



Presenting a Strategy for Utilizing Predictive Control Methods to Reduce Frequency Fluctuations in Ship Electrical Systems

Gholam Reza Lalezar

Assistant Professor, Department of Electrical and Mechatronics, Faculty of Electromagnetics and Electronic Materials, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran

Email: g.lalezar@mut-es.ac.ir

Abstract

Today, logistics and sustainment play a decisive role in modern warfare. Maritime transportation of equipment is among the most common logistical methods. Frequency disturbances can severely degrade operational performance. Maintaining the power system frequency within permissible limits is one of the critical requirements on ships, particularly in defense-related applications. In this study, through consultation with experts associated with maritime industries, both internal and external environmental factors were examined. By prioritizing these environmental factors, relevant strategies were subsequently extracted. Among the most important identified strategies are: “planning for the development of sciences and technologies related to maritime industries for defense applications,” “establishing policies for material and non-material support to strengthen and enhance effective collaboration among elites, university faculty members, and knowledge-based companies with the maritime industry and the country’s sea-based operational domain,” and “continuous optimization and localization of existing equipment and components in ship power systems in line with technological advancements.” For ten major strategies, a number of plans, programs, and projects were defined. One of the key strategies is planning for the development of sciences and technologies related to maritime industries in defense applications. Among the important projects contributing to the realization of this strategy is the establishment of laboratory and simulation infrastructures for controlling disturbances in equipment. Subsequently, a model of a ship power system is presented, and the effect of a predictive control method on system frequency oscillations is investigated. The results of applying the proposed control method indicate a significant improvement in transient response speed. The state-of-charge (SOC) coefficient is another important parameter in the objective function of the proposed method. Steady-state experimental results show that incorporating this coefficient prevents frequent battery switching operations and increases battery lifespan, while not degrading frequency quality.

Keywords: Predictive Control, Environmental Factors, Ship Power System, Frequency Oscillations, Strategy





سال نهم، شماره یکم (پیاپی ۲۹)، بهار ۱۴۰۵، صص. ۱۱-۳۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

مقاله پژوهشی

ارائه راهبرد جهت بهره‌برداری روش کنترل پیش‌بین با هدف کاهش نوسانات فرکانسی در سامانه برق کشتی

غلامرضا لاله‌زار

استادیار گروه برق و مکترونیک، دانشکده الکترومغناطیس و مواد الکترونیکی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران
Email: g.lalezar@mut-es.ac.ir

چکیده

آماد و لجستیک نقش تعیین‌کننده در نبردها دارد. حمل‌ونقل دریایی تجهیزات از مرسوم‌ترین روش‌ها است. اختلالات فرکانسی می‌تواند بازدهی عملکرد را به شدت کاهش دهد. نگهداری فرکانس سامانه قدرت در محدوده مجاز یکی از الزامات مهم در کشتی‌ها به‌ویژه در کاربردهای دفاعی است. در این پژوهش با مشورت متخصصین مرتبط با صنایع دریایی، به بررسی عوامل محیطی درونی و بیرونی پرداخته شده است. با اولویت‌بندی عوامل محیطی به استخراج راهبردها پرداخته شده است. از مهم‌ترین راهبردهای استخراج شده می‌توان به «برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی»، «ایجاد سیاست‌های حمایت مادی و معنوی جهت تقویت و مؤثر سازی ارتباط نخبگان، اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان با صنعت دریایی و حوزه عملیاتی دریای پناه کشور» و «بهینه‌سازی و بومی‌سازی مستمر تجهیزات و قطعات موجود در سامانه توان کشتی با توجه به پیشرفت فناوری‌ها» اشاره کرد. برای ۱۰ راهبرد قوی، تعدادی طرح، برنامه و پروژه تعریف شده است. یکی از راهبردهای قوی برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی است. از پروژه‌های مهم در تحقق این راهبرد، ایجاد زیرساخت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کنترل اختلالات بر تجهیزات است. در ادامه مدلی از سامانه توان کشتی بیان شده و به بررسی اثر روش کنترل پیش‌بین بر نوسانات فرکانسی سامانه پرداخته شده است. نتایج استفاده از روش کنترلی نشان داد که پاسخ حالت گذرا به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع می‌شود. ضریب SOC دیگر ضریب مهم در تابع هدف روش پیشنهادی است که آزمایشات حالت دائم نشان می‌دهد که به‌کارگیری این ضریب باعث جلوگیری از قطع و وصل‌های مکرر باتری و افزایش طول عمر آن می‌گردد درحالی‌که به‌کارگیری این ضریب به کیفیت فرکانس لطمه‌ای وارد نمی‌کند.

کلیدواژه‌ها: کنترل پیش‌بین، عوامل محیطی، سامانه برق کشتی، نوسانات فرکانسی، راهبرد

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1404.9.1.1.9

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



مقدمه

حمل و نقل دریایی به دلیل ظرفیت بالا، صرفه جویی در هزینه‌ها و قابلیت حمل مقادیر زیادی کالا، یکی از مهم‌ترین روش‌های حمل و نقل بین‌المللی است. این نوع حمل و نقل نقش حیاتی در تجارت جهانی دارد و حدود ۸۰ درصد از کالاهای جهان از طریق دریا جابه‌جا می‌شوند. بهره‌گیری از حمل و نقل دریایی نه تنها باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود بلکه به توسعه اقتصادی و افزایش روابط تجاری بین کشورها کمک می‌کند. توسعه فناوری‌ها به کشتی‌های بدون خدمه و خودمختار منجر می‌شود (آگاروالا^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین صنایع دریایی نقشی اساسی در نبردها دارند (اسپلر^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). یکی از مهم‌ترین نبردهای اخیر بین روسیه و اوکراین است. مسئله آماد و لجستیک دفاعی نقشی تعیین‌کننده را داشته است (پویس^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). تحلیل محیطی و ارزیابی عوامل درونی و بیرونی، ابزارهای کلیدی در برنامه‌ریزی استراتژیک هستند. این تحلیل‌ها باعث فهم عمیق از محیط، شناسایی فرصت‌ها و تهدیدها و بهره‌برداری بهتر از منابع شده و آمادگی جهت تغییرات و کاهش ریسک‌ها را میسر می‌کند. در این پژوهش با مشورت متخصصین مرتبط با صنایع دریایی، به بررسی عوامل محیطی درونی (نقاط قوت و ضعف) و عوامل محیطی بیرونی (تهدید و فرصت) پرداخته شده است. با اولویت‌بندی عوامل محیطی به استخراج راهبردها پرداخته شده است. برنامه‌های اجرایی، فعالیت‌های لازم‌الاجرائی هستند که در راستای هر یک از راهبردها و جهت تحقق اهداف کلان، مورد نیاز هستند. برای ۱۰ راهبرد قوی، تعدادی طرح، برنامه و پروژه تعریف شده که در چند مرحله به اجرا درمی‌آیند و تحقق اهداف برنامه را تضمین می‌نمایند. یکی از راهبردهای قوی برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی است. از پروژه‌های مهم در تحقق این راهبرد، ایجاد زیرساخت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کنترل اختلالات بر تجهیزات است. در ادامه مدلی از سامانه توان کشتی بیان شده و به بررسی اثر روش کنترل پیش‌بین بر نوسانات فرکانسی

-
1. Agarwala
 2. Speller
 3. Powis



سامانه پرداخته شده است. نگهداری فرکانس سامانه قدرت در محدوده مجاز یکی از الزامات مهم در کشتی‌ها به‌ویژه در کاربردهای دفاعی است. عدم تعادل بین بار و سامانه تولید باعث خروج فرکانس از این محدوده مجاز می‌شود. بنابراین در این مقاله در قسمت پایانی، مسئله تعادل فرکانس با به‌کارگیری روش کنترل پیش‌بین مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۱. مبانی نظری پژوهش

در سال‌های اخیر شرکت‌های کشتیرانی تحت فشار فزاینده‌ای برای رعایت مقررات انتشار، به‌ویژه هنگام ورود به مناطق کنترل انتشار^۱ (ECA) هستند. برقی شدن کشتی‌ها این امکان را به وجود می‌آورد که شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش‌یافته و همچنین در هزینه‌ها صرفه‌جویی شود. این مزایا باعث شده کشتی‌ها پیشرفت فناوری بزرگی در زمینه الکتریکی داشته باشند تا جایی که امروزه کشتی‌ها تقاضای توان بالاتر و بارهایی با ماهیت متغیر دارند (لان^۲ و همکاران، ۲۰۱۶؛ رویکو^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). این مشخصه، بررسی، تحلیل و کنترل سامانه برق کشتی را همچنان که سامانه برق شهری در این موارد مورد مطالعه قرار گرفته به یک نیاز ضروری تبدیل کرده است. البته سامانه تولید برق کشتی در مقایسه با سامانه برق شهری دارای ظرفیت و اینرسی محدودی است و از سیستم‌های قدرت سایر کشتی‌های اطراف پشتیبانی نمی‌کند. این کوچک بودن و جدا بودن از سایر سیستم‌های قدرت، سامانه برق کشتی^۴ (SPS) را مستعد اختلال می‌کند. (SPS) مورد نظر در شکل (۱)، توضیح داده شده است (فانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ یان^۶ و همکاران، ۲۰۲۴). تغییرات مکرر بار و متعاقباً عدم تعادل بین تولید و تقاضا یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد این اختلالات بوده که نیازمند در نظر

۱. مناطق کنترل انتشار (ECA) یا Emissions Control Areas مناطق خاصی در دریای آزاد و بنادر هستند که مقررات سخت‌تری برای کاهش انتشار آلاینده‌های هوا از وسایل نقلیه دریایی، مانند کشتی‌ها، اعمال می‌شود. هدف از تعیین این مناطق، کاهش آلودگی هوا و حفاظت از محیط زیست دریایی و هوایی در مناطق مهم است.

2. Lan

3. Ruichu

4 Shipboard Power System

5. Fang

6. Yun

گرفتن تمهیداتی جهت کاهش اثرات آن است (رادان^۱ و همکاران، ۲۰۰۸؛ میندوکوسکی^۲ و همکاران، ۲۰۰۵؛ میروسوی^۳ و همکاران، ۲۰۱۵؛ پروسالیدیس^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از منبع ثانویه انرژی یکی از راه‌حل‌هایی است که می‌توان جهت حفظ این تعادل پیشنهاد کرد. شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد استفاده از این منبع می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای کاهش این اثرات در سامانه قدرت کشتی به‌کار گرفته شود (هو^۵ و همکاران، ۲۰۱۴؛ آرانی^۶ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ونجی^۷ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لوپز^۸ و همکاران، ۲۰۰۶؛ آلبارازانچی^۹ و همکاران، ۲۰۱۵؛ بو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). به‌کارگیری منبع یا منابع انرژی در کنار سامانه تولید اصلی، مسئله تقسیم قدرت بین منابع به وجود می‌آید زیرا که بایستی این تقسیم به‌طور مناسب انجام پذیرد. در (کالیکاتزاراکیس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸). از راه‌حل بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور تقسیم بهینه توان بین سه یا چند منبع انرژی استفاده شده که این منابع می‌توانند باتری، ژنراتور و یا منابع انرژی تجدیدپذیر باشند. راهبرد کنترل تعادل توان و مدیریت بهینه انرژی در سامانه قدرت برق کشتی و حفظ ولتاژ باس در حد مطلوب با استفاده از منطق فازی و ترکیبی از منابع باتری و ابرخازن به‌عنوان سامانه ذخیره انرژی در (گو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۶) پیشنهاد شده است. در (فدل^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۰)، روش هموارسازی تغییرات توان با استفاده از باتری‌ها در شبکه برق کشتی پیشنهاد شده است. در اینجا باتری‌ها به‌منظور کاستن از نوسانات فرکانس و جلوگیری از فرسودگی بیش از حد منبع تولید به‌کار گرفته شده است. البته همان‌گونه که در مقاله نیز اشاره شده است نوسانات

-
1. Radan
 2. Mindykowski
 3. Miroševi
 4. Prousalidis
 5. Hou
 6. Arani
 7. Wenjie
 8. Lopes
 9. Al-Barazanchi
 10. Bø
 11. Kalikatzarakis
 12. Guo
 13. Faddel



زیاد باعث گرم شدن بیش از حد باتری‌ها می‌شود. تا جایی که نویسندگان روشی مبتنی بر مدل پیش‌بین به‌منظور استفاده بهینه از باتری و جلوگیری از گرم‌شدن بیش از حد پیشنهاد داده‌اند. فناوری توان هیبریدی برای کشتی‌ها روشی مؤثر برای ارتقای توسعه سبز و کم‌کربن صنعت دریایی است. برای کاهش مصرف سوخت، یک راهبرد مدیریت انرژی کنترل پیش‌بینی‌کننده مدل غیرخطی مبتنی بر شناسایی شرایط کاری برای مدیریت بهینه انرژی پیشنهاد شده است تا مشکل تنظیم بهینه ژنراتورها و باتری‌ها را در زمان واقعی حل کند (یان^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). طراحی بهینه سامانه مدیریت انرژی کشتی هیبریدی تحت شرایط مختلف دریایی با استفاده از مدل کنترل پیش‌بین صورت پذیرفته است. یک مدل کنترل پیش‌بین برای مدیریت مؤثر سامانه ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی باتری‌ها و ابرخازن‌ها بیان شده است که به‌صورت پویا به تغییرات توان ناشی از امواج اقیانوس پاسخ می‌دهد (مشتاق^۲ و همکاران، ۲۰۲۵). در این مقاله هدف اصلی ارزیابی محیطی و ارائه راهبردهایی برای افزایش بهره‌وری کشتی‌ها وضعیت فرکانسی بود. در کنار آن با ارائه مدلی به بررسی اعمال روش کنترل پیش‌بین پرداخته شده است. نسبت به سایر مقالات اولویت اصلی پاسخ حالت گذرا بود که به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر شده است. همچنین با اعمال ضریب Soc در آزمایشات حالت دائم، قطع و وصل‌های مکرر باتری کاهش و طول عمر آن افزایش می‌یابد. در روش پیشنهادی به ازای ضریب درصد مشارکت باتری، مقادیر اختلاف فرکانس جدید با سرعت مرجع، اختلاف فرکانس جدید با فرکانس بازه زمانی قبل و اختلاف تغییرات Soc در دو بازه زمانی $k+1$ و k به‌دست می‌آید. سپس هرکدام از سه عبارت در ضریب وزنی مربوط به خود ضرب شده و مقدار نهایی که حاصل جمع این سه است در حافظه ذخیره می‌شود. این فرایند تا n که مقدار درصد مشارکت‌های باتری است ادامه خواهد داشت. سپس از بین این n مقدار ضریب مشارکت باتری که منجر به کم‌ترین مقدار تابع هدف می‌شود انتخاب شده و بعد از عبور از گین مربوط به ضریب خروجی به سامانه قدرت منتقل می‌شود. نسبت به سایر مقالات

1. Yan

2. Mushtaq

حجم محاسبات کم‌تر شده و با مقایسه پاسخ حالت دائم در ۴ حالت، اثر اعمال ضرایب به‌خوبی نشان داده شده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی است و از روش مصاحبه، تحلیل محیطی و اشباع نظری استفاده شده است. روش اشباع نظری (که به انگلیسی نظریه اشباع‌پذیری^۱ نامیده می‌شود) یک رویکرد در تحقیق کیفی است که اجازه می‌دهد محقق تصمیم بگیرد که جمع‌آوری داده‌ها کافی است و پژوهش باید پایان یابد. هدف اصلی این روش، رسیدن به نقطه‌ای است که اطلاعات جدید، ارزش افزوده‌ای برای درک پدیده مورد مطالعه نداشته باشد، یعنی داده‌ها به اندازه کافی غنی و جامع شده‌اند. محقق هر چه بیشتر داده جمع می‌کند، دسته‌بندی‌ها و مفاهیم دقیق‌تر مشخص می‌شوند. پس از هر مرحله جمع‌آوری، محقق تحلیل‌های اولیه را انجام می‌دهد تا الگوها، مفاهیم و رهیافت‌ها مشخص شوند. زمانی که نمونه‌های جدید، مفاهیم و الگوهای تکراری را به وجود می‌آورند و هیچ‌چیز جدیدی به دانش موجود اضافه نمی‌کند، عمل اشباع اتفاق افتاده و فرایند پایان یافته است و از طریق مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، پرسش‌نامه با مصاحبه و هم‌فکری با خبرگان داده‌های لازم جمع‌آوری گردید و سپس پس از تحلیل داده‌ها و نتایج به ارائه راهبردها در زمینه کنترل نوسانات در سامانه برق کشتی پرداخته شده است، اقدامات و روند پیش‌گرفته شده در این پژوهش به‌صورت زیر است:

- ❖ بیان مسئله، اهداف پژوهش، پیشینه پژوهش
- ❖ ادبیات و مبانی نظری پژوهش
- ❖ بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل محیطی
- ❖ طراحی پرسش‌نامه
- ❖ جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل آن‌ها



❖ ارائه راهبردها

❖ پیاده‌سازی شبیه‌سازی و مشاهده نتایج در کنترل نوسانات فرکانسی

جامعه آماری این پژوهش، ۲۳ نفر از خبرگان، صاحب‌نظران و فارغ‌التحصیلان، آشنایان حوزه صنایع دریایی و متخصصین هستند، قلمرو مکانی پژوهش نیز، جمهوری اسلامی ایران و افق زمانی ۱۴۱۴ است.

پس از طراحی پرسش‌نامه و توزیع آن، پاسخ‌دهندگان به هر یک از نقاط قوت، ضعف، فرصت و تهدید به صورت تستی ۵ گزینه‌ای خیلی کم، کم، متوسط و خیلی زیاد پاسخ می‌دهند که معادل کمی این گزینه‌ها از ۱ تا ۵ امتیازدهی می‌شود و سپس پس از جمع‌آوری و ارزیابی نتایج با استفاده از تحلیل SWOT به استخراج راهبردهای تهاجمی (آفندی)، تغییر جهت (محافظه کارانه)، تدافعی (پدافند غیرعامل) و رقابتی (پدافند غیرعامل) پرداخته شده است و سپس با طراحی پرسش‌نامه دوم و توزیع آن و پاسخ‌دهندگان برای ارتباط راهبرد پیشنهادی با فرصت‌ها، تهدیدات، قوت‌ها و ضعف‌ها از ۱ تا ۵ به صورت ۵ (کاملاً مرتبط)، ۴ (مرتبط)، ۳ (ارتباط ضعیف)، ۲ (ارتباط خیلی ضعیف)، ۱ (بی‌ارتباط) نمره‌دهی می‌کنند که ارزیابی نتایج انجام شده و راهبردهایی استخراج شده است. در انتها شبیه‌سازی اثر روش کنترل پیش‌بین در راستای یکی از راهبردها انجام شده است.

۳. ارزیابی محیطی استفاده از کنترل پیش‌بین برای کاهش نوسانات فرکانسی

۳-۱. نقاط قوت

استفاده از «کنترل پیش‌بین»^۱ برای کاهش نوسانات فرکانسی در کشتی‌ها، در مواجهه با عوامل محیطی درونی، نقاط قوت قابل توجهی دارد. عوامل محیطی درونی شامل مواردی مانند تغییرات بار وضعیت تجهیزات و محدودیت‌های سیستم‌های داخلی است. از این رو، استخراج عوامل محیطی درونی برای بهره‌برداری بهتر از روش‌های کنترلی مهم است. متغیرهای اصلی مؤثر برای کنترل نوسانات در کشتی عبارت‌اند از: وضعیت و تغییرات بار سامانه وضعیت

اجزای داخلی و تجهیزات، محدودیت‌های فنی و عملیاتی، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های داخلی و پاسخ سامانه به شرایط کاری مختلف. در نتیجه، درک و استخراج این عوامل درونی به کنترل پیش‌بین اجازه می‌دهد تا واکنش‌های بهتری نسبت به تغییرات درون‌سیستمی داشته باشد و نوسانات فرکانسی در کشتی کاهش یابد.

جدول ۱: عوامل محیطی درونی، نقاط قوت

ردیف	عبارات	نوع
۳/۷۵	عزم مسئولین کشور درخصوص توسعه راهبردها و راهکارهای مرتبط با صنایع دریایی در کشور (تأکید وزیر محترم صنعت، معدن و تجارت بر تقویت صنایع دریایی کشور)	S1
۴	توانایی نسبی صنایع دفاعی در طراحی و تولید و پشتیبانی فنی انواع کشتی‌های مورد نیاز	S2
۳/۴۷	قابلیت تطابق با تغییرات داخلی و پیش‌بینی نوسانات در آینده براساس مدل‌های دقیق	S3
۳/۰۹	وجود مدل‌های مناسب جهت پیش‌بینی نوسانات فرکانسی با افزودن بارهای جدید	S4
۳/۱۸	انگیزه مسئولان نسبت به بومی‌سازی انواع فناوری‌ها و محصولات نوین و نوظهور قابل استفاده در کاربردهای دفاعی، دریایی	S5
۳/۴	امکان شناسایی، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات در دریاها و حوادث ناشی از نوسانات فرکانسی	S6
۳/۸۲	جایگاه مناسب صنایع دریایی در اسناد بالادستی با توجه به ابلاغ مقام معظم رهبری درخصوص سیاست‌های کلی اقتصاد دریا محور	S7
۳/۸۰	برخورداري از جایگاه ویژه و قدرت برتر در منطقه خلیج فارس از منظر ناوگان دریایی و دسترسی به آب‌های آزاد	S8
۴/۱۶	وجود مراکز دانشگاهی، اساتید برجسته و مهندسين با انگیزه در کشور	S9
۳/۶۵	تجربه ساخت انواع شناور، زیردریایی توسط متخصصین داخلی	S10
۳/۷۵	امکان عیب‌یابی هوشمند وضعیت تأسیسات دریایی	S11
۴	ظرفیت بالای درآمدزایی محصولات و خدمات حوزه دریا	S12
۳/۴۷	امکان تنظیم و اصلاح خودکار کنترل براساس پارامترهای استخراج شده در زمان واقعی	S13
۳/۰۹	امکان بهینه‌سازی پاسخ سامانه در برابر عوامل درونی و بیرونی برای کاهش نوسانات و افزایش پایداری	S14



۳-۲. نقاط ضعف

در مورد نقاط ضعف کشور در استفاده از روش‌های کنترلی به‌ویژه اعمال روش کنترل پیش‌بین برای کاهش نوسانات فرکانسی کشتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: کمبود سیستم‌های حسگر و کنترلی، به‌روز نبودن تجهیزات و کمبود زیرساخت‌های مرتبط با بومی‌سازی سامانه توان کشتی.

این ضعف‌ها می‌تواند کارایی کنترل پیش‌بین در کاهش نوسانات فرکانسی را کاهش دهد، چون نیازمند داده‌های دقیق، فناوری پیشرفته و نیروی انسانی آموزش‌دیده است. اصلاح این ضعف‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری در فناوری، آموزش و توسعه زیرساخت‌های داخلی است.

جدول ۲: عوامل محیطی درونی، نقاط ضعف

به‌دلیل وجود موارد محرمانه در جدول فوق، اطلاعات مورد نیاز در بایگانی دبیرخانه فصلنامه قابل بهره‌برداری است.

در زمینه استفاده از کنترل پیش‌بین برای کاهش نوسانات فرکانسی کشتی‌ها، عوامل محیطی بیرونی که به‌عنوان نقاط تهدید برای کشور محسوب می‌شوند، نقش مهمی در تأثیرگذاری بر پایداری سامانه دارند. این عوامل می‌توانند بر کارایی و امنیت سامانه کنترل اثر منفی بگذارند و نیازمند برنامه‌ریزی و تدابیر خاص هستند. عمده این عوامل مربوط به تحریم‌های خصمانه و تأثیر آن در تجهیز یا به‌روزرسانی سامانه توان کشتی و سیستم‌های کنترلی است.

جدول ۳: عوامل محیطی بیرونی، تهدید

نقاط	رتبه	عبارات	بایگانی
تهدید	T1	جلب‌توجه جهانی به ایجاد اختلال در سامانه‌های دریایی و برخورداری دشمنان از تجهیزات جدید با قابلیت‌های عملیاتی بالا	۴
	T2	افزایش حضور نظامیان، ناوها و زیردریایی‌های مجهز آمریکایی در خلیج فارس	۴/۲۵
	T3	امکان جذب متخصصان و نیروهای متخصص و ماهر داخلی از سوی دشمنان	۴/۰۵
	T4	محدودیت‌های ناشی از تحریم در قبال سازمان‌ها و کشورهای خارجی متمایل به همکاری در پروژه‌های مرتبط با سامانه توان کشتی	۳/۹۰

ردیف	عبارات	توضیح
۳/۲	خطر حملات سایبری و نفوذ به سامانه‌های کنترل که می‌تواند امنیت و عملکرد سامانه را مخدوش سازد	T5
۴/۱۵	ضعف در زیرساخت‌های دریایی، مخابرات دریایی و شبکه‌های انتقال داده که اجرای کنترل پیش‌بین را با چالش مواجه می‌سازد	T6
۳/۸۸	طمع دشمنان و بیگانگان به راه‌های آبی ژرف موجود در مرزهای آبی کشور	T7
۳/۵۷	وجود محدودیت‌های ناشی از تحریم‌های علمی و فناورانه و اقتصادی در مسیر تأمین دانش فنی و به‌روزرسانی سامانه توان کشتی	T8
۳/۶۵	محدودیت‌ها در تأمین فناوری‌های پیشرفته، تجهیزات، یا مواد اولیه مورد نیاز جهت توسعه سیستم‌های کنترل پیش‌بین	T9
۴/۱۵	تغییرات اقتصادی و ناپایداری در قیمت تجهیزات، انرژی و مواد مصرفی که امر توسعه و نگهداری سیستم‌های کنترل را پیچیده می‌کند	T10
۳/۱	وجود مشوق‌های خارجی که مانع از بازگشت متخصصان و نیروهای متخصص و کارآمد این حوزه به کشور می‌شود	T11

این عوامل تهدید، خارج از کنترل مستقیم کشور هستند و می‌توانند بر استقرار، توسعه و امنیت سیستم‌های کنترل پیش‌بین اثرگذار باشند. شناسایی و مقابله با این تهدیدها نیازمند استراتژی‌های مقاومتی و همکاری‌های بین‌المللی است.

۳-۳. فرصت

عوامل محیطی بیرونی که فرصت‌هایی برای کشور در استفاده از کنترل پیش‌بین برای کاهش نوسانات فرکانسی کشتی فراهم می‌کنند، نقش مهمی در توسعه و بهره‌برداری بهتر از این فناوری دارند. این فرصت‌ها می‌توانند در ارتقای پایداری و امنیت سیستم‌های دریایی تأثیرگذار باشند:

این فرصت‌ها، کشور را قادر می‌سازند تا فناوری کنترل پیش‌بین را با بهره‌گیری از زیرساخت‌ها و استانداردهای جهانی توسعه دهد و در نتیجه نقش فعال‌تری در بازارهای بین‌المللی ایفا کند و امنیت و پایداری سیستم‌های دریایی خود را ارتقا دهد.



جدول ۴: عوامل محیطی بیرونی، نقاط فرصت

ردیف	عبارات	شماره	نوع
۴/۰۸	امکان خرید برخی نمونه‌های کنترلی و سنسورها از طریق کشورهای هم‌سو باهدف گرفتن ایده و بومی‌سازی	01	فرصت
۳/۲۴	امکان حضور و انجام رزمایش‌های مشترک با کشورهای همسایه جهت استفاده از تجربیات آن‌ها پیرامون به‌کارگیری یا مقابله با نوسانات فرکانسی	02	
۲/۵	استفاده از تحریم‌ها به‌عنوان فرصت برای به‌کارگیری و اتکا به نیروی بومی در موضوعات مربوط به سامانه توان کشتی	03	
۲/۷۴	امکان استفاده از علم، تجربه و ارتباطات دانشمندان، متخصصان و مهندسان ایرانی مقیم خارج از کشور	04	
۲/۸۶	امکان حضور در همایش‌ها و کنفرانس‌های بین‌المللی در حوزه‌های مرتبط	05	
۴/۰۲	امکان ایجاد استانداردها و سیاست‌های مشترک در بهره‌برداری از فناوری‌های کنترل پیش‌بین در سطوح منطقه‌ای و بین‌المللی	06	
۳/۴۵	همکاری و توسعه فناوری‌های هوشمند، اینترنت اشیا و داده‌کاوی که امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کند	07	
۳/۸۷	امکان استفاده از تجربیات موفق و کارامل بین‌المللی در حوزه‌های قانونی و حقوقی در زمینه به‌کارگیری روش‌های کنترلی در سامانه توان کشتی	08	
۳/۸۵	تلاش جهانی برای کاهش اثرات منفی صنعت دریایی و پذیرش فناوری‌های هوشمند برای کاهش نوسانات و بهبود کنترل سیستم‌ها	09	
۳/۸۶	رشد فناوری‌های نوین و دیجیتال‌سازی در صنعت حمل‌ونقل دریایی و امکان توسعه فناوری‌های هوشمند که امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کند	010	

۴-۳. ارائه راهبرد جهت بهره‌برداری و افزایش بازدهی

نقش کشتی در صنایع دفاعی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی تأمین امنیت و دفاع از کشورها، بسیار حائز اهمیت است. در زیر به برخی از این نقش‌ها اشاره می‌کنم:

❖ حمل و نقل نیرو و تجهیزات

کشتی‌ها به عنوان وسیله‌ای برای انتقال نیروها، تجهیزات نظامی و نیازمندی‌های لجستیکی به مناطق عملیاتی عمل می‌کنند. این قابلیت به خصوص در مواقع بحران یا جنگ، اهمیت زیادی دارد.

❖ پشتیبانی و تأمین امنیت دریایی

کشتی‌های نظامی مانند ناوها و زیردریایی‌ها به حفاظت از مرزهای دریایی کمک می‌کنند و می‌توانند به شناسایی و مقابله با تهدیدات دریایی بپردازند.

❖ عملیات جنگی

کشتی‌ها می‌توانند در عملیات نبرد دریایی نقش کلیدی ایفا کنند. نیروی دریایی معمولاً برای پشتیبانی از نیروهای زمینی و هوایی نیز استفاده می‌شود.

❖ آموزش و تمرین

کشتی‌ها یکی از ابزارهای مهم برای آموزش نیروی دریایی و انجام تمرینات مشترک با نیروی هوایی و زمینی هستند.

❖ جمع‌آوری اطلاعات و انجام گشت‌زنی

کشتی‌های نظامی می‌توانند برای جمع‌آوری اطلاعات و انجام گشت‌زنی در مناطق حساس استفاده شوند که این خود به ایجاد امنیت و پایش وضعیت دریاها کمک می‌کند.

❖ کمک‌های بشردوستانه و عملیات نجات

کشتی‌ها در شرایط بحرانی می‌توانند به ارائه کمک‌های بشردوستانه و نجات افراد در دریا کمک کنند که این خود بخشی از نقش گسترده آن‌ها در امنیت جهانی است.



جدول ۵: اولویت‌بندی راهبردها

ردیف	عنوان راهبردها	میانگین
۱	برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی	۴/۹۰
۲	ایجاد سیاست‌های حمایت مادی و معنوی جهت تقویت و مؤثر سازی ارتباط نخبگان، اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان با صنعت دریایی و حوزه عملیاتی دریای پایه کشور	۴/۸۵
۳	حمایت از بومی‌سازی و توسعه فناوری‌های زنجیره تأمین صنایع دریایی از طریق صنایع دریایی با کمک شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز دانشگاهی کشور	۴/۶۵
۴	بهینه‌سازی و بومی‌سازی مستمر تجهیزات و قطعات موجود در سامانه توان کشتی با توجه به پیشرفت فناوری‌ها	۴/۵۰
۵	برنامه‌ریزی جهت ایجاد هماهنگی بین نیازهای پژوهشی تحقیقاتی صنایع دفاعی نظامی و اولویت‌های پژوهشی دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی	۴/۴۵
۶	هدایت سرمایه‌های بخش خصوصی در زمینه تحقیقات و توسعه سامانه‌های پیشرفته و صنایع دریایی پویا	۴/۴۱
۷	بهینه شدن و روزآمدسازی زیرساخت‌ها و فناوری‌های مرتبط با تجهیزات کنترلی سامانه توان کشتی	۴/۲۵
۸	تجهیز آزمایشگاه‌های مرجع برای کنترل کیفیت انواع تجهیزات مورد نیاز برای تولید صنایع دریایی و سنجش آسیب‌ها	۴/۲
۹	تدوین دوره‌های مشترک در زمینه صنایع دریایی با کشورهای همسایه	۴/۱
۱۰	ساخت و بومی‌سازی قطعات و اجزای لازم برای طراحی و ساخت سامانه‌های دریایی پیشرفته	۴
۱۱	برنامه‌ریزی جهت دور زدن تحریم‌های علمی، فناورانه و اقتصادی که سبب محدودیت در تأمین برخی اجزا و صادرات این محصولات و خدمات به خارج کشور می‌شود	۳/۸
۱۲	برنامه‌ریزی جهت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در این حوزه	۳/۷
۱۳	برنامه‌ریزی برای مازولار کردن طراحی جهت رفع عیب و محافظت از سامانه توان کشتی در مقابل نوسانات فرکانسی	۳/۵۵
۱۴	در نظر گرفتن اصول فنی و بازدارنده در طراحی و تولید سیستم‌های مبتنی بر حمل نقل دریایی	۳/۳

برنامه‌های اجرایی، فعالیت‌های لازم‌الاجرائی هستند که در راستای هر یک از راهبردها و جهت تحقق اهداف کلان، مورد نیاز هستند. برای هر راهبرد تعدادی طرح و برای هر طرح تعدادی برنامه‌های اجرایی و پروژه تعریف می‌شود که در چند مرحله به اجرا درمی‌آیند و تحقق اهداف برنامه را تضمین می‌نمایند. در جداول (۶)، زیر به ترتیب به برنامه‌ها طرح‌ها و پروژه‌ها مربوط به ۱۰ راهبرد قوی پرداخته شده است:

جدول ۶: برنامه‌ها، طرح‌ها و پروژه‌ها

شماره راهبرد	راهبرد	برنامه	طرح	پروژه
۱	برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی	تدوین برنامه کشور با رویکرد اقتصاد غیرنفتی	بخشنامه به سازمان‌های دانش‌بنیان جهت حمایت از پروژه‌ها	ایجاد زیرساخت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کنترل اختلالات بر تجهیزات
۲	ایجاد سیاست‌های حمایت مادی و معنوی جهت تقویت و مؤثر سازی ارتباط نخبگان، اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان با صنعت دریایی و حوزه عملیاتی دریای پناه کشور	افزایش حمایت بخش خصوصی جهت پذیرش محققین	ایجاد بازار فروش محصولات تولیدی بخش خصوصی	ایجاد همایش‌ها برای معرفی محصولات شرکت‌ها به دیگر شرکت‌ها جهت استقبال فروش
۳	حمایت از بومی‌سازی و توسعه فناوری‌های زنجیره تأمین صنایع دریایی از طریق صنایع دریایی با کمک شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز دانشگاهی کشور	ایجاد بستری برای شناسایی تخصص افراد و به‌کارگیری آنان	ایجاد زیرساخت و حمایت از مهندسی معکوس تجهیزات	ایجاد نرم‌افزار متصل به وزارت صنعت و معدن و تجارت جهت نام‌نویسی افراد با توجه به تخصص
۴	بهینه‌سازی و بومی‌سازی مستمر تجهیزات و قطعات موجود در سامانه توان کشتی با توجه به پیشرفت فناوری‌ها	افزایش مشوق بخش خصوصی جهت بومی‌سازی تجهیزات اولیه ساخت و طراحی	ایجاد زیرساخت و حمایت از مهندسی معکوس تجهیزات	ساخت آزمایشگاه‌های مجهز به دستگاه‌های مدرن



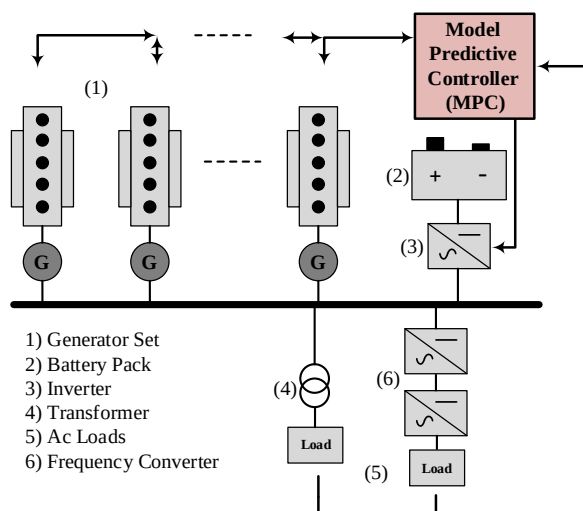
شماره راهبرد	راهبرد	برنامه	طرح	پروژه
۵	برنامه‌ریزی جهت ایجاد هماهنگی بین نیازهای پژوهشی تحقیقاتی صنایع دفاعی نظامی و اولویت‌های پژوهشی دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی	برنامه جهت افزایش کیفیت و کاهش هزینه جاری محصولات	تمرکز بر روی پروژه‌های بهینه‌سازی هزینه و طول عمر و ساخت آن	اعطای یارانه جایگزینی تدریجی تجهیزات فرسوده با مدرن
۶	هدایت سرمایه‌های بخش خصوصی در زمینه تحقیقات و توسعه سامانه‌های پیشرفته و صنایع دریایی پویا	افزایش حمایت بخش خصوصی جهت پذیرش محققین	ایجاد بازار فروش محصولات تولیدی بخش خصوصی	ایجاد همایش‌ها برای معرفی محصولات شرکت‌ها به دیگر شرکت‌ها جهت استقبال فروش
۷	بهینه شدن و روزآمدسازی زیرساخت‌ها و فناوری‌های مرتبط با تجهیزات کنترلی سامانه توان کشتی	برنامه جهت افزایش دقت و کیفیت سامانه توان کشتی	حمایت بخش‌های واردکننده تجهیزات خاص	کاهش گمرکی جهت واردات تجهیزات مورد نیاز پیشرفته
۸	تجهیز آزمایشگاه‌های مرجع برای کنترل کیفیت انواع تجهیزات مورد نیاز برای تولید صنایع دریایی و سنجش آسیب‌ها	برنامه جهت ارتقا قوانین استاندارد جهت نظارت بر سطح کیفیت	ایجاد زیرساخت حمایتی جهت ساخت آزمایشگاه مرجع	ارائه وام برای تأمین مالی جهت تکمیل تجهیزات آزمایشگاهی
۹	تدوین دوره‌های مشترک در زمینه صنایع دریایی با کشورهای همسایه	تدوین برنامه کلان جهت حفظ ارزش پول و حمایت طرح‌های ارزآور	ارتقای همکاری و مشارکت وزارت خارجه با سایر کشورها جهت واردات و صادرات	حمایت از توسعه شرکت‌ها و سازمان‌های صادراتی
۱۰	ساخت و بومی‌سازی قطعات و اجزای لازم برای طراحی و ساخت سامانه‌های دریایی پیشرفته	برنامه تسریع در پیشرفت صنعتی و همگام‌سازی کشور با کشورهای صنعتی پیشرو	طرح حمایت از مهندسی معکوس با ایجاد زیرساخت آزمایشگاهی و تأمین بودجه	کاهش گمرکی جهت واردات تجهیزات مورد نیاز پیشرفته

برنامه‌های اجرایی، فعالیت‌های لازم‌الاجرائی هستند که در راستای هر یک از راهبردها و جهت تحقق اهداف کلان، مورد نیاز هستند. برای هر راهبرد تعدادی طرح و برای هر طرح تعدادی برنامه‌های اجرایی و پروژه تعریف می‌شود که در چند مرحله به اجرا درمی‌آیند و تحقق اهداف برنامه را تضمین می‌نمایند. در جداول زیر به ترتیب به برنامه‌ها طرح‌ها و پروژه‌ها مربوط به ۱۰ راهبرد قوی پرداخته شده است

یکی از راهبردهای قوی برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی است. از پروژه‌های مهم در تحقق این راهبرد، ایجاد زیرساخت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کنترل اختلالات بر تجهیزات است. در ادامه مدلی از سامانه توان کشتی بیان شده و به بررسی اثر روش کنترل پیش‌بین بر نوسانات فرکانسی سامانه پرداخته شده است.

۳-۵. مدل سامانه تحت مطالعه

به‌منظور بررسی اثر تغییرات بار بر روی سامانه تولید و چگونگی مشارکت باتری در جلوگیری از وقوع نوسانات فرکانس می‌توان از مدل ارائه در شکل (۱)، استفاده کرد.



شکل ۱: مدل سامانه تحت مطالعه شامل بار، باتری، ژنراتور و کنترل‌کننده مدل پیش‌بین



این مدل با توجه به نیاز سامانه قدرت برق کشتی از ژنراتور، باتری، بار و تجهیزات جانبی تشکیل شده است. همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است، مطالعه انجام شده مبسوط بوده به‌طوری‌که در آن n ژنراتور، یک باتری با هر مقدار توان و بار از هر نوعی را می‌توان مورد بررسی قرار داد. به‌منظور بررسی و مطالعه این سامانه نیاز به مدل‌های ژنراتور، بار و باتری به‌صورت جداگانه است. مدل مداری ژنراتور شامل منبع ولتاژ، مقاومت و راکتانس سلفی سیم‌پیچ‌های ژنراتور است که رابطه مداری این المانها در رابطه براساس مدل-Behn Eschenburg ارائه شده است.

$$V_T = E - (R_s + jX_s)I \quad (1)$$

یکی از دلایل مهم وقوع نوسانات فرکانس در سامانه برق کشتی عدم تعادل بین تولید و تقاضا است که این عدم تعادل عمدتاً به‌دلیل تغییر در تقاضا به وجود می‌آید. در صورتی‌که تمهیدات مقتضی جهت جلوگیری از وقوع این نوسانات اتخاذ نشود ممکن است موجب خسارت به تجهیزات تولید و مصرف و عدم کارکرد صحیح آن‌ها شود. در این مطالعه مبتنی بر روش MPC راه‌حلی پیشنهاد شده است که با به‌کارگیری آن و با مشارکت منبع ثانویه انرژی در کنار سامانه تولید از وقوع نامتعادلی در سامانه قدرت کشتی جلوگیری می‌شود. بطوریکه در هر لحظه از زمان مقدار بار و تولید اندازه‌گیری شده و با توجه به مقدار این دو، ضرایب متفاوت مشارکت باتری ارزیابی شده و درصدی که کم‌ترین انحراف از حالت تعادل را به وجود می‌آورد توسط تابع هدف انتخاب می‌شود.

در روش پیشنهادی بعد از اندازه‌گیری داده‌ها و جانشانی مقادیر اولیه، فرکانس جدید با اولین مقدار درصد مشارکت باتری به‌دست می‌آید. در بلوک بعدی به ازای ضریب درصد مشارکت باتری مقادیر اختلاف فرکانس جدید با سرعت مرجع، اختلاف فرکانس جدید با فرکانس بازه زمانی قبل و اختلاف تغییرات Soc در دو بازه زمانی k و $k+1$ به‌دست می‌آید. سپس هرکدام از سه عبارت در ضریب وزنی مربوط به خود ضرب شده و مقدار نهایی که حاصل جمع این سه است در حافظه ذخیره می‌شود. این فرایند تا n که مقدار درصد مشارکت‌های باتری است ادامه خواهد داشت. سپس از بین این n مقدار ضریب مشارکت

باتری که منجر به کم‌ترین مقدار تابع هدف می‌شود انتخاب شده و بعد از عبور از گین مربوط به ضریب خروجی به سامانه قدرت منتقل می‌شود.

۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

چگونگی کارایی روش پیشنهادی، بر روی سامانه قدرت برق کشتی که شامل باتری، ژنراتور، بار و سامانه کنترل است شبیه‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفته است. داده‌های باتری از مشخصات باتری مدل KCP216060EN0 ساخت شرکت kokam استخراج شده است. همچنین از بار ارائه شده در (واکتز جولد^۱ و همکاران، ۲۰۱۳) که یک بار با مشخصه سری زمانی است در این مطالعات استفاده شده است.

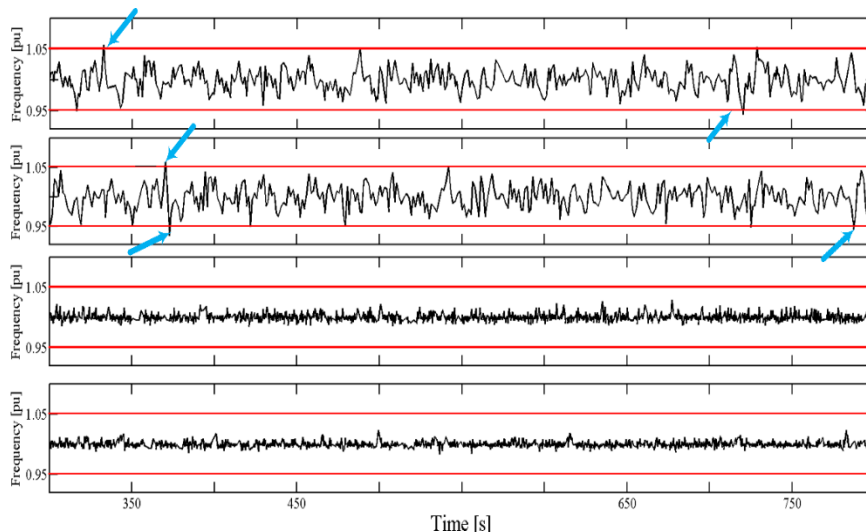
جدول ۷: پارامترهای ژنراتور، باتری و ضرایب روش پیشنهادی

Generator parameters		
electrical power	2	MW
stator windings reactance	0.0019	p.u
stator windings resistance	0.48	p.u
Battery parameters		
Nominal Capacity	60	Ah
Nominal Energy	220.8	Wh
Internal Resistance	0.60	mΩ
Voltage	3.68	V
the number of cells	9300	
Proposed Method factors		
Deviation factor	1	
Deritive factor	1	
SoC factor	2	

بررسی ضرایب فرکانسی روش پیشنهادی بر عملکرد حالت دائم سامانه قدرت کشتی به‌منظور بررسی رفتار سامانه قدرت در حالت کار دائم، پاسخ این سامانه برای چهار حالت بدون استفاده از پکیج باتری یا ضریب خروجی صفر، استفاده از پکیج باتری و با اعمال ضریب kw صفر در تابع هدف روش پیشنهادی، استفاده از پکیج باتری و اعمال ضریب kdw در تابع هدف روش پیشنهادی و حالت چهارم استفاده از باتری و اعمال تمامی ضرایب

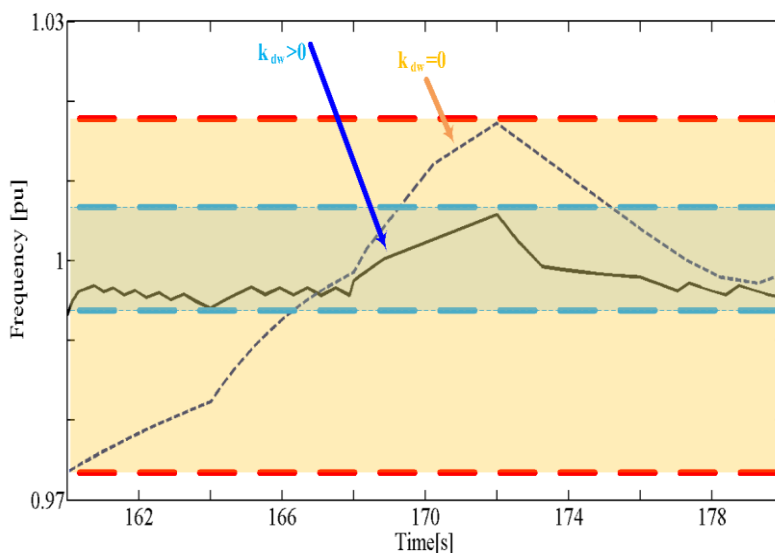


در تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته و در شکل (۲)، نمایش داده شده است. همان‌گونه از شکل مشخص است پاسخ حالت دائم در حالتی که تمامی ضرایب در تابع هدف به‌کار گرفته شده است کیفیت بهتری نسبت به سه روش دیگر دارد. همچنین در حالتی که ضرایب باتری صفر در نظر گرفته شود کیفیت فرکانس نسبت به سه حالت دیگر پایین‌تر بوده و دارای نوسانات فرکانس بیشتری است. این آزمایش نیز نشان می‌دهد که در صورت نادیده گرفتن ضریب kw در روش پیشنهادی از کیفیت فرکانس به‌طور چشم‌گیری کاسته می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت نوسانات فرکانس در حالت اول بین $0/95$ و $1/05$ ، برای حالت دوم $0/95$ و $1/01$ و برای حالت سوم و چهارم بین $0/985$ تا $1/02$ است. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که از ضریب kdw در تابع هدف استفاده نشود در مقایسه با حالتی که تمامی ضرایب در تابع هدف استفاده شود تغییر چندانی در کیفیت فرکانس خروجی به وجود نمی‌آید و تنها مزیتی که پاسخ فرکانس با اضافه شدن این ضریب به سامانه کنترل پیدا می‌کند عدم وقوع تغییرات فرکانسی شدید است که در شکل (۲)، این موضوع نمایش داده شده است.



شکل ۲: پاسخ حالت دائم سامانه قدرت برای چهار حالت بدون استفاده از پکیج باتری، استفاده از باتری با اعمال ضریب صفر در روش پیشنهادی، استفاده از باتری و اعمال ضریب در تابع هدف روش پیشنهادی و حالت چهارم استفاده از باتری و اعمال تمامی ضرایب در تابع هدف

همان‌گونه که از این شکل ملاحظه می‌گردد این ضریب به‌خوبی هدف سامانه کنترل که جلوگیری از تغییرات سریع فرکانس است را محقق می‌کند به‌طوری‌که نتایج این آزمایش نشان داده است که در صورت به‌کارگیری این ضریب در تابع هدف روش پیشنهادی، تغییرات فرکانس در اثر تغییرات بار، شیب ملایم‌تری در مقایسه با به‌کارگیری تابع هدف بدون حضور این ضریب را دارد.



شکل ۳: تغییرات فرکانس در اثر تغییرات بار برای دو حالت به‌کارگیری روش پیشنهادی با اعمال ضریب و بدون آن

یکی از مزایای روش پیشنهادی انعطاف‌پذیری برای انواع کاربردها و سیستم‌های قدرت با بارهای مختلف است. این انعطاف‌پذیری مدیون ۴ ضریبی است که هرکدام از آن‌ها برای هدف مشخصی طراحی شده‌اند و تأثیر هر یک از این ضرایب در نتایج آزمایشات صورت گرفته بررسی و تحلیل شد. به‌طور خلاصه ضریب خروجی پکیج باتری در سرعت پاسخ در حالت گذرا تأثیر چشم‌گیری داشت به‌نحوی‌که هر چه این ضریب بزرگ‌تر می‌شود سرعت پاسخ نیز افزایش پیدا می‌کرد. نتایج دیگر آزمایشات نیز حاکی از آن است، ضریب k_w که



مربوط به عبارت انحراف فرکانس از محدوده مجاز است تأثیر بسزایی در کیفیت پاسخ حالت دائم دارد. همچنین نتایج نشان که اگرچه به‌کارگیری دو ضریب kw و kdw در کیفیت پاسخ در حالت کار دائم نسبت به حالتی که فقط ضریب kw استفاده می‌شود تأثیر چندانی ندارد ولی پاسخ حالت گذرا به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع می‌شود. ضریب soc دیگر ضریب مهم در تابع هدف روش پیشنهادی است که آزمایشات حالت دائم نشان می‌دهد که به‌کارگیری این ضریب باعث جلوگیری از قطع و وصل‌های مکرر باتری و افزایش طول عمر آن می‌گردد درحالی‌که به‌کارگیری این ضریب به کیفیت فرکانس لطمه‌ای وارد نمی‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

عدم تعادل بین تولید و تقاضا در سامانه قدرت برق کشتی باعث ایجاد نوسانات فرکانسی و اختلال در عملکرد عادی بارها و ژنراتورهای الکتریکی می‌گردد. به‌کارگیری منبع توان ثانویه در کنار ژنراتور اصلی و استفاده از روش کنترل پیش‌بین پیشنهادی در این مقاله می‌تواند به‌عنوان راه‌حل مناسبی جهت خنثی‌سازی این نوسانات فرکانسی به‌کار گرفته شود. این مقاله در ۲ بخش اصلی تدوین گردید، بخش اول مربوط به عوامل محیطی و استخراج راهبردهاست. از مهم‌ترین راهبردها در ادامه به مواردی اشاره شده است: برنامه‌ریزی جهت توسعه علوم و فناوری‌های مرتبط با صنایع دریایی در کاربردهای دفاعی، ایجاد سیاست‌های حمایت مادی و معنوی جهت تقویت و مؤثر سازی ارتباط نخبگان، اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان با صنعت دریایی و حوزه عملیاتی دریایپاکه کشور، حمایت از بومی‌سازی و توسعه فناوری‌های زنجیره تأمین صنایع دریایی از طریق صنایع دریایی با کمک شرکت‌های دانش‌بنیان و مراکز دانشگاهی کشور، بهینه‌سازی و بومی‌سازی مستمر تجهیزات و قطعات موجود در سامانه توان کشتی با توجه به پیشرفت فناوری‌ها، برنامه‌ریزی جهت ایجاد هماهنگی بین نیازهای پژوهشی تحقیقاتی صنایع دفاعی نظامی و اولویت‌های پژوهشی دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی و هدایت سرمایه‌های بخش خصوصی در زمینه

تحقیقات و توسعه سامانه‌های پیشرفته و صنایع دریایی پویا. نبرد تحمیلی اخیر با رژیم صهیونیستی نشان داد که لازم است هرچه سریع‌تر به تقویت صنایع دفاعی پرداخته شود.

بخش دوم در زمینه اجرای راه‌حل پیشنهادی مطابق با یکی از راهبردها بود. راه‌حل پیشنهادی مبتنی بر روش MPC با تابع هدفی متشکل از ۲ قید فرکانس شامل خنثی‌سازی انحرافات فرکانس از مقدار مرجع و جلوگیری از تغییرات سریع فرکانس و همچنین یک قید مقدار شارژ باتری و عدم قطع وصل مکرر باتری است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در دو حالت ماندگار و گذرا دارای دقت مناسب و سرعت پاسخ بالایی است که کیفیت و سرعت پاسخ با توجه به ۴ ضریب (ضریب خنثی‌سازی انحرافات فرکانس از مقدار مرجع، ضریب جلوگیری از تغییرات سریع فرکانس، ضریب عدم قطع و وصل‌های مکرر باتری و ضریب خروجی کنترل) که هر کدام برای هدف معینی طراحی شده‌اند می‌تواند تغییر کند. به‌طوری‌که افزایش ضریب کنترل خروجی به ۲ باعث بهبود پاسخ حالت گذرا شده و به‌کارگیری توأمان دو ضریب فرکانسی باعث بهبود پاسخ حالت دائم می‌شوند. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که با تنظیم ضریب مربوط به حالت شارژ (ksoc) در MPC از تعداد قطع و وصل‌های مکرر باتری تا حد زیادی کاسته شده و باعث افزایش طول عمر باتری می‌گردد.

از آنجاکه برای اجرای کنترل پیش‌بین مؤثر، نیاز است که مدل دقیقی از سامانه توان کشتی تهیه شود پیشنهاد می‌شود مدل‌سازی دقیق سامانه صورت گیرد و براساس نیازهای سامانه، می‌توان از کنترل پیش‌بین مناسب استفاده کرد. با توجه به نوسانات دریایی و شرایط متغیر، پیشنهاد می‌شود که از ابزارها و الگوریتم‌هایی برای تخمین پارامترهای سامانه در زمان واقعی و پیش‌بینی آن‌ها تدوین شود. همچنین برای بهبود دقت پیش‌بینی و کنترل، پیشنهاد می‌شود قبل از اجرای روش کنترلی، فاز جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های لحظه‌ای به‌صورت صحیح و سریع جمع‌آوری و تحلیل شوند. با تغییر شرایط دریایی و تجهیزات، مدل‌سازی باید مرتباً به‌روزرسانی شود تا کنترل‌های پیش‌بین همچنان کارآمد باقی بمانند.



References

- Agarwala, N. (2024). The potential of uncrewed and autonomous ships. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 16(1), 39-58.
- Al-Barazanchi, S. A. M., & Vural, A. M. (2015, December). Modeling and intelligent control of a stand-alone PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system. In *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)* (pp. 423-430). IEEE.
- Bø, T. I., & Johansen, T. A. (2016). Battery power smoothing control in a marine electric power plant using nonlinear model predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(4), 1449-1456.
- Chen, W., Ådnanes, A. K., Hansen, J. F., Lindtjørn, J. O., & Tang, T. (2010, September). Super-capacitors based hybrid converter in marine electric propulsion system. In *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010* (pp. 1-6). IEEE.
- Faddel, S., Saad, A. A., El Hariri, M., & Mohammed, O. A. (2019). Coordination of hybrid energy storage for ship power systems with pulsed loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1136-1145.
- Fang, H., & Jianlan, H. (2022, April). Mathematical Model and Stability Analysis of Ship Compensation Current System. In *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)* (pp. 446-449). IEEE.
- Gao, R., Yu, X., Zhang, S., Zou, L., & Chen, X. (2023, September). Study on stability analysis of Ship Power System Based on PSAT. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Power, Communication, Computing and Networking Technologies* (pp. 1-4).
- Guo, Y., Khan, M. M. S., Faruque, M. O., & Sun, K. (2016, July). Fuzzy logic based energy storage supervision and control strategy for MVDC power system of all electric ship. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)* (pp. 1-5). IEEE.
- Hou, J., Sun, J., & Hofmann, H. (2014, June). Mitigating power fluctuations in electrical ship propulsion using model predictive control with hybrid energy storage system. In *2014 American Control Conference* (pp. 4366-4371). IEEE.
- Hou, J.; Sun, J.; Hofmann, H. Mitigating power fluctuations in electrical ship propulsion using model predictive control with hybrid energy storage system. In *Proceedings of the 2014 American Control Conference, Portland, OR, USA, 4–6 June 2014*; pp. 4366–4371.
- Kalikatzarakis, M., Geertsma, R. D., Boonen, E. J., Visser, K., & Negenborn, R. R. (2018). Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging. *Control engineering practice*, 76, 133-154.
- Lan, H., Bai, Y., Wen, S., Yu, D. C., Hong, Y. Y., Dai, J., & Cheng, P. (2016). Modeling and stability analysis of hybrid pv/diesel/ess in ship power system. *Inventions*, 1(1), 5.
- Lopes, J. P., Moreira, C. L., & Madureira, A. G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on power systems*, 21(2), 916-924.

- Mindykowski, J., Szveda, M., & Tarasiuk, T. (2005). Voltage and frequency deviations in exemplary ship's network-research for ship owner. *Electrical Power Quality and Utilisation. Magazine*, 1(2), 61-67.
- Mirošević, M., & Maljković, Z. (2015, March). Effect of sudden change load on isolated electrical grid. In *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Mushtaq, R., Iqbal, M., Khaliq, A., & Iqbal, J. (2025). Optimal design of a hybrid ship energy management system under various sea conditions using Model Predictive Control. *PloS one*, 20(7), e0326969.
- Powis, Gaétan. (2022). What destination for the planes carrying aid to Ukraine? *Air&Cosmos International*, April 26.
- Prousalidis, J., Hatzilau, I. K., Michalopoulos, P., Pavlou, I., & Muthumuni, D. (2005, July). Studying ship electric energy systems with shaft generator. In *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2005. (pp. 156-162). IEEE.
- Radan, D., Sørensen, A. J., Ådnanes, A. K., & Johansen, T. A. (2008). Reducing power load fluctuations on ships using power redistribution control. *Marine Technology and SNAME News*, 45(03), 162-174.
- Speller, I. (2023). *Understanding naval warfare*. Routledge.
- Vaktskjold, E., SKARBO, L., Valde, K., Foer, K. S., Humerfelt, T., Nordvik, R., & Bruvik, B. O. (2013, May). The new bergen B35: 40 lean burn marine gas engine series and practical experiences of SI lean burn gas engines for marine mechanical drive. In *Proc. 27th CIMAC Congr. Combustion Engine Technol. Ship Propuls., Power Gener. Rail Traction*.
- Yan, Y., Chen, Z., & Gao, D. (2025). Nonlinear model predictive control energy management strategy for hybrid power ships based on working condition identification. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 269.
- Yun, Q., Wang, X., Wang, S., Zhuang, W., & Zhu, W. (2024). Stability Analysis in a Direct-Current Shipboard Power System with Parallel Permanent Magnet Synchronous Generators and Supercapacitor Integration. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 578.