

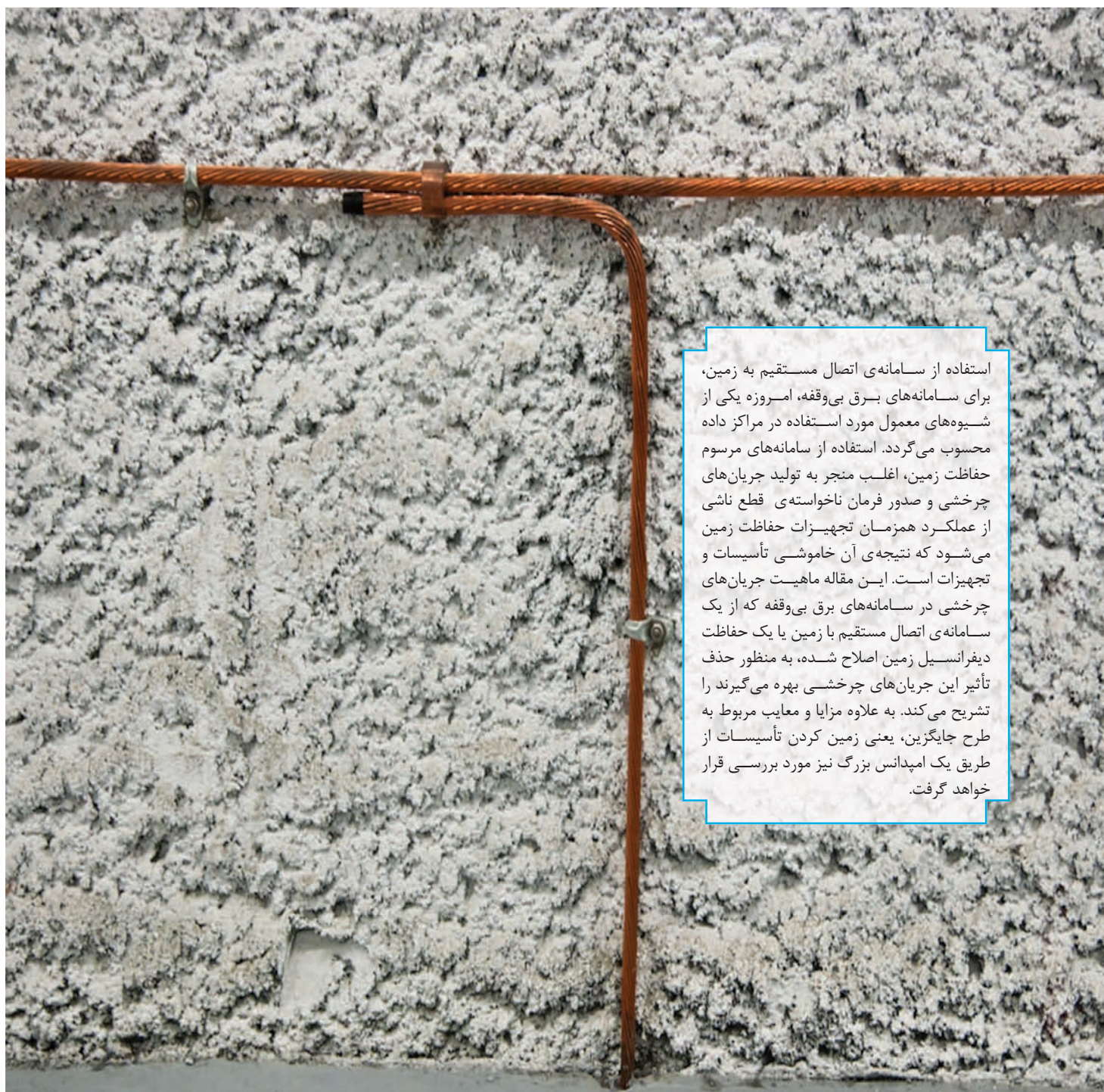
زمین کردن تأسیسات و حفاظت در برابر خطای اتصال کوتاه با زمین

قسمت اول

روش‌های مورد استفاده در تأسیسات برقی
تغذیه شونده با منابع برق بی‌وقفه

واژه‌های کلیدی:
اتصال زمین
تغذیه ی الکتریکی
منبع برق بی‌وقفه
معماری تغذیه

مهندس محمد مهدی مظفر
کارشناس توسعه‌ی محصول شرکت
همندپروگسیل



استفاده از سامانه‌ی اتصال مستقیم به زمین، برای سامانه‌های برق بی‌وقفه، امروزه یکی از شیوه‌های معمول مورد استفاده در مراکز داده محسوب می‌گردد. استفاده از سامانه‌های مرسوم حفاظت زمین، اغلب منجر به تولید جریان‌های چرخی و صدور فرمان ناخواسته‌ی قطع ناشی از عملکرد همزمان تجهیزات حفاظت زمین می‌شود که نتیجه‌ی آن خاموشی تأسیسات و تجهیزات است. این مقاله ماهیت جریان‌های چرخی در سامانه‌های برق بی‌وقفه که از یک سامانه‌ی اتصال مستقیم با زمین یا یک حفاظت دیفرانسیل زمین اصلاح شده، به منظور حذف تأثیر این جریان‌های چرخی بهره می‌گیرند را تشریح می‌کند. به علاوه مزایا و معایب مربوط به طرح جایگزین، یعنی زمین کردن تأسیسات از طریق یک امپدانس بزرگ نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

خاستگاه بحث

۱.۱. آرایش‌های مختلف زمین کردن

تأسیسات

سه آرایش اصلی برای زمین کردن تأسیسات وجود دارد:

- اتصال مستقیم به زمین؛
- کاملاً عایق نسبت به زمین؛
- اتصال به زمین از طریق یک امپدانس بزرگ؛
- در سامانه‌ی اتصال مستقیم به زمین، اتصال ثابت و مستقیم به زمین.

یک ولتاژ مرجع خط نسبت به زمین را ایجاد می‌کند. در آرایش عایق نسبت به زمین، هیچ‌گونه اتصالی بین تأسیسات الکتریکی و زمین وجود ندارد. در نهایت، در شکل سوم، اتصال به زمین از طریق یک امپدانس بزرگ صورت می‌گیرد که دارای مشخصات مربوط به دو نوع قبلی، بسته به نوع امپدانس (القایی یا مقاومتی) است. در سامانه‌ی زمین از طریق یک امپدانس، استفاده از یک مقاومت بالا معمول‌ترین روش

مورد استفاده در تأسیسات فشار ضعیف محسوب می‌شود.

نمونه‌های زیادی در زمینه‌ی نظریه‌ی کاربردی این نوع آرایش زمین کردن وجود دارد. تعدادی از آن‌ها در بخش بعدی مورد بررسی قرار خواهند گرفت (۱) و (۲) را ببینید توصیه می‌شود خوانندگان این منابع را برای اطلاعات بیشتر مطالعه نمایند. در ادامه‌ی بحث، تمرکز ما روی دو آرایش اتصال مستقیم و از طریق یک مقاومت بزرگ به زمین خواهد بود. جدول ۱ مقایسه‌ای بین مشخصه‌های متمایز کننده‌ی آرایش‌های اتصال مستقیم در مقابل اتصال از طریق یک مقاومت بالا به زمین، در تأسیسات سه فاز را انجام داده است. خلاصه‌ی این موارد در زیر بیان شده است:

- آرایش اتصال مستقیم به زمین، ساده‌ترین روش از منظر عملیاتی محسوب می‌شود. زیرا از بارهای ۴ سیمه پشتیبانی کرده و ولتاژ خط به زمین به صورت ذاتی پایدار دارد. با این حال،

این آرایش دارای عیبی نیز هست و آن وجود جریان‌های بزرگ اتصال کوتاه با زمین و نیاز به صدور فرمان قطع در شرایط وقوع اتصال کوتاه با زمین است.

• آرایش اتصال به زمین از طریق یک مقاومت بزرگ، از نظر کاربردی مشکل‌تر است، زیرا ولتاژ خط نسبت به زمین ثابت نبوده و متغیر است. همچنین مقدار مقاومت باید به دقت انتخاب شود تا از اضافه‌ولتاژ گذرای خط به زمین، بیش از ۲/۵ برابر مقدار نامی جلوگیری نماید. در ضمن، به منظور جلوگیری از تأثیر مخرب تجهیزات شبکه بر این نوع آرایش زمین، باید آن‌ها را به دقت انتخاب کرد. به هر حال این آرایش زمین دارای مزایایی نظیر جریان اتصال کوتاه با زمین اندک و توانایی ادامه‌ی کار در زمان بروز خطا می‌باشد. در عمل، هر دو نوع این آرایش‌ها، در کاربردهای حساس الکتریکی و به همراه سامانه‌های برق بی‌وقفه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در صورت طراحی مناسب، به خوبی کار خواهند کرد.

جدول ۱. مشخصات یک سامانه‌ی سه فاز با سامانه‌ی اتصال مستقیم و از طریق یک مقاومت بزرگ به زمین

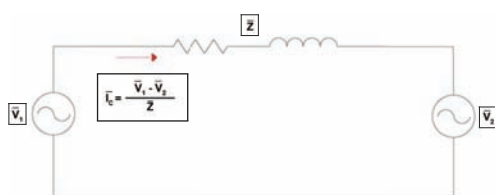
مشخصه	اتصال مستقیم به زمین	اتصال به زمین از طریق یک مقاومت بزرگ
پشتیبانی از بارهای تک فاز	می‌کند	نمی‌کند
پایداری ولتاژ خط به زمین	خوب- به دلیل وجود نقطه‌ی مرجع کاملاً زمین شده. ولتاژ خط به زمین همواره ۵۷/۷٪ ولتاژ خط به خط است.	خوب- اما بستگی به انتخاب مناسب اندازه‌ی مقاومت نسبت به جریان تغذیه کننده‌ی تأسیسات دارد. ولتاژ نامی خط به زمین، در صورت انتخاب مناسب مقاومت، ۵۷/۷٪ ولتاژ خط به خط خواهد بود. بیشینه‌ی ولتاژ گذرای خط به زمین عموماً بین ۲ تا ۲/۵ برابر مقدار نامی خواهد بود. بیشینه‌ی مقدار ولتاژ خط به زمین در شرایط پایدار در مدت زمان اتصال کوتاه یک فاز با زمین ۱۷۳٪ مقدار نامی است
سطح جریان اتصال کوتاه با زمین	بالا	کم
نیاز به قطع مدار در صورت اتصال کوتاه با زمین	بله	خیر- یک خطای اتصال کوتاه به زمین می‌تواند به طور نامحدود ادامه یابد.
تشخیص اتصال کوتاه با زمین	از طریق صدور فرمان قطع	از طریق سامانه‌ی ارسال پالس که امکان تعیین محل یک خطای اتصال کوتاه با زمین را ایجاد می‌کند.
استفاده از TVSS	بله- تمامی حالت‌های حفاظتی	بله- اما تنها با حالت‌های حفاظت خط به خط. سازندگان مناسب TVSS زیادی وجود ندارد.

۲.۳. جریان‌های چرخشی در سامانه‌ی زمین با اتصال مستقیم

برای درک عملکرد مجموعه‌ی نمایش داده شده در شکل ۱ (اتصال مستقیم به زمین)، ابتدا باید به این نکته دقت نمود که اصولاً امکان به وجود آمدن جریان‌های چرخشی در آرایش موازی منابع برق بی‌وقفه با اتصال مستقیم به زمین وجود دارد. این موضوع به طور مفهومی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در شکل ۲، دو منبع ولتاژ از طریق یک امپدانس به یکدیگر متصل شده‌اند. اگر ولتاژ این منابع با یکدیگر متفاوت باشد، یک جریان چرخشی، I_c ، برابر با حاصل تقسیم تفاوت بین ولتاژها بر امپدانس بین آن‌ها به وجود می‌آید. به این نکته توجه داشته باشید که ولتاژها و امپدانس، کمیت‌های برداری بوده و به صورت فازبردار نمایش داده می‌شوند. برای ایجاد جریان چرخشی، وجود اختلاف اندازه یا زاویه‌های فازی، هر یک به تنهایی یا هر دو کافی است. به علاوه وجود هرگونه مؤلفه‌ی هارمونیک در هر یک از منابع ولتاژ، می‌تواند به ایجاد این جریان‌های چرخشی کمک نماید.

در شکل ۳، این موضوع برای دو سامانه‌ی سه فاز ۴ سیمه، با اتصال مستقیم به زمین و با سربرندی ستاره‌ای شکل، نمایش داده شده است. در شکل ۳، Z_p ، نماینده‌ی امپدانس فازی بین دو منبع، Z_p ، نمایانگر امپدانس نول، Z_{G1} و Z_{G2} نشان دهنده‌ی امپدانس زمین بین زمین منابع ولتاژ ۱ و ۲ (شامل تجهیزات رسانی زمین کننده‌ی بین دو منبع) است. در صورت وجود هرگونه اختلاف فاز یا اندازه بین دو منبع ولتاژ، به نحوی که منجر به ایجاد جریان چرخشی در هر فاز، نول و تجهیزات زمین کننده شود، این جریان‌ها به صورت I_{cg} ، I_{cn} ، I_{cc} ، I_{cb} ، I_{ca} نمایش داده خواهند شد.

در صورتی که از بارهای صورت سه سیمه استفاده نشود، دیگر نیازی به استفاده از سیم نول نیست. شکل ۴، جریان‌های چرخشی در دو سامانه‌ی سه فاز با سربرندی ستاره، بدون سیم نول و با اتصال مستقیم به زمین را نشان می‌دهد که به ناچار دارای اختلاف فاز یا اندازه بین ولتاژ (یا اختلاف در محتوای هارمونیک) است.



شکل ۲. نمایش مفهومی جریان چرخشی

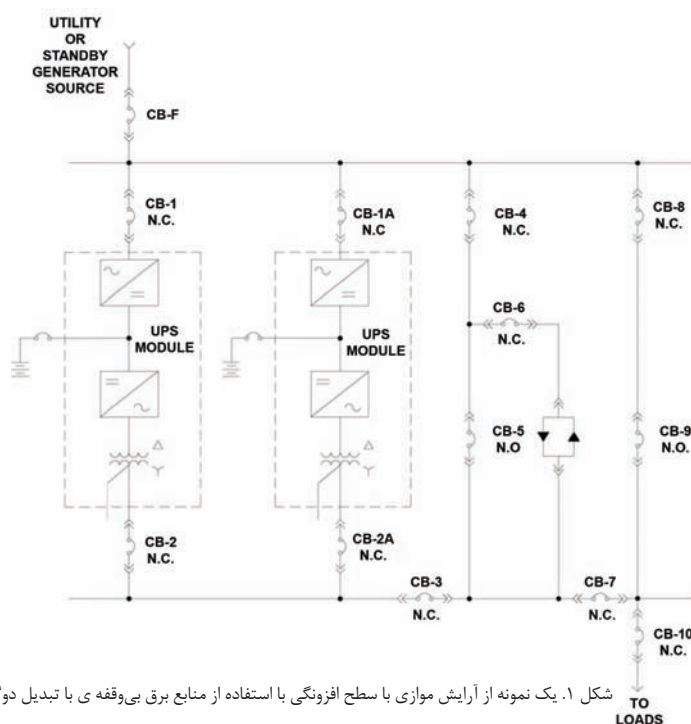
کننده‌ی توان یکسوکنده‌ی متناظر خود هستند و CB-2 و CB-2A مدارشکن‌های اتصال دهنده‌ی ترانسفورماتورهای خروجی متناظر به شبکه‌ی پایین دستی هستند. CB-3 به منظور اتصال شینه‌ی خروجی منبع برق بی‌وقفه به ادامه‌ی مدار استفاده می‌گردد. کلید ایستای مربوط به CB-4، CB-5، CB-6 امکان انتقال خودکار و سریع بار به مسیر کنارگذر منبع برق بی‌وقفه، در صورت بروز خطا در یکی از ماژول‌ها، اضافه بار یا هرگونه خطای دیگر را فراهم می‌کند تا بدین وسیله تداوم تأمین توان مورد نیاز بار را تضمین نماید.

CB-6 امکان جداسازی کامل کلید ایستار را برای تعمیر و نگهداری فراهم می‌کند. CB-7، CB-8 و CB-9 امکان جداسازی کامل شینه‌ی خروجی منبع برق بی‌وقفه از بار به منظور پیاده‌سازی فرآیندهای آزمایش و بررسی یا تعمیر، نگهداری و انتقال همزمان بار به مسیر کنارگذر را فراهم می‌نماید. با این که تعداد منابع برق بی‌وقفه‌ی نشان داده شده در این جا دو عدد است، ولی تمامی اطلاعات بیان شده برای بیش از دو عدد منبع برق بی‌وقفه نیز صادق است. باید به این نکته توجه داشت که اتصالات نول سمت ثانویه‌ی ترانسفورماتورهای خروجی منابع برق بی‌وقفه در شکل ۱ نمایش داده نشده است. کارکردهای این مجموعه با دو سامانه‌ی مختلف زمین، در این جا مورد بحث قرار می‌گیرد.

• در آرایش‌های اتصال مستقیم به زمین، می‌توان و گاهی باید (براساس استاندارد NEC) از تجهیزات حفاظتی شبکه در برابر اتصال کوتاه با زمین استفاده نمود. این در حالی است که در آرایش اتصال به زمین از طریق یک مقاومت بزرگ، نیازی به استفاده از تجهیزات حفاظتی اتصال کوتاه با زمین وجود ندارد.

۲.۱. معماری موازی سامانه‌های برق بی‌وقفه برای دستیابی به افزونگی

سامانه‌های برق بی‌وقفه، عموماً در پایگاه‌های داده‌ی بزرگ به منظور پشتیبانی از ظرفیت و قابلیت اطمینان کل مجموعه، به شکل موازی برای دستیابی به سطح افزونگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ابتدایی‌ترین نمونه‌های این آرایش در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل، ماژول‌های برق بی‌وقفه که هر یک دارای یکسوکنده‌ای برای تبدیل ولتاژ متناوب ورودی به مستقیم، یک شینه‌ی DC با اتصال به یک منبع انبارش انرژی، یک متناوب‌ساز برای تبدیل ولتاژ مستقیم به متناوب کنترل شده و یک ترانسفورماتور مثلث به ستاره در سمت خروجی هستند، نمایش داده شده است. همچنین به منظور سادگی بیشتر، مدارشکن‌های استفاده شده در شبکه، نمایش داده نشده‌اند. CB-F نمایانگر مدارشکن نصب شده در بالادست شبکه و ورودی منبع برق بی‌وقفه است. CB-1A و CB-1A نماینده‌ی مدارشکن‌های تأمین



شکل ۱. یک نمونه از آرایش موازی با سطح افزونگی با استفاده از منابع برق بی‌وقفه‌ی ی با تبدیل دوگانه

زمین در نظر گرفته می‌شود. این جریان به منظور صدور فرمان قطع سریع پس از وقوع اتصال کوتاه با زمین استفاده می‌شود. تجهیز GF نمایش دهنده‌ی وسیله‌ی حفاظتی خطای اتصال کوتاه با زمین است که می‌تواند یک مدار شکن یا رله‌ی حفاظت زمین باشد.

در خیلی از موارد این آرایش به خوبی کار می‌کند. ولی در صورتی که چندین زمین وجود داشته باشد، همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، این آرایش به طور کلی قابل قبول نیست. برای توضیح این موضوع در شکل ۷، از جریان‌های چرخشی نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است. اگر هیچ جریان خطای اتصال کوتاه با زمینی وجود نداشته باشد، در نتیجه هیچ جریانی از داخل تجهیزات حفاظتی نیز عبور نمی‌کند. از معادله‌ی ۲ این گونه برداشت می‌شود که جریان‌های چرخشی برای تجهیزات حفاظت زمین حکم جریان اتصال کوتاه با زمین را دارند و در صورت وجود چنین جریانی بیش از حد معین، این تجهیزات حفاظتی آن را به عنوان جریان اتصال کوتاه تفسیر نموده و مدار را قطع می‌کنند. این موضوع منحصر به سامانه‌های ۴ خطی نیست و می‌توان نشان داد که سامانه‌های سه سیمه‌ی نشان داده شده در شکل ۴ نیز بالقوه دارای این معضل هستند.

شکل ۳. نمایش مفهومی سه فاز جریان‌های چرخشی سامانه‌های ۴ سیمه‌ی سربندی شده به شکل ستاره و زمین شده به طور مستقیم

تأثیر جریان‌های چرخشی روی تجهیزات معمول حفاظتی اتصال کوتاه با زمین

روش‌های مرسوم تشخیص خطای اتصال کوتاه با زمین که تحت عنوان شعاعی نیز شناخته می‌شوند، برای سامانه‌های ۴ سیمه، عموماً شبیه طرح کلی نمایش داده شده در شکل ۶ هستند. در شکل ۶ الف، چهار حسگر تکی جریان و در شکل ۶ ب از یک حسگر توالی صفر استفاده شده است. هدف هر دو آرایش ایجاد جریانی است که برابر مجموع جریان‌های فازی به علاوه‌ی جریان نول است که به عنوان جریان ناشی از اتصال کوتاه با

در این جا باید به این نکته توجه نمود که دیگر مسیری موازی بین نول و سامانه‌ی زمین کننده وجود ندارد و جریان‌های چرخشی به ناچار از طریق مسیر زمین جریان می‌یابد.

در شکل ۵، بیان مشابهی برای دو سامانه‌ی زمین شده از طریق دو مقاومت بزرگ به کار رفته است. اما یک تفاوت اساسی در عملکرد وجود دارد؛ استفاده از مقاومت‌هایی از مرتبه‌ی ۲۵۰ برابر سایر امپدانس‌های موجود در سامانه در مسیر نول زمین، برای کنترل جریان‌های چرخشی. نکته قابل توجه در این جا این است که در شکل ۳، مجموع جریان‌های چرخشی ورودی و خروجی به هر یک از منابع باید صفر باشد که بیان ریاضی آن به صورت زیر است:

(۱) (تنها برای شکل ۳)

$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} + I_{cn} + I_{cg} = 0$$

حذف هر یک از جریان‌های بالا از معادله، موجب صفر نشدن حاصل آن می‌گردد.

(۲) (تنها برای شکل ۳)

$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} + I_{cn} = 0$$

به طور مشابه برای شکل‌های ۴ و ۵ داریم
(۳) (تنها برای شکل ۳)

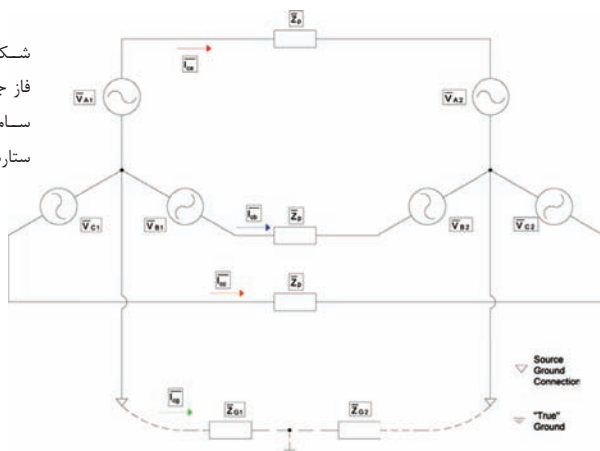
$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} + I_{cg} = 0$$

(۴)

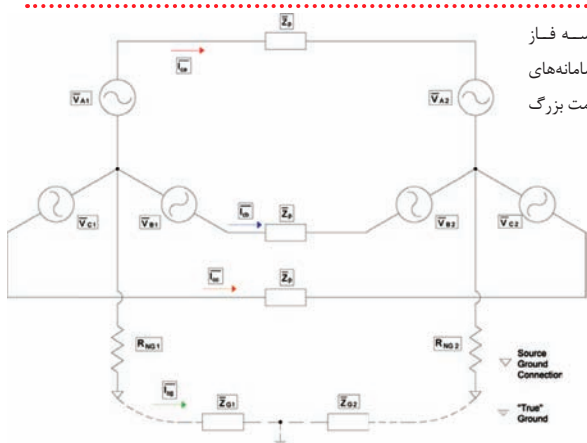
$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} = 0$$

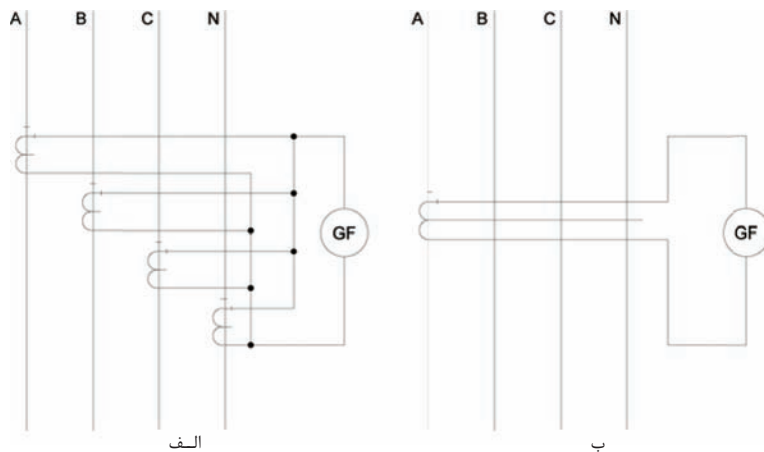
این موضوع، یک مفهوم حیاتی برای درک تأثیر جریان‌های چرخشی روی تجهیزات حفاظتی اتصال کوتاه با زمین محسوب می‌گردد.

شکل ۴. نمایش مفهومی سه فاز جریان‌های چرخشی برای سامانه‌های سه فاز، با سربندی ستاره و اتصال مستقیم به زمین

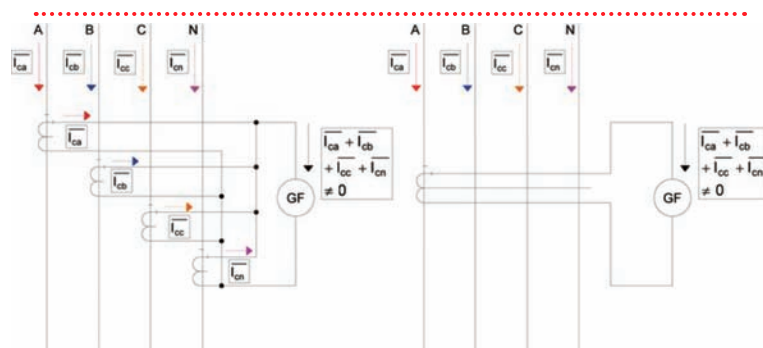


شکل ۵. بیان مفهومی سه فاز جریان‌های چرخشی برای سامانه‌های زمین شده از طریق یک مقاومت بزرگ





شکل ۶ طرح کلی تشخیص خطای اتصال کوتاه با زمین شعاعی
(الف) حسگرهای تکی جریان‌ها (ب) حسگر جریان توالی صفر



شکل ۷ طرح کلی تشخیص خطای اتصال کوتاه با زمین شعاعی شکل ۶ با اعمال جریان‌های چرخشی شکل ۳

نتیجه و مراجع

نبود نول و به تبع نبود هیچ حسگر در مسیر نول، این معماری نیز این مشکل را مرتفع نمی‌کند. برای آرایش‌هایی که از سامانه‌ی زمین از طریق یک مقاومت بزرگ استفاده می‌کنند، همان گونه که در شکل ۵ نمایش داده شده است، می‌توان انتظار داشت که جریان‌های چرخشی در مسیر زمین کاهش یابد. نشانگر خطای زمین علاوه بر قطع مدار، به همراه سامانه‌های زمین از طریق یک مقاومت بزرگ نیز استفاده می‌شوند. در این حالت در صورتی که جریان‌های چرخشی زیاد نباشد، سامانه بدون مشکل به کار خود ادامه خواهد داد.

آیا استفاده از تجهیزات ۴ قطبی، مشکل جریان‌های چرخشی در سامانه‌های برقی با چندین منبع و چندین مرجع زمین مختلف را حل می‌کند؟ به این دلیل که این تجهیزات، نول‌ها را از یکدیگر جدا می‌کنند و منابع دیگر با یکدیگر موازی نخواهند بود، پاسخ مثبت است. در صورتی که به هر دلیل منابع با یکدیگر موازی باشند، نقش این تجهیزات ۴ قطبی خنثی می‌شود. بنابراین تجهیزات ۴ قطبی راه حل برای رفع مشکل موازی شدن منابع با زمین‌های جداگانه محسوب نمی‌شود.

مسئله‌ی حفاظت در برابر خطای اتصال کوتاه با زمین در سامانه‌هایی با چندین زمین مختلف، شامل رفع مشکل مربوط به جریان‌های چرخشی و حساسیت‌زدایی از این تجهیزات است. این موارد در منابع [۵] و [۴] بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

- [1] J. Lewis Blackburn, Protective Relaying, Second Edition, New York: Marcel Dekker, 1998, Ch. 7
- [2] R. Tajali, "System Grounding for Mission Critical Power Systems", Design, Issue 10, 2001.
- [3] NFPA 70, 2005 National Electrical Code, Quincy, MA: NFPA
- [4] M. Mosman, R. Tajali, "Optimizing Power System Protection for Data Centers", Pure Power, September 2003
- [5] Swindler, D.L., "Elegant Ground-Fault Solutions for Impossible Problems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp. 117-128, January/February 2001.

