

تشخیص و مکان‌یابی خطا در شبکه‌های الکتریکی هیبریدی شناورها با استفاده از تبدیل موجک

محسن علیانی، آرش دهستانی کلاگر و محمدرضا علیزاده پهلوانی

مرور زمان با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در حوزه مبدل‌های الکترونیک قدرت، استفاده از شبکه‌های DC و هیبریدی برای تأمین توان آنها افزایش یافته است. این تحول، زمینه استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر نظیر منابع بادی، خورشیدی و همچنین انواع ذخیره‌سازها را در شبکه برق شناورها فراهم ساخته است [۲]. همچنین در طول چند دهه گذشته، تحولات عظیمی در ریزشبکه‌های شناورها به دلیل به‌کارگیری معماری پیچیده سیستم قدرت، واسط الکترونیک قدرت مبتنی بر منابع توان بالا و بارهای خاص صورت گرفته است. از این رو ریزشبکه‌های شناور مدرن تقریباً شبیه به ریزشبکه‌های جزیره‌ای زمینی شده‌اند؛ اما به دلیل وجود بارهای دینامیکی بزرگ، کنترل پیچیده و مدیریت توان، ساختار ریزشبکه‌های شناور در مقایسه با ریزشبکه‌های زمینی پیچیده‌تر شده‌اند [۱]. ریزشبکه‌های شناورها نقش مهمی را در مفهوم شناورهای تماماً الکتریکی ایفا می‌کنند. با افزایش روزافزون تقاضای بارها در حین عملکرد شناور، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم، اهمیت بسزایی را در عملیات‌های مختلف شناورها پیدا کرده‌اند. وقوع خطاها در ریزشبکه‌های الکتریکی شناورها، حتی خطاهای بسیار کوچک می‌توانند منجر به عواقب ناگواری مانند قطع ناگهانی در سیگنال‌های جریان، ولتاژ و فرکانس شوند. مبحث حفاظت در ریزشبکه‌های الکتریکی شناورها و به‌طور مشابه در ریزشبکه‌های الکتریکی در بخش‌های AC و DC در پژوهش‌های پیشین تا حدودی مورد مطالعه قرار گرفته که در ادامه به شرح مختصری از آنها پرداخته می‌شود.

در [۳] یک طرح حفاظتی تحت عنوان تجهیز الکترونیکی هوشمند محافظ دیستانس^۱ (PDPIED) مبتنی بر ارتباطات برای تشخیص و مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های ناحیه‌ای DC شناورها مطرح شده است. در این مرجع، یک دستگاه الکترونیکی هوشمند ارائه شده تا تشخیص سریع و مکان‌یابی خطا در سیستم‌های قدرت شناور را ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی، اثربخشی طرح پیشنهادی را در مکان‌یابی خطاهایی که در ریزشبکه ناحیه‌ای شناور رخ می‌دهند، اثبات می‌کند. در [۴] یک طرح حفاظتی بر اساس اندوکتانس اضافه‌شونده به باس^۲ (ABI) برای سیستم توزیع الکتریکی ناحیه‌ای شناور پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی الزامات قابلیت انتخاب، سرعت و قابلیت اطمینان در حفاظت ریزشبکه شناور^۳ را برآورده می‌کند. در [۵] نیز حفاظت اولیه و پشتیبان جریان خطای محدود برای ریزشبکه‌های هیبریدی شناورها مطرح شده است. در این مرجع، حفاظت اولیه تحت عنوان روش مدیریت خطای متمرکز

چکیده: در سیستم قدرت هیبریدی شناورها، امکان بروز انواع مختلف خطا بسیار زیاد است. طبق مطالعات صورت‌گرفته در زمینه تشخیص و مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های هیبریدی شناورها، فقدان تکنیک‌های جامع مدیریت خطا برای حفاظت ریزشبکه شناور از خطاهای اتصال کوتاه، مانع اصلی استفاده از ریزشبکه‌های هیبریدی شناورها برای مأموریت‌های دریایی حیاتی به‌شمار می‌آید. با توجه به قیود و محدودیت‌های میدانی در شناورها، طراحی یک سیستم حفاظت الکتریکی برای ریزشبکه‌های هیبریدی شناورها، نیاز به توجه و دقت به الزامات ویژه‌ای دارد. هدف این مقاله، ارائه یک طرح حفاظتی مناسب جهت تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های هیبریدی شناورهاست. در این راستا تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا در مدت زمان 0.34 ثانیه الی 0.54 ثانیه با استفاده از الگوریتم مبتنی بر پردازش سیگنال تبدیل موجک با مرتبه چهارم (db4) انجام می‌شود. مشاهده نتایج و تحلیل آنها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی، انواع خطاها حتی خطاهای بسیار گذرا (حدود ۱ میلی‌ثانیه) را چه در بخش AC و چه در بخش DC ریزشبکه شناور، تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی می‌نماید.

کلیدواژه: تشخیص و مکان‌یابی خطا، ریزشبکه هیبریدی شناور، تبدیل موجک.

۱- مقدمه

ریزشبکه‌های شناورها در طول قرن گذشته به‌طور قابل توجهی با معماری‌های شبکه پیچیده و بارهای مختلف و منابع توان بالا به‌صورت الکتریکی تکامل یافته‌اند. با این پیشرفت‌ها، سیستم‌های مدرن قدرت الکتریکی شناورها، کم‌وبیش شبیه به ریزشبکه‌های زمینی شده‌اند. ویژگی‌های مشترک بین دو نوع ریزشبکه، شامل عملیات جزیره‌ای، افزایش استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت و معماری شبکه هستند؛ بنابراین فناوری‌های توسعه‌یافته برای ریزشبکه‌های جزیره‌ای را می‌توان برای ریزشبکه‌های شناورها نیز گسترش داد. با وجود این به‌دلیل حضور بارهای دینامیکی بزرگ و سناریوهای عملیاتی مختلف، مدیریت توان، کنترل و حفاظت ریزشبکه‌های شناورها در مقایسه با ریزشبکه‌های زمینی پیچیده‌تر شده است [۱]. در شناورهای سنتی از برق AC تأمین‌شده توسط دیزل ژنراتور برای تأمین توان الکتریکی مورد نیاز استفاده شده است. به این مقاله در تاریخ ۲۲ بهمن ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۸ خرداد ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

محسن علیانی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: alyani.mut@mut.ac.ir).

آرش دهستانی کلاگر (نویسنده مسئول)، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: a_dehestani@mut.ac.ir).

محمدرضا علیزاده پهلوانی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: mr_alizadehp@mut.ac.ir).

1. Pilot Distance Protective Intelligent Electronic Device
2. Additional Bus Inductance
3. Shipboard Microgrid

کابل تا نقطه خطا و همچنین مقاومت کل کابل با استفاده از تکنیک حداقل مربع، مکان یابی خطا نیز انجام می شود. در بخش ۲ به بررسی شبکه‌های الکتریکی هیبریدی شناورها پرداخته می‌شود. در بخش ۳ اهمیت تشخیص و مکان‌یابی خطا در شبکه‌های الکتریکی هیبریدی شناورها تشریح شده و در ادامه، الگوریتم حفاظتی پیشنهادی معرفی می‌گردد. در بخش ۴ نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً در بخش ۵، نتایج و دستاوردهای حاصل از این مقاله به صورت خلاصه ارائه می‌گردد.

۲- شبکه‌های الکتریکی هیبریدی در شناورها

۲-۱ سیستم‌های تأمین انرژی شناور

ابتدا در تمام شناورها از سیستم‌های مبتنی بر جریان متناوب استفاده می‌شود؛ اما در حال حاضر شناورهایی وجود دارند که بر اساس سیستم هیبریدی دیزل ژنراتور الکتریکی کار می‌کنند. ژنراتورهای دیزلی موجود در شناور، برق متناوب تولید می‌کنند و یک باس جریان متناوب را برق‌دار می‌کنند. سپس برق از این باس به پیش‌رانه‌های الکتریکی و سایر بارهای شناور منتقل می‌شود. اخیراً به دلیل پیشرفت‌های بالقوه در عملکرد الکتریکی و مصرف سوخت، تمایل به استفاده از سیستم توزیع برق جریان مستقیم با سیستم‌های پیش‌رانه هیبریدی دیزل ژنراتور الکتریکی برای شناورها افزایش یافته است. لازم به ذکر است که سیستم‌های محرکه مبتنی بر برق هستند، اما تولید برق همچنان به دیزل ژنراتور نیاز دارد. البته تحقیقات در مورد ادغام وسایل ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری و چرخ طیار در شناورهای دریایی برای کمک به دیزل ژنراتورها در حال انجام هستند؛ با این حال، حتی با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از دیزل ژنراتور برای تولید برق ضروری می‌باشد. این امر به دلیل میزان تقاضای زیاد برق در شناورهای دریایی است.

به دلیل استفاده از پیش‌ران‌ش الکتریکی، سیستم انتقال برق برای انتقال انرژی تولیدشده توسط دیزل ژنراتور به موتور پیش‌رانه نیاز دارد. در حال حاضر، شناورهای دریایی، مشابه سیستم‌های توزیع زمینی در درجه اول با سیستم توزیع AC کار می‌کنند. در سیستم‌های ریزشکه متصل به خشکی مانند ساختمان‌ها نیز تمایل به تغییر به سیستم توزیع مبتنی بر برق DC وجود دارد. این امر در درجه اول ناشی از گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر است. همچنین برای ادغام سیستم‌های AC و DC به یک باس DC نیاز است. با این حال، هنوز استفاده از سیستم‌های توزیع DC تا حد مطلوبی گسترش نیافته است. این واقعیت تا حدودی به دلیل کمبود وسایل حفاظتی مناسب در بخش DC است. تحولات اخیر در حوزه سیستم‌های حفاظتی DC و ساخت کلیدهای قدرت مناسب توسط شرکت‌های ABB و GE سبب شده که این تجهیزات بیش از پیش، تجاری‌سازی شده و بیشتر در دسترس قرار گیرند. همچنین در بحث تولید انرژی، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر برای شناورهای دریایی مانند استفاده از پنل‌های فتوولتائیک و منابع تولید مبتنی بر انرژی باد مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه، این موارد نیز برای سهولت ادغام، نیاز به استفاده از یک باس DC دارند؛ چراکه سیستم‌های DC برخلاف سیستم‌های جریان متناوب، مشکلات هماهنگی و سنکرون‌سازی را ندارند. علاوه بر این، بهبود بالقوه در بهره‌وری، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش وزن و حجم تجهیزات الکتریکی با گذار به سیستم‌های DC حاصل می‌گردد. تحقیقات اخیر در مورد استفاده از سیستم‌های توزیع DC در شناورهای دریایی از فناوری شبکه‌های هوشمند DC مستقر در زمین

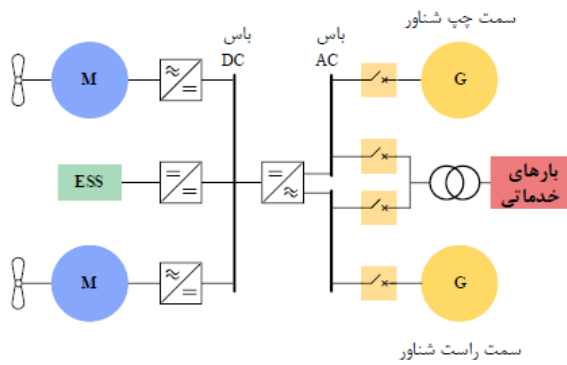
(مرکزی) به ارتباط بین حسگرهای توزیع‌شده و یک مرجع تصمیم‌گیری مرکزی برای دستیابی به سریع‌ترین حالت حفاظت اولیه بستگی دارد. حفاظت پشتیبان نیز توسط یک تابع پاسخ محلی حاصل از مدیریت خطای محلی صورت می‌پذیرد که در صورت بروز ایراد در روش حفاظتی اولیه اجرا می‌شود. در [۶] یک روش جدید مبتنی بر تخمین امیدانس فعال مطرح شده که مزایای مختلفی را برای سیستم‌های نیروی دریایی آینده ارائه نموده است. کاربرد این روش در سیستم‌های توزیع ناحیه‌ای DC تشریح شده و محدودیت آن، دشواری در به دست آوردن امیدانس دقیق سیستم در هنگام عملکرد عادی آن و مزیت‌هایش نیز شامل سرعت و دقت بالاست. در [۷] طرح حفاظتی شبکه‌های عصبی مصنوعی و هوشمند برای ریزشکه‌های شناورها مطرح شده که محدودیت‌های آن شامل پاسخ کند، نیاز به چندین عنصر حفاظتی جهت عملکرد مطلوب و عدم توانایی مکان‌یابی برخط بوده و مزایای آن نیز عبارت از مکان‌یابی دقیق و انعطاف‌پذیری مناسب می‌باشد. در [۸] روش حفاظتی مبتنی بر امیدانس تحت عنوان روش حفاظتی یکپارچه رله‌گذاری مبتنی بر امیدانس برای حفاظت از ریزشکه‌های هیبریدی مطرح شده است. محدودیت این طرح، افزایش هزینه کلی ریزشکه به دلیل نیاز به مدار LC اضافی بوده و از مزایای آن می‌توان به قابل استفاده بودن این طرح برای ریزشکه‌های هیبریدی، عدم نیاز به کانال ارتباطی، کاربردی بودن آن حتی در حضور نویز/خطا، دقت در مکان‌یابی خطا، عملکرد پایدار تحت شرایط مختلف و مدت زمان تشخیص خطای بهبودیافته اشاره نمود.

در [۹] تحت عنوان یک رویکرد جدید تشخیص خطا و مکان آن برای ریزشکه شناور ناحیه‌ای DC بر اساس تخمین امیدانس فرکانس بالا با پروتکل ارتباطی IEC ۶۱۸۵۰، روش حفاظتی بر اساس تخمین امیدانس فرکانس بالا برای تشخیص و مکان‌یابی خطا ارائه شده است. این مقاله یک طرح تطبیقی ابتکاری را برای تشخیص و مکان‌یابی خطاها در ریزشکه‌های شناور ناحیه‌ای DC معرفی می‌کند که مبتنی بر تخمین امیدانس فرکانس بالاست. طرح پیشنهادی در یک دستگاه الکترونیکی هوشمند^۱ (IED) اجرا می‌شود که در آن تبدیل فوریه سریع برای به دست آوردن مؤلفه‌های فرکانس بالای جریان و ولتاژ در هر گره اعمال می‌گردد. سپس این اجزا بین دو IED مبادله می‌شوند که با استفاده از سیستم ارتباطی مبتنی بر IEC ۶۱۸۵۰ GOOSE از یک خط محافظت می‌کنند. امیدانس فرکانس بالای تخمینی خطا، محاسبه و با تنظیمات تعیین شده برای تشخیص و تعیین محل خطا مقایسه می‌گردد. پس از تشخیص و مکان‌یابی خطا، سیگنال‌های ارتباطی بین دو IED که در هر انتهای خط قرار دارند، رد و بدل می‌شوند. این مبادله قبل از ارسال سیگنال‌های قطع به کلیدهای مدار مربوط برای جداسازی دقیق خط دارای خطا انجام می‌شود. این طرح می‌تواند خطا را تحت شرایط عدم قطعیت مختلف مانند امیدانس‌های خطا، پیکربندی‌های مختلف سیستم، تغییرات در بارها و منابع تولید سیستم، وجود چند خطا، شرایط احتمالی و وجود نویز در سیگنال‌های ارتباطی، شناسایی و مکان‌یابی کند. همچنین می‌تواند خطاها را به سرعت و با دقت در ۰/۱۲۵ میلی‌ثانیه شناسایی و مکان‌یابی کند.

مرجع [۱۰] تحت عنوان یک طرح جدید تشخیص و مکان‌یابی خطا برای ریزشکه DC دوقطبی، یک طرح جدید تشخیص خطا را بر اساس تفاوت در انرژی تیجر^۲ موجود در موج جریان DC در انتهای خطوط ارسال و دریافت پیشنهاد می‌کند. پس از تشخیص خطا با تخمین مقاومت

1. Intelligent Electronic Device

2. Teager



شکل ۳: نمونه‌ای از معماری ریزشبکه هیبریدی شناور [۱۳].

ژنراتورهای مورد استفاده برای تبدیل ولتاژهای تولیدشده AC به DC به مبدل‌هایی نیاز است. درایو سرعت متغیر برای موتور پیش‌رانه الکتریکی اکنون می‌تواند مستقیماً از باس ۱ کیلوولت DC تغذیه کند. همچنین برای بارهای خدماتی نظیر سیستم‌های روشنایی به مبدل‌های اینورتری برای تبدیل ولتاژ DC به AC نیاز می‌باشد. این تجهیزات مستقیماً جایگزین ترانسفورماتورهای پله‌ای کاهنده می‌شوند که در سیستم AC وجود داشتند. با استفاده از باس DC، اتصال عناصر ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری‌ها اکنون با سهولت بیشتری قابل اجراء است. با وجود این، مبدل‌های DC به DC برای کنترل جهت جریان برق بین عنصر ذخیره‌ساز انرژی و باس DC مورد نیاز هستند. یک نمونه معماری سیستم تغذیه جریان مستقیم شناور در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۲].

۲-۱-۳ سیستم هیبریدی ریزشبکه شناور

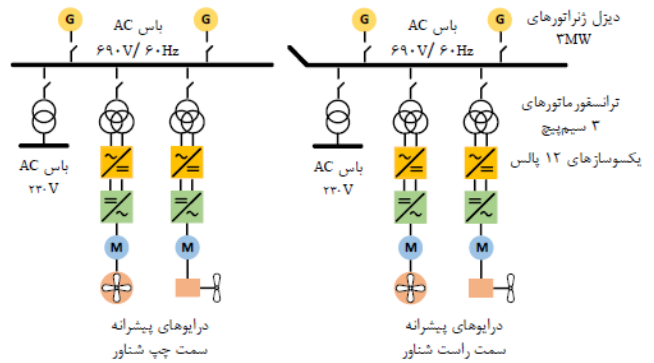
در شکل ۳ یک ریزشبکه الکتریکی هیبریدی شناور، شامل منابع تولید و بارهای خدماتی در سمت باس AC و سیستم ذخیره‌ساز باتری و بارهای پیش‌رانه در سمت باس DC آمده است. این نوع معماری الکتریکی شامل ویژگی‌های هر دو سیستم AC و DC در کنار هم می‌باشد.

۲-۲ انواع ساختارهای سیستم قدرت شناور

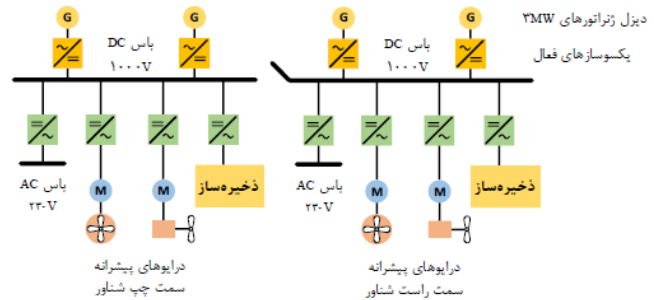
سیستم توزیع شناور دارای چندین توپولوژی مختلف است که از جمله آنها می‌توان به سیستم‌های توزیع شعاعی، سیستم‌های توزیع حلقوی، سیستم‌های توزیع ناحیه‌ای AC و سیستم‌های توزیع ناحیه‌ای DC اشاره کرد. در ادامه به بررسی اجمالی هر یک از آنها می‌پردازیم.

۲-۲-۱ سیستم توزیع شعاعی

این سیستم، ساختاری معمولی است که IEEE Std. ۱۷۰۹-۲۰۱۰، آن را توصیه می‌کند و برای ریزشبکه شناورها اعمال شده است. به‌طور کلی در این معماری دو باس DC برق را بین مصرف کنندگان توزیع می‌کنند. منابع توان از جمله ژنراتورها و ESS^۱ها به‌طور متقارن توزیع شده و هر باس DC را تغذیه می‌کنند. پروانه‌های سمت چپ و سمت راست شناور از طریق دو باس DC به‌طور جداگانه تغذیه می‌شوند؛ در حالی که هر دو باس DC بارهای خدماتی را برای قابلیت اطمینان بیشتر تغذیه می‌کنند. طرح توزیع شعاعی مزایایی مانند سادگی و مقرون‌به‌صرفه‌بودن را دارد و از آنجا که در شناورهای مکانیکی سنتی و شناورهای AC استفاده می‌شود، طراحی مجدد سیستم از سیستم‌های سنتی به سیستم‌های جایگزین DC مدرن، آسان و کاربردی خواهد بود. سیستم برق یک شناور با توزیع شعاعی در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۱: نمونه‌ای از معماری سیستم تغذیه جریان متناوب شناور [۱۲].



شکل ۲: نمونه‌ای از معماری سیستم تغذیه جریان مستقیم شناور [۱۲].

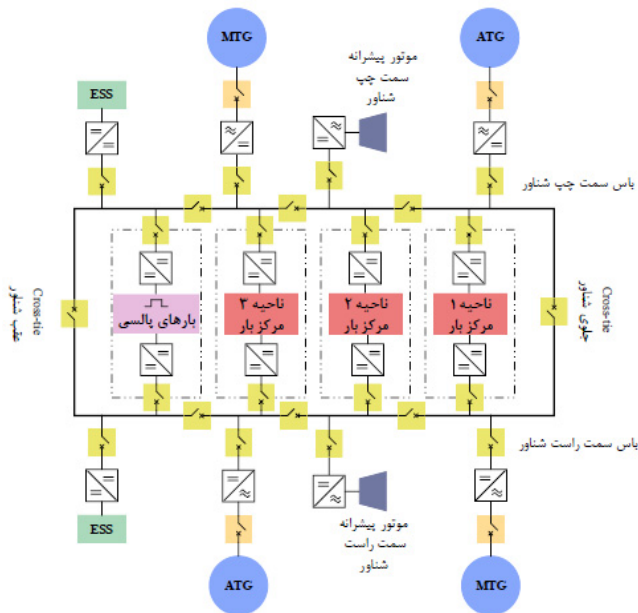
به‌عنوان ابزاری برای مقایسه و نمایش برتری این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های رایج AC استفاده کرده‌اند. با وجود این در زمینه‌های عملیاتی برای بحث یکپارچه‌سازی سیستم‌های DC تحقیقات کمی انجام شده است [۱۱].

۲-۱-۲ سیستم جریان متناوب

معماری سیستم جریان متناوب که در حال حاضر بر روی شناورهای دریایی (به‌عنوان مثال شناور پشتیبانی غواصی) نصب شده، در شکل ۱ آمده است. برای این شناور، کل ظرفیت تولید توان الکتریکی ۱۲ مگاوات آمپر است که در آن، چهار دیزل ژنراتور الکتریکی، برق پیش‌رانه‌های شناور و بارهای خدماتی شناور را تأمین می‌کنند. دو باس جریان متناوب ۶۹۰ ولتی نیز وجود دارند که می‌توان با بستن کلید بین دو باس، امکان انتقال توان را بین دو منبع تغذیه فراهم نمود. پیش‌رانه‌های الکتریکی این شناور از باس ۶۹۰ ولت AC توان مورد نیاز خود را دریافت می‌کنند. منبع تغذیه سه‌فاز از طریق یک ترانسفورماتور سه‌سیم‌پیچه با اتصال ستاره-ستاره/ مثلث و پس از آن توسط یکسوساز پل دیودی ۱۲ پالسه به درایو موتور پیش‌رانه متصل می‌شود. موتور محرکه الکتریکی سپس توسط یک درایو سرعت متغیر کنترل می‌شود که امکان کار با سرعت و گشتاور متغیر را فراهم می‌سازد. بارهای خدماتی نیز از باس ۶۹۰ ولت AC تغذیه می‌شوند که دارای ترانسفورماتور پله‌ای کاهنده بوده و از طریق آن، سطح ولتاژ AC از ۶۹۰ ولت به ولتاژ تک‌فاز ۲۳۰ ولت یا ۴۴۰ ولت سه‌فاز کاهش می‌یابد. این بارها می‌توانند شامل روشنایی، تجهیزات ناوبری، انواع ماشین‌آلات کمکی و پمپ‌های خنک‌کننده باشند. یک نمونه معماری سیستم تغذیه جریان متناوب شناور در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲].

۲-۱-۳ سیستم جریان مستقیم

سیستم تأمین توان DC پیشنهادی که می‌تواند مستقیماً جایگزین سیستم قدرت AC فعلی شود در شکل ۲ آمده است. در این ساختار، تفاوت اصلی بین سیستم‌های AC و DC جابه‌جایی از یک باس ۶۹۰ ولت AC به یک باس ۱ کیلوولت DC است. با توجه به باقی‌ماندن



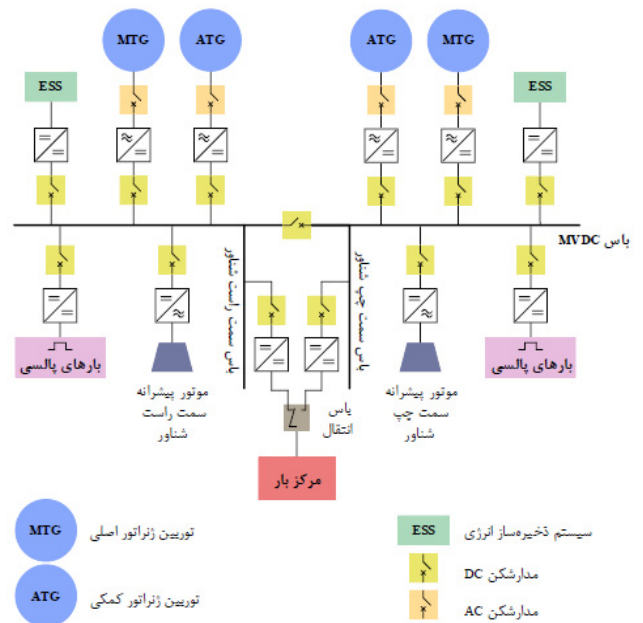
شکل ۳: سیستم قدرت یکپارچه شناور مبتنی بر توزیع ناحیه‌ای.

۲-۲-۳ سیستم توزیع ناحیه‌ای

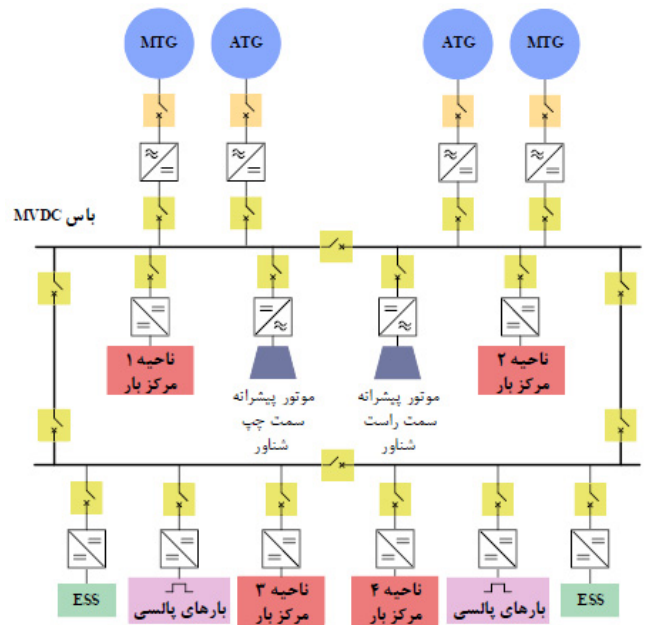
سیستم توزیع ناحیه‌ای، یکی دیگر از پیکربندی‌های بالقوه مطابق با IEEE Std. ۱۷۰۹-۲۰۱۰ می‌باشد که به استاندارد دریایی ایالات متحده نیز تبدیل شده است. در شبکه ناحیه‌ای، بارهای شناور به n ناحیه تقسیم می‌شوند که هر کدام توسط دو اتصال از باس‌ها تغذیه گردیده و به‌طور مستقل مدیریت می‌شوند. باس‌های توزیع ناحیه‌ای معمولاً در کناره‌های سمت چپ و سمت راست بدنه شناور قرار داده می‌شوند و این دو باس در قسمت عقب و جلوی شناور به هم متصل می‌گردند. این طراحی، قابلیت افزودنی تغذیه برای بارهای دو باس طولی DC را امکان‌پذیر می‌کند. هر مرکز بار با هر دو باس سمت چپ و سمت راست شناور ارتباط دارد و وقتی که خطایی در یک طرف رخ دهد، بارهای حیاتی در ناحیه‌ها به‌طور مستقل منابع انرژی دریافتی خود را به باس سالم مقابل منتقل می‌کنند. در شناورهای نیروی دریایی، بارهای خاص با قدرت بالا مانند رادارها به‌طور مستقل به‌عنوان تنها تجهیزات در یک ناحیه قرار داده می‌شوند. در شبکه‌های ناحیه‌ای، مزایای زیادی وجود دارد. توانایی بقای بار را می‌توان برای بارهای دریایی با تغذیه برق از هر دو باس DC سمت چپ و راست شناور افزایش داد. با تشخیص از دست دادن منبع برق اصلی، بارهای حیاتی می‌توانند به‌طور خودکار یا دستی به منبع تغذیه جایگزین تغییر اتصال داده شوند. معماری باس طولی، امکان جداسازی خطاها با قطع حداقل مناطق آسیب‌دیده را با استفاده از سیستم‌های حفاظت هماهنگ از طریق یک شبکه ارتباطی فراهم می‌کند. علاوه بر این، تقسیم بارها از جلو به عقب در طول شناور، مترژ کابل مورد نیاز را کاهش داده و در نتیجه هزینه کلی را کم می‌کند. سیستم توزیع الکتریکی ناحیه‌ای یک شناور در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۵].

۳- تشخیص و مکان‌یابی خطا در شبکه‌های الکتریکی هیبریدی شناورها

بیان شد که ریزش شبکه شناورها به دلیل افزایش مقدار توان مصرفی انواع بارها در آنها، نقش مهمی در تأمین این بارها در شناورها دارند. پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق شناورها، دو جزء اساسی در عملکرد ریزش شبکه آنهاست. حادث شدن خطا بر روی باس یا خط انتقال ریزش شبکه شناورها،



شکل ۴: سیستم قدرت یکپارچه شناور مبتنی بر توزیع شعاعی.

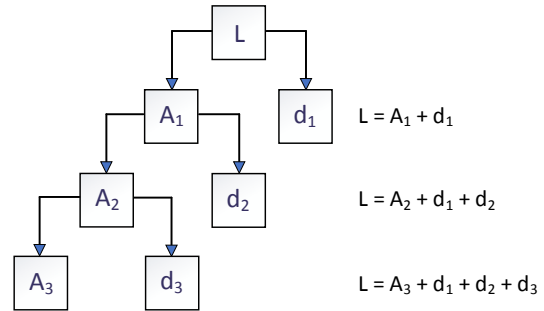


شکل ۵: سیستم قدرت یکپارچه شناور مبتنی بر توزیع حلقه‌ای.

۲-۲-۲ سیستم توزیع حلقوی

در سیستم توزیع حلقوی، سوئیچ‌های bus-tie که باس‌های DC را به هم متصل می‌کنند در حالت عملکرد عادی، بسته می‌مانند و باس DC را به یک حلقه تبدیل می‌کنند. پیکربندی حلقوی مشابه معماری ناحیه‌ای، قابلیت بقا و پیکربندی مجدد بالاتری نسبت به معماری شعاعی دارد. وقتی خطایی در باس DC رخ دهد، ساختار توزیع حلقوی این امکان را فراهم می‌کند که خطا با قطع کردن نزدیک‌ترین کلیدهای مدارشکن جدا شده و بقیه المان‌ها به‌طور عادی به کار خود ادامه دهند. با این حال، متفاوت از سیستم توزیع ناحیه‌ای، هر مرکز بار در شبکه توزیع حلقوی تنها یک پیوند به باس دارد که مستعد خطا در بارهای حیاتی است. معماری حلقوی بیشتر شبیه یک مصالحه بین معماری‌های شعاعی و ناحیه‌ای است و به‌ندرت در ریزش شبکه‌های شناورها استفاده می‌شود. یک نمونه از سیستم توزیع حلقوی مربوط به شناور در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۵].

تبدیل موجک با استفاده از توابع پایه‌ای که دارای انرژی محدود هستند، یک سری زمانی را به فضای فرکانسی نگاشت داده و آن را در زمان و مقیاس‌های مختلف نمایش می‌دهد. بنابراین از تبدیل موجک برای تجزیه و تحلیل ماهیت نامتقارن داده‌های متغیر با زمان استفاده می‌شود. تبدیل موجک، طی سطوح متوالی، سیگنال را به چندین مؤلفه فرکانسی تجزیه می‌کند که در شکل ۷ نشان داده شده است. در سطح اول، سیگنال به دو مؤلفه فرکانس پایین و فرکانس بالا تجزیه می‌گردد. مؤلفه فرکانس پایین، ضریب تقریب نامیده می‌شود که روند کلی سیگنال را نمایش می‌دهد. مؤلفه فرکانس بالا تحت عنوان ضریب جزئیات شناخته شده و اختلاف بین دو تقریب متوالی را نشان می‌دهد. از آنجا که سیگنال الکتریکی، دامنه و مؤلفه‌های فرکانسی گوناگونی دارد، مؤلفه فرکانس پایین خود مجدداً به دو مؤلفه فرکانس پایین و فرکانس بالا تجزیه می‌شود؛ در حالی که نیازی به تجزیه مؤلفه فرکانس بالا نیست. زیرا دامنه بسیار کوچک‌تری نسبت به مؤلفه فرکانس پایین دارد. تعداد سطوح مختلف تجزیه، بسته به نوع مسئله و تا آنجا که مورد نیاز باشد قابل ادامه است و در سطوح بسیار بالاتر، تفاوت محسوسی در تجزیه دیده نمی‌شود؛ زیرا تقریباً دیگر فرکانسی وجود ندارد که قابل فیلتر شدن باشد. مؤلفه‌های فرکانسی حاصل از تجزیه با موجک را می‌توان به صورت شکل ۷ نمایش داد [۱۶].



شکل ۷: نمایش درختی تجزیه موجک گسسته.

حتی خطاهای کوچک می‌تواند موجب عواقب فاجعه‌باری مثل قطعی ناگهانی در جریان، ولتاژ یا سیگنال‌های فرکانسی شود.

تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های شناورها، جهت بازگردانی شبکه به حالت عادی، بسیار پراهمیت و حساس است. بدین منظور برای تأمین قابلیت اطمینان مطلوب در ریزشبکه شناور در این مقاله از الگوریتم مبتنی بر پردازش سیگنال تبدیل موجک با سطح چهارم تجزیه و تحلیل موجک^(۴) (db۴) استفاده می‌شود تا مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال خطا را توسط سطوح مختلف، پردازش، تجزیه و استخراج نماید. سپس این موج تجزیه شده به منظور تشخیص، مکان‌یابی و طبقه‌بندی فازهای خطا در با مقادیر از پیش تعیین شده مقایسه می‌گردد. مکان‌یابی خطا با استفاده از داده‌های محلی خطا توسط نمایشگرهای هوشمند قرار گرفته بر روی باس‌های ریزشبکه صورت می‌پذیرد. در طرح پیشنهادی، فقط بر اساس داده‌های جریان ثبت شده توسط رله، به راحتی با گرفتن تبدیل موجک از آن، استخراج یک سری ویژگی‌های خاص صورت پذیرفته و مکان خطا تخمین زده می‌شود.

۳-۱ تبدیل موجک

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل سیگنال مبتنی بر تبدیل فوریه با توجه به نوع توابع پایه‌ای مورد استفاده در آن که در حوزه فرکانس واقع شده‌اند، تصمیم‌گیری در مورد موقعیت زمانی و مکانی رویداد مدنظر امکان‌پذیر نیست. تجزیه و تحلیل فوریه برای فرکانس‌هایی که با زمان متغیر نیستند، نظیر سری‌های مانا مناسب است. از طرفی بارهای ریزشبکه شناور شامل چندین ویژگی غیرمانا نظیر روند تغییرات در میزان بار و شیب تغییرات آن و ویژگی‌های فصلی هستند که غالباً این ویژگی‌ها مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین بخش از یک سیگنال الکتریکی هستند که باید مدنظر قرار گیرند. استفاده از تبدیل موجک از روش‌های جایگزین در چنین مواردی است [۱۶]. یکی از دستاوردهای اصلی که با تبدیل موجک انجام می‌گیرد، قابلیت تحلیل محلی سیگنال است که امکان تحلیل یک ناحیه کوچک از یک سیگنال وسیع را میسر می‌سازد. تبدیل موجک شامل شکستن یک سیگنال به سیگنال‌های انتقال داده شده و تغییر مقیاس داده شده سیگنال موجک اصلی (موجک مادر) است؛ بنابراین تحلیل سیگنال‌های دارای تغییرات به کمک موجک‌ها نیز بهتر از تحلیل فوریه با موج‌های سینوسی است.

تبدیل موجک، مشخصه‌ای به نام موجک مادر با انواع مختلف دارد. این تبدیل، ابتدا از بین کل امواج موجود، موجی را جدا می‌نماید که با موجک مادر شباهت دارد و سپس موج جدا شده را بر اساس انواع مؤلفه‌های فرکانس بالا تا فرکانس پایین تشکیل دهنده آن مرتب می‌کند؛ به طوری که با جمع آنها همان موج اولیه حاصل می‌گردد.

۳-۲ تبدیل موجک و تجزیه آن

همان طور که پیداست، تبدیل فوریه^(۲) (FT)، یک تکنیک پرکاربرد در پردازش سیگنال می‌باشد که نشانگر یک سیگنال معین توسط اجزای نوسانی، سینوسی‌ها و توابع کسینوسی است. تبدیل فوریه، امکان تجزیه و تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس را فراهم می‌آورد. با این حال، هنگامی که خواص سیگنال تحت مطالعه با گذشت زمان تغییر می‌کند (مثلاً یک سیگنال غیرثابت)، تبدیل موجک تجزیه مناسب‌تری را ارائه می‌دهد؛ زیرا اطلاعات زمانی نیز در نظر گرفته می‌شوند. برای تجزیه باید یک تابع موجک اصلی یا موجک مادر انتخاب شود و مجموعه‌ای از موجک‌های مورد استفاده برای تبدیل داده‌های تحت مطالعه از این موجک مادر نشأت گرفته از جابه‌جایی در امتداد محور زمان و مقیاس‌بندی آن در نظر گرفته شوند. نتیجه این تبدیل، مجموعه‌ای از ضرایب موجک است که نشان می‌دهد چگونه سیگنال و یک عملکرد پایه شباهت دارند.

تبدیل موجک پیوسته، نمایشی را بر اساس ضرب یک سیگنال توسط مجموعه‌ای از توابع پایه فراهم می‌کند. نسخه‌های تبدیل مقیاس‌یافته از عملکرد موجک انتخابی $\phi(t)$ عبارتند از

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

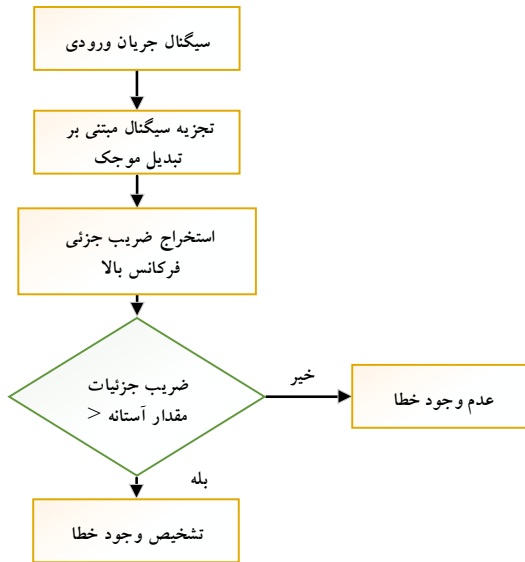
که در آن $a \neq 0 \in \mathbb{R}^+$ است که با فرکانس، رابطه معکوس دارد. همچنین $b \in \mathbb{R}$ انتقال در محور زمان و متناسب با $1/\sqrt{a}$ است که نرمال‌سازی انرژی را تضمین می‌کند (در هر مقیاس، موجک همان انرژی را دارد). سپس برای یک سیگنال داده شده x داریم

$$CWT(a,b) = \int x(t) \phi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

که در آن * معرف عملگر کانولوشن بوده و CWT همبستگی بین سیگنال داده شده و موجک را که از متغیرهای مختلف در فاکتور مقیاس

2. Fourier Transform
3. Continuous Wavelet Transform

1. Daubechies

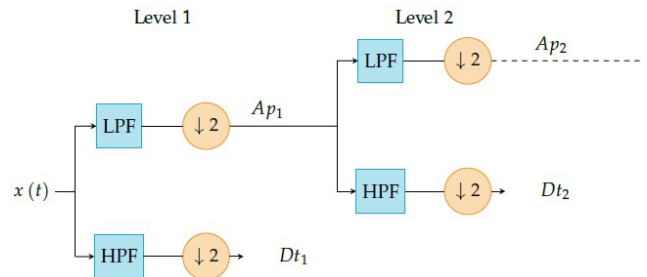


شکل ۹: فلوچارت تشخیص خطا مبتنی بر تبدیل موجک در ریزشبکه شناور.

سیگنال x است. A_{p1} اطلاعات فرکانس پایین (تقریب) سیگنال را نشان می‌دهد؛ در حالی که D_{i1} حاوی جزئیات استخراج شده (اطلاعات مربوط به فرکانس بالا) می‌باشد. تقریب‌های به‌دست‌آمده سپس با همان رویکرد تجزیه می‌شوند و منجر به به‌دست‌آمدن تقریب A_{p2} و جزئیات D_{i2} برای سطح دوم تجزیه می‌شوند. فرایند فوق برای تعداد سطوح تجزیه تعریف شده j تکرار می‌شود و در هر سطح j مطابق با توضیحات تجزیه می‌گردد که این تجزیه در شکل ۸ نشان داده شده است. در هر سطح j ، سیگنال اصلی را می‌توان با توجه به تقریبات فعلی A_{pj} و توالی جزئیات D_{i1}, \dots, D_{ij} بازنویسی کرد.

۳-۳ تشخیص و مکان‌یابی خطا توسط تبدیل موجک

فلوچارت روش تشخیص خطا مبتنی بر تبدیل موجک در شکل ۹ آمده است. روند طرح بدین صورت است که پس از نمونه‌برداری از سیگنال‌ها، جریان‌های سه‌فاز و جریان زمین به‌دست می‌آیند. برای استخراج ضرایب جزئی فرکانس بالا از فیلتر تجزیه DWT استفاده می‌شود. هنگامی که مقدار اولین تفاوت حداکثر ضریب جزئی جریان یک فاز به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از مقدار آستانه از پیش تعیین شده باشد، فاز مربوط تحت عنوان فاز خطا دار شناسایی می‌شود. فرایند به‌دست آوردن ضرایب پیش‌فرض در هر یک از باس‌ها بدین صورت است که طبق ستون نوع خطا، شرایط مدنظر یک بار از قبل در شبکه پیاده‌سازی شده و بر اساس الگوریتم مبتنی بر تبدیل موجک، بیشینه ضرایب مربوط استخراج گردیده و سپس به‌عنوان مقادیر از پیش تنظیم شده برای جاگذاری در الگوریتم استفاده شده‌اند. سپس در صورت وجود خطا، حداکثر ضرایب جزئی در هر فاز به‌طور خلاصه نوع خطاها را بر اساس ضریب موجک به‌دست‌آمده با استفاده از MRA دسته‌بندی می‌کنند. مفهوم این رویکرد آن است که وقتی خطا در هر فازی رخ دهد، مقدار ضریب در آن فاز در مقایسه با سایر فازها دارای اندازه بیشتری خواهد بود. این ضریب در فازهای سالم دیگر دارای اندازه صفر یا اندازه بسیار کوچکی است که این ضریب کوچک، نشان از عدم وجود خطا در فازهای مربوطه در ریزشبکه شناور است. طبق توضیحات فوق، طبقه‌بندی خطا صورت می‌پذیرد. در شکل ۱۰ فلوچارت مربوط به طبقه‌بندی خطا بر اساس تبدیل موجک آمده است.



شکل ۸: نمودار درختی شماتیک DWT برای دو سطح تجزیه.

a (SF)^۱ و فاکتور انتقال (TF)^۲ b تعریف می‌شود، محاسبه می‌کند. در نتیجه، این فرایند اطلاعات اضافه‌ای را ارائه می‌دهد (مقیاس‌ها و انتقال‌ها مقادیر پیوسته هستند) که برای بازسازی سیگنال اصلی مورد نیاز نیست. از آنجا که CWT به‌دلیل مقیاس‌های مداوم و انتقال‌های نسخه کارآمد و محاسباتی از آن، اطلاعات اضافی را ارائه می‌دهد، تبدیل موجک گسسته DWT معرفی شده که در آن فاکتور مقیاس a و فاکتور انتقال b عبارت از $a = a^j$ و $b = na^j \tau$ هستند که $a > 1$ ، $j, n \in \mathbb{Z}$ یک مرحله ثابت و τ یک فاکتور انتقال است که به a بستگی دارد. در نتیجه، این تبدیل از موجک‌های گسسته استفاده می‌کند

$$\phi_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \phi\left(\frac{t - na^j \tau}{a^j}\right) = a^{-\frac{j}{2}} \phi(a^{-j} t - n\tau) \quad (3)$$

برای تبدیل سیگنال، $n \in \mathbb{Z}$ عرض موجک را نشان می‌دهد و موقعیت زمانی آن توسط عامل انتقال j بیان می‌گردد؛ یعنی مقیاس‌ها و انتقال‌ها مقادیر گسسته‌ای هستند. همچنین ضرایب موجک حاصل عبارتند از

$$c_{j,n} = \int x(t) \phi_{j,n}^*(t) dt \quad (4)$$

که * معرف عملگر کانولوشن است که از آن برای توصیف سیگنال x استفاده می‌شود

$$x(t) = \sum_j \sum_n c_{j,n} \phi_{j,n}(t) \quad (5)$$

DWT یا تبدیل موجک گسسته می‌تواند در قالب مجموعه‌ای از فیلترها با استفاده از استراتژی تجزیه و تحلیل چندبندجریه‌ای^۳ پیاده‌سازی شود. سپس آنالیز مدنظر توسط فیلترهای Quadrature mirror که یک جفت فیلتر پایین و بالاگذر هستند، اعمال می‌شود. این عملیات به‌صورت هرمی اجرا می‌شود و مقیاس‌ها را با وضوح زمانی و فرکانسی مختلف ارائه می‌کند. در مرحله اول، سیگنال x با استفاده از دنباله زیر جدا می‌شود

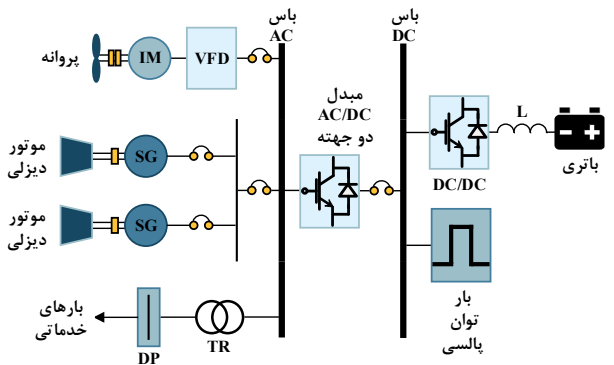
$$A_{p1}(t) = \sum_n l_{t-n} x(t) \quad (6)$$

نتایج حاصل شده از تجزیه سیگنال x با فیلتر پایین‌گذر و ضرایب $l_1, \dots, l_{pf}, LPF = [l_1, \dots, l_{pf}]$ از طریق p_f به‌دست می‌آید. مرحله بعد به‌دست آوردن دنباله زیر است

$$D_{i1}(t) = \sum_n h_{t-n} x(t) \quad (7)$$

سیگنال x توسط فیلتر بالاگذر $HPF = [h_1, \dots, h_{pf}]$ تجزیه می‌شود. A_{p1} و D_{i1} توسط عناصر T_p تشکیل شده‌اند که T تعداد نمونه‌ها در

1. Scaling Factor
2. Translating Factor
3. Discrete Wavelet Transform
4. Multi-Resolution



شکل ۱۱: ساختار ریزشبه‌ساز شناور الکتریکی تحت مطالعه.

باتری‌ها را بر عهده دارند. در بخش AC نیز بارهای خدماتی و موتورهای محرکه شناور قرار دارند که با استفاده از یک ترانسفورماتور ۵۰ کیلوولت به ۶/۶ کیلوولت تغذیه می‌گردند. سیستم ذخیره‌ساز ریزشبه‌ساز که در این پژوهش به صورت باتری مدل‌سازی شده است، به عنوان منبع ثانویه سیستم در نظر گرفته شده که هدف آن، کمک به پایداری و قابلیت اطمینان ریزشبه‌ساز است. سیستم ذخیره‌ساز مذکور با یک مبدل دوطرفه DC/DC به ریزشبه‌ساز متصل شده است. سایر مشخصات مربوط به ژنراتورها، ترانسفورماتورها، بارهای خدماتی و پالسی، مبدل‌ها، ذخیره‌سازها و پارامترهای خط انتقال در جدول ۱ آورده شده است.

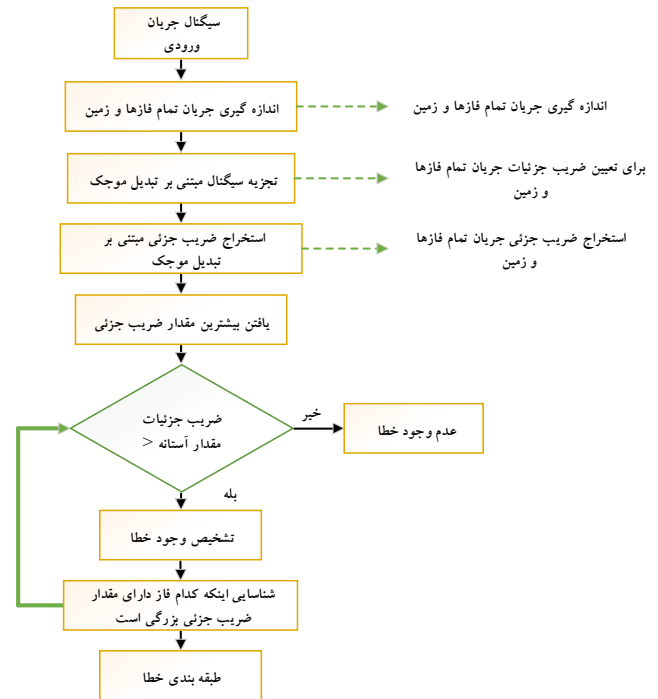
شکل ۱۲ دیاگرام شبیه‌سازی شده ریزشبه‌ساز شناور تحت مطالعه را در سیمولینک نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد. به منظور مدل‌سازی خط انتقال در ریزشبه‌ساز شناور از مدل خط π که به صورت فیلتر سری RL و خازن موازی در ابتدا و انتهای خط می‌باشد، استفاده شده است.

۴-۲ انواع سناریوهای وقوع خطا در شناور تحت مطالعه

همان طور که پیش‌تر بیان شد به منظور بررسی و مقایسه حالت‌های مختلف وقوع خطا در ریزشبه‌ساز شناور تحت مطالعه، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده که در ادامه، هر سناریو همراه با نتایج مربوط و شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی آن به تفصیل تشریح و بررسی شده است.

۴-۲-۱ سناریوی اول: بررسی حفاظت ریزشبه‌ساز شناور در بخش AC با اعمال انواع خطاهای سه‌فاز، دوفاز و تک‌فاز

در سناریوی اول به منظور تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا در سیستم ریزشبه‌ساز شناور و همچنین بررسی پایداری و قابلیت اطمینان آن، انواع خطاهای AC از قبیل خطای سه‌فاز به زمین (PG^۳)، دوفاز به زمین (PG^۲)، تک‌فاز به زمین (PG) و دوفاز (PP) در باس‌های مختلف به ریزشبه‌ساز اعمال گردیده و سیگنال ولتاژ و جریان سه‌فاز باس‌ها جمع‌آوری شده است. سپس این سیگنال‌ها با استفاده از موجک سطح چهارم ۴db، تجزیه و تحلیل شده تا بیشینه ضرایب تجزیه و زمان وقوع خطا مشخص گردند. سپس با استفاده از مقادیر از پیش تنظیم‌شده و مقایسه آن با ضرایب تجزیه تبدیل موجک، فاز خطا و باس خطا مشخص می‌شوند و توسط نمایشگرهای هوشمند قابل مشاهده خواهند بود. زمان شبیه‌سازی ریزشبه‌ساز ۰/۳ ثانیه بوده و کلیه خطاها در لحظه ۰/۱۵ الی ۰/۲۰ ثانیه بر روی ریزشبه‌ساز حادث می‌شود. بارهای پالسی جریان زیاد شناور نیز در لحظه ۰/۱ ثانیه به ریزشبه‌ساز اضافه شده تا صحت عملکرد طرح حفاظتی ریزشبه‌ساز در حضور بارهای پالسی اعتبارسنجی گردد. شکل موج‌های ولتاژ، جریان و توان سیستم در ادامه آورده شده و جدول ۲ نیز به منظور مقایسه ضرایب تبدیل موجک در سناریوهای مختلف ارائه گردیده است.



شکل ۱۰: فلوچارت شناسایی، مکان‌یابی و طبقه‌بندی خطا بر اساس تبدیل موجک در ریزشبه‌ساز شناور.

۴- نتایج شبیه‌سازی

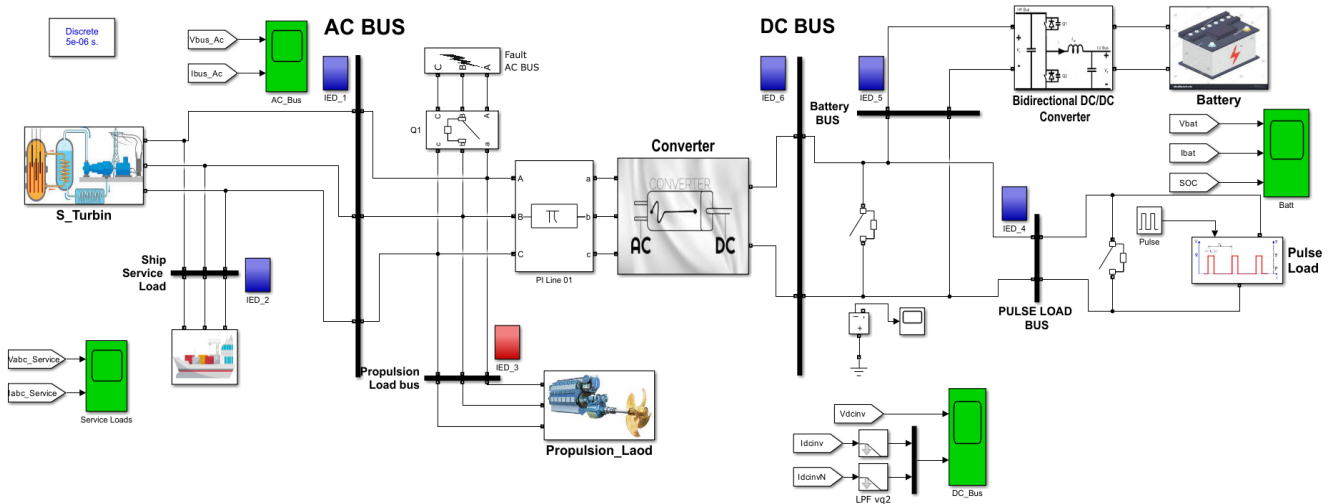
در این بخش با در نظر گرفتن انواع خطاهای رایج در ریزشبه‌ساز شناور، هم در بخش AC و هم در بخش DC به بررسی سناریوهای متعددی پرداخته می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردند. برای انجام مطالعات عددی و شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی ریزشبه‌ساز هیبریدی شناور متشکل از ژنراتور متصل به توربین بخار، بارهای خدماتی شناور، موتور محرکه پیش‌ران، بارهای پالسی و بانک باتری، از دو سناریوی مختلف بهره گرفته شده است. در سناریوی اول، انواع خطاهای بخش AC ریزشبه‌ساز شامل خطاهای سه‌فاز به زمین (۳PG)، دوفاز به زمین (۲PG)، تک‌فاز به زمین (PG) و دوفاز (PP) بررسی شده است. در سناریوی دوم نیز خطاهای بخش DC ریزشبه‌ساز شامل خطای قطب به زمین^۱ و خطای قطب به قطب^۲ بررسی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل نتایج می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی، به خوبی انواع خطاها را چه در بخش AC و چه در بخش DC ریزشبه‌ساز شناور، تشخیص داده و طبقه‌بندی و مکان‌یابی می‌نماید.

۴-۱ معرفی ریزشبه‌ساز شناور تحت مطالعه (SMG)

در این مقاله از ساختار ارائه شده در شکل ۱۱ برای مدل‌سازی سیستم قدرت شناور الکتریکی استفاده گردیده است. این ریزشبه‌ساز شامل عناصر مختلفی می‌باشد که در ادامه به تفکیک معرفی می‌شوند.

در این ساختار، دو ژنراتور کوپل‌شده با توربین بخار با سطح ولتاژ ۵۰ کیلوولت به عنوان منابع تغذیه اصلی و اولیه ریزشبه‌ساز در نظر گرفته شده‌اند که ولتاژ خروجی آنان توسط یک مبدل دوطرفه با فیلتر RL به ولتاژ DC تبدیل شده و تغذیه بارهای پالسی شناور و شارژ

1. Pole to Ground
2. Pole to Pole



شکل ۱۲: دیاگرام شبیه‌سازی شده ریزشبه‌ساز در سیمولینک متلب.

جدول ۱: مشخصات و پارامترهای ریزشبه‌ساز مورد مطالعه.

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
|---------------------|-------|-------------------------|-------|
| ولتاژ ژنراتور (KV) | ۵۰ | مقاومت خط (Ω) | ۶ |
| فرکانس منبع (Hz) | ۵۰ | اندوکتانس خط (mH) | ۵۳ |
| توان اکتیو (MW) | ۱ | خازن لینک DC (mF) | ۵ |
| توان بار خدماتی | ۵۰۰ | ظرفیت باتری (Ah) | ۵۰۰ |
| توان راکتیو (Kvar) | ۱۰۰۰ | مقاومت خطا (Ω) | ۰٫۰۱ |
| جریان بار پالسی (A) | ۰٫۳ | زمان کل شبیه‌سازی (S) | ۰٫۳ |
| توان اکتیو (MW) | ۵ | مدت زمان خطا (S) | ۰٫۱ |
| توان موتورهای محرکه | ۲ | طول خط انتقال (m) | ۲۷۰ |
| توان راکتیو (Kvar) | | | |

جدول ۲: مقادیر بیشینه ضریب جزئی تبدیل موجک فازهای ریزشبه‌ساز و جریان زمین در خطاهای مختلف در AC BUS ریزشبه‌ساز در سناریوی اول.

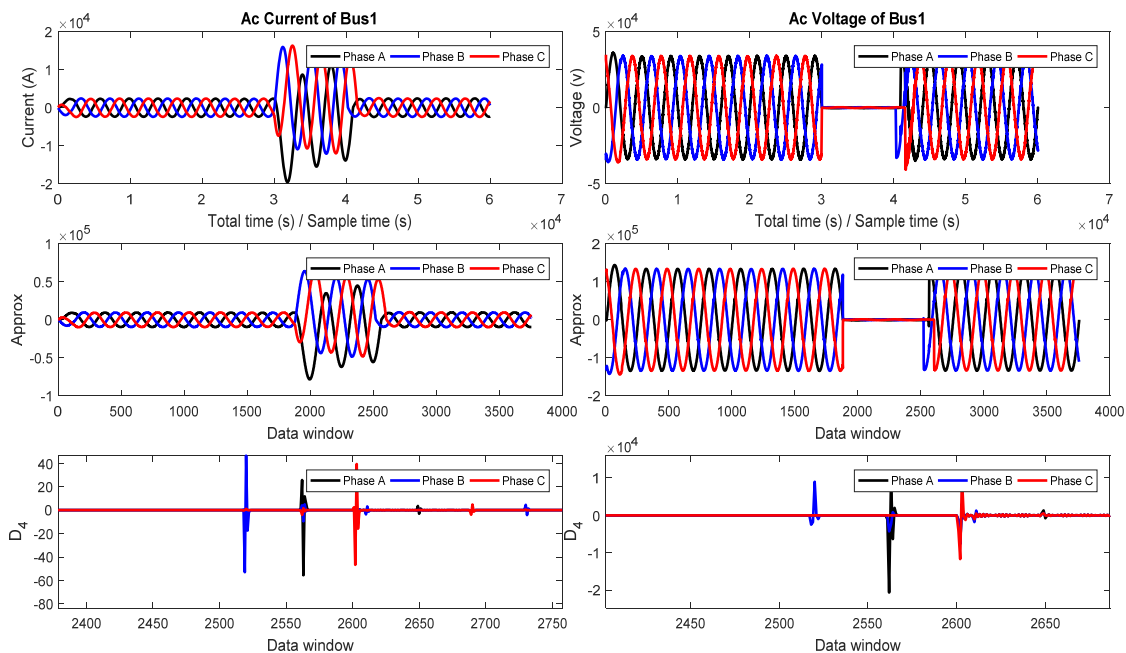
| نوع خطا | بیشینه ضریب فاز A | بیشینه ضریب فاز B | بیشینه ضریب فاز C | بیشینه ضریب جریان زمین |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| حالت عادی ریزشبه‌ساز | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| خطای سه‌فاز به زمین (ABCG) | ۴۵٫۷ | ۴۹٫۵ | ۶۳ | ۲۲ |
| خطای سه‌فاز (ABC) | ۴۱ | ۶۰٫۸ | ۶۱٫۹ | ۰ |
| خطای دوفاز به زمین (BCG) | ۰ | ۶۰٫۴ | ۶۲٫۳ | ۲۱٫۵ |
| خطای دوفاز (BC) | ۰ | ۶۱٫۳۸ | ۶۱٫۳۶ | ۰ |
| خطای تک‌فاز به زمین (AG) | ۴۲٫۸۷ | ۰ | ۰ | ۱۲٫۱۰ |

خطا در AC Bus

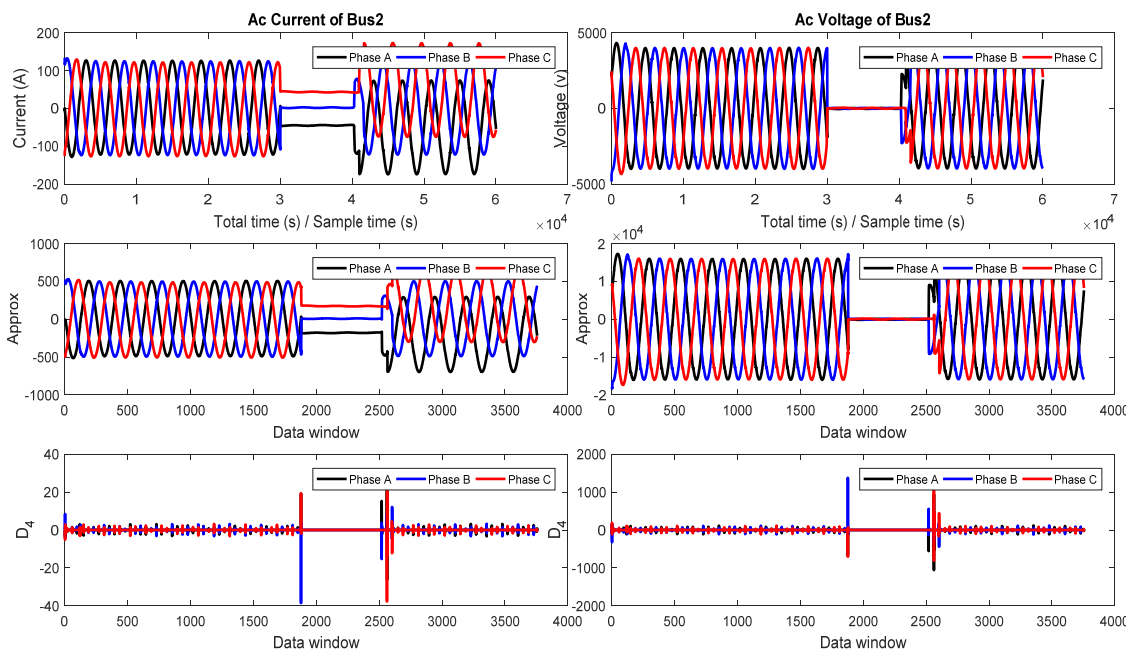
می‌گردد. نهایتاً می‌توان از خروجی تبدیل موجک به‌منظور جداسازی باس خطا دار استفاده نمود. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نیز به ترتیب شکل موج ولتاژ و جریان در باس‌های Srvce Load و Propulsion Load را نشان می‌دهند؛ اما همان گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، اندازه مقادیر ضرایب جزئی بسیار کمتر از مقادیر تنظیمی باس خطا دار بوده و لذا این باس‌ها توسط الگوریتم تبدیل موجک، باس خطا دار تلقی نمی‌شوند. در این مقاله به‌منظور نمایش باس خطا دار (مکان خطا) در مدل شبیه‌سازی شده از دستگاه‌های الکترونیک هوشمند (IED) استفاده گردیده که در شکل ۱۶ با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. سیگنال‌های تریپ مربوط به AC Bus نیز در این شکل، نشان‌دهنده تشخیص صحیح نوع خطا (سه‌فاز) یا همان بحث طبقه‌بندی خطا توسط الگوریتم حفاظتی پیشنهادی می‌باشد.

شکل ۱۷، جریان بار پالسی به‌همراه ضرایب تبدیل موجک در لحظه خطا را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، چون خطا در بخش AC حادث شده، اثرات آن در بخش DC ریزشبه‌ساز توسط مبدل AC به DC کم‌رنگ گردیده و لذا سیستم حفاظتی و الگوریتم تبدیل موجک

ریزشبه‌ساز مدل شده در این مقاله شامل ۶ باس بوده که ۳ باس آن متعلق به بخش AC و ۳ باس دیگر مربوط به بخش DC هستند. به‌منظور نشان دادن کارایی سیستم حفاظتی، خطاهای مختلفی در برخی از این ۶ باس اعمال گردیده و شکل موج ولتاژ و جریان باس‌ها نشان داده می‌شود. یک خطای سه‌فاز به زمین یا PG₃ در لحظه ۰٫۱۸ ثانیه به باس AC شبکه اعمال می‌گردد. ولتاژ و جریان باس‌های مختلف در شکل‌های ۱۳ تا ۱۹ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تغییرات شکل موج ولتاژ و جریان AC Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز در لحظه ۰٫۱۸ ثانیه توسط ضریب جزئی تبدیل موجک به‌طور کاملاً واضح نمایان گردیده است. ضریب جزئی (D) مربوط به جریان باس خطا دار AC Bus در محدوده مقدار ۱۰۰ و ضریب جزئی مربوط به ولتاژ آن در محدوده مقدار ۲۰ هزار توسط موجک ۴db به‌دست آمده است. با مقایسه این ضرایب و مقادیر از پیش تنظیم شده با توجه به اندازه ضریب مربوط به هر فاز، اولاً نوع خطا و ثانیاً محل خطا مشخص



شکل ۱۳: شکل موج ولتاژ و جریان AC Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز به زمین در لحظه ۰٫۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.



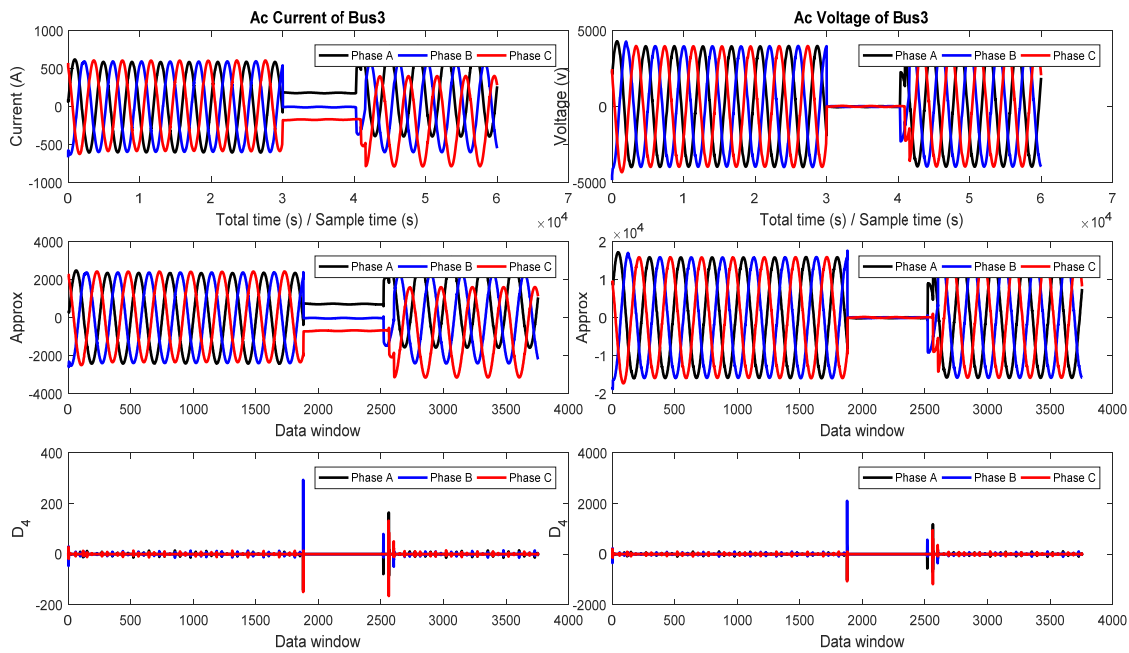
شکل ۱۴: شکل موج ولتاژ و جریان Ship Service Load Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز به زمین در لحظه ۰٫۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.

موجک حساس‌تر بوده و مقداری در حدود ۲ را نشان داده که این مقدار برای عملکرد الگوریتم حفاظتی، کافی نیست. به‌منظور درک بیشتر و بهتر آنچه که در بالا شرح داده شد، مقادیر عددی مربوط به‌طور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.

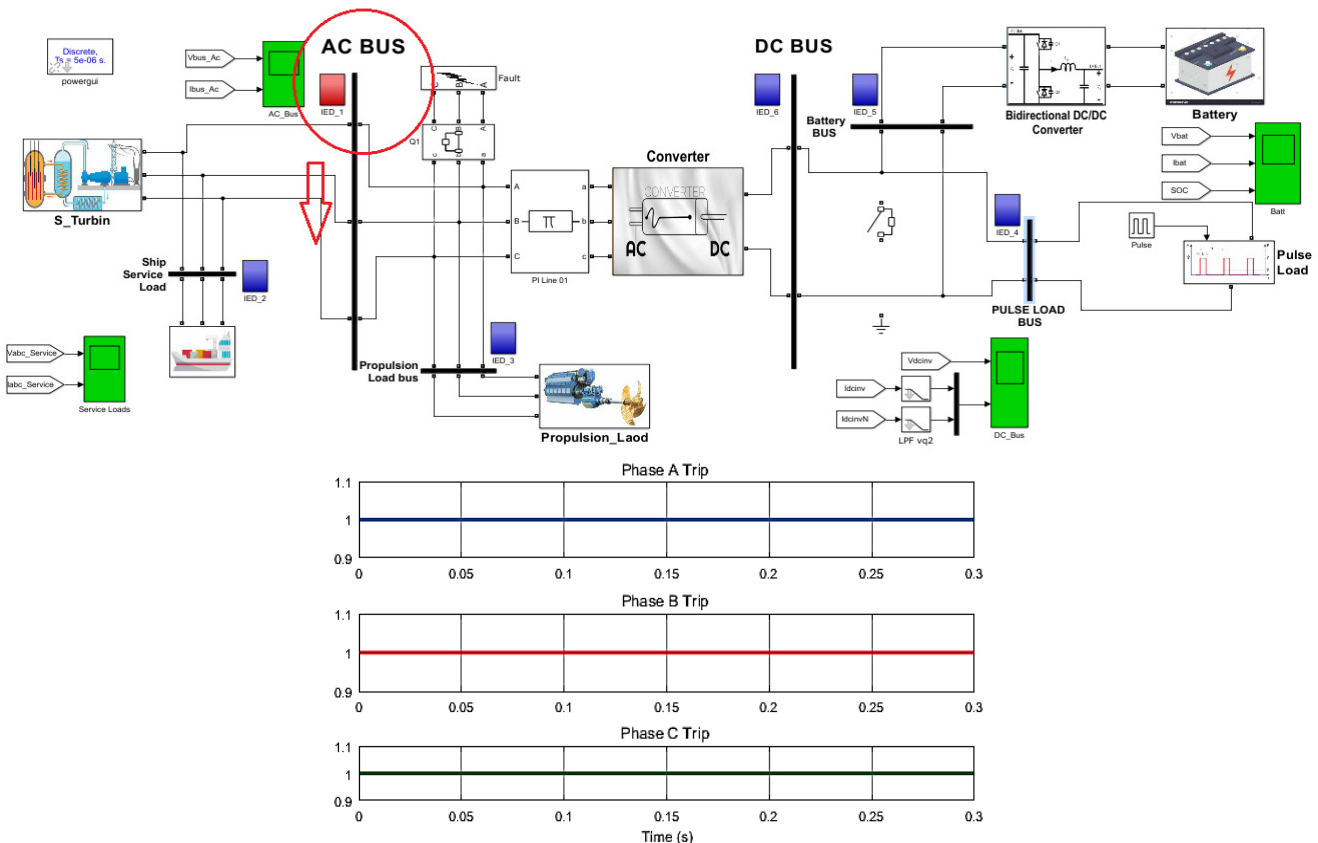
۴-۲-۲ سناریوی دوم: مدیریت خطاهای بخش DC ریزش‌بکه مانند خطای قطب به زمین و قطب به قطب

در سناریوی دوم به‌منظور تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطاهای DC در سیستم ریزش‌بکه شناور و همچنین بررسی پایداری و قابلیت اطمینان آن، همانند بخش AC، خطاهای مختلفی در برخی از باس‌های ریزش‌بکه اعمال شده و سپس سیگنال جریان DC باس‌ها جمع‌آوری شده و با استفاده از موجک سطح چهارم ۴db، تجزیه و تحلیل می‌گردد تا

خطایی را در این بخش شناسایی نمی‌کنند. از طرفی با وجود این که بار پالسی، جریان بسیار زیادی را در لحظه کوتاهی از ریزش‌بکه می‌کشد، با توجه به پارامترهای تنظیم‌شده در الگوریتم تبدیل موجک، این حالت به‌عنوان خطا در ریزش‌بکه دیده نشده و این موضوع کارایی سیستم حفاظتی پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل ۱۸، جریان سیستم ذخیره‌ساز ریزش‌بکه در کل زمان شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد در لحظه ۰٫۱ ثانیه که بار پالسی به ریزش‌بکه اعمال می‌گردد از باتری، جریان بیشتری کشیده شده تا در تأمین توان بار به‌عنوان منبع ثانویه مشارکت نماید. شکل ۱۹ نیز جریان باس DC به‌همراه ضرایب تبدیل موجک را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که چون باس DC نزدیک‌ترین باس به بخش AC ریزش‌بکه است، ضرایب تبدیل



شکل ۱۵: شکل موج ولتاژ و جریان Propulsion Load Bus در لحظه وقوع خطای سلفاز به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.



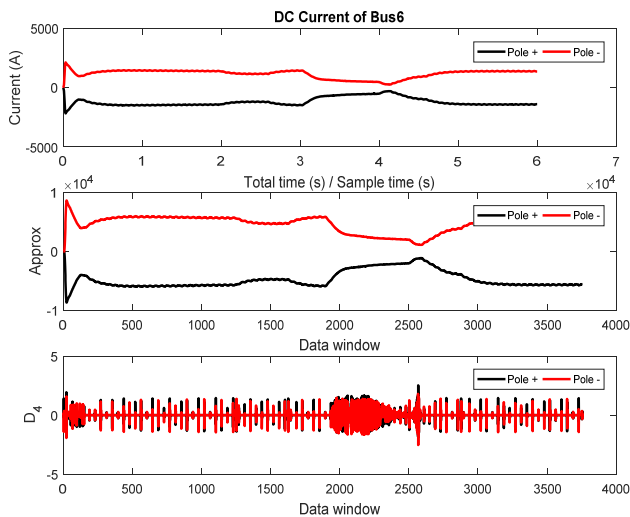
شکل ۱۶: تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا توسط الگوریتم تبدیل موجک در AC Bus در سناریوی اول.

موج‌های جریان ریزش‌بکه در ادامه در بخش‌های مختلف آمده و جدول ۳ نیز به‌منظور مشاهده بیشینه ضرایب تبدیل موجک در سناریوهای مختلف ارائه شده است.

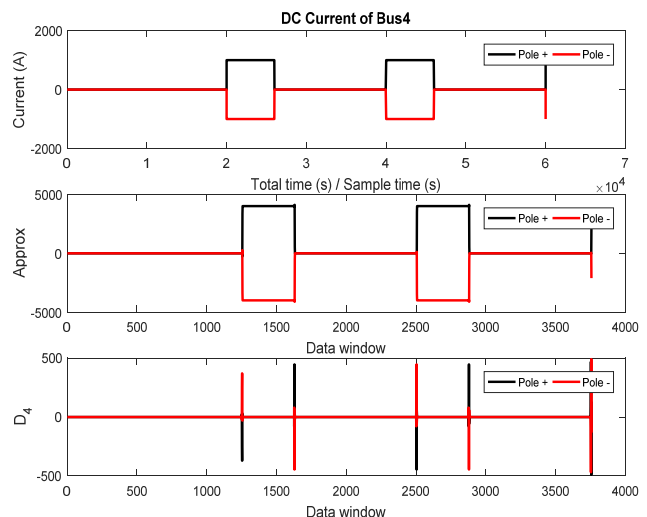
۴-۲-۱ خطا در Pulse Load Bus

به‌منظور نشان‌دادن کارایی الگوریتم حفاظتی پیشنهادی، یک خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به باس Pulse Load شبکه اعمال می‌گردد. جریان باس‌های مختلف در شکل‌های ۲۰ تا ۲۶ نشان

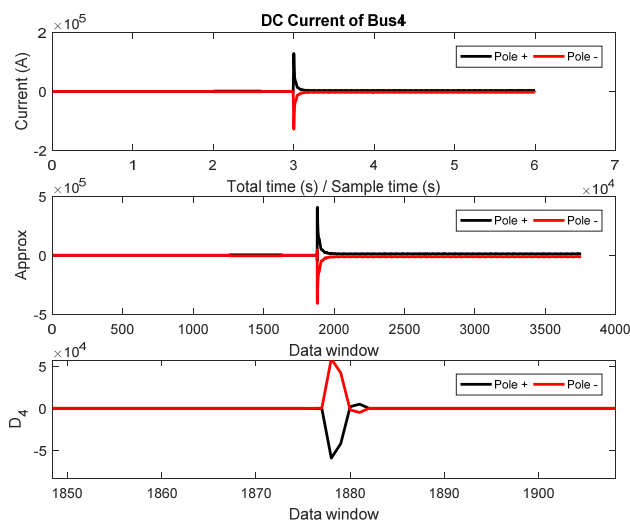
بیشینه ضرایب تجزیه و زمان وقوع خطا مشخص شود. در ادامه با استفاده از مقادیر از پیش تنظیم‌شده و مقایسه آن با ضرایب تجزیه تبدیل موجک، فاز خطادار و باس خطادار مشخص می‌گردد که توسط IEDها قابل مشاهده می‌باشد. زمان شبیه‌سازی همانند سناریوی اول، ۰/۳ ثانیه بوده و کلیه خطاها در لحظه ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ ثانیه بر روی ریزش‌بکه حادث می‌شود. بارهای پالسی جریان زیاد شناور نیز در لحظه ۰/۱ ثانیه به ریزش‌بکه اضافه شده تا صحت عملکرد طرح حفاظتی ریزش‌بکه اعتبارسنجی گردد. شکل



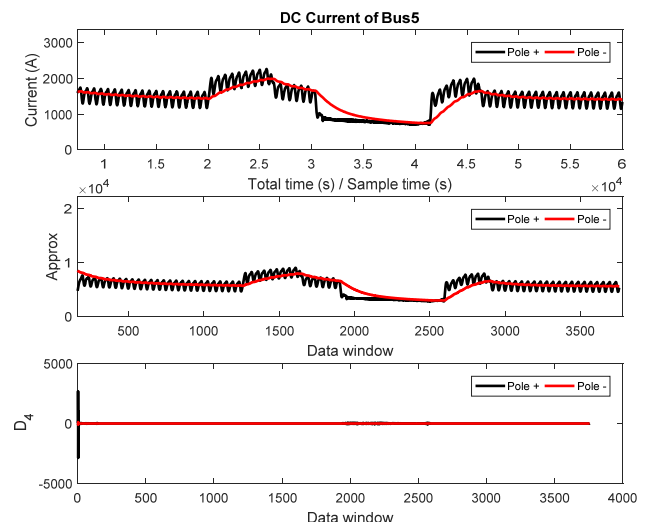
شکل ۱۹: شکل موج جریان DC Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.



شکل ۱۷: شکل موج جریان Pulse Load Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.



شکل ۲۰: شکل موج جریان Pulse Load Bus در لحظه وقوع خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.



شکل ۱۸: شکل موج جریان Battery Bus در لحظه وقوع خطای سه‌فاز به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به‌همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی اول.

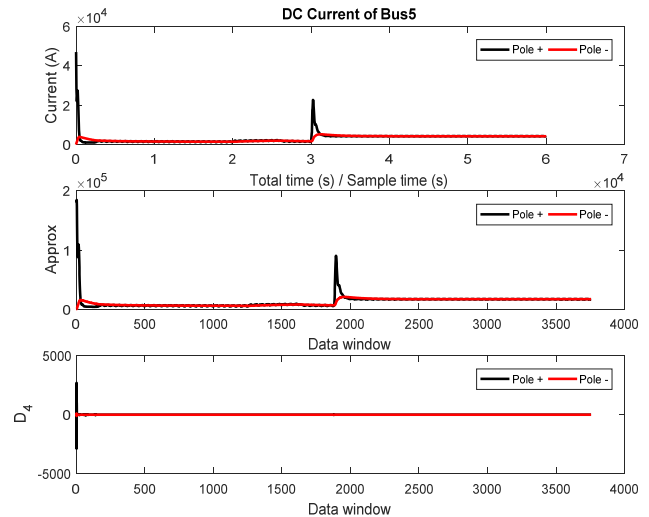
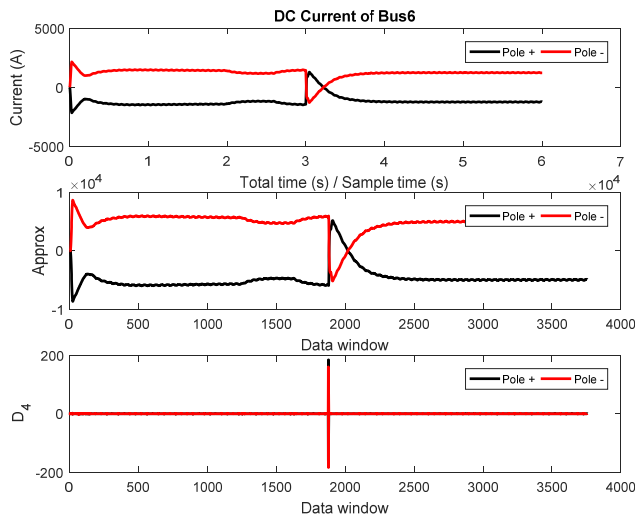
جدول ۳: مقادیر بیشینه ضریب جزئی تبدیل موجک قطب‌های DC شبکه و جریان زمین در خطاهای مختلف در PULSE LOAD BUS ریزشکبه شناور در سناریوی دوم.

| نوع خطا | بیشینه ضریب قطب مثبت | بیشینه ضریب قطب منفی | بیشینه ضریب جریان زمین |
|----------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| حالت عادی ریزشکبه | . | . | . |
| خطای قطب به قطب (PP) | $-۵,۹ \times ۱۰^۴$ | $۵,۹ \times ۱۰^۴$ | . |
| خطای قطب مثبت به زمین (PG) | $۳,۰۵ \times ۱۰^۴$ | . | ۲۱۳۰ |

جزئی بسیار کمتر از مقادیر تنظیمی باس خطادار بوده و لذا این باس‌ها توسط الگوریتم تبدیل موجک، باس خطادار تلقی نمی‌شوند. باس خطادار (مکان خطا) نیز توسط دستگاه‌های الکترونیک هوشمند (IED) در شکل ۲۳ با رنگ قرمز نشان داده شده است. سیگنال‌های تریپ مربوط به باس حادثه‌دیده نیز در این شکل، نشان‌دهنده عملکرد صحیح تشخیص نوع خطا (قطب به قطب) توسط الگوریتم حفاظتی پیشنهادی می‌باشد.

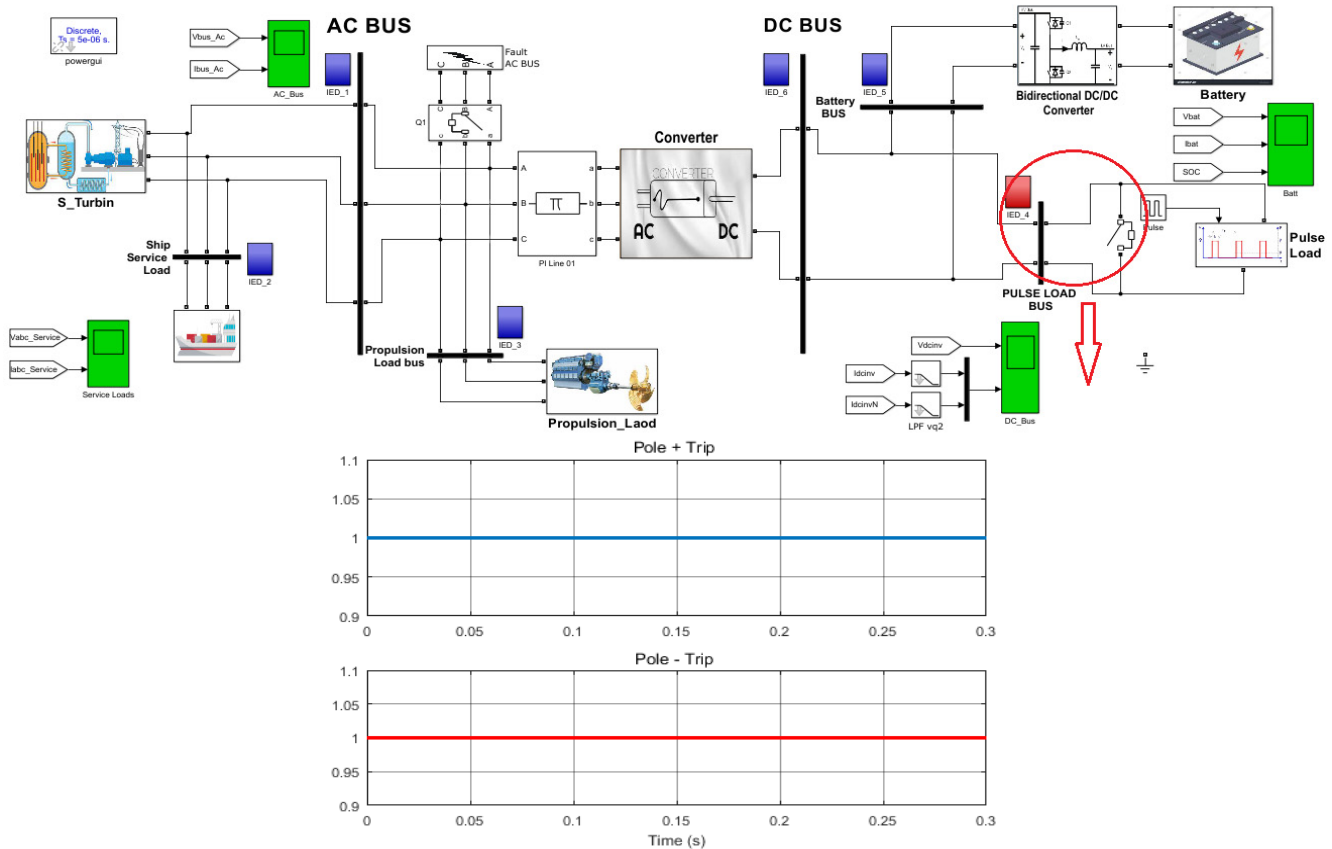
همان‌طور که در شکل‌های ۲۴ تا ۲۶ مشاهده می‌شود، چون خطا در بخش DC حادث شده، اثرات آن در بخش AC ریزشکبه توسط مبدل AC به DC کم‌رنگ گردیده و لذا سیستم حفاظتی و الگوریتم تبدیل موجک، خطایی را در این بخش شناسایی نمی‌کنند و این موضوع کارایی سیستم حفاظتی پیشنهادی را نشان می‌دهد. شکل ۲۴ جریان باس AC

داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، تغییرات شکل موج جریان Pulse Load Bus در خطای قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه توسط ضریب جزئی تبدیل موجک به‌طور کاملاً واضح نمایان گردیده است. ضریب جزئی (D) مربوط به جریان باس بار پالسی در محدوده مقدار ۶۰ هزار توسط موجک db^4 به‌دست آمده است. همانند سناریوی اول با مقایسه این ضریب و مقادیر از پیش تنظیم‌شده با توجه به اندازه ضریب مربوط به هر قطب DC، اولاً نوع خطا و ثانیاً محل خطا مشخص می‌گردد و نهایتاً می‌توان از خروجی تبدیل موجک به‌منظور قطع باس خطادار از ریزشکبه استفاده نمود. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نیز به‌ترتیب شکل موج جریان در باس‌های Battery Bus و DC Bus را نشان می‌دهند؛ اما همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، اندازه مقادیر ضرایب



شکل ۲۲: شکل موج جریان DC Bus در خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.

شکل ۲۱: شکل موج جریان Battery Bus در خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.



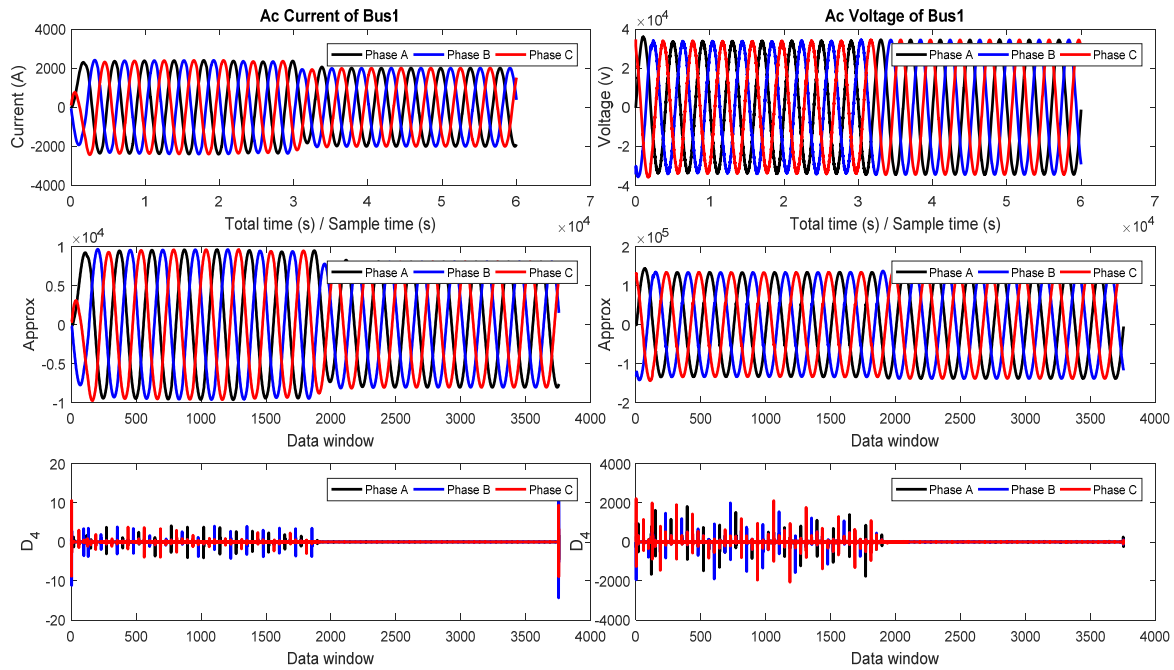
شکل ۲۳: تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا توسط الگوریتم تبدیل موجک در Pulse Load Bus در سناریوی دوم.

مختلف در شکل‌های ۲۷ تا ۳۰ نشان داده شده است. تغییرات شکل موج جریان در باس‌های DC ریزشکبه با خطای قطب منفی به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه توسط ضرایب تبدیل موجک در شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ مشخص گردیده است. در شکل ۲۹، ضریب جزئی (D) مربوط به جریان باس خطادار DC Bus در محدوده مقدار ۵۰۰ توسط موجک db^۴ به دست آمده است. همانند سناریوهای قبل با مقایسه این ضریب و مقادیر از پیش تنظیم‌شده با توجه به اندازه ضریب مربوط به هر فاز، نوع خطا و محل خطا مشخص شده و نهایتاً می‌توان از خروجی تبدیل موجک به منظور حفاظت ریزشکبه استفاده نمود. شکل‌های ۲۷ و ۲۸ نیز به ترتیب شکل موج ولتاژ و جریان در باس‌های Pulse Load Bus و Battery Bus را

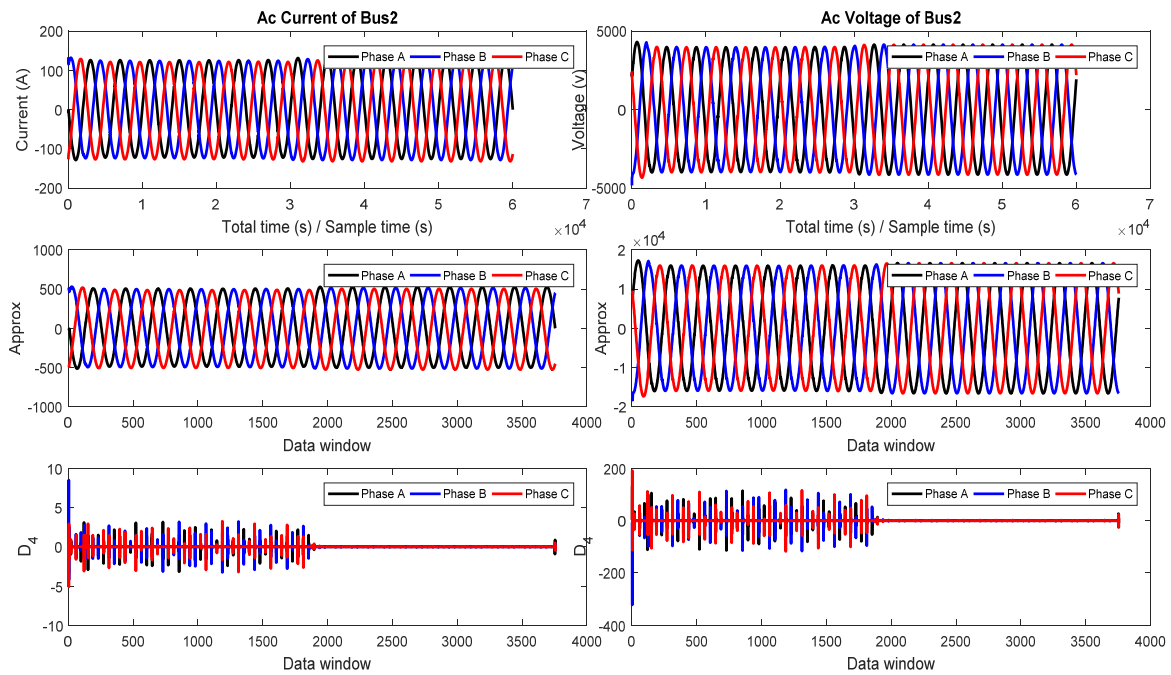
به همراه ضرایب تبدیل موجک را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که چون این باس، نزدیک‌ترین باس به بخش DC و خطادار ریزشکبه است، ضرایب تبدیل موجک حساس‌تر بوده و مقداری در حدود ۲۰ را نشان داده که برای عملکرد الگوریتم حفاظتی کافی نیست. به منظور درک بیشتر و بهتر آنچه که در بالا شرح داده شد، مقادیر عددی به طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

۴-۲-۲-۲ خطا در DC Bus

در این بخش یک خطای DC قطب منفی به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به DC Bus و خروجی مبدل ریزشکبه اعمال می‌گردد. جریان باس‌های



شکل ۲۴: شکل موج ولتاژ و جریان AC Bus در خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.



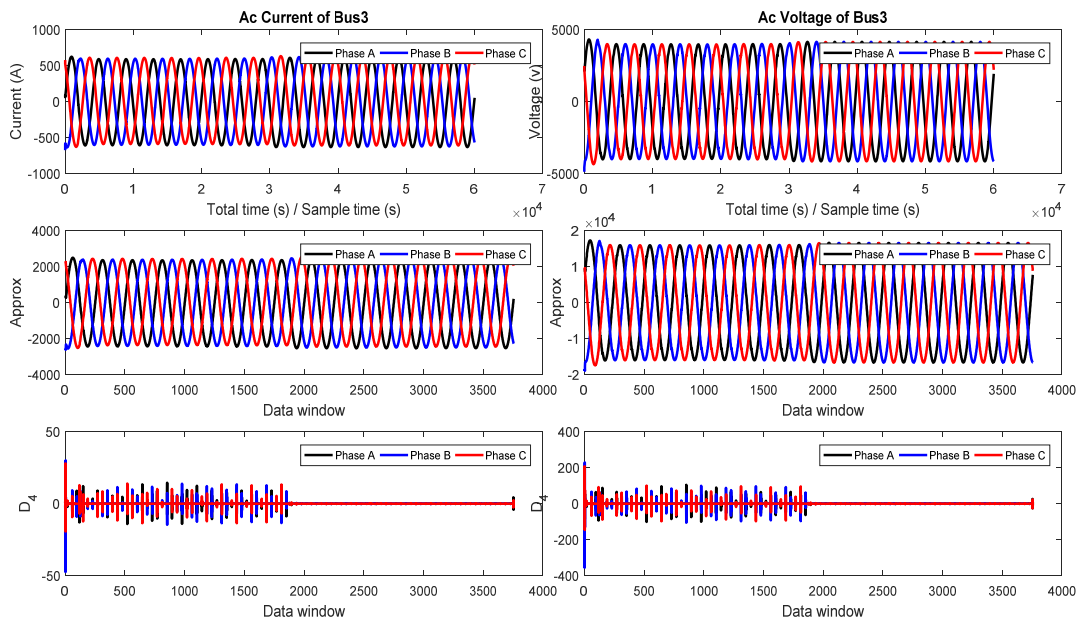
شکل ۲۵: شکل موج ولتاژ و جریان Ship Service Load Bus در خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.

جدول ۴: مقادیر بیشینه ضریب جزئی تبدیل موجک قطب‌های DC ریزشکبه و جریان زمین در خطاهای مختلف در DC BUS ریزشکبه شناور در سناریوی دوم.

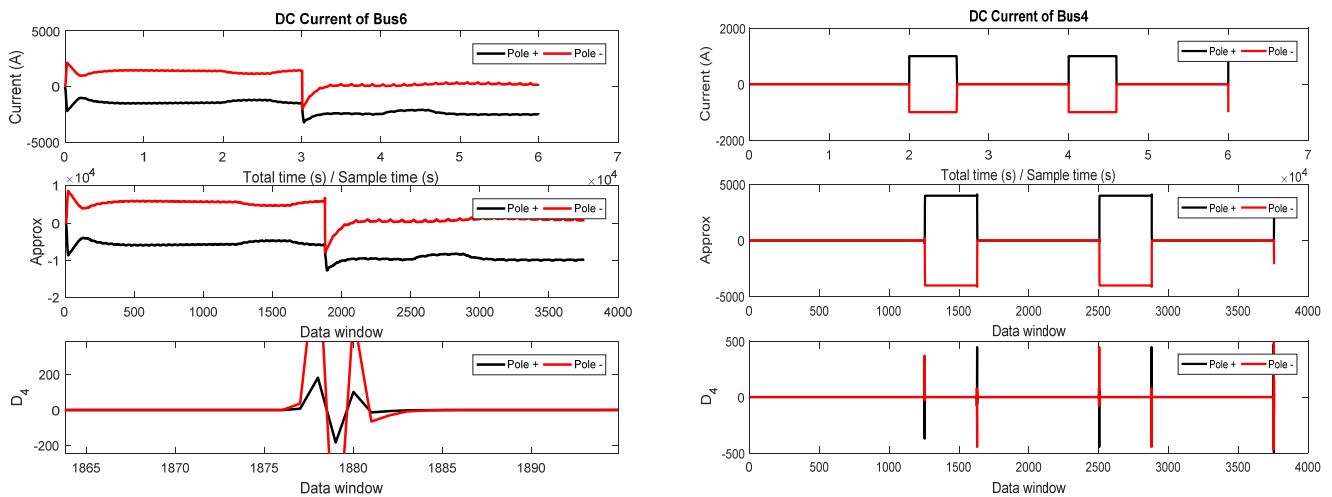
| نوع خطا | بیشینه ضریب قطب مثبت | بیشینه ضریب قطب منفی | بیشینه ضریب جریان زمین |
|----------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| حالت عادی ریزشکبه | ۰ | ۰ | ۰ |
| خطای قطب به قطب (PP) | ۱۳۴۴ | ۱۳۴۴ | ۰ |
| خطای قطب منفی به زمین (PG) | ۰ | ۹۳۷٫۷ | ۲۲۷۱ |

است. سیگنال‌های تریپ مربوط به باس حادثه‌دیده نیز در این شکل، نشان‌دهنده عملکرد صحیح تشخیص نوع خطا (قطب به زمین) توسط الگوریتم حفاظتی پیشنهادی می‌باشد. مقادیر عددی ضریب تبدیل موجک نیز به‌طور خلاصه در جدول ۴ آورده شده است.

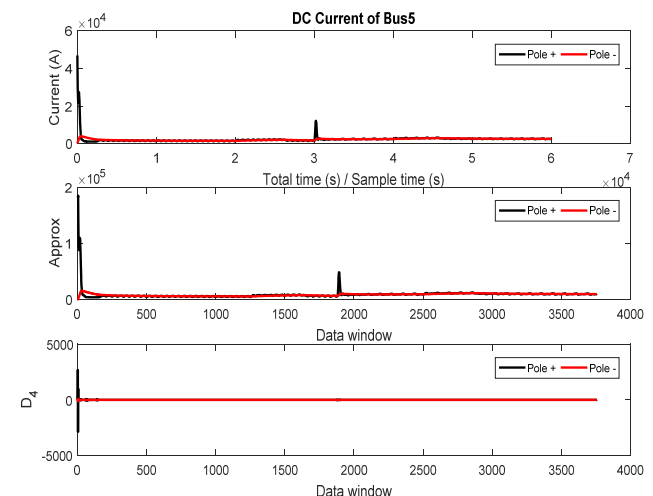
نشان می‌دهند؛ اما چون اندازه مقادیر ضرایب جزئی آنها بسیار کمتر از مقادیر تنظیمی باس خطادار بوده، این باس‌ها توسط الگوریتم تبدیل موجک، باس خطادار تلقی نمی‌شوند. محل خطا نیز توسط دستگاه‌های الکترونیک هوشمند (IED) در شکل ۳۰ با رنگ قرمز نشان داده شده



شکل ۲۶: شکل موج ولتاژ و جریان در خطای DC قطب به قطب در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.



شکل ۲۷: شکل موج جریان در خطای DC قطب به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.

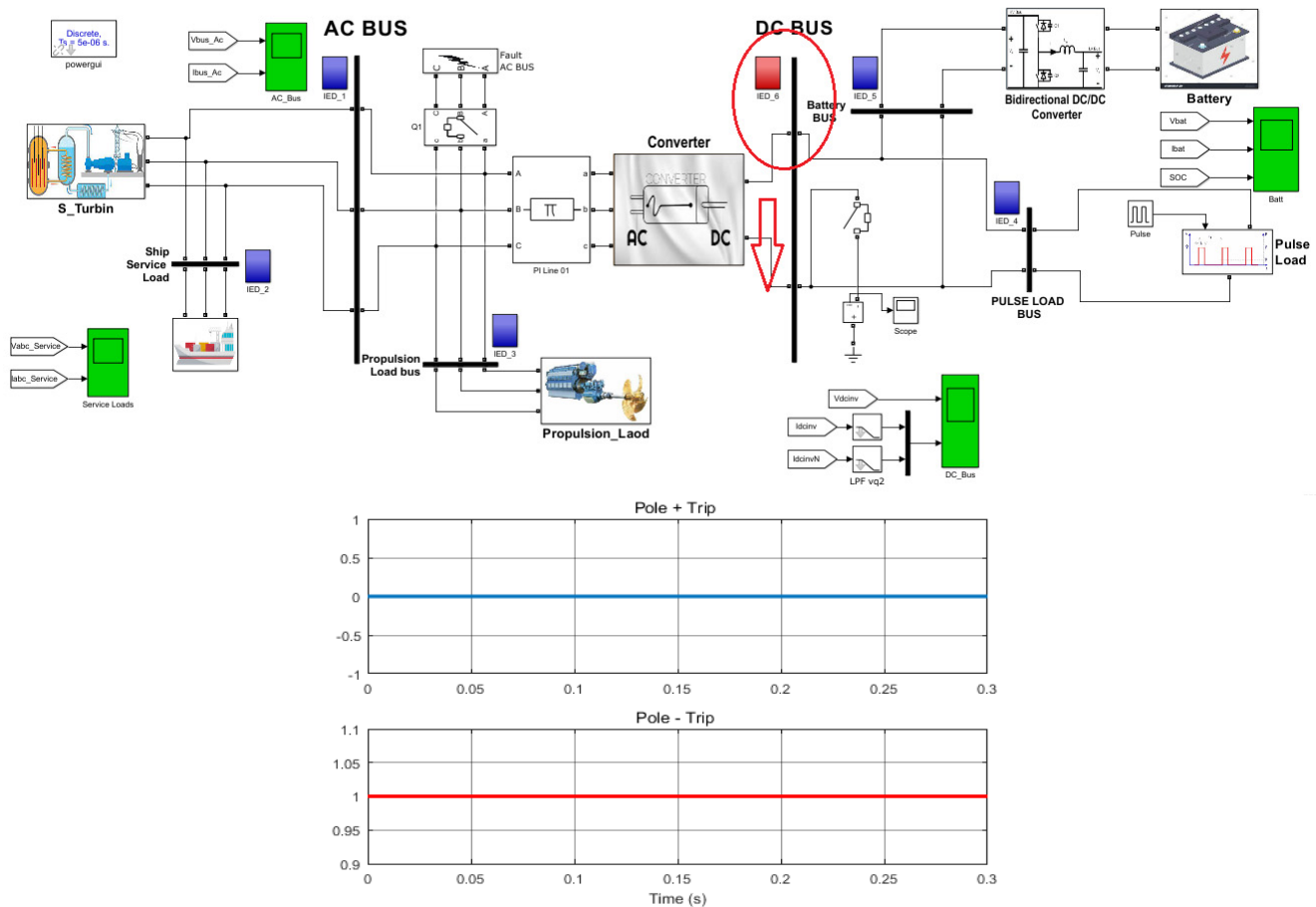


شکل ۲۸: شکل موج جریان در خطای DC قطب به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.

شکل ۲۹: شکل موج جریان در خطای DC قطب به زمین در لحظه ۰/۱۵ ثانیه به همراه ضریب تقریبی (Ap) و ضریب جزئی (D) تبدیل موجک سطح چهارم در سناریوی دوم.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور پایداری و قابلیت اطمینان ریزشکه شناورها که دو جزء اساسی در عملکرد ریزشکه بوده و اختلال در آنها می تواند موجب عواقب فاجعه باری مثل قطعی ناگهانی در جریان، ولتاژ یا سیگنال های فرکانسی شود، یک الگوریتم حفاظتی جهت تشخیص، طبقه بندی و مکان یابی خطا پیشنهاد گردید که هم می تواند بخش AC و هم بخش DC ریزشکه شناور را پوشش دهد. تشخیص، طبقه بندی و مکان یابی خطا در مدت زمان ۰/۰۳۴ ثانیه تا ۰/۵۴ ثانیه با استفاده از الگوریتم مبتنی بر پردازش سیگنال تبدیل موجک^۱ با سطح چهارم تحلیل و موجک db4 انجام گردید. سیگنال خطا توسط سطوح مختلف موجک db4 پردازش و تجزیه شده و اطلاعات مهم آنها استخراج گردید. سپس این موج تجزیه شده به منظور تشخیص و طبقه بندی فازهای خطا دار با مقادیر



شکل ۳۰: تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا توسط الگوریتم تبدیل موجک در DC Bus در سناریوی دوم.

[8] R. Bhargava, C. P. Gupta, and B. R. Bhalja, "Unified impedance-based relaying scheme for the protection of hybrid AC/DC microgrid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 13, no. 2, pp. 913-927, Mar. 2022.

[9] A. M. Aboezez, M. M. El-Saadawi, A. A. Eladl, V. Bures, and B. E. Sedhom, "A novel fault detection and location approach for DC zonal shipboard microgrid based on high-frequency impedance estimation with IEC 61850 communication protocol," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 36212-36228, 2024.

[10] G. K. Rao and P. Jena, "A novel fault identification and localization scheme for bipolar DC microgrid," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 12, pp. 11752-11764, Dec. 2023.

[11] D. Kumar and F. Zare, "A comprehensive review of maritime microgrids: system architectures, energy efficiency, power quality, and regulations," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 67249-67277, 2019.

[12] M. Chai, et al., "Alternating current and direct current-based electrical systems for marine vessels with electric propulsion drives," *Applied Energy*, vol. 231, pp. 747-756, Dec. 2018.

[13] M. U. Mutarraf, et al., "Adaptive power management of hierarchical controlled hybrid shipboard microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21397-21411, 2022.

[14] S. S. Kaddah, *Cost Effective Damage Control Analysis for Shipboard Power System*, Ph.D. Thesis, Howard University, Washington DC, USA, Dec. 2002.

[15] L. Xu, et al., "A review of DC shipboard microgrids-part i: power architectures, energy storage, and power converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 5155-5172, May 2022.

[16] Z. Ali, et al., "Fault detection and classification in hybrid shipboard microgrids," in *Proc. IEEE PES 14th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., APPEEC'22*, 6 pp., Melbourne, Australia, 20-23 Nov. 2022.

محسن علیانی در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق- قدرت خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب تهران دریافت نمود و در سال ۱۳۹۹ در دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران پذیرفته شد و در سال ۱۴۰۲ فارغ التحصیل گردید. وی هم‌اکنون در حال فعالیت تخصصی در حوزه اتوماسیون صنعتی در سطح کشور

تنظیم‌شده تطبیقی مقایسه گردیده است. با مشاهده نتایج و تحلیل آنها مشاهده شد که الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی، انواع خطاها حتی خطاهای بسیار گذرا (حدود ۱ میلی‌ثانیه) را چه در بخش AC و چه در بخش DC ریزش‌بکه شناور، تشخیص داده و طبقه‌بندی و مکان‌یابی می‌نماید.

مراجع

[1] S. G. Jayasinghe, L. Meegahapola, N. Fernando, Z. Jin, and J. M. Guerrero, "Review of ship microgrids: system architectures, storage technologies and power quality aspects," *Inventions*, vol. 2, no. 1, Article ID: 2010004, Mar. 2017.

[2] M. D. Al-Falahi, T. Tarasiuk, S. G. Jayasinghe, Z. Jin, H. Enshaei, and J. M. Guerrero, "AC ship microgrids: control and power management optimization," *Energies*, vol. 11, no. 6, Article ID: 1458, Jun. 2018.

[3] A. M. Aboezez, M. M. El-Saadawi, A. A. Eladl, and B. E. Sedhom, "IEC 61850 communication-based pilot distance protective IED for fault detection and location in DC zonal shipboard microgrid," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 59, no. 5, pp. 5559-5569, Oct. 2023.

[4] Z. Xiao, X. Zheng, Y. He, N. Tai, H. Cheng, and J. Shen, "An additional bus inductance-based protection scheme for shipboard DC zonal electric distribution systems," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 138, Article ID: 107910, Jun. 2022.

[5] Q. Deng, X. Liu, R. Soman, M. Steurer, and R. A. Dougal, "Primary and backup protection for fault current limited MVDC shipboard power systems," in *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symp., ESTS'15*, pp. 40-47, Old Town Alexandria, VA, USA 21-24 Jul. 2015.

[6] E. Christopher, M. Sumner, D. W. P. Thomas, X. Wang, and F. D. Wildt, "Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 860-865, Apr. 2013.

[7] G. Wu, "Fault detection method for ship equipment based on BP neural network," in *Proc. Int. Conf. on Robots & Intelligent System, ICRIS'18*, pp. 556-559, 26-27 May 2018.

می‌باشد. زمینه‌های علمی و کاری مورد علاقه ایشان عبارتند از: حفاظت ریزشکبه‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت، کنترل و اتوماسیون صنعتی.

آرژش دهستانی کلاگر در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه اصفهان و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. نام-برده از سال ۱۳۹۳ به‌عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، مبدل‌های توان بالا، فیلترهای اکتیو، کوره‌های قوس الکتریکی و سیستم‌های مغناطیسی.

محمدرضا علیزاده پهلوانی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۸ نام‌برده به‌عنوان محقق سیستم‌های قدرت در مرکز تحقیقات کنترل دانشگاه صنعتی مالک اشتر مشغول به کار بود. در سال ۱۳۸۲ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ درجه دکتری مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۸۸ در مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه استادی می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.