

طراحی سیستم مدیریت یکپارچه شبکه برق شناور مبتنی بر حذف بار

علی نوززاده^۱، محمدرضا علیزاده پهلوانی^{۲*}، آرش دهستانی کلاگر^۳، مهدی مصیبی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- استاد ۳- استادیار ۴- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱)

چکیده

در سال‌های اخیر علاوه بر دیزل ژنراتورها، منابع انرژی متنوعی نظیر منابع خورشیدی و ذخیره‌سازها در شبکه برق شناور حضور پیدا کرده‌اند. در این مقاله، سیستم مدیریت یکپارچه برق شناور مبتنی بر حذف بار، طراحی و شبیه‌سازی گردیده است. در این مسیر، سیستم مدیریت انرژی شناور در قالب مدل بهینه‌سازی غیرخطی فرمول‌بندی شده و تابع هدف، شامل کاهش هزینه سوخت، کاهش هزینه حذف بار، افزایش قابلیت اطمینان شناور و کاهش هزینه تلفات شبکه برق شناور، فرمول‌بندی شده است. محدودیت‌های فنی در بهره‌برداری از شبکه برق شناور و همچنین محدودیت‌های بهره‌برداری منابع نیز در حل مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. به منظور مقاوم ساختن پاسخ سیستم مدیریت انرژی در برابر عدم قطعیت‌ها، حالت‌های عملکردی مختلف شناور به همراه سطح بار و منابع تولید توان در هر حالت در نظر گرفته شده است. همچنین، جهت ارائه عملکرد راهکار پیشنهادی، یک شبکه برق استاندارد شامل شبکه برق ۳۳ باس IEEE به عنوان شبکه برق شناور لحاظ شده است. با اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB، نتایج استخراج و تحلیل گردیده است. مطابق نتایج، سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، قابلیت مطلوبی در مدیریت منابع انرژی شناور دارد.

کلیدواژه‌ها: شبکه برق شناور، سیستم مدیریت انرژی، مدیریت یکپارچه منابع انرژی

Integrated Management System Design for Shipboard Power System Based on Load Shedding

A. Nourzadeh, M. R. Alizadeh Pahlavani*, A. Dehestani Kolagar, M. Mosayebi

Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2024/03/27, Revised: 2024/05/04, Accepted: 2024/05/11, Published: 2024/05/31)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.1.5>

Abstract

In recent years, various energy sources such as solar sources and energy storage devices have been appeared in the shipboard power system. In this paper, the integrated control system of shipboard power grid has been designed and simulated based on load shedding. In this regard, the shipboard energy management system is formulated in the form of a nonlinear optimization model and then the objective function is formulated, including fuel cost, load shedding cost, shipboard reliability, and network losses. The technical limitations in the operation of shipboard power network as well as the limitations belong to the use of resources are also considered in solving the optimization problem. In order to make the response of the energy management system robust to uncertainties, different operating modes of the shipboard along with the load level and power generation sources have been considered in each mode. Moreover, in order to provide the performance of the proposed solution, a standard power grid, IEEE 33-bus power system, has been investigated as a shipboard power system. By performing the simulation in MATLAB software, the results have been extracted and analyzed. According to the results, the proposed energy management system has a favorable capability in managing shipboard energy resources.

Keywords: Shipboard Power Grid, Energy Management System, Integrated Management of Energy Resources

*Corresponding Author E-mail: a_dehestani@mut.ac.ir

۱. مقدمه

قابلیت اطمینان تأمین انرژی یکی از عوامل مهمی است که تأثیر زیادی در عملیات نظامی دارد. در طول تاریخ، ارتش‌ها به سوخت‌های فسیلی در شرایطی نظیر مأموریت‌های برون‌مرزی، قطع شبکه، زمین‌های نامناسب یا حملات سایبری که می‌تواند بر سامانه شبکه برق تأثیر بگذارد، متکی بودند. این وابستگی با معرفی منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید و فناوری‌های جدید برای ذخیره انرژی در اشکال مختلف تغییر کرده است. به این ترتیب قابلیت اطمینان و وابستگی متقابل سامانه‌های نظامی در رابطه با شبکه برق و مصرف سوخت‌های فسیلی افزایش می‌یابد. این سامانه‌های جدید را می‌توان در مناطق دورافتاده یا در سرزمین‌های متخاصم مورد استفاده قرارداد که نیاز به حمل و نقل سوخت برای حفظ پایگاه نظامی و در نتیجه، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و سامانه توزیع محلی را کاهش می‌دهد.

در دهه‌های اخیر، توجه به سامانه‌های الکتریکی در تأمین انرژی شناورها به دلیل مزایای بسیاری که ارائه می‌دهند، به طرف آن‌ها جلب شده است. صنعت حمل و نقل، در حال حاضر پایه و اساس اقتصاد ملی است. حمل و نقل دریایی ۸۰ درصد تجارت جهان را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. در حال حاضر، دیزل ژنراتورها هنوز منبع اصلی انرژی برای تمام کاربردهای دریایی هستند. باتوجه به استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، ناوگان دریایی سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. در نتیجه، علاقه فزاینده‌ای نسبت به بهبود بهره‌وری سوخت و کاهش ردپای زیست‌محیطی کشتی‌های دریایی وجود دارد [۲]. استفاده از منابع انرژی با راندمان بالا مانند پیل‌های سوختی و منابع انرژی تجدید پذیر مانند باد و انرژی خورشیدی فرصت‌هایی برای حل این مشکل خواهد بود [۳].

امروزه به دلیل وابستگی گسترده صنایع، فعالیت‌های تجاری و همچنین فعالیت‌های اجتماعی به شبکه قدرت، حفظ پایداری و امنیت این شبکه‌ها از دیدگاه اقتصادی و امنیتی اجتناب‌ناپذیر است. بدیهی است که در چنین شرایطی، تلاش برای استفاده مؤثر از کلیه ابزارهای موجود در راستای بهبود وضعیت پایداری سامانه‌های قدرت، یکی از اولویت‌های مهم محسوب می‌شود [۴]. انتخاب منابع انرژی متنوع نظیر دیزل ژنراتورها، منابع خورشیدی و ذخیره‌سازها به منظور تأمین انرژی در شبکه برق شناور، امری حیاتی برای بهره‌برداری بهینه و کاهش هزینه‌های تأمین انرژی این شناورها است [۶]. سامانه‌های خورشیدی، در تجهیزات دریایی کاربرد دارند و جهت تأمین برق چراغ‌های بندرها، شارژهای باتری در قایق‌های بادبانی از آن‌ها استفاده می‌شود [۷]. استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در صنعت کشتیرانی باتوجه به افزایش هزینه سوخت و آلودگی دریا افزایش -

یافته است. موتورهای دیزلی برای تأمین انرژی در کشتی‌ها، سوخت استفاده می‌کنند و این امر باعث آزاد شدن مقادیر زیادی گازهای خروجی مانند دی‌اکسید کربن و اکسید نیتروژن می‌شود که آب‌وهوا را آلوده می‌کند و باعث گرم شدن کره زمین و خطرات سلامتی برای انسان می‌شود. تا سال ۲۰۵۰ بسته به رشد اقتصادی آینده و تحولات انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای ممکن است بین ۵۰ تا ۲۵۰ درصد افزایش یابد. باتوجه به معایب سوخت فسیلی در سال ۲۰۱۰ سازمان بین‌المللی دریانوردی استانداردها و مقرراتی برای افزایش کیفیت زیست‌محیطی در سرتاسر جهان معرفی کرده است [۸]. این هدف نیازمند طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم کنترل یکپارچه برق شناور مبتنی بر حذف بار است که توانایی مدیریت انرژی بهینه و بهره‌برداری از منابع متنوع را با در نظر گرفتن حالت‌های عملکرد مختلف، کاهش هزینه‌های سوخت، حذف بار و تلفات شبکه را داشته باشد.

باتوجه به حجم روزافزون حمل و نقل دریایی و نقش استراتژیک آن و همچنین کارکرد مطمئن سامانه‌های مختلف تولید انرژی در کشتی، اهمیت این صنعت بیشتر نمایان می‌شود. موفقیت‌های زیادی در زمینه‌های فناوری علوم، سامانه‌های تولید انرژی، الکترونیک قدرت و ریز شبکه‌ها به وجود آمده است که سبب پراهمیت شدن این موضوع گردیده است [۹]. در نتیجه برای داشتن یک سیستم انرژی هیبریدی با حداقل آلاینده‌ها، استفاده از سلول‌های سوختی و باتری‌ها به منظور داشتن یک کشتی سازگار با محیط زیست ضروری است [۱۰].

بر این اساس، با ارائه یک سیستم مدیریت انرژی دریافت شد که مدیریت انرژی و اندازه اجزا منجر به تولید یک شناور با کارایی بالا می‌شود که می‌تواند در صنایع دریایی مورد استفاده قرار گیرد. یک مدل غیرخطی برای مدیریت انرژی بهینه شناورهای با انتشار صفر هیبریدی به عنوان منابع انرژی با در نظر گرفتن عوامل پیری پیل سوختی و ذخیره‌ساز پیشنهاد شد [۱۱]. کاهش مجموع هزینه‌های عملیاتی و کاهش عوامل پیری پیل سوختی و ذخیره‌ساز به عنوان اهداف مسئله انتخاب می‌شوند و نتایج مناسبی ارائه شد. افزایش حضور مبدل‌های الکترونیک قدرت در سامانه‌های برق شناور، عامل نفوذ هارمونیک‌ها در شبکه می‌باشند و باتوجه به ظرفیت محدود تولید توان شناور و حضور بارهای سنگین، وقوع ناپایداری ولتاژ به عنوان یک چالش اساسی مطرح شده است [۱۲]. یک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای استفاده در شناورهای تمام الکتریکی پیشنهاد شده است. سیستم ذخیره انرژی ترکیبی از دو بخش تشکیل شده است. یک باتری برای ذخیره انرژی و یک ذخیره ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا برای ذخیره توان با چگالی بالا. در این مرجع یک کنترل افت پویا^۱

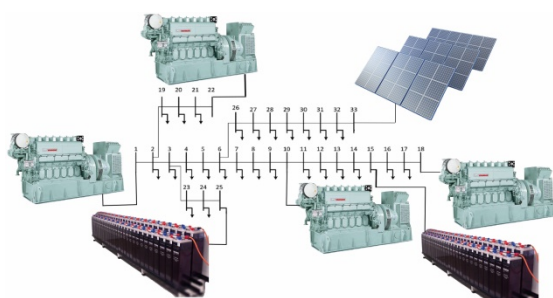
^۱ Dynamic Drop Control

این مقاله دارای اجزایی است که در چهار بخش تنظیم شده است. در بخش دوم، سیستم‌های مدیریت انرژی تشریح شده و سپس ساختار شبکه توزیع پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، شبیه‌سازی و نتایج حاصله ارائه و تحلیل شده است. سرانجام، در بخش چهارم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. سیستم‌های مدیریت انرژی

۲-۱. سیستم الکتریکی تغذیه شناور

برای طراحی سیستم مدیریت انرژی در شناور، لازم است تا یک شبکه آماده الکتریکی مربوط به شناور در دسترس باشد. باتوجه به عدم دسترسی به اطلاعات یک شبکه الکتریکی شناور واقعی در این مقاله از شبکه استاندارد ۳۳ شین به عنوان شبکه پایه برق شناور استفاده می‌شود. در این شبکه چهار دیزل ژنراتور، یک منبع تولید پراکنده خورشیدی و ذخیره‌ساز در باس‌های مشخص شده تعبیه شده است. در سایر باس‌ها، انواع بارهای موجود در شناور نظیر بارهای موتوری، روشنایی تجهیزات نظامی، رادارها و آنتن‌ها و ... تعبیه می‌شود. شکل (۱) شبکه برق شناور مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شبکه برق شناور مورد استفاده

هدف این مقاله طراحی سیستم مدیریت انرژی برای تعیین میزان بهینه تولید هر واحد دیزلی و تعیین ظرفیت بهینه سلول خورشیدی و ذخیره‌ساز به همراه میزان بهینه شارژ و دشارژ انرژی توسط ذخیره‌ساز است. در فرایند طراحی سیستم مدیریت انرژی، عدم قطعیت تابش خورشید در عملکرد شناور در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت بار الکتریکی مصرفی شناور نیز تابع حالت عملکرد شناور است که در اجرای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در هر لحظه از حالت کاری شناور، بار مصرفی، تابش خورشید و وضعیت شارژ ذخیره‌ساز تصمیم می‌گیرد که چگونه منابع انرژی داخل شناور را به نحو بهینه مدیریت نماید.

برای کنترل اولویت‌بندی شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز ترکیبی پیشنهاد شد. از آنجایی که با حضور ذخیره‌ساز، بارهای پالسی و تغییرات بار، توسط ذخیره‌ساز تغذیه می‌شود و از طرفی به دلیل چگالی توان و انرژی بالای ذخیره‌سازهای ترکیبی نسبت به باتری‌های الکترولیتی و همچنین نرخ شارژ و دشارژ بالای آن‌ها، سرعت پاسخ‌گویی این ذخیره‌سازها بالا بوده و می‌تواند زمینه پایداری ولتاژ سیستم تغذیه شناور را فراهم سازد [۱۳]. به منظور غلبه بر چالش افت ولتاژ در شبکه برق شناور، یک توپولوژی ترکیبی شامل یک فیلتر قدرت فعال ترکیبی متصل به تابلو از طریق یک فیلتر غیرفعال سری پیشنهاد گردیده و به موازات آن، یک خازن ثابت و راکتور کنترل‌شده با تایریستور در نظر گرفته شد و نتایج مثبتی را ارائه داد [۱۴]. توربین‌های بادی به عنوان منبع انرژی در شناورهای مدرن امروزی معرفی شده‌اند. توربین‌های بادی با تبدیل انرژی مکانیکی باد به انرژی الکتریکی باتوجه به وزش باد نسبتاً زیاد در سطح دریاها، در ابعاد مختلف در تأمین توان شناورها استفاده می‌شود [۱۵]. تحقیقات گسترده‌ای در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدشده توسط شناورهای دریایی انجام شده است و گنجاندن منابع انرژی تجدید پذیر، مانند سلول خورشیدی در کشتی‌های دریایی را بسیار مؤثر توصیف کردند [۱۶]. استفاده از پیشراندهای برقی یا دیزلی-الکتریکی در شناورهای دریایی امری عادی است [۱۷]. در شناورهای دریایی به عنوان مثال شناورهای عرضه سکو، شناورهای پشتیبانی غواصی و کشتی‌های حمل کانتینر، از سامانه‌های محرک دی‌الکتریک استفاده می‌شود چراکه این شناورها هم دارای پیشراندهای مکانیکی هستند که در طی عملیات دوربرد، با سرعت ثابت استفاده می‌شوند [۱۸]. معماری سامانه‌های تغذیه شناور اعم از سیستم‌های AC و DC مقایسه شد و نتایج مناسبی ارائه گردید. نتایج نشان داد که باوجود پیشرفت‌ها در هر دو زمینه سیستم‌های برق جریان متناوب و مستقیم، به دلیل امکان تبدیل دامنه ولتاژ در سیستم‌های برق جریان متناوب به کمک ترانسفورماتور، استفاده از آن‌ها فزونی یافته است [۱۹].

در این مقاله، یک سیستم کنترل یکپارچه برق شناور مبتنی بر حذف بار به طریقه‌ای بهینه، طراحی و به کمک شبیه‌سازی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور دستیابی به بهره‌برداری بهینه، مدل بهینه‌سازی غیرخطی مدیریت انرژی شناور ارائه شد که هدف آن شامل کاهش هزینه سوخت، مدیریت بهینه حذف بار، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش تلفات شبکه برق شناور بود. این مدل به طور هم‌زمان محدودیت‌های فنی مرتبط با بهره‌برداری از شبکه برق شناور و همچنین منابع انرژی را در نظر می‌گیرد تا سیستم مدیریت انرژی قادر به مقابله با عدم قطعیت‌ها و حالت‌های مختلف عملکرد شناور باتوجه به سطح بار و تولیدات خورشیدی باشد.

تابع هدف: در این کار هدف اصلی در طراحی سیستم کنترل و مدیریت انرژی برق شناور، حداقل کردن هزینه تأمین انرژی شبکه با در نظرگیری قابلیت اطمینان شبکه شناور است. براین اساس، ابتدا تابع هزینه بهینه‌سازی تعریف شده و در ادامه نیز قیود مسئله فرمول‌بندی می‌شود. رابطه (۱)، تابع هدف پیشنهادی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

$$\min F = \sum_{s=1}^S pro_s \times (C_{fuel,s} + C_{bat,s} + C_{relia,s} + C_{loss,s} + C_{lc,s}) \quad (1)$$

که در این عبارت داریم:

C_{fuel} : هزینه سوخت

C_{relia} : هزینه انرژی تأمین نشده شناور

C_{loss} : هزینه تلفات شبکه

C_{bat} : هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز

C_{lc} : هزینه حذف بار

pro_s : احتمال رخداد حالت عملکرد S ام

به‌منظور کنترل و مدیریت بهینه برق شناور و تعیین ظرفیت بهینه نصب منابع و همچنین تعیین وضعیت بهینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز، تابع هدف فوق تعیین شده است. این تابع هدف هزینه سوخت، هزینه شارژ و دشارژ باتری، هزینه انرژی تأمین نشده شناور، هزینه تلفات فیدرهای شبکه برق شناور و نهایتاً هزینه به‌کارگیری استراتژی مدیریت حذف بار را کمینه می‌کند. به‌منظور بهینه‌سازی تابع هدف فوق، مجموعه محدودیت‌های فنی و اقتصادی در نظر گرفته می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردد.

محدودیت‌ها: مجموعه قیود لحاظ شده در حل مسئله بهینه‌سازی در این بخش ارائه می‌شود.

• محدودیت پخش توان اکتیو

رابطه زیر، پایستگی و تعادل توان اکتیو در کل شبکه را نشان می‌دهد.

$$P_i(v, \delta) - P_{G_i} + P_{D_i} = 0 \quad (2)$$

i بیانگر شماره باس است که در این رابطه داریم:

$$P_i(v, \delta) = |V_i| \left| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \right| \quad (3)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \phi_{ij} \quad (4)$$

حالت‌های کاری شناور: حالت‌های کاری مختلف شناور می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

حالت اول: خاموشی کامل شناور (شامل از دست دادن تمام قدرت برای فرمان و نیروی محرکه) که باتری‌ها برای تأمین بار استفاده می‌شوند. این حالت معمولاً برای یک شناور لنگر انداخته و همچنین برای یک شناور در بندر قابل اجرا خواهد بود.

حالت دوم: حداقل یک دیزل ژنراتور روشن و متصل به شناور باشد. در این حالت، باتری‌ها بخشی از کار را بر عهده می‌گیرند و نیازی به اتصال ژنراتور به باتری‌ها نیست. این حالت ممکن است زمانی رخ دهد که باتری‌ها به‌عنوان منبع انرژی اصلی استفاده نمی‌شوند و حداقل یک ژنراتور باید در حال کار باشد.

حالت سوم: گسترش حالت اول با هدف کاهش خطر خاموشی است. بخشی از انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها به‌عنوان رزرو در دسترس قرار می‌گیرد. در این حالت، باتری‌ها همچنان نقشی در تأمین انرژی دارند و به‌عنوان انگیزه برای حفظ قابلیت‌های عملیاتی شناور استفاده می‌شوند.

حالت چهارم: حداقل یک دیزل ژنراتور روشن و متصل به شناور باشد. باتری‌ها همچنان کار می‌کنند و توان رزرو (ذخیره گردان) در هر باس وجود دارد که فوراً برای پوشش افزایش ناگهانی بار در دسترس باشد. ذخیره گردان مجموع ظرفیت استفاده نشده در موتورهای دیزلی در حال کار و متصل و علاوه بر آن حداکثر توانی است که ذخیره‌سازی می‌تواند برای حداقل مدت‌زمان قابل تنظیم تأمین کند.

حالت پنجم: نوع خاصی از حالت چهارم است. باتری‌ها به‌عنوان ذخیره گردان انرژی رزرو عمل می‌کنند. این امر نیاز به موتورهای دیزلی اضافی برای اتصال به ذخیره گردان موردنیاز را کاهش می‌دهد. این حالت یک نوع خاص از حالت قبل برای استفاده در عملیات حیاتی است که در آن توان کافی برای رسیدگی به یک خرابی در بدترین حالت فوراً در دسترس است. در این حالت باتری‌ها نیز اجازه دارند به‌عنوان ذخیره گردان (انرژی رزرو) عمل کنند. این امر نیاز به موتورهای دیزلی اضافی برای اتصال به ذخیره گردان موردنیاز را کاهش می‌دهد. الزامی که برای هر بخش اعمال می‌شود این است که مقدار (قابل تنظیم) توان آزاد (ذخیره گردان) باید فوراً برای پوشش افزایش ناگهانی بار در دسترس باشد.

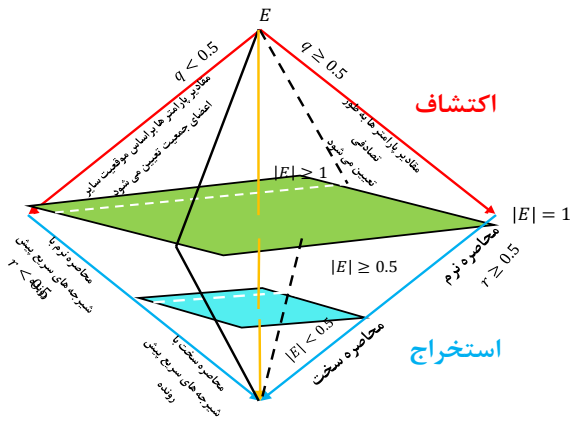
۲-۲. طراحی سیستم مدیریت و کنترل برق شناور

در این مقاله هدف اصلی در طراحی سیستم کنترل و مدیریت انرژی برق شناور، حداقل کردن هزینه تأمین انرژی شبکه با در نظرگیری قابلیت اطمینان شبکه شناور است. براین اساس، ابتدا تابع هزینه بهینه‌سازی تعریف شده و در ادامه نیز قیود مسئله فرمول‌بندی می‌شود.

۲-۳. تشریح الگوریتم شاهین هریس

الگوریتم شاهین هریس^۱ در سال ۲۰۱۹ توسط علی اصغر حیدری ابداع و ارائه گردید [۲۰]. این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت و الهام‌گرفته از طبیعت است که از رفتار مشارکتی و سبک تعقیب و گریز شاهین هریس و غافلگیری طعمه نشأت می‌گیرد. در این رفتار و استراتژی هوشمندانه چندین شاهین با همکاری یکدیگر، یک طعمه را از جهات مختلف موردحمله قرار می‌دهند تا آن را غافلگیر کنند. از این رفتار شاهین هریس برای به دام انداختن طعمه برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است.

در این بخش، مراحل اکتشاف^۲ و بهره‌برداری^۳ الگوریتم HHO با الهام از جستجوی طعمه، حملات غافلگیرکننده و استراتژی‌های مختلف حمله مدل‌سازی می‌شود. الگوریتم شاهین هریس یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت و بدون گرادیان است. از این‌رو، می‌توان آن را برای هر مسئله بهینه‌سازی با یک فرمول مناسب اعمال کرد. شکل (۲) تمام مراحل الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل الگوریتم شاهین هریس [20]

• محدودیت پخش توان راکتیو

رابطه زیر، پایستگی و تعادل توان راکتیو در کل شبکه را نشان می‌دهد.

$$Q_i(v, \delta) - Q_{G_i} + Q_{D_i} = 0 \quad [7] \quad (5)$$

که در این رابطه داریم:

$$G_i(v, \delta) = |V_i| \left| \sum_{j=1}^N V_j \right| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \quad [7] \quad (6)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \phi_{ij} \quad [7] \quad (7)$$

• محدودیت توازن توان اکتیو و راکتیو در کل ریز شبکه

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{D_i} - P_L = 0 \quad [7] \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} Q_{G_i} - \sum_{i=1}^{N_D} Q_{D_i} - Q_L = 0 \quad [7] \quad (9)$$

که در این رابطه، اندیس L به معنای تلفات، اندیس G بیانگر تولید و اندیس D بیانگر بار یا تقاضا است.

• قید ولتاژ باس

مطابق رابطه زیر، ولتاژ باس باید بین دو مقدار حد کمینه و حد بیشینه باشد.

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad [7] \quad (10)$$

که در این رابطه V_i ولتاژ باس i ام است. $V_{\max}$ و $V_{\min}$ نیز محدوده کمینه و بیشینه ولتاژ باس i ام است.

• قید ظرفیت اشغال شده فیدر

مطابق رابطه زیر، توان عبوری از فیدر به $F_{\max}$ یا همان حد حرارتی فیدر محدود شده است.

$$|F_j| \leq F_{\max} \quad [7] \quad (11)$$

مطابق این قید کل توان عبوری از فیدر i ام به $F_{\max}$ محدود شده است.

• قید تعداد کل ذخیره‌ساز قابل نصب در شبکه

رابطه زیر محدودیت تعداد کل ذخیره‌سازهای قابل نصب در شبکه را نشان می‌دهد.

$$N_{strg} \leq N_{strg \max} \quad (12)$$

که مطابق این رابطه، تعداد کل ذخیره‌سازهای مورد استفاده در شبکه از N_{strg} به $N_{strg \max}$ محدود شده است.

¹ Harris Hawks optimizer

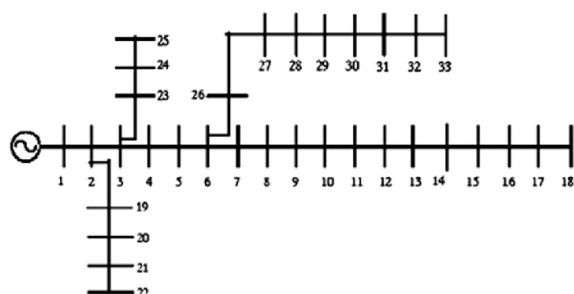
² Exploration

³ Exploitation

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم HHO: پیچیدگی محاسباتی الگوریتم HHO عمدتاً به سه فرآیند مقداردهی اولیه، ارزیابی تابع تناسب و به‌روزرسانی شاهین‌ها بستگی دارد. توجه داشته باشید که با N شاهین، پیچیدگی محاسباتی فرآیند مقداردهی اولیه $O(N)$ است. پیچیدگی محاسباتی مکانیزم به‌روزرسانی $O(T \times N) + O(T \times N \times D)$ است که از جستجوی بهترین مکان و به‌روزرسانی بردار مکان همه شاهین‌ها تشکیل شده است، جایی که T حداکثر تعداد تکرار است و D بعد مسئله است؛ بنابراین، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم شاهین هریس $O(N \times (T + TD + 1))$ است.

۳. ساختار شبکه توزیع پیشنهادی

به‌منظور کارایی سنجی عملکرد سیستم مدیریت انرژی شناور، شبکه توزیع برق شناور مطابق شبکه استاندارد ۳۳ باس در نظر گرفته می‌شود. دیاگرام تک‌خطی این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین جدول (۱) اطلاعات این شبکه را نشان می‌دهد. بارهای اعلامی در این شبکه، به‌عنوان بار نامی شناور در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی اولیه شبکه با فرض حضور تنها یک منبع دیزلی در باس یک، به اجرای پخش بار بر روی شبکه پرداخته شد. (شکل‌های ۴ و ۵)



شکل ۳. شبکه ۳۳ باس استاندارد IEEE

جدول ۱. اطلاعات شبکه برق شناور

مرحله اکتشاف در الگوریتم شاهین هریس: در این مرحله اکتشاف در الگوریتم HHO باتوجه به ماهیت شاهین هریس، می‌توان گفت این پرندگان می‌توانند طعمه را با چشمان قدرتمند خود ردیابی و تشخیص دهند، اما گاهی اوقات طعمه به‌راحتی دیده نمی‌شود. از این‌رو، شاهین‌ها منتظر می‌مانند و منطقه را مشاهده و نظارت می‌کنند تا شاید پس از چند ساعت طعمه‌ای را شناسایی کنند. شاهین‌های هریس به طور تصادفی در مکان‌هایی نشسته و منتظرند. اگر شانس q را برای هر راه‌برد به انتظار نشستن در نظر بگیریم، بر اساس دو استراتژی، طعمه شناسایی می‌شود:

۱- شاهین‌ها بر اساس موقعیت سایر شاهین‌ها و خرگوش نشسته و منتظر هستند. ($q < 0.5$)

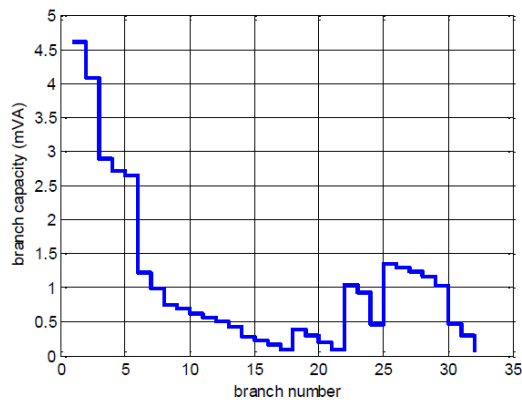
۲- یا بر روی درختان بلند به‌صورت تصادفی (مکان تصادفی در محدوده خانه گروه شاهین‌ها)، نشسته و منتظر هستند. ($q \geq 0.5$)

انتقال از مرحله اکتشاف به بهره‌برداری در الگوریتم شاهین هریس:

الگوریتم HHO می‌تواند از مرحله اکتشاف به بهره‌برداری و سپس بین رفتارهای استثماری مختلف، بر اساس انرژی فرار طعمه تغییر کند. انرژی یک طعمه در طول فرار به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. برای مدل‌سازی این واقعیت، انرژی یک طعمه به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (13)$$

E_0 می‌تواند به طور تصادفی در بازه $(-1, +1)$ در هر تکرار تغییر کند. هنگامی که مقدار E_0 از ۰ به ۱ کاهش می‌یابد، خرگوش از نظر فیزیکی احساس ضعف می‌کند، درحالی‌که زمانی که مقدار E_0 از ۰ به ۱ افزایش می‌یابد، به این معنی است که خرگوش در حال تقویت خود است. انرژی فرار دینامیکی E در طول تکرارها، روند کاهشی دارد.



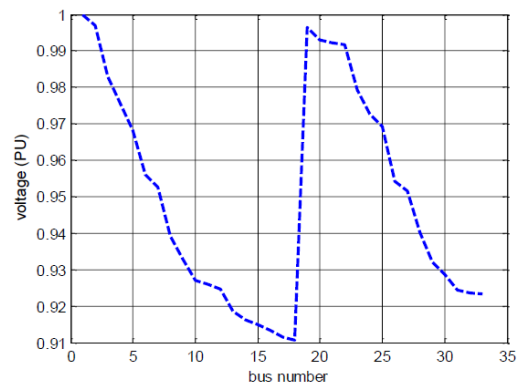
شکل ۵. توان هر فیدر شبکه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در منحنی ولتاژ باس‌ها در شبکه اولیه، ولتاژ باس‌های شبکه بیش از ۰/۰۵ افت کرده‌اند و از این‌رو در این تحقیق تلاش می‌شود تا سیستم مدیریت انرژی به نحوی عمل نماید که ولتاژ باس‌های شبکه در محدوده مجاز بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پر یونیت باشد.

به‌منظور اجرای شبیه‌سازی فرض می‌شود که منابع دیزل ژنراتور خورشیدی و ذخیره‌ساز در شبکه توزیع ۳۳ باس حضور پیدا کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود چهار ژنراتور دیزلی، یک منبع خورشیدی و دو ذخیره‌ساز در شبکه توزیع فرض شده است. ظرفیت منبع تولید پراکنده خورشیدی برابر با ۱۰ کیلووات در نظر گرفته می‌شود. همچنین ظرفیت هر واحد ذخیره‌ساز برابر با ۵۰۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. منابع دیزلی نیز با ظرفیت هر منبع معادل ۱ مگاوات در نظر گرفته می‌شود. مکان نصب منابع ثابت بوده و هدف تعیین نحوه بهره‌برداری از آن‌ها در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز برحسب حالت کاری شناور در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور اجرای شبیه‌سازی یک روز معادل ۲۴ ساعت در نظر گرفته می‌شود. ضریب بارگذاری شبکه شناور (بیانگر مقدار توان مورد نیاز شبکه بر حسب ضریبی از پر یونیت) در این ۲۴ ساعت مطابق منحنی شکل (۶) در نظر گرفته می‌شود. ضریب بارگذاری شبکه به‌عنوان یک عامل مفید در توصیف ویژگی‌های مصرف برق در یک دوره زمانی عمل می‌کند، زیرا بیانگر میزان مصرف انرژی در یک دوره زمانی معین است. در مقابل مقدار انرژی که در صورت روشن ماندن برق، در زمان پیک تقاضا مصرف می‌شد. در سمت مصرف‌کننده، ضریب بار بهبود یافته به این معنی است که تقاضا کاهش می‌یابد و اساساً میانگین هزینه واحد کیلووات ساعت را کاهش می‌دهد. داشتن ضریب بار بالاتر مطلوب است و ضریب بار کم به این معنی است که مصرف برق در مقایسه با زمانی که پیک تقاضای خود را کنترل می‌کرد ناکارآمد است. همچنین پروفیل توان خروجی منبع خورشیدی طی ۲۴ ساعت مطابق شکل (۷) در نظر گرفته می‌شود.

بار در باس گیرنده مقدار	P (KW)	Q (Kvar)	X (Ohm)	R (Ohm)	گیرنده باس	فرستنده باس
۱	۱۰۰	۶۰	۰/۰۴۷۰	۰/۰۹۲۲	۲	۱
۲	۹۰	۴۰	۰/۲۵۱۱	۰/۴۹۳۰	۳	۲
۳	۱۲۰	۸۰	۰/۱۸۶۴	۰/۳۶۶۰	۴	۳
۴	۶۰	۳۰	۰/۱۹۴۱	۰/۳۸۱۱	۵	۴
۵	۶۰	۲۰	۰/۷۰۷۰	۰/۸۱۹۰	۶	۵
۶	۳۰۰	۱۰۰	۰/۶۱۸۸	۰/۱۸۷۲	۷	۶
۷	۳۰۰	۱۰۰	۰/۲۳۵۱	۰/۷۱۱۴	۸	۷
۸	۶۰	۲۰	۰/۷۴۰۰	۱/۰۳۰۰	۹	۸
۹	۶۰	۲۰	۰/۷۴۰۰	۱/۰۴۴۰	۱۰	۹
۱۰	۴۵	۳۰	۰/۰۶۵۰	۰/۱۹۶۴	۱۱	۱۰
۱۱	۶۰	۳۵	۰/۱۳۲۸	۰/۳۷۴۴	۱۲	۱۱
۱۲	۶۰	۳۵	۱/۱۵۵۰	۱/۴۶۸	۱۳	۱۲
۱۳	۱۲۰	۸۰	۰/۷۱۲۹	۰/۵۴۱۶	۱۴	۱۳
۱۴	۶۰	۱۰	۰/۵۲۶۰	۰/۵۹۱۰	۱۵	۱۴
۱۵	۶۰	۲۰	۰/۵۴۵۰	۰/۷۴۶۳	۱۶	۱۵
۱۶	۶۰	۲۰	۱/۷۲۱	۱/۲۸۹	۱۷	۱۶
۱۷	۹۰	۴۰	۰/۵۲۴۰	۰/۷۳۲۰	۱۸	۱۷
۱۸	۹۰	۴۰	۰/۱۵۶۵	۰/۱۶۴۰	۱۹	۱۸
۱۹	۹۰	۴۰	۱/۳۵۵	۱/۵۰۴	۲۰	۱۹
۲۰	۹۰	۴۰	۰/۴۷۸۴	۰/۴۰۹۵	۲۱	۲۰
۲۱	۹۰	۴۰	۰/۹۳۷۳	۰/۷۰۸۹	۲۲	۲۱
۲۲	۹۰	۵۰	۰/۳۰۸۳	۰/۴۵۱۲	۲۳	۲۲
۲۳	۴۲۰	۲۰۰	۰/۷۰۹۱	۰/۸۹۸۰	۲۴	۲۳
۲۴	۴۲۰	۲۰۰	۰/۷۰۱۱	۰/۸۹۶۰	۲۵	۲۴
۲۵	۶۰	۲۵	۰/۱۰۳۴	۰/۲۰۳۰	۲۶	۲۵
۲۶	۶۰	۲۵	۰/۱۴۴۷	۰/۲۸۴۲	۲۷	۲۶
۲۷	۶۰	۳۰	۰/۹۳۳۷	۱/۰۵۹۰	۲۸	۲۷
۲۸	۱۲۰	۷۰	۰/۷۰۰۶	۰/۸۰۴۲	۲۹	۲۸
۲۹	۲۰۰	۶۰۰	۰/۲۵۸۵	۰/۵۰۷۵	۳۰	۲۹
۳۰	۱۵۰	۷۰	۰/۹۶۳۰	۰/۹۷۴۴	۳۱	۳۰
۳۱	۳۱۰	۱۰۰	۰/۳۶۱۹	۰/۳۱۰۵	۳۲	۳۱
۳۲	۶۰	۴۰	۰/۵۳۰۲	۰/۳۴۱۰	۳۳	۳۲

شکل‌های (۴ و ۵) به ترتیب منحنی ولتاژ باس‌های شبکه و منحنی تراکم فیدرهای شبکه را نشان می‌دهد. محور افقی در شکل‌های (۴ و ۵) به ترتیب شماره باس و شماره فیدر را نشان می‌دهد. محورهای عمودی نیز به ترتیب شامل دامنه ولتاژ باس و ظرفیت توان عبوری از فیدر است.

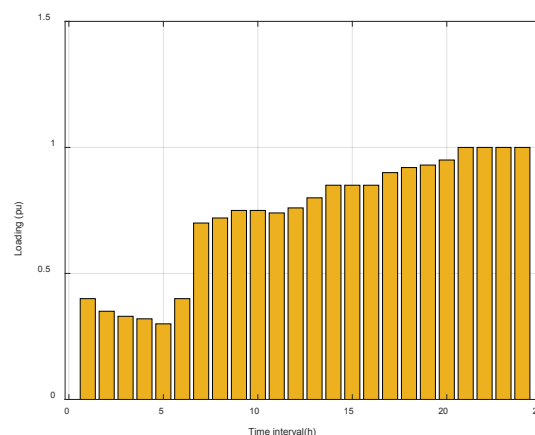


شکل ۴. پروفیل اولیه ولتاژ شبکه

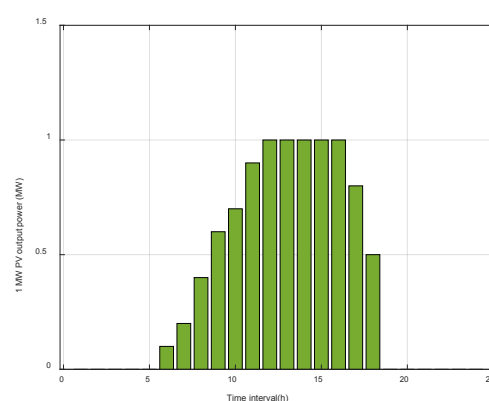
انرژی ذخیره‌شده، (مجموع انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌سازها) در دسترس باشد تا به‌عنوان مثال، اطمینان حاصل شود که در هر زمان، انرژی ذخیره‌شده کافی برای حرکت شناور وجود خواهد داشت. مثلاً این حالت زمانی رخ می‌دهد که یکی از منابع دیزلی در هنگام راه‌اندازی به مشکل برمی‌خورد و روشن نمی‌شود. در صورتی که کل انرژی ذخیره‌شده کمتر از حداقل مقدار موردنیاز باشد، حداقل یک موتور دیزل باید راه‌اندازی و وصل شود (باتری در صورتی می‌تواند به‌تنهایی بار را تأمین کند که ظرفیت انرژی آن کمی بیشتر از بار باشد).

حالت چهارم (ساعت ۱۷ تا ۱۹): در این حالت لازم است که حداقل دو دیزل ژنراتور روشن باشد. کارکرد فقط با باتری مجاز نیست. علاوه بر این لازم است مقدار قابل تنظیم، توان رزرو (ذخیره گردان) در هر بخش وجود داشته باشد که فوراً برای پوشش افزایش ناگهانی بار در دسترس باشد. این حالت با عملیات موقعیتیابی دینامیکی کلاسیک و همچنین سایر عملیات حیاتی شناور مطابقت دارد که در آن باید اطمینان حاصل شود که توان کافی برای رسیدگی به یک خرابی در بدترین حالت وجود دارد. در ساده‌ترین شکل آن شرط لازم این خواهد بود که هر بخش دارای انرژی رزرو کافی باشد تا در صورت ازکارافتادن کامل آن بخش، تمام بار بخش دیگر را به عهده بگیرد. در این حالت، انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز به‌عنوان رزرو محسوب نمی‌شود.

حالت پنجم (ساعت ۲۰ تا ۲۴): این حالت یک نوع خاص از حالت قبل برای استفاده در عملیات حیاتی است که در آن توان کافی برای رسیدگی به یک خرابی در بدترین حالت فوراً در دسترس است. در این حالت باتری‌ها نیز اجازه دارند به‌عنوان ذخیره گردان انرژی رزرو عمل کنند. این امر نیاز به موتورهای دیزلی اضافی برای اتصال به ذخیره گردان موردنیاز را کاهش می‌دهد. الزامی که برای هر بخش اعمال می‌شود این است که مقدار قابل تنظیم توان آزاد (ذخیره گردان) باید فوراً برای پوشش افزایش ناگهانی بار در دسترس باشد. ذخیره گردان مجموع ظرفیت استفاده‌نشده در موتورهای دیزلی در حال کار و متصل و علاوه بر آن، حداکثر توانی است که ذخیره‌سازی می‌تواند برای حداقل مدت‌زمان قابل تنظیم تأمین کند. (در این حالت ذخیره-ساز نیز در تأمین رزرو مشارکت می‌کند). به‌منظور ارزیابی جملات تابع هدف مطابق اطلاعات مرجع [۱۷] فرض می‌شود که منابع دیزلی به ازای هر کیلووات ساعت انرژی تولیدی معادل ۰/۱۸ کیلوگرم گازوئیل مصرف نمایند و هزینه هر کیلوگرم سوخت معادل ۱/۳۳ دلار در نظر گرفته می‌شود. به‌این‌ترتیب برای مگاوات ساعت انرژی الکتریکی تولیدی توسط منابع دیزلی ۲۳۹/۴ دلار هزینه می‌شود. هزینه راه‌اندازی منابع دیزلی نیز برابر با ۲/۲۸ دلار در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت نامی منابع دیزلی در باسهای ۱۰ و ۱۸ و ۲۲ برابر با یک مگاوات و ظرفیت منبع دیزلی در باس



شکل ۶. ضریب بارگذاری شبکه برق شناور



شکل ۷. توان خروجی منبع تولید پراکنده خورشیدی

حالت‌های کاری شناور به این صورت در نظر گرفته می‌شود [۱۷]: حالت اول (ساعت ۱۲ شب تا ۶ صبح): این حالت ساده‌ترین حالت است. در این حالت یک خرابی می‌تواند منجر به خاموشی کامل شناور شود. (شامل از دست دادن تمام قدرت برای فرمان و نیروی محرکه). در این حالت تنها نیاز این است که منابع تأمین انرژی برق موردنیاز بارها را تأمین کنند. این حالت برای یک شناور لنگرانداخته و همچنین برای یک شناور در بندر قابل‌اجرا خواهد بود. در این حالت، کارکرد فقط با باتری نیز در صورتی که باتری‌ها بتوانند بار را به‌تنهایی تأمین کنند، مجاز است. در این صورت همه موتورهای دیزل قطع می‌شود. اگر ظرفیت انرژی باتری بیش از بار بود، می‌تواند کاملاً بار را تأمین کند.

حالت دوم (ساعت ۷ تا ۱۴): در این حالت لازم است حداقل یک دیزل ژنراتور روشن و متصل باشد. کارکرد فقط با باتری مجاز نیست. این حالت تنها زمانی رخ می‌دهد که به دلایلی، از باتری‌ها به طور کامل به‌عنوان منبع انرژی واحد استفاده نشود و حداقل یک ژنراتور در حال کار باشد.

حالت سوم (ساعت ۱۵ تا ۱۶): این حالت گسترش‌یافته حالت اول با کاهش خطر خاموشی در دوره‌هایی است که شناور فقط با باتری کار می‌کند. در حالت اول، کار فقط با باتری مجاز است؛ اما در حالت دوم، لازم است که حداقل یک مقدار مشخصی از کل

هزینه راه اندازی	۲/۲۸ دلار
------------------	-----------

جدول ۴. ضرایب محاسبه هزینه تابع هدف

پارامتر	مقدار
هزینه برق ذخیره ساز	۴۵/۶ دلار بر مگاوات ساعت
هزینه برق دیزلی	۲۳۹/۴ دلار بر مگاوات ساعت
هزینه حذف بار	۲۶۶ دلار بر مگاوات ساعت
هزینه انرژی تأمین نشده	۳۸۰ دلار بر مگاوات ساعت
هزینه تلفات	۲۶۶ دلار بر مگاوات ساعت

به منظور بهینه سازی تابع هدف از الگوریتم شاهین هریس با تنظیماتی مطابق جدول (۵) استفاده می شود. همچنین جدول (۶) ساختار پاسخ بهینه را نشان می دهد.

جدول ۵. تنظیمات الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس

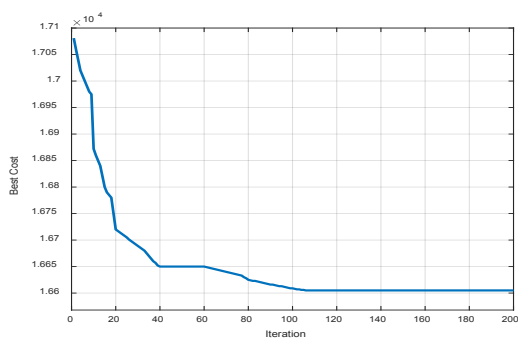
عبارت	مقدار
تعداد جمعیت	۲۰۰۰
تعداد تکرار	۱۰۰
ضریب انرژی E1	مقدار نزولی از ۲ تا صفر بر حسب تعداد
ضریب انرژی E0	عدد تصادفی بین ۱- تا ۱+
انرژی فرار	حاصل ضرب E0*E1
تعداد متغیر	۴۲

جدول ۶. ساختار پاسخ بهینه

۲۴ متغیر سوم	۲۴ متغیر دوم	۲۴ متغیر اول
توان خروجی دیزلی	وضعیت ذخیره ساز ۲	وضعیت ذخیره ساز
۲۴ متغیر هفتم	۲۴ متغیر ششم	۲۴ متغیر پنجم
میزان حذف بار	توان خروجی دیزلی	توان خروجی دیزلی

شبیه سازی و تحلیل نتایج حاصله

در این بخش با ملاحظات فوق الذکر، به اجرای شبیه سازی پرداخته شد. شکل (۸) روند بهبود تابع هدف را نشان می دهد. مشاهده می شود مقدار هزینه بر حسب دلار، نسبت به قبل از بهینه سازی کاهش یافته است. مقدار بهینه متغیرهای تصمیم گیری شامل توان خروجی منابع دیزلی، وضعیت بهینه ذخیره سازها و همچنین میزان بهینه حذف بار به ترتیب در جداول (۷-۹) ارائه شده است.



شکل ۸. روند بهبود تابع هدف

۱ برابر با ۲ مگاوات در نظر گرفته می شود. همچنین هزینه هر مگاوات ساعت شارژ و دشارژ ذخیره ساز، هزینه ای معادل ۴۵/۶ دلار در نظر گرفته می شود. همچنین هزینه هر مگاوات ساعت تلفات شبکه برابر با ۲۶۶ دلار در نظر گرفته می شود که هر مگاوات ساعت حذف بار و انرژی تأمین نشده، (در صورتی که مقدار توان مصرفی بیشتر از توان تولیدی باشد آن را با انرژی تأمین نشده تعریف می کنیم) نیز به ترتیب برابر با ۲۶۶ دلار و ۳۸۰ دلار در نظر گرفته می شود که تنها بارهای موجود در باس های ۴ و ۱۱ و ۲۰ امکان مشارکت در فرایند حذف بار را داشته باشند. ظرفیت هر ذخیره ساز معادل ۲ مگاوات ساعت و میزان نرخ شارژ و دشارژ ذخیره ساز نیز معادل ۲۰۰ کیلووات لحاظ می گردد. بازدهی شارژ و دشارژ ذخیره ساز نیز برابر با ۹۵ درصد در نظر گرفته می شود. میزان شارژ اولیه ذخیره ساز در محاسبات نیز برابر با ۶۰ درصد در نظر گرفته می شود. همچنین حداقل وضعیت شارژ ذخیره سازها با لحاظ ملاحظات حالت های مختلف برابر با ۰/۰۵ لحاظ شد که در برخی از حالات، این مقدار افزایش می یابد. میزان رزرو مورد نیاز در حالت های عملکرد چهارم و پنجم برابر با ۱۰ درصد بار شبکه هر ساعت در نظر گرفته می شود. مجموع میزان در بازه های زمانی مربوط شارژ ذخیره سازها نباید از میزان ۱۵ درصد کمتر شود. جداول (۲-۴) خلاصه ای از ملاحظات پیاده سازی، شامل پارامترهای ذخیره ساز، مشخصات منابع دیزلی مورد استفاده در شبکه و همچنین ضرایب هزینه برای محاسبه تک تک جملات تابع هدف را نشان می دهند.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به ذخیره سازی

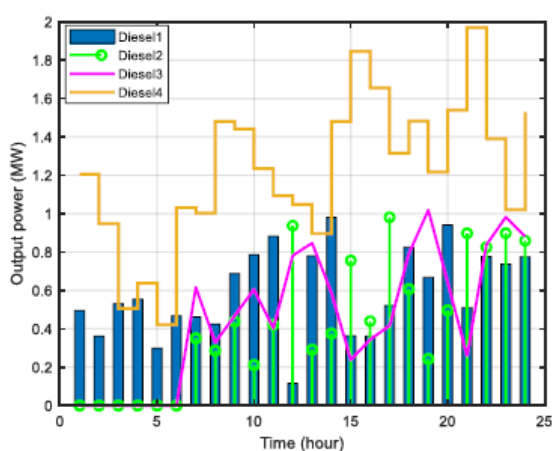
پارامتر	مقدار
ظرفیت ماکزیمم	۲ مگاوات ساعت
نرخ شارژ و دشارژ	۲۰۰ کیلووات
بازدهی شارژ و دشارژ	۹۵ درصد
شارژ اولیه	۶۰ درصد

جدول ۳. پارامترهای مربوط به منبع دیزل ژنراتور

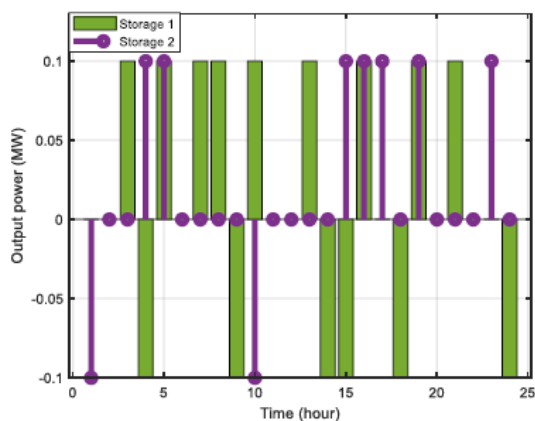
پارامتر	مقدار
ظرفیت نامی منابع در باس های ۱۰ و ۱۸ و ۲۲	۱ مگاوات
ظرفیت نامی منبع در باس ۱	۲ مگاوات
نرخ تبدیل سوخت به برق	۰/۱۸ کیلوگرم بر کیلووات -
هزینه سوخت	۱/۳۳ دلار بر کیلوگرم
بازدهی	۰/۹۵

۷	۱۵	۱۹	۶/۱
۸	۶/۲	۲۰	۸/۱
۹	۷/۴	۲۱	۶/۳
۱۰	۸/۱	۲۲	۸/۵
۱۱	۵	۲۳	۵/۳
۱۲	۱۱/۵	۲۴	۱/۷

به‌منظور نمایش گرافیکی و بهتر نتایج، شکل (۹ و ۱۰) به ترتیب توان خروجی منابع دیزلی و وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای اول و دوم را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۱) درصد حذف بار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم مدیریت بهینه انرژی طراحی شده، توانسته است از ظرفیت همه منابع استفاده کند. اینک به‌منظور نمایش کارایی پاسخ پیشنهادی با اعمال پاسخ بهینه بر روی شبکه برق شناور، وضعیت فنی عملکرد شبکه شناور در ادامه گزارش شده است. شکل (۱۲) تلفات فیدرهای شبکه توزیع برق شناور را در حضور پاسخ بهینه نشان داده و با وضعیت حالت عادی مقایسه کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان تلفات فیدرها در شبکه برق شناور کاهش قابل توجهی یافته است.



شکل ۹. توان خروجی منابع دیزل ژنراتور



شکل ۱۰. وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها در زمان‌های مختلف

جدول ۷. وضعیت شارژ ذخیره‌سازی

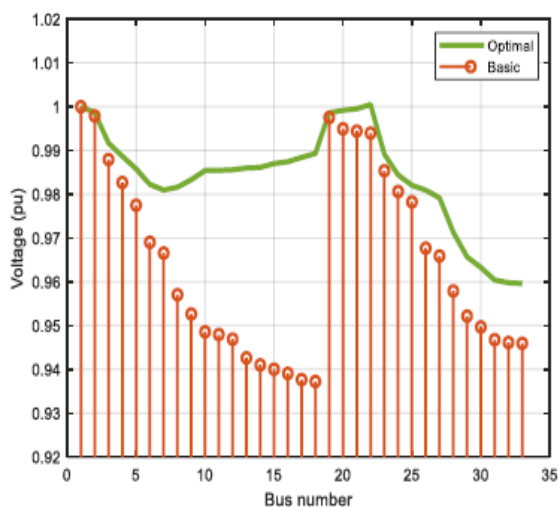
عبارت	مقدار
تعداد جمعیت	۲۰۰۰
تعداد تکرار	۱۰۰
ضریب انرژی	مقدار نزولی از ۲ تا صفر برحسب تعداد
ضریب انرژی	عدد تصادفی بین -۱ تا +۱
انرژی فرار	حاصل ضرب E0×E1
تعداد متغیر	۴۲

جدول ۸. توابع خروجی منابع دیزل ژنراتور

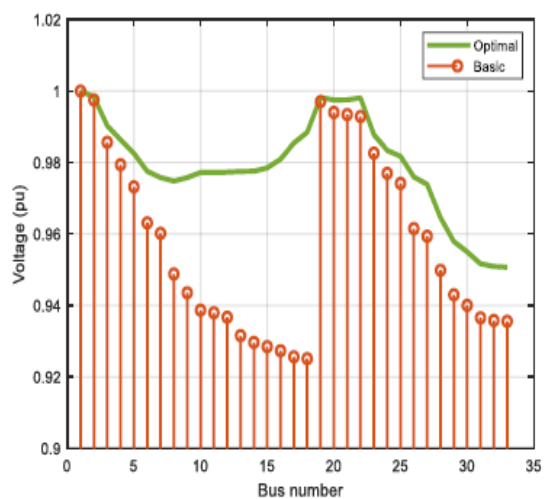
بازه	دیزلی ۱ (مگاوات)	دیزلی ۲ (مگاوات)	دیزلی ۳ (مگاوات)	دیزلی ۴ (مگاوات)
۱	۰/۴۹	۰	۰	۱/۲۰
۲	۰/۳۶	۰	۰	۰/۹۴
۳	۰/۵۳	۰	۰	۰/۵۰
۴	۰/۵۵	۰	۰	۰/۶۳
۵	۰/۲۹	۰	۰	۰/۴۲
۶	۰/۴۶	۰	۰	۱/۰۳
۷	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۶۱	۱/۰۰
۸	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۳۲	۱/۴۸
۹	۰/۶۸	۰/۴۳	۰/۴۶	۱/۴۴
۱۰	۰/۷۸	۰/۲۱	۰/۶۰	۱/۲۳
۱۱	۰/۸۸	۰/۴۲	۰/۴۰	۱/۰۹
۱۲	۰/۱۱	۰/۹۳	۰/۷۸	۱/۰۴
۱۳	۰/۷۷	۰/۲۹	۰/۸۴	۰/۸۹
۱۴	۰/۹۸	۰/۳۷	۰/۵۸	۱/۴۸
۱۵	۰/۳۶	۰/۷۵	۰/۲۳	۱/۸۴
۱۶	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۳۴	۱/۶۵
۱۷	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۴۱	۱/۳۱
۱۸	۰/۸۲	۰/۶۰	۰/۷۹	۱/۴۸
۱۹	۰/۶۶	۰/۲۴	۱/۰۱	۱/۲۱
۲۰	۰/۹۴	۰/۴۹	۰/۶۴	۱/۵۴
۲۱	۰/۵۰	۰/۸۹	۰/۲۵	۱/۹۶
۲۲	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۳	۱/۳۵
۲۳	۰/۴۹	۰	۰	۱/۲۰
۲۴	۰/۳۶	۰	۰	۰/۹۴

جدول ۹. میزان بهینه حذف بار شناور در بازه‌های زمانی مختلف

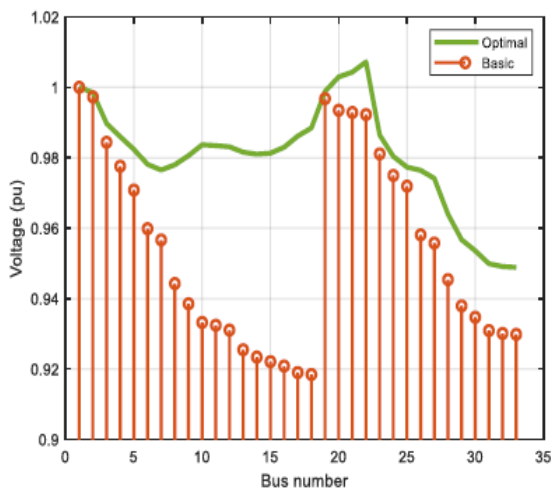
بازه زمانی	میزان حذف بار (%)	بازه زمانی	میزان حذف بار (%)
۱	۷/۶	۱۳	۱۴/۸
۲	۶	۱۴	۴/۵
۳	۵/۳	۱۵	۱۴/۸
۴	۱۲/۶	۱۶	۱۳/۴
۵	۲/۸	۱۷	۵/۴
۶	۵/۲	۱۸	۸/۵



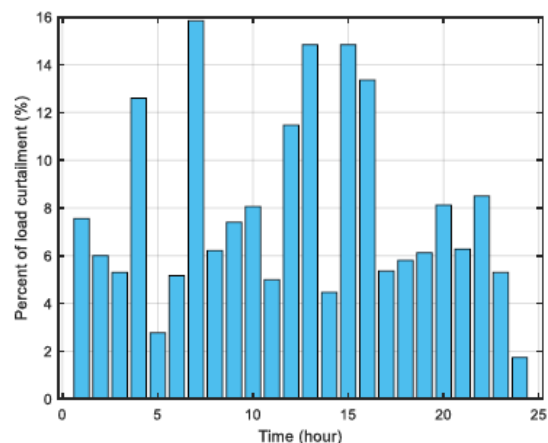
شکل ۱۴. مقایسه منحنی ولتاژ در ۸ حالت دوم



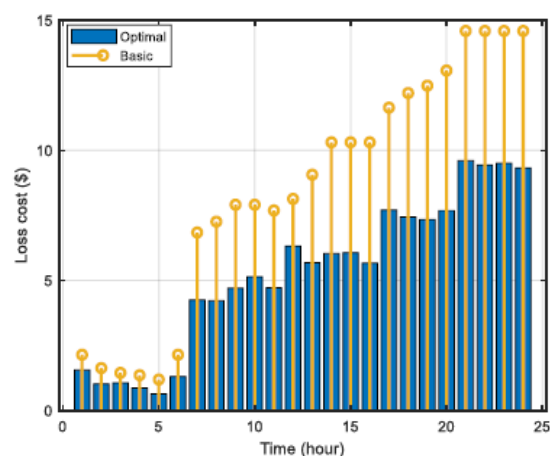
شکل ۱۵. مقایسه منحنی ولتاژ در ۱۵ حالت سوم



شکل ۱۶. مقایسه منحنی ولتاژ در ۱۸ حالت چهارم

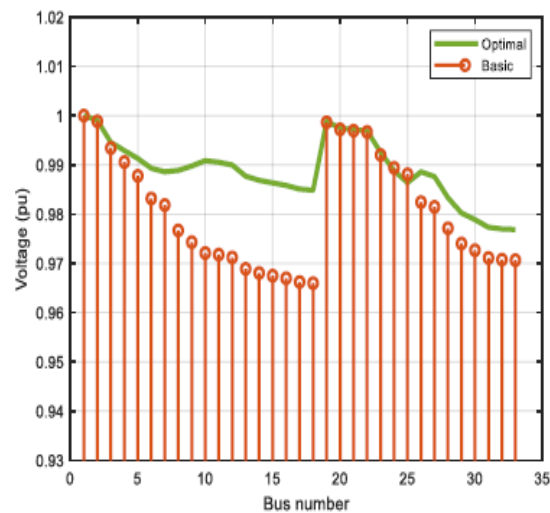


شکل ۱۱. وضعیت بهینه حذف بار

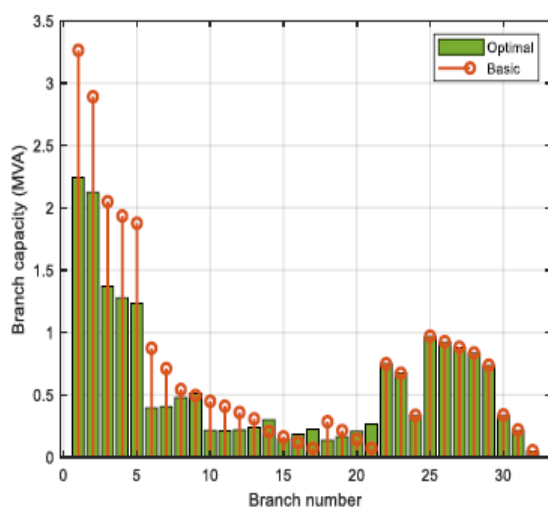


شکل ۱۲. مقایسه تلفات شبکه شناور قبل و بعد از اجرای سیستم مدیریت انرژی

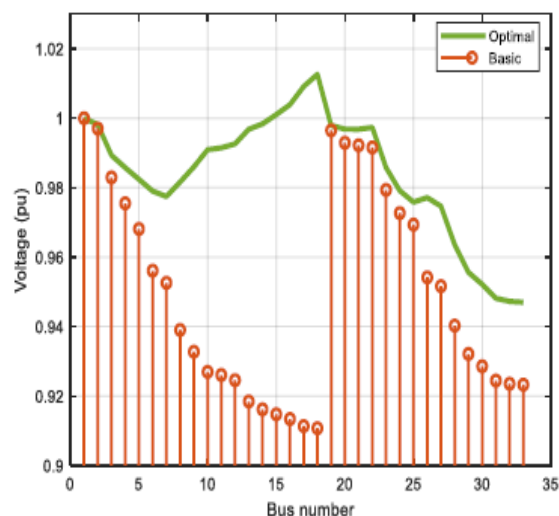
شکل‌های (۱۳-۱۷) منحنی ولتاژ باس‌های شبکه برق را به ازای عملکرد حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان انحرافات ولتاژ باس‌های شبکه کاهش یافته و وضعیت بهره‌برداری از شبکه برق شناور بهبود فراوانی یافته است.



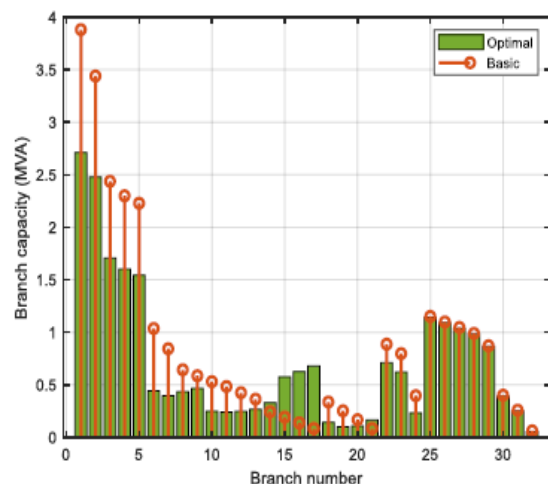
شکل ۱۳. مقایسه منحنی ولتاژ در ۱ حالت اول



شکل ۱۹. مقایسه منحنی تراکم فیدرهای شناور در ساعت ۸ در حالت دوم

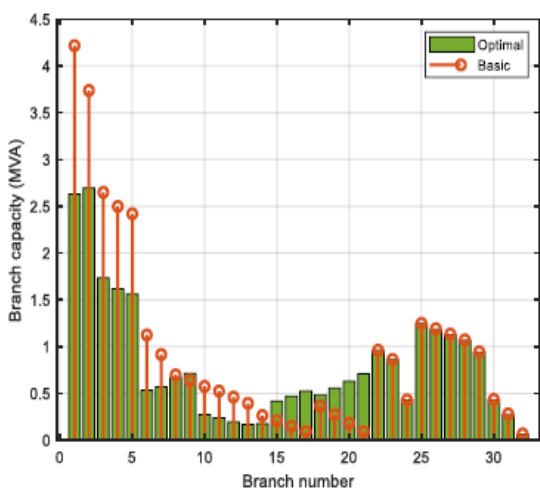


شکل ۱۷. مقایسه منحنی ولتاژ در ساعت ۲۱ در حالت پنجم

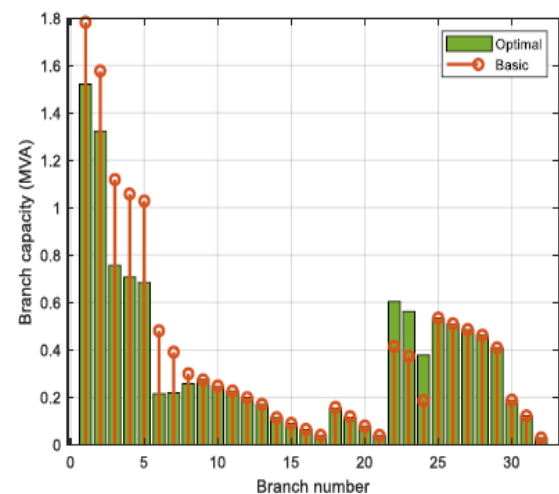


شکل ۲۰. مقایسه منحنی تراکم فیدرهای شناور در ساعت ۱۵ در حالت سوم

شکل‌های (۱۸-۲۲) نیز منحنی تراکم فیدرهای شبکه برق را به ازای حالت‌های کاری مختلف شناور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم مدیریت برق شناور توانسته است به نحوی از پتانسیل ذخیره‌سازها و منابع دیزل ژنراتور و همچنین از قابلیت حذف بار شناور استفاده کند که وضعیت بهره‌برداری از شبکه بهبود یابد. شکل (۱۹) که میزان تراکم فیدرهای مختلف شبکه را نشان می‌دهد، کمترین حد بارگذاری شناور است. در طرف مقابل حالت پنجم بهره‌برداری شناور بیشترین ضریب بارگذاری شبکه برق شناور را شامل می‌شود. در همه حالت‌های کاری وضعیت شبکه برق شناور تأمین شده است. جدول (۱۰) مقدار عددی جملات مختلف تابع هدف، شامل هزینه برق منابع دیزل ژنراتور، هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، هزینه حذف بار و هزینه تلفات فیدرهای شبکه را نشان داده است.



شکل ۲۱. مقایسه منحنی تراکم فیدرهای شناور در ساعت ۱۸ در حالت چهارم

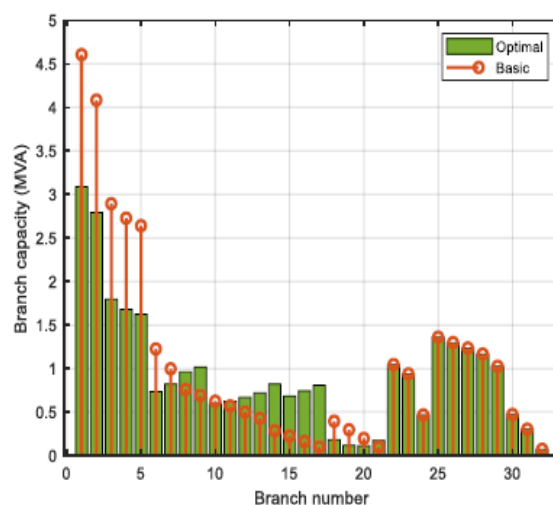


شکل ۱۸. مقایسه منحنی تراکم فیدرهای شناور در ساعت ۱ در حالت اول

تغذیه انرژی در این نوع شناورها با چالش‌های جدیدی مواجه شده‌اند. تنوع منابع تولید انرژی برای شناورها شامل دیزل، ذخیره‌سازها و منابع تولید پراکنده خورشیدی است. از این‌رو، اهمیت توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی یکپارچه در شناورها، برای بهینه‌سازی تولید و مصرف انرژی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فرمول‌بندی شده است که تابع هدف آن شامل کاهش هزینه تلفات، کاهش هزینه سوخت، کاهش هزینه حذف بار و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق شناور است. به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی، از الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس بهره گرفته شده است. نتایج حاکی از موفقیت سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی هستند. با اجرای راهکار پیشنهادی، تلفات شبکه کاهش‌یافته و هزینه‌های سوخت به حداقل رسیده‌اند. همچنین، افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق شناور نیز از جمله اثرات مثبت دیگر این سیستم مدیریت انرژی است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از راهکار پیشنهادی، میزان بار در فرایند حذف بار از شبکه برق شناور به حداقل رسیده است. در نتیجه، سیستم مدیریت انرژی یکپارچه برق شناور به‌عنوان یک راهکار مؤثر و کارآمد می‌تواند در بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی و افزایش اطمینان شبکه برق شناور مورد استفاده قرار گیرد.

۵. مراجع‌ها

- [1] Pan, P.; Sun, Y.; Yuan, C.; Yan, X.; Tang, X. "Research Progress on Ship Power Systems Integrated with New Energy Sources: A review"; *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2021, 144: 111048. DOI:10.1016/j.rser.2021.111048
- [2] Ribeiro, P. F.; Johnson, B. K.; Crow, M. L.; Arsoy, A.; Liu, Y. "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications"; *Proc. IEEE.* 2001, 89, (12):1744-1756. DOI:10.1109/5.975900
- [3] Chen, H.; Cong, T.N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; Ding, Y. "Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review"; *Prog. Nat. Sci.* 2009; 19, (3):291-312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014
- [4] Gaffarpour, R.; Ranjbar, A. "Presentation of Special Protection Scheme in Power System to Reduce Graphite Bomb Attacks Damages"; *J. Adv. Defence Sci. Technol.* 2017, 4, 33-34 (InPersian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1396.8.1.4.2>
- [5] Shahriyari, M.; Khoshkhou, H. "A Novel Approach for Fast Prediction of Transient Angle Stability Status in Power Systems"; *J. Adv. Defence Sci. Technol.* 2020, 3, 309-324 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1399.11.3.8.1>
- [6] Kumar, J.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K. "Technical Design Aspects of Harbour Area Grid for Shore to Ship Power: State of the Art and Future Solutions"; *Int. J. Elec. Ppower.* 2019, 104, :840-852. DOI:10.1016/j.ijepes.2018.07.051
- [7] Ghafarpour, R.; Janati oskoei, M. "Resiliency, an Answer to Existing Passive Defense Concerns About the Classical Reliability-Oriented View in Electric Power



شکل ۲۲. مقایسه منحنی تراکم فیدرهای شناور در ساعت ۲۱ در حالت پنجم

مطابق نتایج جدول (۱۰)، سیستم مدیریت انرژی با حذف بارهای کم‌اهمیت در برخی از ساعت‌ها، عملاً با کاهش میزان بار، میزان نیاز به منابع انرژی را کاهش داده است. همچنین با بهره‌گیری از ذخیره‌ساز، توانسته است در برخی از ساعات شبانه‌روز میزان استفاده از منابع دیزلی را کاهش دهد. همچنین قابل مشاهده است که با نصب منابع متنوع انرژی در باس‌های مختلف شبکه، عملاً فاصله نقاط تولید و مصرف انرژی کاهش‌یافته و در نتیجه از هزینه تلفات شبکه کاسته شده است. در نهایت مشاهده می‌شود که سامانه مدیریت انرژی با صدور اطلاعیه‌های در هر ساعت، بهره‌بردار را برای حذف میزان مشخصی از بار آگاه می‌سازد و به این صورت، جلوی انرژی از دست‌رفته ناشی از کمبودهای ناگهانی انرژی را می‌گیرد. به این ترتیب هزینه انرژی تأمین نشده نیز برابر با صفر شده است.

جدول ۱۰. مقدار عددی جملات تابع هدف (بر مبنای دلار)

شبکه عادی	شبکه بهینه	
۲۰۱۷۳/۴۴	۱۵۵۹۹/۴۱۸	هزینه برق دیزل ژنراتور
۰	۴۳۷/۷۶	هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها
۰	۸۴/۷	هزینه حذف بار
۰	۰	هزینه انرژی تأمین نشده
۶۵۹/۴۱	۴۸۳/۷۷	هزینه تلفات

۴. نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به مطالعه و بررسی سیستم مدیریت یکپارچه انرژی برق شناورها می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، بهره‌برداری بهینه از منابع مختلف انرژی در کنار استفاده از استراتژی حذف بار است. در سال‌های اخیر، با توسعه شناورها و افزایش مصرف‌کننده‌های الکتریکی و پیشرفته‌های الکتریکی، شبکه‌های

- Networks"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2019, 6, 1-22 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1398.10.1.1.3>
- [8] Palizvan, M.; Dashti, R. "Reinforcing Power Network Infrastructures by Employing Passive Defense Applications"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2019, 2, 57-67 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1397.9.4.6.7>
- [9] Ghafarpour, R.; Alizadeh, M. "Resiliency Concept Explanation in Electricity Network and its Relationship with Passive Defense"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2020, 6, 51-64 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1397.9.4.6.7>
- [10] Letafat, A.; Rafiei, M.; Sheikh, M.; Afshari-Igder, M.; Banaei, M.; Boudjadar, J. "Simultaneous Energy Management and Optimal Components Sizing of a Zero-Emission Ferry Boat"; J. Energy. Stor. 2020, 28, :101215. DOI:10.1016/j.est.2020.101215
- [11] Banaei, M.; Boudjadar, J.; Khooban, M. H. "Stochastic Model Predictive Energy Management in Hybrid Emission-Free Modern Maritime Vessels"; IEEE Trans. Ind. Informat. 2021, 17,(8): 40-5430-5440. DOI:10.1109/TII.2020.3027808
- [12] Terriche, Y.; Su, C. L.; Lashab, A.; Mutarraf, M. U.; Mehrzadi, M.; Guerrero, J. M. "Design of Cost-Effective Compensators to Enhance Voltage Stability and Harmonics Contamination of High-Power More Electric Marine Vessels"; IEEE Trans. Ind. Appl. 2021, 57, (4):4130-4142. DOI:10.1109/TIA.2021.3081079
- [13] Alafnan, H.; Zhang, M.; Yuan, W.; Zhu, J.; Li, J.; Elshiekh, M. "Stability Improvement of DC Power Systems in an All-Electric Ship Using Hybrid SMES/Battery"; IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018, 28, (3):1-6. DOI:10.1109/TASC.2018.2794472
- [14] Terriche, Y.; Mutarraf, M. U.; Mehrzadi, M.; Su, C. -L.; Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C. "Power Quality and Voltage Stability Improvement of Shipboard Power Systems with Non-Linear Loads"; 2019 IEEEIC / I&CPS Europe; DOI:10.1109/IEEEIC.2019.8783356
- [15] Bockmann, E.; Steen, S. "Wind Turbine Propulsion of Ships"; Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany; 2011.
- [16] Han, C. -Hh. "Strategies to Reduce Air Pollution in Shipping Industry"; The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2010, 26, (1):7-29. DOI:10.1016/S2092-5212(10)80009-4
- [17] Lan, H.; Wen, S.; Hong, Y. -Y.; Yu, D. C.; Zhang, L. "Optimal Sizing of Hybrid PV/Diesel/Battery in Ship Power System"; Appl. Energ. 2015, 158, :26-34. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.08.031
- [18] Patel, M. R. "Shipboard Electrical Power Systems"; CRC Press; 2021. DOI: 10.1201/9781003191513
- [19] Chai, M.; Bonthapalle, D. R.; Sobrayen, L.; Panda, S. K.; Wu, D.; Chen, X. "Alternating Current and Direct Current-Based Electrical Systems for Marine Vessels with Electric Propulsion Drives"; Appl. Energ. 2018, 231, :747-756. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.09.064
- [20] Heidari, A. -A.; Mirjalili, S.; Faris, H.; Aljarah, I.; Mafarja, M.; Chen, H. "Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications"; Future. Gener. Compsy. 97, 849-872. DOI:10.1016/j.future.2019.02.028