

مدلسازی رفتار امواج گذرای القای سطحی (TEV) در پست‌های GIS

علی اصغر رضی کاظمی^۱

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

Razi.Kazemi@kntu.ac.ir

چکیده: امروزه فضای محدود شهری و نیاز به افزایش تعداد پست‌ها باعث شده است استفاده از پست‌های GIS به دلیل نیاز به مساحت کمتر، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار گردد. یکی از چالش‌های موجود در این نوع پست‌ها، اضافه ولتاژهای بسیار سریع (VFTO) در حین عملیات کلیدزنی می‌باشد. این اضافه ولتاژها در هادی‌های داخل محفظه این پست‌ها ایجاد و شروع به سیر به سمت تجهیزات می‌کنند. نکته جالب توجه، ایجاد اضافه ولتاژ القایی دیگر در همین حین بر روی بدنه فلزی لوله‌های پست GIS است که به آن امواج گذرای سطحی (TEV) اطلاق می‌گردد. این اضافه ولتاژها نیز می‌توانند به تجهیزات مجاور کلید آسیب وارد کرده و از نظر ایمنی نیز پست را دچار اختلال نمایند. این مقاله به تشریح نحوه مدل‌سازی این پدیده‌ها و ارزیابی اثر عوامل متفاوت بر تغییر رفتار آنها می‌پردازد. روابط تحلیلی لازم جهت ارزیابی این پدیده‌ها ارائه خواهد شد و در ادامه، اثر طراحی پست، المان‌های مجاور پست همچون CVT و برقگیر و نوار زمین بر مشخصات این اضافه ولتاژها به وسیله شبیه‌سازی در نرم افزار EMTP-RV مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت اثر مدل‌سازی فرکانس بالای زمین و اهمیت این موضوع در مدل‌سازی این دسته اضافه ولتاژها ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با روش تحلیلی و محدوده گزارش شده در اندازه‌گیری‌های TEV در مراجع تطابق مناسبی نشان داده است. مدل‌سازی و تحلیل رفتار این گذراها به تعیین راهکار جهت حفاظت بهتر تجهیزات در برابر آنها و همچنین طراحی زمین مناسب برای این پست‌ها کمک خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: پست GIS، اضافه ولتاژ گذرا، VFTO، TEV

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.49

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی اصغر رضی کاظمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - سیدخندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

پست‌های GIS امروزه به دلیل مساحت اشغالی کم جهت احداث از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. همچنین، استفاده از این پست‌ها از منظر پدافند غیرعامل و امکان قرارگیری در زیرزمین و طبقات ساختمان‌ها از گزینه‌های با اولویت بالا بشمار می‌آیند. در این پست‌ها به دلیل استفاده از گاز SF_6 با فشار بالا در حدود ۴۰۰ الی ۶۰۰ کیلوپاسکال، امکان کاهش فاصله بین بخش‌های برقدار آن فراهم شده است. بنابراین، تمامی خطوط سه فاز و سایر تجهیزات همانند کلید، CT و ... می‌توانند در فضای محدودتری قرار گیرند. به بیانی، از آنجایی که ولتاژ شکست در گاز SF_6 در حدود ۱۰۰ برابر هوا می‌باشد، تقریباً ابعاد یک پست GIS نسبت به پست‌های سنتی هوایی تقریباً ۰.۱ برابر است. قرارگیری تجهیزات این پست در یک محفظه بسته باعث شده است که زوال تجهیزات ناشی از هوا، رطوبت و آلودگی در این پست‌ها بسیار کمتر از پست‌های هوایی سنتی بوده و نسبت به آنها قابلیت اطمینان بالاتری داشته باشند [۱]–[۳].

اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی سکسیونرها و کلیدهای زمین در این پست‌ها به دلیل وقوع در یک محیط پرفشار گازی، مشخصات متفاوتی نسبت به اضافه ولتاژهای رخ داده در پست‌های هوایی دارند. این اضافه ولتاژها دارای زمان‌خیز در حدود نانو ثانیه و محتوای فرکانسی در حدود چند ده مگاهرتز خواهند بود؛ به همین دلیل به این اضافه ولتاژ VFTO (Very Fast Transient Overvoltage) اطلاق می‌گردند. این پدیده دو اثر داخلی و خارجی دارد. به بیانی این پدیده-های گذرا می‌تواند در داخل پست GIS و از مسیر هادی‌های فاز به سمت تجهیزات روانه شوند (اثر داخلی) یا برروی بدنه از طریق القا انتقال یابند و به سمت تجهیزات سیر کنند (اثر خارجی) که به آن امواج القای سطحی یا TEV (Transient Enclosure Voltage) گفته می‌شود. این گذراها می‌توانند باعث ایجاد خطر شکست و یا خطا در بخش‌های کنترلی و تجهیزات حفاظتی شوند و همچنین، دقت مطالعات گذرا را تحت تاثیر خود قرار دهند. مدلسازی پست GIS به منظور مطالعه این نوع اضافه ولتاژهای بسیار تیز با محتوای فرکانسی بالا متفاوت از پست‌های هوایی معمولی است. در این زمینه مقالات متعددی به چاپ رسیده است که خود نشان دهنده اهمیت موضوع است. مراجع [۱] و [۲] جز مقالات پایه در این زمینه هستند. موارد ارائه شده در این مقالات و مدلسازی‌های آنها در مقالات متعددی استفاده شده است. مشکل اساسی این مقالات، در تحلیل ناقص برخی از موارد و ارزیابی نکردن بخشی از پارامترهای مهم همچون اثر فرکانس بالای زمین است. مرجع [۴] به مدلسازی و ارائه تست‌های آزمایشگاهی معادل TEV در پست‌های GIS پرداخته است. مراجع [۵]–[۷] با توجه به اهمیت موضوع TEV، راهکارهای متنوع اندازه‌گیری این اضافه ولتاژ را ارائه می‌دهند. مرجع [۸]، سعی در تحلیل و بررسی تغییر توپولوژی در پست GIS بر مشخصات TEV

پرداخته است. مرجع [۹] و [۱۰] با استفاده از نرم افزار EMTP اقدام به شبیه‌سازی VFTO در پست‌های GIS نموده‌اند. مقاله [۱۱] به ارزیابی انتشار و انکسار موج‌های سیار ناشی از VFTO در فواصل عایقی اتصالات موجود در پست‌های GIS می‌پردازد. مقاله [۱۲] با مدلسازی مبتنی بر روش خط انتقال پست‌های GIS، اثر بارهای باقی مانده بر اضافه ولتاژهای ناشی از VFTO را ارزیابی می‌کند. گذراهای اضافه ولتاژی در محل اتصالات کابل به پست GIS نیز در [۱۳] ارزیابی شده است. در مقاله [۱۴]، آزمایش‌های متعددی در قالب عملکرد متعدد سکسیونرها در حالت‌های مدار باز، اتصال کوتاه و تحت بار پست‌های GIS انجام شده است. مشخصه‌هایی همچون پیک اضافه ولتاژ و زمان خیز VFTO به صورت آماری تحلیل شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های متعدد TEV در مقاله [۱۵] به صورت آماری ارائه شده است. در این مقاله نشان داده شده است که مابین پیک TEV و ولتاژ شکست عایقی در داخل پست‌های GIS ارتباط معناداری وجود دارد. مقاله‌های [۱۶]–[۱۸] به ارزیابی TEV‌های اندازه‌گیری شده در پست ۳۳۰ کیلوولتی پرداخته است. در این مقاله نشان داده شده است که پیک ولتاژ TEV‌ها می‌توانند تا ۵ کیلوولت و با محتوای فرکانسی تا ۳۵ مگاهرتز باشند.

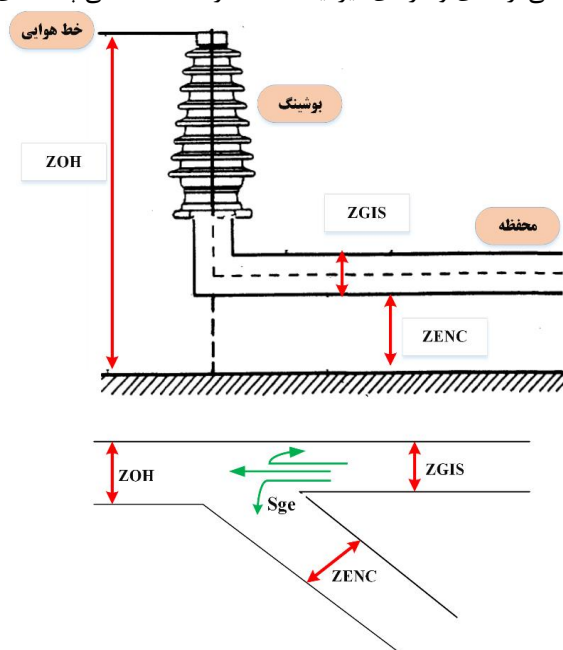
به منظور مهار اضافه ولتاژهای VFTO روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود. با توجه به محتوای فرکانس بالا و زمان خیز کم این امواج، عملاً برقی‌گیر قادر به مهار موثر این اضافه ولتاژها نخواهد بود. در این راستا، استفاده از مقاومت میراکنده در سکسیونرها، استفاده از حلقه‌های فریتی یا رزنانورهای فرکانس بالا از راهکارهای متداول تضعیف این نوع اضافه ولتاژها می‌باشند [۱۹]–[۲۲].

مطالعات انجام شده بیشتر بر روی VFTO متمرکز بوده و تحلیل رفتار TEV کمتر مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. علاوه بر این مورد، اندرکنش مابین ساختار پست‌های GIS، مدل زمین و مشخصات TEV نیاز به تحلیل بیشتر دارد. در این راستا، در این مقاله به مدل-سازی و شبیه‌سازی رفتار TEV در یک پست GIS پرداخته می‌شود. ساختاری از پست GIS در نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثر مکان خطا، ارتفاع پست، فاصله بین لوله‌ها، مدل‌سازی دقیق زمین، وجود و عدم وجود بند زمین (ground strap)، برقی‌گیر و CVT مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق این پدیده نیاز به مدل‌سازی سه فاز و در نظر گرفتن فازهای مجاور خواهد داشت. همچنین نشان داده می‌شود که افزایش ارتفاع و فاصله مابین فازها باعث افزایش اضافه ولتاژهای رخ داده خواهد شد. اهمیت مدل‌سازی زمین و چگونگی تغییر نتایج با در نظر گرفتن مدل فرکانسی زمین تحلیل خواهد شد. نتایج بدست آمده با ایجاد یک شناخت مناسب از رفتار این پدیده کمک شایانی در طراحی‌های دقیق‌تر و حفاظت‌های مناسب برای این پست‌ها خواهد نمود.

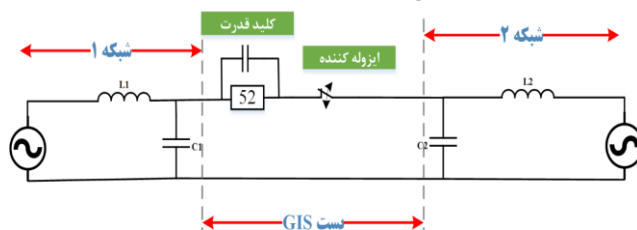
۲- چگونگی ایجاد VFTO/TEV و حل تحلیلی اضافه ولتاژها

ولتاژ در دو سر ایزوله کننده قرار خواهد گرفت (به دلیل افزایش فاصله)، پدیده وصل مجدد می‌تواند رخ دهد. این پدیده می‌تواند چندین مرتبه تا تکمیل فرایند قطع و باز شدن کامل کنتاکت‌ها رخ داده و ایجاد تغییرات ناگهانی ولتاژ نماید. این امواج ولتاژ تیز ناشی از این قطع و وصل‌های مجدد را VFTO می‌نامند.

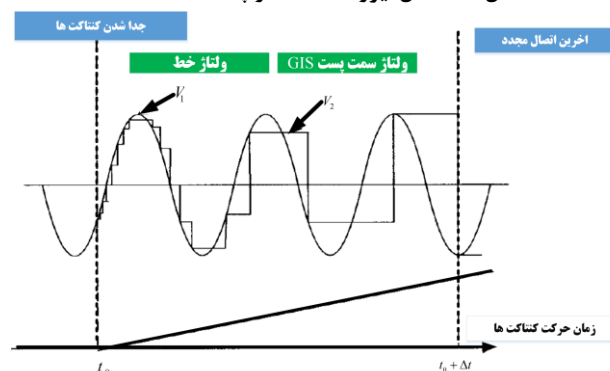
ولتاژ القای سطحی (TEV) که افزایش گذرای پتانسیل زمین (Transient ground potential rise: TGPR) نیز نامیده می‌شود، ناشی از القای ولتاژهای تیز ایجاد شده در قسمت داخلی پست‌های



شکل (۳): مسیرهای سیر موج اضافه ولتاژ VFTO و TEV در یک پست نمونه



شکل (۱): محل ایزوله کننده در پست GIS [۳]



شکل (۲): اختلاف پتانسیل دو سر ایزوله کننده در حین فرایند باز شدن و قطع و وصل‌های مکرر [۳]

GIS است که به بدنه آن مطابق شکل ۳ انتقال می‌یابد [۱]. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در واقع از منظر ولتاژ فرکانس بالای داخلی، سه ناحیه با سه امپدانس موجی قابل توصیف است:

(الف) ناحیه مابین هادی GIS و بدنه آن (Z_{GIS})

(ب) ناحیه مابین بدنه GIS و زمین پست (Z_{ENC})

(ج) ناحیه مابین خط هوایی یا کابل به زمین پست (Z_{OH})

بدنه فلزی لوله‌های پست GIS برای هادی‌های فازهای پست همانند زمین رفتار می‌کند ولی همین بدنه نسبت به زمین پست مثل یک هادی رفتار می‌کند.

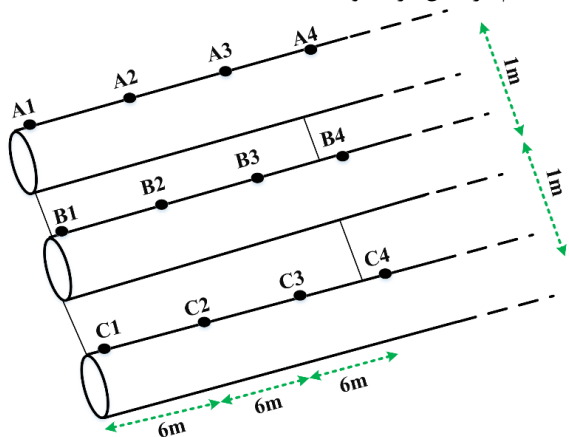
این شبکه با سه خط انتقال با تئوری امواج سیار در خطوط انتقال قابل توصیف بوده و ضرایب انعکاس (Reflection) و انکسار (Refraction) برای آن قابل محاسبه خواهد بود. این ضرایب به صورت یک ماتریس قابل توصیف است. اما عاملی که در مطالعه ولتاژ القای سطحی موثر است، ضریب مرتبط با عبور موج به سمت زمین است که به صورت رابطه (۱) قابل توصیف است:

$$\rho_{tr} = \frac{(Z_{ENC} + Z_{OH})Z_{GIS}}{Z_{ENC} + Z_{OH} + Z_{GIS}} \quad (1)$$

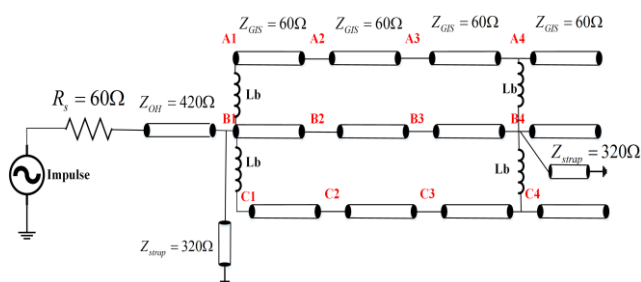
(Prestrike) وجود دارد. هرگاه ولتاژ دو سر کنتاکت‌های ایزوله کننده به اندازه ولتاژ شکست آن گردد، احتمال رخ داد آرک و به بیانی وصل مجدد وجود خواهد داشت. این فرایند باعث تغییر ناگهانی ولتاژ و ایجاد ولتاژهای تیز با زمان‌های خیز در حدود نانو ثانیه و قدرت سیر بالا می‌شود. این اضافه ولتاژها در طی مسیر خود در صورت رسیدن به نقاطی که امپدانس موجی متفاوتی از مسیر سیر داشته باشد، بازتابیده شده و امکان افزایش پیک آنها فراهم می‌شود. شکل ۲ نحوه تشکیل این اضافه ولتاژها را در فرایند قطع یک ایزوله کننده نشان می‌دهد. V_1 و V_2 به ترتیب ولتاژ سمت خط و پست GIS است. زمانی که فرمان قطع صادر می‌شود، اختلاف ولتاژی در دو سر ایزوله کننده ایجاد می‌شود ($V_2 - V_1$). اگر این اختلاف ولتاژ از استقامت عایقی که خود تابعی از فاصله مابین کنتاکت‌ها است و با افزایش فاصله بیشتر می‌شود (شکل ۲- قسمت پایین) تجاوز نماید، آرک یا اتصال مجدد رخ خواهد داد. در این شرایط، ولتاژ پست GIS برای رسیدن به ولتاژ شبکه شروع به تغییر خواهد کرد، این تغییر ولتاژ در بازه زمانی حدود ۴ الی ۵ نانو ثانیه رخ می‌دهد و در همین حین هم یک جریان فرکانس بالایی ایجاد می‌گردد. این جریان بصورت متوالی قطع می‌گردد و در حین قطع ولتاژ پست ثابت خواهد شد و در نقطه دیگر که اختلاف بزرگتری

$$k_s = \frac{2Z_{strap}}{2Z_{strap} + Z_{ENC}} \quad (7)$$

Z_{strap} امپدانس موجی نوار زمین بوده و مقدار آن معمولاً از امپدانس موجی بدنه به زمین (Z_{ENC}) بیشتر است. محدوده این ضریب تضعیف هم در عمل در حدود ۰٫۸ است.



شکل (۴): نمایی از کنار پست سه فاز شبیه‌سازی شده



شکل (۵): مدار معادل شبیه‌سازی شده برای پست مورد مطالعه

۳- شبیه‌سازی پست و تحلیل نتایج

به منظور تحلیل دقیق پدیده‌های گذرا، بخشی از یک پست GIS ۵۰۰ kV مطابق شکل‌های ۳ و ۴ مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱]. زمین پست مورد مطالعه با مقاومت ویژه ۲۰ اهم-متر در نظر گرفته شده است. فاصله مابین لوله‌ها ۱ متر، قطر آنها ۰٫۵ و ارتفاع آنها ۱ متر از سطح زمین می‌باشد. قطر هادی و لوله‌های این پست به ترتیب ۱۸ و ۴۸ سانتی‌متر فرض شده است. ارتفاع خطوط هوایی ۷٫۵ متر و با قطر ۴ سانتی‌متر می‌باشند.

شکل ۵ مدار مدل‌سازی شده از پست GIS در نرم افزار EMTP-RV را نشان می‌دهد. ولتاژ VFTO در این شبیه‌سازی به صورت یک منبع ولتاژ ۲ pu با زمان خیز ۱۰ نانوثانیه و مقاومت ۶۰ اهمی در نظر گرفته شده است. به بیانی این منبع اثر خطایی با ولتاژ ۱ pu را در ترمینال ورودی خواهد داشت. خط هوایی با امپدانس موجی ۴۰۰ اهمی مدل‌سازی شده است. به منظور بررسی اثر سیر موج، هر کدام از فازها در هر شش متر با یک امپدانس موجی خط انتقال مدل‌سازی شده‌اند. همچنین اثرگذاری فاصله بین فازها نیز به صورت اندوکتانس L_b با مقدار $0.1 \mu H$ مدل‌سازی شده است. ادامه پست نیز با طول

در رابطه فوق، ρ_{tr} ضریب انعکاس و بنابراین $1 + \rho_{tr}$ ضریب انکسار خواهد بود. همچنین مقدار پیک ولتاژ بدنه به زمین نیز به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$V_{gr} = -2V_i \left[\frac{Z_{ENC}}{Z_{ENC} + Z_{OH} + Z_{GIS}} \right] = S_{ge} V_i \quad (2)$$

در رابطه فوق، V_i پیک اضافه ولتاژ داخلی در پست GIS و S_{ge} ضریب انتشار موج در محیط مابین لوله و زمین است. علامت منفی در این رابطه بیانگر جهت معکوس این اضافه ولتاژ نسبت به اضافه ولتاژ داخل محفظه پست است. همچنین شایان ذکر است که در حالت ایده‌آل انتظار می‌رود که این اضافه ولتاژ بصورت تابع پله باشد در صورتی که در عمل به دلیل بازتاب‌های موجود در پست و محتوای فرکانس بالای این موج، موج TEV به صورت نوسانی و با محتوای فرکانسی ۵ الی ۵۰ مگاهرتز مشاهده می‌شود. همچنین امپدانس‌های موجی یاد شده در روابط (۱) و (۲) به صورت زیر قابل محاسبه هستند.

الف) امپدانس موجی پست GIS:

$$Z_{GIS} = 60 \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \quad (3)$$

که در آن r_o و r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی است. در عمل معمولاً این مقدار در حدود ۶۰ اهم است.

ب) امپدانس موجی بدنه به زمین:

$$Z_{ENC} = 60 \cosh^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) \quad (4)$$

که در آن h و r به ترتیب ارتفاع لوله و شعاع آن است. این مقدار نیز در عمل حدود ۱۵۰ اهم برای پست‌های ۴۲۰ کیلوولت است.

ج) امپدانس موجی خطوط هوایی:

$$Z_{OH} = 60 \ln \left(\frac{2h_l}{r_l} \right) \quad (5)$$

که در آن h_l و r_l ارتفاع خطوط و شعاع آن می‌باشد. مقدار این امپدانس نیز در عمل برای خطوط فشارقوی حدود ۳۰۰ الی ۴۰۰ اهم است.

با در نظر گرفتن مقادیر حدودی امپدانس‌ها در واقعیت، می‌توان با توجه به رابطه (۲) بیان کرد که حدود ۵۰٪ الی ۶۰٪ اضافه ولتاژ داخلی به سطح منتقل می‌گردد.

یکی از راهکارهای کاهش اثر TEV استفاده از نوار زمین (Ground Strap) است. این نوار یا پایه‌های فلزی از بدنه پست به زمین وصل می‌شوند و با ایجاد یک ساختار T شکل باعث کاهش Z_{ENC} خواهد شد. نوار زمین را می‌توان با یک امپدانس موجی مرتبط با یک خط انتقال با طول h و شعاع r مدلسازی کرد.

$$Z_{strap} = 60 \ln \frac{2\sqrt{2}h}{r} \quad (6)$$

۱۰۰ متر با یک امپدانس موجی مدل شده است. ۱۸ متر اول هر فاز در چهار نقطه با فاصله‌های ۶ متری نام‌گذاری شده و کاملاً مشابه هم هستند.

با توجه به اطلاعات ارائه شده، پارامترهای گذرا به صورت ارائه شده در جدول ۱ محاسبه شده است:

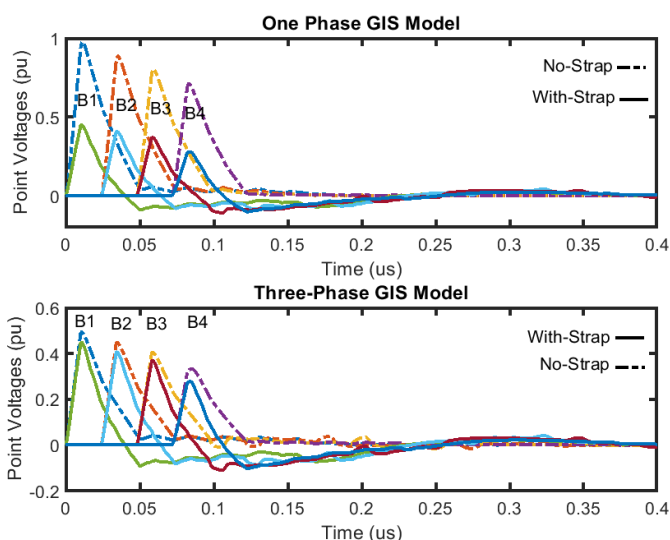
جدول (۱): پارامترهای گذرای محاسبه شده در پست GIS مطالعاتی

پارامترهای گذرا	Z_{GIS} (Ω)	Z_{ENS} (Ω)	Z_{OH} (Ω)	S_{ge}	Z_{strap} (Ω)
مقادیر محاسبه شده	۶۰	۱۲۴	۴۰۰	-۰.۴۲	۳۲۰

۳-۱- تحلیل مدل‌سازی تک فاز و سه فاز و اثر نوار زمین

در این بخش، پست به صورت تک فاز، سه فاز، با حضور و بدون حضور نوار زمین شبیه‌سازی شده است. در این بخش اثر در نظر گرفتن فازهای مجاور (یا باندل کردن فازها) بررسی خواهد شد و اثر عمل‌کرد نوار زمین تحلیل می‌گردد. همانگونه که در جدول ۱ محاسبه شده است، امپدانس موجی نوار زمین حدود ۳۲۰ اهم است. شایان ذکر است که نوار زمین با شعاع ۱۳ میلی‌متر (سطح مقطع 500 mm^2) در این مطالعه فرض شده است.

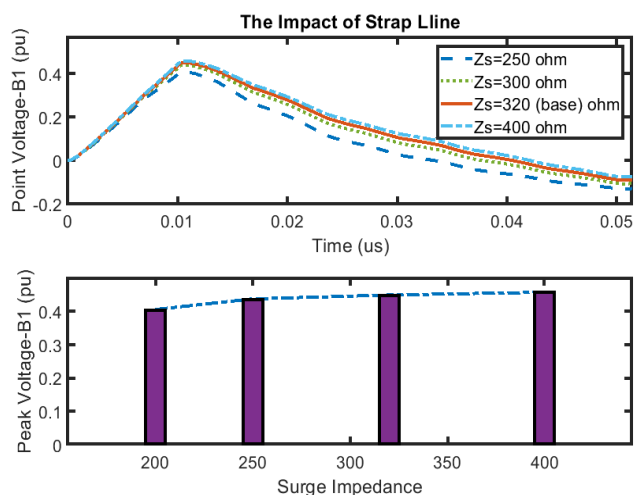
نتایج شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، به دلیل وجود تلفات در مسیر با گذر موج از ترمینال به سمت انتهای پست، دامنه آن کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که این کاهش در هر دو حالت تک فاز و سه فاز در طول مسیر در هر ۶ متر تقریباً ۱۰٪ می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مدل‌سازی سه فاز پست‌های GIS اثر قابل توجهی بر دقت نتایج دارد. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً ۵۰٪ اختلاف مابین مدل‌سازی تک فاز و سه فاز وجود خواهد داشت. همچنین نتایج اثر مثبت اتصال بدنه‌های پست GIS به یک‌دیگر را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده به این صورت قابل ارزیابی خواهد بود که با توجه به رابطه (۲)، (۷) و اطلاعات جدول ۱، میزان TEV منتهی از روش تحلیلی حدود ۸۰٪ الی ۹۰٪ خواهد بود. همچنین اثر نوار زمین حدود ۹۰٪ خواهد بود. با توجه به اعتبار این روابط برای حالت تک‌فاز، همانگونه مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی با تحلیل‌ها تطابق دارد. شایان ذکر است، میزان کاهش اثر نوار زمین در شبیه‌سازی‌ها به دلیل وجود امواج بازگشتی منفی از زمین بیش از مقدار محاسبه شده خواهد شد. همچنین شایان توجه است مقادیر دست‌یافته برای TEV با محدوده‌های اندازه‌گیری شده در مراجع [۱]، [۲] و [۴] تطابق مناسبی دارد.



شکل (۶): ارزیابی مدل‌سازی تک فاز، سه فاز و نوار زمین و اثر آن بر اضافه ولتاژ

در حالت تک فاز و بدون نوار زمین، موج ورودی با دامنه ۲ pu در ورودی خط و در ورودی پست دچار انکسار شده و آنچه در ورودی ترمینال پست قرار می‌گیرد حدود ۱ pu خواهد بود. با قرار گرفتن نوار زمین، با توجه به موازی شدن امپدانس موجی آن با امپدانس پست، ضرایب کاهش و ولتاژ ورودی ترمینال کاهش می‌یابد. همچنین موج کاهش یافته با رسیدن به زمین و بازگشت منفی باعث کاهش بیشتر پیک خواهد شد.

در ادامه با در نظر گرفتن مدل دقیق سه فاز به بررسی تغییر رفتار اضافه ولتاژهای ناشی از تغییر در نوار زمین، مدل زمین، فاصله پست از زمین و فاصله مابین فازها در ورودی ترمینال پرداخته می‌شود



شکل (۷): بررسی اثر تغییر امپدانس موجی نوار زمین بر ولتاژ

۲-۳- بررسی اثر نوار زمین

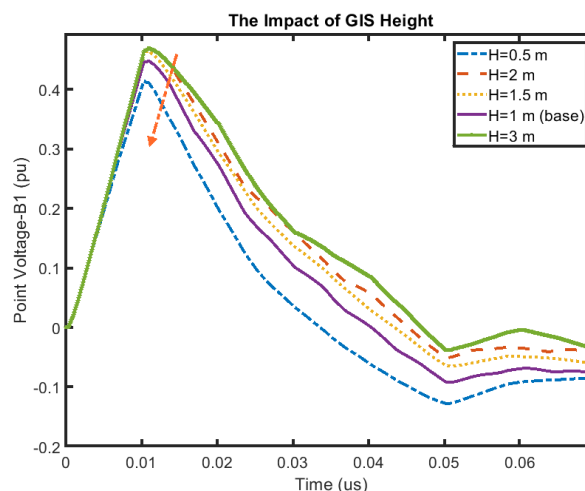
در این بخش نوار زمین‌های متفاوت با سه امپدانس موجی ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ اهم علاوه بر امپدانس موجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داده شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که پیک ولتاژ در صورت تغییرات بزرگ در این امپدانس دچار تغییرات اساسی می‌شود. همچنین، با کاهش امپدانس موجی نوار زمین یا به بیانی، کاهش اندوکتانس آن یا افزایش خاصیت خازنی آن، می‌توان باعث کاهش اضافه ولتاژهای ورودی شود. همچنین افزایش شعاع این نوار با توجه به رابطه (۶) موجب کاهش این امپدانس و اثر مثبت‌تر استفاده از این نوار در مهار اضافه ولتاژها خواهد شد.

۳-۳- بررسی اثر تغییرات ارتفاع لوله‌ها

در این بخش لوله‌های پست علاوه بر ارتفاع ۱ متر، در ارتفاع ۰٫۵، ۱٫۵، ۲ و ۳ متری نیز قرار گرفته و اثر آن‌ها بر اضافه ولتاژهای تولیدی بررسی شده‌است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده‌است، همانگونه که ملاحظه می‌شود کاهش ارتفاع پست باعث کاهش میزان اضافه ولتاژ خواهد شد. در واقعی کاهش ارتفاع باعث کاهش مقدار امپدانس موجی نوار زمین خواهد شد و در نتیجه ضریب تضعیف مرتبط با آن مطابقت رابطه (۷) کمتر خواهد شد. البته باید به این نکته توجه داشت که، بنابر ملاحظات طراحی و جانمایی قطعات، کاهش ارتفاع پست بیش از میزان مشخصی در طراحی امکان‌پذیر نخواهد بود و بایستی از راهکارهای مهار دیگر استفاده کرد.

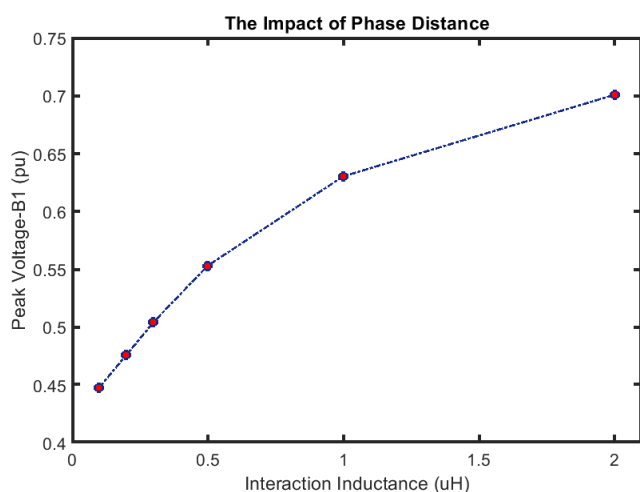
۴-۳- بررسی فاصله میان فازها

اثر القای ما بین فازها با یک سلف ۰٫۱ میکروهنری مدل‌سازی شده است. فاصله کنونی مابین فازها ۱ متر است، با افزایش فاصله مقدار این سلف نیز افزایش پیدا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در شکل



شکل (۸): ارزیابی اثر ارتفاع لوله‌های پست بر اضافه ولتاژ

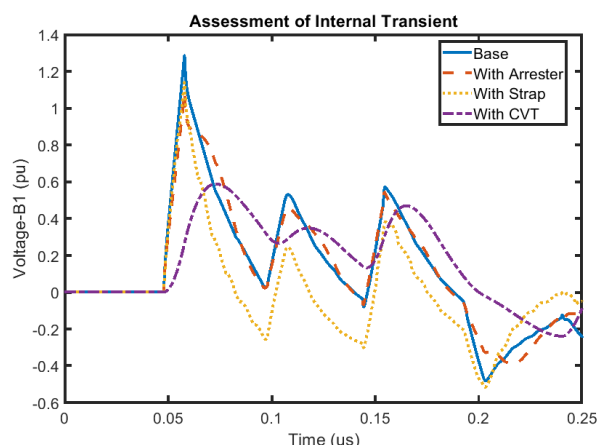
۹ ارائه شده است. همانگونه مشاهده می‌شود، افزایش فاصله مابین فازها باعث افزایش پیک اضافه ولتاژ خواهد شد. دلیل امر این است که با افزایش فاصله مابین فازها، پست GIS رفتار گذرای نزدیک به حالت تک فاز پیدا می‌کند و همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شد، پیک اضافه ولتاژ در حالت تک فاز تقریباً دو برابر حالت سه فاز است. بنابراین با افزایش فاصله، پیک اضافه ولتاژ بیشتر خواهد شد و اثر فازهای مجاور بر میرایی اضافه ولتاژها کمتر خواهد شد.



شکل (۹): بررسی اثر فاصله مابین فازها بر اضافه ولتاژ

۵-۳- ارزیابی اضافه ولتاژ داخلی و سیر آن در پست GIS

تاکنون در شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، فرض بر این بوده است که اضافه ولتاژ از خارج پست GIS به سمت داخل آن در



شکل (۱۰): ارزیابی اضافه ولتاژ داخلی در پست GIS

حال حرکت بوده‌است. در این بخش، سیر موج اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی‌های داخل پست به سمت خارج پست مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر نوار زمین، CVT و برقگیر در ورودی پست بر این اضافه ولتاژها مطالعه می‌شود. به منظور مدلسازی CVT در ترمینال ورودی،

ولتاژهای ورودی پست است و نگاه بعدی افزایش دقت مدل سازی پست است.

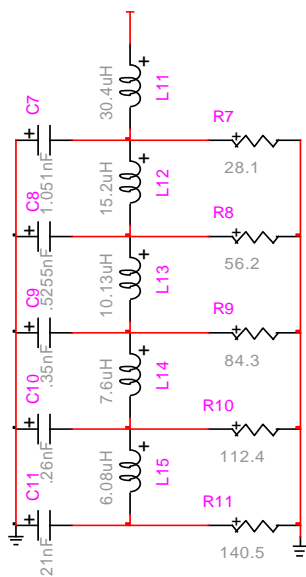
به منظور ارزیابی اثر پارامتر زمین، اضافه ولتاژها در نقطه B1 در حضور برقگیر، CVT و نوار زمین در مقاومتهای ثابت و متفاوت زمین شامل مقاومتهای صفر، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ اهم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، افزایش مقاومت زمین باعث کاهش اثر میرایی بخش های میراکننده سیستم و افزایش زمان خیز امواج گذرا خواهد شد. همچنین مشاهده می شود که محدوده تغییرات زیر ۵ اهم مقاومت زمین موجب تغییرات زیادی بر پیک اولیه نخواهد شد اما بر پیک های بعدی که ناشی از بازتاب امواج است موثر خواهد بود.

شایان ذکر است مدل سازی زمین به صورت مقاومت ثابت، ساده ترین نمونه مدل سازی زمین به شمار می آید. در واقعیت رفتار زمین به صورت امپدانس و تابعی از فرکانس است و به صورت خطی نمی باشد [۱۱] و [۲۳]. بنابراین، از مدل نردبانی شکل ۱۲ استفاده شده است که پاسخ فرکانسی آن نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. شایان ذکر است محدوده تغییرات مقاومت زمین نسبت به فرکانس، وابسته به مشخصات خاک و طراحی زمین است [۱۱] و [۲۳]-[۲۵].

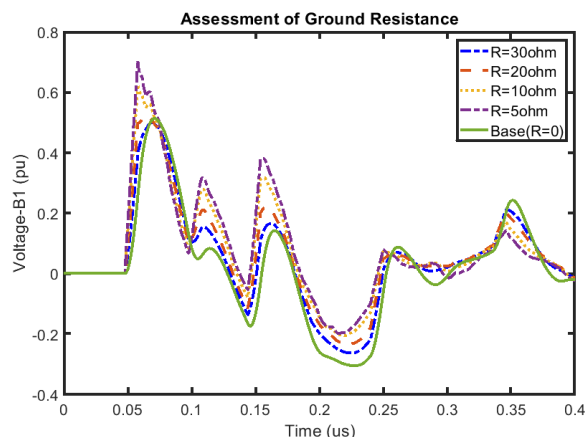
همانگونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، مقاومت زمین در فرکانس های پایین کم است (مقدار آن ۱۲.۵ اهم فرض شده است) و با افزایش فرکانس، این امپدانس زیاد می شود. در واقعیت رفتار زمین به

خازنی به ظرفیت ۱nF در آن مکان نظر گرفته شد. برقگیرهای مورد استفاده در پست های GIS مجموعه ای از قرص های سری شده اکسید روی با مشخصه کاملاً غیرخطی و محصور در گاز SF_6 هستند. برقگیر مورد استفاده با حداکثر ولتاژ (U_s) ۷۰۰ کیلوولت، ولتاژ پیوسته (U_c) حدود ۵۰۰ کیلوولت و ولتاژ نامی ۵۵۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است. مدل برقگیر نیز با استفاده از مدل استاندارد IEEE پیاده سازی شده است. منبع خطا نیز مشابه منبع خطای استفاده شده برای حالات قبل در نظر گرفته شده و به صورت مستقیم متصل به نقطه B3 فرض شده است.

نتایج بدست آمده از شبیه سازی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانگونه مشاهده می شود، با توجه به محل خطا، حدود ۵۰ نانوثانیه طول می کشد تا موج به نقطه B1 برسد. در ادامه، موج با توجه به امپدانس های موجی مجاور و اتلاف طول میسر، از پیک ۲pu در حالت پایه (ورودی) به حدود ۱.۳pu کاهش یافته است. شایان توجه است که، برقگیر موجود در ورودی پست باعث کاهش پیک در حدود ۰.۳pu شده است. البته باید به این نکته توجه داشت که، عملاً برقگیر در مقایسه با مهار امواج صاعقه در مهار اینگونه اضافه ولتاژهای تیز کارایی خوبی نخواهد داشت. نوار زمین هم همانگونه که پیشتر بحث شد باعث کاهش اضافه ولتاژ در حدود ۰.۲pu شده است. البته تنش های عایقی ناشی از ولتاژهای بازگشتی از نوار زمین هم قابل توجه است (ادامه موج). همانگونه مشاهده می شود، CVT به دلیل خاصیت خازنی، همانند یک فیلتر عمل کرده و شکل موج را صاف تر کرده و همچنین پیک آن را به صورت قابل توجهی کاهش می دهد.



شکل (۱۲): مدل مداری زمین وابسته به فرکانس



شکل (۱۱): بررسی اثر تغییر مقاومت ثابت پست GIS بر اضافه ولتاژ ایجاد شده

۳-۶- بررسی اثر مقاومت زمین و افزایش دقت مدل سازی آن

یکی از پارامترهای مهم در مهار اضافه ولتاژهای گذرا، زمین پست است. این موضوع در این بخش از دو منظر مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. نگاه اول، بررسی تاثیر تغییرات مقاومت پست بر پیک

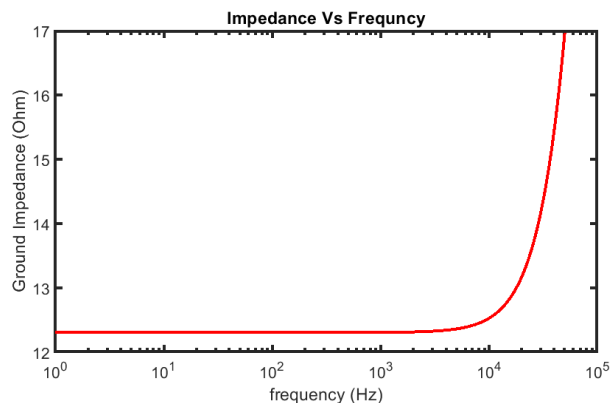
روابط تحلیلی ارائه شد. اضافه ولتاژها در پست‌های GIS از دو منظر ورود موج از ترمینال به سمت پست و انتقال موج از پست به سمت ترمینال خروجی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. اثر نوار زمین، CVT و برقگیر بررسی گردید. همچنین اثر مقاومت زمین و افزایش دقت مدلسازی زمین تحلیل شد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن مدل تک فاز در مدل‌سازی پست‌های GIS منجر به دریافت پاسخ‌هایی به دور از واقعیت خواهد شد. همچنین نشان داده شد که در صورت افزایش فاصله مابین فازها و یا افزایش ارتفاع پست، اضافه ولتاژها زیاد خواهند شد. اثر نوار زمین در حالتی که امپدانس موجی آن کم باشد بیشتر خواهد بود و بایستی در طراحی دقت نمود که خاصیت سلفی آن کم و خاصیت خازنی آن زیاد باشد. همچنین نشان داده شد که CVT ها، به دلیل خاصیت خازنی خود، مشروط به مقاومت مناسب زمین آنها می‌توانند اثر بسزایی بر اضافه ولتاژهای خروجی از پست بگذارند. نتایج نشان داد که تلفات در هر دو حالت تک فاز و سه فاز در هر ۶ متر، باعث کاهش تقریباً ۱۰٪ از پیک اضافه ولتاژ می‌شود. همچنین اختلاف ۵۰٪ مابین نتایج حاصل از مدلسازی تک فاز و سه فاز پست‌های GIS مشاهده گردید. این نتیجه نشان دهنده اهمیت مدلسازی دقیق در پست‌های GIS کوچک است. همچنین نشان داده شد که نوار زمین می‌تواند باعث کاهش پیک ولتاژ با ضریبی در حدود ۸۰٪ الی ۹۰٪ در نقاط متفاوت شود. با افزایش فاصله مابین فازها، پیک اضافه ولتاژ بیشتر خواهد شد و اثر فازهای مجاور بر میرایی اضافه ولتاژها کمتر خواهد شد. همچنین، معین شد که برقگیر می‌تواند منجر به کاهش ۳۰٪ TEV می‌شود. در پایان، نتایج نشان داد که مقاومت بیش از ۵ اهم زمین پست باعث کاهش اثرگذاری خاصیت میرایی سیستم‌های مهار کننده اضافه ولتاژ خواهد شد. همچنین نتیجه‌گیری شد که با در نظر گرفتن رفتار فرکانس بالای زمین، اثرات المان‌های مجاور پست همچون CVT ها بر خلاف انتظار می‌تواند بسیار کم باشد که این موضوع خود نشان دهنده اهمیت طراحی پست‌های GIS با در نظر گرفتن امواج فرکانس بالا و اهمیت مدلسازی دقیق این بخش به همراه سایر بخش‌ها به منظور محاسبه دقیق تنش‌های ولتاژی این پست‌ها می‌باشد.

تشکر و قدردانی

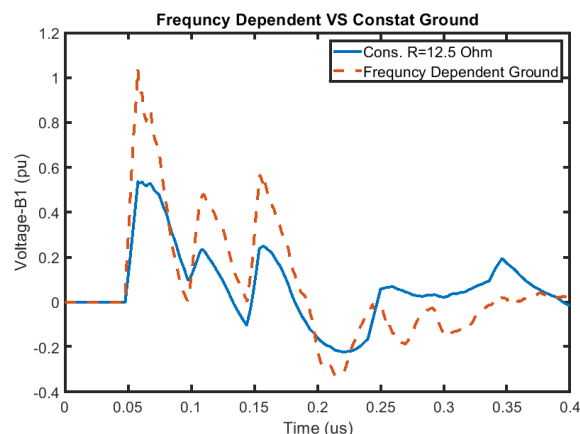
از آقای مهندس خانعلی به دلیل انجام مطالعات اولیه در این موضوع تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Fujimoto, N., Dick, E.P., Boggs, S.A. and Ford, G.L., 1982. Transient ground potential rise in gas insulated substations-experimental studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (10), pp.3603-3609.
- [2] Dick, E.P., Fujimoto, N., Ford, G.L. and Harvey, S., 1982. Transient ground potential rise in gas-insulated substations-problem identification and mitigation. IEEE



شکل (۱۳): پاسخ فرکانسی زمین مورد استفاده



شکل (۱۴): اضافه ولتاژ ترمینال ورودی در مدلسازی واقعی زمین

صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ است و در مطالعه حاضر با توجه به محتوای فرکانسی بالای ۲۰ مگاهرتزی موج ورودی توجه به این نوع مدلسازی اهمیت بالایی دارد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل وابسته به فرکانس زمین و با مقاومت ثابت ۱۲٫۵ اهم در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به محتوای فرکانس بالای موج، در نظر گرفتن رفتار فرکانس بالای زمین به معنی وجود امپدانس زیاد در فرکانس بالا و کاهش اثر زمین در امواج بازگشتی و افزایش ولتاژ القای سطحی خواهد بود. نتیجه ارائه شده اهمیت بسیار زیاد طراحی زمین پست‌های GIS را نشان می‌دهد و به بیان دقیق‌تر، طراحی مبتنی بر رفتار فرکانس بالا نه طراحی‌های سنتی. همچنین همانگونه مشاهده می‌شود، در صورتی که رفتار فرکانس بالای زمین لحاظ گردد، عملاً المان‌های حفاظتی و یا دارای خاصیت خازنی همانند CVT نقش کاهنده خود را شدیداً از دست خواهند داد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت و گسترش استفاده از پست‌های GIS مطالعه اضافه ولتاژها در این پست‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله رفتار اضافه ولتاژهای تیز و القایی سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نحوه مدلسازی و تحلیل اضافه ولتاژهای سطحی و انواع امپدانس‌ها و

- [16] Xuni, R.A.O., Jie, G.U.O., Zihao, G.A.O., Xiaoke, W.U. and Zexin, Z.H.A.O., 2018, September. Study on 330kV GIS Transient Enclosure Voltage Caused by Disconnecting Switch Operation. In 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) (pp. 1-4). IEEE.
- [17] Cheng, L., Zhu, Y., Wang, C., Han, W., Zhang, C., Wang, Y., Ren, T., Liu, X., Hao, D., Tong, Y. and Shen, Y., 2018, September. Study on Rise of Transient Ground Potential Caused by Switching and Closing Operation in 330kV GIS Substation. In 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED) (pp. 1611-1614). IEEE
- [18] Chen, S., Guo, J., Hu, C., Tao, F., Xie, T., Xu, Y. and Jia, J., 2019. The electromagnetic effect study of GIS enclosure under high-frequency electromagnetic pulse. *The Journal of Engineering*, 2019(16), pp.2837-2841.
- [19] Riechert, U., Neumann, C., Hama, H., Schichler, U., Okabe, S., Ito, H. and Zaima, E., 2010. Very fast transient overvoltage (VFTO) in gas-insulated UHV substations. *CIGRE Advisory Group Report*, pp.56-67.
- [20] Burow, S., Riechert, U., Köhler, W. and Tenbohlen, S., 2012. New mitigation methods for transient overvoltages in gas insulated substations.
- [21] Szweczyk, M. and Kuniewski, M., 2017. Controlled voltage breakdown in disconnecter contact system for VFTO mitigation in gas-insulated switchgear (GIS). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(5), pp.2360-2366.
- [22] Li, J., He, Z., Wang, Y., Chen, X. and Liu, Y., 2020. Analysis of Discharge Faults Between Flanges Caused by Transient Enclosure Voltage. *IEEE Access*, 8, pp.10981-10988.
- [23] Razi-Kazemi, A.A. and Hajian, M., 2018. Probabilistic Assessment of Ground Potential Rise Using Finite Integration Technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(5), pp.2452-2461.
- [24] Shariatinasab R, Tadayyon P. Estimation of Lightning Performance and Failure Risk of Overhead Lines Caused by Direct Strokes Based on Monte Carlo Method. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2016; 13 (1)
- [25] Shafiee B, Mirzaei A. Optimal, Safety, and Economic Design of High Voltage Substations Grounding System. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2016; 13 (1) :109-122.
- Transactions on Power Apparatus and Systems, (10), pp.3610-3619.
- [3] Das, J.C., 2010. Transients in electrical systems. McGraw-Hill Professional Publishing.
- [4] Okabe, S., Yuasa, S. and Kaneko, S., 2008. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms-breakdown characteristics for non-standard lightning impulse waveforms associated with disconnecter switching surges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(3), pp.721-729.
- [5] Hu, R., Cui, X., Zhang, W., Chen, P., Qi, L., Li, J., Chen, W., Li, Z. and Dai, M., 2012, September. Transient enclosure voltage (TEV) measurement system of UHV GIS and TEV statistical characterization. In *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Zhao, J., Zhang, J., Liu, Z. and Gan, Z., 2015, November. Measurement of TEV of 1000kV UHV gas insulated switchgear. In *2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)* (pp. 313-315). IEEE.
- [7] Wang, J., Feng, C., Kim, I.K.S., Lee, H.H., Zhou, H., Kim, M.K. and Qiu, Y., 1998, June. Laboratory and on-site measurements of TEV generated by disconnecter switching in 362 kV GIS. In *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 98CH36239) (Vol. 2, pp. 681-684). IEEE.*
- [8] Na, W. and Yu, L., 2012. Research on the Characteristics of TEV when Disconnector Operating in UHV GIS. *Physics Procedia*, 33, pp.634-640.
- [9] Chandrakar, K. and Gorayan, R.S., 2013, December. Analysis and control of transient enclosure voltages in GIS (EMTP simulation studies). In *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [10] Rahmani, S. and Razi-Kazemi, A.A., 2015, November. Investigation of very fast transient over voltages in gas insulated substations. In *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)* (pp. 428-435). IEEE.
- [11] Okabe, S., Takami, J. and Nojima, K., 2008. Phenomena of leaking electromagnetic waves and high frequency surges from isolated joint of gas insulated switchgear. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(4), pp.1006-1014.
- [12] Lu, B., Lin, X., Shi, Y. and Zhao, N., 2014. Analysis Model for VFT Considering the Effect of Nonuniform Distribution of Residual Charge. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), pp.1157-1164.
- [13] Khamlichi, A., Donoso, G., Garnacho, F., Denche, G., Valero, A. and Álvarez, F., 2015. Improved cable connection to mitigate transient enclosure voltages in 220-kV gas-insulated substations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(1), pp.562-569.
- [14] Wu, H.T., Cui, X., Liu, X.F., Jiao, C.Q., Hu, R., Chen, W.J. and Wang, L., 2016. Characteristics of electromagnetic disturbance for intelligent component due to switching operations via a 1100 kV AC GIS test circuit. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(5), pp.2228-2237.
- [15] Yuanji, C.A.I., Yonggang, G.U.A.N. and Weidong, L.I.U., 2017. Statistical characteristics of transient enclosure voltage in ultra-high-voltage gas-insulated switchgear. *Plasma Science and Technology*, 19(6), p.064011.