشران‌های سمت چپ و سمت راست شناور از طریق دو باس DC به طور جداگانه تغذیه می‌شوند؛ این در حالی است که هر دو باس DC بارهای سرویس را برای اطمینان بیشتر تأمین می‌کنند. طرح شعاعی مزایای ساده و مقرون‌به‌صرفه بودن را دارد. علاوه بر این، از آنجا که در شناورهای مکانیکی سنتی و شناورهای AC از این معماری استفاده شده است، طراحی مجدد سیستم از سیستم‌های سنتی به جایگزین‌های DC مدرن آسان‌تر و کاربردی‌تر است [۲۴]؛ با این حال، شبکه زمانی که تعداد بارها افزایش می‌یابد، حجیم می‌شود و زمانی که خطا در باس DC رخ می‌دهد، انعطاف‌پذیر نیست [۲۵].

در برخی از کاربردها، از توزیع حلقه نیز استفاده می‌شود. یک معماری برق DC مبتنی بر گذرگاه حلقه معمولی در شکل (۲) نشان داده شده است. در توزیع حلقه، سوئیچ‌های کناری که باس‌های DC را به هم متصل می‌کنند، در عملکرد عادی بسته می‌مانند و باس DC را به یک حلقه تبدیل می‌کنند. معماری حلقه قابلیت بقا و بازآرایی بیشتری نسبت به مدل‌های شعاعی دارد. هنگامی که یک خطا در

۲- معرفی شبکه شناور

در این بخش، ویژگی انواع شبکه الکتریکی شناور و اجزای آن معرفی می‌شود. ابتدا، انواع جریان و سپس، انواع معماری به کاررفته در ریزشبکه شناور تشریح خواهند شد.

۲-۱- انواع شبکه شناور بر اساس نوع جریان

در دسته‌بندی نوع جریان، هر کدام از سیستم‌های DC و AC دارای ویژگی، مزایا و معایب ویژه خود هستند؛ اما در رابطه با شناور، سیستم DC به AC مزیت دارد؛ زیرا:

- سیستم‌های جریان متناوب (AC) دارای کابل‌های کوتاه‌تر، اما قطعات بزرگ‌تر و سنگین‌تر هستند.
- ژنراتورهای AC باید با استفاده از سرعت ثابت کار کنند؛ بنابراین، بهره‌وری مصرف سوخت نادیده گرفته می‌شود.

• ترانسفورماتورهای AC سنگین هستند و فضای زیادی را اشغال می‌کنند.

• کیفیت جریان AC به شدت تحت تأثیر توان راکتیو و مسائل هارمونیک قرار می‌گیرد.

• کاربردهای نظامی با پشتیبانی از تجهیزات و سلاح‌های الکتریکی پیشرفته با بارهای پالسی با قدرت زیاد هستند که می‌توانند آسیب‌های شدیدی به سیستم AC وارد کنند.

• سیستم‌های AC در کاربردهای زمینی بسیار پراکنده، به دلیل توانایی آن‌ها در انتقال انرژی برای مسافت‌های طولانی با کاهش اتلاف نیرو، استفاده می‌شوند. در شناور، این مزیت به دلیل انتقال توان در مسافت‌های کوتاه به کار نمی‌آید [۲۳].

علاوه بر این، سیستم‌های دارای جریان مستقیم (DC) از اجزایی کوچک‌تر تشکیل شده‌اند که این امر ممکن است باعث کاهش وزن تجهیزات در شناور شود. به علاوه، جریان DC نسبت به AC مزایایی دیگر از جمله مبدل‌های قدرت فشرده، اتصالات آسان‌تر، عدم وجود مشکل توان راکتیو و هارمونیک دارد.

این ویژگی‌ها می‌توانند باعث کاهش خطا و روش‌های بازآرایی آسان‌تر شوند. عیب اصلی سیستم‌های DC این

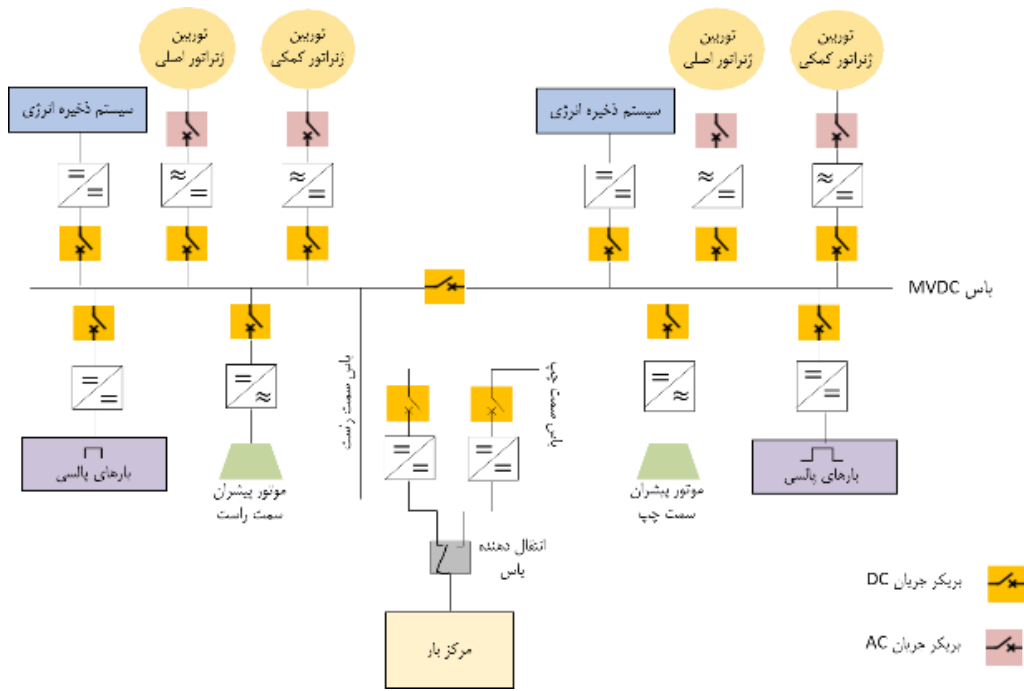
شبکه ارتباطی فراهم می‌کند. علاوه بر این، تقسیم بارها از دماغه به پاشنه در طول شناور، طول کابل مورد نیاز و در نتیجه، هزینه کابل‌ها را کاهش می‌دهد. اطلاعات بیشتر برای طراحی سیستم توزیع ناحیه‌ای در IEEE Std 1826-2012 قابل دسترسی است. یک مقایسه کیفی در معماری توزیع شعاعی، ناحیه‌ای و حلقه‌ای و عملکردهای کلیدی در جدول (۱) از جنبه‌های شماتیک، عملکردهای کلیدی مانند قابلیت اطمینان، بقا، قابلیت بازآرایی و پیچیدگی نشان داده شده است. بررسی انجام شده دو نوع اصلی معماری شبکه الکتریکی در شناور را برجسته می‌کند: شعاعی و ناحیه‌ای. در معماری شعاعی، بارها معمولاً از یک نقطه اتصال به هم متصل می‌شوند و در نتیجه، طول کابل کشی شناورها کاهش می‌یابد.

استفاده از تمام معماری‌های قدرت مورد بحث در سیستم‌های قدرت شناور امکان‌پذیر است؛ با این حال، همیشه بین قابلیت اطمینان و پیچیدگی باید یک مزیت را انتخاب کرد. معماری‌های پیچیده به راهبردهای بازآرایی دقیق‌تری نیاز دارند که باید در مرحله طراحی در نظر گرفته شوند. در عوض، معماری‌های ساده‌تر ممکن است به راحتی تعمیر شوند؛ اما امکان دارد در معرض خرابی‌های عمده نیز باشند. این انتخاب در واقع بیشتر به الزامات ویژه شناور بستگی دارد.

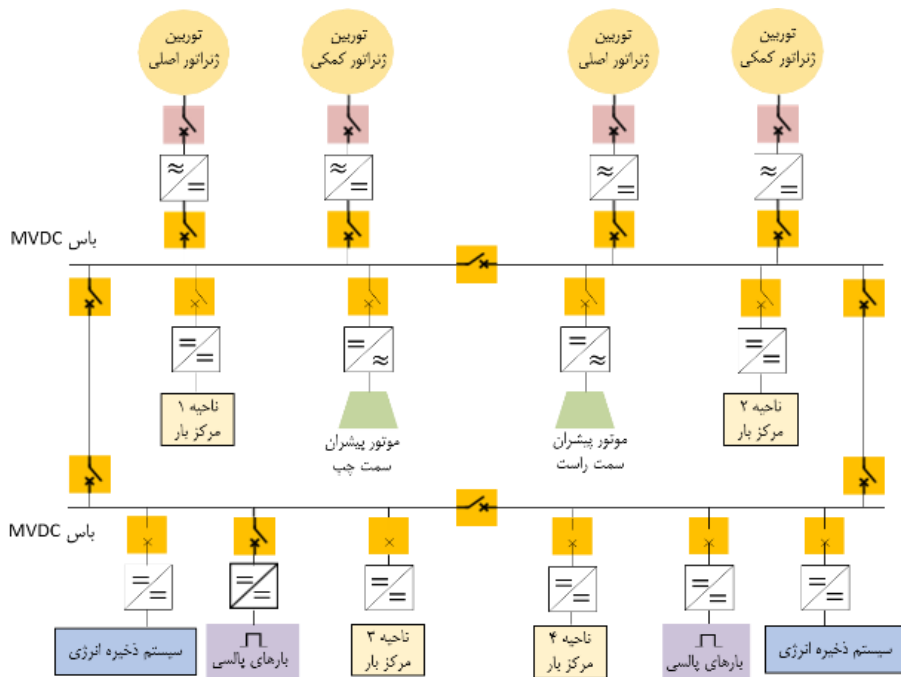
بارهای الکتریکی معمولی شناور شامل بارهای محرکه، پمپ‌ها و کمپرسورها برای گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، سیستم‌های کنترل و ارتباط در بارهای خدماتی و هتل هستند. انواع دیگر بارها ممکن است بسته به عملکرد شناور متفاوت باشند، مانند بارهای توان پالسی و بارهای توان ثابت. برای مثال، در ناوهای هواپیمابر، بارهای اضافی ممکن است شامل سیستم‌های بالابر برای هواپیماها باشند. این بارهای مختلف نیز باید انرژی خود را از ریزشبکه شناور تأمین کنند. به طور کلی، دینامیک و ویژگی‌های آن‌ها باید در مرحله طراحی سیستم قدرت در نظر گرفته شوند.

باس DC رخ می‌دهد، توزیع حلقه باعث می‌شود عیب با جدا کردن نزدیک‌ترین کلیدهای مدار جدا شود و بقیه قطعات به طور عادی کار کنند؛ با این حال، هر مرکز بار در توزیع حلقه فقط یک پیوند به باس دارد که مستعد خطا در بارهای حیاتی است. معماری حلقه بیشتر شبیه یک معماری بین شعاعی و ناحیه‌ای است و به ندرت در ریزشبکه شناور استفاده می‌شود.

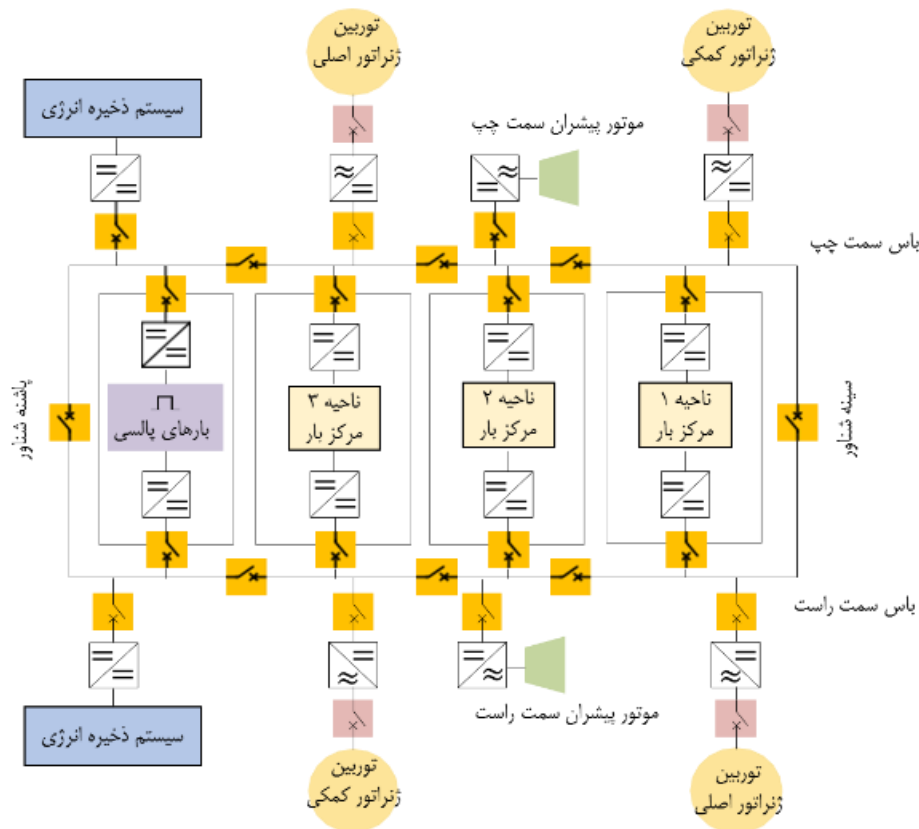
توزیع ناحیه‌ای یکی دیگر از معماری‌ها بر اساس IEEE Std 1709-2010 است [۲۶]. این معماری به استاندارد نیروی دریایی ایالات متحده تبدیل شده است [۲۷]. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است [۲۸]، در شبکه ناحیه‌ای، بارهای شناور به n ناحیه تقسیم می‌شوند که هر کدام از دو اتصال از باس‌ها تغذیه و به طور مستقل مدیریت می‌شود. توزیع ناحیه‌ای معمولاً در کناره‌های سمت چپ و سمت راست شناور مرتب می‌شود و این دو باس در پاشنه و دماغه شناور به هم متصل می‌شوند [۲۹]. این طراحی تغذیه اضافی برای بارهای دو باس DC طولی را امکان‌پذیر می‌کند. هر مرکز بار با هر دو باس سمت چپ و سمت راست ارتباط دارد و هنگامی که یک خطا در یک طرف رخ می‌دهد، بارهای حیاتی در ناحیه به طور مستقل منابع انرژی خود را به باس سالم مقابل منتقل می‌کنند [۳۰]. در شناورهای نیروی دریایی، بارهای ویژه با قدرت زیاد مانند رادارها به طور مستقل به عنوان تنها تجهیزات در یک ناحیه تنظیم می‌شوند [۲۶]. در حال حاضر، کاربردهای محدود از معماری ناحیه‌ای استفاده می‌کنند؛ در حالی که بیشتر آثار مطالعاتی بر اساس مدل‌های فرضی هستند [۲۸]. در معماری ناحیه‌ای، مزایای زیادی وجود دارند. قابلیت بقا را می‌توان برای بارهای حیاتی با تغذیه توان از هر دو باس DC سمت راست و چپ افزایش داد. با تشخیص از دست دادن منبع اولیه توان، بارهای حیاتی می‌توانند به طور خودکار یا دستی به منبع جایگزین تغییر کنند. معماری باس طولی امکان جداسازی خطا با کمترین مناطق آسیب‌دیده را با استفاده از سیستم‌های حفاظت هماهنگ از طریق یک



شکل (۱): شبکه توزیع شعاعی شناور DC



شکل (۲): شبکه توزیع حلقه‌ای شناور DC



شکل (۳): شبکه توزیع ناحیه‌ای شناور DC

و تجاری، انرژی هسته‌ای برای نیروی دریایی از اواسط قرن بیستم مورد توجه بوده و در گذشته برای نیروی محرکه استفاده شده است [۳۲].

۳- معرفی بازآرایی شبکه شناور

معمولاً از میزان همگرایی و سادگی محاسبات به عنوان تنها معیار قابلیت اجرای زمان واقعی الگوریتم‌های بازآرایی استفاده می‌شود. اجرای ایمن یک الگوریتم بازآرایی به تجزیه و تحلیل دینامیک سیستم‌های قدرت در طول زمان و بعد از بازآرایی نیاز دارد.

مجموعه مقاله‌های فعلی فاقد بررسی دقیق جنبه‌های پویای بازآرایی است. با مرور روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای حل مسئله بازآرایی شبکه شناور، در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای این منظور انتخاب شد. گفتنی است، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به لطف سادگی محاسباتی و زمان محاسباتی کمتر، قادر به ایجاد یک طرح بازآرایی بهینه برای حل مسئله غیرخطی با اهداف متعدد است. الگوریتم PSO دارای مزایای کلیدی بسیاری

جدول (۱): مقایسه بین توزیع شعاعی، ناحیه‌ای و حلقه‌ای [۳۱]

ویژگی	شعاعی	حلقه‌ای	ناحیه‌ای
شماتیک	اتصال دو باس با یک بریکر	یک باس حلقه با ۶ بریکر	یک باس حلقه با $2n+2$ بریکر
قابلیت اطمینان	کم	متوسط	زیاد
بقا	کم	متوسط	زیاد
قابلیت بازآرایی	کم	متوسط	زیاد
پیچیدگی	کم	متوسط	زیاد
کاربرد	زیاد	کم	متوسط

منابع انرژی استفاده‌شده در شناورهای الکتریکی بسته به اندازه و کاربرد متفاوت هستند و سطوح توان ممکن است از محدوده ۶۰ کیلووات تا ۱۲۰ مگاوات متغیر باشند. علاوه بر این، استفاده از ذخیره انرژی برای کاهش نیاز ظرفیت ژنراتور نیز به کار گرفته می‌شود. نیازهای نیروی دریایی بسته به عملکرد شناور به طرز جالب توجه متفاوت هستند. با توجه به تقاضاهای توان زیاد در شناورهای دریایی

کندی و ابرهاریت^{۲۰} در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۳۶]. این الگوریتم از رفتار اجتماعی گله پرندگان یا پرورش ماهی الهام گرفته شده است. PSO یک الگوریتم مشتق از الگوریتم ژنتیک (GA) است. برخلاف GA، PSO هیچ عملگر تکاملی مانند تقاطع و جهش ندارد؛ بنابراین، در زمان محاسبات بسیار صرفه جویی خواهد شد.

جدول (۲): مقایسه الگوریتم بهینه سازی PSO با سایر روش ها

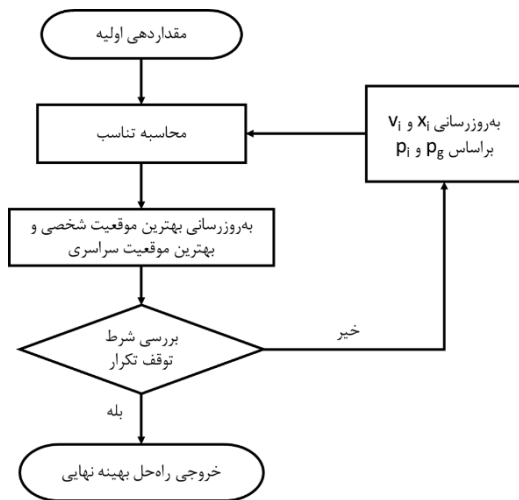
[۳۴، ۳۵]

روش	ویژگی ها	مقایسه با PSO
الگوریتم ژنتیک	- یکی از روش های بهینه سازی تکاملی با استفاده از عملگرهای جهش و ترکیب - مناسب برای مسائل غیرخطی و چندهدفه	- PSO زمان محاسباتی کمتری دارد. - PSO سرعت همگرایی بیشتری دارد؛ اما GA در مسائل بزرگ تر به زمان بیشتری نیاز دارد.
الگوریتم تکامل دیفرانسیلی (DE)	- مبتنی بر جمعیت و استفاده از تفاوت موقعیت ذرات برای بهبود جست و جو - کارایی زیاد در مسائل چندهدفه	- DE در یافتن جواب های دقیق تر بهتر است؛ اما PSO به دلیل سادگی و سرعت محاسباتی مناسب تر است.
روش های برنامه ریزی ریاضی	- استفاده از مدل های ریاضی برای حل مسائل بازاریابی - مناسب برای مسائل کوچک با پیچیدگی کمتر	- مناسب برای مسائل ساده تر - PSO توانایی بیشتری در حل مسائل با قیود پیچیده دارد و در مسائل پیچیده عملکردی بهتر دارد.
سیستم های چندعاملی (MAS)	- استفاده از عامل های مستقل برای مدیریت اجزای شبکه - مناسب برای بازاریابی در سناریوهای تک خطا	- PSO توانایی بیشتری در حل مسائل با قیود پیچیده دارد و در مسائل پیچیده عملکردی بهتر دارد. - MAS برای سناریوهای چندخطا مناسب نیست؛ اما PSO می تواند هم زمان چندین خطا را مدیریت کند.

است که آن را به یک ابزار قدرتمند در بهینه سازی تبدیل کرده اند. این الگوریتم با اجرای ساده و نیاز به کدنویسی مستقیم، دسترسی آسانی را برای پژوهشگران و متخصصان فراهم می کند. همچنین، با داشتن فقط سه پارامتر کنترل اصلی شامل وزن اینرسی، نسبت شناختی و نسبت اجتماعی، امکان تنظیم دقیق و سازگاری با مسائل مختلف را ایجاد می کند. انعطاف پذیری این الگوریتم به آن اجازه می دهد تا با سایر الگوریتم های بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی ترکیب شود و عملکردی بهتر را برای کاربردهای ویژه ارائه دهد. PSO به طور مؤثر بین اکتشاف راه حل های جدید و بهره برداری از راه حل های خوب تعادل برقرار می کند که این ویژگی برای حل مسائل پیچیده بسیار مهم است. این الگوریتم به دلیل مقاومت خود در یافتن راه حل های بهینه حتی در محیط های پرنویز یا پویا شناخته شده است که این امر آن را برای کاربردهای دنیای واقعی قابل اعتماد می کند. PSO معمولاً نسبت به روش های سنتی، همگرایی سریع تری به سمت راه حل های بهینه یا نزدیک به بهینه دارد و برای کاربردهای حساس به زمان بسیار کارآمد است. این الگوریتم در مسائل مختلف دنیای واقعی مانند شبکه های حسگر بی سیم و شبکه های رادیویی شناختی با موفقیت اعمال شده است و تطبیق پذیری و اثربخشی زیاد خود را نشان داده است. همچنین، قابلیت پشتیبانی از بهینه سازی چندهدفه را دارد و می تواند راه حل های سازشی را در معیارهای مختلف پیدا کند. در کاربردهایی مانند شبکه های رادیویی شناختی، PSO مصرف انرژی را به طرز جالب توجه کاهش می دهد و معیارهایی مانند کارایی طیفی و زمان حسگری را بهینه می کند. علاوه بر این، این الگوریتم با داشتن نسخه های مختلف که محدودیت هایی مانند همگرایی زودرس را برطرف می کنند، به طور مستمر بهبود می یابد و عملکردی بهتر را در سناریوهای مختلف ارائه می دهد [۳۳]. مزایای PSO نسبت به سایر روش ها در جدول (۲) ارائه شده اند.

۳-۱- معرفی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر جمعیت است که برای اولین بار توسط



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۶]

۳-۲- معرفی مسئله و تابع هدف

در این مسئله، تابع هدف و قیود مشابه قیود ارائه شده در [۳۷] و [۳۸] است؛ با این حال، این پژوهش در درجه اول کار در [۳۸] را گسترش می‌دهد تا شامل نمونه‌هایی از سیستم‌های SPS متعادل جدید باشد. نوآوری اصلی مقاله در استفاده از قیود مطرح شده در راستای بهبود بازآرایی شبکه شناور پس از وقوع خطا است. این نوآوری شامل تطبیق و تلفیق قیود انرژی، ولتاژ و جریان (با توجه به شرایط دینامیکی شبکه شناور) و استفاده از آن‌ها در الگوریتم PSO برای مدیریت بازآرایی سیستم با هدف کاهش تلفات و حفظ بارهای حیاتی است. هدف پژوهش پیدا کردن وضعیت بهینه برای کلیدها است تا بتوان تحویلی به بارها بیشینه شود یا به عبارت دیگر، ریزش بار مقدار کمینه داشته باشد. معادله‌سازی دقیق در زیر ارائه شده است:

تابع هزینه:

$$\text{Min} \sum_{I \in L} W'_{VL} S'_{VL_I} + W'_{SVL_I} S'_{SVL_I} + W'_{NVL_I} S'_{NVL_I} \quad (3)$$

در معادله بالا، S'_{VL} ، S'_{SVL} و S'_{NVL} به ترتیب توان تأمین نشده یا حذف شده مرتبط با بارهای حیاتی، نیمه‌حیاتی و غیرحیاتی است. W'_{VL} ، W'_{SVL} و W'_{NVL} به ترتیب وزن عدم تأمین بارهای حیاتی، نیمه‌حیاتی و غیرحیاتی است.

مطابق شکل (۴)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات از مراحل زیر تشکیل شده است:

- مرحله ۱: مقداردهی اولیه جمعیتی از ذرات با مقادیر تصادفی X_i و V_i . در این مرحله، موقعیت اولیه ذرات^{۱۱} به صورت تصادفی در محدوده تعریف شده متغیرها مقداردهی می‌شود. سرعت اولیه ذرات^{۱۲} برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. بهترین موقعیت فردی^{۱۳} و بهترین موقعیت سراسری^{۱۴} مقداردهی اولیه می‌شوند.

- مرحله ۲: محاسبه ارزش تناسب هر ذره در d متغیر. برای هر ذره، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده کیفیت جواب مربوط به موقعیت فعلی ذره است.

- مرحله ۳: پیدا کردن بهترین موقعیت شخصی (p_i) و بهترین موقعیت سراسری (p_g) با توجه به تناسب. در صورتی که مقدار فعلی از p_i بهتر باشد، مقدار آن جایگزین p_i در فضای بعد d خواهد شد.

- مرحله ۴: پیدا کردن بهترین موقعیت سراسری (p_g) با توجه به تناسب. در صورتی که مقدار فعلی از p_g بهتر باشد، مقدار آن جایگزین p_g در فضای بعد d خواهد شد.

- مرحله ۵: به‌روزرسانی سرعت (vid) و موقعیت فعلی (xid) برای تکرار بعد. سرعت هر ذره با استفاده از معادله (۱) به‌روزرسانی می‌شود که در آن، w وزن اینرسی^{۲۰} است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد، $C1$ و $C2$ ضرایب یادگیری شخصی و سراسری و $r1$ و $r2$ اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. همچنین، موقعیت هر ذره با استفاده از سرعت جدید بر اساس معادله (۲) به‌روزرسانی می‌شود:

$$vid = w \cdot vid + c1 \cdot r1 \cdot (pb - xid) + c2 \cdot r2 \cdot (pg - xid) \quad (1)$$

$$xid(new) = xid + vid \quad (2)$$

- مرحله ۶: تا زمانی که معیار توقف برآورده شود، روند از مرحله ۲ تکرار خواهد شد.

همچنین، واضح است:

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max} \quad (16)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (17)$$

در معادلات بالا، محدودیت‌هایی متعدد شامل جریان برق، محدودیت‌های توان ژنراتور، محدودیت‌های بار، جریان باس و محدودیت‌های ولتاژ اعمال می‌شوند. PG و QG به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدشده توسط ژنراتورهای AC، PD و QD توان اکتیو و راکتیو تقاضا، V_i ولتاژ باس i ام، δ_{ij} زاویه ولتاژ باس i ام، Y_{ij} اندازه ادمیتانس از باس i به j ، θ_{ij} زاویه ادمیتانس از باس i به j ، PL_i توان تحویلی به بارهای متصل به باس i ام و B_i یک متغیر باینری است که یک بار ثابت را به باس سمت چپ (PB) یا باس سمت راست (SB) متصل می‌کند و می‌توان آن را از پیش تعیین کرد. IL_i جریان بار در باس i ام، I_{ij} جریان عبوری از باس i به باس j ، I_{ini} و I_{outi} به ترتیب جریان ورودی به باس و جریان خروجی از باس i به معنای باس مبدأ (منبع) و TB به معنای باس مقصد و Z_{ij} امپدانس بین شاخه i و j است. min و max هم به ترتیب به مقادیر بیشینه و کمینه هر متغیر اشاره دارد. کلیدها به صورت متغیرهای باینری فرموله می‌شوند. محدودیت‌های انحصاری متقابل روی سوئیچ‌ها تعیین می‌کنند که توان تحویلی به بارهای با اولویت بیشتر از PB یا SB باشد. به منظور انجام پخش بار از روش پخش بار نیوتون - رافسون^{۲۶} استفاده می‌شود.

محاسبه پخش بار مطابق معادلات زیر انجام می‌شود:

$$PG_i - PD_i = V_i \sum_{j \neq i} V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) + V_i^2 Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (18)$$

$$QG_i - QD_i = V_i \sum_{j \neq i} V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) + V_i^2 Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (19)$$

با استفاده از (۱۸) و (۱۹)، ژاکوبین محاسبه شده و تغییر افزایشی ولتاژها و زوایا در هر مرحله از تکرار از مقادیر اولیه زوایا و ولتاژها مطابق معادله زیر به دست می‌آید:

وزن برای اولویت بندی سرویس به انواع مختلف بار مرتبط است. اگر $W'_{NVL} = 1$ ، با توجه به اینکه $W'_{NVL} < W'_{SVL} < W'_{VL}$ طبیعی است که وزن بارهای نیمه‌حیاتی و حیاتی بیشتر در نظر گرفته شود؛ در نتیجه:

$$W'_{SVL} = 10 \text{ \& } W'_{VL} = 100 \quad (4)$$

این ضرایب به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که اختلاف بین اهمیت بارهای مختلف به وضوح مشخص باشد و الگوریتم بتواند تصمیم‌هایی بهینه برای تأمین توان اتخاذ کند.

مشروط به محدودیت قیود برابری AC:

$$PG_i - PD_i = \sum_i V_i V_j V_{ij} \operatorname{Re}\{< (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)\} \quad (5)$$

$$QG_i - QD_i = \sum_i V_i V_j V_{ij} \operatorname{Im}\{< (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)\} \quad (6)$$

قیود نابرابری:

$$PG_i^{min} \leq PG_i \leq PG_i^{max} \quad (7)$$

$$QG_i^{min} \leq QG_i \leq QG_i^{max} \quad (8)$$

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max} \quad (9)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (10)$$

$$\delta_i^{min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{max} \quad (11)$$

محدودیت‌های قیود برابری DC:

$$\sum_i I_{in_i} = \sum_i I_{out_i} + IL_i \mid i \in FB, j \in TB \quad (12)$$

$$V_i = V_j + I_{ij} \times Z_{ij} \quad (13)$$

قیود نابرابری برای بارهای متغیر:

$$PL_i \leq PL_i^{max} \times SW_i \quad (14)$$

برای بارهای ثابت:

$$PL_i = B_i \times PL_i^{max} \times SW_i \quad (15)$$

بازآرایی ساختار در ریزشبکه شناورها پس از جداسازی خطا، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

$$\begin{bmatrix} \Delta PG_i \\ \Delta QG_i \end{bmatrix} = [U_i] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

حیاتی، نیمه‌حیاتی و غیرحیاتی هستند؛ در حالی که دو ناحیه بار فقط دارای بارهای حیاتی هستند. انتقال ناهم‌زمان باس (ABT)^{۳۲} برای جابه‌جایی استفاده می‌شود و همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، با سوئیچ‌های متقابل منحصر به فرد مشخص می‌شود.

برای سیستم مورد بحث، فرض بر این است که:

- بارهای حیاتی به ۰/۵ مگاوات، بارهای نیمه‌حیاتی به ۱ مگاوات و بارهای غیرحیاتی برای کار در ظرفیت کامل به ۰/۵ مگاوات نیاز دارند [۳۸].
- بارهای غیرحیاتی مستقیماً از طریق باس‌ها تغذیه می‌شوند؛ در حالی که بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی از طریق ABT‌ها سرویس می‌شوند.
- توان ترکیبی ژنراتورها برای تغذیه تمام بارها در شرایط عملیاتی عادی کافی است.

• توزیع بارهای غیرحیاتی شعاعی است؛ زیرا توزیع شعاعی مزایایی مانند جریان اتصال کوتاه کمتر، سوئیچینگ آسان و نصب و عملکرد کمتر تجهیزات حسگر را فراهم می‌کند.

روش بهینه‌سازی برای بازآرایی SPS پس از وقوع یک یا چند خطا اعمال می‌شود. فقط وضعیت بازآرایی حالت پایدار در این پژوهش در نظر گرفته شده است. جدول (۳) پارامترهای محدود استفاده‌شده در شبیه‌سازی و مقادیر بیشینه و کمینه مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. ابتدا، یک آرایش بهینه پیش از خطا برای مدل سیستم ارائه شده است که در آن، تمام بارها تا ظرفیت کامل خود تغذیه می‌شوند. مجموع ظرفیت بارهایی که در شرایط عادی تغذیه می‌شوند ۱۳/۵ مگاوات است.

فرض بر این است که در حالت پایدار، هرگاه ایرادی وجود داشته باشد، یک جزء در دسترس نیست که به معنای عملکرد بریکرها و جدا شدن ناحیه خطا است؛ بنابراین، جریان عبوری از آن جزء قطع می‌شود. این امر با بی‌نهایت در نظر گرفتن مقاومت شاخه در شبیه‌سازی به دست می‌آید. واضح است، برخی از بارها پس از خطا بدون برق می‌مانند.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش، سیستم شبکه شناور برای شبیه‌سازی معرفی می‌شود. سپس، عملکرد عادی سیستم قدرت ارزیابی می‌شود. پس از آن، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم انتخابی برای بازآرایی شبکه شناور، سناریوهای مختلف خطا، وضعیت عملکرد سیستم قبل از اعمال بازآرایی و نحوه عملکرد الگوریتم انتخابی و عملکرد سیستم پس از بازآرایی بررسی می‌شوند. در انتخاب سناریوها سعی بر این بوده است که تا حد امکان اثربخشی الگوریتم انتخابی در شرایط دشوار تحمیل شده به سیستم (تعداد خطا، خارج شدن بارهای حیاتی و ژنراتورها) بررسی شود.

۴-۱- معرفی شبکه شناور تحت مطالعه

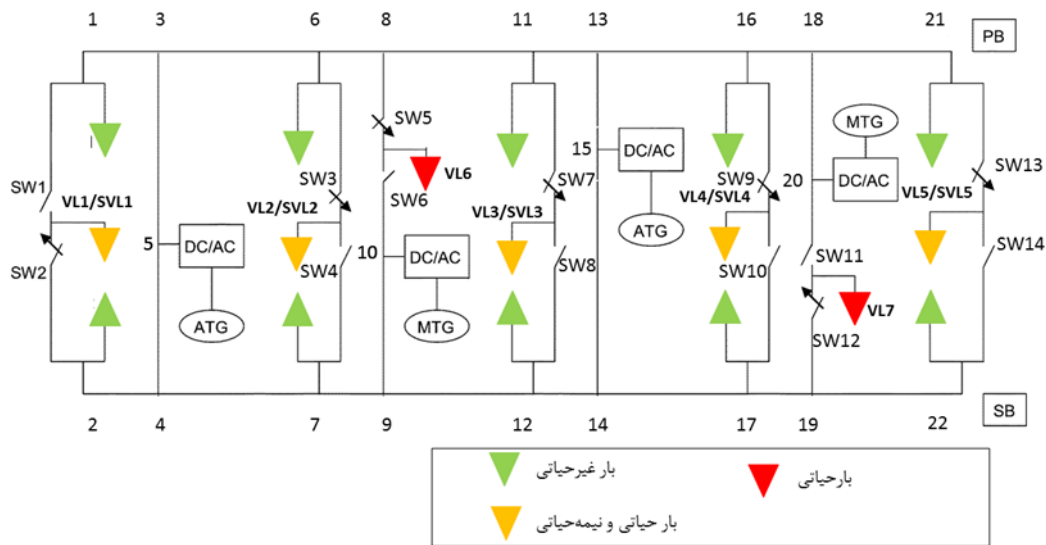
برای مدل مدنظر، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، یک سیستم توزیع الکتریکی ناحیه‌ای DC در نظر گرفته شده است. توان تولیدشده توسط ژنراتورهای AC ابتدا به DC تبدیل و سپس به بارها منتقل می‌شود. این توان برای استفاده در بارها ممکن است نیاز به تبدیل مجدد به AC داشته باشد. هر ناحیه دارای دو مرکز بار است که توسط تابلوهای ژنراتور به صورت شعاعی از PB و SB هدایت می‌شوند. سه نوع بار در این مدل در نظر گرفته شده‌اند: بارهای حیاتی (VL)^{۳۷} و بارهای نیمه‌حیاتی (SVL)^{۳۸} که برای عملیات رزمی مورد نیاز هستند و بارهای غیرحیاتی (NVL)^{۳۹}. فرض بر این است که می‌توان بارهای غیرحیاتی را برای حفظ توان در بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی در مواقع اضطراری از مدار خارج کرد. این مدل جدید دارای چهار ژنراتور و هفت مرکز بار است.

هفت ناحیه بار DC از دو ژنراتور اصلی (MTG)^{۳۰} با ظرفیت ۶ مگاوات و دو ژنراتور کمکی (ATG)^{۳۱} با ظرفیت ۲ مگاوات تغذیه می‌شوند. پنج ناحیه بار دارای بارهای

۴-۲- عملکرد شبکه شناور در حالت عادی

در شرایط عادی و عدم وجود خطا، وضعیت اولیه سیستم به شرح جدول (۴) است. ولتاژ باس‌ها مطابق شکل (۶) و جریان خطوط مطابق شکل (۷) است. همان‌طور که مشخص است، ولتاژ و جریان در محدوده مجاز قرار دارند

و عملکرد سیستم پایدار است. در این حالت، وضعیت اولیه کلیدها نیز به شرح جدول (۵) است. همان‌طور که مشخص است، هر جفت کلید در یک شاخه نمی‌توانند به طور هم‌زمان متصل باشند که این شرط برقرار است.



شکل (۵): شبکه شناور تحت مطالعه و اجزای آن

۴-۳- بررسی انواع سناریوی خطا و عملکرد

روش پیشنهادی

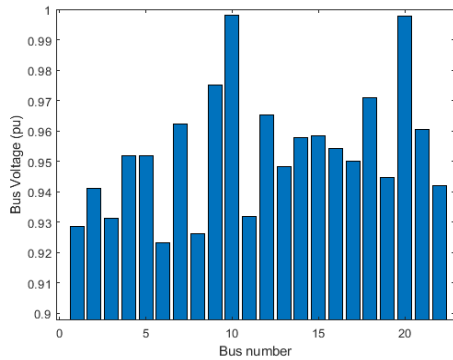
در این بخش، سناریوهای مختلف خطا و تأثیر عملکرد الگوریتم در بازآرایی شبکه بررسی می‌شود.

۴-۳-۱- سناریوی اول (وقوع یک خطا)

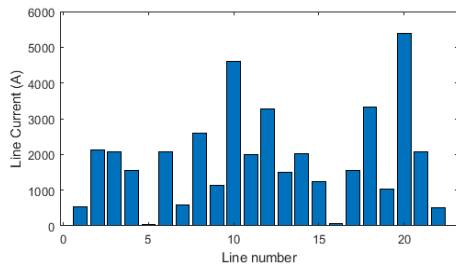
در ادامه، فرض می‌شود در اثر بروز خطا در سیستم، یکی از شاخه‌ها از مدار خارج شده است و طبیعتاً جریانی نمی‌تواند از آن عبور کند. در این وضعیت، فرض می‌شود وضعیت کلیدها مطابق جدول (۵) است. در این سناریوی خطا، اتصال بین باس‌های ۲ و ۴ همانند شکل (۸) قطع می‌شود. وضعیت ولتاژ باس‌ها و بارها پیش از بازآرایی شبکه در جدول (۶) مشخص شده است. مقدار ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط نیز پس از وقوع خطا و پیش از بازآرایی

شبکه به ترتیب در شکل (۹) و شکل (۱۰) مشخص شده است. با مقایسه جدول (۴) و جدول (۶) مشخص می‌شود، در سناریوی اول و با بروز خطا در محل مشخص شده، ۰/۵ مگاوات بار حیاتی، ۱ مگاوات بار نیمه‌حیاتی و ۰/۵ مگاوات بار غیرحیاتی از مدار خارج می‌شوند.

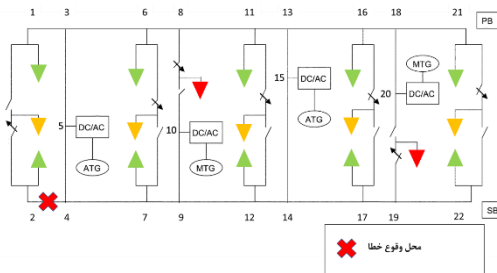
با اعمال الگوریتم PSO و بازآرایی شبکه شناور، وضعیت جدید کلیدها مطابق جدول (۷) تغییر می‌کند. همان‌طور که از وضعیت عملکرد سیستم پس از بازآرایی شبکه در جدول (۸) مشخص است، تمام بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی تأمین می‌شوند. در این وضعیت، ژنراتورهای اصلی در مجموع ۸/۸۱ مگاوات و ژنراتورهای کمکی ۴ مگاوات توان تولید می‌کنند که نشان از عملکرد مناسب بازآرایی در این وضعیت دارد. همچنین، تمام ولتاژها مطابق شکل (۱۱) و جریان‌ها مطابق شکل (۱۲) در محدوده مجاز قرار دارند.



شکل (۶): ولتاژ باس‌ها در حالت عملکرد عادی ریز شبکه شناور



شکل (۷): جریان خطوط در عملکرد عادی ریز شبکه شناور



شکل (۸): محل وقوع خطا در سناریوی اول

جدول (۵): وضعیت کلیدها در حالت عملکرد عادی شبکه شناور

شماره کلید	وضعیت کلید
۱	قطع
۲	وصل
۳	وصل
۴	قطع
۵	وصل
۶	قطع
۷	وصل
۸	قطع
۹	وصل
۱۰	قطع
۱۱	قطع
۱۲	وصل
۱۳	وصل
۱۴	قطع

جدول (۳): مشخصات ریز شبکه شناور شبیه‌سازی شده

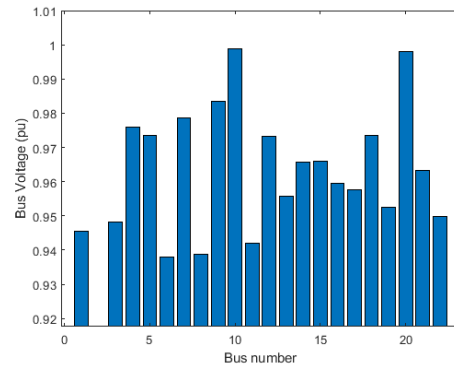
پارامتر محدود	بیشینه	کمینه
PG_i (MTG) (مگاوات)	۶	۰
PG_i (ATG) (مگاوات)	۲	۰
I_{ij} (آمپر)	۶۰۰۰	-۶۰۰۰
V_i (ولت)	۹۵۰	۱۰۵۰
δ_i	+۱ درجه	-۱ درجه
PL_i (VL) (مگاوات)	۰/۵	۰
PL_i (SVL) (مگاوات)	۱	۰
PL_i (NVL) (مگاوات)	۰/۵	۰
SW_i	۱	۰
B_i	۱	۰

جدول (۴): مشخصات عملکرد ریز شبکه شناور در شرایط

عادی (عدم وجود خطا)

شماره باس	بار حیاتی (مگاوات)	بار نیمه حیاتی (مگاوات)	بار غیر حیاتی (مگاوات)	ولتاژ (PU)
۱	۰	۰	۰/۹۳	۰/۹۳
۲	۰/۵	۱	۰/۹۴	۰/۹۴
۳	۰	۰	۰/۹۳	۰/۹۳
۴	۰	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
۵	۰	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
۶	۰/۵	۱	۰/۹۲	۰/۹۲
۷	۰	۰	۰/۹۶	۰/۹۶
۸	۰/۵	۰	۰/۹۳	۰/۹۳
۹	۰	۰	۰/۹۸	۰/۹۸
۱۰	۰	۰	۱	۰/۹۳
۱۱	۰/۵	۱	۰/۹۳	۰/۹۳
۱۲	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۷
۱۳	۰	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
۱۴	۰	۰	۰/۹۶	۰/۹۶
۱۵	۰	۰	۰/۹۶	۰/۹۶
۱۶	۰/۵	۱	۰/۹۵	۰/۹۵
۱۷	۰	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
۱۸	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۷
۱۹	۰/۵	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
۲۰	۰	۰	۱	۰/۹۶
۲۱	۰/۵	۱	۰/۹۶	۰/۹۶
۲۲	۰	۰	۰/۹۵	۰/۹۵
مجموع	۳/۵	۵	۵	

جریان‌ها در محدوده مجاز قرار دارند و عملکرد سیستم پایدار است. همان‌طور که در جدول (۱۰) مشخص شده است، ۰/۵ مگاوات از بارهای حیاتی و ۱ مگاوات از بارهای نیمه‌حیاتی برای پایداری از مدار خارج می‌شوند. در این وضعیت، با توجه به خروج یکی از ژنراتورهای اصلی از مدار به دلیل خطا، دیگر ژنراتور اصلی ۵/۷ مگاوات توان تولید می‌کند و ژنراتورهای کمکی ۴ مگاوات توان تولید می‌کنند.

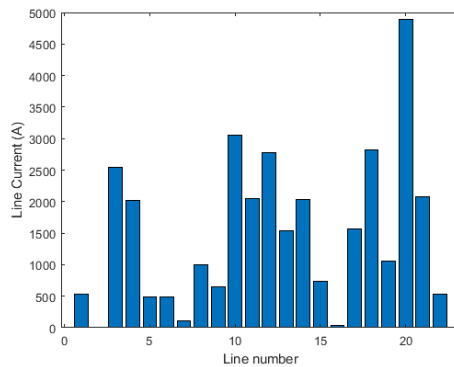


شکل (۹): ولتاژ باس‌ها در سناریوی اول پیش از بازآرایی شبکه

جدول (۶): وضعیت عملکرد سیستم در سناریوی اول پیش از

بازآرایی شبکه

ولتاژ (PU)	بار غیرحیاتی (مگاوات)	بار نیمه‌حیاتی (مگاوات)	بار حیاتی (مگاوات)	شماره باس
۰/۹۵	۰/۵	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۲
۰/۹۵	۰	۰	۰	۳
۰/۹۸	۰	۰	۰	۴
۰/۹۷	۰	۰	۰	۵
۰/۹۴	۰/۵	۱	۰/۵	۶
۰/۹۸	۰/۵	۰	۰	۷
۰/۹۴	۰	۰	۰/۵	۸
۰/۹۹	۰	۰	۰	۹
۱	۰	۰	۰	۱۰
۰/۹۴	۰/۵	۱	۰/۵	۱۱
۰/۹۷	۰/۵	۰	۰	۱۲
۰/۹۶	۰	۰	۰	۱۳
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۴
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۵
۰/۹۶	۰/۵	۱	۰/۵	۱۶
۰/۹۶	۰/۵	۰	۰	۱۷
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۸
۰/۹۵	۰	۰	۰/۵	۱۹
۱	۰	۰	۰	۲۰
۰/۹۶	۰/۵	۱	۰/۵	۲۱
۰/۹۵	۰/۵	۰	۰	۲۲
	۴/۵	۴	۳	مجموع
	۰/۵	۱	۰/۵	بار ازدست‌رفته



شکل (۱۰): جریان خطوط در سناریوی اول پیش از بازآرایی شبکه

۴-۳-۲- سناریوی دوم (وقوع دو خطا به صورت هم‌زمان)

در این سناریوی خطا، اتصال بین باس ۷ و ۹ و باس ۹ و ۱۲ قطع می‌شود. محل وقوع خطا در سیستم در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این وضعیت، با توجه به از مدار خارج شدن یکی از ژنراتورهای اصلی سیستم، در صورتی که تمام بارها وارد مدار شوند، طبیعتاً پایداری سیستم دچار اشکال خواهد شد. وضعیت ولتاژ باس‌ها در شکل (۱۴) و جریان خطوط در شکل (۱۵) گواهی همین مدعاست.

با توجه به وضعیت موجود، بازآرایی سیستم قدرت شناور برای بازیابی عملکرد صحیح آن انجام می‌شود. وضعیت جدید کلیدها پس از بازآرایی شبکه در جدول (۹) مشخص شده است. مطابق شکل (۱۶) و شکل (۱۷)، پس از بازآرایی شبکه و در وضعیت جدید سیستم، تمام ولتاژ و

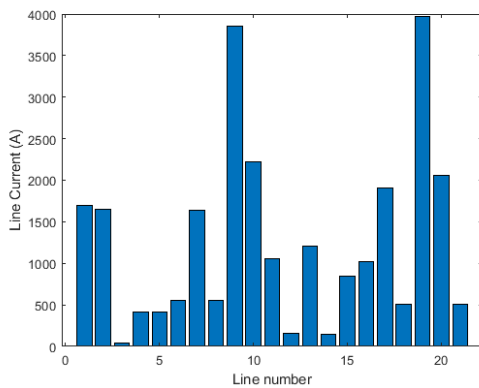
۴-۳-۳- سناریوی سوم (وقوع سه خطا به صورت هم‌زمان)

در این سناریوی خطا، اتصال بین باس ۳ و ۶، باس ۶ و ۸ و باس ۸ و ۱۱ قطع می‌شود. محل وقوع خطا در سیستم در شکل (۱۸) نشان داده شده است. وضعیت ولتاژ باس‌ها و بارها پیش از بازآرایی شبکه مطابق جدول (۱۱) است. همان‌طور که از جدول پیداست، ۱ مگاوات بار حیاتی، ۱ مگاوات بار نیمه‌حیاتی و ۰/۵ مگاوات بار غیرحیاتی از مدار خارج شده‌اند. ژنراتورهای اصلی در این وضعیت در مجموع ۷/۲ مگاوات و ژنراتورهای کمکی ۴ مگاوات توان تولید می‌کنند. وضعیت ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط نیز پس از وقوع خطا و پیش از بازآرایی شبکه به ترتیب در شکل (۱۹) و شکل (۲۰) مشخص شده است.

جدول (۷): وضعیت جدید کلیدها در سناریوی اول پس از بازآرایی شبکه

وضعیت متغیر مناظر	شماره کلید	وضعیت کلید
S1=1	۱	وصل
	۲	قطع
S2=2	۳	قطع
	۴	وصل
S3=2	۵	قطع
	۶	وصل
S4=2	۷	قطع
	۸	وصل
S5=1	۹	وصل
	۱۰	قطع
S6=1	۱۱	وصل
	۱۲	قطع
S7=1	۱۳	وصل
	۱۴	قطع

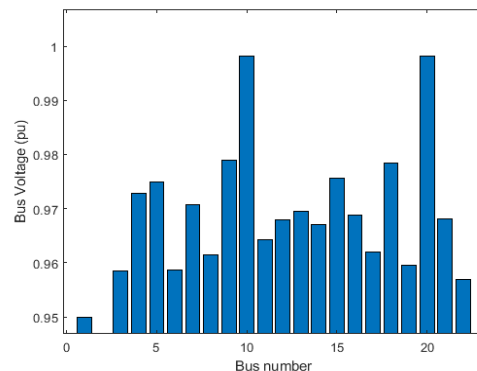
با توجه به وضعیت موجود، بازآرایی سیستم قدرت شناور برای بازیابی توان بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی آن انجام می‌شود. در این حالت، وضعیت جدید کلیدها و عملکرد جدید سیستم به ترتیب مطابق جدول (۱۲) و جدول (۱۳) است. تمام بارهای حیاتی و نیمه‌حیاتی تأمین می‌شوند. در این وضعیت، ژنراتورهای اصلی در مجموع ۹/۲ مگاوات و ژنراتورهای کمکی ۴ مگاوات توان تولید می‌کنند که نشان از عملکرد مناسب بازآرایی در این وضعیت دارد. همچنین، مطابق شکل (۲۱) و شکل (۲۲)، تمام ولتاژها و جریان‌ها در محدوده مجاز قرار دارند.



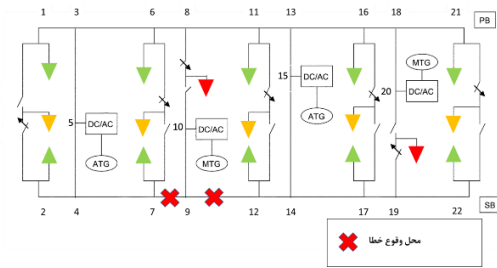
شکل (۱۲): جریان خطوط در سناریوی اول پس از بازآرایی شبکه

۴-۳-۴- سناریوی چهارم (وقوع چهار خطا به صورت هم‌زمان)

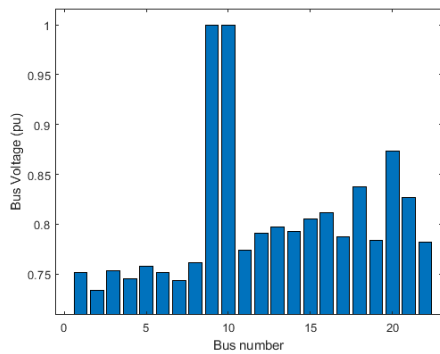
در این سناریوی خطا، اتصال بین باس ۳ و ۵، باس ۴ و ۵، باس ۱۳ و ۱۵ و ۱۴ و ۱۵ قطع می‌شود. محل وقوع خطا در سیستم در شکل (۲۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در این وضعیت، دو ژنراتور کمکی از مدار خارج می‌شوند. وضعیت ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط به ترتیب در شکل (۲۴) و شکل (۲۵) مشخص شده است. با توجه به وضعیت ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط، مشخص است با وجود تمام بارها در مدار، ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط از محدوده مجاز خارج می‌شود و باعث ناپایداری سیستم می‌شود که اعمال بازآرایی شبکه را ضروری می‌کند. وضعیت جدید کلیدها پس از بازآرایی شبکه در جدول (۱۴) و عملکرد جدید شبکه در جدول (۱۵) نشان داده شده است. مطابق جدول، پس از بازآرایی شبکه و در وضعیت



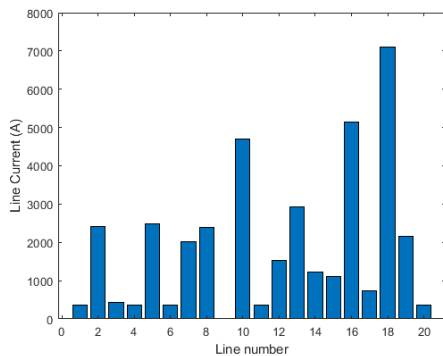
شکل (۱۱): ولتاژ باس‌ها در سناریوی اول پس از بازآرایی شبکه



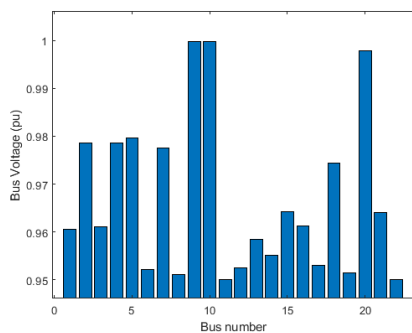
شکل (۱۳): محل وقوع خطا در سناریوی دوم



شکل (۱۴): ولتاژ باس‌ها پیش از بازآرایی شبکه در سناریوی دوم



شکل (۱۵): جریان خطوط پیش از بازآرایی شبکه در سناریوی دوم

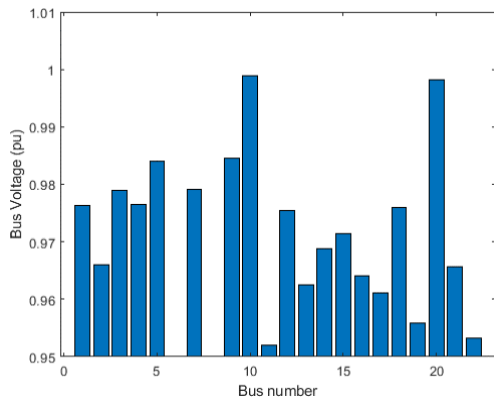


شکل (۱۶): ولتاژ باس‌ها پس از بازآرایی شبکه در سناریوی دوم

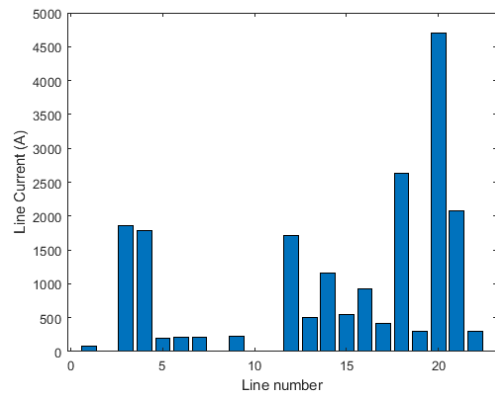
جدید سیستم، تمام ولتاژها و جریان‌ها در محدوده مجاز قرار دارند و عملکرد سیستم پایدار است. ۰/۵ مگاوات از بارهای حیاتی و ۱ مگاوات از بارهای نیمه‌حیاتی برای پایداری از مدار خارج می‌شوند. باید در نظر داشت یکی از علل خروج این بارها از مدار محدودیت جریان است. در صورتی که محدودیت جریان خطوط افزایش می‌یافت، این بارها نیز تأمین می‌شدند. در این وضعیت، با توجه به خروج دو ژنراتور کمکی از مدار به دلیل خطا، ژنراتورهای اصلی در مجموع ۱۰/۸ مگاوات توان تولید می‌کنند. همچنین، وضعیت ولتاژ باس‌ها در شکل (۲۶) و جریان خطوط در شکل (۲۷) مشخص شده است.

جدول (۸): وضعیت عملکرد سیستم در سناریوی اول پس از بازآرایی شبکه

شماره باس	بار حیاتی (مگاوات)	بار نیمه‌حیاتی (مگاوات)	بار غیرحیاتی (مگاوات)	ولتاژ (PU)
۱	۰/۵	۱	۰/۱۲۵۳	۰/۹۵
۲	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰/۹۶
۴	۰	۰	۰	۰/۹۷
۵	۰	۰	۰	۰/۹۸
۶	۰	۰	۰/۵	۰/۹۶
۷	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۷
۸	۰/۵	۰	۰	۰/۹۶
۹	۰	۰	۰	۰/۹۸
۱۰	۰/۵	۰	۰	۱
۱۱	۰	۰	۰/۵	۰/۹۷
۱۲	۰	۰	۰/۵	۰/۹۷
۱۳	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۴	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۵	۰	۰	۰	۰/۹۸
۱۶	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۷
۱۷	۰	۰	۰/۵	۰/۹۶
۱۸	۰	۰	۰	۰/۹۸
۱۹	۰	۰	۰	۰/۹۶
۲۰	۰/۵	۰	۰	۱
۲۱	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۷
۲۲	۰	۰	۰/۵	۰/۹۶
مجموع	۳/۵	۵	۴/۱۲۵	
بار ازدست‌رفته	۰	۰	۰/۸۷۵	



شکل (۱۹): ولتاژ باس‌ها در سناریوی سوم پیش از بازآرایی شبکه



شکل (۱۷): جریان خطوط پس از بازآرایی شبکه در سناریوی دوم

جدول (۱۰): وضعیت عملکرد سیستم در سناریوی دوم پس از

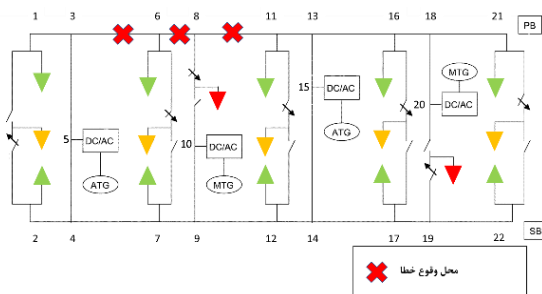
بازآرایی شبکه

ولتاژ (PU)	بار غیر حیاتی (مگاوات)	بار نیمه حیاتی (مگاوات)	بار حیاتی (مگاوات)	شماره باس
۰/۹۵	۰/۱	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۲
۰/۹۶	۰	۰	۰	۳
۰/۹۷	۰	۰	۰	۴
۰/۹۸	۰	۰	۰	۵
۰/۹۶	۰	۱	۰/۵	۶
۰/۹۷	۰/۲	۰	۰	۷
۰/۹۶	۰	۰	۰	۸
۰/۹۸	۰	۰	۰	۹
۱	۰	۰	۰/۵	۱۰
۰/۹۷	۰/۳۵	۱	۰/	۱۱
۰/۹۷	۰/۴۹	۰	۰	۱۲
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۳
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۴
۰/۹۸	۰	۰	۰	۱۵
۰/۹۷	۰/۵	۱	۰/۵	۱۶
۰/۹۶	۰/۱۳	۰	۰	۱۷
۰/۹۸	۰	۰	۰	۱۸
۰/۹۶	۰	۰	۰	۱۹
۱	۰	۰	۰/۵	۲۰
۰/۹۷	۰/۵	۱	۰/۵	۲۱
۰/۹۶	۰/۳	۰	۰	۲۲
	۲/۶	۴	۳	مجموع
	۲/۴	۱	۰/۵	بار ازدست‌رفته

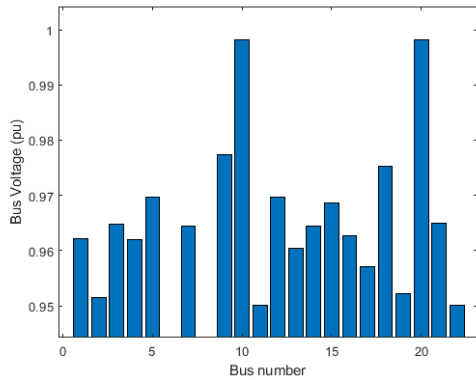
جدول (۹): وضعیت جدید کلیدها پس از بازآرایی شبکه در سناریوی

دوم

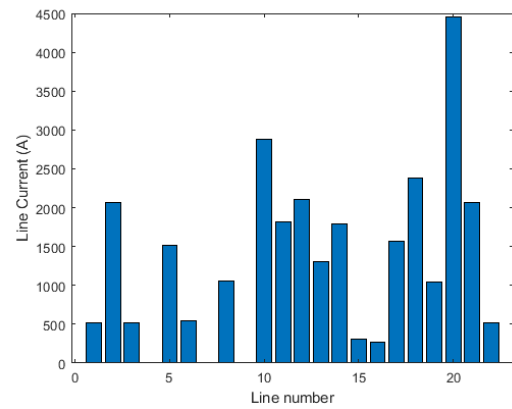
وضعیت متغیر متناظر	شماره کلید	وضعیت کلید
S1=0	۱	قطع
	۲	قطع
S2=1	۳	وصل
	۴	قطع
S3=2	۵	قطع
	۶	وصل
S4=1	۷	وصل
	۸	قطع
S5=1	۹	وصل
	۱۰	قطع
S6=1	۱۱	وصل
	۱۲	قطع
S7=1	۱۳	وصل
	۱۴	قطع



شکل (۱۸): محل وقوع خطا در سناریوی سوم



شکل (۲۱): ولتاژ باس‌ها پس از بازآرایی شبکه در سناریوی سوم



شکل (۲۰): جریان خطوط در سناریوی سوم پیش از بازآرایی شبکه

جدول (۱۲): وضعیت جدید کلیدها در سناریوی سوم پس از بازآرایی

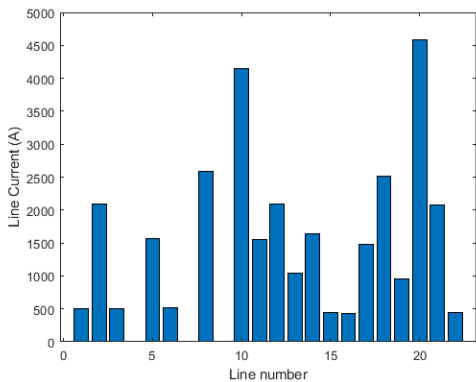
شبکه

وضعیت متغیر متناظر	شماره کلید	وضعیت کلید
S1=2	۱	قطع
	۲	وصل
S2=2	۳	قطع
	۴	وصل
S3=2	۵	قطع
	۶	وصل
S4=1	۷	وصل
	۸	قطع
S5=1	۹	وصل
	۱۰	قطع
S6=2	۱۱	قطع
	۱۲	وصل
S7=1	۱۳	وصل
	۱۴	قطع

جدول (۱۱): وضعیت عملکرد سیستم در سناریوی سوم پیش از

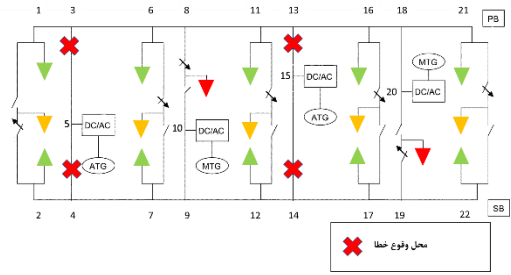
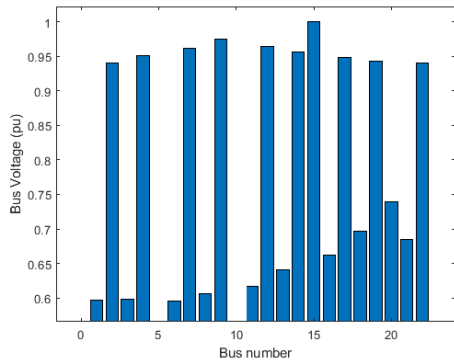
بازآرایی شبکه

شماره باس	بار حیاتی (مگاوات)	بار نیمه حیاتی (مگاوات)	بار غیر حیاتی (مگاوات)	ولتاژ (PU)
۱	۰	۰	۰/۵	۰/۹۸
۲	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۷
۳	۰	۰	۰	۰/۹۸
۴	۰	۰	۰	۰/۹۸
۵	۰	۰	۰	۰/۹۸
۶	۰	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰/۵	۰/۹۸
۸	۰	۰	۰	۰
۹	۰	۰	۰	۰/۹۸
۱۰	۰	۰	۰	۱
۱۱	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۵
۱۲	۰	۰	۰/۵	۰/۹۸
۱۳	۰	۰	۰	۰/۹۶
۱۴	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۵	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۶	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۶
۱۷	۰	۰	۰/۵	۰/۹۶
۱۸	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۹	۰/۵	۰	۰	۰/۹۶
۲۰	۰	۰	۰	۱
۲۱	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۷
۲۲	۰	۰	۰/۵	۰/۹۵
مجموع	۲/۵	۴	۴/۵	
بار ازدست‌رفته	۱	۱	۰/۵	



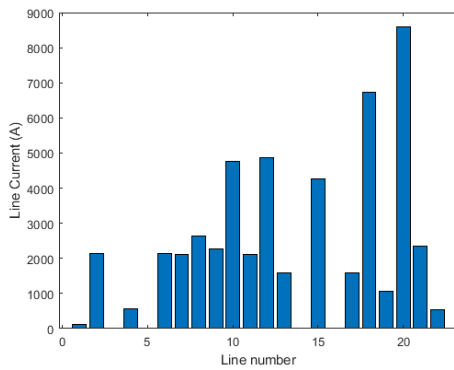
شکل (۲۲): جریان خطوط پس از بازآرایی شبکه در سناریوی سوم

۳۰ بازآرایی ساختار در ریز شبکه شناورها پس از جداسازی خطا، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات



شکل (۲۳): محل وقوع خطا در سناریوی چهارم

شکل (۲۴): ولتاژ باسها در سناریوی چهارم پیش از بازآرایی شبکه



شکل (۲۵): جریان خطوط در سناریوی چهارم پیش از بازآرایی شبکه

جدول (۱۳): وضعیت عملکرد سیستم در سناریوی سوم پس از

بازآرایی شبکه

ولتاژ (PU)	بار غیر حیاتی (مگاوات)	بار نیمه حیاتی (مگاوات)	بار حیاتی (مگاوات)	شماره باس
۰/۹۶	۰/۵	۰	۰	۱
۰/۹۵	۰/۵	۱	۰/۵	۲
۰/۹۶	۰	۰	۰	۳
۰/۹۶	۰	۰	۰	۴
۰/۹۷	۰	۰	۰	۵
۰	۰	۰	۰	۶
۰/۹۷	۰/۵	۱	۰/۵	۷
۰	۰	۰	۰	۸
۰/۹۸	۰	۰	۰	۹
۱	۰	۰	۰/۵	۱۰
۰/۹۵	۰/۵	۱	۰/۵	۱۱
۰/۹۷	۰/۵	۰	۰	۱۲
۰/۹۶	۰	۰	۰	۱۳
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۴
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۵
۰/۹۶	۰/۵	۱	۰/۵	۱۶
۰/۹۶	۰/۵	۰	۰	۱۷
۰/۹۷	۰	۰	۰	۱۸
۰/۹۵	۰	۰	۰/۵	۱۹
۱	۰	۰	۰	۲۰
۰/۹۶	۰/۵	۱	۰/۵	۲۱
۰/۹۵	۰/۴	۰	۰	۲۲
	۴/۴	۵	۳/۵	مجموع
	۰/۶	۰	۰	بار از دست رفته

جدول (۱۴): وضعیت جدید کلیدها پس از بازآرایی شبکه در

سناریوی چهارم

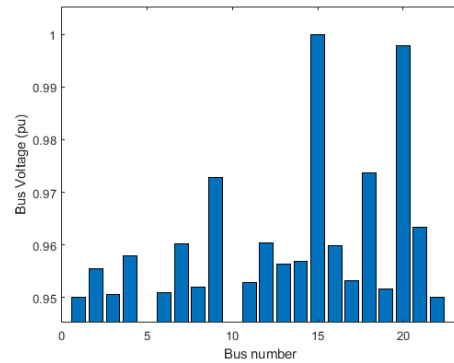
وضعیت کلید	شماره کلید	وضعیت متغیر متناظر
قطع	۱	S1=0
قطع	۲	
قطع	۳	S2=2
وصل	۴	
قطع	۵	S3=2
وصل	۶	
قطع	۷	S4=2
وصل	۸	
وصل	۹	S5=1
قطع	۱۰	
وصل	۱۱	S6=1
قطع	۱۲	
وصل	۱۳	S7=1
قطع	۱۴	

پاسخ‌گویی الگوریتم و زمان پیدا کردن آرایش بهینه کاهش می‌یابد. در این پژوهش، بارها به سه دسته حیاتی، نیمه‌حیاتی و غیرحیاتی تقسیم و ضرایب جریمه برای عدم تأمین این بارها در نظر گرفته شدند. ضرایب را می‌توان با توجه به اهمیت بارها در شرایط مختلف و به صورت پویا تغییر داد. مهم‌ترین ایراد الگوریتم ازدحام ذرات و سایر الگوریتم‌هایی که با پردازنده مرکزی کار می‌کنند، خطر خرابی تک‌نقطه‌ای است که ممکن است باعث تخریب عملیات کلی سیستم شود.

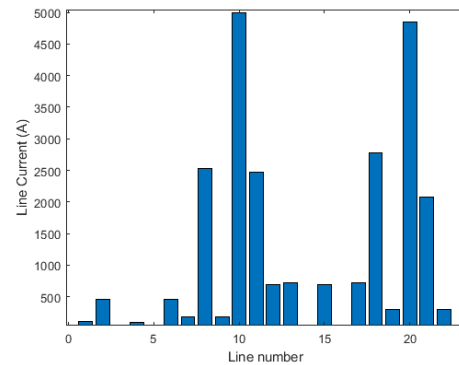
جدول (۱۵): وضعیت عملکرد سیستم پس از بازآرایی شبکه در سناریوی

چهارم

شمارهٔ باس	بار حیاتی (مگاوات)	بار نیمه‌حیاتی (مگاوات)	بار غیرحیاتی (مگاوات)	ولتاژ (PU)
۱	۰	۰	۰/۱	۰/۹۵
۲	۰	۰	۰/۴۵	۰/۹۵
۳	۰	۰	۰	۰/۹۶
۴	۰	۰	۰	۰/۹۶
۵	۰	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰/۱	۰/۹۵
۷	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۶
۸	۰	۰	۰	۰/۹۵
۹	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۰	۰/۵	۰	۰	۱
۱۱	۰	۰	۰/۵	۰/۹۵
۱۲	۰/۵	۱	۰/۲	۰/۹۶
۱۳	۰	۰	۰	۰/۹۶
۱۴	۰	۰	۰	۰/۹۶
۱۵	۰	۰	۰	۰
۱۶	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۶
۱۷	۰	۰	۰/۴	۰/۹۵
۱۸	۰	۰	۰	۰/۹۷
۱۹	۰	۰	۰	۰/۹۵
۲۰	۰/۵	۰	۰	۱
۲۱	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۹۶
۲۲	۰	۰	۰/۳	۰/۹۵
مجموع	۳	۴	۳/۵۵	
بار ازدست‌رفته	۰/۵	۱	۱/۴۵	



شکل (۲۶): ولتاژ باس‌ها پس از بازآرایی شبکه در سناریوی چهارم



شکل (۲۷): جریان خطوط در سناریوی چهارم پس از بازآرایی شبکه

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش سعی شد تا با بررسی روش‌های مختلف بازآرایی در شبکه الکتریکی شناور و قیود مرتبط با سیستم، الگوریتمی برای بازآرایی شبکه شناور پس از وقوع خطا انتخاب شود. در نهایت، با در نظر داشتن جنبه‌های مختلف سیستم، الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بازآرایی شبکه الکتریکی شناور پس از وقوع خطا و انتخاب آرایش بهینه برای سیستم انتخاب شد.

پس از شبیه‌سازی شبکه الکتریکی شناور و بررسی عملکرد آن در شرایط عادی، به منظور بررسی عملکرد الگوریتم انتخابی، نحوه کارکرد آن تحت سناریوهای مختلف بررسی شد. مهم‌ترین مزیت‌های الگوریتم ازدحام ذرات برای پیدا کردن آرایش بهینه شبکه الکتریکی شناور شامل سادگی اجرا، تطابق با شرایط مختلف، امکان در نظر داشتن قیود مختلف، امکان پاسخ‌گویی و پیدا کردن آرایش بهینه هنگام وقوع چندین خطای هم‌زمان هستند. با افزایش دقت در محاسبه پخش بار بهینه و تعداد تکرار الگوریتم، سرعت

۶- مراجع

- [1]. I. Ullah, S. Rahman, and I. A. Khan, "SST-Based Marine Shipboard System to Achieve Improved Performance & Easy Renewable Energy Integration", in 2023 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 13-14 Feb. 2023, pp. 1-6, 2023. <https://doi.org/10.1109/TPEC56611.2023.10078485>
- [2]. K. Satpathi, A. Ukil, and J. Pou, "Short-Circuit Fault Management in DC Electric Ship Propulsion System: Protection Requirements, Review of Existing Technologies and Future Research Trends", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 4, No. 1, pp. 272-291, 2018, <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2788199>
- [3]. M. Babaei, J. Shi, and S. Abdelwahed, "A Survey on Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods in Electric Ship Power Systems", IEEE Access, Vol. 6, pp. 9430-9441, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2798505>
- [4]. R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "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, 1 Nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.03.002>
- [5]. M. A. N. Guimaraes, J. F. C. Lorenzetti, and C. A. Castro, "Reconfiguration of distribution systems for stability margin enhancement using tabu search", in 2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004., 21-24 Nov. 2004, Vol. 2, pp. 1556-1561, 2004. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1460251>
- [6]. R. J. Sarfi, M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction", Electric Power Systems Research, Vol. 31, No. 1, pp. 61-70, 1 Oct. 1994. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0378-7796(94)90029-9)
- [7]. P. Mitra, and G. K. Venayagamoorthy, "Implementation of an Intelligent Reconfiguration Algorithm for an Electric Ship's Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 5, pp. 2292-2300, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2161849>
- [8]. M. Wooldridge, "An introduction to multiagent systems", John Wiley & Sons,

روش پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثر در سیستم‌های قدرت شناور نظامی و تجاری، سیستم‌های قدرت دریایی تجاری و ریزشبکه‌های زمینی استفاده شود. در شناورهای نظامی مانند ناوهای هواپیمابر و زیردریایی‌ها، حفظ توان بارهای حیاتی برای تضمین عملکرد تجهیزات نظامی ضروری است و این روش می‌تواند در شرایط اضطراری با انجام بازآرایی سریع شبکه، از عملکرد ایمن و پایدار سیستم اطمینان حاصل کند. در سیستم‌های قدرت دریایی تجاری، مانند کشتی‌های مسافربری و باری، این روش با کاهش زمان قطعی برق و تأمین توان بارهای حیاتی، می‌تواند ایمنی و رضایت مسافران را افزایش دهد. همچنین، اگرچه این پژوهش بر شبکه‌های شناور متمرکز است، روش پیشنهادی قابلیت استفاده در ریزشبکه‌های زمینی را نیز دارد؛ به‌ویژه در کاربردهایی که این ریزشبکه‌ها دارای منابع تولید پراکنده و بارهای با اولویت‌های مختلف هستند.

در این پژوهش، بازآرایی شبکه در حالت پایدار بررسی شده است؛ اما پژوهش‌های آینده می‌توانند بازآرایی شبکه را در شرایط گذرا و دینامیکی مطالعه کنند تا عملکرد سیستم در زمان وقوع خطا و بازآرایی بهبود یابد. همچنین، تمرکز این پژوهش بر پایداری و قابلیت اطمینان سیستم بوده است؛ اما افزودن قیود اقتصادی مانند هزینه‌های سوخت و تعمیر و نگهداری می‌تواند کاربردهای عملی روش پیشنهادی را گسترش دهد. مقایسه عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نیز می‌تواند مزایا و محدودیت‌های روش پیشنهادی را بهتر نشان دهد. علاوه بر این، پژوهش‌های آینده می‌توانند روش پیشنهادی را در سیستم‌های قدرت واقعی اجرا و عملکرد آن را در شرایط عملی ارزیابی کنند. اگرچه این پژوهش بر معماری ناحیه‌ای تمرکز دارد، بررسی عملکرد روش پیشنهادی در معماری‌های دیگر مانند معماری شعاعی و حلقه‌ای می‌تواند به انتخاب بهینه معماری برای کاربردهای مختلف کمک کند. در نهایت، لازم است تا با توجه به اهمیت سرعت پاسخ‌گویی الگوریتم در رابطه با تأثیر تغییر متغیرها و انتخاب آن‌ها در سرعت پاسخ‌گویی الگوریتم و افزایش آن، پژوهش‌های بیشتر انجام شوند.

- Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp. 444-448, 1-4 June 2016. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7512995>
- [17]. M. R. Bussieck, and A. Meeraus, "General algebraic modeling system (GAMS)", in Modeling languages in mathematical optimization, Springer US, pp. 137-157, 2004. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0215-5_8
- [18]. L. Ma, J. Zhang, and G. Ren, "An improved selection strategy differential evolution algorithm for reconfiguration of shipboard power system", in 2015 5th International Conference on Information Science and Technology (ICIST), pp. 131-135, 24-26 Apr. 2015. 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIST.2015.7288955>
- [19]. K. R. Davey, and R. E. Hebner, "Reconfiguration of shipboard power systems", CEM Publications, 2015.
- [20]. S. K. Srivastava, and K. L. Butler-Purry, "Probability-based predictive self-healing reconfiguration for shipboard power systems," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 3, p. 405, 2007, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060168>
- [21]. S. Das, S. Bose, S. Pal, N. N. Schulz, C.M. Scoglio, and B. Natarajan, "Dynamic reconfiguration of shipboard power systems using reinforcement learning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp. 669-676, 2013. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2207466>
- [22]. S. Pal, S. Bose, S. Das, C.M. Scoglio, B. Natarajan, N. N. Scoglio, "Shipboard power system reconfiguration using reinforcement learning", in 2010 IEEE North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-7, 2010. <https://doi.org/10.1109/naps.2010.5618962>
- [23]. P. Ghimire, M. Zadeh, J. Thorstensen, and E. Pedersen, "Data-Driven Efficiency Modeling and Analysis of All-Electric Ship Powertrain; A Comparison of Power System Architectures", in IEEE Transactions on Transportation Electrification, <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3123886>
- [24]. D. Bosich, A. Vicenzutti, R. Pelaschiar, R. Menis, and G. Sulligoi, "Toward the future: The MVDC large ship research program", in 2015 AEIT International Annual Conference, 2015.
- [25]. E. Skjong, R. Volden, E. Rodskar, M. Molinas, T. A. Johansen, and J. Cunningham, "Past, present, and future challenges of the marine vessel's electrical power system", IEEE Trans. Transp. Electr., Vol. 2, No. 4, pp. 522-537, 2016.
- 2009.
- [9]. S. Bose, S. Pal, B. Natarajan, C. M. Scoglio, S. Das, and N. N. Schulz, "Analysis of Optimal Reconfiguration of Shipboard Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 1, pp. 189-197, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2163948>
- [10]. S. S. Gharehveran, K. Shirini, S. C. Khavar, S. H. Mousavi, and A. Abdolahi, "Deep learning-based demand response for short-term operation of renewable-based microgrids". J Supercomput Vol. 80, pp. 26002-26035, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06407-z>
- [11]. S. S. Gharehveran, S. Ghassemzadeh, and N. Rostami. "Resilience-Oriented Planning and Pre-Positioning of Vehicle-Mounted Energy Storage Facilities in Community Microgrids", Journal of Energy Storage, Vol. 72, 15 Nov. 2023, p. 108263, Accessed 14 Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108263>
- [12]. S. S. Gharehveran, S. Ghassemzadeh, and N. Rostami, "Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages", Sustainable Cities and Society, Vol. 83, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103952>
- [13]. M. Ahrari, K. Shirini, S. S. Gharehveran, M. Ghazizadeh, S. Haidari, and P. Anvari, "A Security-Constrained Robust Optimization for Energy Management of Active Distribution Networks with Presence of Energy Storage and Demand Flexibility", Journal of Energy Storage, Vol. 84, 21 Feb. 2024, pp. 111024-111024, Accessed 1 Dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111024>
- [14]. K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Modified imperialist competitive algorithm for aircraft landing scheduling problem", J Supercomput Vol. 80, pp. 13782-13812, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05999-w>
- [15]. K. Shirini, H. S. Aghdasi, and S. Saeedvand, "Multi-objective aircraft landing problem: a multi-population solution based on non-dominated sorting genetic algorithm-II", J Supercomput Vol. 80, pp. 25283-25314, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06385-2>
- [16]. O. Li, L. Yong, T. Yi, X. Juanxia, and C. Yijia, "Reconfiguration optimization of DC zonal distribution network of shipboard power system", in 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-

- 4, 2017.
<https://doi.org/10.3390/inventions2010004>
- [33]. T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaitti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, "Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey", in *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 10031-10061, 2022,
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>
- [34]. E. Elbeltagi, T. Hegazy, and D. Grierson, "Comparison among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 19, No. 1, pp. 43-53, Jan. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.01.004>
- [35]. W. Ooldridge, "An introduction to multiagent systems", John Wiley & Sons, 2009.
- [36]. K. L. Butler, and N. D. R. Sarma, "General reconfiguration methodology for AC radial shipboard power systems", in 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), Vol. 2, pp. 1226-1230, 23-27 Jan. 2000.
<https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850121>
- [37]. S. Khushalani, J. Solanki, and N. N. Schulz, "Optimized restoration of combined ac/dc shipboard power systems including distributed generation and islanding techniques", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 78, pp. 1528-1536, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.01.019>
- [38]. S. Bose, S. Pal, C. Scoglio, B. Natarajan, S. Das, and N. N. Schulz, "Analysis of optimized reconfiguration of power systems for electric ships", in *Proc. North American Power Symp.*, pp.1-7, 26-28 Sep. 2010.
<https://doi.org/10.1109/naps.2010.5618967>
- <https://doi.org/10.1109/tte.2016.2552720>
- [26]. IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships. *IEEE Standards 1709-2010*, 1-54, Nov. 2010.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5623440>
- [27]. J. V. Amy, "Condiserations in the Design of Naval Electric Power Systems", in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 7, pp. 57-68, 2002.
- [28]. N. Zohrabi, J. Shi, and S. Abdelwahed, "An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 104, No. May 2018, pp. 680-693, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.050>
- [29]. G. Sulligoi, S. Member, D. Bosich, and A. Vicenzutti, "Design of Zonal Electrical Distribution Systems for Ships and Oil Platforms: Control Systems and Protections", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 56, No. 5, pp. 5656-5669, 2020.
<https://doi.org/10.1109/tia.2020.2999035>
- [30]. Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Next-Generation Shipboard DC Power System", *IEEE Electrification Mag.*, Vol. 4, No. 2, pp. 45-57, 2016.
<https://doi.org/10.1109/mele.2016.2544203>
- [31]. L. Xu, J. M. Guerrero, A. Lashab, B. Wei, N. Bazmohammadi, J. Vasquez, and A. M. Abusorrah, "A Review of DC Shipboard Microgrids - Part I: Power Architectures, Energy Storage, and Power Converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 37, No. 5, pp. 5155-5172, May 2022,
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3128417>
- [32]. S. G. Jayasinghe, L. Meegahapola, N. Fernando, Z. Jin, and J. M. Guerrero, "Review of ship microgrids: System architectures, storage technologies and power quality aspects", *Inventions*, Vol. 2, No. 1, p.

¹ Shipboard Power System

² Distributed Energy Resources

³ Multi-Agent Systems

⁴ Agent

⁵ Cumulative Distribution Function

⁶ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

⁷ Demand Response Programs

⁸ Mixed-Integer Quadratic Programming

⁹ Aircraft Landing Problem

¹⁰ Particle Swarm Optimization

- ¹¹ Immune Artificial Intelligence System
- ¹² Grey Wolf Optimization
- ¹³ Genetic Algorithm
- ¹⁴ Flower Pollination Algorithm
- ¹⁵ Imperialist Competitive Algorithm
- ¹⁶ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
- ¹⁷ Chaos-based Adaptive Differential Algorithm
- ¹⁸ Differential Evolution for Multi-objective Optimization
- ¹⁹ Expected Probability of Damage
- ²⁰ Kennedy & Eberhart
- ²¹ Position
- ²² Velocity
- ²³ Personal Best
- ²⁴ Global Best
- ²⁵ Inertia Weight
- ²⁶ Newton-Raphson method
- ²⁷ Vital Loads
- ²⁸ Semi Vital Loads
- ²⁹ Non-Vital Loads
- ³⁰ Main Turbine Generator
- ³¹ Auxiliary Turbine Generator
- ³² Asynchronous Bus Transfer

