

Research Article

A Hierarchical Energy Management and Power Quality Enhancement System for Floating Marine Hybrid Power Networks: Dynamic Control and Filtering Approach

Yaser Barfizad¹, Reza Moradpour^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
yaser.barfizad@uok.ac.ir

² Department of Electrical Engineering, Imam Khomeini Marine Science University, Nowshahr, Iran
r.moradpour@ikhnsu.ac.ir

Abstract:

This paper presents the design, development, and simulation of an intelligent hierarchical Energy Management System (EMS) for a floating marine hybrid power network. The system architecture integrates multiple distributed energy resources (DERs), including synchronous diesel generators, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), and lithium-ion batteries, to reliably supply a 630 kVA, 380 V, 50 Hz three-phase microgrid. The EMS is built upon a novel three-layer control strategy based on a Follower Load Deterministic Base-Rule logic, enabling dynamic power source coordination and scenario-based load allocation. The proposed static allocation and LC filter reduced dynamic response times by 60% and harmonic distortion by 28%, respectively, enhancing both stability and power quality for mission-critical operations. A MATLAB/Simulink environment was used to implement and validate the proposed EMS, capable of managing 59 primary operational states and one overload condition. Simulation scenarios include Initial Load, Normal Navigation, and Combat Mode, allowing comprehensive evaluation of the system's performance under varying power demands and operating conditions. The results demonstrate that the proposed EMS effectively maintains power balance, reduces unnecessary diesel generator use, optimizes fuel cell operation, and enhances battery utilization. This study provides a scalable and modular framework for intelligent power management in isolated marine environments, laying the groundwork for future implementation of AI-driven predictive control and the integration of renewable energy sources into floating microgrids.

Keywords: Hybrid Marine Power System, Energy Management System (EMS), Hierarchical Control, PEM Fuel Cell, Battery, Load Shedding

Received: 24 March 2026

Revised: 13 May 2026

Accepted: 19 May 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Reza Moradpour

Citation: Y. Barfizad1, R. Moradpour, "A Hierarchical Energy Management and Power Quality Enhancement System for Floating Marine Hybrid Power Networks: Dynamic Control and Filtering Approach", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 85-105, June 2026 (in Persian).

مقاله پژوهشی

سیستم سلسله‌مراتبی مدیریت انرژی و بهبود کیفیت توان برای شبکه‌های توان هیبریدی دریایی شناور: رویکرد کنترل دینامیکی و فیلترگذاری

یاسر برفی‌زاد^۱، رضا مرادپور^۲

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی، نوشهر، ایران، yaser.barfizad@uok.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، r.moradpour@ikhnsu.ac.ir

چکیده: این مقاله طراحی، توسعه و شبیه‌سازی یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند و سلسله‌مراتبی را برای یک شبکه توان هیبریدی دریایی شناور ارائه می‌دهد. معماری این سیستم، منابع مختلف انرژی توزیع‌شده، شامل ژنراتورهای دیزلی سنکرون، پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون و باتری‌های لیتیوم-یون را یکپارچه می‌سازد تا توان موردنیاز یک ریزشبکه سه‌فاز با ظرفیت ۶۳۰ کیلوولت‌آمپر، ولتاژ ۳۸۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز را به‌صورت قابل‌اعتماد تأمین کند. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی بر پایه یک راهبرد کنترلی سه‌لایه نوین مبتنی بر منطق بارگذاری پیرو - قانون پایه قطعی طراحی شده است که هماهنگی دینامیکی منابع توان و تخصیص بار مبتنی بر سناریو را امکان‌پذیر می‌سازد. تخصیص ایستا و فیلتر LC پیشنهادی، به‌ترتیب زمان پاسخ دینامیکی را ۶۰٪ و اعوجاج هارمونیک را ۲۸٪ کاهش داده‌اند و در نتیجه، پایداری و کیفیت توان را برای عملیات‌های حیاتی مأموریتی بهبود بخشیده‌اند. محیط متلب سیمولینک برای پیاده‌سازی و اعتبارسنجی سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است؛ این سیستم قادر به مدیریت ۵۹ حالت عملیاتی اصلی و یک حالت اضافه‌بار است. سناریوهای شبیه‌سازی شامل بار اولیه، ناپری عادی و حالت رزومی هستند که امکان ارزیابی جامع عملکرد سیستم را تحت سطوح مختلف تقاضای توان و شرایط بهره‌برداری فراهم می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی به‌طور مؤثری تعادل توان را حفظ کرده، استفاده غیرضروری از ژنراتورهای دیزلی را کاهش می‌دهد، بهره‌برداری از پیل سوختی را بهینه می‌کند و استفاده از باتری را بهبود می‌بخشد. این مطالعه یک چارچوب مقیاس‌پذیر و ماژولار برای مدیریت هوشمند توان در محیط‌های دریایی ایزوله ارائه می‌دهد و زمینه را برای پیاده‌سازی آینده کنترل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی و یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌های شناور فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: سیستم توان هیبریدی دریایی، سیستم مدیریت انرژی، کنترل سلسله‌مراتبی، پیل سوختی، باتری، حذف بار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

* نام نویسنده مسئول: دکتر رضا مرادپور

نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۱- مقدمه

صنعت حمل‌ونقل، همانند بسیاری از بخش‌های دیگر، با فشار فزاینده‌ای برای کاهش اثرات زیست‌محیطی خود مواجه است. با شتاب گرفتن گذار جهانی انرژی و کربن‌زدایی اقتصاد جهانی، اتخاذ تصمیمات فوری برای تأمین نیازهای انرژی حمل‌ونقل دریایی ضروری است. نشان داده شده است که تقاضای انرژی در حمل‌ونقل دریایی بین‌المللی تابعی از تولید ناخالص داخلی (GDP^1)، فعالیت‌های تجاری و سطوح تولید است [۱].

در راستای هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۵۰٪ تا سال ۲۰۵۰ نسبت به سطوح سال ۲۰۰۸، تمرکز اصلی بر افزایش بهره‌وری انرژی قرار گرفته است. در واکنش به توافق‌نامه پاریس در سال ۲۰۱۵، سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO^2) در آوریل ۲۰۱۸ یک راهبرد اولیه را با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشتی‌ها به تصویب رساند [۲].

پیش‌رانه هیبریدی عموماً به ترکیبی از سامانه‌های پیش‌رانه متعارف و الکتریکی اشاره دارد. در کاربردهای دریایی، پیش‌رانه هیبریدی معمولاً توسط یک ژنراتور مبتنی بر سوخت تأمین می‌شود که به‌وسیله یک تجهیز ذخیره‌ساز انرژی پشتیبانی می‌گردد. بیشتر ژنراتورهای مورد استفاده با سوخت دیزل دریایی یا نفت کوره سنگین کار می‌کنند، در حالی که ذخیره‌سازی انرژی معمولاً به‌صورت بانک‌های باتری انجام می‌شود. اگرچه مفهوم توان هیبریدی جدید نیست، کاربرد آن همچنان محدود بوده و تنها بخش کوچکی از ناوگان جهانی را پوشش می‌دهد [۲].

برخلاف سامانه‌های سنتی توزیع توان متمرکز و مبتنی بر ساختار بالا به پایین، تلاش‌ها برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار کربن، روندهایی را به سمت تمرکززدایی، دیجیتالی‌شدن و استفاده گسترده‌تر از هوش مصنوعی (AI^3) و اتوماسیون ایجاد کرده‌اند. شبکه‌های هوشمند به‌عنوان راهکاری ظهور کرده‌اند که می‌توانند نسل آینده تولید، انتقال و توزیع کارآمد توان را امکان‌پذیر سازند. این شبکه‌ها می‌توانند از لایه‌های به‌هم‌پیوسته‌ای از ریزشبکه‌ها تشکیل شوند که یک شبکه بزرگ‌تر انرژی هوشمند را ایجاد می‌کنند. اهداف اصلی شبکه‌های هوشمند معمولاً شامل پایش بلادرنگ شبکه، بهبود عملکرد سیستم، افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری، حفاظت و کنترل هوشمند و متمرکز، و بهبود بهره‌برداری اقتصادی است [۳].

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS^4) به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در معماری شبکه‌های هوشمند شناخته شده‌اند. توسعه روش‌های کنترل ریزشبکه، به‌ویژه با مشارکت ESS ، به دلیل نیاز به مدیریت بهینه توان، به یکی از حوزه‌های حیاتی در شبکه‌های توزیع هوشمند تبدیل شده است. در این زمینه، هر دو راهبرد کنترل متمرکز و غیرمتمرکز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. در زمینه‌های دریایی، سیستم‌های توان کشتی معمولاً با ریزشبکه‌های جزیره‌ای مقایسه می‌شوند، زیرا هر دو باید انرژی موردنیاز خود را تولید کرده و به‌صورت مستقل از شبکه اصلی فعالیت کنند. راهبردهای کنترل ثانویه که توسط سیستم مدیریت توان (PMS^5) اجرا می‌شوند، معمولاً شامل کنترل روشن/خاموش ژنراتورها و مدیریت کیفیت توان برای مقابله با نوسانات ولتاژ و فرکانس هستند. علاوه بر این، PMS مسئول اطمینان از برقراری تعادل میان عرضه و تقاضا است. سطوح کنترل ثالثه نیز به برنامه‌ریزی تولید و توزیع بهینه منابع توان می‌پردازند [۴].

یک کنترل‌کننده هوشمند منطق فازی نوع ۲ برای مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های ریزشبکه هیبریدی (HMG^6)، به‌ویژه با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف بهره‌برداری خودروهای الکتریکی (EV^7)، پیشنهاد شده است. این مطالعه چالش‌های ناشی از تغییرپذیری توان خروجی منابع تجدیدپذیر و شارژ ناهماهنگ خودروهای الکتریکی را مورد بررسی قرار داده است؛ عواملی که می‌توانند موجب ناپایداری شبکه و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری شوند. کنترل‌کننده کنترل‌کننده هوشمند منطق فازی نوع ۲ پیشنهادی به‌صورت ریاضی مدل‌سازی شده است تا تعاملات پیچیده میان اجزای ریزشبکه هیبریدی، شامل ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه ($DFIG^8$)، سامانه‌های فتوولتائیک، توان AC شبکه و باتری‌های خودروهای الکتریکی را در نظر بگیرد. شبیه‌سازی بر اساس داده‌های یک‌ساله نشان داد که این کنترل‌کننده می‌تواند هزینه‌های بهره‌برداری را به میزان قابل‌توجهی، تا حدود ۳,۷۵۰,۰۰۰ دلار، کاهش دهد و در عین حال تعادل بهینه انرژی را تحت شرایط تصادفی حفظ کند [۵]. برخلاف رویکردهای بهینه‌سازی بلادرنگ نظیر برنامه‌ریزی پویا (DP^1) یا کنترل پیش‌بین مدل (MPC^2) که معمولاً به بار محاسباتی و مدل دقیق

¹ Dynamic Programming

² Model Predictive Control,

پیش‌بینی نیاز دارند، رویکرد Rule-Based قطعی این مطالعه با هدف تضمین زمان پاسخ قابل‌پیش‌بینی و سازگاری با محدودیت‌های محاسباتی محیط Simulink برای کاربرد بلادرنگ دریایی انتخاب شده است؛ هزینه این انتخاب، عدم بهینگی سراسری³ در مقایسه با روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی است.

یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند (EMS⁹) برای شناورهای دریایی مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر هیبریدی توسعه داده شده است [۶]. همچنین، بهبود پاسخ دینامیکی پیل‌های سوختی PEM با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا و مبدل‌های DC/DC دوسویه ارائه شده است [۷]. این روش‌ها به‌طور مؤثری بر دینامیک ذاتی و کند در شرایط تغییرات ناگهانی بار غلبه کرده‌اند. منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های انرژی هیبریدی به‌منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها، به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و هوش مصنوعی نیز نقش محوری در راهبردهای مدیریت انرژی ایفا می‌کند. در یکی از مطالعات، حالت‌های بهره‌برداری کم‌صدا برای زیردریایی‌ها با استفاده از رویکردهای عصبی-فازی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته است تا جریان‌های انرژی بهینه شوند [۸]. فرآیندهای طراحی مفهومی برای وسایل نقلیه زیرآبی هیبریدی با استفاده از ترکیب پیل سوختی/باتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در آن‌ها درجه هیبریداسیون، زیرسیستم‌های ذخیره‌سازی و معماری‌های پیش‌ران مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹]. همچنین، یک مطالعه مروری جامع درباره کاربردهای هوش مصنوعی در الکترونیک قدرت ارائه شده است که نقش AI را در زمینه‌های بهینه‌سازی، طبقه‌بندی، رگرسیون و ساختاربندی داده‌ها در مراحل طراحی، کنترل و نگهداری سیستم تشریح می‌کند [۱۰].

یک رویکرد جدید برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ترافیک دریایی از طریق سیستم‌های پیش‌ران هیبریدی باتری ارائه شده است. در این مطالعه، از مدل‌سازی عددی برای تعیین پیکربندی معادل پیش‌ران هیبریدی برای مسیرهای مشخص استفاده شده است [۱۱]. فناوری‌های مبتنی بر هیدروژن نیز به‌عنوان جایگزین‌هایی برای ژنراتورهای دیزلی متداول ارزیابی شده‌اند که در این ارزیابی، فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی و الزامات مربوط به فضا و وزن موردنیاز برای کشتی‌ها در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. بهینه‌سازی چندهدفه برای بهبود طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی هیبریدی و راهبردهای EMS در کشتی‌های مجهز به پیل سوختی به‌کار گرفته شده است تا انتشار آلاینده‌ها به حداقل رسیده، عملکرد دینامیکی بهبود یابد و طول عمر پیل سوختی افزایش پیدا کند [۱۳]. این مطالعه معماری‌های یکپارچه ذخیره‌سازی انرژی، سیستم‌های پیش‌ران الکتریکی و کشتی‌های مجهز به پیل سوختی را پوشش داده است. مطالعات دیگری [۱۴]-[۱۷] نیز بر برآورد طول عمر اجزای مختلف شبکه‌های الکتریکی تمرکز داشته‌اند و از رویکردهای نوین و متنوع تصمیم‌گیری استفاده کرده‌اند.

یک راهبرد کنترل هماهنگ برای یک شناور دریایی دوما (تمام‌الکتریکی/هیبریدی) پیشنهاد شده است که هدف آن بهینه‌سازی هماهنگی میان ژنراتور و باتری بوده است [۱۸]. همچنین، سیستم‌های توان هیبریدی دریایی پایدار مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در این مطالعات، انواع مختلف سیستم‌های پیش‌ران هیبریدی و رویکردهای EMS با یکدیگر مقایسه شده و اثربخشی منابع انرژی جایگزین در مقایسه با دیزل ارزیابی شده است [۱۹].

یک مطالعه درباره سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری (BESS¹⁰) در پیش‌ران‌های دریایی هیبریدی/الکتریکی، پیشرفت‌های اخیر در زمینه برقی‌سازی و هیبریدی‌سازی شناورها را بررسی کرده و بر کلاس‌ها و پیکربندی‌های مختلف BESS تمرکز داشته است [۲۰]. در مطالعه‌ای دیگر، یک نیروگاه هیبریدی مستقل کشتی با توپولوژی موازی معرفی شده است که از یک ژنراتور دیزلی، یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG¹¹) و سیستم ذخیره‌سازی الکتریکی تشکیل شده و از طریق مدل‌سازی الکترومغناطیسی و انرژی در محیط Simulink اعتبارسنجی شده است [۲۱].

مطالعات بیشتری بر بهینه‌سازی اندازه اجزا و معماری سیستم برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های هیبریدی در کشتی‌ها تمرکز داشته‌اند و کاهش انتشار آلاینده‌ها، ظرفیت انرژی و معماری پیش‌ران را در نظر گرفته‌اند [۲۲]. همچنین، یک راهبرد کنترل بهینه انرژی مبتنی بر شبکه عصبی برای سیستم‌های هیبریدی دریایی مجهز به باتری ارائه شده است که با استفاده از روش کمینه‌سازی مصرف معادل و بهینه‌سازی تطبیقی وزن‌های شبکه، به دقت یادگیری دست یافته است [۲۳]. یک راهبرد کنترل توزیع‌شده شیب ولتاژ برای متعادل‌سازی وضعیت شارژ و مدیریت تغییرات پیچیده بار دریایی پیشنهاد شده است که از پیل‌های

³ global optimality

سوختی، باتری‌ها و ابرخازن‌ها استفاده می‌کند. برای بهینه‌سازی سیستم نیز از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^{12}) استفاده شده است [۲۴]. مطالعه [۲۵] نیز به بررسی روش‌های ذاتی برای این الگوریتم‌ها پرداخته است.

یک راهبرد نوآورانه EMS برای یک سیستم هیبریدی متشکل از PEMFC، باتری و ابرخازن پیشنهاد شده است که در آن از روش‌های تفکیک فرکانسی برای تخصیص توان و از یک حلقه کنترل تطبیقی ولتاژ باس DC برای تثبیت ولتاژ خروجی استفاده شده است [۲۶]. روش‌های استخراج چرخه‌های بار دریایی مبتنی بر یادگیری ماشین معرفی شده‌اند تا بهره‌برداری پایدار و سازگار با محیط‌زیست امکان‌پذیر شود. در این روش‌ها از تکنیک‌های تقریب خطی قطعه‌ای و نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شده است [۲۷].

مطالعات [۲۸]-[۳۱] بر ارتقای قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری ریزشبکه‌ها تمرکز دارند. در [۲۸]، یک چارچوب چندعامله مبتنی بر نیروگاه‌های مجازی (VPP^{20}) برای هماهنگی منابع توزیع‌شده ارائه شده که موجب کاهش هزینه و بهبود تاب‌آوری می‌شود. مطالعه [۲۹] بر ضرورت ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار یافته و نقش تعامل میان اجزای مختلف شبکه تأکید دارد. در [۳۰]، کاربرد PSO در مدیریت منابع انعطاف‌پذیر و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت مرور شده است. همچنین، [۳۱] نقش هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر را در بهبود هم‌زمان اقتصاد، قابلیت اطمینان، کیفیت توان و تاب‌آوری ریزشبکه‌ها بررسی می‌کند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در سیستم‌های پیش‌رانه هیبریدی دریایی، رویکردهای موجود اغلب فاقد یک EMS بلادرنگ یکپارچه هستند که بتواند کنترل مبتنی بر سناریو و قابلیت سازگاری ماژولار را برای شرایط بهره‌برداری عادی و اضطراری فراهم کند. بسیاری از سیستم‌ها در اولویت‌بندی بارهای توزیع‌شده یا تخصیص دینامیکی منابع بر اساس معیارهایی همچون بازده، دسترس‌پذیری و مصرف سوخت ناتوان هستند. علاوه بر این، مطالعات محدودی پیاده‌سازی‌های با دقت بالا در محیط سیمولینک متلب ارائه کرده‌اند که تمامی حالت‌های ممکن سیستم هیبریدی را با اعتبارسنجی دقیق کد پوشش دهد. این مقاله با هدف رفع شکاف‌های موجود، موارد زیر را ارائه می‌کند:

- ارائه یک معماری کامل و سلسله‌مراتبی EMS شامل سه لایه کنترلی مجزا
- پیاده‌سازی منطق مبتنی بر سناریو شامل شرایط عادی، اضافه‌بار و اضطراری
- مدیریت ۵۹ حالت عملیاتی اصلی و یک حالت اضافه‌بار از طریق یک معماری کنترلی سلسله‌مراتبی سه‌لایه مبتنی بر منطق بارگذاری پیرو-قانون پایه قطعی، با تخصیص ایستای منابع محاسباتی به‌جای گسترش پویای آرایه‌ها، که سازگاری با محدودیت‌های حافظه Simulink و بهبود عملکرد بلادرنگ را تضمین می‌کند.
- یکپارچه‌سازی اولویت‌بندی بار، زمان‌بندی باتری مبتنی بر وضعیت شارژ (SoC^{13}) و منطق شارژ مبتنی بر توان مازاد
- معرفی روش تخصیص ایستا و فیلتر LC که در مجموع زمان پاسخ دینامیکی را ۶۰٪ و اعوجاج هارمونیک را ۲۸٪ کاهش می‌دهند و به‌طور قابل توجهی پایداری و کیفیت توان را برای عملیات‌های حیاتی دریایی بهبود می‌بخشند.

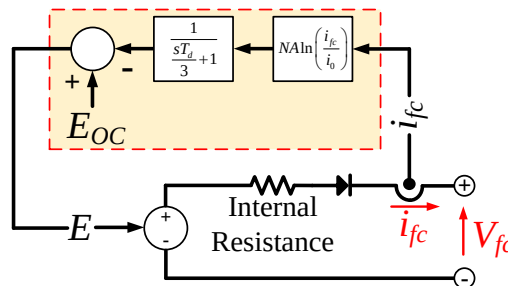
ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است. بخش ۱ به مقدمه و مرور مطالعات اخیر در زمینه پیش‌رانه هیبریدی دریایی و سیستم مدیریت انرژی اختصاص دارد. بخش ۲ توصیف مدل پایه شامل مدل‌های پیل سوختی، باتری، اینورتر و کنترل را ارائه می‌کند. بخش ۳ به تشریح EMS پیشنهادی و راهبرد کنترلی اختصاص دارد. بخش ۴ مشخصات سیستم و اجزای کنترلی را بیان می‌کند. بخش ۵ عملکرد کنترل بار، ژنراتور، باتری و سناریوهای اضطراری را ارزیابی می‌کند. در نهایت، بخش ۶ به نتیجه‌گیری و ارائه مسیرهای پژوهشی آینده اختصاص یافته است.

۲- توصیف مدل پایه

سیستم توان هیبریدی دریایی پیشنهادی از منابع مختلف انرژی توزیع‌شده (DER^{14})، واحدهای ذخیره‌سازی و بارهای الکتریکی تشکیل شده است که از طریق یک طرح کنترل متمرکز با یکدیگر یکپارچه شده‌اند. اجزای اصلی سیستم در بخش‌های زیر ارائه شده‌اند.

۲-۱- مدل پیل سوختی

دو مدل برای پشته پیل سوختی، متشکل از چندین سلول متصل به صورت سری، مدل ساده شده و مدل دقیق [۳۲-۳۳] پیشنهاد شده است. مدل ساده شده پشته پیل سوختی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل ساده پیل سوختی

Figure (1): Simple model of fuel cell

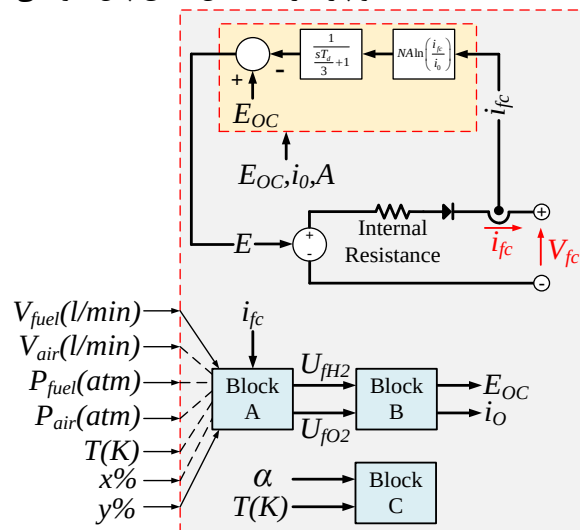
مدل ساده شده پیل سوختی تحت شرایط دمایی و فشاری نامی عمل می کند. این مدل از یک منبع کنترل شونده با ولتاژ تشکیل شده است که به صورت سری با یک مقاومت ثابت متصل شده است. منبع کنترل شونده با ولتاژ (E) مطابق روابط (۱) و (۲) توصیف می شود:

$$E = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \cdot \frac{1}{\frac{sT_d}{3} + 1} \quad (1)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (2)$$

که در آن، E_{oc} ولتاژ مدار باز، N تعداد سلول ها، A شیب تافل، i_0 جریان تبدالی، T_d زمان پاسخ (متناظر با ۹۵٪ مقدار نهایی)، R_{ohm} مقاومت داخلی، i_{fc} جریان پیل سوختی و V_{fc} ولتاژ پیل سوختی است.

مدل دقیق، یک پشته پیل سوختی مشخص را تحت پارامترهای متغیری همچون فشار، دما، ترکیب و نرخ های جریان سوخت و هوا مدل می کند (شکل ۲). این تغییرات بر شیب تافل (A)، جریان تبدالی (i_0) و ولتاژ مدار باز (E_{oc}) تأثیر می گذارند. مدار معادل مدل دقیق مشابه مدل ساده شده است. شماتیک و پارامترهای مدل دقیق پیل سوختی در ادامه ارائه شده اند.

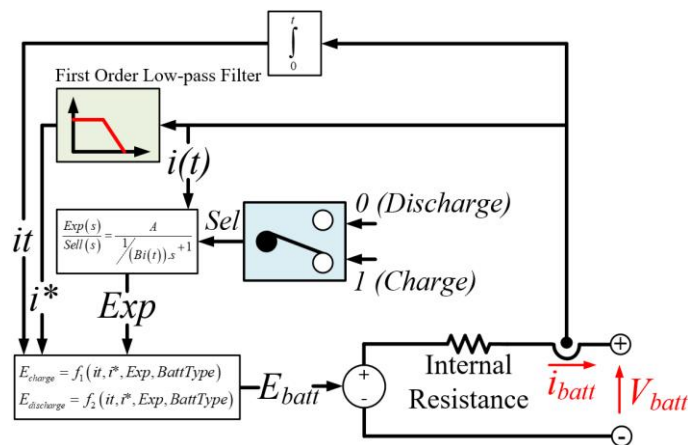


شکل (۲): مدل دقیق پیل سوختی

Figure (2): Accurate fuel cell model

۲-۲- مدل باتری

شکل ۳ نمودار بلوکی کلی باتری های قابل شارژ را ارائه می دهد [۳۴-۳۵]:



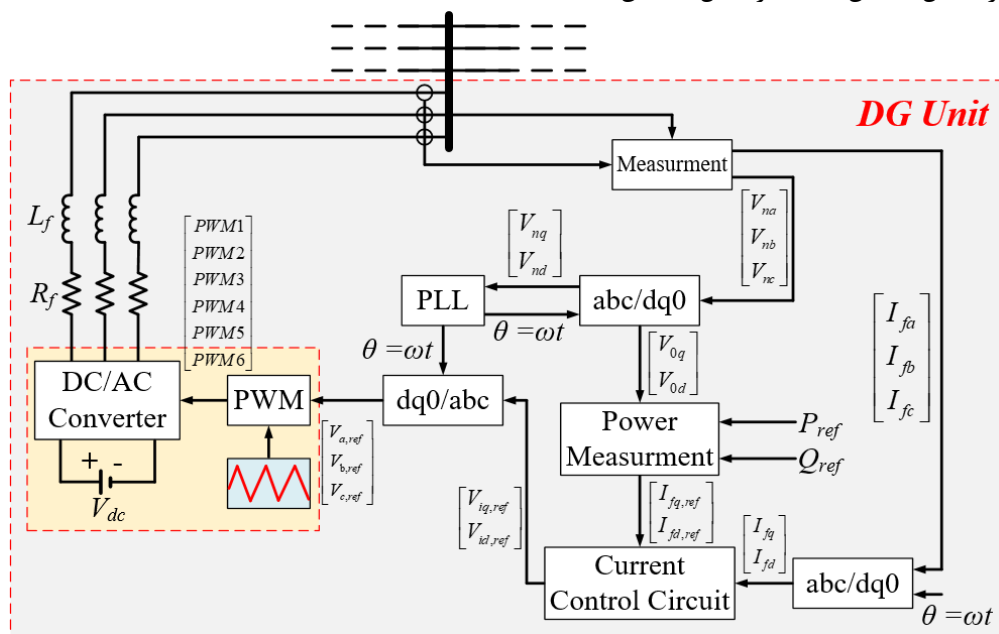
شکل (۳): نمودار بلوکی باتری‌های قابل شارژ

Figure (3): Block display of rechargeable batteries

پارامترهای مدار را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که یک نوع خاص از باتری و ویژگی‌های شارژ و دشارژ آن را نمایش دهند. بر اساس این شکل، E_{batt} ولتاژ غیرخطی باتری، E_0 ولتاژ ثابت باتری، $Exp(s)$ دینامیک ناحیه نمایی، $sel(s)$ حالت عملکرد باتری است (۰ برای حالت دشارژ و ۱ برای حالت شارژ)، K ثابت قطبش همراه با مقاومت قطبش، i^* دینامیک جریان در فرکانس پایین، i جریان باتری است.

۳-۲- مدل اینورتر

به‌طور کلی، اینورترهای توان از دو بخش اصلی مدار قدرت و بلوک‌های کنترلی مبدل تشکیل می‌شوند. دیاگرام تک‌خطی یک اینورتر سه‌فاز متصل به باس شبکه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): مدار قدرت سه‌فاز و بلوک کنترل اینورتر با کنترل جریان

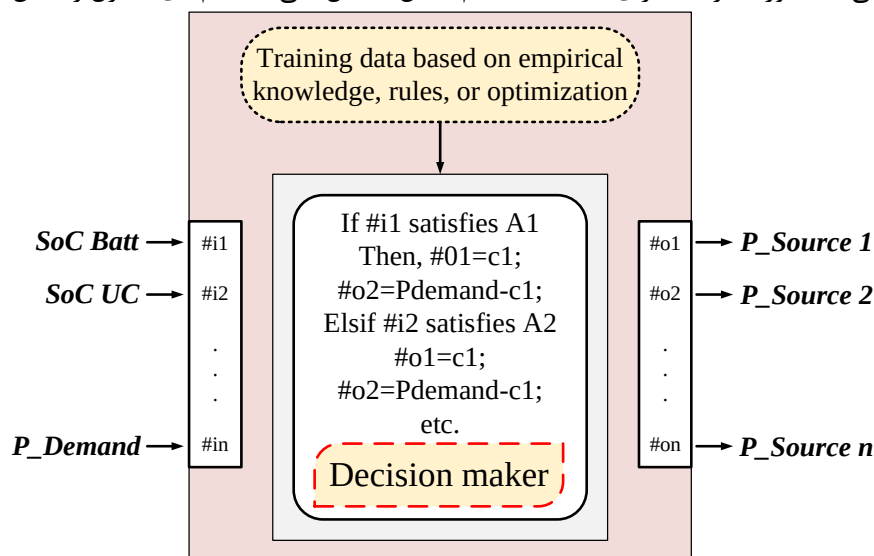
Figure (4): Three-phase power circuit and current control inverter control block

در سمت باس DC مبدل، یک منبع ولتاژ DC ثابت (نماینگر یک منبع انرژی تجدیدپذیر) در نظر گرفته شده است. در سمت باس AC نیز یک خروجی توان سه‌فاز به همراه یک فیلتر سری وجود دارد.

۴-۲- مدل سیستم کنترل

سیستم‌های کنترل، بسته به نوع و ماهیت عملکردی خود، می‌توانند دارای رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی باشند. با این حال، به‌طور کلی، این سیستم‌ها بر اساس عملکرد خود از سه مؤلفه اصلی تشکیل می‌شوند: یک بخش ورودی برای دریافت

پارامترهای ورودی، یک بخش خروجی برای اعمال فرمان‌های کنترلی به بخش‌های مختلف و یک بخش تصمیم‌گیری برای تعیین حدود کنترلی به منظور مدیریت اجزای مختلف سیستم. شکل ۵ مدل کلی سیستم‌های کنترل را نشان می‌دهد.



شکل (۵): مدل شماتیک سیستم کنترل

Figure (5): Schematic model of a control system

در مدل‌سازی سیستم‌های کنترل، مطابق رابطه (۳)، توان تولیدی باید برابر با توان بار باشد. سیستم توان هیبریدی دریایی پیشنهادی از منابع مختلف انرژی توزیع شده (DERs)، واحدهای ذخیره‌سازی و بارهای الکتریکی تشکیل شده است که از طریق یک طرح کنترل متمرکز با یکدیگر یکپارچه شده‌اند. اجزای اصلی مطابق رابطه (۳) عبارت‌اند از:

$$P_{Load}(t) = \sum_{i=1}^N S_i \cdot P_{L,i}(t) \quad (3)$$

که در آن، N تعداد باس‌ها، $S_i(t) \in \{0,1\}$ وضعیت کلید بار در زمان t و $P_{L,i}$ توان نامی بار i ام است. ظرفیت کل تولید در دسترس در زمان t مطابق رابطه (۴) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{Gen}(t) = \sum_{j=1}^{N_{DG}} S_{j,DG} \cdot P_{DG,j}^{max}(t) + \sum_{k=1}^{N_{FC}} S_{k,FC} \cdot P_{FC,k}^{max}(t) + \sum_{l=1}^{N_{Batt}} S_{j,Batt} \cdot P_{Batt,l}^{max}(t) \quad (4)$$

که در آن، فعال‌سازی هر منبع $S_x \in \{0,1\}$ توسط منطق سیستم مدیریت انرژی تعیین می‌شود.

۵-۲- مدل پیش‌رانه الکتریکی هیبریدی

برای به حداکثر رساندن مزایای استفاده از یک سیستم پیش‌رانه هیبریدی، درک نحوه عملکرد موتورهای دریایی ضروری است. این موتورها معمولاً در یک محدوده مشخص از شرایط بهره‌برداری، بازده بالاتری دارند. پس از شناسایی این محدوده، یک سیستم هوشمند می‌تواند با استفاده از کنترل، عملکرد موتور را به سمت آن هدایت کند. یک موتور دیزل متداول عموماً دارای بازده حرارتی در حدود ۳۰ درصد تا ۴۰ درصد است. به عبارت دیگر، تنها حدود یک‌سوم انرژی حرارتی موجود در سوخت به انرژی مفید تبدیل می‌شود. اگرچه این موضوع ممکن است ائتلاف انرژی به نظر برسد، موتورهای دیزلی در مقایسه با موتورهای بنزینی که معمولاً بازدهی حدود ۲۵ درصد تا ۳۵ درصد دارند، عموماً به‌عنوان موتورهای با بازده انرژی بالاتر شناخته می‌شوند. در حالی که بازده حرارتی بیانگر خروجی کلی یک موتور است، میزان عملکرد موتور را در بارهای مختلف نشان نمی‌دهد.

۵-۲-۱- مدل سیستم ذخیره‌سازی انرژی

از آنجا که تمامی موتورهای دیزلی دریایی قادر به کار تحت بارهای متغیر هستند، برای توسعه راهبردهای کنترلی با هدف به حداکثر رساندن بهره‌وری سوخت، لازم است چرخه‌های کاری و مصرف سوخت آن‌ها به‌خوبی درک شود. یک روش مناسب، پایش مصرف ویژه سوخت ($SFOC^{15}$) است که به مقدار سوخت مصرف‌شده برای تولید یک واحد توان اشاره دارد. مطالعات تجربی و شبیه‌سازی پیشین نشان داده‌اند که هر موتور معمولاً دارای محدوده‌ای است که در آن $SFOC$ به حداقل مقدار خود

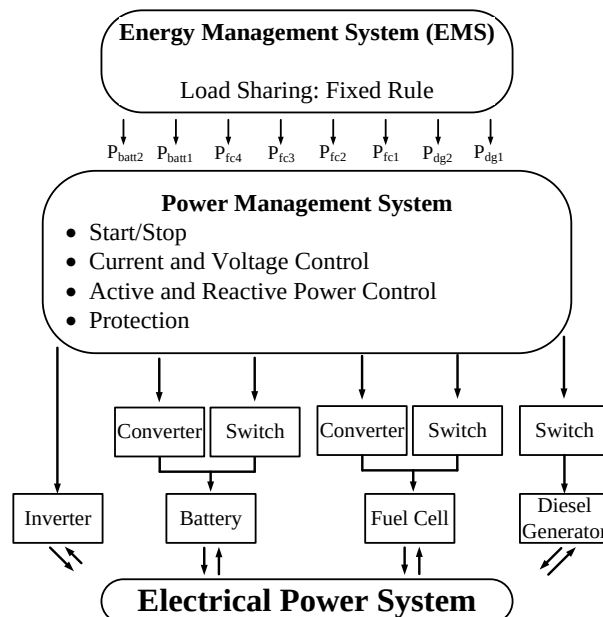
می‌رسد. به عبارت دیگر، هنگامی که موتور در این محدوده مشخص کار می‌کند، در مقایسه با سایر محدوده‌های کاری، انرژی بیشتری تولید می‌کند. ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های پیش‌رانه هیبریدی از اهمیت زیادی برخوردار است و با کمک به موتور برای کار در سطوح توان مشخص، امکان مدیریت توان مازاد بین بار و توان موتور را فراهم می‌کند. دو نوع اصلی سیستم ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته شده‌اند:

- i. **ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی:** مانند باتری‌های لیتیوم-یون که از طریق واکنش‌های شیمیایی پتانسیل الکتریکی تولید می‌کنند. اگرچه این باتری‌ها بازده بالایی دارند، طول عمر آن‌ها به تعداد چرخه‌های شارژ/دشارژ محدود می‌شود و دشارژ باتری به کمتر از سطوح مشخص می‌تواند طول عمر آن را به شدت کاهش دهد.
 - ii. **ذخیره‌سازی مبتنی بر خازن:** این نوع ذخیره‌سازی به واکنش‌های شیمیایی وابسته نیست. این فناوری امکان شارژ/دشارژ سریع‌تر و طول عمر بالایی را فراهم می‌کند؛ با این حال، ابرخازن‌های کنونی در مقایسه با باتری‌ها دارای چگالی انرژی پایین‌تری هستند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند.
- هر دو نوع سیستم ذخیره‌سازی دارای مزایا و معایبی هستند و انتخاب میان آن‌ها به نیازهای خاص کاربرد موردنظر بستگی دارد.

۳- مدل پیشنهادی سیستم مدیریت انرژی

بر اساس الزامات و ملاحظات تعیین‌شده برای طراحی یک سیستم کنترلی مناسب برای سیستم پیش‌رانه هیبریدی یک شناور دریایی، و با در نظر گرفتن مطالعات بررسی‌شده در بخش‌های پیشین، راهبرد کنترلی پیشنهادی، راهبرد مبتنی بر قواعد پایه قطعی پیرو بار^{۱۶} است. مزایای انتخاب این راهبرد برای سیستم‌های پیش‌رانه هیبریدی عبارت‌اند از:

- i. **سهولت طراحی و پیاده‌سازی،** به‌ویژه در سیستم‌های پیچیده پیش‌رانه هیبریدی دریایی
- ii. **تطبیق منابع توان با تقاضای بار** از طریق پیروی از تقاضای بار در هر لحظه
- iii. **قابلیت ارتقا** برای بهینه‌سازی بخش‌های مختلف شبکه
- iv. **قابلیت تعریف و استفاده از توان تولیدی مازاد** برای شارژ خودکار منابع ذخیره‌سازی
- v. **قابلیت انطباق با منابع مختلف تولید توان،** به‌ویژه منابع تجدیدپذیر
- vi. **قابلیت سازگاری با شرایط اضطراری**
- vii. **انعطاف‌پذیری در تعریف ملاحظات مختلف** بر اساس شبکه طراحی‌شده



شکل (۶): ساختار سیستم کنترلی پیشنهادی برای یک شبکه سه‌فاز

Figure (6): Structure of the proposed control system for a three-phase network

با بهره‌گیری از این مزایا، الزامات و ملاحظات تعیین‌شده را می‌توان به‌طور مناسبی برآورده کرد و این راهبرد را می‌توان با حداقل تغییرات، به‌صورت یکپارچه در سیستم‌های تک‌فاز و سه‌فاز به‌کار گرفت. راهبرد سه‌فازی در نظر گرفته‌شده در این مقاله در شکل ۶ نشان داده شده است.

همچنین باید توجه داشت که اگرچه این مقاله راهبرد و نتایج مربوط به سیستم سه‌فاز را ارائه می‌دهد، همین رویکرد را می‌توان برای یک سیستم تک‌فاز نیز به‌کار گرفت و ارائه کرد. ساختار سیستم کنترلی این راهبرد در قالب یک سلسله‌مراتب سه‌سطحی طراحی شده است:

- **سطح ۱ (اولیه):** با اجزای قدرت شبکه تعامل دارد و فرمان‌های صادرشده از سطح ۲ را به شبکه منتقل می‌کند.
- **سطح ۲ (ثانویه):** بخش‌های مختلف مدار را مدیریت کرده و فرمان‌های مناسب را ارسال می‌کند و دستورالعمل‌های سطح ۳ را به قواعد قابل‌فهم برای سطح ۱ تبدیل می‌کند.
- **سطح ۳ (ثالثه):** مسئول تصمیم‌گیری و تعیین سطوح توان بخش‌های مختلف مدار بر اساس بازخورد دریافتی است. این ساختار امکان به‌کارگیری آن را در انواع مختلف شبکه‌ها فراهم کرده و قابلیت انطباق بالایی ارائه می‌دهد. سیستم مدیریت انرژی مسئول پایش بلادرنگ و تصمیم‌گیری برای برقراری تعادل میان تولید و بار، ضمن حفظ وضعیت شارژ باتری و بهره‌وری سوخت است. سیستم مدیریت انرژی از راهبرد مبتنی بر قواعد پایه قطعی پیرو بار استفاده می‌کند و اولویت‌های زیر را در نظر می‌گیرد:

- بهره‌برداری مبتنی بر پیروی از بار،
- اعزام باتری در اولویت نخست در شرایط بار سبک،
- ترتیب‌دهی منابع بر اساس دسترس‌پذیری و اولویت،
- حذف بار در شرایط اضافه‌بار

۳-۱- انتخاب منابع و حالت‌های بهره‌برداری

سیستم مدیریت انرژی سه ناحیه اصلی بهره‌برداری را بر اساس تقاضای بار تعریف می‌کند:

الف) حالت صرفاً باتری:

در این حالت، باتری‌ها کل بار را تأمین می‌کنند. پیل‌های سوختی و ژنراتورهای دیزلی (DG^{17}) خاموش هستند.

$$0 < P_{Load} < P_{B1,max} + P_{B2,max} \quad \text{and} \quad SoC_{Bi} > SoC_{min} \quad (5)$$

ب) حالت پشتیبانی پیل سوختی:

در این حالت، پیل‌های سوختی فعال می‌شوند.

$$P_B^{max} < P_{Load} < P_{FC}^{max} \quad \text{and} \quad SoC_B \leq SoC_{min} \quad (6)$$

در صورت وجود توان مازاد:

$$P_{FC,surplus} = P_{FC}^{max} - P_{Load} > 0 \Rightarrow \text{Battery Charging} \quad (7)$$

ج) حالت پشتیبانی ژنراتور:

در این حالت، پشتیبانی ژنراتور فعال می‌شود.

$$P_{Load} > P_{FC}^{max} + P_B^{max} \Rightarrow \text{Activate Diesel Generator (s)} \quad (8)$$

۳-۲- منطق مدیریت و حذف بار

اگر:

$$P_{Load} > P_{Gen} \quad (9)$$

آنگاه EMS بارهای با اولویت پایین را بر اساس صف اولویتی تعریف‌شده در رابطه (۱۰) حذف می‌کند:

$$\text{Priority: } L_N > \dots > L_5 > L_4 > \dots > L_1 \quad (10)$$

سیگنال‌های کنترلی کلیدهای بار به‌صورت زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$SW_{L_{O-i}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if load is shed} \\ SW_{L,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

۳-۳- کنترل باتری

جریان‌های شارژ و دشارژ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{ref,i} = \frac{P_{batt,i} \cdot 10^3}{V_{batt,i}} \cdot \text{sign}(P_{batt,i}) \quad (12)$$

وضعیت باتری بر اساس تقاضای بار، سطح SoC و توان مازاد پیل سوختی تغییر می‌کند.

۳-۴- بهینه‌سازی دینامیکی الگوریتم برای پایداری سیستم

به منظور مقابله با رفتار دینامیکی شبکه توان هیبریدی، در این مقاله یک الگوریتم کنترلی بهبودیافته پیشنهاد شده است که گسترش دینامیکی آرایه‌ها را با پیش‌اختصاص‌دهی ایستا جایگزین می‌کند. این اصلاح، سازگاری با محدودیت‌های حافظه Simulink را تضمین کرده و هم‌زمان عملکرد بلادرنگ سیستم را بهبود می‌بخشد.

۳-۵- بهبود کیفیت توان از طریق فیلتر هارمونیک

به منظور کاهش اعوجاج هارمونیک در خروجی شبکه هیبریدی، یک فیلتر LC در سیستم یکپارچه شده است. معیارهای طراحی و تأثیر آن در ادامه کمی‌سازی شده‌اند:

❖ معادلات طراحی فیلتر:

فرکانس قطع فیلتر f_c (LC) کمتر از پایین‌ترین فرکانس هارمونیک تنظیم می‌شود؛ برای مثال، هارمونیک پنجم در فرکانس ۲۵۰ هرتز برای فرکانس پایه ۵۰ هرتز قرار دارد:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \leq 250 \text{ Hz} \quad (13)$$

برای $C = 100 \mu\text{F}$ و $L = 5 \text{ mH}$ بوده و داریم:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{5 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6}}} \approx 225 \text{ Hz} \quad (14)$$

❖ کاهش THD:

اعوجاج هارمونیک کل (THD^{18}) برای ولتاژ و جریان مطابق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (15)$$

که در آن، V_h مقدار مؤثر (RMS^{19}) ولتاژ هارمونیک مرتبه h و V_1 مؤلفه اصلی (فرکانس بنیادی) است.

۴- پیکربندی و استراتژی کنترل سیستم قدرت دریایی هیبریدی

سیستم توان هیبریدی دریایی مورد مطالعه، شامل یک شبکه فشار ضعیف با ظرفیت ۶۳۰ کیلوولت آمپر، ولتاژ ۳۸۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز با پیکربندی تک‌باس است. اجزای اصلی سیستم عبارت‌اند از:

❖ دو ژنراتور دیزلی سنکرون؛

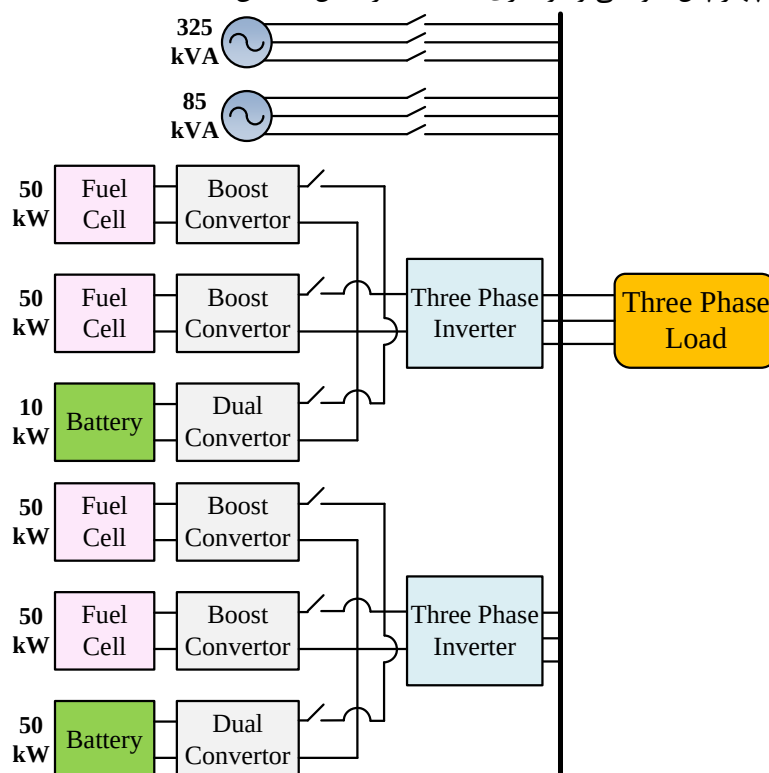
❖ چهار پیل سوختی، هر یک با ظرفیت ۵۰ کیلووات؛

❖ دو باتری لیتیوم-یون، هر یک با حداکثر قابلیت شارژ و دشارژ ۱۰ کیلووات؛

❖ سیزده بار توزیع‌شده مجهز به منطق حذف بار مبتنی بر اولویت .

سیستم قدرت الکتریکی در محیط MATLAB/Simulink و با استفاده از کدنویسی و نمودارهای بلوکی مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. بستر شبیه‌سازی امکان تحلیل بلادرنگ راهبردهای کنترلی، سناریوهای بار و شرایط خطا را فراهم

می‌کند و محیطی عملی برای ارزیابی پاسخ دینامیکی و اعتبارسنجی طراحی ارائه می‌دهد. این سیستم شامل یک باس، دو ژنراتور دیزلی سنکرون، چهار پیل سوختی و دو باتری است که در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل (۷): سیستم توان سه‌فاز شناور مورد مطالعه

Figure (7): Floating three-phase power system under study

بارها و منابع توان توسط یک سیستم مدیریت انرژی متمرکز کنترل می‌شوند که بر اساس ورودی‌های بلادرنگ و سناریوهای بهره‌برداری از پیش تعریف شده عمل می‌کند. وصل و قطع بارها از طریق کنترل کلیدهای مبتنی بر منطق انجام می‌شود. این کلیدها فرمان‌های خود را از EMS دریافت کرده و سیگنال‌های بازخورد تأخیردار را برای تأیید اجرای فرمان ارسال می‌کنند که این امر موجب افزایش استحکام و یکپارچگی عملیاتی سیستم می‌شود. با استفاده از این بستر، مهندس می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، تأثیر اغتشاشات یا سایر عوامل ورودی را بر عملکرد سیستم نیز تحلیل کند.

۴-۱- منطق کنترل سلسله‌مراتبی EMS پیشنهادی

سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی بر اساس یک معماری سلسله‌مراتبی سه‌لایه طراحی شده است که حول یک راهبرد قواعد پایه قطعی پیرو بار بهینه‌سازی شده است. اهداف EMS عبارت‌اند از:

❖ اطمینان از برقراری تعادل توان در تمام زمان‌ها مطابق رابطه (۱۶):

$$P_{generation} = P_{load} + P_{loss} \quad (16)$$

❖ حفظ وضعیت شارژ باتری در محدوده‌های از پیش تعیین شده:

$$SoC_{min} \leq SoC_{battery} \leq SoC_{max} \quad (17)$$

که در آن:

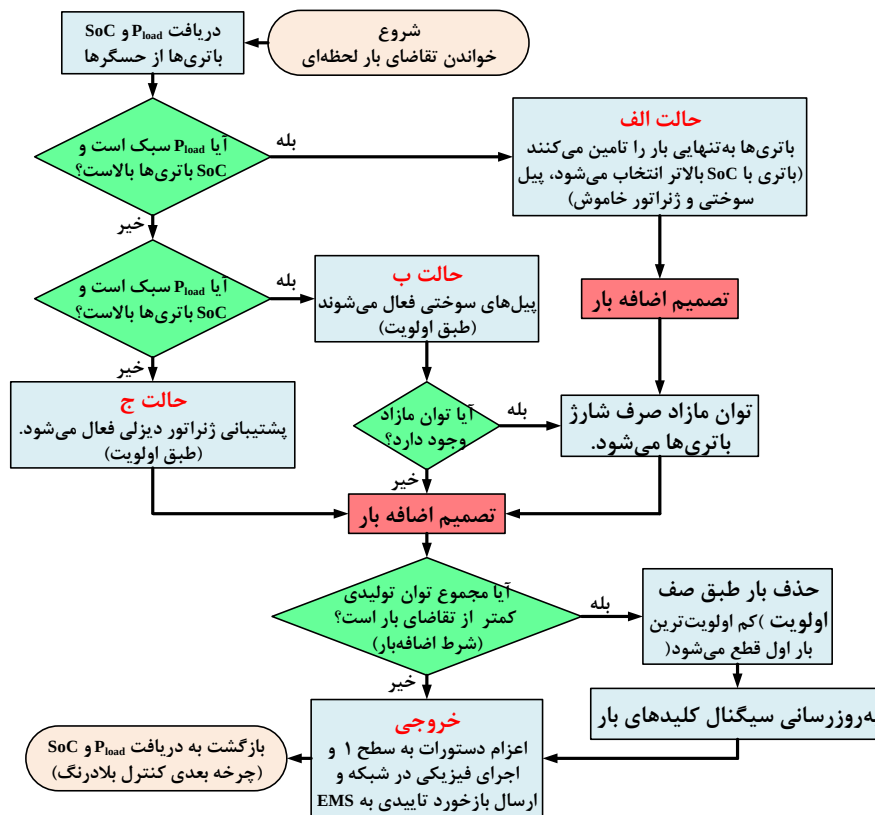
$$SoC_{min} = 20\% , SoC_{max} = 80\% , Hysteresis = 20\% \quad (18)$$

❖ اعمال حذف بار در شرایط زیر:

$$P_{load} > P_{available} \quad (19)$$

⇒ Shed low-priority loads based on predefined priority list

نمای کلی توالی تصمیم‌گیری راهبرد کنترلی پیشنهادی، شامل انتخاب حالت بهره‌برداری (باتری/پیل سوختی/ژنراتور)، بررسی شرط تعادل توان و اعمال منطق حذف بار، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): فلوچارت رویه پیشنهادی

Figure (8): Flowchart of proposed methodology

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، در هر گام کنترلی، EMS ابتدا تقاضای بار لحظه‌ای و وضعیت SoC باتری‌ها را دریافت می‌کند. در صورت برقراری شرایط بار سبک و SoC بالا، حالت صرفاً باتری (رابطه ۵) فعال می‌شود؛ در غیر این صورت، پیل‌های سوختی (رابطه ۶) و در نهایت ژنراتورهای دیزلی (رابطه ۸) به ترتیب اولویت وارد مدار می‌شوند. در هر مرحله، شرط تعادل توان (رابطه ۱۶) بررسی و در صورت نقض آن، منطق حذف بار مبتنی بر اولویت (روابط ۹ تا ۱۱) اعمال می‌شود.

۴-۲- ویژگی‌های اصلی EMS

- **حالت‌های بهره‌برداری:** سیستم مدیریت انرژی ۵۹ حالت اصلی بهره‌برداری شامل ترکیب‌های مختلف منابع توان، به علاوه ۱ حالت اضطراری اضافه‌بار پشتیبانی می‌کند.
- **خروجی‌های کنترلی:**
 - ✓ ۴۰ پورت ورودی برای دریافت بازخورد سنسورها و وضعیت سیستم؛
 - ✓ ۲۵ پورت خروجی برای کنترل عملگرها و کلیدها
- **پایگاه کد شبیه‌سازی:** سیستم با استفاده از بیش از ۱۱۵۰۰ خط کد MATLAB/Simulink پیاده‌سازی شده است که شرایط عادی و غیرعادی را پوشش می‌دهد.
- **مدیریت باتری:** سیستم مدیریت انرژی فرآیندهای شارژ و دشارژ باتری‌ها را مطابق رابطه (۲۰) کنترل می‌کند:

$$I_{ref} = \begin{cases} \frac{P_{bat} \cdot 10^3}{V_{bat}} & \text{Charging} \\ -\frac{P_{bat} \cdot 10^3}{V_{bat}} & \text{Discharging} \end{cases} \quad (20)$$

- **کنترل پیل سوختی:** تخصیص توان بر اساس فعال‌سازی منابع با اولویت مشخص و نیازهای بار تعیین می‌شود، به گونه‌ای که محدودیت‌های منابع نیز رعایت شوند:

$$P_{fc_i}^{\max} = 50kW, \quad P_{batt_i}^{\max} = 10kW \quad (21)$$

۳-۴- معماری کنترل

- لایه ۱ (لایه اولیه): به‌طور مستقیم با تجهیزات سخت‌افزاری مدار ارتباط برقرار کرده و فرمان‌های کنترلی را اعمال می‌کند.
 - لایه ۲ (لایه ثانویه): تصمیمات سطح بالا را به سیگنال‌های کنترلی قابل اجرا تبدیل می‌کند.
 - لایه ۳ (لایه ثالثه): بر اساس داده‌های بلادرنگ، انتخاب سناریو و اهداف بهینه‌سازی، فرآیند تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد.
- این ساختار لایه‌ای، ماژولار بودن، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری سیستم را در پیکربندی‌های شبکه تک‌فاز و سه‌فاز افزایش می‌دهد.

۴-۴- کنترل مبتنی بر سناریو

سیستم مدیریت انرژی با انتخاب دینامیکی ترکیب مناسبی از ژنراتورها، پیل‌های سوختی و باتری‌ها، به سناریوهای مختلف بهره‌برداری، مانند کشتی خاموش، حالت کروز و شرایط اضطراری، پاسخ می‌دهد. برای مثال، در شرایط بار سبک و SoC بالا، ممکن است تنها از باتری‌ها استفاده شود؛ در حالی که در سناریوهای بار سنگین، ژنراتورهای دیزلی و پیل‌های سوختی به‌صورت متوالی وارد مدار می‌شوند.

۵- ارزیابی و بحث حول سیستم کنترلی

در این بخش، هر یک از اجزای کنترلی ریزشبکه سه‌فاز شناور مورد مطالعه، به‌صورت مجزا تحلیل و ارزیابی می‌شوند که جزئیات آن‌ها در ادامه ارائه شده است.

۵-۱- ارزیابی کنترل بار

به‌منظور ارزیابی سیستم کنترل بار و اطمینان از اجرای صحیح سناریوهای بهره‌برداری و در نتیجه، تخصیص صحیح بارها در شبکه سه‌فاز، سه سناریوی متمایز شامل بار اولیه، ناوبری عادی و حالت رزومی انتخاب شدند. عملکرد سیستم کنترل بار تحت این سناریوها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ مشخصات دقیق هر یک از بارها را ارائه می‌دهد. همچنین، جدول ۲ تخصیص بارها در هر سناریو و توان موردنیاز هر بار را نشان می‌دهد.

Table (1): Number and position of each load in a three-phase network

جدول (۱): تعداد و محل هر بار در یک شبکه سه‌فاز

شماره بار	توضیح بار	شماره بار	توضیح بار
بار ۰	بار اولیه	بار ۷	یخچال
بار ۱	تجهیزات ناوبری (رادار، GPS و غیره)	بار ۸	سامانه تسلیحاتی
بار ۲	بار کمکی روشنایی	بار ۹	سکان
بار ۳	موتور/پیشران اصلی	بار ۱۰	لنگر
بار ۴	آشپزخانه	بار ۱۱	آبگرمکن و گرمایش
بار ۵	پمپ‌های موتورخانه	بار ۱۲	بارهای متفرقه (سیستم اعلام حریق و غیره)
بار ۶	تهویه		

Table (2): Details of the load placement for each scenario in the three-phase network

جدول (۲): جزئیات تخصیص بارها برای هر سناریو در شبکه سه‌فاز

سناریو	بار ۱۰۰ (کیلووات)	بار ۲۱ (کیلووات)	بار ۱۲ (کیلووات)	بار ۳۰۰ (کیلووات)	بار ۴۱۲ (کیلووات)	بار ۵۱۵ (کیلووات)	بار ۶۳ (کیلووات)
مرحله ۱	✓	--	--	--	--	--	--
مرحله ۲	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓
مرحله ۳	--	✓	✓	✓	--	✓	✓
سناریو	بار ۱۷ (کیلووات)	بار ۸۱ (کیلووات)	بار ۹۱ (کیلووات)	بار ۱۰۷ (کیلووات)	بار ۱۱۳ (کیلووات)	بار ۱۲۱ (کیلووات)	
مرحله ۱	--	--	--	--	--	--	
مرحله ۲	✓	--	✓	--	✓	✓	
مرحله ۳	✓	✓	✓	--	✓	✓	

۲-۵- ارزیابی کنترل ژنراتور سنکرون

به‌منظور بررسی عملکرد صحیح سیستم کنترل ژنراتور سنکرون و اطمینان از فعال‌سازی صحیح هر ژنراتور بر اساس سناریوی انتخاب‌شده و تقاضای بار متناظر، سیستم تحت سه سناریوی متمایز شامل بار اولیه، نوبری عادی و حالت رزمی آزمایش شد. جدول ۳ وضعیت صحیح هر ژنراتور را متناسب با سناریوی انتخاب‌شده نشان می‌دهد.

Table (3): Details of the generator placement for each scenario in the three-phase network

جدول (۳): جزئیات وضعیت ژنراتورها برای هر سناریو در شبکه سه‌فاز

سناریو	وضعیت ژنراتور ۱ (۸۵ کیلووات)	وضعیت ژنراتور ۲ (۲۲۵ کیلووات)
مرحله ۱	--	--
مرحله ۲	--	✓
مرحله ۳	✓	✓

۳-۵- ارزیابی کنترل پیل سوختی و باتری

مشابه ژنراتورهای سنکرون، سیستم کنترل پیل سوختی و باتری نیز به‌منظور اطمینان از عملکرد صحیح آن تحت سه سناریوی تعریف‌شده شامل بار اولیه، نوبری عادی و حالت رزمی ارزیابی شد. عملکرد سیستم کنترل در این سناریوها مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۴ وضعیت صحیح تخصیص هر یک از پیل‌های سوختی و باتری‌ها را در شبکه سه‌فاز برای هر سناریو نشان می‌دهد.

Table (4): Details of the FCs and batteries placement for each scenario in the three-phase network

جدول (۴): جزئیات وضعیت پیل‌های سوختی و باتری‌ها برای هر سناریو در شبکه سه‌فاز

سناریو	وضعیت پیل سوختی ۱	وضعیت پیل سوختی ۲	وضعیت باتری ۱	وضعیت پیل سوختی ۳	وضعیت پیل سوختی ۴	وضعیت باتری ۲
مرحله ۱	--	--	✓	--	--	✓
مرحله ۲	✓	✓	✓	✓	✓	✓
مرحله ۳	✓	--	✓	✓	--	✓

علاوه بر یکپارچه‌سازی باتری‌ها در شبکه، سیستم کنترل جریان کاری آن‌ها را نیز تعیین می‌کند. از آنجا که هر باتری می‌تواند در دو حالت دشارژ و شارژ فعالیت کند، جریان آن بر اساس تقاضای بار و توان مازاد در دسترس از سایر منابع تغییر می‌کند. بنابراین، جریان باتری تحت هر شرایط به‌صورت یک محدوده از مقادیر بیان می‌شود. جدول ۵ جزئیات محدوده جریان کاری باتری‌ها را در حالت‌های شارژ و دشارژ ارائه می‌دهد.

Table (5): Battery performance status and its corresponding current range

جدول (۵): وضعیت عملکرد باتری و محدوده جریان متناظر

وضعیت عملکرد باتری	محدوده جریان
دشارژ ($SoC > SoC_{min}$)	۰-۳۰ آمپر
شارژ ($SoC < SoC_{max}$)	۰-۳۰ آمپر
بدون استفاده	۰ آمپر

۴-۵- ارزیابی سیستم کنترل سرعت موتور

سرعت‌های مختلف موتور در شناور دریایی منجر به مقادیر متفاوتی از تقاضای توان می‌شوند. به‌منظور ارزیابی و بررسی عملکرد صحیح کنترل‌کننده سرعت موتور در شبکه سه‌فاز، سیستم تحت سناریوی ناوبری عادی و با سرعت‌های مختلف موتور، مطابق جدول ۶، آزمایش شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم تغییرات تقاضای توان متناظر با سرعت انتخاب‌شده موتور را به‌درستی بازتاب می‌دهد که عملکرد صحیح کنترل‌کننده سرعت را نشان می‌دهد. توجه شود سرعت موتور بر حسب دور بر دقیقه (rpm) گزارش شده و محدوده آزمایش‌شده بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه است.

Table (6): Details of motor speed and equivalent load demand for each speed in a three-phase network

جدول (۶): جزئیات سرعت موتور و تقاضای بار معادل برای هر سرعت در یک شبکه سه‌فاز

سرعت موتور (دور بر دقیقه)	تقاضای بار معادل موتور
۱۰۰	۰,۱۵۴ کیلووات
۸۰۰	۷۷,۱ کیلووات
۱۵۰۰	۵۰۱ کیلووات

۵-۵- ارزیابی کنترل‌کننده سناریوی اضطراری الکتریکی

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، هنگامی که شناور دریایی وارد شرایط اضطراری الکتریکی می‌شود، بارها باید بر اساس یک فهرست اولویت از پیش تعیین‌شده از شبکه جدا شوند تا پایداری سیستم حفظ شود.

به‌منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده سناریوی اضطراری الکتریکی، منابع توان در سه مرحله مجزا و به‌صورت عمدی از شبکه تحت سناریوی ناوبری عادی قطع شدند؛ این شرایط در جدول ۷ مشخص شده‌اند. پاسخ و تصمیم‌گیری کنترل‌کننده در خصوص قطع بارها بر اساس سطوح اولویت آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت تا عملکرد صحیح سیستم اطمینان حاصل شود. در مرحله ۳ (که متناظر با شرایط بار سنگین حالت رزمی است)، تنها پیل سوختی ۳ و باتری ۲ بر اساس سناریوی اضطراری تعریف‌شده از مدار خارج می‌شوند؛ سایر واحدهایی که در مراحل پیشین خارج شده بودند (ژنراتور ۲، پیل سوختی ۱ و ۲، پیل سوختی ۴، باتری ۱) در وضعیت قطع خود باقی می‌مانند و علامت «--» در این مرحله نشان‌دهنده تداوم وضعیت قبلی آن‌هاست و ارتباطی با رویداد جدی ندارد. در این جدول، Exit نشان‌دهنده خروج منبع طی همان مرحله است؛ Stay منبع تحت ارزیابی قرار گرفته اما با اولویت بالاتر در مدار باقی مانده است؛ و «--» به دو حالت اشاره دارد: یا منبع مورد آزمون قطع در آن مرحله قرار نگرفته (مانند ژنراتور ۱ در تمام مراحل)، یا در مرحله‌ای پیشین از مدار خارج شده و بدون تغییر باقی مانده است.

Table (7): Sequence of power supply sources exiting the three-phase network during three consecutive stages of intentional source disconnection under the normal navigation scenario

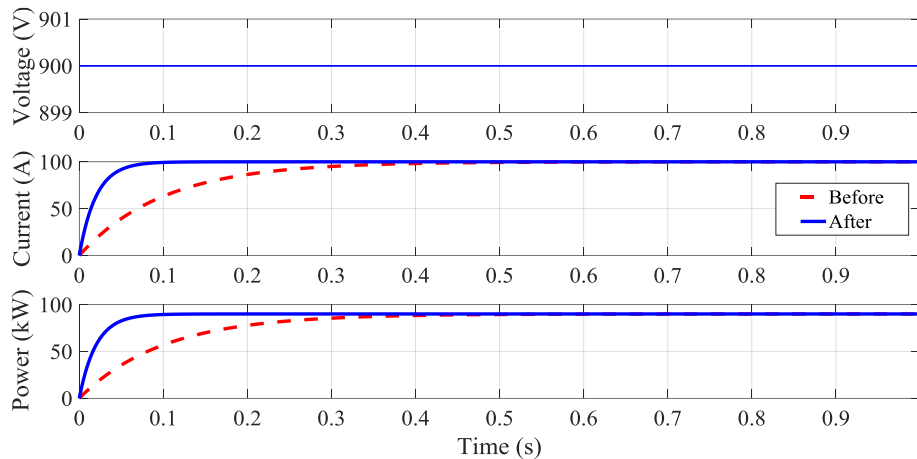
جدول (۷): ترتیب خروج منابع تأمین توان از شبکه سه‌فاز طی سه مرحله‌ای متوالی قطع عمدی منبع در سناریوی ناوبری عادی

سناریو	ژنراتور دیزلی ۱	ژنراتور دیزلی ۲	پیل سوختی ۱	پیل سوختی ۲	پیل سوختی ۳	پیل سوختی ۴	باتری ۱	باتری ۲
مرحله ۱	--	Exit	Stay	Exit	Stay	Stay	Stay	Stay
مرحله ۲	--	--	Exit	--	Stay	Exit	Exit	Stay
مرحله ۳	--	--	--	--	Exit	--	--	Exit

علاوه بر سه سناریوی اصلی، سیستم مدیریت انرژی تحت یک حالت اضطراری اضافه‌بار نیز ارزیابی شد که در آن تقاضای بار به‌صورت مصنوعی از ظرفیت نامی سیستم (۶۳۰ کیلوولت‌آمپر) فراتر برده شد. در این حالت، EMS با فعال‌سازی زنجیره حذف بار مبنی بر اولویت، پایداری شبکه را حفظ کرد.

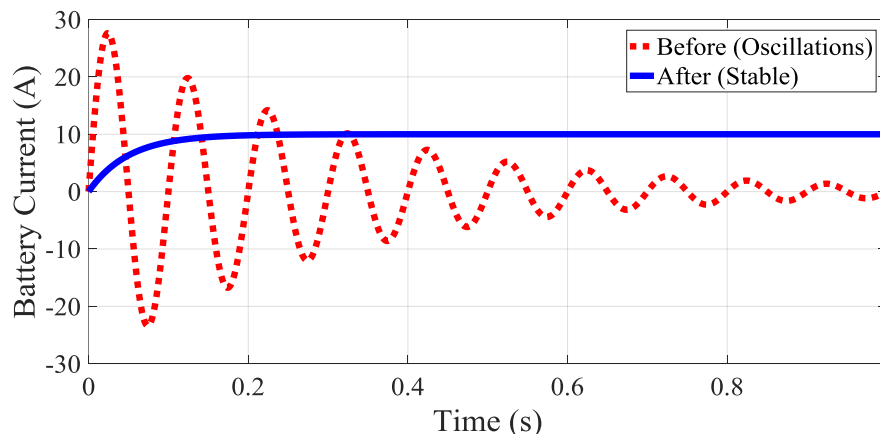
۵-۶- اعتبارسنجی عملکرد دینامیکی

اثربخشی الگوریتم اصلاح‌شده از طریق شبیه‌سازی و مقایسه پاسخ پیل سوختی و باتری، پیش و پس از بهینه‌سازی، اعتبارسنجی شد:



شکل (۹): خروجی پیل سوختی: قبل و بعد از بهینه‌سازی

Figure (9): Fuel cell output: before vs after optimization



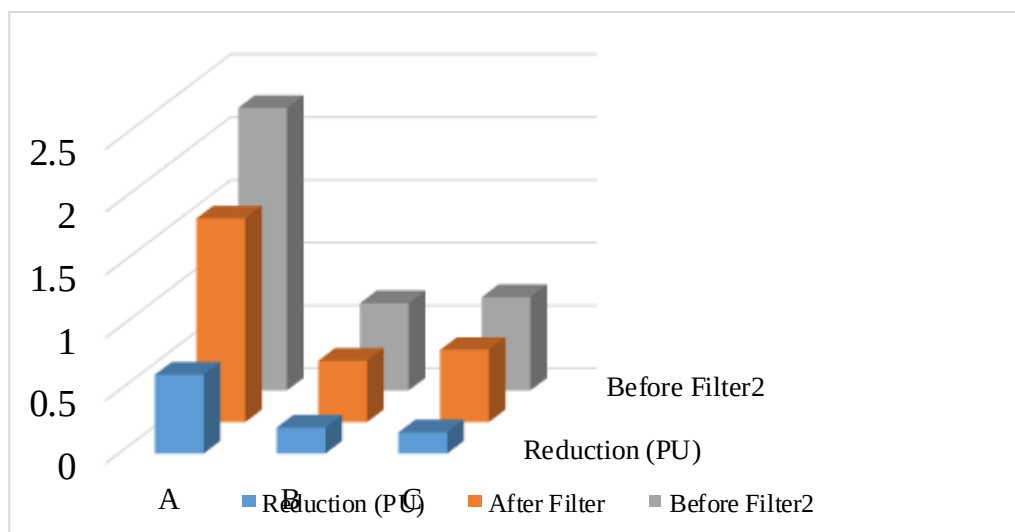
شکل (۱۰): جریان باتری: قبل و بعد از بهینه‌سازی

Figure (10): Battery current: before vs after optimization

- خروجی پیل سوختی (شکل ۹):
 ✓ پیش از بهینه‌سازی: تثبیت کند جریان (حدود ۱۰۰ میلی‌ثانیه) به دلیل سربار ناشی از تخصیص دینامیکی آرایه
 ✓ پس از بهینه‌سازی: زمان نشست سریع (حدود ۲۰ میلی‌ثانیه) که موجب بهبود اینرسی سیستم می‌شود.
- جریان باتری (شکل ۱۰):
 ✓ پیش از بهینه‌سازی: نوسانات (± 30 آمپر) در هنگام گذار بین حالت‌های شارژ و دشارژ
 ✓ پس از بهینه‌سازی: جریان پایدار (± 5 آمپر) که تنش وارد بر سلول‌های باتری را کاهش می‌دهد.
 روش تخصیص ایستا، تأخیر محاسباتی را ۶۰ درصد کاهش داده و امکان پاسخ سریع‌تر به گذراهای بار را فراهم کرده است. این موضوع با هدف لایه کنترل ثالثه در زمینه تصمیم‌گیری بلادرنگ هم‌راستا است.

۷-۵- بهبود کیفیت توان

تأثیر فیلتر LC بر سرکوب هارمونیک‌ها در هر سه فاز ارزیابی شده و نتایج آن در شکل ۱۱ و جدول ۸ ارائه شده است.



شکل (۱۱): مقایسه THD در شبکه سه‌فاز

Figure (11): THD comparison in three-phase

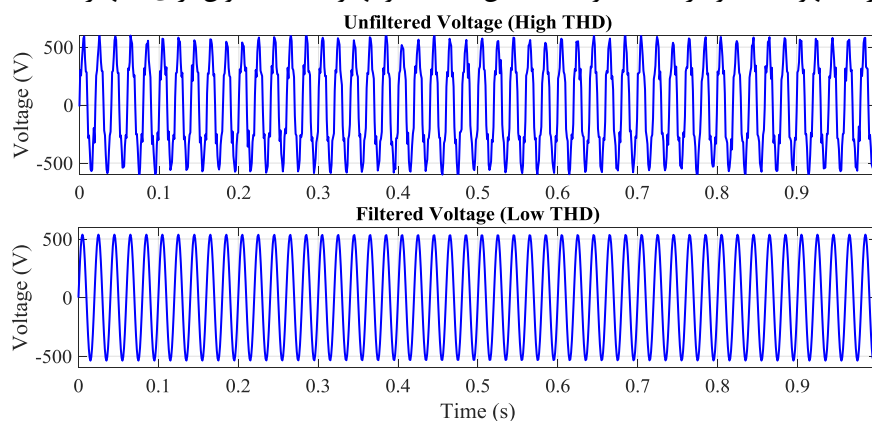
Table (8): THD comparison in three-phase

جدول (۸): مقایسه THD در شبکه سه‌فاز

فاز	مقدار THD قبل از فیلتر (درصد)	مقدار THD بعد از فیلتر (درصد)	کاهش (درصد)
A	۲,۲۴۸	۱,۶۲	۲۷,۹
B	۰,۶۹۵	۰,۴۸۸	۲۹,۷
C	۰,۷۴۳	۰,۵۷۴	۲۲,۷

فیلتر، THD ولتاژ را به کمتر از ۲ درصد کاهش داده است که با الزامات استاندارد IEEE Std. 519 مطابقت دارد و موجب کاهش گرمایش و تلفات تجهیزات می‌شود.

شکل ۱۲ شکل موج ولتاژ شبکه تک‌فاز را هم پیش از بهبود کیفیت توان (حالت بدون فیلتر) و هم پس از بهبود کیفیت توان با استفاده از فیلتر LC نشان می‌دهد. همان‌طور که به‌وضوح مشاهده می‌شود، فیلتر LC به‌طور مؤثری هارمونیک‌های ولتاژ را سرکوب کرده و شکل موج سینوسی تمیزتری ایجاد می‌کند. این بهبود به‌ویژه در کاهش نویز با فرکانس بالا، یعنی هارمونیک مرتبه پنجم و بالاتر، مشهود است و در نتیجه موجب کاهش THD و بهبود کیفیت توان برای تجهیزات حساس می‌شود.



شکل (۱۲): مقایسه شکل موج ولتاژ: بدون فیلتر در مقابل فیلتر شده

Figure (12): Voltage waveform comparison: unfiltered vs filtered

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک راهبرد جامع مدیریت انرژی را توسعه داده و برای شبکه‌های توان هیبریدی دریایی شناور، طراحی و اعتبارسنجی کرده است. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی به صورت یک سیستم کنترل سلسله‌مراتبی سه‌سطحی ساختار بندی شده است که قادر به هماهنگی هوشمند میان ژنراتورهای دیزلی، پیل‌های سوختی PEM و واحدهای ذخیره‌سازی باتری است. با به کارگیری یک راهبرد قطعی مبتنی بر قواعد، EMS منابع توان را بر اساس تقاضای بار در زمان واقعی، قواعد اولویت‌بندی و وضعیت ذخیره‌سازی انرژی به صورت دینامیکی تخصیص می‌دهد. پیاده‌سازی دقیق سیستم در محیط MATLAB/Simulink امکان شبیه‌سازی ۶۰ حالت بهره‌برداری را تحت سه سناریوی متمایز شامل بار اولیه، ناوبری عادی و حالت رزمی فراهم کرده است. نتایج شبیه‌سازی توانایی سیستم را در مدیریت زمان‌بندی منابع، حذف بار و سناریوهای اضطراری، ضمن حفظ پایداری شبکه و انعطاف‌پذیری عملیاتی، تأیید کردند. ماژولار بودن و قابلیت انطباق EMS پیشنهادی، آن را برای توسعه‌های آتی، از جمله یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر اضافی یا پیکربندی‌های پیچیده‌تر شناورها، مناسب می‌سازد. علاوه بر این، نمایش حالت‌های بهره‌برداری با استفاده از منطق بازخورد، قابلیت اطمینان و تفسیرپذیری سیستم کنترلی را برای اپراتورهای دریایی افزایش می‌دهد. در مطالعات آینده، تمرکز بر یکپارچه‌سازی روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی و توسعه مدل برای پلتفرم‌های سخت‌افزار در حلقه به منظور اعتبارسنجی بلادرنگ خواهد بود. روش تخصیص ایستا و فیلتر LC پیشنهادی نیز به ترتیب زمان پاسخ دینامیکی را ۶۰ درصد و اعوجاج هارمونیک را ۲۸ درصد کاهش دادند و در نتیجه، پایداری و کیفیت توان را برای عملیات‌های حیاتی مأموریتی بهبود بخشیدند. در این مطالعه مقایسه کمی مستقیمی بین راهبرد Rule-Based و روش‌های بهینه‌سازی بلادرنگ نظیر DP، MPC یا EMS‌های فازی تطبیقی انجام نشده است. اگرچه راهبرد پیشنهادی مزیت قطعیت زمان اجرا و سادگی پیاده‌سازی بلادرنگ را ارائه می‌دهد، ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد بهینگی (نظیر مصرف سوخت یا طول عمر باتری) در برابر این روش‌ها به عنوان یک جهت پژوهشی مهم برای کار آینده شناسایی شده است.

References

مراجع

- [1] H. Pourrahmani, M. Gay, A. Yavarinasab, and J. Van herle, "Optimization and dynamic responses of an integrated fuel cell and battery system for an 800 kW ferry: A case study," *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 9757–9776, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.144.
- [2] S. Kumar, "Deep Reinforcement Learning based Energy Management in Marine Hybrid Vehicle," NTNU, 2021.
- [3] M. Al- Saadi, M. Al- Greer, and M. Short, "Strategies for controlling microgrid networks with energy storage systems: A review," *Energies*, Vol. 14, No. 21, pp. 7234, 2021, doi: 10.3390/en14217234.
- [4] C. De, S. Peixoto, and S. Paulo, "Modeling, simulation and control of hybrid power systems for vessels," *Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica (PPGEM)*, 2022.
- [5] T. Aljohani, "Intelligent Type-2 Fuzzy Logic Controller for Hybrid Microgrid Energy Management with Different Modes of EVs Integration," *Energies*, Vol. 17, No. 12, 2024, doi: 10.3390/en17122949.
- [6] M. Gaber, M. Hamad, S. El-banna, and M. El-Dabah, "An Intelligent Energy Management System for Ship Hybrid Power System based on Renewable Energy Resources," *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, Vol. 16, No. 60, pp. 712–723, 2021, doi: 10.21608/aej.2021.187967.
- [7] N. Ghardash khani, "Improving dynamic response of PEMFC using SMES and bidirectional DC/DC converter," *Automatika*, Vol. 63, No. 4, pp. 745–755, 2022, doi: 10.1080/00051144.2022.2066768.
- [8] M. Gaber, S. H. El-Banna, M. El-Dabah, and M. S. Hamad, "Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system," *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 7989–7998, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.054.

- [9] H. B. Farahabadi, M. R. Firuzjaei, A. M. Mir, and R. Youneszadeh, "Fuel Cell Power System Conceptual Design for Unmanned Underwater Vehicles Article Information," *Fuel Cell & Energy Storage*, Vol. 10, pp. 33–50, 2023, doi: 10.22104/IJHFC.2022.5884.1248.
- [10] S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, "An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4633–4658, April 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3024914.
- [11] J. Penga, T. Vidović, G. Radica, and Ž. Penga, "Analysis of Hybrid Ship Machinery System with Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Battery Pack," *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 14, No. 7, 2024, doi: 10.3390/app14072878.
- [12] M. Minutillo, V. Cigolotti, G. Di Ilio, A. Bionda, E. J. Boonen, and T. Wannemacher, "Hydrogenbased technologies in maritime sector: technical analysis and prospective," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2022. doi: 10.1051/e3sconf/202233406011.
- [13] H. Chen, Z. Zhang, C. Guan, and H. Gao, "Optimization of sizing and frequency control in battery/supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship," *Energy*, Vol. 197, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117285.
- [14] A. Aranizadeh, S.M. Shahrtash, A. Gholami, "Comprehensive Condition Assessment of Circuit Breakers in a Power Network for Maintenance Scheduling", *IET Generation Transmission & Distribution*, Vol. 17, pp. 3463–3476, 2023.
- [15] A. Aranizadeh, S.M. Shahrtash, A. Gholami, "Prioritizing CBs maintenance and identifying mandatory maintenance at higher priorities", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022.
- [16] A. Aranizadeh, B. Vahidi, A. Khorsandi, "Extending battery health in wind-integrated systems through optimal state of charge management: A multi-objective approach", *Journal of Energy Storage*, Vol. 146, 2026.
- [17] A. Aranizadeh, B. Vahidi, A. Khorsandi, "An integrated Gaussian–Probabilistic–Fuzzy framework for health assessment and remaining useful life prediction of medium-voltage switchgears", *PLoS One*, Vol. 21, 2026.
- [18] L. Xu, B. Wei, Y. Yu, J. M. Guerrero, and J. Vasquez, "Coordinated control of diesel generators and batteries in dc hybrid electric shipboard power system," *Energies (Basel)*, Vol. 14, No. 19, 2021, doi: 10.3390/en14196246.
- [19] S. B. Roslan, D. Konovessis, and Z. Y. Tay, "Sustainable hybrid marine power systems for power management optimisation: A review," *Energies*, Vol. 15, No. 24, pp. 9622, 2022, doi: 10.3390/en15249622.
- [20] M. Kolodziejski and I. Michalska-Pozoga, "Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems," *Energies*, Vol. 16, No. 3, pp. 1122, 2023, doi: 10.3390/en16031122.
- [21] D. Tarnapowicz, S. German-Galkin, A. Nerc, and M. Jaskiewicz, "Improving the Energy Efficiency of a Ship's Power Plant by Using an Autonomous Hybrid System with a PMSG," *Energies (Basel)*, Vol. 16, No. 7, 2023, doi: 10.3390/en16073158.
- [22] S. Karagiorgis, S. Nasiri, and H. Polinder, "Implementation of Ship Hybridisation: Sizing a Hybrid Crew Transfer Vessel Considering Uncertainties," *Conference Proceedings of INEC*, Vol. 16, 2022, doi: 10.24868/10643.
- [23] S. Kim and J. Kim, "Optimal energy control of battery hybrid system for marine vessels by applying neural network based on equivalent consumption minimization strategy," *J Mar Sci Eng*, Vol. 9, No. 11, 2021, doi: 10.3390/jmse9111228.
- [24] Z. Ma et al., "Optimal SOC Control and Rule-Based Energy Management Strategy for Fuel-CellBased Hybrid Vessel including Batteries and Supercapacitors," *J Mar Sci Eng*, Vol. 11, No. 2, 2023, doi: 10.3390/jmse11020398.
- [25] A. Aranizadeh, B. Vahidi, A. Khorsandi, "Data inherent assessment of electrical equipment by failure pattern and self-evaluation decision-making algorithm", *Scientific Reports*, Vol. 15, 2025.
- [26] H. A. Trinh, H. V. A. Truong, M. D. Pham, T. C. Do, H. H. Lee, and K. K. Ahn, "Comprehensive Control Strategy and Verification for PEM Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 421–436, Mar. 2023, doi: 10.1007/s40684-022-00498-w.

- [27] X. Sun, Y. Gao, Q. Zhang, and S. Ding, "Machine Learning-Based Extraction Method for Marine Load Cycles with Environmentally Sustainable Applications," *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 16, No. 11, 2024, doi: 10.3390/su16114840.
- [28] H. Neyahosseini, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi, "Resilience and Flexibility Coordination in VPP-Based Multi-Agent Microgrids via a Multi-Layer Framework", *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 81-99, 2025.
- [29] M. Shahgholian, M. Vasili, G. Shahgholian, "A Brief Overview of Reliability Approaches in the Restructured Power System", *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-18, 2025.
- [30] M. F. Abed Al-Safi, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi "An Analytical Review of PSO Algorithm Applications in Power System Flexibility and Resilience", *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 85-105, 2025.
- [31] A. Mofidi, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi "A Review of the Role of Flexible Renewable Energy Hubs in Enhancing Economic Indices, Voltage Security, and Reliability of Microgrids", *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-16, 2026.
- [32] B. Robert, E. B. Brown, and P. C. Sen, *Principles of electric machines and power electronics*, No. 1. John Wiley & Sons, 2021.
- [33] N. M. Souleman, O. Tremblay, and L. A. Dessaint, "A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell power systems," 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09, pp. 1722–1729, 2009, doi: 10.1109/PES.2009.5275853.
- [34] O. Tremblay and L. A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications," 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2009, EVS 24, Vol. 2, pp. 930–939, 2009.
- [35] M. M. Rana, M. F. Romlie, M. F. Abdullah, M. Uddin, and M. O. Rahman, "Modeling of an isolated microgrid with hybrid PV-BESS system for peak load shaving simulation," *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, Vol. 8, No. 75, pp. 352–361, 2021, doi: 10.19101/IJATEE.2020.762168.

زیر نویس‌ها:

1. Gross Domestic Product
2. International Maritime Organization
3. Artificial Intelligence
4. Energy Storage System
5. Power Management System
6. Hybrid Micro Grid
7. Electrical Vehicle
8. Doubly Fed Induction Generator
9. Energy Management System
10. Battery Energy Storage System
11. Permanent Magnet Synchronous Generator
12. Particle Swarm Optimization
13. State of Charge
14. Distributed Energy Resource
15. Specific Fuel Oil Consumption
16. Follower Load Deterministic Base-Rule
17. Diesel Generator
18. Total Harmonic Distortion
19. Root Mean Square
20. Virtual Power Plant