تجزیه و تحلیل سیستم‌های توزیع برق در 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

با توجه به اهمیت کاربرد روزافزون سیستم‌های الکتریکی در شناورها، بررسی سیستم‌های توزیع برق در شناورها، به‌خصوص در شناورهای نظامی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. هرچند تحقیقاتی در زمینه‌ی خصوصیات سیستم‌های توزیع صورت پذیرفته، اما نیاز به ارائه‌ی یک تجزیه و تحلیل مناسب و معرفی بهترین سیستم با توجه به شرایط استفاده در شناورها، خصوصاً شناورهای نظامی است. مهم‌ترین نکته در انتخاب یک سیستم توزیع سه‌فاز در شناورها، چگونگی اتصال نقطه نول (خنثی) ژنراتورها و ترانسفورماتورها به زمین (بدنه‌ی شناور) و استفاده و یا عدم استفاده از سیم نول است. مباحثی که در این زمینه مطرح می‌شود؛ بحث اضافه ولتاژ، پایداری کارکرد سیستم‌های حیاتی شناور، تشخیص محل خطا، ایمنی تجهیزات و ایمنی کارکنان است. در این مقاله، ضمن تحلیل انواع سیستم‌های توزیع، با توجه به اهمیت موضوع پایداری کارکرد سیستم‌های حیاتی در شناورها، خصوصاً شناورهای نظامی، بهترین سیستم، «سیستم توزیع برق سه‌فاز زمین نشده»، معرفی می‌شود.

کلمات کلیدی

نول، جریان خطا، اضافه ولتاژ، دستگاه‌های حیاتی.

Analysis of power distribution systems in marine vessels

Mojahed Erami[1], Reza Haghmaram[2], Mohammad Reza Souri[3]
[1]MSc, Faculty of Information Technology and Communication, Imam Hussein University, Merami1357@gmail.com
[2]Assistant Professor, Imam Hussein University, rhaghmrm@ihu.ac.ir
[3]MSc, Faculty of Science and Technology, Imam Khamenehei Navy University (Nedsa), MRS_1352@yahoo.com
(Submitted: 2017/Jul/23; Accepted: 2017/Aug/18)

Abstract

Considering the importance of increasing the use of electrical systems on vessels, the assessment of power distribution systems in boats, especially in military vessels, has a special position. Although research on the characteristics of distribution systems has taken place, it is necessary to provide an appropriate analysis and to introduce the best system according to the conditions of use on vessels, especially military vessels. The most important point in choosing a three-phase distribution system in boats is how to connect the neutral point (neutral) of generators and transformers to the ground (boat body) and the use or non-use of the neutral wire. The issues discussed in this regard are over voltage, stability of the functioning of boat vital systems, Error location detection, equipment safety and personnel safety. In this paper, while analyzing a variety of distribution systems, considering the importance of sustainability of vital systems functioning on boats, especially military vessels, the best system, "Three phase non-grounded power distribution system" is introduced.

Keywords

Neutral, Fault flow, Over Voltage, Vital Systems.

۱- مقدمه

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 سیستم‌های الکتریکی وجود دارد که اثربخشی بالایی بر حالت عملیاتی آن شناور دارند. سیستم توزیع برق می‌تواند بر عملکرد این سیستم‌ها (نظیر سیستم سکان، سیستم‌های ارتباطی، سیستم رادار، سونار، کنترل موشک و ...) تأثیر مستقیم بگذارد. یک شناور نظامی به‌عنوان یک شناور مبارز و یا یک شناور واحد پشتیبانی، بدون استفاده از یک سیستم توزیع برق مناسب، تقریباً به‌طور کامل ازنظر دفاعی و عملیاتی در برابر دشمن، بی‌فایده و غیرعملیاتی است[۱].

در چند دهه‌ی اخیر، تکنولوژی سیستم‌های الکتریکی دریایی به صورت خیلی سریع و چشم‌گیر رشد کرده است. بسیاری از این سیستم‌ها، 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 ایالات متحده در کشتی‌های خود از یک سیستم سه‌فاز، 440V، 60Hz، استفاده کرد. با توجه به لزوم کارکرد مداوم سیستم‌های حیاتی در کشتی و همچنین، مشکلات مطرح‌شده در سیستم‌های قبلی در زمان خطای زمین به دلیل اتصال یک هادی به بدنه (سیستم برگشت از بدنه) و ارائه‌ی سیستم دوسیمه‌ی ارت‌نشده‌ی 220V DC قبلی، این سیستم جدید نیز بدون هیچ اتصالی به بدنه بود[۲].

پس از جنگ جهانی دوّم سیستم توزیع 440V AC در اکثر ناوهای جنگی دیگر کشورها نیز به تصویب رسید و مورد استفاده قرار گرفت و به تدریج، به طور کلی اکثر کشتی‌های تجاری و مسافربری نیز از این سیستم استفاده نمودند. نول در اکثر این سیستم‌ها زمین‌نشده بود به جز چند مورد استثنا که در زیر به آنها اشاره می‌شود[۲].

شناور Mv Bergen Fiord، ساخته‌شده در سال ۱۹۵۰ دارای سیستم نول زمین‌شده با مقاومت بود و همچنین، در آنها از رله‌های خطای زمین، به طور گسترده‌ای استفاده شده بود. شناور ملکه الیزابت ۲[1]، ساخته‌شده در سال ۱۹۶۸ که از «سیستم نول زمین‌شده به صورت مستقیم» برای مصارف عمومی داخلی استفاده می‌کرد؛ و چندین کشتی از نیروی دریایی دانمارک که از سیستم توزیع نول زمین‌شده با استفاده از سیم‌پیچ پترسون استفاده می‌کردند. همچنین، چندین کشتی کوچک از کشورهای آلمان، یوگسلاوی و استرالیا نیز از «سیستم نول زمین‌شده به صورت مستقیم» استفاده می‌کردند[۲].

۲- معیارهای انتخاب سیستم توزیع برق در شناور

معیارهای انتخاب نوع زمین کردن سیستم نول، جنبه‌های مختلفی را به چالش می‌کشند[۳]:

- ملاحظات فنّی (عملکرد سیستم قدرت، اضافه ولتاژها، جریان خطا و ...).
- ملاحظات عملیاتی (تداوم سرویس‌دهی، تعمیر و نگهداری).
- ایمنی.
- هزینه (هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری).
- شیوه‌ها و رویه‌های محلی و ملی.

دو مورد از عمده‌ترین ملاحظات فنّی که در تضاد با یکدیگرند، عبارتند از:

- کاهش سطح اضافه ولتاژها.
- کاهش جریان خطای اتصال زمین.

متأسفانه بهینه‌سازی هر یک از این دو مورد خودبه‌خود باعث زیان رسیدن به دیگری خواهد شد[۲]. دو روش معمول زمین کردن نول با در نظر گرفتن این تضاد عبارتند از:

- نول ایزوله‌شده که جاری شدن جریان خطای اتصال زمین را از طریق نول حذف کرده، اما اضافه ولتاژهای بالاتری ایجاد می‌کند.
- نول به طور مستقیم زمین‌شده که اضافه ولتاژها را به مقدار حداقل کاهش داده، اما باعث جریان خطای بزرگ‌تری می‌شود.

۳- انواع سیستم‌های توزیع برق

به طور کلی، سیستم توزیع با توجه به طریقه‌ی اتصال نول سیستم به زمین و یا عدم اتصال آن به زمین به چهار روش اصلی تقسیم می‌شود[۳]:

---

[1] Elizabeth 2 (Queen)

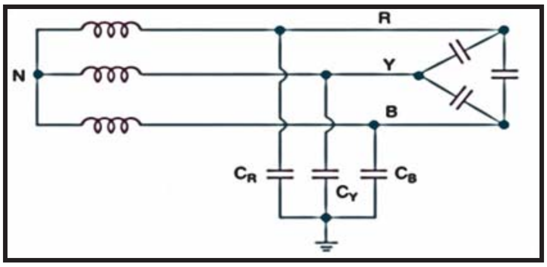
۱. زمین‌نشده.
۲. زمین‌شده‌ی مستقیم.
۳. زمین‌شده با مقاومت.
۴. زمین‌شده با اندوکتانس.

در یک سیستم زمین‌نشده، تنها ارتباط مؤثر سیستم با زمین، از طریق راکتانس خازنی بزرگ ناشی از ظرفیت خازنی فاز به بدنه‌ی تمام هادی‌های فازهای سیستم است. جریان خطای زمین بسیار کم، ولی اضافه ولتاژ گذرای سیستم در زمان خطا بالا است. باید توجه داشت که در یک سیستم زمین‌شده‌ی مستقیم، اضافه ولتاژ ناشی از خطای تک‌فاز به زمین حداقل است، اما جریان خطای زمین بسیار بالا است؛ و این امر ممکن است باعث خرابی‌هایی در محل خطا شود. بر عکس در یک سیستم زمین‌شده با امپدانس بالا، جریان خطای زمین بسیار کم ولی اضافه ولتاژ گذرای سیستم در زمان خطا بالا است.

۱-۳- سیستم نول زمین‌نشده

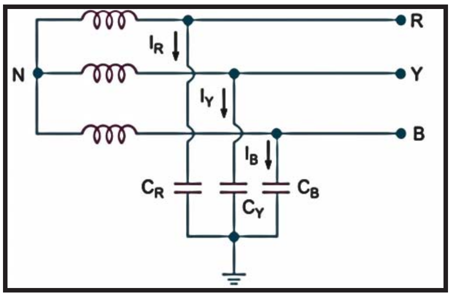
در یک سیستم نول زمین‌نشده، نول سیستم به زمین اتصال داده نشده است. بدین معنی که نول از زمین جدا (ایزوله) شده است؛ بنابراین، این سیستم، «سیستم نول ایزوله‌شده» یا «سیستم نول آزاد» نیز نامیده می‌شود.

شکل (۱ یک سیستم نول زمین‌نشده را نشان می‌دهد. هادی‌های 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 می‌باشند.



شکل (۱): سیستم توزیع نول زمین‌شده با خصوصیات خازنی.

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



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

اجازه دهید در ابتدا رفتار سیستم نول زمین‌نشده تحت شرایط عادی بحث شود (تحت شرایط تعادل و حالت پایدار). هر هادی، خازن مشابه با زمین دارند. از این رو، $C = C_R = C_Y = C_B$ (بیان می‌شود). از آنجا که ولتاژهای V_{RN}، V_{YN} و V_{BN} هم‌اندازه هستند (البته، ۱۲۰ درجه با همدیگر اختلاف‌فاز دارند)، جریان‌های خازنی I_R، I_Y و I_B مقدارهای مشابهی خواهند داشت:

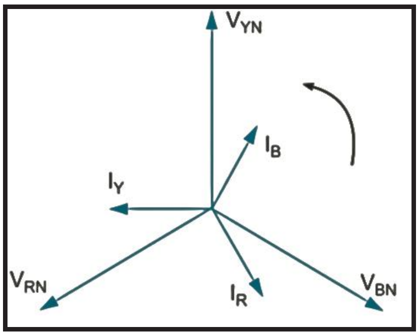
$$I_R = I_Y = I_B = \frac{V_{ph}}{X_C} \qquad (۱)$$

جایی که:

V_{ph} = ولتاژ فاز (ولتاژ خط به نقطه نول)

X_C = راکتانس خازنی خط به زمین

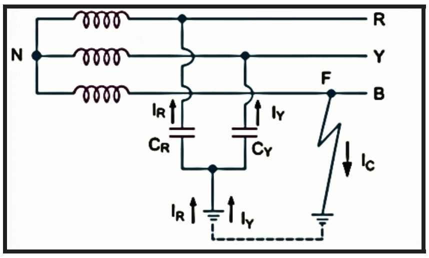
جریان‌های خازنی I_R، I_Y و I_B نسبت به ولتاژهای فازی خود V_{RN}، V_{YN} و V_{BN} همان‌طورکه در دیاگرام بُرداری شکل (۳ نشان داده شده است، ۹۰ درجه پیش‌فاز هستند.



شکل (۳): دیاگرام بُرداری جریان و ولتاژ خازنی در سیستم زمین‌نشده.

سه جریان خازنی (I_R، I_Y و I_B) از لحاظ اندازه و بزرگی با هم مساوی هستند و از نظر زاویه‌ای با هم ۱۲۰ درجه اختلاف‌فاز دارند. از این رو، جمع فازوری آنها صفر است. در نتیجه، هیچ جریانی به زمین جاری نمی‌شود و پتانسیل نول با پتانسیل زمین مشابه است (هم‌پتانسیل هستند)؛ بنابراین، سیستم نول زمین‌نشده هیچ مشکلی در شرایط عادی ندارد.

رفتار سیستم نول زمین‌نشده را وقتی‌که خطای تک‌فاز به زمین اتفاق می‌افتد، بررسی می‌کنیم. فرض کنیم خطای تک‌فاز به زمین در خط B در نقطه F اتفاق افتاده است. مدار در شکل (۴) 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_{BR} و V_{BY} هستند.



شکل (۴): رفتار سیستم زمین‌نشده در زمان خطای تک‌فاز به زمین.

باید توجه داشت که V_{BR} و V_{BY} ولتاژهای خط هستند (شکل (۵). مسیرهای I_R و I_Y اساساً خازنی است؛ بنابراین I_R نسبت به V_{BR}، ۹۰ درجه پیش‌فاز است و همین‌طور I_Y نسبت به V_{BY}، نیز ۹۰ درجه پیش‌فاز است (شکل (۵). جریان خطای خازنی Ic در خط B، جمع فازوری I_R و I_Y است.

جریان خطا در خط B،

$$I_C = I_R + I_Y \qquad \text{جمع فازوری}$$

که،

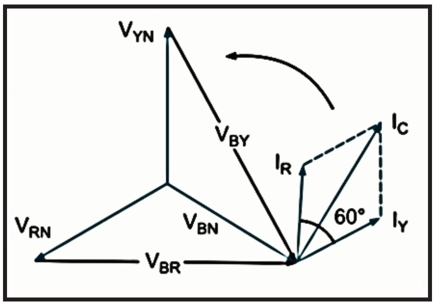
$$I_R = \frac{V_{BR}}{X_C} = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C}$$

و

$$I_Y = \frac{V_{BY}}{X_C} = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C}$$

$$I_R = I_Y = \frac{\sqrt{3}V_{ph}}{X_C} \qquad (۲)$$

جمع فازوری $I_C = I_Y$ و I_R



شکل (۵): دیاگرام بُرداری جریان‌ها و ولتاژها در زمان خطا در سیستم نول زمین‌نشده.

با توجه به شکل (۵) اندازه I_R و I_Y با هم برابر است و زاویه‌ی بین آنها ۶۰ درجه است؛ بنابراین، جریان خطای خازنی I_C نتیجه می‌شود:

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

$$I_C = \sqrt{3}I_R = \sqrt{3} \times \frac{\sqrt{3}\ V_{ph}}{X_C} = \frac{3\ V_{ph}}{X_C} \quad (۳)$$

$$I_C = \frac{3\ V_{ph}}{X_C} = 3 \times \frac{V_{ph}}{X_C} \quad (۴)$$

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

ظرفیت خازنی فاز به زمین یا فاز به بدنه‌ی سیستم توزیع یک شناور دریایی، به طور اجتناب‌ناپذیری به دلیل نزدیکی هادی‌ها 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 فرکانس‌های رادیویی (RFI)، به طور خاص در شناورهای نظامی، اضافه می‌شود[۴].

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، ظرفیت خازنی فاز به زمین (بدنه‌ی شناور) برای سیستم‌های توزیع ولتاژ پایین شناوری، در حدود ۱ تا ۵ میکروفاراد برای هر فاز است. اگرچه در نتیجه‌ی خازن‌های RFI ممکن است تا ۱۰ میکروفاراد هم برسد. در صورتی که ولتاژ و فرکانس سیستم 440V/60Hz در نظر گرفته شود، جریان خطای زمین می‌تواند در رنج ۰/۱ تا ۰/۵ آمپر باشد و با در نظر گرفتن خازن‌های نصب‌شده‌ی RFI تا ۵ آمپر هم برسد[۲].

۵]. بنابراین، وقتی خطای تک‌فاز به زمین در یک سیستم با نول زمین‌نشده رُخ می‌دهد، تأثیرات زیر در سیستم 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 نخواهد کرد.

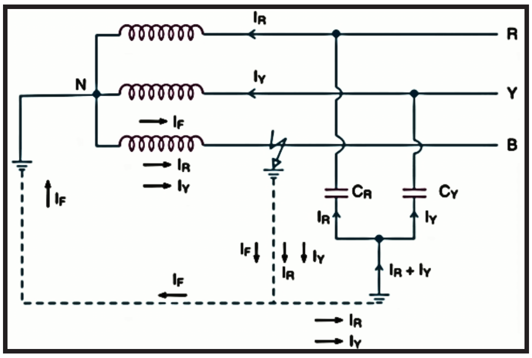
مهم‌ترین و اساسی‌ترین مزیّت این روش، تداوم سرویس‌دهی و پایداری کارکرد سیستم در زمان بروز اولین خطای تک‌فاز به زمین است. مزیّت دوّم این روش کاهش جریان قوس الکتریکی، تنش‌های مکانیکی و حرارتی به وجود آمده در سیم‌پیچ ژنراتورها، کاهش خطر آتش‌سوزی و انفجار در زمان بروز خطای اول است. دیگر مزیّت این روش ایمنی بهتر برای کارکنان با توجه به سطح خیلی پایین ولتاژ نسبت به بدنه است.

مهم‌ترین عیب این روش، ردیابی خطا با توجه به پایین بودن جریان خطا، پیچیده و سخت است و در صورت برطرف نکردن خطای اول احتمال بروز خطای دوّم و در نتیجه خطای اتصال کوتاه دو فاز است. دیگر عیب این روش امکان به وجود آمدن اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم در زمان خطا است و همچنین، نیاز به ترانسفورماتور کاهنده برای مصارف تک‌فاز است.

۲-۳- سیستم توزیع با نول زمین‌شده مستقیم

یک اتصال الکتریکی با امپدانس صفر بین نقطه‌ی نوترال و زمین قرار می‌گیرد. یا به عبارتی دیگر، وقتی نقطه نول یک سیستم سه‌فاز (ژنراتور یا ترانسفورماتور) به صورت مستقیم (از طریق یک سیم با امپدانس ناچیز) به زمین (بدنه شناور) وصل می‌شود، زمین کردن مؤثر نامیده می‌شود[۶، ۷].

از آنجا که نول بدون هیچ امپدانس محدودکننده‌ای و به صورت مستقیم از طریق یک سیم به زمین (بدنه) وصل شده است، نقطه‌ی نول با پتانسیل صفر زمین تحت همه‌ی شرایط نگه داشته می‌شود. بنابراین، تحت شرایط خطا، ولتاژ هر هادی با زمین از ولتاژ طبیعی سیستم تجاوز نخواهد کرد و در هر حال، ولتاژ زمین صفر خواهد بود. جریان خطای تک‌فاز به زمین عملاً یک اتصال کوتاه فاز به نول است و بنابراین، مقدار آن بالا است (شکل (۶) و هنگامی که اولین خطای عایقی رُخ می‌دهد. به دلیل داشتن مقاومت خیلی کم (در حد صفر) به هنگام وقوع خطا متحمّل عبور جریان شدیدی شده که این امر باعث فعال شدن فیوزها یا کلید تعبیه‌شده می‌شود و امر حفاظت انجام می‌گیرد.



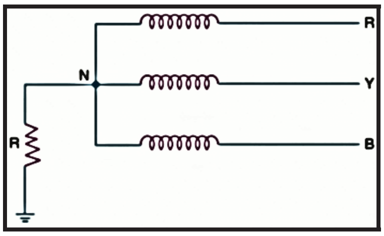
شکل (۶): خطای اتصال زمین در یک سیستم توزیع با نول زمین‌شده به صورت مستقیم.

مهم‌ترین مزیّت این روش این است که نقطه‌ی نول به طور مؤثر هم‌پتانسیل با زمین نگه داشته می‌شود. از دیگر مزیّت‌های این روش، نداشتن اضافه‌ولتاژ در زمان بروز خطا، امکان استفاده از سیم نول برای مصارف تک‌فاز و عملکرد ساده رله‌های حفاظتی در زمان بروز خطا است.

مهم‌ترین عیب این روش، وجود جریان خطای تک‌فاز در بدنه با مقدار بسیار زیاد است. در نتیجه، احتمال آتش‌سوزی و انفجار در مناطق خطرناک زیاد است و از همه مهم‌تر، عملکرد دستگاه‌ها و رله‌های حفاظتی در زمان بروز اولین خطا و باعث قطع سیستم‌های حیاتی می‌شود و قابلیت اطمینان و تداوم سرویس‌دهی را در سیستم، بسیار کم می‌کند و این عیب بسیار بزرگی در سیستم‌های توزیع شناوری خصوصاً شناورهای نظامی است. دیگر عیب این سیستم به دلیل اینکه ولتاژ تماس ایجادشده مقدار بالایی دارد، خطرات آن برای انسان بسیار زیاد است.

۳-۳- سیستم توزیع با نول زمین‌شده امپدانس بالا

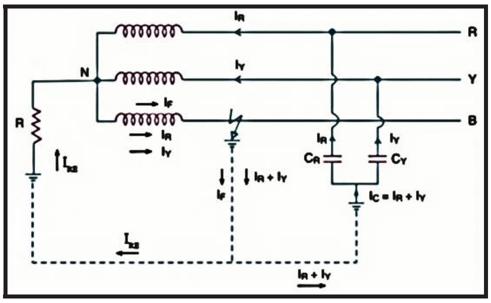
استفاده از این روش، ابتدا در آمریکا به عنوان ابزاری برای محدود کردن اضافه ولتاژ ناشی از خطای زمین متناوب بر روی سیستم‌های انتقال ولتاژ بالا با نول زمین‌نشده (نول ایزوله) محبوب شد و مورد استفاده قرار گرفت. مقدار مقاومت نول برای رسیدن به یک جریان خطای برابر و یا بیش از $3I_C$ انتخاب می‌شود. جایی که I_C، جریان شارژ خازنی هر فاز است[۲].



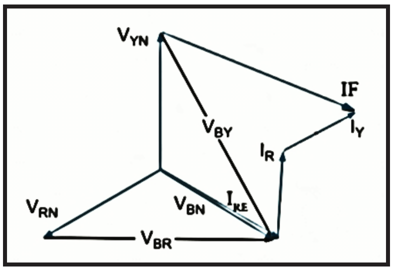
شکل (۷): سیستم توزیع زمین‌شده با مقاومت.

در این نوع سیستم قدرت، امپدانس مقاومتی، جریان خطای اتصال زمین را محدود می‌کند و نیز امکان محدود کردن اضافه ولتاژها را به یک مقدار رضایت‌بخش فراهم می‌کند.

مقدار مقاومت استفاده‌شده برای این منظور معمولاً جریان‌های خطای زمین را به کمتر از ۲۰ آمپر محدود می‌کند.



شکل (۸): خطای تک‌فاز به زمین در سیستم توزیع زمین‌شده با مقاومت.



شکل (۹): دیاگرام بُرداری جریان خطای تک‌فاز در سیستم توزیع نول زمین‌شده با مقاومت بالا.

۴-۳- سیستم توزیع نول با زمین‌شده امپدانس کم

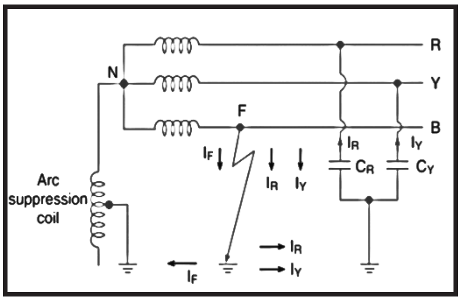
در این نوع از زمین کردن، سیستم از طریق یک مقاومت امپدانس پایین، با هدف محدود کردن جریان خطای زمین، زمین شده است. شکل ظاهری و اتصال شبیه سیستم زمین کردن با مقاومت بالا است. اما از لحاظ عملکردی معمولاً در جاهایی که به لحاظ در نظر داشتن اضافه‌ولتاژهای گذرای ناشی خطای زمین و جریان بالای خطای زمین، نمی‌توان از سیستم‌های توزیع با مقاومت بالا و زمین‌شده به صورت مستقیم استفاده کرد، از این سیستم استفاده می‌شود. جریان خطای زمین در این نوع سیستم توزیع معمولاً بین عدد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ آمپر محدود می‌شود.

۵-۳- سیستم توزیع با نول زمین‌شده راکتانس جبران‌ساز

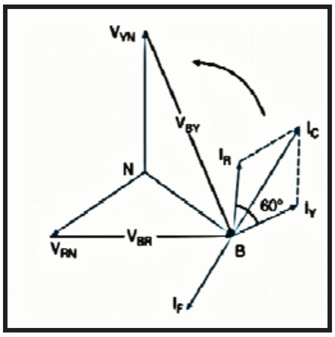
برای کنترل و حذف مؤلفه‌ی راکتیو جریان خطای زمین معمولاً از سیستم زمین با راکتانس در نقطه نول سیستم استفاده می‌شود. جریان تولیدشده به واسطه‌ی این اتصال راکتانسی می‌تواند جریان خازنی موجود را تا حد زیادی کاهش بدهد. تنظیم دقیق مقدار این راکتور و سیم‌پیچ برای حذف کامل جریان خازنی عمدتاً دشوار و غیرعملی می‌باشد. به وجود آمدن پدیده رزونانس به منظور حذف جریان‌های خازنی اغلب باعث اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم می‌شود که برای حذف و کنترل این اضافه ولتاژها، مقادیر راکتانس‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حدود ۲۵ تا ۶۰ درصد جریان خطای سه‌فاز را از خود عبور دهند؛ لذا، جریان عبوری عدد بزرگی است و به همین دلیل استفاده از این نوع سیستم کم است[۶].

یک راکتور که مطابق با مقدار کل ظرفیت خازنی فاز به زمین سیستم توزیع تنظیم گردیده است، بین نقطه نول و زمین قرار می‌گیرد. بنابراین، هنگامی‌که یک خطای اتصال زمین اتفاق افتد جریان خطای زمین نزدیک به صفر می‌شود. مشاهده کردیم که جریان‌های خازنی مسئول تولید قوس زمین می‌باشند. این جریان‌های خازنی به دلیل وجود ظرفیت خازنی بین هر خط و زمین جاری می‌شوند. اگر اندوکتانس L با مقدار مناسب با خازن‌های

سیستم، به صورت موازی وصل شده باشد، جریان خطای I_F که تضاد فازی با جریان خازنی I_C سیستم خواهد بود، از طریق L جاری می‌شود. اگر L طوری تنظیم شود که $I_L = I_C$ شود، آنگاه جریان نتیجه در خطا صفر خواهد شد. این حالت به عنوان زمین کردن تشدید یا رزونانس نامیده می‌شود.



شکل (۱۰): زمین کردن با سیم‌پیچ پترسون.



شکل (۱۱): دیاگرام بُرداری جریان‌های سیستم توزیع با زمین کردن سیم‌پیچ پترسون.

زمین کردن سیم‌پیچ پترسون دارای مزایای زیر است:

این سیستم جریان خطای زمین را حتی اگر ظرفیت‌های خازنی فاز به زمین به مقدار بالایی باشند، کاهش می‌دهد: از بین رفتن خودبه‌خود خطاهای اتصال زمین غیردایمی. ولتاژ تماس در محل خطا محدود است. سرویس‌دهی سیستم حتی در مواقع بروز خطای دایمی تداوم دارد. خطای اول با آشکارسازی جریان جاری‌شده از طریق سیم‌پیچ نشان داده می‌شود. سیم‌پیچ پترسون مزایای سیستم نول زمین‌نشده را دارد. زمین کردن سیم‌پیچ پترسون دارای معایب زیر است:

با توجه به شرایط عملکردی متنوع، ظرفیت خازنی شبکه وقت به وقت تغییر می‌کند. بنابراین، مقدار اندوکتانس L سیم‌پیچ پتروسون برای تطبیق‌سازی باید تعدیل و اصلاح گردد و این عمل هزینه را بالا می‌برد. احتمال خطر اضافه ولتاژهای گذرا بر روی سیستم توزیع وجود دارد. کارکنان باید برای نظارت همیشه در محل حضور داشته باشند. ایجاد هماهنگی در حفاظت برای خطای اول دشوار است.

۶-۳- سیستم توزیع چهارسیمه با نول زمین‌نشده

شکل ظاهری این سیستم همانند سیستم توزیع قدرت سه‌فاز سه‌سیمه با نول زمین‌نشده است و تفاوت آن در استفاده از سیم نول برای مصارف تکفاز است. با توجه به اینکه در زمان استفاده از سیستم توزیع چهارسیمه، احتمال نامتعادل شدن بار به دلیل وجود بارهای تکفاز زیاد است، در صورتی که نقطه نول به پتانسیل صفر مرجع زمین وصل نباشد، باعث جابجایی نقطه صفر سیستم و برقدار شدن خط نول (سیم چهارم) می‌شود. استفاده از این نوع سیستم به دو دلیل زیر در شناورها دارای اشکال است:

- جابجایی نقطه‌ی نول سیستم و نداشتن نقطه‌ی نول و صفر ثابت در سیستم.
- در صورت بروز خطای تکفاز به زمین، اختلاف پتانسیل نول با بدنه به اندازه ولتاژ فازی سیستم خواهد شد و این عمل ضمن اینکه برای عایق‌بندی سیستم مشکل‌ساز است، با توجه به اینکه سطح ولتاژ تماس زیاده شده است، برای کارکنان نیز بسیار خطرناک است.

لازم به توضیح است که در اکثر استانداردهای دریایی، تنها سیستم توزیع سه‌فاز سه‌سیمه، به عنوان سیستم زمین‌نشده معرفی شده است و سیستم توزیع سه‌فاز چهارسیمه به عنوان سیستم زمین‌شده معرفی شده است[۸-۱۱]؛ و در برخی از استانداردهای دریایی به صراحت عنوان شده است که در صورت استفاده از سیستم توزیع چهارسیمه، باید نقطه‌ی نول سیستم، مستقیم به زمین وصل شود[۸، ۹].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌هایی که در این مقاله در رابطه با انواع سیستم‌های توزیع قدرت صورت پذیرفت، مهم‌ترین عوامل انتخاب سیستم توزیع، بحث اضافه ولتاژ و جریان خطا است. با در نظر گرفتن خصوصیات، مزایا و معایب روش‌های توزیع و همچنین، با

در نظر داشتن معیارهای انتخاب یک سیستم کارآمد و مناسب برای شناورهای دریایی، خصوصاً شناورهای نظامی، به نتایج زیر می‌توان دست یافت:

سیستم‌های توزیع زمین‌شده به صورت مستقیم و زمین‌شده با مقاومت کم برای استفاده در شناورهای دریایی تقریباً عملکرد مشابهی دارند. اضافه ولتاژ گذرای این سیستم‌ها کم است، ولی جریان خطای زمین همه‌ی این سیستم‌ها بالا است؛ بنابراین، تشخیص خطا با استفاده از دستگاه‌های حفاظتی آسان است، اما در عوض تداوم سرویس‌دهی سیستم کاهش می‌آید و امکان دارد که در زمان اولین خطای تک‌فاز به زمین، دستگاه‌های حیاتی شناور را از دست بدهیم. پس با توجه به اهمیت پایداری کارکرد دستگاه‌های حیاتی در شناورها، خصوصاً شناورهای نظامی، بهتر است از این نوع سیستم‌های توزیع در شناورهای نظامی استفاده نشود.

سیستم‌های توزیع سه‌فاز زمین‌نشده، زمین‌شده با مقاومت بالا و زمین‌شده از طریق سیم‌پیچ پترسون، با توجه به جریان خطای زمین کم آنها، از لحاظ عملکردی در شناورها تقریباً مشابه هستند؛ اما با توجه به هزینه‌ی بالا و پیچیدگی سیستم‌های توزیع زمین‌شده از طریق سیم‌پیچ پترسون و جریان خطای زمین حدود ۱۰ آمپر در سیستم زمین‌شده با مقاومت بالا، با در نظر گرفتن اهمیت تداوم خدمات و پایداری کارکرد سیستم‌های حیاتی در شناورهای نظامی، سیستم توزیع سه‌فاز زمین‌نشده می‌تواند بهترین نوع سیستم توزیع در شناورهای نظامی باشد.

سیستم توزیع سه‌فاز، چهارسیمه با نول زمین‌نشده، به دلیل اشکال فنی که در جای خود توضیح داده شد، نباید مورد استفاده قرار گیرد.

منابع:

[1] Behniafar, M. B. A., and Darabi, A., “Protection of marine equipment power system for single phase to ground fault,” International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 12-15, Jan. 2012.

[2] Ball, R., and Stephens, G.W., “Neutral earthing of marine electrical power systems,” Trans. I. Mar (TM), Vol. 95, pp. 2-7, 1982.

[3] Mcsweeney, R. J., and Hall, W. A., “Neutral grounding as applied to marine AC system,” AIEE Publication, Vol. 953, pp. 341-348, 1960.

[4] Wang, J., Sumner, M., Thomas, D. W. P., and Geertsma, R. D., “Active fault protection for an AC zonal marine power system,” The Institution of Engineering and Technology, Vol. 1, pp. 156 –166, 2011.

[5] Bruning, A. M., and Lusby, E. W., “Advantages of ungrounded marine electric systems,” AIEE Publication, Vol. 953, pp. 348-363, 1960.

[6] Ahmad, V. K. M. N., “Neutral grounding chapter-26 principles of power systems,” Electrical Engineering Department University of Engineering and Technology Lahore, 2015.

[7] Graphème, “Electrical network protectione,” Protection guide, 2008.

[8] “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), pp. 11, 2015.

[9] “DNV.GL rules for classification ships,” in Electrical installations PT.4, Ch.8, ed. Hamburg: Germanischer Lloyd SE, 2017.

[10] “Military Standard,” in Design Msthods for Naval Shipboard Systems Electric System Load And Powsr Analysis, ed. USA, 1998.

[11] “Iran Defense Standardization center (IDS) 191-4, Missile Fast Patrol Craft,” in Electrical Systems Specifications, ed. Tehran: Iran Defense Standardization Center, pp. 35-36, 2008.