

A Fuse-Isolator-Switch Based Protection Scheme for Shipboard Electrical Distribution Systems with Zonal Configuration

Mehdi Mohammadzamani^{1,2}, Ph.D. Student, Iman Sadeghkhanian^{1,2}, Assistant Professor,
Majid Moazzami^{1,2} Associate Professor

¹ Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad 85141-43131, Iran

² Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad 85141-43131, Iran

Abstract:

The need for high reliability of modern ships has led to the development of a zonal structure for their electrical distribution systems. One of the most important challenges of the electric distribution systems of modern ships with a zonal structure is their protection in the event of a fault to maintain stability and reliability at an acceptable level. Failure to detect the fault and to isolate the faulty section at the proper time has disastrous consequences for the shipboard electrical system. This paper aims to present an effective protection scheme for all equipment of the hybrid AC/DC distribution system of ships with a zonal structure. In the proposed scheme, protection against single-phase to ground faults is performed using a high-resistance grounding system and timer, while the current of two-phase and three-phase faults is cleared using the fuse-isolator-switches. The use of a high-resistance grounding system allows uninterrupted operation of the ship's electrical system when single-phase to ground faults occur. Due to not using protective relays, the cost of the proposed scheme implementation is low. The proposed protection scheme includes primary and backup protections and does not require communication infrastructure. Also, all equipment of the ship's electrical system including generator, propulsion motor, busbar, feeder, line, load, and direct current system are considered in the proposed scheme. The coordinate operation of the developed protection scheme is assessed on the ETAP simulation model of a test zonal electrical system of the ship.

Keywords: Fault isolation, Fuse-isolator-switch, Grounding system, Protection coordination, Shipboard electrical system.

Received: 22 December 2020

Revised: 25 February 2021

Accepted: 13 March 2021

Corresponding Author: Dr. Iman Sadeghkhanian, sadeghkhanian@pel.iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1981548.10671173>



طراحی یک سیستم حفاظتی مبتنی بر کلید فیوز برای سیستم توزیع انرژی الکتریکی کشتی با ساختار ناحیه‌ای

مهدی محمدزمانی^۱، دانشجوی دکتری، ایمان صادق‌خانی^۲، استاد یار، مجید معظمی^۱، دانشیار

۱- مرکز تحقیقات ریزش‌بکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی سیستم‌های انتقال قدرت الکتریکی کشتی مدرن با ساختار ناحیه‌ای، حفاظت آنها در شرایط وقوع خطا به منظور حفظ پایداری و قابلیت اطمینان در سطح قابل قبول می‌باشد. عدم آشکارسازی خطا و جدا کردن قسمت معیوب در زمان مناسب عواقب فاجعه آمیزی برای سیستم انتقال قدرت الکتریکی کشتی در پی دارد. نیاز به قابلیت اطمینان بالای کشتی‌های مدرن، منجر به توسعه ساختار ناحیه‌ای برای سیستم توزیع انرژی الکتریکی کشتی شده است. هدف این مقاله ارائه یک طرح حفاظتی کارا برای کلیه قسمت‌های سیستم توزیع برق کشتی با ساختار ناحیه‌ای و از نوع ترکیبی جریان متناوب-جریان مستقیم است. در روش پیشنهادی، حفاظت در برابر خطاهای تک‌فاز به زمین با بهره‌گیری از سیستم زمین مقاومت-بالا و تایمر انجام می‌شود در حالیکه جریان خطاهای دو فاز و سه فاز با استفاده از کلید-فیوز قطع می‌شود. استفاده از سیستم زمین با مقاومت بالا امکان عملکرد بدون وقفه سیستم برق کشتی را در هنگام وقوع خطاهای تک‌فاز به زمین فراهم می‌کند. بدلیل عدم استفاده از رله‌های حفاظتی، هزینه اجرای طرح پیشنهادی کم است. طرح حفاظت پیشنهادی شامل حفاظت اصلی و پشتیبان بوده و به زیرساخت مخابراتی نیاز ندارد. همچنین کلیه اجزای سیستم برق کشتی شامل ژنراتور، موتور پیشران، باسبار، فیدر، خط، بار و شبکه جریان مستقیم در طرح پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. عملکرد هماهنگ طرح حفاظت پیشنهادی با استفاده از مدل یک سیستم تست برق کشتی با ساختار ناحیه‌ای در نرم افزار ETAP مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی خطا، هماهنگی حفاظتی، سیستم برق کشتی، سیستم زمین، کلید فیوز.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

نویسنده مسئول: دکتر ایمان صادق‌خانی، sadeghkhani@pel.iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1981548.1067>





حمل و نقل دریایی یکی از اصلی‌ترین روش‌های حمل و نقل بین‌المللی است که در آن بارهای سنگین و حجیم، کالا و مواد خطرناک از طریق دریا حمل می‌شوند. این روش حمل و نقل، نقش مهمی در توسعه صنعت، تجارت و تبادلات بین‌المللی دارد [۱-۳]. همچنین، این روش باعث کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش امنیت در حمل و نقل بار می‌شود. با توجه به اهمیت حمل و نقل دریایی، تحقیقات و پژوهش‌های زیادی برای بهبود عملکرد و افزایش کارایی در این حوزه انجام شده است. یکی از مهمترین بخش‌های حمل و نقل دریایی، سیستم برق کشتی^۱ است [۴]. سیستم تأمین انرژی الکتریکی کشتی نقش مهمی در ناوگان نیروی دریایی نسل‌های بعدی دارند. با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی به علت افزایش ظرفیت مسافر در کشتی‌های مسافری، افزایش ظرفیت کشتی‌های باربری، به روز شدن کشتی‌های تسلیحاتی و نظامی، توسعه سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی کشتی برای پشتیبانی از جنبه‌های مختلف عملکرد کشتی بسیار مهم است [۵]. بدلیل حرکت کشتی در دریا، سیستم توزیع برق در اکثر مواقع بصورت جزیره‌ای کار می‌کند. هنگامی که کشتی در بندرگاه پهلو می‌گیرد، امکان اتصال سیستم برق کشتی به شبکه سراسری برق وجود دارد. در این حالت می‌توان به منظور جلوگیری از آلودگی زیست محیطی، ژنراتورهای کشتی را خاموش کرد. از طرف دیگر، می‌توان در صورتی که کشتی در یک جزیره پهلو گرفته و آن جزیره نیاز به برق دارد، از طریق کشتی به تأمین برق جزیره کمک کرد. عموماً منابع تولید توان در ریزشبه‌کشتی ژنراتورها و منابع انرژی وقفه‌ناپذیر (UPS^۲) هستند در حالیکه عمده انرژی الکتریکی کشتی‌ها توسط موتورهای پیشران کشتی، رستوران و بارهای عمومی و صنعتی به مصرف می‌رسد.

مشکل طراحی و اجرای مؤثر سیستم مدیریت خطای مناسب برای سیستم توزیع انرژی الکتریکی کشتی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. محدود کردن جریان خطا، تشخیص و آشکارسازی جریان خطا در سیستم برق کشتی به دلیل نزدیکی اجزای الکتریکی و فیزیکی داخل کشتی و مقررات سختگیرانه عملکرد و ایمنی، موضوعی چالش برانگیز در روند طراحی سیستم‌های حفاظتی است. برای کاهش اثرات مخرب بر روی تجهیزات شبکه برق کشتی، سیستم حفاظتی باید در کمترین زمان ممکن به خطاها پاسخ دهد. برای مدیریت مؤثر خطا، تجهیزات حفاظتی کشتی باید به صورت هماهنگ کار کنند تا بتوانند جریان خطا را به سرعت محدود و آشکار کرده و ناحیه معیوب را جدا نمایند و اقدامات سریع برای بازیابی قسمت‌های آسیب دیده نیز انجام شود. یکی دیگر از چالش‌هایی که در طراحی سیستم حفاظت کشتی وجود دارد، فقدان دستورالعمل‌ها، استانداردها و راه‌حل‌های جامع در مورد اجرای این سیستم‌ها می‌باشد [۶]. سیستم حفاظتی ابزاری مؤثر برای جدا کردن ناحیه معیوب از قسمت‌های سالم و اصلاح ساختار سیستم است تا از وقفه‌های غیر ضروری بارهای مهم کشتی به عنوان شبکه‌ای مستقل جلوگیری شود. چالش دیگر تفاوت بارهای سیستم برق کشتی با بارهای یک سیستم توزیع زمینی است؛ تقریباً ۸۰ درصد از ظرفیت تولید انرژی الکتریکی کشتی توسط موتورهای پیشران مصرف می‌شود که تأثیر بسزایی در تغییر پروفیل بار دارد [۷]. در کنار این موارد، سیستم برق کشتی به عنوان یک سیستم خودگردان نیاز به قابلیت اطمینان و بهره‌وری بسیار بالا دارد. این نیاز منجر به توسعه سیستم‌های برق ناحیه‌ای شده است که طراحی سیستم حفاظت برای این سیستم‌های حلقوی نسبتاً پیچیده خود چالش دیگری پیش روی طراحان سیستم حفاظت برق کشتی است.

یکی از روش‌های حفاظت شبکه برق کشتی بهره‌گیری از حفاظت اضافه جریان^۳ است که اساس عملکرد آن افزایش جریان در هنگام وقوع خطا می‌باشد [۸]. اگر جریان سیستم از مقدار از پیش تعیین شده تجاوز نماید، رله اضافه جریان بر اساس منحنی مشخصه زمان-معکوس^۴ در زمان معین فرمان قطع را به کلید مربوطه ارسال می‌کند. مزیت استفاده از منحنی مشخصه زمان-معکوس امکان ایجاد هماهنگی حفاظتی بین رله‌های اضافه جریان مورد استفاده در شبکه برق می‌باشد. اما طول کوتاه کابل‌های کشتی باعث می‌شود تأخیر زمانی حاصل از منحنی زمان-معکوس منجر به گسترش سریع خطا به قسمت‌های مختلف سیستم برق کشتی شود. همچنین عدم تفاوت قابل توجه بین جریان خطاهای نزدیک و دور مانع از دستیابی به عملکرد هماهنگ رله‌های اضافه جریان می‌گردد [۹]. از طرفی ساختار حلقوی چند منبعی [۱۰] سیستم‌های مدرن برق کشتی باعث می‌شود که عملکرد هماهنگ رله‌های اضافه جریان مجهز به واحد حفاظت جهتی^۵ که به منظور تعیین جهت خطا در شبکه‌های غیرشعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت تأثیر قرار گیرد. سیستم حفاظت دیستانس^۶ نیز که بر اساس اندازه‌گیری امپدانس دیده شده از محل رله عمل می‌کند، کارایی چندانی در شبکه‌های برق کشتی ندارد زیرا طول کوتاه کابل‌های کشتی باعث می‌شود تفاوت چندانی بین امپدانس دیده شده در حالت عادی و معیوب و همچنین بین حالت خطا در ناحیه تحت حفاظت و خطا در خارج از ناحیه تحت حفاظت رله وجود نداشته باشد. هر چند که سیستم حفاظت تفاضلی^۷ که بر



اساس تفاوت اندازه جریان در دو سمت ناحیه تحت حفاظت عمل می‌کند، حفاظتی کارا است [۱۱]، اما نیاز به استقرار یک سیستم مخابراتی گسترده برای ارسال اطلاعات تجهیزات مختلف شبکه کشتی، هزینه پیاده‌سازی سیستم حفاظت را افزایش می‌دهد [۱۲]. از طرف دیگر، قطع سیستم مخابراتی منجر به غیرفعال شدن سیستم حفاظت برق کشتی می‌شود [۱۳، ۱۴]. برای غلبه بر چالش‌های پیش روی طرح‌های حفاظتی سنتی، چندین طرح ارائه شده است. در مرجع [۱۵] یک طرح حفاظت وفقی^۸ پیشنهاد شده است که در آن هنگام تغییر پیکربندی شبکه برق کشتی، تنظیمات رله‌های اضافه جریان به روز می‌شوند. علاوه بر مشکلات بیان شده برای این نوع از رله‌ها، این طرح نیاز به زیرساخت مخابراتی گسترده و یک سیستم پردازش مرکزی برای محاسبه تنظیمات دارد که این امر هزینه طرح حفاظتی را افزایش می‌دهد. یک طرح حفاظتی هوشمند در مرجع [۱۶] ارائه شده است که در آن از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۹ بهره گرفته شده است. اما نیاز به آموزش شبکه عصبی برای حالت‌های کاری مختلف از کارآیی این روش می‌کاهد. مرجع [۱۷] یک طرح حفاظتی مبتنی بر تخمین امپدانس فعال^{۱۰} پیشنهاد کرده است که در آن واحد واسط باس در هنگام وقوع افت ولتاژ در شبکه برق کشتی، اقدام به تزریق یک سیگنال اغتشاش جریانی کرده و پاسخ گذرا با بهره‌گیری از تبدیل موجک^{۱۱} پردازش می‌شود تا امپدانس تخمین زده شود. اما مشکل اصلی این روش انتخاب موجک مادر و نیاز به نرخ نمونه برداری بالا است.

از طرف دیگر سیستم‌های برق کشتی در مقایسه با اکثر سیستم‌های برق زمینی، سیستم زمین متفاوتی دارد زیرا برای کارکردن در پیکربندی زمین نشده یا زمین شده بواسطه امپدانس بسیار بالا طراحی شده‌اند. در یک سیستم قدرت زمین نشده هیچ اتصال عمده به زمین وجود ندارد و بارها به صورت فاز به فاز متصل می‌شوند. در این روش جریان خطای فاز به زمین صفر است [۱۸]. عیب این روش آن است که در صورت وقوع خطای فاز به زمین دوم، سطح جریان اتصال کوتاه زیاد می‌باشد و چون نقطه خنثی ترانسفورماتور یا ژنراتور به زمین متصل نیست، در نقطه خنثی اضافه ولتاژ ایجاد می‌شود که باعث صدمه دیدن سیم پیچ ژنراتور یا ترانسفورماتور می‌گردد. بنابراین خطای اول باید به سرعت آشکار شود که با توجه به جریان خطای صفر، چالش مهمی محسوب می‌شود. برای غلبه بر این چالش، مرجع [۱۹] یک طرح آشکارسازی خطای زمین برای سیستم برق کشتی ارائه کرده است که بر پایه استفاده از تبدیل موجک می‌باشد. اما انتخاب موجک مادر و نیاز به نرخ نمونه برداری بالا از معایب این طرح می‌باشند.

در اکثر روش‌های حفاظتی ارائه شده چون سطح جریان اتصال کوتاه فاز به زمین بالا می‌باشد، حتی در صورت عملکرد سریع سیستم حفاظتی، برای حداقل زمان ۲۰ میلی ثانیه (زمان عملکرد رله) شوک ولتاژ شدیدی به وجود می‌آید که امکان توقف تجهیزات برقی کشتی به خاطر افت ولتاژ وجود دارد. چون اکثر خطاهای سیستم برق کشتی از نوع فاز به زمین می‌باشند، ایمنی افراد در برابر برق گرفتگی و تجهیزات در برابر آتش سوزی حائز اهمیت است. چون تجهیزات برقی و تابلوها در ریز شبکه کشتی به یکدیگر نزدیک می‌باشند، در صورت بالا بودن سطح جریان اتصال کوتاه تکفاز، امکان صدمه دیدن آنها وجود دارد. در صورتی که وقفه‌ای در تأمین پیوسته انرژی الکتریکی کشتی به وجود آید، می‌تواند عواقب سنگینی در پی داشته باشد. بعلاوه سیستم حفاظتی باید در برابر کالیبره نبودن تجهیزات حفاظتی، قطع برق تغذیه آنها، ناموفق بودن قطع جریان اتصال کوتاه توسط کلیدهای قدرت و تنظیمات اشتباه تجهیزات حفاظتی ایمن باشد و در صورت عدم عملکرد تجهیزات حفاظتی و کلیدهای قدرت، جریان خطا صدمه‌ای به سیستم برق کشتی وارد نکند. بدین منظور در این مقاله روشی برای حفاظت سیستم انرژی الکتریکی کشتی ارائه شده است که در آن از ترکیب سیستم زمین کشتی و طرح حفاظتی پیشنهادی برای محدود کردن جریان خطا، آشکارسازی خطا، جداسازی قسمت معیوب و بازیابی سیستم برق کشتی پس از وقوع خطا بهره گرفته شده است. در طرح حفاظتی پیشنهادی از رله‌های حفاظتی استفاده نمی‌شود که این امر هزینه پیاده‌سازی آن را کاهش می‌دهد. در این طرح با نصب ترانسفورماتور ولتاژ تکفاز در مرکز ستاره ژنراتور کشتی، جریان خطای تکفاز به زمین به حداقل خود می‌رسد در حالیکه خطاهای دو و سه فاز نیز با استفاده از فیوز-جداکننده-کلید (FIS)^{۱۲} که به اختصار کلید فیوز نامیده می‌شود، مدیریت می‌شوند.

ساختار مقاله بدین صورت است که در بخش دوم پیکربندی سیستم برق کشتی تشریح می‌گردد. بخش سوم به طراحی سیستم حفاظتی پیشنهادی اختصاص یافته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم حفاظتی پیشنهادی در بخش چهارم ارائه شده است. در نهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری این مقاله می‌پردازد.



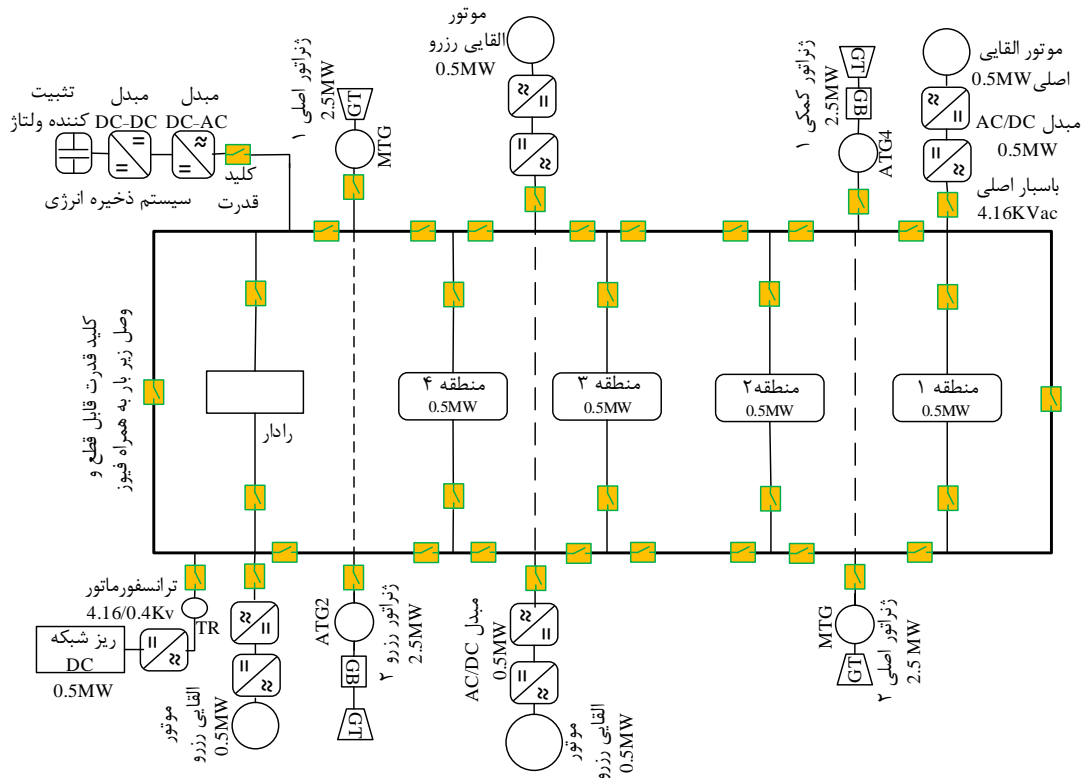


۲- ساختار سیستم انرژی الکتریکی کشتی

سیستم برق کشتی‌های سنتی دارای ساختاری شعاعی است. این ساختار پایداری، کارایی و قابلیت اطمینان قابل قبولی برای کشتی‌های مدرن ایجاد نمی‌کند. برای غلبه بر این چالش، در کشتی‌های مدرن از ساختار سیستم برق ناحیه‌ای استفاده می‌گردد. شکل (۱) سیستم برق کشتی تحت مطالعه [۱۲] را نشان می‌دهد که دارای ساختاری ناحیه‌ای و از نوع ترکیبی جریان متناوب-جریان مستقیم است. سطح ولتاژ بخش جریان متناوب این سیستم ۴/۱۶ کیلوولت می‌باشد. سیستم تحت مطالعه مجهز به چهار ژنراتور با ظرفیت ۲/۵ مگاوات است که دو عدد از آنها ژنراتور اصلی و دو ژنراتور دیگر به صورت رزرو می‌باشند. قدرت پیشران کشتی توسط دو عدد موتور الکتریکی ۱ مگاواتی تأمین می‌شود که یکی از آنها بعنوان رزرو کار می‌کند. کنترل دور موتورها با استفاده از یک اینورتر ۱ مگاواتی صورت می‌پذیرد. بارهای سیستم برق کشتی به دو دسته بارهای عمومی و بارهای صنعتی تقسیم می‌شوند. با توجه به مساحت کم کشتی، فاصله بین ژنراتورها تا تابلوهای برق و الکتروموتورها حدود ۵۰ تا ۱۰۰ متر است. بارهای عمومی مانند روشنایی، رستوران و بارهای تکفاز می‌باشند و بارهای صنعتی نیز عموماً از نوع سه فاز هستند. در ساختار ناحیه‌ای تحت مطالعه، بارهای صنعتی به واسطه نیاز به قابلیت اطمینان بالا در چهار منطقه تقسیم شده‌اند و برق هر منطقه به واسطه یک ترانسفورماتور ۰/۵ مگاوات از دو باس تأمین می‌گردد تا در صورت بروز مشکل در یک باس، از باس دیگر برق بارها تأمین گردد. توان بخش جریان مستقیم و بارهای عمومی که بطور موازی بهم متصل شده‌اند، ۰/۵ مگاوات می‌باشد که بواسطه یک ترانسفورماتور ۴/۱۶ به ۰/۴ کیلوولت با ظرفیت ۰/۵ مگاوات تغذیه می‌شوند. منابع تولید انرژی الکتریکی بخش جریان مستقیم شامل باتری و UPS می‌باشد.

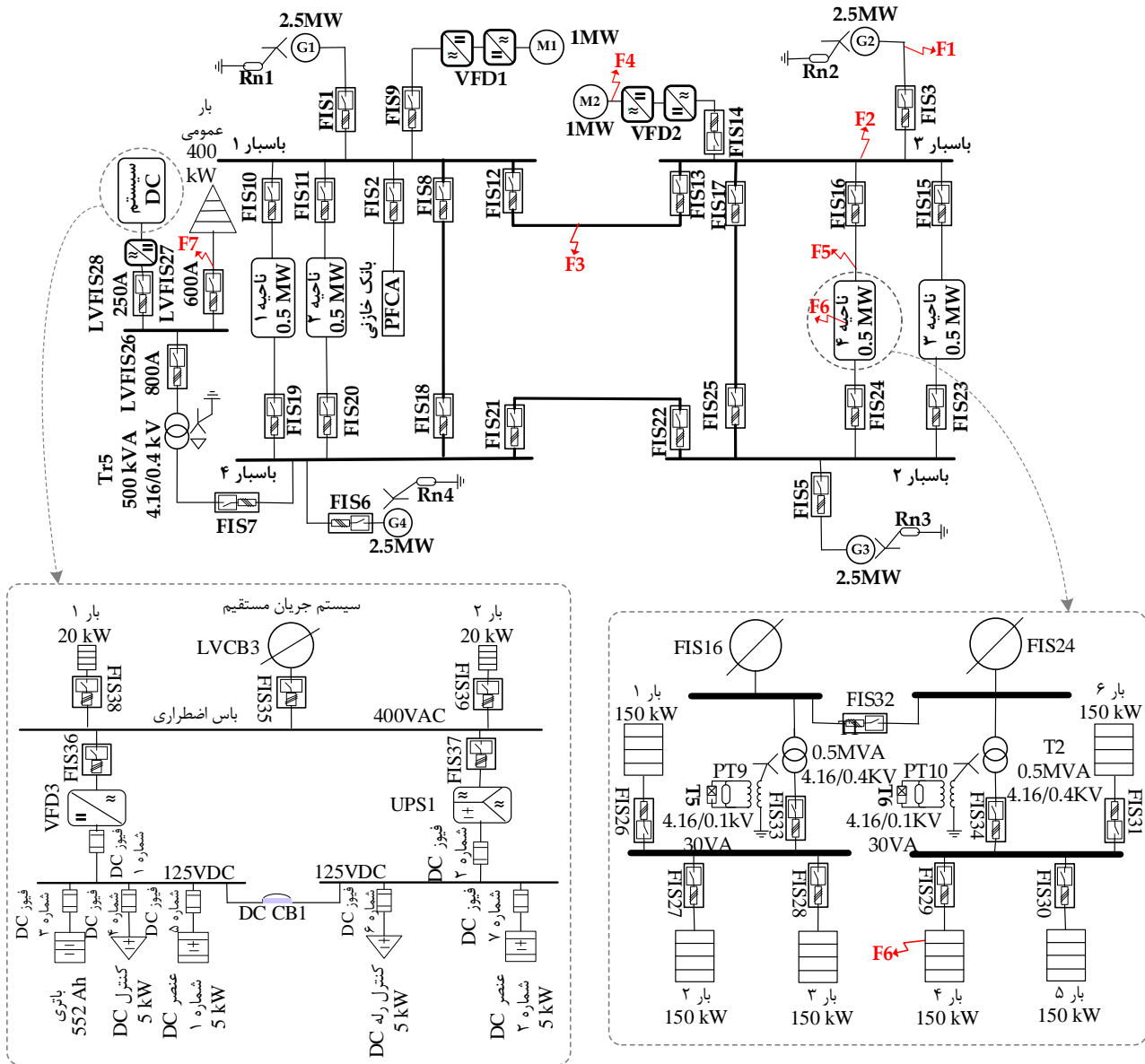
۳- طرح حفاظت هماهنگ پیشنهادی

گسترش خطا در سیستم برق کشتی منجر به نقص عملکرد آن خواهد شد و این امکان وجود دارد که یک خطا باعث عواقب متعدد شود. گام اول در مدیریت خطا، محدود کردن جریان خطا و آشکارسازی خطا است. پس از تعیین ناحیه معیوب، باید جداسازی آن قسمت از بقیه قسمت‌های سالم سیستم انجام شود. در نهایت، سیستم به سطح عملیاتی ایمن و قابل قبول بازگردانده می‌شود. شکل (۲) طرح حفاظتی پیشنهادی به همراه جانمایی سکسیونرهای قابل قطع و وصل زیر بار و FISها را نشان می‌دهد که در آن بطور همزمان از سیستم زمین کشتی و یک طرح حفاظتی استفاده شده است.



شکل (۱): سیستم تحت مطالعه برق کشتی با ساختار ناحیه‌ای





شکل (۲): طرح حفاظت پیشنهادی برای سیستم برق کشتی با ساختار ناحیه‌ای

۳-۱- حفاظت در برابر خطای تکفاز به زمین

برای حفاظت از خطاهای تکفاز به زمین، از سیستم زمین کشتی استفاده می‌شود؛ در این طرح یک ترانسفورماتور ولتاژ تکفاز که معادل یک مقاومت بزرگ است در مرکز ستاره ژنراتور قرار داده می‌شود. وجود این مقاومت باعث می‌شود جریان خطای تکفاز به زمین که مسیر خود را از مرکز ستاره ژنراتور می‌بندد، محدود به یک آمپر در اولیه ترانسفورماتور ولتاژ شود. این جریان خطای کوچک به آشکارسازی جریان خطای فاز به زمین کمک می‌کند. جریان خطا ارتباط مستقیمی با نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان کابلی دارد؛ هرچه نسبت تبدیل کوچکتر باشد، جریان خطا کمتر می‌شود و می‌توان محدوده تغییرات جریان خطای کشتی به زمین را از ۱ آمپر تنظیم کرد. مزیت این روش آن است که اگر هرگونه مشکلی در سیستم حفاظت کشتی پیش آید، جریان خطای تکفاز به زمین به قدری نیست که به تجهیزات سیستم برق کشتی آسیب برساند. همچنین امکان عملکرد پیوسته سیستم تأمین برق کشتی وجود خواهد داشت. مزیت چنین سیستمی نسبت به سیستم زمین نشده علاوه بر آشکارسازی ساده‌تر وقوع خطا، اجتناب از وقوع اضافه ولتاژ در نقطه خنثی ژنراتور و عدم صدمه دیدن سیم پیچ‌های آن می‌باشد.



مقاومت بالای این سیستم تشخیص خطای زمین را نسبت به سیستم زمین نشده تسهیل می‌نماید. در سیستم‌های دارای اتصال خازنی ضعیف به زمین، باید اختلاف بین ولتاژ خطا و ولتاژ عملکرد عادی افزایش یابد. یکی از راه‌های افزایش این تفاوت، اتصال مقاومت به نقاط خنثی برخی از ترانسفورماتورها یا ژنراتورها است.

هنگام وقوع خطای تکفاز به زمین، در ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ ۱۲۰ ولت القاء می‌شود که قادر است بوبین یک تایمر 120 VAC را تحریک کند. تایمر به منظور جلوگیری از عملکرد اشتباه در هنگام وقوع نوسانات ولتاژ، تایمر دارای ۲ ثانیه تاخیر در وصل است و پس از آن فرمان آلارم را صادر می‌کند. با فرمان آلارم ارسال شده توسط تایمر، متخصصین برق با حذف تدریجی و به نوبت هر کدام از باسبارها خطا مورد نظر را شناسایی و از سیستم برق کشتی جدا می‌کنند.

۳-۲- حفاظت در برابر خطاهای دو فاز و سه فاز

با توجه به اینکه سطح ولتاژ سیستم تحت مطالعه ۴/۱۶ کیلوولت است، نیازی به استفاده از کلیدهای جدید و گران قیمت نمی‌باشد. کلیدهای جدید عملکرد قطع و وصل آنها قابل رویت نبوده و برای رویت قطع و وصل کلید، باید از سکسیونر استفاده نمود. این امر باعث بزرگ شدن تابلو برق می‌گردد. کلیدهای قدرت جدید برای قطع جریان اتصال کوتاه ۲ فاز و ۳ فاز با استفاده از ترانسفورماتور جریان و رله‌های حفاظتی و ارسال فرمان قطع به کلید قدرت قادرند خطا را از سیستم برق کشتی جدا نمایند. اگر سطح جریان اتصال کوتاه بالا باشد، امکان عدم قطع جریان خطا و انفجار کلید قدرت وجود دارد. این نمونه کلیدهای قدرت به خاطر مکانیزم خاموش کردن جرقه و جداسازی خطا با استفاده از رله و ترانسفورماتور جریان و ولتاژ، نسبت به FISها بسیار گران قیمت هستند. همچنین مکانیزم خاموش کردن جرقه در انواع دژنگتورهای قدرت^{۱۳} جدید با گاز خلاء، گاز SF₆^{۱۴}، روغن و هوا می‌باشد که امکان تخلیه گاز، روغن و هوا وجود دارد و در زمان وقوع جریان اتصال کوتاه و یا قطع و وصل کلید، جرقه خاموش نشده و باعث خسارت به کلید قدرت می‌شود.

بنابراین در روش پیشنهادی از FISها برای حفاظت در برابر خطاهای دو فاز و سه فاز استفاده می‌شود. با توجه به موارد موفق مزیت FISها قیمت ارزان، قابل رویت بودن عملکرد کلید و کوچکتر شدن تابلو برق است. مکانیزم قطع جرقه در این نمونه کلید با فشار هوا می‌باشد؛ با عملکرد قطع و وصل کلید، پیستون عمل کرده و فشار هوا به محل قطع و وصل کلید منتقل می‌شود و باعث خاموش شدن جرقه می‌گردد. در صورت قطع یکی از فیوزها، اهرم مکانیکی که در زیر فیوز قرار دارد، باعث قطع جریان هر سه فاز از طریق کلید می‌شود.

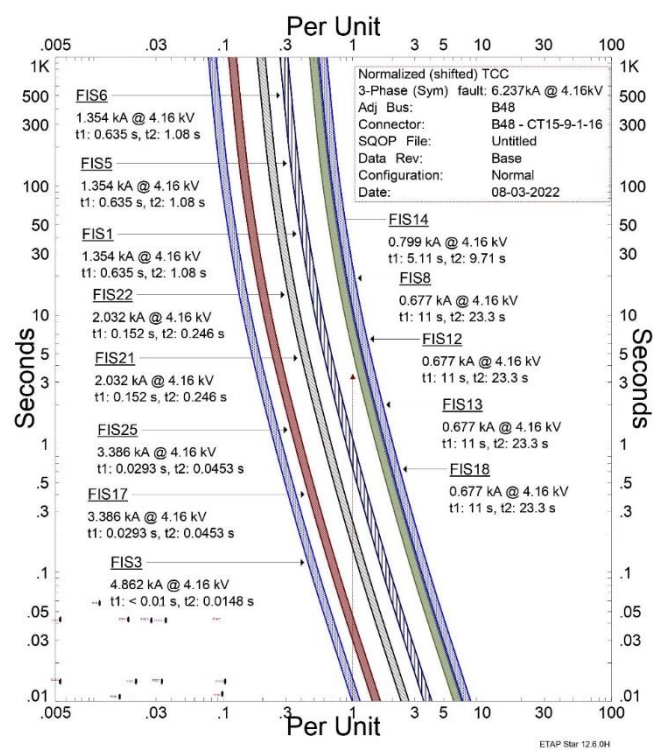
نحوه قرارگیری FISها در بخش‌های مختلف سیستم تحت مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. در هنگام وقوع خطاهای چند-فاز در فیدرهای ورودی و خروجی و مراکز بارها، به ترتیب نزدیکترین FISها به خطا که جریان اتصال کوتاه بیشتری از آنها عبور می‌کند، جریان خطا را قطع می‌کنند. غیر از حفاظت‌هایی که بصورت پیشفرض بر روی ژنراتور و موتور قرار دارد، از FIS برای حفاظت در برابر خطاهای دو فاز و سه فاز استفاده می‌شود. برای حفاظت بارهای عمومی در خطاهای مختلف نیز از فیوزهای کاردی و فشنگی تأخیری تکفاز و سه فاز استفاده می‌شود. توان بارهای عمومی نسبت به بارهای صنعتی کمتر بوده و عموماً از نوع تکفاز می‌باشند. با توجه به اهمیت کمتر این بارها نسبت به بارهای صنعتی، سیستم زمین ترانسفورماتور بارهای عمومی به صورت زمین شده در نظر گرفته شده تا در صورت وقوع خطا در سیستم روشنایی، به سرعت خطا شناسایی شود. حفاظت بخش جریان مستقیم نیز توسط حفاظت داخلی مبدل‌ها و فیوز اجرا می‌گردد.

۴- ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی

برای ارزیابی عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی، سیستم تحت مطالعه شکل (۲) به همراه سیستم حفاظت پیشنهادی در محیط نرم افزار ETAP شبیه سازی شده است. در گام اول در فیدر متصل به ژنراتور G2 یک خطای تکفاز به زمین قرار داده می‌شود. در این حالت جریان خطا یک آمپر بوده که باعث القای ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور نصب شده در مرکز ستاره ژنراتور G2 می‌شود. پس از گذشت ۲ ثانیه، فرمان آلارم صادر می‌گردد. با توجه به کوچک بودن جریان خطا، سیستم برق کشتی دچار وقفه در عملکرد نخواهد شد. با اعمال اتصال کوتاه سه فاز در باسبار ۳ جریان اتصال کوتاه ۶/۲۳ کیلوآمپر می‌باشد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است نزدیکترین FIS به محل اتصال FIS3 در لحظه ۴۰ میلی ثانیه عمل کرده و جریان خطا را قطع می‌کند. در صورت عدم عملکرد این تجهیز، به ترتیب



می‌نمایند. FIS1, FIS2, FIS21, FIS25, FIS3, FIS5, FIS6, FIS8, FIS12, FIS13, FIS18 و جریان خط را در بازه زمانی ۰/۰۴ تا ۱/۷۸ ثانیه قطع

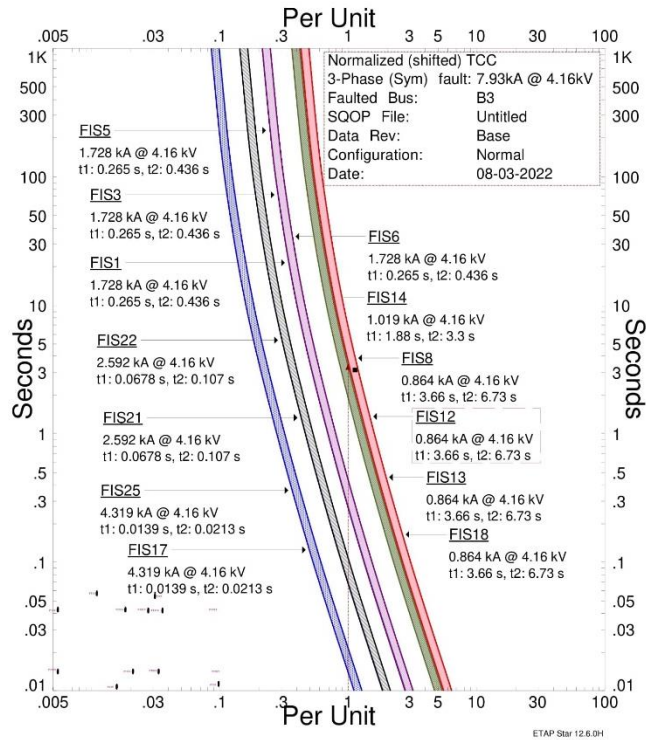


شکل (۳): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در ترمینال ژنراتور

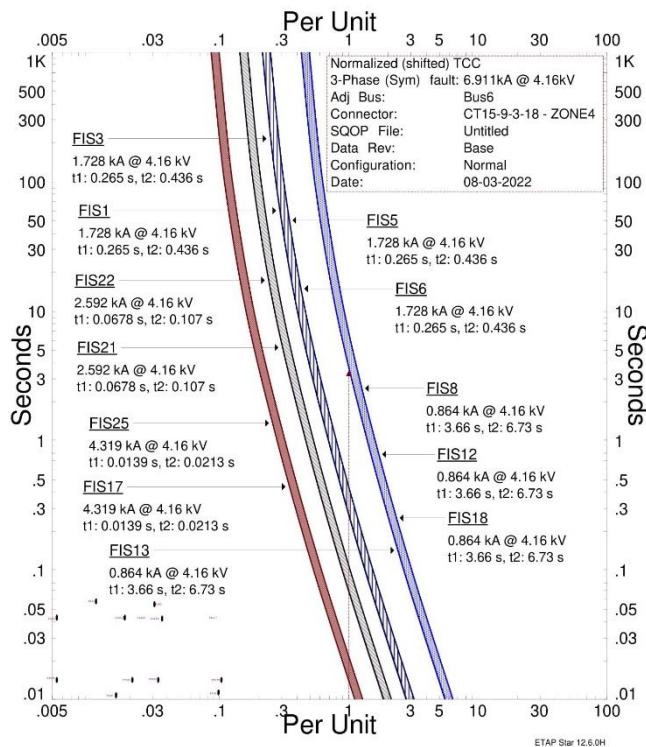
در گام بعدی ارزیابی عملکرد، خطاهای تکفاز و سه فاز در باسبار ۳ شبیه سازی می‌شود. در حالت وقوع خطای تکفاز به زمین، بوبین تایمر با ولتاژ ۱۲۰ VAC تحریک شده و تایمر T1 در زمان ۲ ثانیه فرمان آلام را ارسال می‌کند. در صورت عدم عملکرد تایمر T1، تایمرهای T2, T3 و T4 به ترتیب فرمان آلام را در بازه ۲ تا ۴ ثانیه ارسال می‌نمایند. شکل (۴) نشان می‌دهد که در حالت وقوع اتصال کوتاه سه فاز، جریان خطا ۶/۹۱۱ kA است. در این حالت نزدیکترین FIS به محل خطا FIS17 بوده که جریان اتصال کوتاه ۴/۳ kA را در ۴۰ میلی ثانیه قطع می‌کند. در صورت عدم عملکرد این تجهیز، به ترتیب FIS25, FIS21, FIS1, FIS3, FIS5, FIS6, FIS8, FIS12 و FIS13 و FIS18 جریان خطای ۴/۳ تا ۰/۸۶ کیلوآمپر را در بازه زمانی ۰/۰۴ تا ۱/۷۸ ثانیه قطع می‌نمایند.

در گام بعدی، عملکرد روش پیشنهادی در هنگام وقوع خطا در خطوط واسط بین باسها ارزیابی می‌گردد. بدین منظور ابتدا یک خطای تکفاز به زمین در خط واسط باس ۱ و باس ۳ شبیه سازی می‌شود. در این حالت ابتدا تایمر T1 در زمان ۲ ثانیه فرمان آلام را صادر کرده و در صورت عدم عملکرد آن، تایمرهای T2, T3 و T4 در بازه زمانی ۲ تا ۴ ثانیه به عنوان پشتیبان عمل خواهند کرد. شکل (۵) نشان می‌دهد که در حالت وقوع یک خطای سه فاز در این محل، FIS13 جریان اتصال کوتاه ۶/۰۷ کیلوآمپر را در زمان ۲۵ میلی ثانیه قطع می‌کند و در صورت عدم عملکرد آن، به ترتیب FIS17, FIS25, FIS21, FIS1, FIS3, FIS5, FIS6, FIS8, FIS12 و FIS18 در بازه ۰/۰۲۵ تا ۱/۷۸ ثانیه به عنوان پشتیبان عمل می‌نمایند.





شکل (۴): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در باسبار ۳

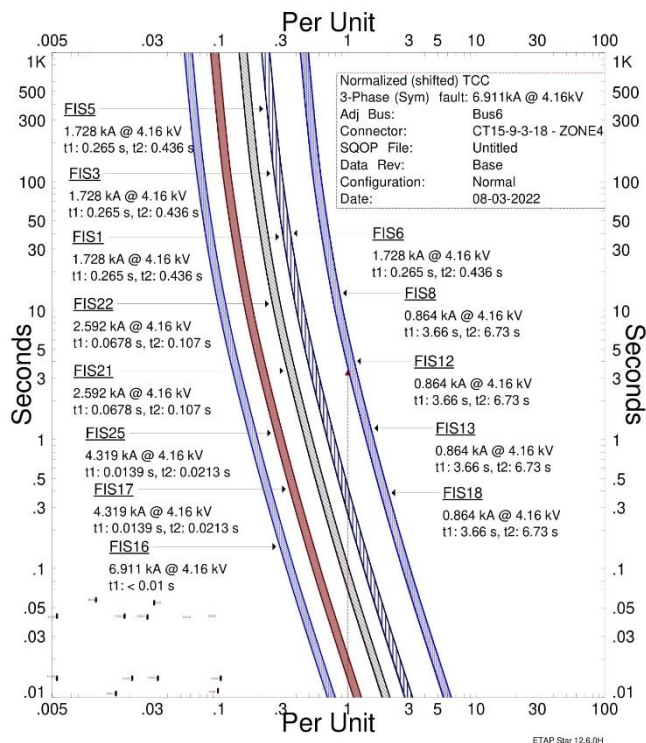


شکل (۵): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در خط واسط باسبارهای ۱ و ۳

گام بعدی به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در هنگام وقوع خطا در فیدرهای ورودی و خروجی به باسبار اختصاص یافته است که در آن خطا در فیدر متصل به ناحیه بار ۴ اتفاق می‌افتد. ابتدا تایمر T1 در ۲ ثانیه فرمان آلارم را صادر کرده و در صورت عدم عملکرد آن، تایمرهای T2، T3 و T4 در بازه زمانی ۲ تا ۴ ثانیه فرمان آلارم را صادر می‌نمایند. در حالت وقوع خطای سه فاز در این فیدر، ابتدا FIS16 جریان خطای ۷/۹ kA را در زمان ۱۴ میلی ثانیه قطع می‌کند. شکل (۶) نشان می‌دهد که در صورت عدم عملکرد این تجهیز حفاظتی،



به ترتیب FIS16, FIS17, FIS25, FIS21, FIS22, FIS1, FIS3, FIS5, FIS6, FIS14, FIS8, FIS12, FIS13 و FIS18 در بازه زمانی ۰/۰۵۶ تا ۲/۷ ثانیه به عنوان پشتیبان جریان خطای ۷/۹ الی ۱/۷۸ کیلوآمپر را قطع می‌نمایند.



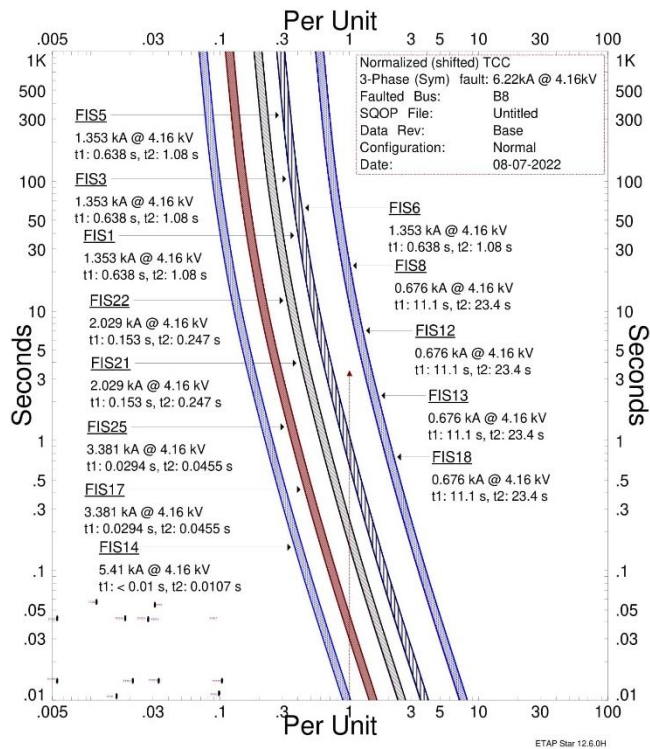
شکل (۶): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در فیدر متصل به ناحیه بار ۴

در حالت وقوع خطای تکفاز در ترمینال موتور M2، در صورت عدم عملکرد حفاظت داخلی اینورتر، ابتدا تایمر T1 در زمان ۲ ثانیه فرمان آلارم را صادر کرده و در صورت عدم عملکرد آن، تایمرهای T2, T3 و T4 در بازه زمانی ۲ تا ۴ ثانیه فرمان آلارم را صادر می‌نمایند. شکل (۷) نشان می‌دهد که در حالت وقوع خطای سه فاز در این محل، در صورت عدم عملکرد حفاظت داخلی اینورتر، ابتدا جریان خطای ۵/۴ کیلوآمپر توسط FIS14 قطع شده و در صورت عدم عملکرد این تجهیز به ترتیب FIS17, FIS25, FIS21, FIS22, FIS1, FIS3, FIS5, FIS6, FIS8, FIS13, FIS12 و FIS18 در بازه زمانی ۰/۰۷۳ تا ۱۰ ثانیه به عنوان پشتیبان جریان خطای ۵/۴ الی ۰/۶ کیلوآمپر را قطع می‌نمایند.

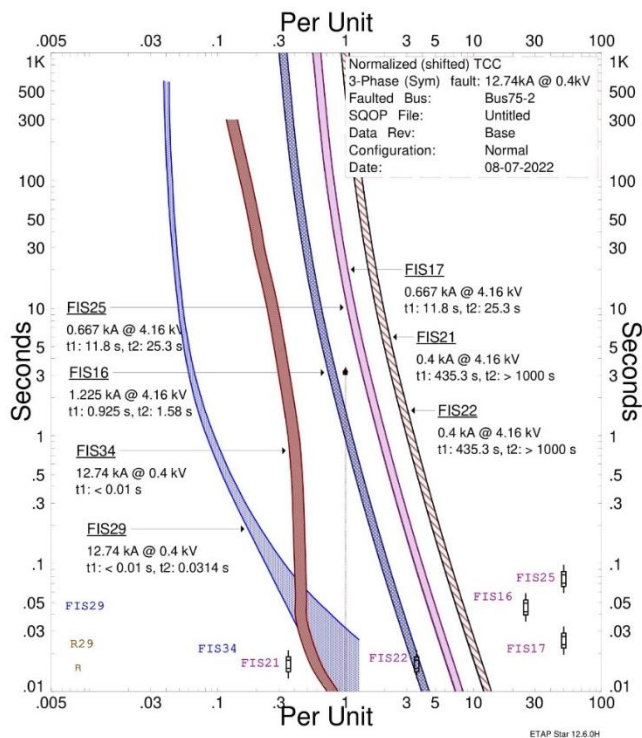
در گام آخر عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطا در بارها بررسی می‌گردد. اگر یک خطای تکفاز به زمین در ناحیه بار ۴ رخ دهد، تایمر ۶ در ۲ ثانیه فرمان آلارم را صادر می‌کند. شکل (۸) نشان می‌دهد که اگر یک خطای سه فاز در این ناحیه رخ دهد، جریان اتصال کوتاه ۱۲/۷۴ kA توسط FIS29 در زمان ۱۰ میلی ثانیه قطع می‌شود. پس از آن FIS36 این جریان اتصال کوتاه را در ۱۵ میلی ثانیه به عنوان پشتیبان FIS29 قطع می‌کند. در صورت عدم عملکرد این دو تجهیز در سمت فشار ضعیف، FIS16, FIS17 و FIS25 جریان اتصال کوتاه ۱/۲ تا ۰/۶ کیلوآمپر را در بازه زمانی ۰/۶ الی ۶/۲۹ ثانیه در سمت فشار متوسط قطع می‌نمایند. در حالت وقوع خطای تکفاز به زمین در بخش بارهای عمومی، جریان خطا بر خلاف حالت‌های قبل بزرگ و برابر با ۹/۹۴ کیلوآمپر است که علت آن زمین شدن بدون مقاومت مرکز ستاره ترانسفورماتور این بخش می‌باشد. بر اساس شکل (۹الف) در این حالت در ابتدا L VFIS27 در زمان ۱۰ میلی ثانیه خطا را شناسایی و در زمان ۳۵ میلی ثانیه جریان خطا را قطع می‌کند. فیوز L VFIS26 به عنوان پشتیبان L VFIS27 در ۱۲ میلی ثانیه خطا را شناسایی و در ۴۰ میلی ثانیه جریان خطا را در سمت فشار ضعیف قطع می‌نماید. در سمت ورودی ترانسفورماتور، جریان خطا ۰/۵۵ kA بوده که توسط FIS7 شناسایی و در زمان ۵۵ ms قطع می‌شود. شکل (۹ب) نشان می‌دهد که در حالت وقوع اتصال کوتاه سه فاز در این بخش، جریان خطا ۹/۴۶ کیلوآمپر است. در ابتدا کلید فیوز L VFIS27 در زمان ۱۰ ms جریان خطای kA ۰/۹۱ را شناسایی و در زمان ۴۰ ms جریان خطا را قطع می‌کند. L VFIS26 به عنوان پشتیبان L VFIS27، در زمان ۱۲ ms جریان



خطای ۰/۹۱ kA را شناسایی و در زمان ۴۱ ms قطع می‌نماید. در صورت عدم عملکرد این تجهیزات، کلید فیوزهای FIS7، FIS17 و FIS25 به ترتیب جریان خطای ۰/۹۱ الی ۰/۴۹ کیلوآمپر را در بازه زمانی ۲/۲۹۹ الی ۵۹۳/۷۲۰ ثانیه قطع می‌کنند.

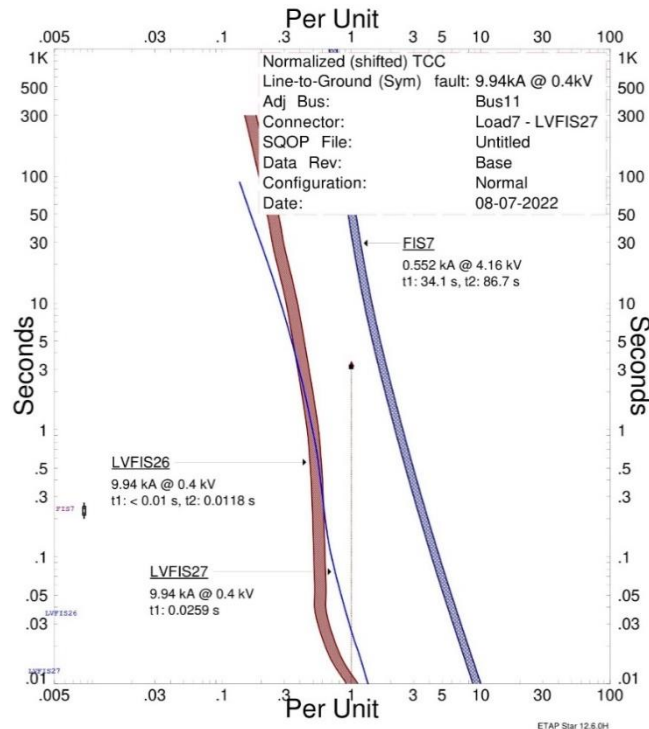


شکل (۷): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در ترمینال موتور

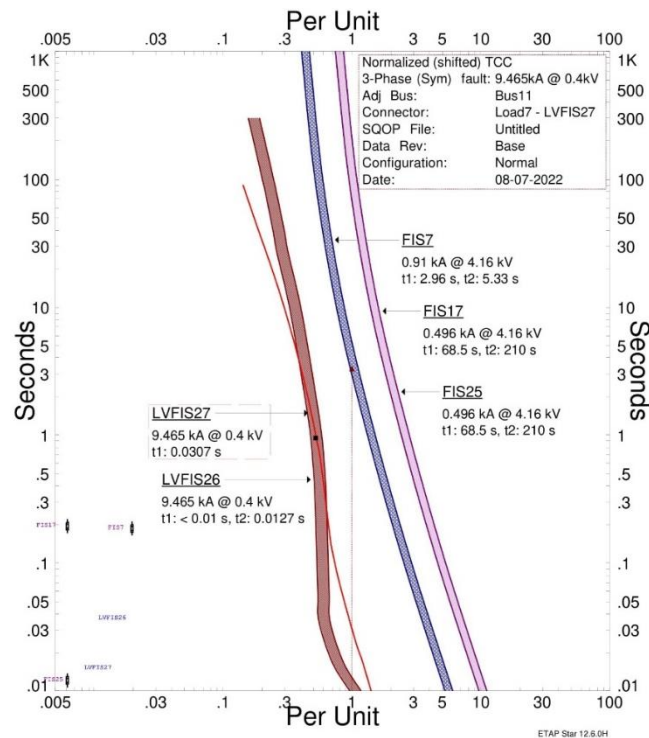


شکل (۸): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطای سه فاز در ناحیه بار ۴





(الف)



(ب)

شکل (۹): عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی در هنگام وقوع خطا در بخش بارهای عمومی. (الف) خطای تکفاز به زمین و (ب) خطای سه فاز

جدول (۱) عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی را در هنگام وقوع خطاهای تکفاز به زمین، دو فاز، دو فاز به زمین و سه فاز در نقاط مختلف سیستم تحت مطالعه نشان می‌دهد. این جدول دارای دو بخش حفاظت اصلی و حفاظت پشتیبان است. در قسمت حفاظت اصلی، تجهیز حفاظتی که برای هر خطا ابتدا عمل می‌کند به همراه زمان عملکرد آن و جریان خطای جاری شده ارائه شده است. در ابتدا کلید فیوز قدرت جریان خطا یک یا دو یا سه فاز را در هنگام وقوع خطاهای مختلف قطع می‌کند (زمان اولیه عملکرد کلید فیوز)؛ با عملکرد فیوز،



یک اهرم از فیوز خارج می‌شود و با تحریک مکانیکی باعث قطع جریان هر سه فاز کلید قدرت می‌شود (زمان ثانویه عملکرد کلید فیوز) تا از دو فاز شدن شبکه جلوگیری شود. در بخش حفاظت پشتیبان نیز، تجهیزهای حفاظتی که به عنوان پشتیبان حفاظت اصلی عمل می‌کنند، به ترتیب همراه با زمان عملکرد و جریان خطا نمایش داده شده‌اند. همچنین در ستون آخر زمان ثانویه عملکرد کلید فیوز ارائه شده است. نتایج حاصل از عملکرد حفاظت اصلی و پشتیبان مؤید عملکرد هماهنگ طرح حفاظت پیشنهادی می‌باشد.

جدول (۱): عملکرد حفاظت اصلی و حفاظت پشتیبان پیشنهادی در هنگام وقوع انواع خطا

نوع خطا	محل خطا	حفاظت اصلی				حفاظت پشتیبان			زمان عملکرد FIS (ms)
		تجهیز حفاظتی	زمان عملکرد تجهیز حفاظتی (ms)	جریان خطا (kA)	زمان عملکرد FIS (ms)	تجهیز حفاظتی	جریان خطا (kA)	زمان عملکرد تجهیز حفاظتی (ms)	
AG	F1	T2	2000	0.001	ALARM	T1	0.001	2000	ALARM
						T3	0.001	2020	ALARM
						T4	0.001	2040	ALARM
ABC	F1	FIS3	38.6	4.77	FIS3(83.7)	FIS17	3.412	79.4	FIS17(137)
						FIS25	3.412	79.4	FIS25(137)
						FIS21	2.04	220	FIS11(318)
						FIS22	2.04	220	FIS22(318)
						FIS1	1.36	520	FIS1(746)
						FIS5	1.36	520	FIS5(746)
						FIS6	1.36	520	FIS6(746)
						FIS14	0.7	2418	FIS14(3874)
						FIS8	0.6	5734	FIS8(10642)
						FIS12	0.6	5734	FIS12(10642)
						FIS13	0.6	5734	FIS13(10642)
FIS18	0.6	5734	FIS18(10642)						
AB	F1	FIS3	45	4.77	FIS3(85)	FIS17	3.412	78.2	FIS17(136)
						FIS25	3.412	78.2	FIS25(136)
						FIS21	2.07	216	FIS21(313)
						FIS22	2.07	216	FIS22(313)
						FIS1	1.365	511	FIS1(733)
						FIS5	1.365	511	FIS5(733)
						FIS6	1.365	511	FIS6(733)
						FIS14	0.7	4478	FIS14(7851)
						FIS8	0.68	5469	FIS8(10097)
						FIS12	0.68	5469	FIS12(10097)
						FIS13	0.68	5469	FIS13(10097)
FIS18	0.68	5469	FIS18(10097)						
ABG	F1	FIS3	45	4.77	FIS3(85)	FIS17	3.4	78	FIS17(136)
						FIS25	3.4	78	FIS25(136)
						FIS21	2	216	FIS21(313)
						FIS22	2	216	FIS22(313)
						FIS1	1.35	511	FIS1(733)
						FIS5	1.35	511	FIS5(733)
						FIS6	1.35	511	FIS6(733)
						FIS14	0.7	4487	FIS14(7851)
						FIS8	0.67	5473	FIS8(10105)
						FIS12	0.67	5473	FIS12(10105)
						FIS13	0.67	5473	FIS12(10105)
FIS18	0.67	5473	FIS12(10105)						
AG	F2	T2	2000	0.001	ALARM	T1	0.001	2020	ALARM



						T3 T4	0.001 0.001	2040 2060	ALARM ALARM
ABG	F2	FIS17	47.9	4.36	FIS17(96.3)	FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	4.36 2.61 2.61 1.7 1.7 1.7 1.7 0.9 0.87 0.87 0.87 0.87	47.9 133 133 300 300 300 300 1543 1724 1724 1724 1724	FIS25(96.3) FIS21(206) FIS22(206) FIS1(429) FIS3(429) FIS5(429) FIS6(429) FIS14(2379) FIS8(2690) FIS12(2690) FIS13(2690) FIS18(2690)
AB	F2	FIS17	47.9	4.36	FIS17(96.3)	FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	4.36 2.61 2.61 1.7 1.7 1.7 1.7 0.9 0.87 0.87 0.87 0.87	47.9 133 133 300 300 300 300 1543 1724 1724 1724 1724	FIS25(96.3) FIS21(206) FIS22(206) FIS1(429) FIS3(429) FIS5(429) FIS6(429) FIS14(2379) FIS8(2690) FIS12(2690) FIS13(2690) FIS18(2690)
ABC	F2	FIS17	48.9	4.36	FIS17(97.5)	FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	4.36 2.59 2.59 1.7 1.7 1.7 1.7 0.9 0.87 0.87 0.87 0.87	48.8 135 135 306 306 306 306 1068 1779 1779 1779 1779	FIS25(97.5) FIS21(209) FIS22(209) FIS1(437) FIS3(437) FIS5(437) FIS6(437) FIS14(1565) FIS8(2790) FIS12(2790) FIS13(2790) FIS18(2790)
AG	F3	T2	2000	0.001	ALARM	T1 T3 T4	0.001 0.001 0.001	2000 2000 2000	ALARM ALARM ALARM
ABG	F3	FIS13	18	6.67	FIS13(55.8)	FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS18	4.36 4.36 2.61 2.61 1.7 1.7 1.7 1.7 0.87 0.87 0.87 0.87	47.9 47.9 133 133 300 300 300 300 1724 1724 1724 1724	FIS17(96.5) FIS25(96.3) FIS21(206) FIS22(206) FIS1(429) FIS3(429) FIS5(429) FIS6(429) FIS14(2379) FIS8(2690) FIS12(2690) FIS18(2690)
AB	F3	FIS13	18	6.67	FIS13(55.8)	FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5	4.36 4.36 2.61 2.61 1.7 1.7 1.7	47.9 47.9 133 133 300 300 300	FIS17(96.5) FIS25(96.3) FIS21(206) FIS22(206) FIS1(429) FIS3(429) FIS5(429)



						FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS18	1.7 0.97 0.87 0.87 0.87	300 1543 1723 1723 1723	FIS6(429) FIS14(2379) FIS8(2689) FIS12(2689) FIS18(2689)
AG	F4	VFD3	2In	0	VFD3	T2 T1 T3 T4	0.001 0.001 0.001 0.001	2000 2020 2040 2060	ALARM ALARM ALARM ALARM
ABG	F4	VFD3	2In	0	VFD3	FIS14 FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	5.4 3.4 3.4 2 2 1.3 1.3 1.3 1.3 0.6 0.6 0.6 0.6	30.8 78.5 78.5 217 217 514 514 514 514 5542 5542 5542 5542	FIS14(73) FIS17(136) FIS25(136) FIS21(314) FIS22(314) FIS1(737) FIS3(737) FIS5(737) FIS6(737) FIS8 (10247) FIS12(10247) FIS13(10247) FIS18(10247)
ABC	F4	VFD3	2In	0	VFD3	FIS14 FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	5.4 3.3 3.3 2 2 1.3 1.3 1.3 1.3 0.6 0.6 0.6 0.6	31 79.6 79.6 220 220 522 522 522 522 5782 5782 5782 5782	FIS14(73) FIS17(138) FIS25(138) FIS21(319) FIS22(319) FIS1(749) FIS3(749) FIS5(749) FIS6(749) FIS8 (10740) FIS12(10740) FIS13(10740) FIS18(10740)
AG	F5	T2	2000	0.001	ALARM	T1 T3 T4	0.001 0.001 0.001	2020 2040 2060	ALARM ALARM ALARM
ABG	F5	FIS16	7.8	14.8	FIS16(40)	FIS16 FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6 FIS14 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	7.8 4.36 4.36 2.6 2.6 1.7 1.7 1.7 1.7 0.9 0.8 0.8 0.8 0.8	14.8 47.9 47.9 133 133 300 300 300 300 1543 1724 1724 1724 1724	FIS16(49.5) FIS17(96.3) FIS25(96.3) FIS21(206) FIS22(206) FIS1(429) FIS3(429) FIS5(429) FIS6(429) FIS14(2379) FIS8 (2690) FIS12(2690) FIS13(2690) FIS18(2690)
ABC	F5	FIS16	7.8	14.8	FIS16(49.5)	FIS17 FIS25 FIS21 FIS22 FIS1 FIS3 FIS5 FIS6	4.36 4.36 2.6 2.6 1.7 1.7 1.7 1.7	48.8 48.8 135 135 306 306 306 306	FIS17(97.5) FIS25(97.5) FIS21(209) FIS22(209) FIS1(437) FIS3(437) FIS5(437) FIS6(437)



						FIS14 FIS8 FIS12 FIS13 FIS18	0.9 0.8 0.8 0.8 0.8	1068 1779 1779 1779 1779	FIS14(1565) FIS8 (2790) FIS12(2790) FIS13(2790) FIS18(2790)
AG	F6	T2	2000	0.001	ALARM	T1 T3 T4	0.001 0.001 0.001	2020 2040 2060	ALARM ALARM ALARM
ABG	F6	FIS29	10	11.2	FIS29(35)	FIS36 FIS16 FIS17 FIS25	11.242 1.2 0.69 0.69	12 634 5003 5003	FIS29(40) FIS16(908) FIS17(9067) FIS25(9067)
ABC	F6	FIS29	10	12.74	FIS29(31)	FIS36 FIS16 FIS17 FIS25	12.74 1.2 0.66 0.69	12 663 6294 6294	FIS29(35) FIS16(953) FIS17(12373) FIS25(12373)
AG	F7	LVFIS27	25	9.94	LVFIS27(25)	LVFIS2 6 FIS7	30 37616	9.94 0.55	LVFIS26(30) FIS17(149553)
ABC	F7	LVFIS26	10	9.4	LVFIS26(41)	LVFIS2 7 FIS7 FIS17 FIS25	15 1496 247350 247350	9.46 0.91 0.46 0.46	LVFIS27(41) FIS7(2299) FIS17(593420) FIS25(593420)

۵- نتیجه گیری

یکی از مواردی که به استفاده هر چه بیشتر از سیستم توزیع انرژی الکتریکی کشتی با ساختار ناحیه‌ای که قابلیت اطمینان بالاتری دارد منجر می‌شود، توسعه یک طرح حفاظتی هماهنگ برای تجهیزات مختلف این سیستم می‌باشد. در این مقاله یک طرح حفاظتی بدون استفاده از رله‌های حفاظتی ارائه شد که دارای حفاظت پشتیبان و حفاظت اصلی می‌باشد. با بهره‌گیری از سیستم زمین با مقاومت بالا و تایمر، هم جریان خطای تکفاز به زمین به عنوان یک خطای متداول محدود شده که این امر امکان عملکرد بدون وقفه سیستم را فراهم می‌نماید و هم سیستم برق کشتی در برابر این نوع خطا محافظت می‌شود. حفاظت در برابر خطاهای دو فاز و سه فاز نیز توسط کلید فیوز انجام می‌شود. هزینه پایین و عدم نیاز به زیرساخت مخابراتی پیاده‌سازی این طرح را ساده می‌نماید. نتایج بررسی سناریوهای مختلف خطا در سیستم تحت مطالعه نشان دهنده عملکرد هماهنگ و سریع طرح حفاظتی پیشنهادی در هنگام وقوع انواع خطا در بخش‌های مختلف بود.

ضمایم

انتخاب فیوز قدرت:

انتخاب فیوز در فیدر انتهایی یک شبکه بستگی مستقیم به نوع بار متصل به آن فیدر دارد. اگر بار متصل موتور یا ترانسفورماتوری باشد، فیوز انتخابی باید به گونه‌ای انتخاب شود که در مقابل جریان‌های هجومی و راه‌اندازی نسوزد. از طرف دیگر اگر بار روی فیدر انتهایی موتوری باشد، با توجه به نیاز قطع سریع مدار در حالت وقوع خطا، فیوز انتخابی از نوع تندسوز انتخاب می‌گردد. فیوزهای تندسوز جریان‌های اضافی را تقریباً تا دو برابر مقدار نامی خود به خوبی تحمل می‌نمایند. بر اساس استاندارد IEC-269، فیوزهای محافظ فیدرهای تغذیه باید توانایی تحمل ۱/۲ برابر جریان بار را داشته باشند. از این رو نخست جریان اضافه بار برای مدت ۳۰۰ ثانیه، ۱/۲ برابر جریان بار انتخاب می‌گردد. سپس در منحنی مشخصه حداقل زمان ذوب فیوز (MMT¹) فیوزهای تندسوز، فیوزی که زمان MMT آن تحت جریان فوق بزرگتر از ۳۰۰ ثانیه باشد، انتخاب می‌گردد. مطابق کاتالوگ ABB جهت انتخاب فیوز برای فیدر خروجی با توان ۱۰۰۰ کیلو وات، فیوز ۲۰۰ آمپر مناسب است:



$$1.2 \times \frac{1000 \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 4160 \times 0.8} = 1.2 \times 173 = 207 \text{ A.}$$

در نتیجه فیوز ۲۰۰ آمپری انتخاب می‌شود.

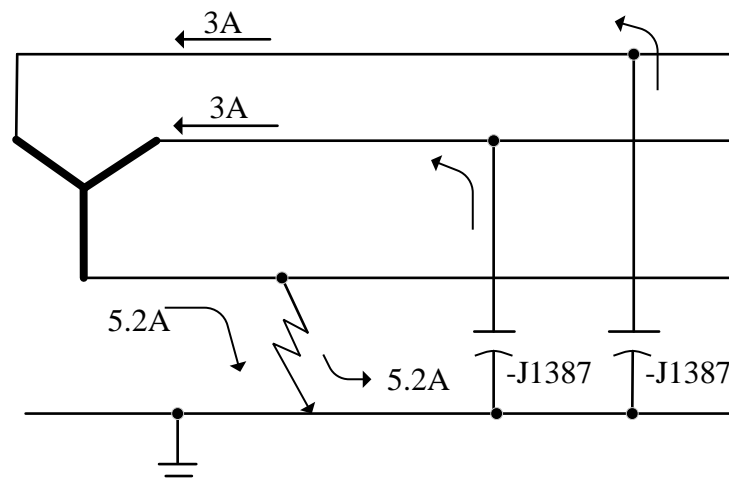
جریان خطا در سیستم زمین نشده:

در این قسمت تأثیر اتصال زمین بر جریان و ولتاژ در شرایط خطای زمین نشان داده شده است. شکل (۱۰) وضعیت سیستم را در حین وقوع یک خطای زمین در سیستم زمین نشده با ولتاژ ۴/۱۶ کیلو ولت نشان می‌دهد. شکل (۱۱الف) ولتاژ سیستم را قبل از وقوع خطای زمین نشان می‌دهد. از آنجایی که سیستم از طریق امپدانس نسبتاً بزرگی به صورت خازنی به زمین متصل شده است، یک خطای فاز به زمین باعث می‌شود که فازورهای ولتاژ سیستم جابجا شوند (شکل ۱۱ب). تا زمانی که عیب برطرف نشود یا در فاز دیگری یک خطای فاز به زمین رخ دهد، سیستم در این وضعیت باقی خواهد ماند. جریان خطای زمین از طریق ظرفیت خازنی توزیع شده (سیستم عایق) فازهای سالم باز می‌گردد. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، جریانی برابر با ۵/۲ آمپر جاری می‌شود. خطوط خط چین در شکل (۱۱) نشان دهنده رابطه فازورهای ولتاژ خطا است که بصورت یک مثلث می‌باشند.

$$|I_A| = |I_B| = \frac{4160 \text{ V}}{-j1387 \Omega} = 3 \text{ A,}$$

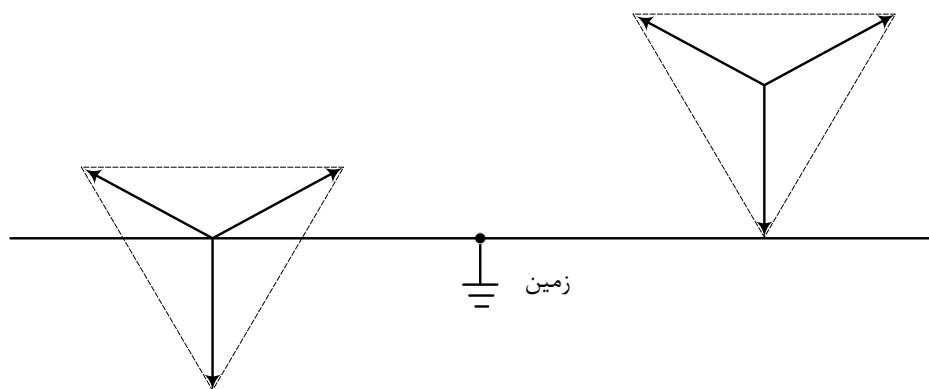
$$I_{GF} = 3I_0 = 3 \times \cos(30^\circ) + 3 \times \cos(30^\circ) = 5.2 \text{ A.}$$

امکان وقوع چندین خطای زمین در یک سیستم زمین نشده وجود دارد. خطای زمین اول در یک فاز از سیستم زمین نشده منجر به قطع خودکار نمی‌شود اما هر چه خطای فاز به زمین طولانی‌تر باشد، احتمال وقوع خطای زمین دوم در فاز دیگر پیش از برطرف شدن خطای اول بیشتر می‌شود؛ زیرا در این حالت فازهای سالم دارای ولتاژ فاز به فاز بوده که این مسئله بر روی عایق فاز به زمین آنها فشار وارد می‌کند. به عبارت دیگر، عایق تا ۷۳ درصد بیش از حد تحت فشار قرار می‌گیرد. همچنین، امکان تخریب سریع سیستم عایقی به دلیل اضافه ولتاژ جمعی که از طریق خطاهای زمین متوالی در طی چندین سال به آن وارد می‌شود، وجود دارد. اگر عایق سیستم برای این شرایط انتخاب نشده باشد، امکان افزایش بیشتر سرعت تخریب عایقی با گذشت زمان نیز وجود دارد.



شکل (۱۰): وقوع خطای زمین در سیستم زمین نشده.





شکل (۱۱): فازور ولتاژها (الف) در حالت عادی و (ب) در هنگام وقوع خطای زمین در سیستم زمین نشده.

مراجع

- [1] T. Zhou, Q. Hu, Z. Hu, and R. Zhen, "An adaptive hyper parameter tuning model for ship fuel consumption prediction under complex maritime environments," *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 7, no. 3, pp. 255-263, 2022, doi: 10.1016/J.JOES.2021.08.007.
- [2] J. Barreiro, S. Zaragoza, and V. Diaz-Casas, "Review of ship energy efficiency," *Ocean Engineering*, vol. 257, p.111594, 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111594.
- [3] H. Daniel, J.P.F. Trovão, and D. Williams, "Shore power as a first step toward shipping decarbonization and related policy impact on a dry bulk cargo carrier," *eTransportation*, vol. 11, p. 100150, 2022, doi: 10.1016/J.ETTRAN.2021.100150.
- [4] J. Hou, J. Sun, and H.F. Hofmann, "Mitigating power fluctuations in electric ship propulsion with hybrid energy storage system: Design and analysis," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 43, no. 1, pp.93-107, 2017, doi: 10.1109/JOE.2017.2674878.
- [5] K.L. Butler, N.D.R. Sarma, C. Whitcomb, H. Do Carmo, and H. Zhang, "Shipboard systems deploy automated protection," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 11, no. 2, pp. 31-36, Apr. 1998, doi: 10.1109/67.659624.
- [6] G. Ulissi, S.Y. Lee, D. Dujic, "Solid-state bus-tie switch for shipboard power distribution networks," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, pp. 1253-1264, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2996776.
- [7] N. Bayati, H.R. Baghaee, A. Hajizadeh, and M. Soltani, "Localized protection of radial DC microgrids with high penetration of constant power loads," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, pp. 4145-4156, 2020, DOI:10.1109/JSYST.2020.2998059.
- [8] N. Bayati, F. Aghaee, and S.H. Sadeghi, "The adaptive and robust power system protection schemes in the presence of DGs," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 9, pp. 732-740, 2019, doi: 10.20508/IJRER.V9I2.9154.G7642.
- [9] Y. Wang, Z. Xu, and D. Wu, "Coordination between inverter short-circuit characteristics and overcurrent protection for shipboard electrical systems," in *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pp. 2634-2638, 2017, doi: 10.1109/IAEAC.2017.8054502.
- [10] Y. Gong, Y. Huang, and N.N. Schulz, "Integrated Protection System Design for Shipboard Power System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 6, pp. 1930- 1936, Nov 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.2006320.
- [11] J. Tang and P. McLaren, "A wide area differential backup protection scheme for shipboard application," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1183-1190, 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.860272.
- [12] M. Babaei, J. Shi, and S. Abdelwahed, "A survey on fault detection, isolation, and reconfiguration methods in electric ship power systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9430-9441, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2798505.





- [13] E. Christopher, M. Sumner, D.W.P. Thomas, X. Wang, and F. de Wildt, "Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 860–865, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2243391.
- [14] W. Li, A. Monti, and F. Ponci, "Fault detection and classification in medium voltage DC shipboard power systems with wavelets and artificial neural networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 11, pp. 2651–2665, 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2313035.
- [15] O.A. Amoda and N.N. Schulz, "An adaptive protection scheme for shipboard power systems," in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 225–230, 2007, doi: 10.1109/ESTS.2007.372090.
- [16] M. Fang, L. Fu, Z. Ye, and L. Hu, "Intelligent protection system design for shipboard power system," in *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, vol. 2, pp. 1562–1567, 2011, doi: 10.1109/ESTS.2005.1524681.
- [17] J. Wang, M. Sumner, D. Thomas, and R. Geertsma, "Active fault protection for an AC zonal marine power system," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 1, pp. 156–166(10), Dec. 2011, doi: 10.1109/08IAS.2008.282.
- [18] D. Whitehead and N. Fischer, "Advanced Commercial Power System Protection Practices Applied to Naval Medium Voltage Power Systems," in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Aug. 2005, doi:10.1109/ESTS.2005.1524713.
- [19] H. Douglas, P. Pillay, and T. Ortmeyer, "The application of wavelets to shipboard power system protection," in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 432–436, 2005, doi: 10.1109/ESTS.2005.1524711.

زیر نویس‌ها

-
- ¹ Shipboard power system
 - ² Uninterruptible power supply
 - ³ Overcurrent protection
 - ⁴ Inverse time characteristic curve
 - ⁵ Directional protection
 - ⁶ Distance protection
 - ⁷ Differential protection
 - ⁸ Adaptive protection
 - ⁹ Artificial neural network
 - ¹⁰ Active impedance estimation
 - ¹¹ Wavelet transform
 - ¹² Fuse-isolator-switch
 - ¹³ Circuit breaker
 - ¹⁴ Sulfur hexafluoride
 - ¹⁵ Minimum melting time

