هجدهمین کنفرانس حفاظت و اتوماسیون در سیستم‌های قدرت
دانشگاه صنعتی شاهرود
۱۹ و ۲۰ دی ماه ۱۴۰۲

تحلیل زمین رزونانسی نوترال ترانسفورماتور

مجید کلباسی زاده

[۱] کارشناس ارشد برق سیستم های قدرت ، شرکت توزیع نیروی برق استان اصفهان
Majid.kalbasi@gmail.com

چکیده

به هنگام وقوع خطای زمین نوع سیستم اتصال نقطه نوترال به زمین کمیت‌های اصلی الکتریکی، دامنه و فاز جریان اتصال به زمین و دامنه اضافه ولتاژها در فرکانس‌های گذرای سیستم و فرکانس شبکه برق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سیستم زمین رزونانسی یکی از انواع روش‌های زمین کردن نقطه نوترال ترانسفورماتور در سمت ولتاژ فشار متوسط هست. سیستم زمین رزونانسی به دلیل بهبود تداوم برق‌رسانی به مشترکین از طریق کم کردن مقدار جریان خطای تکفاز به زمین انتخاب‌شده است. سیستم زمین رزونانسی سبب می‌گردد بدون قطع شدن فیدر خطاهای گذرای سیستم برطرف شده و بنابراین احتمال قطعی برق برای مشترکین و همچنین خسارات واردشده به شبکه برق کاهش یابد.

در این نوشتار تحلیل سیستم زمین رزونانسی با بیان مزایا و معایب آن صورت می‌پذیرد و شبیه سازی به کمک نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد بهترین روش اتصال نقطه نوترال ترانسفورماتور به زمین سیم پیچ پترسن بوده و هرچه جریان خطای تکفاز به زمین کوچک‌تر باشد ایمنی بهتری را علاوه بر شبکه برق به نفع انسان در مقابل ولتاژهای لمسی و گامی مهیا می‌سازد.

کلمات کلیدی

سیستم زمین، زمین رزونانسی، سیم پیچ پترسن

۱- مقدمه

سیستم زمین یا گراندینگ یا ارتینگ در لغت عبارت است از اتصال الکتریکی تجهیزات به جرم بزرگ زمین که جرم بزرگ زمین به‌عنوان پتانسیل صفر محسوب می گردد.

سیستم زمین پست های برق به دلایلی نظیر رفع اضافه ولتاژ فازهای سالم ناشی از اتصال کوتاه تکفاز یا عملکرد صحیح رله های حفاظتی یا شکست عایقی ناشی از اضافه ولتاژها و برق‌دار شدن بدنه تجهیزات و درنتیجه خطرات جانی کارکنان پست‌های برق حائز اهمیت هست. لذا به جهت برآورده شدن اهداف فوق نقاط نوترال به شبکه زمین متصل می گردد[۱].

سیستم ها به لحاظ نحوه اتصال نقطه نول به زمین به چند نوع تقسیم می‌گردند که عبارت‌اند از:

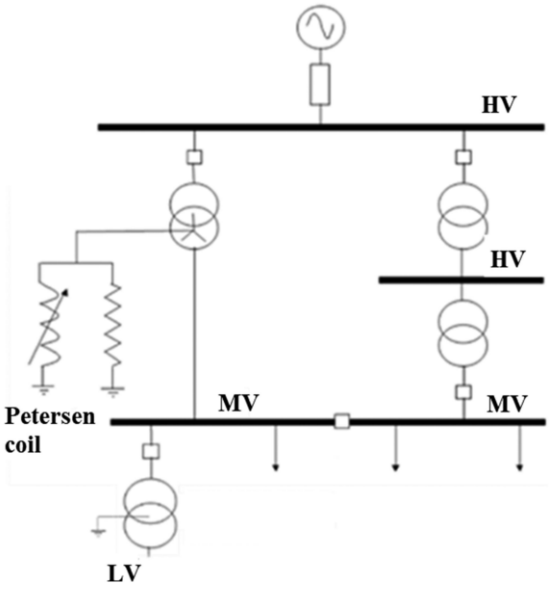
- سیستم های دارای نقطه نول زمین نشده
- سیستم های دارای نقطه نول اتصال به شکل مستقیم به زمین (اتصال از طریق هادی سیم به زمین)
- سیستم های دارای نقطه نول اتصال از طریق مقاومت به زمین
- سیستم های داری نقطه نول اتصال از طریق سیم پیچ به زمین

زمین رزونانسی یکی از روش های ممکن زمین کردن نقطه نوترال تجهیزات سیستم های توزیع در سمت ولتاژ فشار متوسط هست[۲].

استانداردهای IEEE آرایش این نوع سیستم زمین را بیان کرده ولی مزایا و اشکالات و بازخوردهای آن به دلیل استفاده کم هنوز ناشناخته مانده است[۳].

زمین رزونانسی غالباً بانام‌های زمین پترسن یا سیم‌پیچ زمین خفه‌کننده قوس الکتریکی شناخته می‌شود و مفهوم زمین رزونانسی یعنی این که مداری تحت شرایط رزونانس یا تشدید قرار گرفته شده است.

این سیم پیچ بین نقطه نوترال ترانسفورماتور و سیستم زمین مطابق شکل زیر قرارگرفته است[۴].



شکل ۱-۱ سیستم زمین رزونانسی (نوترال زمین شده با سیم-پیچ پترسن سمت ولتاژ فشار متوسط) [۴]

۲- معرفی انواع روش‌های اتصال نقطه نوترال به زمین در سیستم قدرت

۲-۱ اتصال به‌صورت مستقیم یا صلبی

در این اتصال نقطه نوترال ترانسفورماتور به‌صورت مستقیم به سیستم زمین متصل می گردد. این نوع اتصال اگرچه مشکل وقوع اضافه ولتاژهای گذرا را حل می کند ولی به دلیل داشتن مقاومت بسیار کوچک در صورت بروز خطای زمین جریان اتصال کوتاه بسیار بزرگی در سیستم جاری می‌کند و درواقع جریان خطای تکفاز اتصال به زمین در این روش ممکن است از جریان خطای سه فاز تجاوز نماید و همان‌طور که ذکر شد تنها مزیت اصلی استفاده از این نوع روش اتصال به سیستم زمین ، مهار اضافه ولتاژهای گذرا هست[۱].

۲-۲ اتصال به سیستم زمین از طریق مقاومت

در این روش اتصال نقطه نوترال ترانسفورماتور به سیستم زمین از طریق یک مقاومت انجام می‌گیرد. اتصال این مقاومت به سیستم زمین به دو نوع اتصال از طریق مقاومت بالا و اتصال از طریق مقاومت پایین طبقه‌بندی می‌گردد.

اتصال از طریق مقاومت بالا در صنایع کوچک و متوسط جایی که تداوم عملکرد سیستم برق‌رسانی به هنگام خطا موردنیاز است استفاده می‌گردد.
و اتصال از طریق مقاومت کم در سیستم‌های با ولتاژ کم استفاده می‌شود.
از مزیت‌های اتصال با مقاومت کم می‌توان به محدود شدن جریان خطای فاز به زمین و کاهش جریان قوس الکتریکی اشاره نمود.
همچنین از مزیت‌های اتصال با مقاومت بالا نیز می‌توان به افزایش قابلیت تشخیص خطای امپدانس بالا و کاهش جریان‌های قوس الکتریکی و کنترل اضافه ولتاژهای گذرا و رفع خود به خودی بعضی از خطاهای فاز به زمین نیز اشاره نمود[۵].

۲-۳ اتصال به سیستم زمین از طریق راکتانس

در این روش اتصال، نقطه نوترال ترانسفورماتور از طریق یک راکتور با اندوکتانس کم به سیستم زمین متصل می‌گردد.در این نوع اتصال دامنه جریان خطای تکفاز به زمین با تغییر راکتانس به میزان قابل قبولی می‌تواند کاهش یابد.
البته باید اذعان کرد این نوع اتصال نقطه نوترال به سیستم زمین امروزه به دلایل بالا بودن جریان خطای زمین و افزایش شدید ولتاژ گذرا در عملکرد تجهیزات حفاظتی به هنگام وقوع خطای فاز به زمین استفاده نمی‌شود.[۵]

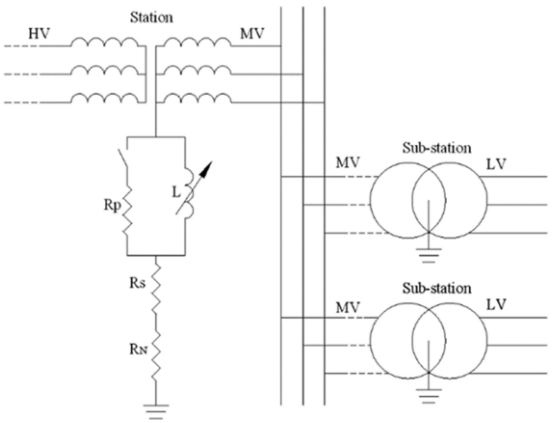
۲-۴ اتصال نقطه نوترال ترانسفورماتور به سیستم زمین از طریق ترانسفورماتور ولتاژ

در این روش اتصال نقطه نوترال ترانسفورماتور از طریق سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور ولتاژ تکفاز به سیستم زمین متصل شده و ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ از طریق یک مقاومت به رله‌ای متصل می‌گردد.
اولیه ترانسفورماتور ولتاژ راکتانس بالایی را مابین نقطه نوترال و سیستم زمین ایجاد کرده بنابراین سیستم در این زمان مانند یک نوترال زمین نشده عمل می‌کند.در صورت اتفاق خطای تکفاز به زمین در هر یک از فازها ثانویه توسط ولتاژ القایی ناشی از خطای فاز به زمین تحریک می‌گردد.این ولتاژ عملکرد تجهیزات حفاظتی را تحریک می‌نماید.این نوع سیستم زمین در ژنراتوری که متصل به ترانسفورماتور افزاینده هست استفاده می‌گردد. مزیت استفاده از این نوع سیستم زمین کاهش اضافه ولتاژهای گذرا و کاهش قوس الکتریکی ناشی از خطای زمین هست[۵].

۲-۵ زمین رزونانسی

سیم‌پیچ پترسن یا سیم‌پیچ خفه‌کننده قوس وسیله‌ای است که مابین نوترال ترانسفورماتور قدرت و سیستم زمین قرارگرفته و به جهت محدود کردن جریان خازنی خطای تکفاز به زمین به هنگام وقوع خطای تکفاز در شبکه فشار متوسط استفاده می‌شود. این روش زمین کردن نقطه نوترال ترانسفورماتور قدرت را زمین رزونانسی می‌نامند. زمین رزونانسی در اروپای مرکزی و اروپای شرقی و کشورهای اسکاندیناوی برای چندین دهه اجرایی شده است. سیم‌پیچ خفه‌کننده قوس در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط شخصی به نام Waldemar Petersen اختراع شده است و به همین دلیل به نام سیم‌پیچ پترسن معروف شده است. سیم‌پیچ پترسن جریان خطا را در شبکه‌های هوایی در حد از بین رفتن و خود نابودی پایین می‌آورد که به‌وسیله این عمل می‌توان همه خطاهای گذرا در شبکه‌های هوایی را بدون قطع فیدر از شبکه پاک نمود. اصول اساسی سیم‌پیچ پترسن از سال ۱۹۱۷ میلادی تاکنون بدون تغییر باقی‌مانده است و نقطه قوت و درخشان آن نرخ پایین خاموشی و قطع فیدر در شبکه‌هایی است که از این تجهیز استفاده‌شده است. استفاده از سیم‌پیچ پترسن در سیستم زمین رزونانسی در ترکیب با تنظیم‌کننده خودکار سیم‌پیچ پترسن و سیستم محل یابی خطای تکفاز به زمین می‌تواند بهترین پیشنهاد جهت حفاظت سیستم قدرت در برابر خطای تکفاز به زمین باشد[۶].

پیاده‌سازی زمین رزونانسی بدین‌صورت است که یک یا چندین نوترال ترانسفورماتورها در سمت فشار متوسط از طریق سیم‌پیچ پترسن که یک سلف متغیر هست به سیستم زمین متصل می‌گردد این سلف متغیر در سیستم زمین رزونانسی در تشدید با ظرفیت خازنی اتصال کوتاه فاز به زمین سیستم تنظیم می‌گردد[۷].



شکل ۲-۱ آرایش کامل زمین رزونانسی[۲]

۳- تحلیل ایمنی

خطای فاز به زمین یکی از ناایمن‌ترین شرایط خطوط هوایی برق رسانی را بر روی شبکه برق رقم می‌زند و دلیل آن این است که مردم در معرض عبور این جریان به زمین هستند. البته این نوع خطای شبکه می‌تواند با نحوه اتصال نوترال ترانسفورماتور به زمین تحت تأثیر قرار گرفته و مهار شود. زمین رزونانسی بر پایه سیم پیچ پترسن یک تکنیک جهت ایمن سازی شبکه در برابر خطاهای تکفاز به زمین است. چراکه این روش، آزادسازی انرژی و عبور جریان بسیار بالا از زمین را محدود نموده و درپی آن خطر ناشی از این اتفاقات را نیز کاهش می دهد. علاوه بر مورد ذکرشده این روش زمین نمودن نوترال به کاهش خاموشی های شبکه به دلیل خطاهای گذرا نیز کمک می کند[۲].

خطاهای تکفاز به زمین در سیستم های با ولتاژ بالا می توانند ولتاژهای خطرناکی را به تأسیسات با ولتاژ فشار ضعیف منتقل کنند. در خارج از پست برق این پتانسیل ممکن است توسط لوله‌ها، نرده‌های فلزی، مدارهای ارتباطی، سیم‌های خنثی ولتاژ پایین و سایر تجهیزات هادی انتقال یابد. خطر به‌طورمعمول از تماس و لمس ناشی می‌شود و خطر انتقال پتانسیل به‌طورکلی هنگامی رخ می دهد که فردی در مکانی دور از محل نصب تجهیزات با ولتاژ بالا ایستاده است و یک هادی یا بدنه هادی تجهیزات متصل به شبکه زمین را لمس می‌کند. این نوع از پتانسیل منتقل‌شده به دلیل پتانسیل بالای ولتاژ لمسی یک مشکل جدی برای قربانی ولتاژ لمسی محسوب می‌گردد[۸].

به‌عنوان یک قاعده کلی می‌توان بیان داشت شبکه زمین رضایت‌بخش که بتواند ولتاژ لمسی را در حد استاندارد نگه دارد می‌تواند ولتاژ گامی را نیز در حد استاندارد نگه دارد و به هنگام وقوع خطا ، ولتاژ لمسی و گامی هر دو در محدوده استاندارد باقی بمانند و این شبکه زمین مسیری جهت عبور جریان مضر به‌جای عبور از بدن می‌گردد و محافظت از قلب انسان را در بردارد[۹].

سیستم زمین رزونانسی سبب می‌گردد دامنه جریان خطای تکفاز به زمین و به دنبال آن ولتاژ لمسی احتمالی و ولتاژ گامی مقدار کمی داشته باشند اگرچه زمان پاک‌سازی خطا تا رفع کامل آن ممکن است کمی زمان‌بر گردد[۱۰].

البته شرکت‌های برقی که روش اتصال نقطه نوترال به زمین را به سیستم زمین رزونانسی تغییر داده‌اند بازطراحی سیستم حفاظتی خود را نیز جهت مقدار جریان خطای زمین و زمان قطع خط به‌طور مثال ۵۰ آمپر و ۱۰ ثانیه بر اساس حساسیت تجهیزات حفاظتی به کار گرفته‌شده نیز انجام داده‌اند[۱۱].

۴- شبیه‌سازی زمین رزونانسی

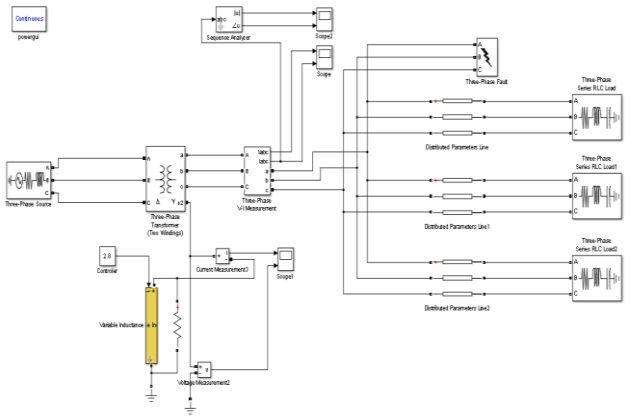
به دلیل تجزیه‌وتحلیل بهتر و مقابله مؤثرتر با اثرات خطای زمین در سیستم قدرت به هنگام وقوع اتصال کوتاه در سیستم زمین رزونانسی، شبیه‌سازی و مدل نمودن سیستم قدرت با استفاده از ابزار سیمولینک نرم‌افزار متلب ضروری به نظر می‌رسد.

داده‌های شبیه‌سازی دلالت بر این موضوع دارد که سیم‌پیچ خفه‌کننده قوس یا سیم‌پیچ پترسن می‌تواند مستقیماً بر کاهش جریان خطای ناشی از اتصال کوتاه فاز به زمین اثرگذار باشد.

اگرچه نقطه نوترال نیرو با وقوع خطای تکفاز به زمین جابجا می‌شود ولی ولتاژ سه خط هنوز متقارن است و ژنراتورهای قدرت و مصرف‌کنندگان برق این خطای تکفاز به زمین را حس نمی‌کنند بنابراین در این مورد باوجود خطای تکفاز به زمین تا مدتی مشخص شبکه به کار خود ادامه می‌دهد و قابلیت اطمینان سیستم قدرت بهبود می‌یابد.

شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب (MATLAB)

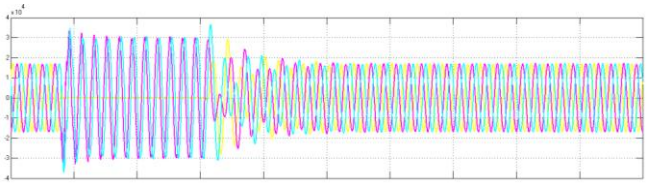
نرم‌افزار SimPowerSystems یک ابزار پیشرفته طراحی است که به محققین و مهندسین اجازه ساخت سریع و آسان مدل سیستم‌های قدرت را می‌دهد. با استفاده از چند کلیک مدل ساخته می‌شود و طرح مدار قابل پیاده‌سازی است. بعلاوه بین مدار الکتریکی با مدل‌های مکانیکی، حرارتی و کنترلی به‌آسانی می‌شود ارتباط برقرار کرد.



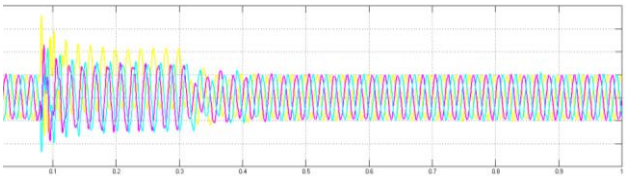
شکل ۴-۱ شماتیک خطای تکفاز به زمین در سیستم زمین رزونانسی

همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشخص‌شده است نقطه نوترال ترانسفورماتور با راکتور سری با اندوکتانس متغیر که این راکتور با کمک المان سلف متغیر و راکتور متغیر جریان AC موجود در کتابخانه مثال‌های نرم‌افزار متلب در مدار قرار داده‌شده است به زمین مرجع متصل شده است که اندوکتانس سلف متغیر توسط تنظیم‌کننده سیم‌پیچ پترسن مشخص می‌گردد. همچنین آمپرمتر و ولت‌متری نیز جهت اندازه‌گیری ولتاژ و آمپر در نقطه نوترال ترانسفورماتور قرار داده‌شده است. ترانسفورماتور قدرت به‌صورت مثلث ستاره با نقطه نوترال با ولتاژ اولیه ۶۳کیلوولت و ولتاژ ثانویه ۲۰ کیلوولت و توان ۲۵۰ کیلوولت آمپر در فرکانس ۵۰ هرتز در نظر گرفته‌شده است.سه فیدر هرکدام با مشخصات بار ۱۰ کیلوواتی در شماتیک قرارگرفته و فیدرها هرکدام به طول ۱۰۰ کیلومتر با مقاومت ۰.۰۱۲۷۳ اهم بر کیلومتر و لندوکتانس ۰.۹۳۳۷ میلی هانری بر کیلومتر و کاپاسیتانس ۰.۰۱۲ میکرو فاراد بر کیلومتر شبیه‌سازی‌شده و خطای تکفاز به زمین با مقاومت ۰.۰۱ اهم در نقطه اتصال کوتاه شبیه‌سازی‌شده است. مقدار راکتور سری در مسیر نوترال به زمین نیز ۲.۸ هانری در نظر گرفته‌شده است. جریان توالی صفر خطای تکفاز به زمین نیز به کمک تحلیلگر توالی که به‌صورت تحلیلگر توالی صفر پیکره بندی شده است نیز شبیه‌سازی‌شده و نتایج حاصل از این تحلیلگر جریان توالی صفر جهت آشکارسازی وقوع خطای تکفاز به زمین در سیستم زمین رزونانسی بسیار کاربردی هست.

طول مدت شبیه‌سازی ۱ ثانیه در نظر گرفته‌شده است و طول مدت خطا ۰.۳ ثانیه تنظیم‌شده است و روش حل ode15s در نظر گرفته‌شده است. حال پس از اجرای شبیه‌سازی سیگنال‌های به‌دست‌آمده را تحلیل می‌کنیم.



شکل ۴-۲ شکل موج ولتاژ خطای تکفاز به زمین در سیستم زمین رزونانسی



شکل ۴-۳ شکل موج جریان خطای تکفاز به زمین در سیستم زمین رزونانسی

همان‌طور که در شکل ۴-۲ مشخص است ولتاژ فاز معیوب بلافاصله پس از وقوع خطای تکفاز به زمین در نوترال زمین شده با سیم پیچ پترسن زمین رزونانسی صفر شده و ولتاژ دو فاز دیگر به یک‌میزان افزایش داشته است. این امر نشان می دهد به هنگام وقوع خطای تکفاز به زمین باوجود سیم پیچ پترسن در سیستم زمین رزونانسی جابجایی مرکز ستاره در ترانسفورماتور قدرت اتفاق نمی‌افتد. و درنتیجه مصرف‌کنندگان الکتریکی مشترکینی که بر روی فازهای سالم سیستم قدرت هستند با توجه به عدم قطع فیدر در سیستم زمین رزونانسی به کار خود ادامه می‌دهند و دچار افزایش ناگهانی یا افت ولتاژ ناگهانی نمی شوند. و در عمل سیستم زمین رزونانسی پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش داده است.
همچنین همان‌طور که در شکل ۴-۳ مشاهده می‌گردد دامنه جریان خطای تکفاز به زمین بین ۴۰ تا حداکثر ۶۰ آمپر هست و با توجه به جریان بسیار کم در مقایسه با سایر روش‌های زمین کردن نقطه نوترال ازنظر ایمنی سیستم قدرت زمین رزونانسی بسیار بهتر عمل نموده و به دلیل جاری شدن جریان کم در خاک و زمین اطراف محل وقوع خطا، ولتاژهای لمسی و گامی متأثر از ولتاژ به وجود آمده در اثر جاری شدن جریان خطا به حداقل ممکن کاهش می‌یابد و ایمنی افراد واقع در محل خطا در بالاترین سطح نسبت به روش‌های دیگر حفظ می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

سیستم زمین رزونانسی متشکل از یک سیم‌پیچ پترسن هست که در شبکه فشار متوسط بین نوترال ترانسفورماتور و سیستم زمین قرار می‌گیرد. این روش زمین کردن نقطه نوترال ترانسفورماتور سبب می‌گردد جریان ناشی از خطای تکفاز به زمین به کمترین مقدار ممکن در مقایسه با سایر روش‌های زمین کردن نقطه نوترال ترانسفورماتور برسد. علاوه بر این مزایای دیگری نیز از قبیل حفاظت از تجهیزات مشترکین و یافتن محل خطا به هنگام رخداد خطای تکفاز به زمین نیز می‌توان برای سیستم زمین رزونانسی در نظر گرفت.

مراجع

[1] M. Lehtonen and T. Hakola, Neutral earthing and power system protection: earthing solutions and protective relaying in medium voltage distribution networks. ABB Transmit, 1996.

[2] M. Silveira, C. Figueiredo, G. Mello, and S. Machado, "Resonant Grounding Project–More Reliability and Safety in the Overhead MV systems," in AES Sul, LP70–AES Congress on Innovation, Technical Excellence and Sustainable Practice, 2013.

[3] G. Graditi, M. L. Di Silvestre, D. La Cascia, E. R. Sanseverino, and G. Zizzo, "On multi-objective optimal reconfiguration of MV networks in presence of different grounding," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 7, no. 1, pp. 97-105, 2016.

[4] M. Mitolo, R. Musca, M. Tartaglia, and G. Zizzo, "Electrical safety analysis in the presence of resonant grounding neutral," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4483-4489, 2019.

[5] M. A. Salam and Q. M. Rahman, Power systems grounding. Springer, 2016.

[6] S. N. AB, "Swedish Neutral Workshop 2013 Neutral Treatment – Arc Suppression Coil & Earth Fault Protection," 2013.

[7] J. Schlabbach and J. Schlabbach, *Short-circuit currents*. Iet, 2005.

[8] E. B. Joffe and K.-S. Lock, *Grounds for grounding: A circuit to system handbook*. John Wiley & Sons, 2011.

[9] F. Freschi and M. Mitolo, "Currents passing through the human body: the numerical viewpoint," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 826-832, 2016.

[10] M. Mitolo, P. E. Sutherland, and R. Natarajan, "Effects of high fault currents on ground grid design," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 3, pp. 1118-1124, 2010.

[11] C. Italian Standard, "CEI 0-16 "Reference technical rules for the connection of active and passive consumers to the HV and MV electrical networks of distribution Company"," ed: December, 2012.