

ارائه یک راه کار ترکیبی مبتنی بر استفاده همزمان از حلقه های نانو کریستالی و کابل XLPE جهت کاهش اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در پست های فشارقوی گازی

حمیدرضا عزیزپور^۱ محسن جنتی^۲ محمدرضا انصاری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق- مرکز آموزش عالی شهرضا- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

H.Re.azizpour@gmail.com

۲- دانشیار- گروه مهندسی برق- مرکز آموزش عالی شهرضا- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

M.Jannati@shr.ui.ac.ir

۳- استادیار- گروه مهندسی برق- مرکز آموزش عالی شهرضا- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران

M.R.Ansari@shr.ui.ac.ir

چکیده: استفاده از پست های با عایق گاز^۱ در سطوح ولتاژ بالا سیستم های قدرت به خاطر مزیت های متعدد آن از قبیل نیاز به فضای کمتر، مقاومت در برابر آلودگی های محیطی، قابلیت اطمینان بالا و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری متوالی در حال گسترش است. یکی از پدیده هایی که فواصل عایقی داخل محفظه بسته را در این پست ها تهدید می کند وقوع اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع^۲ می باشد. این اضافه ولتاژها در اثر عملکرد کلیدزنی^۳ در پست های با عایق گاز برای تجهیزات داخل پست و متصل به آن خطرناک بوده و در صورت تکرار می تواند به عایق داخلی تجهیزات آسیب برساند. همچنین این اضافه ولتاژهای گذرا در موارد خاص چون ولتاژهای فوق العاده بالا ممکن است آسیب های جدی را به تجهیزات گران قیمت پست وارد نماید. از این رو در این مقاله ضمن بررسی روش های موجود جهت محدود نمودن اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در نقاط مختلف و حساس پست های GIS، یک روش ترکیبی جدید مبتنی بر استفاده همزمان از حلقه های نانو کریستالی در باسبار و دو مسیر کابل XLPE^۴ جهت اتصال ترانسفورماتور قدرت به پست ارائه شده است. نتایج شبیه سازی در سمت ۲۳۰ کیلوولت پست GIS دانشگاه شیراز نشان می دهد که در صورت کلیدزنی در نقاط مختلف، روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به سایر روش ها دارای کمترین دامنه اضافه ولتاژها می باشد. با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی، دامنه اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در پایانه ترانسفورماتور قدرت شبکه تحت مطالعه به میزان ۵۹/۶ درصد کاهش یافته و این کاهش در دیگر نقاط پست نیز قابل مشاهده است.

واژه های کلیدی: اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع؛ پست های فشارقوی گازی؛ EMTP-RV

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.171

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

نام نویسنده ی مسئول: دکتر محسن جنتی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - اصفهان - شهرضا - دانشگاه اصفهان - مرکز آموزش عالی شهرضا - گروه مهندسی برق

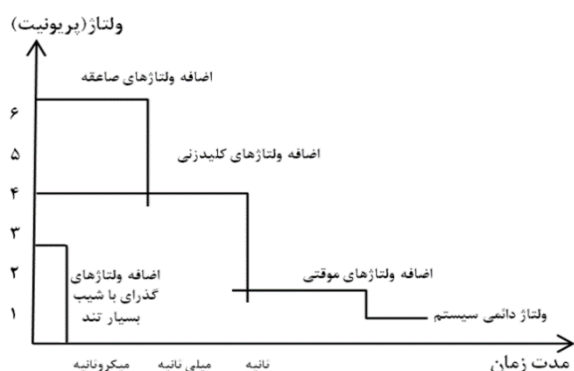
۱- مقدمه

پست‌های فشارقوی از جمله تأسیسات ضروری در شبکه‌های انتقال برق می‌باشند. فناوری رایج در ساخت پست‌ها، استفاده از فضای باز جهت استقرار تجهیزات و بهره‌گیری از خاصیت عایقی هوا است. تأمین زمین برای ایجاد پست، از نظر اقتصادی اهمیت زیادی دارد. در بعضی موارد برای احداث پست در مناطق شهری یا در شرایط و مکان‌های خاص، زمین کافی برای ایجاد پست‌های معمولی وجود ندارد و یا قیمت زمین بسیار بالا است؛ بنابراین صرفه‌جویی در استفاده از زمین منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه اجرای طرح شده و آن را اقتصادی می‌سازد. یکی از گزینه‌های موجود برای کوچک‌تر ساختن ابعاد پست‌ها، ایجاد پست‌های با عایق گاز است [۱]. در این پست‌ها برخلاف پست‌های با عایق هوا^۱، برای ایجاد فواصل عایقی مورد نیاز بین فازهای مختلف و بین فاز با زمین از گاز هگزا فلوراید گوگرد^۲ استفاده شده است. گاز SF_6 به دلیل خواص عایقی فوق‌العاده و خاصیت الکترون‌گاتیو^۳ بودن مولکول‌های آن تنها عایق مساعد برای استفاده در GIS با سطح ولتاژ بالا است [۲]. در دهه اخیر تقاضا برای نصب GIS با ولتاژهای بالا در مناطق صنعتی به دلیل مزایای آن در مقایسه با AIS از جمله نیاز به فضای کمتر، نصب آسان، ایمنی کارکنان و تعمیر و نگهداری کمتر افزایش چشم‌گیری داشته است. اما برخلاف مزایایی که GIS نسبت به AIS دارد، ظهور پدیده گذراهای بسیار سریع در GIS نیاز به توجه کافی دارد. تا دهه ۱۹۷۰ میلادی تمام گذراهای فرکانس بالای سیستم قدرت به‌عنوان گذراهای سریع با محدوده فرکانسی تا چند مگاهرتز شناخته شده بودند؛ اما امروزه با ساخت و استفاده از GIS در سطوح ولتاژ خیلی بالا و فوق‌العاده بالا به علت ابعاد جدید این پست‌ها، گذراهایی با فرکانس‌های در حد چند صد مگاهرتز در این پست‌ها گزارش شده است. منشأ اصلی ایجاد گذراهای بسیار سریع در GIS کلیدزنی است. هرگونه شکست عایقی در GIS منجر به افزایش بسیار سریع دامنه ولتاژ در یک مدت‌زمان بسیار کوتاه شده و در داخل GIS به‌صورت امواج سیار منتشر می‌شود. انعکاس و بازتاب این امواج سیار، اضافه ولتاژهایی با دامنه بالا ایجاد می‌کند. شکست عایقی در داخل GIS به علت عملکرد سکسیونر^۴ یا خطای فاز با زمین^۵ منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع می‌شود [۳]. هیچ استاندارد تأکون در رابطه با دامنه و شکل موج VFTO وجود نداشته؛ اما بر اساس استاندارد IEC این گذراها در رده بالاترین محدوده فرکانسی (بین ۳۰ kHz تا ۱۰۰ MHz) قرار دارند. این اضافه ولتاژها منجر به تخریب عایق تجهیزات موجود در GIS می‌شوند. با توجه به اینکه فرکانس‌های غالب VFTO در محدوده چند مگاهرتز قرار دارند، ممکن است با فرکانس‌های طبیعی ترانسفورماتور قدرت متصل به GIS هم‌خوانی داشته و در نتیجه رزونانس داخلی در ترانسفورماتور رخ دهد [۴].

محققین تاکنون راه‌کارهای مختلف و البته معدودی جهت کاهش اضافه ولتاژهای اشاره‌شده پیشنهاد کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در [۵] استفاده از مقاومت موازی میراکننده در کلید جهت میرا کردن VFTO پیشنهاد شده است. در [۶ و ۳] با استفاده از مقاومت موازی میراکننده در سکسیونر، دامنه VFTO کاهش یافته است. در [۵] حلقه‌های فریت در شرایط ولتاژ پایین آزمایش شده و نتایج نسبتاً مناسبی به همراه داشته است. با این وجود استفاده از آن‌ها در کاربردهای ولتاژ بالا باعث به اشباع رفتن کامل این حلقه‌ها شده است. می‌توان با لایه‌لایه کردن حلقه‌های فریت از به اشباع رفتن آن‌ها در ولتاژهای بالا تا حد مناسبی جلوگیری نمود. در مراجع [۷-۹] استفاده از حلقه‌های نانوکریستالی جهت کاهش VFTO پیشنهاد شده است. آلیاژ مورد استفاده برای ساخت حلقه‌های نانوکریستالی بر پایه آهن با سیلیسیم و بورن و سایر مواد افزودنی است. این مواد برخلاف حلقه‌های فریت در ولتاژهای بالا اشباع نشده و خاصیت میراکنندگی خود را در ولتاژها و شدت میدان‌های بسیار بالا نیز حفظ می‌کنند. حلقه‌های نانوکریستالی نصب‌شده در اطراف هادی‌های GIS دامنه VFTO را بیشتر کاهش داده‌اند. در مرجع [۵] از تشدیدکننده الکترومغناطیسی فرکانس بالا جهت کاهش دامنه VFTO استفاده شده است. طراحی تشدیدکننده فرکانس بالا با ضریب کیفیت پایین موجب پوشش دادن محدوده فرکانسی بیشتری می‌شود. با تنظیم دامنه فرکانسی تشدیدکننده الکترومغناطیسی، با فرکانس غالب VFTO دامنه کاهش یافته است. در [۱۰] با استفاده از فیلترهای RC ترکیبی نوع L و T دامنه VFTO کاهش یافته است. همچنین در [۱۱] سه ساختار فیلتر RC با امپدانس کم در فرکانس‌های بالا برای کاهش VFTO معرفی شده است. در [۱۲] ظرفیت خازنی موازی در پایانه ترانسفورماتور قدرت، برای میرا کردن VFTO در طراحی پست استفاده شده است. خازن موجود در برق‌گیرها و ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی یا خازن‌های اضافی در پایانه ترانسفورماتور می‌تواند در کاهش VFTO مؤثر باشد. در [۱۲] از ۵ متر کابل هوایی در پایانه سمت منبع و از ۱۱ متر کابل هوایی در پایانه سمت بار GIS، استفاده شده است. بررسی‌های انجام‌گرفته تأثیر نوع اتصال‌دهنده به پایانه‌های پست را نشان می‌دهد. در مرجع [۱۳] شکل موج‌های VFTO در سرعت‌های مختلف سکسیونر در ۴ حالت مختلف بررسی شده است. نتایج نشان داده است که سرعت عملکرد سکسیونر و میزان بار ذخیره‌شده به‌شدت بر دامنه و زمان صعود موج VFTO تأثیرگذارند. در [۱۱] با طراحی یک طول مناسب برای باس داکت‌های پست و انتخاب امپدانس موجی مناسب برای باسبار GIS، از انتقال اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع به‌صورت گسترده و با دامنه بالا به سمت ترانسفورماتور قدرت، جلوگیری نموده است. در [۱۴] اتصال یک کابل XLPE به خط هوایی، امواج سیار ایجاد شده در اثر ضربات صاعقه و کلیدزنی را کاهش داده است. در [۱۵] محدودکننده‌های RC برای محافظت از ترانسفورماتورهای

۲-۲- اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در GIS

در GIS انتشار امواج رفت و برگشتی در طول هادی‌ها نسبت به AIS تا چندین برابر بیشتر است. به همین دلیل اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی در GIS نسبت به AIS اهمیت بیشتری دارند. دامنه VFTO به نوع کلید و آرایش پست بستگی دارد. اگرچه دامنه VFTO در سطوح ولتاژ فوق‌العاده بالا کمتر از مقادیر سطح عایقی مبنا است؛ اما تکرار این اضافه ولتاژها می‌تواند عمر عایق‌های سیستم را به طرز قابل‌توجهی کاهش دهد [۱۸]. دامنه اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی حدود $1/5 p.u$ تا $2 p.u$ است و حتی ممکن است تا $2/5 p.u$ نیز برسد. در زمان عملکرد یک سکسیونر معمولی، بدترین حالت برای ایجاد VFTO زمانی است که ولتاژ $1 p.u$ در سمت منبع و ولتاژ $1 p.u$ - در سمت بار سکسیونر وجود داشته باشد. در این شرایط حداکثر دامنه VFTO می‌تواند به $3 p.u$ نیز برسد. شدت اضافه ولتاژهای گذرا در GIS با افزایش سطح ولتاژ افزایش می‌یابد و نیاز به توجه کافی در سطوح ولتاژ بالاتر از $345 kV$ دارد. شکل (۱) نمودار انواع اضافه ولتاژها و دامنه آن‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱)، دامنه VFTO کمتر از $2/5 p.u$ است. حداکثر دامنه VFTO برای تجهیزات ولتاژ بالا در استانداردهای IEC و IEEE پایین‌تر از سطح عایقی مبنا است [۱۹].



شکل (۱): نمودار انواع اضافه ولتاژها و دامنه آن [۱۸]

دلیل اصلی شکل‌گیری VFTO با فرکانس بالا در GIS عملکرد کلیدزنی است. عملکرد کلیدزنی شامل باز و بسته شدن کلید قدرت و سکسیونر است. به علت سرعت عملکرد خیلی کند کنتاکت‌های سکسیونر در مقایسه با کلید قدرت قوس اولیه رخ می‌دهد و قوس‌های مجدد ایجاد می‌شوند. موج سیار ایجادشده، بر اساس تئوری امواج سیار در خطوط انتقال، در دو سمت کلید یا محل وقوع خطا منتشر می‌شود [۱۱]. بر اساس شکل (۲) عملکرد سکسیونر در کنتاکت‌های دو سمت آن، موج سیار گذرا با پلاریته مخالف ایجاد کرده است. خطای فاز با زمین موجب می‌شود موج سیار از نقطه ایجاد خطا در دو سمت محل ایجاد آن، با دامنه یکسان انتشار یابد. امواج سیار بر اساس تئوری امواج سیار و با سرعتی نزدیک به سرعت نور، در طول کم هادی‌های GIS انتشار یافته و در اثر بازتاب‌ها، موج

قدرت در برابر VFTO به‌صورت موازی در پایانه ترانسفورماتور استفاده شده‌اند. مقاومت باعث جذب انرژی VFTO شده و خازن، فرکانس‌های VFTO را کاهش می‌دهد. در [۱۶] بر اساس نتایج شبیه‌سازی، استفاده از فیلتر پایین گذر LC در سطح ولتاژ فشارقوی را به‌عنوان یک روش جدید برای کاهش VFTO مطرح کرده است. فیلتر پایین گذر فشارقوی LC می‌تواند جهت کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و کلیدزنی در شبکه استفاده شود. در [۱۷] تغییر در زاویه ولتاژ در زمان قطع کلید قدرت، باعث تغییر پیک دامنه اضافه ولتاژ ایجادشده در GIS شده است؛ بنابراین قطع کلید در زمان صفر یا پیک ولتاژ می‌تواند در حالت گذرای ایجادشده بسیار تأثیرگذار باشد. همچنین می‌بایست اشاره نمود که در GIS تعدادی از تجهیزات در محوطه بیرونی پست نصب می‌شوند. استفاده از سیم محافظ^۱ جهت حفاظت تجهیزات محوطه بیرونی در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به تجهیزات یا خطوط متصل به پست، یک روش مناسب جهت جلوگیری از ایجاد VFTO در پست است.

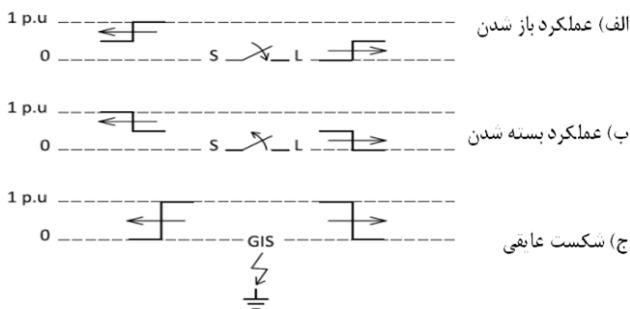
با این‌وجود، تحقیقات در این زمینه همچنان در جریان است. از همین رو در این مقاله یک روش ترکیبی جدید مبتنی بر استفاده همزمان از حلقه‌های نانوکریستالی در باسبار و کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی در پست ۲۳۰ کیلوولت واقعی دانشگاه شیراز کاهش بیشتر این نوع اضافه ولتاژها را با استفاده از این روش نسبت به سایر روش‌ها نشان داده است.

سازمان‌دهی این مقاله بدین‌صورت می‌باشد که: در بخش (۲) انواع گذراها در سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. بخش (۳) به مدل‌سازی پست ۲۳۰ کیلوولت دانشگاه شیراز پرداخته است. در بخش (۴) روش پیشنهادی معرفی و نتایج شبیه‌سازی کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در پست مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV از نظر خواهد گذشت. در انتها نیز نتیجه‌گیری و مراجع به ترتیب در بخش‌های (۵) و (۶) آورده شده است.

۲- گذراها در سیستم قدرت

۲-۱- دسته‌بندی گذراها

گذراها^{۱۱} در سیستم قدرت از نظر منشأ به دو دسته گذراهای ناشی از صاعقه^{۱۲} و گذراهای ناشی از کلیدزنی تقسیم‌بندی شده و همچنین این گذراها از نظر زمان تداوم و محدوده فرکانسی نیز در دو استاندارد IEC60071-4 [۱۸] و IEEE Std C37.122.1 [۱۹] بیان شده‌اند. بر اساس استاندارد IEC60071-1، اضافه ولتاژهای گذرا دارای زمان ظهور بسیار کوتاه در حدود کمتر از چند میلی‌ثانیه بوده و معمولاً به‌سرعت میرا می‌شوند. انواع اضافه ولتاژها بر اساس این استاندارد به‌صورت جدول (۱) دسته‌بندی شده‌اند [۱۷].



شکل (۲): دامنه امواج سیار در حالت باز و بسته شدن کلید و خطای فاز با زمین [۱۱]

۳- مدل سازی پست ۲۳۰/۶۳ kV

با توجه به منشأ و ماهیت سیار موج VFTO، مدل سازی GIS باید بر اساس مدار معادل فشرده عناصر یا پارامترهای گسترده خطوط انجام شود. به طور کلی از عناصر یا پارامترهای فشرده در موارد مربوط به گذراهایی که فوراً در هر نقطه از سیستم قدرت انتشار می یابند استفاده می شود. در این موارد رفتار سیستم قدرت در زمان ایجاد خطا با معادلات دیفرانسیل معمولی توصیف می شود. در حالی که در عناصر یا پارامترهای گسترده باید یک زمان برای موج خطا در نظر گرفته شود.

جدول (۱): دسته بندی انواع اضافه ولتاژها بر اساس استاندارد IEC60071-1 [۱۷]

گذرا			فرکانس پایین		کلاس
با شیب بسیار تند	با شیب تند	با شیب کند	موقتی	دائمی	شکل موج ولتاژ یا اضافه ولتاژ
					محدوده شکل موج ولتاژ یا اضافه ولتاژ
$3 \text{ ns} < T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$	$0.1 \text{ } \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ } \mu\text{s}$	$20 \text{ } \mu\text{s} < T_1 < 5 \text{ ms}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.03 \text{ s} < T_1 < 3600 \text{ s}$	$f = 50-60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	شکل موج ولتاژ استاندارد
(۱)	 $T_1 = 1/2 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ } \mu\text{s}$	 $T_1 = 250 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \text{ } \mu\text{s}$	 $48 < f < 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $f = 50-60 \text{ Hz}$ $T_1(1)$	آزمون استاندارد

باید توسط کمیته مربوطه مشخص بشود

مدل خط انتقال بدون تلفات برای ایجاد مسیر محفظه زمین شده استفاده شود [۲۰].

تمام تجهیزات موجود در GIS براساس ترتیب قرارگیری خود در دیاگرام تک خطی پست مدل سازی شده و تجهیزات داخل سالن GIS به سایر تجهیزات خارجی مانند برق گیر، لاین تراب و ترانسفورماتور ولتاژ خازنی و خطوط انتقال متصل می شوند. هر بخش

سیار پیچیده ای ایجاد شده که اضافه ولتاژهای بزرگتری را در هر نقطه نسبت به نقطه دیگر به وجود می آورد. پس از عملیات کلیدزنی و ایجاد امواج سیار، این امواج در مسیر حرکت خود با ناپیوستگی هایی مواجه می شوند و به نقاطی می رسند که امپدانس مشخصه مسیر تغییر می کند. در این نقاط امواج سیار منعکس شده و در نهایت با روی هم قرار گرفتن چندین باره امواج بازتاب شده، امواج سیار VFTO با قدرتی زیاد روی هادی های داخلی GIS قرار می گیرند [۱۱]. اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع در GIS به دو دسته گذراهای داخلی و خارجی تقسیم می شوند. گذراهای داخلی قابلیت اطمینان تجهیزات فشارقوی مانند ترانسفورماتورها، عایق ها و تجهیزات حفاظتی را کاهش داده و گذراهای خارجی با افزایش ولتاژ زمین گذرا^{۱۳} یا ولتاژ گذرای محفظه^{۱۴} ایمنی کارکنان پست را با خطر مواجه کرده و در مواردی باعث آرک زدگی بین فلنج و محفظه با سیستم زمین پست می شوند. امواج سیار با ایجاد جریان های گذرای بسیار سریع، منبع اصلی ایجاد میدان های الکترومغناطیسی در GIS بوده و باعث ایجاد اختلال در عملکرد تجهیزات کنترلی و حفاظتی می شوند [۱۱].

بنابراین رفتار سیستم در این حالت با معادلات تلگراف توصیف می شود [۱۸ و ۱۹]. برای مدل سازی اثرات داخلی VFTO فقط حالت داخلی بین هادی اصلی و محفظه در نظر گرفته شده و فرض می شود که محفظه فلزی به طور کامل به سیستم زمین متصل است. در مطالعاتی که قصد بررسی اثرات خارجی VFTO را دارند، باید از یک

زمان صعود VFTO به دامنه شدت میدان مغناطیسی در فاصله بین کنتاکت‌ها و قدرت شکست عایقی گاز SF₆ و ضریب h بستگی دارد و از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$t_r = 13.3 \left(\frac{E}{P} \right)_0 . P.h \quad (4)$$

که در آن $\left(\frac{E}{P} \right)_0$ برابر با $860 \frac{1kV}{cm}$ است. k_t ثابت قوس توپلر و فشار گاز SF₆ برابر با ۵ bar به بالا است. روابط (۵) تا (۸) نیز جهت محاسبه اندوکتانس، ظرفیت خازنی، امپدانس موجی شین‌های GIS و سرعت انتشار موج سیار در GIS استفاده شده‌اند:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (5)$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}} \quad (6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu \epsilon}}{2\pi} \approx 60 \ln \frac{R}{r} \quad (7)$$

$$v = \frac{0.95}{\sqrt{L.C}} \quad (8)$$

مقادیر L و C نیز به ترتیب اندوکتانس و ظرفیت خازنی شین هستند. r شعاع خارجی هادی و R شعاع داخلی محفظه GIS و Z امپدانس موجی شین و v سرعت انتشار موج سیار در GIS است [۹]. در زمان بسته شدن کلید در GIS، بین کنتاکت‌ها قوس الکتریکی رخ می‌دهد. رابطه ریاضی مقاومت متغیر قوس به صورت رابطه (۹) است:

$$R(t) = r + R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

که در آن r مقاومت ثابت قوس و R_0 مقاومت بین کنتاکت‌ها در حالت باز بودن کلید و τ ثابت زمانی تأخیر برای شکست عایقی گاز است. مقاومت قوس ایجادشده در یک زمان کوتاه از یک مقدار بسیار زیاد در حدود 10^{12} اهم به یک مقدار کوچک در حدود 0.5 اهم کاهش می‌یابد. جهت مدل‌سازی مقاومت قوس، از یک مقاومت ثابت r برابر با 0.5 اهم به صورت سری با یک مقاومت متغیر که به صورت نمایی بازمان کاهش می‌یابد، استفاده شده است [۲۳].

با توجه به مشخصات تجهیزات و نقشه‌های مربوط به پست، مدل‌سازی تجهیزات و در نهایت GIS با توجه به مدل‌های بیان شده در جدول (۲) انجام شده است. اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی اجزای پست از مشخصات فنی ارائه شده توسط سازنده و سایر تجهیزات فشارقوی متصل به GIS جمع‌آوری شده است.

۴- روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا پست ۲۳۰/۶۳ kV دانشگاه شیراز که از نوع GIS با باسبار دویل است و در موقعیت مکانی شمال شیراز و در نزدیکی دانشگاه شیراز واقع شده است شبیه‌سازی می‌شود. دو خط ۲۳۰ kV از نیروگاه سیکل ترکیبی فارس و پست ۲۳۰ kV سعدی با دو خط انتقال هوایی به این پست وارد می‌شوند. دیاگرام تک‌خطی پست kV

از GIS به عنوان یک خط انتقال بدون تلفات با پارامترهای ثابت و با دو مشخصه مهم امپدانس موجی و زمان سیر موج یا سرعت انتشار موج در نرم‌افزار EMTP مدل‌سازی می‌شود [۲۱]. به دلیل فرکانس بالای VFTO، ظرفیت خازنی تجهیزات در GIS بیشتر نمایان است [۲۲]. از آنجا که سیستم سه فاز متقارن است و هر فاز در این پست در یک محفظه جداگانه قرار دارد، از مدار تک فاز برای مدل‌سازی GIS استفاده شده است. هر بخش از GIS را می‌توان با استفاده از طول فیزیکی و زمان انتشار یا سرعت انتشار موج در آن و امپدانس موجی مدل‌سازی نمود [۲۳]. بر اساس استاندارد IEC62271-4- سرعت انتشار موج در GIS حدود 0.95 تا 0.96 سرعت انتشار نور است [۲۴].

در این بخش، تجهیزات پست GIS بر اساس راهنمای دو استاندارد IEC و IEEE مدل‌سازی شده‌اند. برای مدل‌سازی تجهیزات سه مؤلفه امپدانس موجی، سرعت انتشار موج و طول فیزیکی تجهیزات در نظر گرفته شده است. سرعت انتشار موج VFTO برابر با $285 \text{ m}/\mu\text{s}$ در نظر گرفته شده است [۲۵]. اگر دقت مدل‌سازی تجهیزات بالا باشد؛ می‌توان مقادیر دقیق‌تری از حداکثر دامنه VFTO در نقاط مختلف GIS را در شبیه‌سازی مشاهده نمود. مدار معادل الکتریکی شامل عناصر فشرده و گسترده مداری است. هادی‌های پست می‌توانند به وسیله یک قطعه از خط انتقال ترانسپوز نشده با پارامترهای گسترده با امپدانس موجی مدل‌سازی شوند [۲۶]. امپدانس موجی GIS بین 60 تا 75 اهم و کمتر از خط انتقال هوایی با امپدانس موجی بین 300 تا 400 اهم است. امپدانس موجی کابل‌های XLPE بین 30 تا 60 اهم و سرعت انتشار موج در آن‌ها بین 0.33 تا 0.6 سرعت انتشار نور است. در این مقاله، مطالعه تنها بر روی گذراهای بسیار سریع داخلی صورت گرفته است. برای مطالعه یک گذرای خاص در محدوده فرکانسی 100 MHz مدل‌سازی همه اجزای سیستم قدرت ضروری نیست. به همین دلیل فقط اجزایی که در دامنه فرکانس بالای گذرا تأثیر تعیین‌کننده دارند، باید مدل‌سازی شوند [۲۷]. در زمان کلیدزنی بالاترین دامنه نوسان ولتاژ در اولین قوس از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} V_n \quad (1)$$

که در آن U_1 دامنه ولتاژ قوس اولیه و V_n ولتاژ نامی سیستم قدرت است. بزرگ‌ترین دامنه ولتاژ مشاهده شده در آخرین قوس مجدد از رابطه (۲) به دست می‌آید:





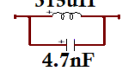
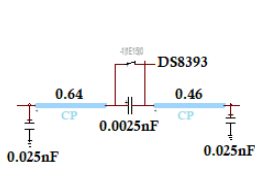
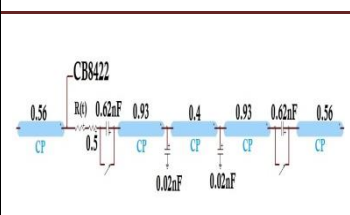
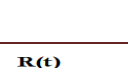
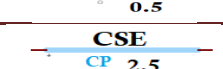
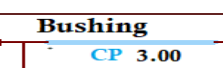
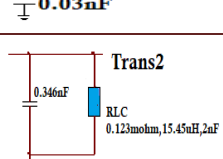
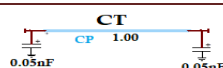


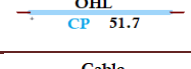
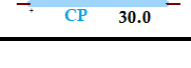
$$U_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} V_n \left(1 + e^{-\frac{1}{2\tau f}} \right) \quad (2)$$

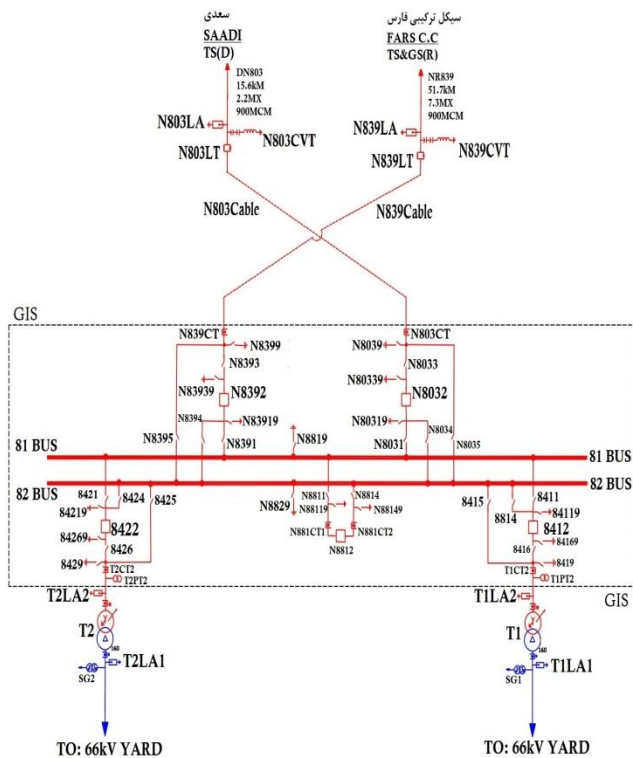
که در آن U_2 دامنه ولتاژ در آخرین قوس مجدد و f فرکانس منبع و τ ثابت زمانی تأخیر باسبار است و با توجه به مقادیر R و C باسبار پست، از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\tau = R.C \quad (3)$$

۲۳۰ دانشگاه شیراز در شکل (۳) نشان داده شده است. تجهیزات این پست همانند پست با عایق هوا به ترتیب پشت سرهم قرار گرفته و ترانسفورماتور قدرت به وسیله یک مسیر کابل هوایی به طول ۵ متر به باس داکت‌های پست با عایق گاز متصل شده‌اند.

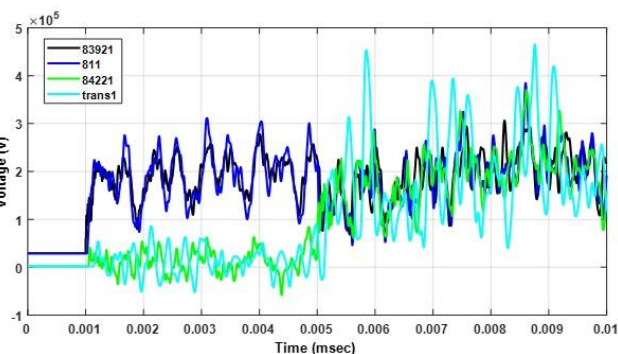
جدول (۲): مدل‌سازی تجهیزات پست گازی مورد مطالعه

تجهیزات	مدار معادل	ملاحظات
باس داکت		خط انتقال بدون تلفات
جداکننده فازی و فلنج		خازن زمین شده ۱۵ pF
خمیدگی		خط انتقال بدون تلف
برق گیر		خازن ۲۰۰ pF
لاین تراپ		مدار LC (سلف ۳۱۵ uH و خازن ۴/۷ nF)
سکسیونر در حالت کلی		(خط بدون تلف ۳۵ اهم و ۰/۶۴ متر سمت منبع) (خط بدون تلف ۳۵ اهم و ۰/۴۶ متر سمت بار) (۲/۵ pF بین کنتاکت) (۲۵ pF با زمین)
کلید قدرت در حال عملکرد		(خط بدون تلف ۵۸ اهم و ۰/۵۶ متر سمت منبع) (خط بدون تلف ۵۸ اهم و ۰/۹۳ متر سمت بار) (خط بدون تلف ۱۶ اهم و ۰/۴ متر) (۶۲۰ pF بین کنتاکت‌ها) (۲۰ pF با زمین)
مدل قوس		مقاومت ثابت و متغیر
حذف کننده کابل		خط بدون تلف با امپدانس ۷۰ اهم
بوشینگ گاز - هوا		امپدانس موجی ۲۵۰ اهم و در سمت هوایی ظرفیت خازنی زمین شده ۳۰ pF
ترانسفورماتور قدرت		خازن زمین شده معادل سیم پیچی و امپدانس بوشینگ
ترانسفورماتور جریان		مدار معادل π (۷۰ اهم و ۰/۰۵ nF)
ترانس ولتاژ خازنی		خازن زمین شده ۴/۸ nF
ترانس ولتاژ مغناطیسی		خازن زمین شده ۱۰۰ pF
کابل هوایی		خط بدون تلف با امپدانس ۳۵۰ اهم
کابل XLPE		خط بدون تلف با امپدانس ۳۰ اهم



شبیه‌سازی هر یک از روش‌های فوق با توجه به ترتیب قرارگیری تجهیزات در شکل‌های (۳) و (۵) و با استفاده از مدل‌سازی‌های جدول (۲) و با کمک نرم افزار EMTP-RV انجام شده است. بدین صورت که در روش اول تنها از یک مسیر کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور قدرت به جای مسیر کابل هوایی استفاده می‌شود. در روش دوم از دو حلقه نانوکریستالی و در روش سوم دو حلقه فریت در هر باسبار نصب می‌شود. در روش چهارم یک حلقه فریت و یک حلقه نانوکریستالی در هر باسبار و یک مسیر کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور قدرت شبیه‌سازی می‌گردد. در روش پنجم نیز یک حلقه فریت و یک حلقه نانوکریستالی در هر باسبار و دو مسیر کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور نصب می‌شود. در روش ششم دو حلقه نانوکریستالی در هر باسبار نصب شده و از یک مسیر کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور استفاده می‌شود. در روش هفتم نیز علاوه بر نصب دو حلقه نانوکریستالی در هر باسبار از دو مسیر کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور قدرت استفاده می‌گردد.

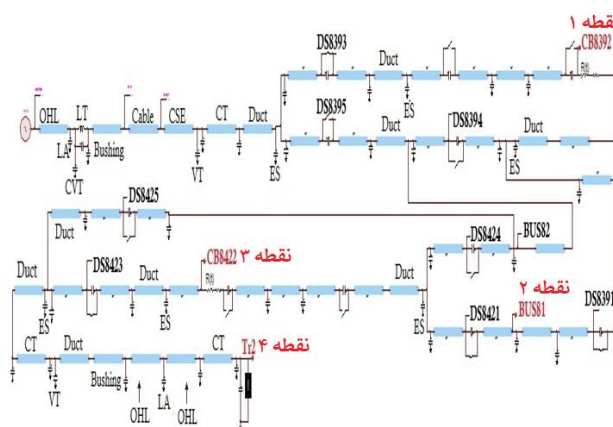
ابتدا شبکه مورد مطالعه بدون استفاده از روش‌های محدودکننده VFTO و بدون بار باقیمانده در نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده و دامنه VFTO بدست آمده در ۴ نقطه مهم شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): شکل موج ولتاژ در نقاط مختلف پست ۲۳۰/۶۳ kV
دانشگاه شیراز در نرم‌افزار EMTP-RV

سپس شبکه بدون استفاده از روش‌های محدودکننده VFTO و با بار ذخیره‌شده ۱- پریونیت در سمت بار کلیدهای ۸۳۹۲ و ۸۴۲۲ شبیه‌سازی شده و دامنه VFTO بدست آمده در نقاط مهم پست در شکل (۷) نشان داده شده است.

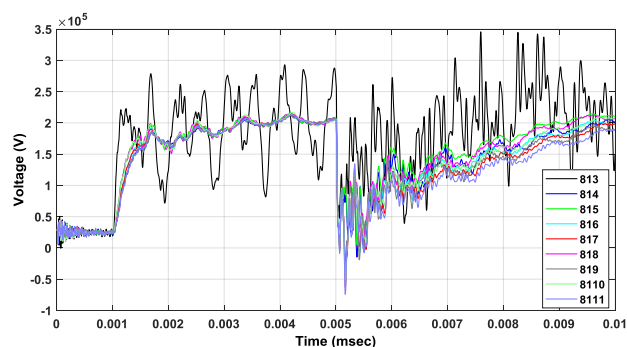
شکل (۵) شبیه‌سازی بخش مورد مطالعه از پست را در نرم‌افزار EMTP-RV نشان می‌دهد. شبیه‌سازی برای عملیات بسته‌شدن کلید قدرت خط (۸۳۹۲) در زمان ۱ میکروثانیه و برق‌دار شدن باسبار ۸۱ و سپس بسته شدن کلید قدرت ترانسفورماتور (۸۴۲۲) در زمان ۵ میکروثانیه و برق‌دار شدن ترانسفورماتور شماره ۲ در نرم‌افزار EMTP-RV انجام شده است. مدت زمان شبیه‌سازی ۱۰ میکروثانیه و گام زمانی ۱ نانوثانیه در نظر گرفته شده است. در این پژوهش شکل موج‌های مربوط به دامنه VFTO در ۴ نقطه مهم، یعنی در محل کلید قدرت ۸۳۹۲ (نقطه ۱)، باسبار ۸۱ (نقطه ۲)، کلید قدرت ۸۴۲۲ (نقطه ۳) و ترانسفورماتور قدرت شماره ۲ (نقطه ۴) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



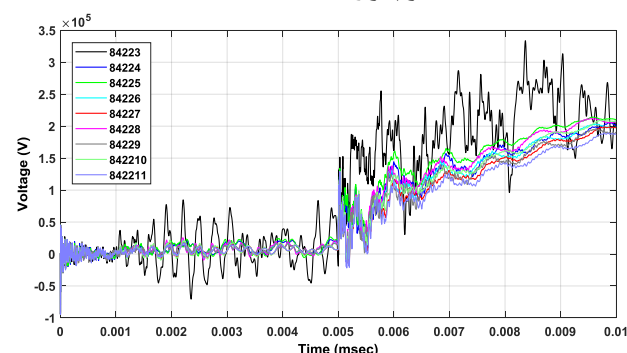
شکل (۵): مدار شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار EMTP-RV

جهت دستیابی به بهترین روش ممکن و کاهش هر چه بیشتر دامنه VFTO، روش‌هایی که در مطالعات پیشین بیشترین کاهش را ایجاد نموده‌اند با هم ترکیب می‌شوند. ۹ روش ترکیبی بررسی شده در این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

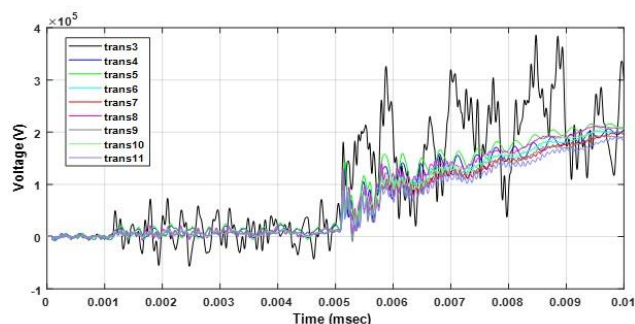
۱. روش یک مسیر کابل XLPE جهت اتصال ترانس به پست،
۲. روش دو حلقه نانو کریستالی-یک مسیر خط هوایی،
۳. روش دو حلقه فریت-یک مسیر خط هوایی جهت اتصال ترانس،
۴. روش یک حلقه فریت-یک حلقه نانوکریستالی-یک مسیر کابل XLPE،
۵. روش یک حلقه فریت-یک حلقه نانوکریستالی-دو مسیر کابل XLPE،
۶. روش دو حلقه فریت-یک مسیر کابل XLPE،
۷. روش دو حلقه نانوکریستالی-یک مسیر کابل XLPE،
۸. روش دو حلقه فریت-دو مسیر کابل XLPE و
۹. روش دو حلقه نانوکریستالی-دو مسیر کابل XLPE.



شکل (۹): دامنه VFTO در نقطه (۲) برای ۹ روش ترکیبی در نرمافزار EMTP-RV

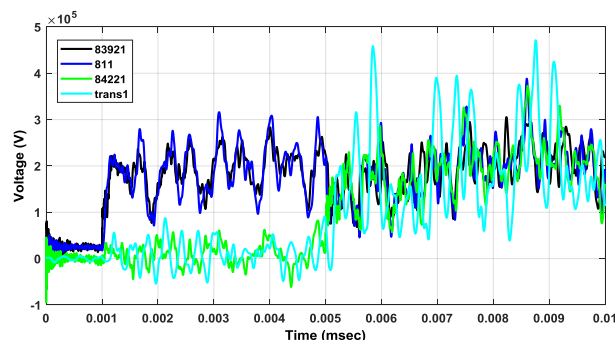


شکل (۱۰): دامنه VFTO در نقطه (۳) برای تمام ۹ روش ترکیبی در نرمافزار EMTP-RV



شکل (۱۱): دامنه VFTO در نقطه (۴) برای تمام ۹ روش ترکیبی در نرمافزار EMTP-RV

با توجه به شکل (۸)، دامنه VFTO در نقطه (۱) با استفاده از روش ترکیبی دو حلقه نانوکریستالی و دو مسیر کابل XLPE از مقدار ۳۰۵ kV به ۲۳۴/۵ kV کاهش یافته است. با توجه به شکل (۹)، دامنه VFTO در نقطه (۲) با استفاده از روش ترکیبی دو حلقه نانوکریستالی و دو مسیر کابل XLPE از مقدار ۳۸۸ kV به ۲۱۲ kV کاهش یافته است. دامنه VFTO در نقطه (۳) با استفاده از روش ترکیبی دو حلقه نانوکریستالی و دو مسیر کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور به پست دارای بیشترین کاهش بوده به گونه‌ای که دامنه VFTO از مقدار ۳۷۲/۹ kV به ۱۸۹/۰۳ kV کاهش یافته است که این مطلب در شکل (۱۰) مشخص می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۱۱)، با استفاده از روش ترکیبی دو حلقه نانوکریستالی و دو مسیر کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور به

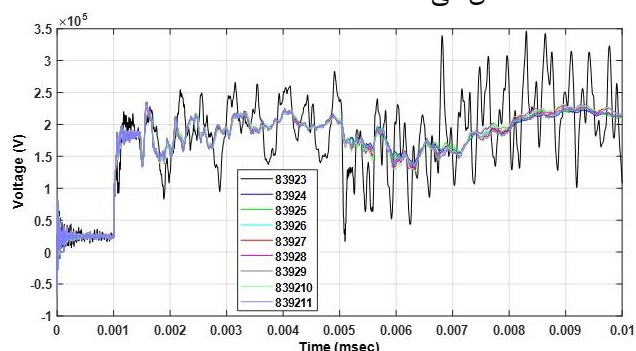


شکل (۷): موج ولتاژ در نقاط مختلف پست ۲۳۰/۶۳ kV دانشگاه شیراز در نرمافزار EMTP-RV

در شکل (۶) در حالتی که از هیچ روش محدود کننده‌ای استفاده نشود (و بدون در نظر گرفتن بار باقیمانده) ولتاژ در نقطه (۱) برابر با ۳۰۶/۳ kV، در نقطه (۲) برابر با ۳۸۴/۷ kV، در نقطه (۳) برابر با ۳۷۰/۶۳ kV و در نقطه (۴) برابر با ۴۶۵ می‌باشد. در شکل (۷) با در نظر گرفتن بار باقیمانده ۱- پریونیت در سمت بار کلیدهای قدرت و بدون اعمال روش‌های محدود کننده، ولتاژ در نقطه (۱) برابر با ۳۰۵/۳ kV، در نقطه (۲) برابر با ۳۸۸/۲ kV، در نقطه (۳) برابر با ۳۷۲/۹ kV و در نقطه (۴) برابر با ۴۷۱/۱ kV رسیده است؛ بنابراین در حالت دوم به علت وجود بار ذخیره شده، اضافه ولتاژ بیشتری در شبکه مورد مطالعه ایجاد شده است.

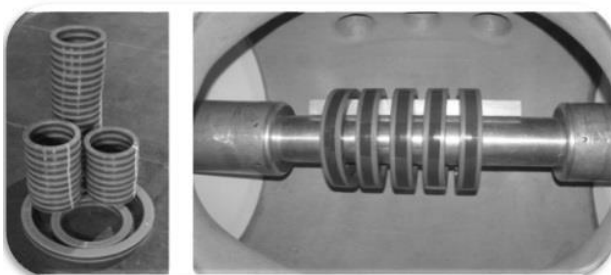
به منظور کاهش دامنه این اضافه ولتاژها در پست، در ادامه به بررسی استفاده از ۹ روش ترکیبی اشاره شده در شبکه مورد مطالعه پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر ۹ روش در ۴ نقطه مهم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل‌های (۸) الی (۱۱) دامنه VFTO را به ترتیب در نقاط (۱) الی (۴) برای هر ۹ روش ترکیبی معرفی شده در محیط EMTP-RV نشان می‌دهند.



شکل (۸): دامنه VFTO در نقطه (۱) برای ۹ روش ترکیبی در نرمافزار EMTP-RV

می‌شوند. آلیاژ مورد استفاده برای ساخت حلقه‌های نانوکریستالی بر پایه آهن با سیلیسیم و بورن و سایر مواد افزودنی است. این مواد دارای خواص بسیار ویژه‌ای بوده و نفوذپذیری مغناطیسی بالایی دارند. همچنین چگالی شار اشباع در این حلقه‌ها بسیار بالا است. این مواد برخلاف مواد فریت در ولتاژهای بالا اشباع نشده و خاصیت میراکندگی خود را در ولتاژها و شدت میدان‌های بسیار بالا نیز حفظ می‌کنند. شکل (۱۲) تصویری از این نوع حلقه‌ها در اطراف هادی‌های پست را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): حلقه‌های نانوکریستالی و کاربرد آن در اطراف هادی‌های پست [۲۲]

بر اساس توضیحات بخش (۱)، هرچه تعداد حلقه‌های نانوکریستالی نصب شده در اطراف هادی‌های پست بیشتر باشد دامنه اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع کاهش بیشتری خواهد داشت. اما با توجه به مراجع [۲۷ و ۱۲]، می‌بایست تعداد بهینه حلقه‌های نانوکریستالی در اطراف هادی‌های پست مورد استفاده قرار گیرند. بر این اساس و با توجه به آزمایش‌های متعدد با تعداد حلقه‌ها و جنس‌های متفاوت در پست ۲۳۰ کیلوولت دانشگاه شیراز، تعداد حلقه‌های نانوکریستالی بهینه جهت نصب در هر باسبار ۲ عدد بوده که دامنه اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع را با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۳) به حد مطلوبی کاهش داده است. همچنین استفاده از کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور قدرت به پست نیز در مقایسه با کابل هوایی و خط گازی^{۱۵} بیشترین کاهش را در دامنه VFTO در پایانه ترانسفورماتور ایجاد نموده و با افزایش طول کابل مقادیر پیک VFTO کاهش می‌یابد. علت این موضوع خاصیت خازنی کابل XLPE نسبت به زمین است که به طور مؤثر دامنه VFTO را کاهش می‌دهد. بنابراین قابل انتظار بود که با ترکیب دو روش گفته‌شده یعنی با نصب دو حلقه نانوکریستالی در هر باسبار و در صورتی که دو مسیر با دو تکه کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور به GIS استفاده شود، دامنه VFTO در نقاط مختلف پست بیشترین کاهش را داشته باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در پست مورد مطالعه، در نهایت دو مسیر با دو تکه کابل XLPE به طول ۲/۵ متر جایگزین کابل هوایی موجود، جهت اتصال ترانسفورماتور به GIS شده و همزمان دو حلقه نانو کریستالی در هر باسبار نصب شده است. دامنه VFTO در نقاط مختلف پست در این شرایط بررسی شده است. این موضوع با

پست، دامنه VFTO از ۴۷۱ kV به ۱۸۹/۹ kV کاهش یافته و حدود ۵۹/۶ درصد کم شده است.

جهت مقایسه بهتر، مقادیر دامنه VFTO در نقاط مختلف پست مربوط به تمام روش‌های بررسی شده در این مقاله برحسب پروینیت در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود دامنه VFTO در حالتی که از دو حلقه نانوکریستالی در هر باسبار و از دو مسیر با دو تکه کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور به پست استفاده شود، در مجموع بیشترین کاهش را نسبت به سایر روش‌های ترکیبی در دامنه اضافه ولتاژهای گذرای بسیار سریع ناشی از کلیدزنی خواهد داشت.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از روش‌های مختلف

روش‌های ترکیبی جهت کاهش VFTO	کلید ۸۳۹۲	باسبار ۸۱	کلید ۸۴۲۲	ترانس ۲
بدون روش محدودکننده و با بار باقیمانده ۱ پروینیت	۱/۶۳	۲	۱/۹۷	۲/۵۱۳
بدون روش محدودکننده	۱/۶۳۶	۱/۹۹	۱/۹۶	۲/۴۸۷
روش یک مسیر کابل XLPE جهت اتصال ترانس به پست	۱/۸۱۴	۱/۸۵۷	۱/۷۶	۲/۰۷۴
روش دو حلقه نانو کریستالی - یک مسیر خط هوایی	۱/۲۴۹	۱/۱۳	۱/۰۹۴	۱/۱۰۱
روش دو حلقه فریت - یک مسیر خط هوایی جهت اتصال ترانس	۱/۲۳	۱/۱۴۲	۱/۱۳۸	۱/۱۵
روش حلقه فریت - حلقه نانوکریستالی - یک مسیر کابل XLPE	۱/۲۲	۱/۱۷۱	۱/۰۹۹	۱/۰۸۶۵
روش حلقه فریت - حلقه نانوکریستالی - دو مسیر کابل XLPE	۱/۲۱۸	۱/۱۵۷	۱/۰۶۵	۱/۰۶۴
روش دو حلقه فریت - یک مسیر کابل XLPE	۱/۲۳	۱/۱۴۴	۱/۱۲۸	۱/۱۲۶
روش دو حلقه نانوکریستالی - یک مسیر کابل XLPE	۱/۲۴۸	۱/۱۳۱	۱/۰۴۱	۱/۰۳۱
روش دو حلقه فریت - دو مسیر کابل XLPE	۱/۲۳	۱/۱۴۵	۱/۱۱	۱/۱۱۹
روش دو حلقه نانوکریستالی - دو مسیر کابل XLPE	۱/۲۴۸	۱/۱۲۸	۱/۰۰۶	۱/۰۱۴
روش فیلتر هیبرید نوع T - یک مسیر خط هوایی	۱/۴۹	۱/۴۸۹	۱/۵۹۷	۱/۶۱۹
روش فیلتر هیبرید نوع L - یک مسیر خط هوایی	۱/۸۲۶	۱/۸۰۲	۱/۸۹۹	۱/۹۱۸

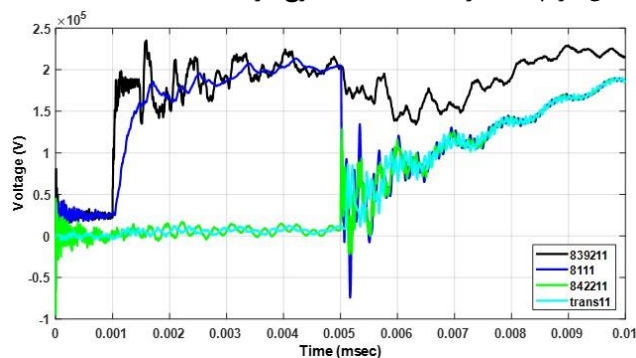
در توجیه مناسب بودن روش پیشنهادی ترکیبی یعنی استفاده همزمان از دو حلقه نانوکریستالی و دو مسیر کابل XLPE جهت اتصال ترانسفورماتور به پست می‌توان چنین استنباط کرد: همان‌گونه که در بخش (۱) نیز اشاره شد، از بین روش‌هایی که در اطراف هادی‌های پست نصب می‌شوند، بیشترین کاهش در دامنه VFTO با نصب حلقه‌های نانوکریستالی در باسبار ایجاد شده است. این حلقه‌ها، همانند حلقه‌های فریت در اطراف هادی‌های داخلی GIS نصب

- [4] IEC 60076-18, "Power Transformer, Part 18: Measurement of Frequency Response", 2012.
- [5] CIGRE AG D1.03, "Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-Insulated UHV Substations", 2012.
- [6] سلمانی، سعید. غلامی، احمد. شهابی، سعید. "بررسی اثر مقاومت وصل بر روی امواج گذرای سریع ناشی از کلیدزنی در پست‌های فشارقوی با عایق گازی"، ششمین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، ایران، ۱۳۰.
- [7] Pathak, N., Bhatti, T.S., Verma, A., "Mitigation and suppression Techniques of Very Fast Transient Over Voltages of a Gas Insulated Substation", IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016.
- [8] Burow, S., Riechert, U., Switzerland Ltd., Kohler, W., Tenbohlen, S., "New mitigation methods for transient overvoltage in gas insulated substation", ABB corporation (Project: VFT in GIS), pp. 1-13, 2012.
- [9] Rahmani, S., Razi-Kazemi, A.A., "Investigation of Very Fast Transient Over Voltages in Gas Insulated Substations", Journal of Informatics and Computer Engineering (JICE), Vol. 2(4), pp. 150-156, 2016.
- [10] Shah, J.P., Talati, S., "Modeling and Analysis of Very Fast Transient Overvoltages in 400 kV GIS", 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), IEEE, 2019.
- [11] Babaeilaktarashani, M., "A New Cost Effective Approach to Suppress Very Fast Transients on Power Transformers Connected to Gas Insulated Substations", MSc Thesis, Curtin University, 2016.
- [12] Abd-Allah, M.A., Said, A., Badran, E.A., "New Techniques for VFT Mitigation in GIS", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 4(2), pp. 179-192, 2014.
- [13] Rama Rao, J., Ramakrishna, A., "Experimental study of effect of Disconnector speed on Very Fast transient Over Voltages in a 420kV Gas Insulated Substation", Journal of Electrical Systems, Vol. 16(2), pp. 142-151, 2020.
- [14] Kuczek, T., Florkowski, M., "Modeling of overvoltages in gas insulated substations", ABB Corporate Research Center in Krakow, Poland, pp. 1-4, 2012.
- [15] Han, B., Lin, J., Ban, L., Wang, H., Li, Z., Xiang, Z., "Simulation and Test Study on Very Fast Transient Overvoltage in 1000kV GIS Substation", China Electric Power Research Institute, No.15 Xiaoying East Road, Haidian District, Beijing 100192, China, 2017 2nd Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2017.
- [۱۶] کرمانی، بهزاد. صمدی مقدم، زهرا. شریعتی نسب، رضا. "تحلیل و بررسی روش‌های جدید کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه و کلیدزنی در پست‌های فشارقوی GIS"، سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق، ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۷] خانی، علی. کامیاب، عباداله. ظریف، مهدی. "بررسی حالت‌های گذرای خیلی سریع ولتاژ بالا VFTO در پست‌های GIS و روشی جهت کاهش تأثیر آن‌ها بر ترانس‌های قدرت"، سی و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، ایران، ۱۳۹۹.
- [18] IEC 60071-4, "Insulation Coordination", in Part 4: Computational guide to insulation coordination and modelling of electrical networks, ed : IEC, 2004.

شبیه‌سازی پست دانشگاه شیراز در نرم‌افزار EMTP-RV به صورت شکل (۱۳) خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت تکنولوژی و گسترش روز افزون استفاده از پست‌های GIS در سطح ولتاژهای بالا، کاهش اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی در این پست‌ها بسیار ضروری می‌باشد. روش‌های گوناگونی جهت کاهش اضافه ولتاژها تاکنون معرفی شده است. روش‌هایی که جهت نصب در باسبار استفاده می‌شوند، دامنه VFTO را در نقاط مختلف پست به خوبی کاهش داده و روش‌هایی که در پایانه ترانسفورماتور استفاده می‌شوند، دامنه VFTO را بیشتر در پایانه ترانسفورماتور قدرت کاهش داده و در کاهش دامنه VFTO در سایر نقاط پست تأثیر کمی دارند. در این مقاله به منظور حصول یک روش که دارای بیشترین کاهش در میزان اضافه ولتاژهای گذرا در تمامی بخش‌های یک پست GIS باشد، ۹ روش ترکیبی مختلف پیشنهاد و در نظر گرفته شد. جهت بررسی اثربخشی هر کدام از این روش‌ها، پست واقعی GIS دانشگاه شیراز در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV پیاده‌سازی گردید و ۴ نقطه مهم از این پست جهت کاهش دامنه VFTO انتخاب گردید. نتایج شبیه‌سازی روش‌های ترکیبی مختلف در این پست واقعی نشان داد استفاده هم‌زمان از حلقه‌های نانوکریستالی در باسبار و مسیر موازی کابل XLPE در پایانه ترانسفورماتور قدرت جهت کاهش دامنه VFTO در پست‌های فشارقوی گازی می‌تواند به عنوان بهترین و موثرترین روش جهت کاهش هر چه بیشتر دامنه VFTO مطرح گردد.



شکل (۱۳): شکل موج ولتاژ در نقاط مختلف پست ۲۳۰/۶۳ kV دانشگاه شیراز در نرم‌افزار EMTP-RV

مراجع

- [۱] رضی کاظمی، علی اصغر. "مدلسازی رفتار امواج گذرای القای سطحی (TEV) در پست‌های GIS"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره هجدهم، شماره دوم، ۱۴۰۰.
- [2] Koch, H., "Gas Insulated Substations", John Wiley & Sons-IEEE Press, 2014.
- [3] CIGRE brochure No. 306, "Insulation Coordination for UHV AC Systems", 2013.

- [19] IEEE Std C37.122.1-1993: "Guide for Gas-Insulated Substations", ed. NY: IEEE, 1994.
- [20] Glover, J.D., Sarma, M.S., Overbye, T.J., "Power System Analysis and Design", Fifth.ed: Cengage Learning, 2011.
- [21] Reddy, P.R., Amarnath, J., "Nanocrystalline to Suppress VFTO and VFTC for 245kV Gas Insulated Substations", International Journal of Computer Applications, Vol. 70(13), pp. 1-6, 2013.
- [22] Dhaware, A.M., Potdar, M.S., "Review on mitigation method of VeryFast Transient Overvoltage in Gas Insulated switchgear", Resincap Journal of Science & Engineering, Vol. 1(1), pp. 21-26, 2017.
- [23] Gaikwad, N.S., Tapre, P., "Various Mitigation Techniques for Very Fast Transient Over Voltages in Gas Insulated Substation", International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vol. 3(1), pp. 257-260, 2018.
- [24] Rao, R.D., Zameer, A., "Estimation Of Vfto And Supression Methods In 420kV Gas Insulated Substation", International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 8(9), pp. 1783-1788, 2019.
- [25] Prakasam, K., Kalavathi, M.S., Prabhavathi, D., "Mitigation and Analysis of Very Fast Transient over Voltages (VFTOs) in 765/245kV Gas Insulated Substation (GIS) by Wavelet Transforms", International Journal of Advanced Technolgy in Engineering and Science, Vol. 4(1), pp. 311-321, 2019.
- [26] Sun, S., Tremouille, G., Marquezin, G., Berteloot, T., Vinson, P., Girodent, A., "VFTO Simulation and Testing for 550kV and 800kV GIS Disconnectors", Alstom GRID, China & France, 2014.
- [27] Nam, N.N., "A Simpl Simulation Model for Analyzing Ver Fast Transient Overvoltage in Gas Insulated switchgear", GMSARN International Journal, Vol. 12, pp. 41-46, 2018.

زیر نویس ها

- ¹ Gas Insulated Substations (GISs)
- ² Very Fast Front Transient Overvoltages (VFTOs)
- ³ Switching
- ⁴ Cross-Linked-Polyethylene
- ⁵ Air Insulated Substations (AISs)
- ⁶ Sulfur hexafluoride(SF₆)
- ⁷ Electronegative
- ⁸ Disconnected Switch (DS)
- ⁹ Ground Fault
- ¹⁰ Guard
- ¹¹ Transients
- ¹² Lightning
- ¹³ Transient Ground Potential Rise (TGPR)
- ¹⁴ Transient Enclosure Voltage (TEV)
- ¹⁵ Gas Insulated Line (GIL)