

تشخیص و مکان‌یابی خطا در سامانه توزیع شناورهای دریایی

مجاهد ارمی^۱، رضا حق‌مرام^۲، محمدرضا سوری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، Merami1357@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، rhaghmrm@ihu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد رشته کنترل و ناوبری- مدرس دانشگاه دریایی امام خامنه‌ای (مدظله‌العالی)، دانشکده علوم و فنون شناوری حضرت جوادالائمه (علیه‌السلام)،

MRS_1352@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۷)

چکیده:

در سال‌های ابتدایی ساخت شناورها، مهم‌ترین موضوع الکتریکی در شناورها، تنها مسأله‌ی استفاده از برق برای روشنایی بود. با رشد روزافزون فناوری در ساخت شناورها و با توجه به دستگاه‌های الکتریکی دریایی که به تازگی به صورت تجاری و صنعتی مطرح شده‌اند، وجود یک سامانه توزیع دریایی مجهز و قابل اطمینان امری اجتناب‌ناپذیر است. سامانه توزیع سه‌فاز سه‌سیم با نول زمین‌نشده (نول ایزوله)، به لحاظ کم بودن جریان خطای زمین و در نتیجه، پایداری کارکرد دستگاه‌های حیاتی نظیر سگن، سامانه‌های ارتباطی، رادار و... بهترین انتخاب برای تغذیه‌ی الکتریکی شناورها است. اما با انتخاب این نوع از سامانه توزیع، در کنار مزیت ذکر شده، دارای عیب‌هایی نیز هست. یکی از عیب‌های این سامانه این است که در صورت عدم تشخیص خطای تک‌فاز به زمین و بروز خطای فاز به زمین دوم، خطای اتصال کوتاه رخ می‌دهد و باعث عملکرد رله‌های حفاظتی و قطع تغذیه‌ی بارهای حیاتی و در نتیجه غیر عملیاتی شدن شناور می‌شود. پس باید قبل از بروز خطای زمین دوم، خطای اول شناسایی و رفع گردد. در این مقاله، یک روش ترکیبی با استفاده از تبدیل موجک برای تشخیص فاز خطا و ویژگی‌های جریان توالی صفر برای تشخیص فیدر خطا و بخش خطا استفاده شده است. **واژه‌های کلیدی:** خطای تک‌فاز، تبدیل موجک، جریان توالی صفر.

Detecting and locating the fault in the distribution system of marine boats

Mojahed Erami¹, Reza Haghmaram², Mohammad Reza Souri³

¹MSc, Faculty of Information Technology and communication, Imam Hussein University, Merami1357@gmail.com

²Assistant Professor of Imam Hussein University, rhaghmrm@ihu.ac.ir

³MSc of control and navigation- Lecturer, Faculty of Science and Technology Javadolaemneh Prophet Nedsa,

MRS_1352@yahoo.com

(Submitted: 2017/Jul/23; Accepted: 2017/Aug/18)

Abstract:

In the early years of building the boats, the most important electrical issue on boats was just the use of electricity for lighting. With the growing growth of technology in the construction of the boats and due to the commercially and instructionally developed marine electrical equipment, the existence of a well equipped and reliable marine distribution system is inevitable. Three phase distribution system, three wires with no ground null (isolated null) due to low earth fault current and as a result of sustainability of functioning of vital devices such rudders, communication systems, radar etc is the best choice to feed the boats. But choosing this type of distribution system, there are some flaws along with the advantages. One of the drawbacks after system is that in the event of failure to detect single-phase fault and phase-to-ground fault, a short circuit fault occurred and the triggers protective relay and terminates the feeding of the critical loads resulting in making boats non-operational, Therefore the first fault must be identified and resolved before the second ground fault. In this paper a hybrid method using wavelet transformation for fault phase detection and zero sequence flow characteristics has been used to identify the fault feeder and fault section.

Keywords: single-phase fault, wavelet transformation, zero sequence flow

تأمین انرژی الکتریکی مناسب برای شناورهای دریایی، خصوصاً برای یک شناور نظامی پیشرفته امروزی و اثربخشی عملکرد آن ضروری است. در یک شناور دریایی، مخصوصاً یک شناور نظامی، برخی سامانه‌های الکتریکی وجود دارد که در استانداردهای دریایی به عنوان سامانه‌های حیاتی عنوان شده‌اند [۱، ۲] و اثربخشی بالایی بر حالت عملیاتی آن شناور دارند. سامانه توزیع برق می‌تواند بر عملکرد این سامانه‌ها (نظیر سامانه سگن، سامانه‌های ارتباطی، سامانه رادار، سونار، کنترل موشک و ...) تأثیر مستقیم بگذارد. یک شناور نظامی به عنوان یک شناور مبارز و یایک شناور واحد پشتیبانی، بدون استفاده از یک سامانه توزیع برق مناسب، تقریباً به طور کامل از نظر دفاعی و عملیاتی در برابر دشمن، بی‌فایده و غیر عملیاتی است [۱].

در چند دهه‌ی اخیر، فناوری سامانه‌های الکتریکی دریایی به صورت خیلی سریع و چشمگیر رشد کرده است. بسیاری از این سامانه‌ها، به طور مستمر و ۲۴ ساعت شبانه‌روز و تا زمانی که مأموریت شناور به پایان نرسیده است، باید فعال و در حال کار باشند.

برای اولین بار، در سال ۱۹۳۰ نیروی دریایی ایالت متحده آمریکا در شناورهای خود از یک سامانه‌ی سه‌فاز 440V, 60Hz استفاده کرد. با توجه به لزوم کارکرد مداوم سامانه‌های حیاتی در شناور و همچنین، مشکلات مطرح‌شده در سامانه‌های قبلی در زمان خطای زمین به دلیل اتصال یک هادی به بدنه (سیستم برگشت از بدنه) و ارایه‌ی سامانه‌ی دوسیم ارت‌نشده‌ی 220V DC قبلی، این سامانه‌ی جدید نیز بدون هیچ اتصالی به بدنه بود [۳]. پس از جنگ جهانی دوم، سامانه‌ی توزیع AC 440V در اکثر ناوهای جنگی دیگر کشورها نیز به تصویب رسید و مورد استفاده قرار گرفت. به تدریج، به طور کلی بیشتر شناورهای تجاری و مسافربری نیز از این سامانه استفاده نمودند. نول در اکثر این سامانه‌ها زمین نشده بود.

دلیل اصلی انتخاب این نوع سامانه‌ی توزیع، این است که بارهایی بر روی شناور هستند که به بارهای حیاتی معروف هستند، مانند دستگاه‌های ناوبری، سامانه‌ی رادار، سگن، و ... که قابلیت اطمینان سامانه تغذیه‌ی آنها در شناور بسیار مهم است. سامانه‌ی زمین‌نشده به دلیل اینکه وقتی خطای تک‌فاز به زمین رخ دهد، سامانه به طور

پایدار و بدون وقفه باقی خواهد ماند، برای شناور پیشنهاد می‌شود.

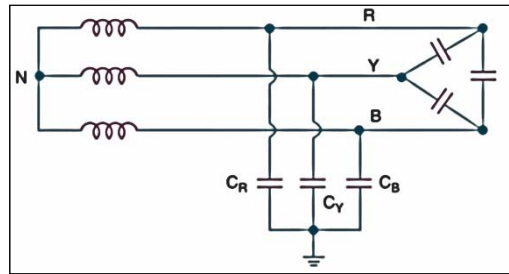
سیستم زمین‌نشده در کنار این مزیت، دارای عیب‌هایی نیز است. در صورتی که پس از اتفاق خطای تک‌فاز به زمین اول، خطا شناسایی و رفع نشود و خطای فاز دوم به زمین رخ دهد، خطای دوفاز رخ داده و باعث جاری شدن جریان خطای بالا و عملکرد رله‌های حفاظتی جریان بالا و قطع تغذیه بارهای حیاتی می‌شود.

بنابراین، لازم است که خطای تک‌فاز به زمین در سامانه‌ی قدرت دریایی تشخیص داده شود. روش‌هایی برای تشخیص این نوع از خطا بیان شده است، مانند استفاده از سامانه‌ی متریک اهم، روش سه‌لامپ [۴]، روش تبدیل موجک [۵-۷]، روش تزریق جریان و برآورد امپدانس فعال [۸، ۹]. اگرچه مقالات قبلی تا حدی موفق بوده‌اند، اما روش کلی برای تشخیص این نوع از خطا هنوز ارائه نشده است و نمی‌توان از آنها برای حفاظت کامل در برابر خطای تک‌فاز به زمین در شناورها استفاده کرد. بیشتر این روش‌ها در بهترین حالت فقط قادر به تشخیص فاز خطا هستند و این کار با توجه به نوع سامانه و کابل کشی در شناور کمک زیادی برای پیدا کردن نقطه خطا نمی‌کند.

در این مقاله، برای به دست آوردن مشخصه‌ی ویژه‌ی خطا، از یک روش ترکیبی دومرحله‌ای استفاده می‌شود که در مرحله‌ی اول با روش تبدیل موجک گسسته، فاز خطا مشخص می‌شود. و در مرحله‌ی دوم با استفاده از مقایسه‌ی ویژگی‌های اندازه و زاویه‌ی فازی جریان توالی صفر، فیدر خطا و بخش خطا تشخیص داده می‌شود. در بخش دوم این مقاله، مروری بر ویژگی‌های سامانه‌ی توزیع نول ایزوله در شناور شده است. در بخش سوم، نظریه‌ی تبدیل موجک گسسته به اختصار شرح داده شده است. در بخش چهارم، به طور کلی الگوریتم مقایسه‌ی اندازه و زاویه‌ی فازی جریان توالی صفر برای تشخیص مکان خطا مورد بحث قرار گرفته و در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. در انتها، در بخش ششم نتیجه‌گیری صورت پذیرفته است.

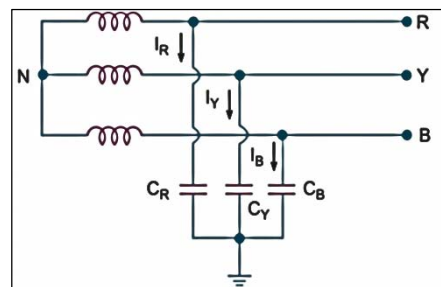
۲- مروری بر ویژگی‌های سامانه‌ی توزیع نول ایزوله در شناور

شکل (۱) یک سامانه‌ی نول زمین‌نشده را نشان می‌دهد. رساناهای خط بین یکدیگر و زمین، خاصیت خازنی دارند. شکل خازن‌ها در خطوط نسبت به یکدیگر به صورت اتصال مثلث (دلتا) و در خطوط نسبت به زمین به صورت ستاره هستند.



شکل (۱): سامانه‌ی توزیع نول زمین‌نشده با خصوصیات خازنی.

خازن‌های اتصال داده‌شده به صورت مثلث تأثیر کمی بر روی خصوصیات زمین کردن سامانه دارند (این خازن‌ها اثری بر مدار زمین ندارند) و از این رو، می‌توان از آنها چشم‌پوشی کرد [۱۰]. این مدار خلاصه‌شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

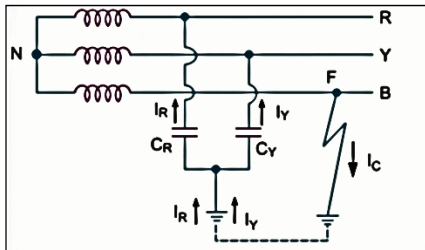


شکل (۲): سامانه‌ی توزیع زمین‌نشده با خازن‌های خط به زمین.

ظرفیت خازنی فاز به زمین یا فاز به بدنه سامانه‌ی توزیع یک شناور دریایی، به طور اجتناب‌ناپذیری به دلیل نزدیکی رساناها و کابل‌ها به ساختار بدنه‌ی شناور و همچنین، سیم‌پیچی‌ها به هسته‌های استاتور زمین‌شده‌ی ماشین‌های الکتریکی به وجود می‌آید. علاوه بر این، ظرفیت خازنی به وسیله‌ی خازن‌های حذف تداخل

فرکانس رادیویی (RFI)، به طور خاص در شناورهای نظامی اضافه می‌شود [۳]

رفتار سامانه‌ی نول زمین‌نشده را وقتی که خطای تک-فاز به زمین اتفاق می‌افتد، بررسی می‌کنیم. فرض کنیم خطای تک‌فاز به زمین در خط B در نقطه‌ی F اتفاق افتاده است. مدار در شکل (۳) نشان داده شده است. جریان‌های خازنی I_R و I_Y به ترتیب از طریق خط‌های R و Y جاری می‌شود. ولتاژهای راه‌انداز I_R و I_Y به ترتیب V_{BY} و V_{BR} هستند.



شکل (۳): رفتار سامانه‌ی زمین‌نشده در زمان خطای تک‌فاز به زمین.

باید توجه داشت که V_{BY} و V_{BR} ولتاژهای خط هستند. مسیرهای I_R و I_Y اساساً خازنی است. بنابراین، I_R نسبت به V_{BR} ، 90° درجه پیش‌فاز است، و همین‌طور I_Y نسبت به V_{BY} ، نیز 90° درجه پیش‌فاز است (شکل (۴)). جریان خطای خازنی I_C در خط B، جمع فازوری I_R و I_Y است.

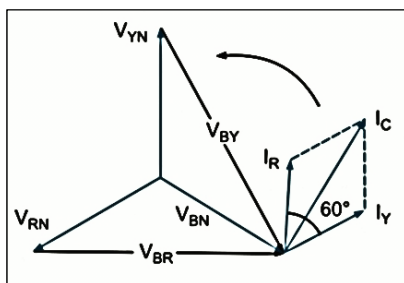
جریان خطا در خط B.

جمع فازوری $I_C = I_R + I_Y$

$$I_Y = \frac{V_{BY}}{X_C} = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C} \text{ و } I_R = \frac{V_{BR}}{X_C} = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C} \text{ که}$$

$$I_R = I_Y = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C} \quad (1)$$

جمع فازوری $I_C = I_Y$ و I_R



شکل (۴): دیاگرام برداری جریان‌ها و ولتاژها در زمان خطا در سامانه‌ی نول زمین‌نشده.

با توجه به شکل (۴) اندازه‌ی I_R و I_V با هم برابر است و زاویه‌ی بین آنها 60° درجه است. بنابراین، جریان خطای خازنی I_C نتیجه می‌شود:

$$I_C = 2I_R \cos(60^\circ/2) = 2I_R \cos 30^\circ \\ = 2I_R \times \sqrt{3}/2 = \sqrt{3}I_R$$

$$I_C = \sqrt{3}I_R = \sqrt{3} \times \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C} = \frac{3V_{ph}}{X_C} \quad (2)$$

$$I_C = \frac{3V_{ph}}{X_C} = 3 \times \frac{V_{ph}}{X_C} \quad (3)$$

جریان خازنی هر فاز تحت شرایط عادی $3 \times$

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، ظرفیت خازنی فاز به زمین (بدنه‌ی شناور) برای سامانه‌های توزیع ولتاژ پایین شناوری، در حدود ۱ تا ۵ میکروفاراد برای هر فاز است. اگرچه، در نتیجه خازن‌های RFI ممکن است تا $10 \mu F$ هم برسد. در صورتی که ولتاژ و فرکانس سامانه $440V/60Hz$ در نظر گرفته شود، جریان خطای زمین می‌تواند در رنج 0.1 تا 0.5 آمپر باشد و ممکن است با در نظر گرفتن خازن‌های نصب‌شده‌ی RFI تا ۵ آمپر هم برسد [۴].

بنابراین، وقتی خطای تک‌فاز به زمین در یک سامانه با نول زمین‌نشده رخ می‌دهد، تأثیرات زیر در سامانه به وجود می‌آید:

- پتانسیل فاز معیوب با پتانسیل زمین برابر خواهد شد و به همین دلیل، ولتاژهای دو فاز سالم باقی‌مانده، نسبت به زمین به اندازه‌ی ولتاژ کامل خط خواهد شد.
- جریان خازنی در دو فاز سالم به اندازه‌ی $\sqrt{3}$ برابر مقدار عادی و نرمال افزایش می‌یابد.
- جریان خطای خازنی I_C سه برابر مقدار نرمال جریان خازنی در هر فاز خواهد شد.
- به دلیل کوچک بودن مقدار جریان خطا (جریان خطای خازنی)، دستگاه‌های حفاظتی عمل نخواهند کرد.

مهم‌ترین و اساسی‌ترین مزیت این روش، تداوم سرویس‌دهی و پایداری کارکرد سامانه در زمان بروز اولین خطای تک‌فاز به زمین (بدنه‌ی شناور) است. مزیت دوم این روش کاهش جریان قوس الکتریکی، تنش‌های مکانیکی و حرارتی به وجود آمده در سیم‌پیچ ژنراتورها و کاهش خطر آتش‌سوزی و انفجار در زمان بروز خطای اول است و همچنین، دیگر مزیت این روش ایمنی بهتر برای

کارکنان با توجه به سطح خیلی پایین ولتاژ نسبت به بدنه است.

مهم‌ترین عیب این روش، این است که ردیابی خطا با توجه به پایین بودن جریان خطا، پیچیده و سخت است و در صورت برطرف نکردن خطای اول احتمال بروز خطای دوم و در نتیجه خطای اتصال کوتاه دو فاز است.

۳- تئوری تبدیل موجک گسسته

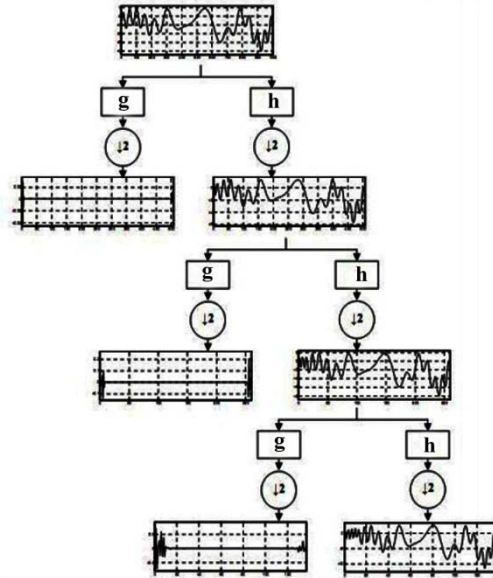
تجزیه و تحلیل طیفی و هارمونیک مدرن بر اساس تبدیل فوریه است. این تبدیل‌ها با موفقیت در سیگنال‌های ثابت جایی که فرکانس‌های سیگنال خیلی با زمان تغییر نمی‌کند، استفاده شده است. برای سیگنال‌های غیرثابت، هرگونه تغییر ناگهانی ممکن است در سراسر محور فرکانس پخش شود. با این حال، این روش‌ها در ردیابی دینامیک سیگنال برای اختلالات گذرا کمتر کارآمد است. در نتیجه، تبدیل موجک به عنوان یک روش سازگار برای تجزیه و تحلیل سیگنال غیرثابت معرفی شده است. اگرچه کاربرد موجک در زمینه مهندسی سیستم قدرت هنوز نسبتاً جدید است، اما رشد استفاده از آن بسیار سریع است. روش تبدیل موجک (WT)، به تازگی به عنوان یک ابزار جدید برای نظارت بر مسائل کیفیت توان پیشنهاد شده است و به صورت قابل توجهی در زمینه پردازش سیگنال سیستم قدرت مورد علاقه محققان قرار گرفته است [۳، ۷، ۱۳-۱۱].

مقایسه‌ی نظریه‌ی DWT و تبدیل فوریه در [۱۴] به طور کامل شرح داده شده است. در DWT، سیگنال با استفاده از ضرایب موجک کوچک که حاصل از فشرده-سازی و گسترش موجک مادر است، تعمیم می‌یابد. این ویژگی اجازه تجزیه و تحلیل سیگنال‌های گذرا به وسیله تبدیل موجک محلی در زمان اتفاق آنها را می‌دهد. معادله مورد استفاده در DWT به شرح زیر است [۱]:

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x(k)g(a_0^{-m}n - b_0k) \quad (4)$$

با توجه به معادله ۴، سیگنال اصلی به دو سیگنال، به نام تقریب‌ها و جزئیات تقسیم می‌شود. تقریب، جزء سیگنال فرکانس پایین را شامل شده است و بخشی از سیگنال اصلی خواهد بود. از سوی دیگر، جزئیات شامل اجزای گذرا و هارمونیک فرکانس بالای سیگنال می‌شوند. این فرآیند می‌تواند با تجزیه و تحلیل تقریب به سطح

بعدی از جزئیات و تقریب ادامه دهد. این عمل به تجزیه رزولیشن (وضوح) چندگانه شناخته شده است. شکل (۵) چگونگی تجزیه سیگنال اصلی به سطوح فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۵): تجزیه سیگنال اصلی به فرکانس‌های مختلف.

محدوده فرکانس هر یک از جزئیات DWT بستگی به نرخ نمونه‌برداری سیگنال اصلی دارد. به علت ساختار لگاریتمی DWT، هر یک از محدوده‌ی فرکانسی این تبدیل، سطح نامیده می‌شود. حداکثر تعداد سطح تجزیه تبدیل موجک (j) مطابق معادله ۵ تعریف می‌شود.

$$j = \log_2^N \quad (5)$$

که در آن N تعداد نمونه است.

DWT را می‌توان با انتخاب $a_0 = 2$ و $b_0 = 1$ در معادله ۴ و با استفاده از فیلتر چندسطحی با موجک مادر، به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر $l(n)$ ، و توأم به عنوان یک فیلتر بالاگذر $h(n)$ انجام داد. همچنین، با نمونه‌برداری بالا به پایین از خروجی فیلتر پایین‌گذر، موجک‌ها برای سطح بعدی کوچک خواهند شد و در نتیجه، ساده‌سازی انجام می‌شود [۱]

۳-۱- تشخیص خطای تک‌فاز به زمین

ولتاژهای خط خروجی ترمینال‌های بار به عنوان وسیله‌ای برای تشخیص خطا استفاده می‌شود.

در روش ارائه شده ولتاژهای خط V_{CA} و V_{AB} ، V_{BC} در ترمینال‌های بار به عنوان سیگنال X از مرتبه $n \times 1$ نشان داده شده است. با اعمال تبدیل موجک به X، ماتریس تجزیه از مرتبه $n \times 1$ را دریافت می‌کنیم.

$$1^{st} \text{ level decomposition} \rightarrow D_1 = [W_4]_{n(n+2)} [X]_{(n+2) \times 1} = \begin{bmatrix} A_1 \\ C_1 \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$$2^{nd} \text{ level decomposition} \rightarrow D_2 = [W_4]_{\frac{n}{2}(\frac{n}{2}+2)} [C_1]_{(\frac{n}{2}+2) \times 1} = \begin{bmatrix} A_2 \\ C_2 \end{bmatrix}_{\frac{n}{2} \times 1}$$

$$1^{th} \text{ level decomposition} \rightarrow D_1 = [W_4]_{2 \times 4} [C_{(1-1)}]_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} A_1 \\ C_1 \end{bmatrix}_{2 \times 1}$$

که در آن، $A_i, i = 1, 2, \dots, I$ یک ماتریس ضریب تقریب است و C_i یک ماتریس ضریب دقیق شده است.

ضرایب تقریب و دقیق شده‌ی ولتاژهای خط V_{AB} ، V_{BC} و V_{CA} توسط A_{AB}, A_{BC}, A_{CA} و C_{AB}, C_{BC}, C_{CA} به ترتیب مشخص شده است. برای تشخیص خطا و طبقه بندی، فقط ضرایب دقیق در نظر گرفته شده است.

اگر $C'_{CA} = \sum |C_{BC}|$ ، $C'_{AB} = \sum |C_{AB}|$ و $C'_{BC} = \sum |C_{CA}|$ خطایی بر روی سیستم نیست. اگر یکی و یا هیچ کدام از C'_{CA} ، C'_{BC} و C'_{AB} صفر نباشند، خطا بر روی سیستم است. جدول درستی برای تشخیص خطا در جدول آورده شده است.

جدول ۱

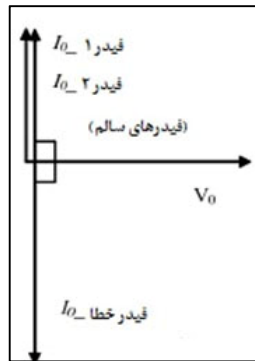
مجموع مقدار مطلق ضرایب	تشخیص خطا		
	خط A	خط B	خط C
$\min(C'_{AB}, C'_{BC}, C'_{CA})=0$	بدون خطا	بدون خطا	بدون خطا
$\min(C'_{AB}, C'_{BC}, C'_{CA})=C'_{AB}$	بدون خطا	بدون خطا	خطا
$\min(C'_{AB}, C'_{BC}, C'_{CA})=C'_{BC}$	خطا	بدون خطا	بدون خطا
$\min(C'_{AB}, C'_{BC}, C'_{CA})=C'_{CA}$	بدون خطا	خطا	بدون خطا

۴- الگوریتم مقایسه فازی جریان توالی صفر

همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** در بخش ۲ مشاهده شد، در زمان خطای تک‌فاز به زمین، خاصیت خازنی توزیع‌شده فاز خطا با زمین اتصال کوتاه می‌شود. خازن‌های توزیع‌شده فاز به زمین، عمدتاً اندازه‌ی جریان خطای زمین را که نسبتاً کوچک است، تعیین می‌کنند.

۴-۱- انتخاب فیدر خطا

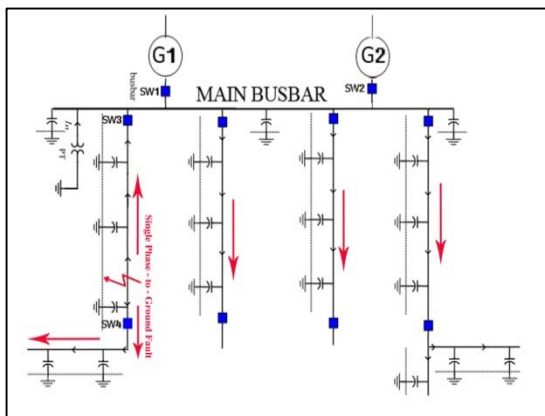
در این مقاله، یک روش معمول و ساده مطابق با رابطه زاویه‌ای بین جریان توالی صفر فیدر و ولتاژ توالی صفر سیستم برای تشخیص فیدر خطا معرفی شده است.



شکل (۷): معیار انتخاب فیدر خطا.

۲-۴- تشخیص بخش خطا

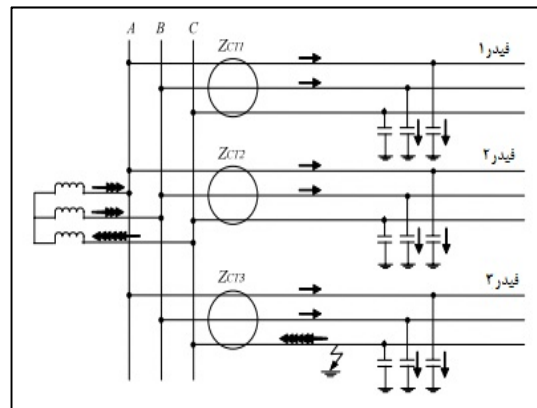
با توجه به ویژگی‌های کابل‌کشی و تابلوهای نصب‌شده در یک کشتی، می‌توان کابل‌کشی بین دو تابلو را یک بخش در نظر گرفت. شکل (۸) جهت جریان توالی صفر در هر فیدر و هر بخش را نشان می‌دهد. هنگامی که یک خطای تک‌فاز به زمین در یک سیستم توزیع زمین‌نشده شناسایی می‌شود، در فیدر خطا جهت جریان توالی صفر تابلوهای بالادست از نقطه خطا نسبت به تابلوهای پایین‌تر از نقطه خطا، معکوس است. توجه داشته باشید که قسمت بالادست، از نقطه خطا تا باسبار است و طرف پایین دست، از نقطه خطا تا انتهای فیدر است.



شکل (۸): جهت جریان توالی صفر فیدرهای هر بخش در یک سامانه‌ی نمونه‌ی ساده‌شده شناسایی.

در سامانه‌ی توزیع زمین‌نشده شناور، ولتاژ توالی صفر را می‌توان با ترانسفورماتور پتانسیل زمین (GPT) در سوئیچ‌برد اصلی، و جریان توالی صفر هر بخش را با استفاده از ترانس جریان کور بالانس (Core Balance CT) اندازه‌گیری کرد. باید توجه داشت که داده‌ها همزمان در سامانه دریافت شوند. روش تشخیص بخش

شکل (۶) یک سامانه قدرت زمین‌نشده را با یک خطای فاز C به زمین در فیدر ۳ نشان می‌دهد. در این حالت، ولتاژ توالی صفر سامانه برابر با ولتاژ فاز به نول در حالت عادی است. اگر جریان توالی صفر در هر فیدر با همدیگر همفاز باشند، آنگاه خطا در باسبار اتفاق افتاده است؛ اگر جریان توالی صفر یکی از فیدرها در جهت معکوس باشد، آنگاه خطا در آن فیدرها اتفاق افتاده است. علاوه بر این، جریان توالی صفر فیدر خطا برابر با مجموع جریان خازنی کل شبکه به استثنای فیدر خطا است، در حالی که جریان توالی صفر فیدر سالم برابر با مجموع جریان‌های سه‌فاز خودش است. جریان توالی صفر فیدر خطا از نقطه‌ی خطا به باسبار جاری می‌شود، در حالی که جریان فیدر سالم از باسبار به انتهای فیدر جاری می‌شود. از این رو، جریان توالی صفر فیدر خطا بیشتر از فیدر سالم است [۱۵].



شکل (۶): یک سامانه زمین‌نشده سه فیدر در کشتی.

شکل (۷) ملاک انتخاب فیدر خطا را نشان می‌دهد: جریان توالی صفر فیدر سالم نسبت به ولتاژ توالی صفر ۹۰ درجه پیش‌فاز می‌شود، در حالی که جریان توالی صفر فیدر خطا نسبت به ولتاژ توالی صفر ۹۰ درجه پس‌فاز است.

خطا، پیشنهاد شده بر اساس تجزیه و تحلیل رابطه‌ی زاویه‌ی فازی بین ولتاژ توالی صفر فاز به زمین با سبار و جریان توالی صفر در هر تابلو است.

با توجه به بحث بالا، فرض کنید که θ^k اختلاف فاز بین ولتاژ فاز به زمین و جریان توالی صفر در تابلو k است.

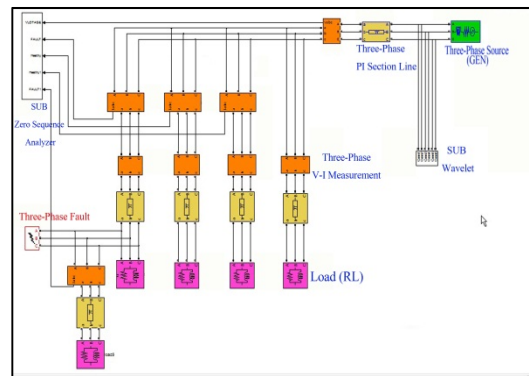
$$\theta^K = \angle V_{LPH}^K - \angle I_0^K \quad (6)$$

$$\theta_{Diff}^K = \theta^{K-1} - \theta^K \quad (7)$$

اگر θ_{Diff}^K بین تابلو $K-1$ و تابلو K ، 180° درجه باشد، نشان می‌دهد که خطای تک‌فاز به زمین بین دو تابلو رخ داده است.

۵- شبیه‌سازی

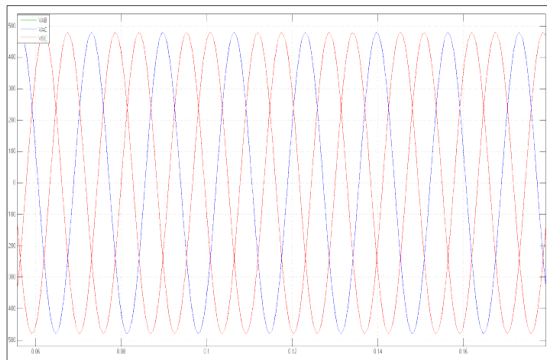
در اینجا نمونه ساده شده سیستم قدرت زمین نشده از کشتی‌های نیروی دریایی در سیمولینک متلب مدل شده است، که در شکل (۹) نشان داده شده است. برای آزمایش مدل مطرح شده در بالا، یک خطا بین فاز A و بدنه کشتی در ترمینال‌های بار ساخته شده است.



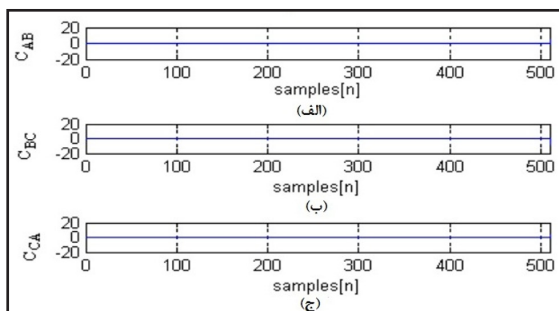
شکل (۹): مدل ساده شده (در متلب) یک سامانه‌ی قدرت زمین نشده در کشتی.

تحلیل موجک با استفاده از موجک دوبیشی انجام گرفته و سپس، به ولتاژ خط اعمال می‌شود. ضرایبی از مقیاس‌های دقیق برای تعیین خطی که خطای زمین رخ داده است مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیستم بدون خطا و با خطا بین خط A و بدنه کشتی در 0.2101 ثانیه با مدت زمان 0.1 میلی‌ثانیه، در نزدیکی ترمینال‌های بار در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۰): ولتاژهای خط سه‌فاز قبل از خطا.



شکل (۱۱) قبل از خطا

(الف) تجزیه موجک ولتاژ خط AB (V_{AB}).

(ب) تجزیه موجک ولتاژ خط BC (V_{BC}).

(ج) تجزیه موجک خط ولتاژ CA (V_{CA}).

مورد اول: بدون خطا

در اینجا هدف تشخیص عدم وجود خطا با استفاده از روش پیشنهادی برای سیستم قدرت زمین نشده در کشتی است. در این روش ولتاژهای خط V_{BC} ، V_{AB} و V_{CA} در ترمینال‌های بار در شکل (۱۰) به منظور استفاده نشان داده شده است.

منظور از سیگنال $X[n] = (V_{CA}, V_{BC}, V_{AB})$ ، 4096×1 است و ماتریس ضریب تبدیل موجک دوبیشی از دستور 4098×4096 برای به دست آوردن ضرایب

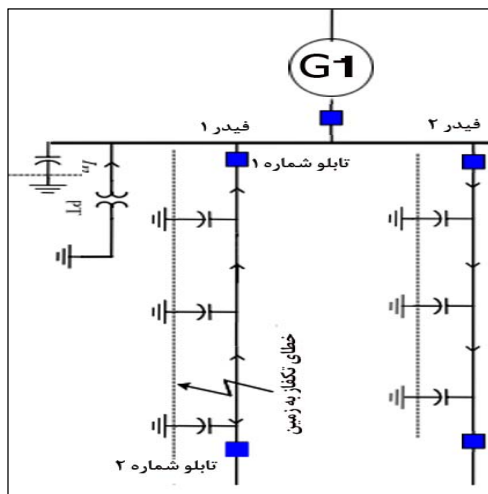
۵-۱- شبیه‌سازی تشخیص وقوع خطا و تعیین فاز خطا

ولتاژهای خط V_{CA} و V_{AB} ، V_{BC} در ترمینال‌های بار برای شناسایی خطا مورد استفاده قرار گرفته است.

یک خطای خط به زمین به عنوان یک اتصال تک‌فاز بین فاز و بدنه‌ی کشتی تعریف شده است. سیمولینک متلب برای تولید داده ولتاژ خط به خط برای شرایط مختلف خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک تجزیه و

نشان داده شده است که تجزیه و تحلیل تبدیل موجک می‌تواند برای شناسایی خطای فاز به زمین (بدنه کشتی) مورد استفاده قرار گیرد. یک روش پیشنهادی تبعیض خطا که فقط فاز خطا را تعیین می‌کند، ارائه شده است.

۲-۵- شبیه‌سازی تشخیص فیدر خطا و بخش خطا
 شبیه‌سازی این بخش هم در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. یک خطای تک‌فاز به زمین (فاز A) به زمین بین تابلوهای شماره ۱ و ۲ در فیدر ۱ همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده، رخ داده است. داده‌ها در جدول ۲ برای تعیین فیدر خطا می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. اختلاف فاز جریان توالی صفر فیدر ۱ نسبت به ولتاژ توالی صفر باسبار ۱۵/۰۰۹۰ درجه پسفاز است، در حالی که این اختلاف فاز در فیدر ۲ برابر با ۸۹/۹۹ درجه پیشفاز است. این نشان می‌دهد که در فیدر ۱ خطا رخ داده است.



شکل (۱۴): سامانه آزمایشی.

همچنین، اندازه‌ی جریان توالی صفر فیدر ۱، ۰/۲۸۴ آمپر است، در حالی که مقدار جریان توالی صفر فیدر ۲، ۰/۰۴۷۹ آمپر است.

جدول ۲

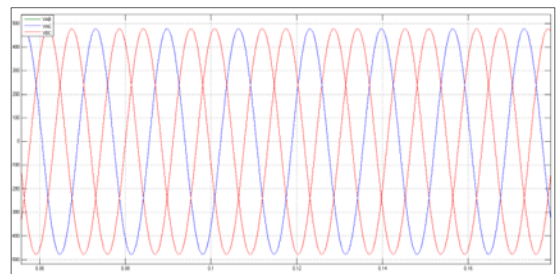
نوع داده	اندازه	زاویه نسبت به ولتاژ
جریان فیدر ۱	۰/۲۸۴ آمپر	-۹۰/۰۰۱۵
جریان فیدر ۲	۰/۰۴۷۹	۸۹,۹۹

دقیق، C_{CA} و C_{BC} ، C_{AB} به ترتیب از V_{CA} و V_{BC} ، V_{AB} در سطح چهار موضوع که در شکل (۱۱) (الف-ج) نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

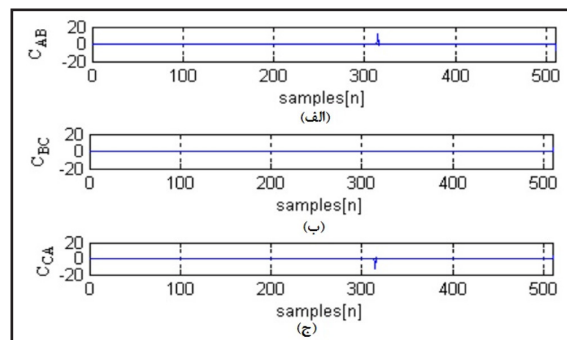
با مشاهده **Error! Reference source not found.** (الف-ج) تمام ضرایب صفر هستند. همچنین، با محاسبه‌ی $C'_{CA} = 0$ و $C'_{BC} = 0$ ، $C'_{AB} = 0$ ، بنابراین خطا بین هر یک از خطوط و بدنه کشتی وجود ندارد.

مورد دوم: با خطا

ولتاژهای خط V_{BC} ، V_{AB} و V_{CA} ، با خطا در ترمینال-های بار در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقایسه این ولتاژها با ولتاژهای در شکل (۱۰) برای تشخیص وجود خطا دشوار است. استفاده از تبدیل موجک برای سیگنال در شکل (۱۳)، C_{CA} و C_{BC} ، C_{AB} را همان طور که در **Error! Reference source not found.** (الف-ج) نشان داده شده است، داریم. با محاسبه‌ی $C'_{AB} = 19.57$ ، $C'_{BC} = 0.00$ و $C'_{CA} = 19.57$ ، از آنجا که C'_{BC} حداقل است، خطا بین خط A و بدنه کشتی وجود دارد.



شکل (۱۲): ولتاژهای خط سه‌فاز بعد از خطا.



شکل (۱۳): (الف) تجزیه موجک ولتاژ خط V_{AB} (C_{AB}). (ب) تجزیه موجک ولتاژ خط V_{BC} (C_{BC}). (ج) تجزیه موجک خط ولتاژ V_{CA} (C_{CA}).

جدول ۳

تابلو شماره ۲	تابلو شماره ۱	زاویه / تابلو
۹۵,۱۶۸۵	-۹۰,۰۰۱۵	$\theta^K = \angle V_{L,PH}^K - \angle I_0^K$
۱۸۵,۱۷		$\theta_{Diff}^K = \theta^{K-1} - \theta^K$

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است اختلاف فاز بین جریان توالی صفر تابلو شماره ۱ و تابلو شماره ۲، ۱۸۵/۱۷ درجه است. بنابراین، می‌توان گفت که خطا بین تابلو شماره ۱ و تابلو شماره ۲ است.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌هایی که در این مقاله در رابطه با تشخیص خطا در یک سامانه زمین-نشده‌ی دریایی صورت پذیرفت، می‌توان با استفاده از روش تبدیل موجک وقوع خطا و همچنین، فاز خطا را در هنگام خطای تک‌فاز به زمین تشخیص داد و سپس، با استفاده از ویژگی‌های اندازه و زاویه فازی جریان توالی صفر با ولتاژ توالی صفر، فیدر خطا و بخش خطا را مشخص کرد.

مراجع:

- Detection Method for Ungrounded Power System with Balanced and Unbalanced load," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 1, pp. 9-16, 2011.
- [7] W. Zhao, Y. H. Song and Y. Min, "Wavelet Analysis Based Scheme for Fault Detection and Classification in Underground Power Cable Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 53(1), pp. Pages 23-30, 5 January (2000).
- [8] J. Wang, M. Sumner, D. W. P. Thomas, and R. D. Geertsma, "Active fault protection for an AC zonal marine power system," *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 1, pp. 156 –166, 2011.
- [9] J. Wang, D.W.P. Thomas, M. Sumner, R.D. Geertsma, " Fast fault detection and location for a marine power system using system power converters and active impedance estimation," *Fourth IET Conf. on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008.
- [10] Ahmad, V.K Mehta Nouman, "Neutral Grounding Chapter-26 Principles of Power Systems," Electrical Engineering Department University of Engineering and Technology Lahore 2015.
- [11] Z. B. Chen, and Z. Q. Jiang, "Wavelet Transform Based Accurate Fault Location and Protection Technique for Cable Circuits" in *International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, 2000.
- [12] M.F. Akorede, and H. Hizam, "Wavelet Transforms: Practical Applications in Power Systems," *Journal of Electrical and Technology*, vol. 4(2), pp. 168-174, 2009.
- [13] C. H. K. a. R. Aggarwal, "Wavelets Transforms in Power Systems," *Power Engineering Journal*, vol. 15(4), pp. 193-202, 2001.
- [14] O. Sayyadi, Wavelet_Basic_Tutorial," *Sharif university of technology*, 2014.
- [15] M.-S. C. Xia Yang, Seung-Jae Lee, Il-Hyung Lim and Seong-Il Lim, "Ungrounded System Fault Section Detection Method by Comparison of
- [1] A. Behniafar, M. Banejad, and A. Darabi, "Protection of Marine Equipment Power System for Single," *Information and Electronics Engineering*, vol. 2, pp. 12-15, 2012.
- [2] "Ships / High Speed, Light Craft And Naval Surface Craft," in *Electrical Installations Pt.4 Ch.8 Sec.2* vol. 3.304 ed. Norway: Det Norske Veritas (DNV), 2015, p. 11.
- [3] R. Ball and G.W. Stephens, "Neutral earthing of marine electrical power systems," *Trans.I.Mar (TM)*, vol. 95, pp. 2-7, 1982.
- [4] D. T. Hall, *Practical Marine Electrical Knowledge*. london: witherby, 1999.
- [5] P. P. H. Douglas, T. H. Ortmeyer, "The Application Of Wavelets to Shipboard Power System Protection " *IEEE Electric Ship Technologies Symposium* pp. 432-436, 2005.
- [6] V.R.Sheelavant, C. Vijaya, and S. C. Shiralashetti, "Wavelet based Fault

Phase Angle of Zero-Sequence Current " *Electrical Engineering & Technology*, vol. 3(3), p. 484-490, 2008.