حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل اضافه ولتاژ صاعقه

عبدالرضا یزدانی، حمیدرضا صفا، آرمین بنائی زنوزی و آرش شیخ قمی
شرکت برق منطقه‌ای فارس، شرکت برق منطقه‌ای فارس، شرکت سیمکاتک، شرکت سیمکاتک

چکیده — صاعقه به‌طور عمده بر روی خطوط هوایی تأثیر گذاشته و این تأثیر به‌صورت امواج اضافه ولتاژ در طول خط به سمت پست‌های فشارقوی سیر می‌کند. در محل پست با برخورد موج سیار به ترانسفورماتور قدرت و انعکاس آن اضافه ولتاژ، تقویت‌شده و ممکن است از سطح تحمل عایقی طراحی‌شده ترانسفورماتور تجاوز نموده و موجب خسارت به آن شود.

بامطالعه پدیده صاعقه و تأثیر پارامترهای مختلف آن، می‌توان با نصب برق‌گیرهای اکسید فلزی مناسب، اثرات این پدیده مخرب را تا حد قابل قبولی کاهش داده و یا حذف نمود. در این مطالعه به کمک نرم‌افزار EMTP-RV ضرورت استفاده از برقگیر و محل بهینه نصب آن جهت کنترل اضافه ولتاژهای صاعقه در پست‌های AIS تغذیه شونده از خط هوایی و یا خط هوایی- کابل زمینی، به‌منظور بهبود عملکرد صاعقه ترانسفورماتورهای قدرت نشان داده‌شده است.

واژه‌های کلیدی — ترانسفورماتور قدرت؛ اضافه ولتاژ؛ صاعقه؛ قوس برگشتی؛ برقگیر اکسید فلزی؛ EMTP-RV.

۱. مقدمه

اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، ممکن است منجر به شکست عایقی تجهیزات پست‌های فشارقوی شده و درنهایت خسارت مالی فراوان و خاموشی‌های گسترده و طولانی‌مدت در شبکه‌های قدرت را به دنبال داشته باشند؛ بنابراین حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت به‌عنوان گران‌بهاترین و بحرانی‌ترین اجزاء پست‌های انتقال و فوق توزیع در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد.

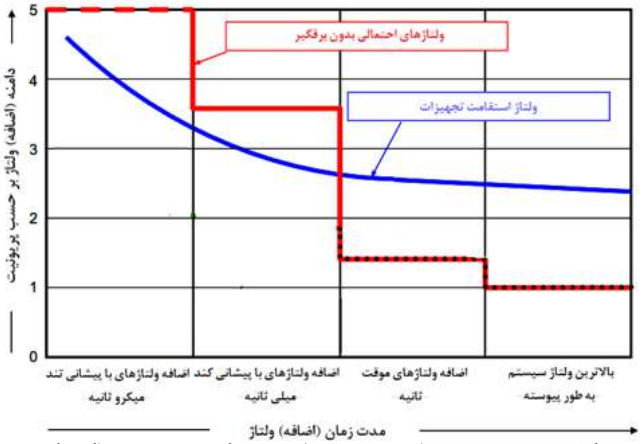
برای طراحی و اجرای یک سیستم مؤثر و اقتصادی حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و ماهیت کاملاً تصادفی آن، نیاز به آشنایی کامل با پدیده صاعقه، مطالعه و تأثیر پارامترهای گسترده آن، مشخصه‌های هندسی سیستم حفاظت پیشگیرانه، مقاومت الکتریکی زمین، ولتاژ استقامت ضربه صاعقه (L.I.W.V) ترانسفورماتورهای قدرت، آرایش پست‌های فشارقوی و خطوط انتقال متصل به آن‌ها می‌باشد.

هدف این مقاله شناخت پدیده صاعقه و تأثیر آن بر سیستم‌های قدرت به‌منظور بهبود عملکرد صاعقه ترانسفورماتورهای قدرت در پست‌های HV/MV می‌باشد.

۱.۱. اضافه ولتاژ در سیستم‌های قدرت

در سیستم‌های قدرت تغییر وضعیت از یک حالت به حالت دیگر همراه باحالت‌های گذرایی می‌باشد که معمولاً همراه با تغییرات ولتاژ می‌باشد.

چنانچه در هرلحظه از زمان، ولتاژ هر نقطه از هادی فازهای یک شبکه با بالاترین ولتاژ سیستم Us، نسبت به زمین از ولتاژ $\sqrt{2}/\sqrt{31}$ Us (p.u.) تجاوز نماید، در آن نقطه اضافه ولتاژ فاز به زمین رخ‌داده است [۱]. اتصالی‌ها، عملیات کلید زنی، ضربه صاعقه ازجمله عوامل تغییر حالت و ایجاد اضافه ولتاژ می‌باشند. چنانچه اضافه ولتاژها، تجهیزات شبکه و ازجمله ترانسفورماتورهای قدرت را فراتر از توان طراحی آن‌ها تحت تنش قرار دهند، ممکن است موجب شکست عایقی این تجهیزات بحرانی و گران‌بها شده و تأثیر منفی بر عملکرد سیستم قدرت داشته باشد. در شکل (۱) انواع اضافه ولتاژهای احتمالی در شبکه‌های قدرت الکتریکی، زمان استمرار و اندازه آن‌ها برحسب P.U. نشان داده‌شده است [۲].



شکل ۱: انواع اضافه ولتاژهای احتمالی در شبکه‌های قدرت الکتریکی

همان‌طور که انتظار می‌رود تجهیزات استاندارد در سیستم‌های قدرت، ازجمله ترانسفورماتورها دارای استقامت عایقی کافی در محدوده اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت و اضافه ولتاژهای موقت می‌باشند.

۲. صاعقه و مشخصه‌های آن

در جو زمین در هرلحظه ۲۰۰۰ طوفان تندری در حال شکل‌گیری می‌باشد که منجر به برخورد ۱۰۰ صاعقه به زمین در هر ثانیه (۸ میلیون در شبانه‌روز) می‌گردد. [۳]. مهم‌ترین پارامترهای صاعقه که در بحث مهندسی برق شبکه اهمیت دارد عبارت‌اند از:

- دامنه اولین ضربه جریان صاعقه و ضربه‌های بعدی آن
- شکل موج جریان صاعقه
- رابطه بین پارامترهای صاعقه
- تعداد ضربه در هر صاعقه
- چگالی صاعقه زمین (GFD)، یعنی تعداد صاعقه در هر کیلومترمربع و در هرسال

بر طبق پیشنهاد IEEE تابع احتمال توزیع جریان صاعقه از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$P(I) = \frac{1}{1 + (\frac{I}{31})^{2.6}}$$

که در آن

P (I)= احتمال مساوی یا بزرگ‌تر بودن دامنه جریان صاعقه از جریان I (برحسب KA) می‌باشد.

برای مثال رابطه فوق نشان می‌دهد که احتمال آنکه جریان صاعقه بزرگ‌تر از 10KA باشد برابر با ٪ ۹۵ می‌باشد.

۳. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در ترانسفورماتورهای قدرت

حوادث صاعقه بر خطوط انتقال هوائی اثر گذاشته و این اثر به‌عنوان یک موج سیار در طول خط به سمت پست‌های فشارقوی انتشار می‌یابد. موج انتشاریافته پس از برخورد به ترانسفورماتور قدرت که دارای امپدانس بالای سیم‌پیچ در مقابل صاعقه می‌باشد، با دامنه‌ای نزدیک به دامنه موج تابش یافته، انعکاس می‌یابد. چنانچه مجموع ولتاژهای تابشی و انعکاسی، در ورودی ترانسفورماتور از ولتاژ استقامت طراحی آن تجاوز نماید، ممکن است موجب شکست عایقی در ترانسفورماتور و خسارت به آن گردد [4].

۴. مکانیزم‌های تأثیر صاعقه بر خطوط انتقال

تأثیر صاعقه بر خطوط انتقال معمولاً از طریق سه مکانیزم ذیل صورت می‌گیرد:

۴.۱. برخورد مستقیم صاعقه به هادی فازها

بسیاری از خطوط انتقال هوایی، خصوصاً در ولتاژهای 63KV و پایین‌تر که معمولاً فاقد سیم گارد می‌باشند و یا به علت نقص در سیستم گارد، ضربه صاعقه مستقیماً به هادی فازها برخورد می‌کند. با برخورد مستقیم صاعقه به هادی فاز، جریان صاعقه به دو قسمت مساوی تقسیم‌شده و در طول هادی با جهت‌های مخالف انتشار می‌یابند. هرکدام از این دو جریان، موج ولتاژ سیاری ایجاد می‌کند که مقدار آن از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$V(t) = \frac{1}{2} I(t) Zw$$

که در آن Zw امپدانس موجی هادی فاز می‌باشد که معمولاً مقدار آن در محدوده ۳۰۰ تا ۵۰۰ اهم می‌باشد[3]. شکل (۲)

شکل ۲: برخورد صاعقه به هادی فاز

به‌محض رسیدن هر یک از دو موج سیار به دکل، ولتاژ دو سر مقره فاز مربوط شروع به افزایش نموده و ازآنجا به یکی از دو صورت ذیل انتشار می‌یابد:

- به‌عنوان یک ضربه کامل که مقدار ماکزیمم آن به مقدار ذیل می‌رسد.

$$U_{max} = Z_w \frac{I_{max}}{2}$$

به‌شرط آنکه

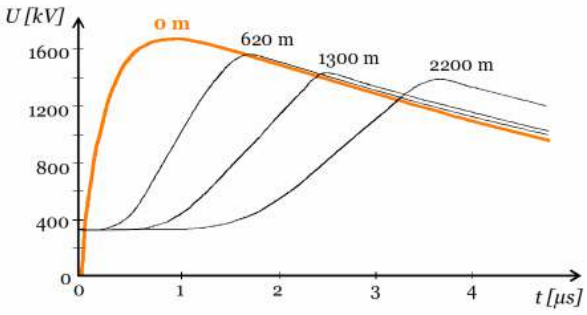
$$Ui \geq Z_w \frac{I_{max}}{2}$$

که در آن Ui ولتاژ استقامت ضربه مقره می‌باشد.

- به‌عنوان یک موج بریده که ولتاژ آن به علت بروز قوس در سطح مقره محدود می‌گردد، به‌شرط آنکه:

$$Ui \leq Z_w \frac{I_{max}}{2}$$

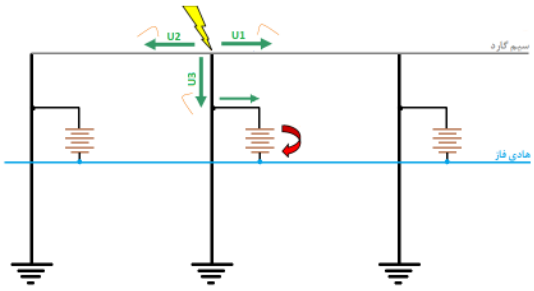
در هر یک از دو حالت فوق، امواج ایجادشده بر روی هادی‌های فاز به علت تلفات ناشی از پدیده کرونا تضعیف و هموار می‌گردند و درنهایت به پست‌های منتهی به این خطوط رسیده و ممکن است ترانسفورماتورهای قدرت را تحت تنش الکتریکی و شکست عایقی قرار دهند. شکل (۳).



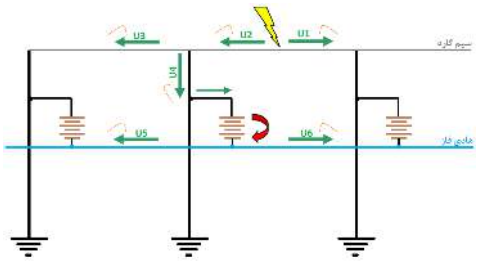
شکل ۳: تضعیف امواج به علت تلفات ناشی از پدیده کرونا

۴.۲. برخورد صاعقه به سیم گارد یا دکل و ایجاد قوس برگشتی

موقعی که صاعقه به دکل یا سیم گارد برخورد می‌کند، با توجه به محل برخورد یعنی دکل یا سیم گارد، به ترتیب سه یا دو موج سیار ایجاد می‌کند که در جهت‌های مختلف سیر می‌کنند. شکل‌های ۴ الف و ب.



شکل ۴ الف: برخورد صاعقه به دکل خط انتقال



شکل ۴ ب: برخورد صاعقه به سیم گارد در میانه اسپن

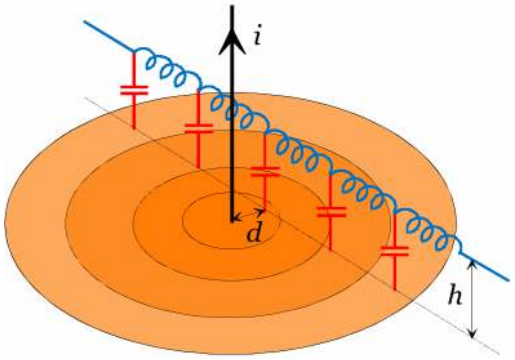
هریک از این امواج سیار و یا بخشی از آن‌ها که در محل دکل به سمت زمین آن دکل انتشار می‌یابند در محل مقاومت زمین پای دکل منعکس‌شده و ممکن است موجب شود که ولتاژ در دو سر مقره از ولتاژ بحرانی جرقه (CFO) مقره تجاوز نموده و منجر به قوس بر روی مقره شود که به آن جرقه برگشتی می‌گویند.

درهرحال امواج سیاری که در هادی فازها انتشاریافته و معمولاً مقدار پیک آن‌ها کمتر از CFO مقره می‌باشد، به پست‌های منتهی به خطوط رسیده و ممکن است تجهیزات پست‌ها و ازجمله ترانسفورماتورهای قدرت را مورد تنش قرار دهند [5].

۴.۳. برخورد صاعقه به زمین مجاور خطوط انتقال

صاعقه‌هایی که به زمین یا هر شیء نزدیک به خطوط انتقال و توزیع انرژی الکتریکی برخورد می‌کنند، با توجه به اینکه جریان صاعقه موجب تغییر سریع میدان الکتریکی در حلقه‌های LC خط می‌گردد، روی هادی‌های فاز، سیم گارد و در دو سر مقره ولتاژ القا می‌کنند.

ازآنجایی‌که اضافه ولتاژهای القائی اندازه‌گیری شده بر روی خطوط انتقال به‌ندرت از مقدار 300KV تجاوز می‌کنند، اعتقاد عمومی بر آن است که این پدیده دارای اثر کمی در سطوح ولتاژ انتقال دارد. شکل (۵).



شکل ۵: برخورد صاعقه به زمین مجاور خطوط انتقال

۵. حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل اضافه ولتاژهای صاعقه

حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل صاعقه، در پست‌های HV/MV شامل دو بخش اساسی می‌باشد:

۵.۱. پیشگیری از برخورد صاعقه به ترانسفورماتورها

بهترین روش برای پیشگیری از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات پست‌ها و خصوصاً ترانسفورماتورهای قدرت، ایجاد سیستم گارد در پست با استفاده از نصب سیم‌های گارد و دکل یا هردوی آن‌ها می‌باشد. به‌عنوان یک اقدام ایمنی بیشتر در صورت نقص سیستم گارد، نصب برقگیر در مجاورت ترانسفورماتورها، حفاظت بیشتری را تأمین می‌کند [6].

۵.۲. حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل امواج صاعقه ورودی از خطوط متصل به پست‌ها

همان‌طور که ملاحظه گردید، هر سه مکانیزه تأثیر صاعقه بر خطوط انتقال منجر به تولید امواج سیاری می‌شوند که با سرعت نور (در خطوط هوائی) و یا کسری از آن (در کابل‌های زمینی) در طول خط انتشاریافته و به ترمینال ترانسفورماتورهای قدرت برخورد می‌کنند. امپدانس بسیار بالای سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت نسبت به امپدانس موجی خطوط هوائی و کابل زمینی، موجب می‌شود که این امواج با همان دامنه موج تابشی، منعکس‌شده و مقدار ولتاژ در ورودی ترانسفورماتور قدرت تا دو برابر ولتاژ ورودی افزایش می‌یابد؛ بنابراین این امواج ورودی خطر اصلی برای عایق ترانسفورماتورهای قدرت محسوب می‌شوند.

حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل اثرات امواج سیار رسیده به پست را می‌توان با انتخاب سطوح عایقی بالاتر برای ترانسفورماتور قدرت بهبود بخشید، اما این روش نیازمند صرف هزینه فوق‌العاده بود و غالباً غیراقتصادی و غیرعملی می‌باشد.

اما با استفاده از نصب برقگیر های اکسید فلزی بدون فاصله هوائی مناسب در نقاط بحرانی سیستم، می‌توان عملکرد صاعقه پست‌های فشارقوی و ترانسفورماتورهای قدرت نصب‌شده در آن‌ها را بهبود قابل‌توجهی بخشید [6].

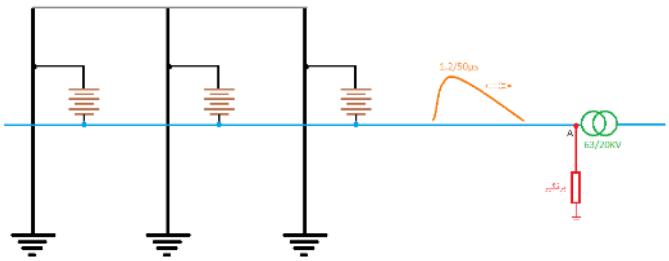
۶. شبیه‌سازی اضافه ولتاژ صاعقه و کنترل آن توسط نرم‌افزار EMTP-RV

ازآنجائیکه پست‌های فشارقوی غالباً در مقابل برخورد مستقیم ضربه صاعقه به ترانسفورماتورهای قدرت، توسط سیستم گارد موردحفاظت قرار می‌گیرند، عملکرد صاعقه ترانسفورماتور به‌طور عمده بستگی به امواج ورودی از خطوط هوایی دارد. در این مطالعه خط 63KV رابط بین پست AIS، 63/20KV اکبرآباد به پست 400/230/63KV ملک مکان شرکت برق منطقه‌ای فارس مورد مطالعه قرارگرفته است. این خط هوایی با هادی لینکس در خارج از پست ملک مکان توسط کابل 63KV تک هسته با عایق

XLPE، مقطع $500mm^2$ و طول 1.4Km به باسبار 63KV آن اتصال یافته است.

۶.۱. پست AIS اکبرآباد با ورودی خط هوائی

شکل (۶) آرایش ساده پست 63/20KV اکبرآباد را که شامل یک ترانسفورماتور قدرت 63/20KV و یک خط هوائی 63KV تک مدارِ می‌باشد، نشان می‌دهد.



شکل ۶: پست AIS با ورودی خطوط هوایی

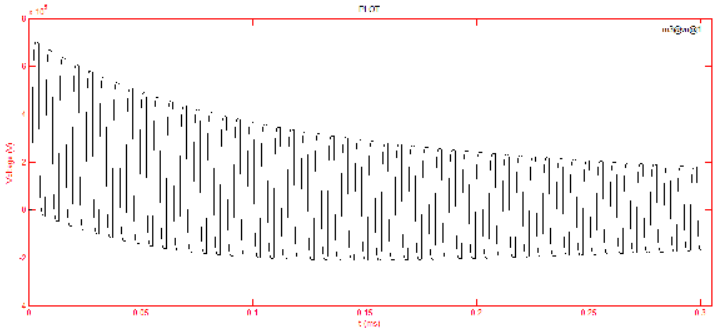
امپدانس موجی خط هوایی $Zs= 350\Omega$، ولتاژ بحرانی مقره‌های آن 350KV و ولتاژ استقامت ضربه صاعقه (L.I.W.V) سمت 63KV ترانسفورماتورهای آن 325KV در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر هر سه مکانیزم صاعقه بر روی خط هوایی، درنهایت به‌صورت یک موج استاندارد صاعقه 1.2/50μs با دامنه 350KV می‌باشد که از نقطه برخورد در طول خط و در دو جهت مخالف به سمت پست‌های اکبرآباد و ملک مکان انتشار می‌یابد.

در جدول (۱) مشخصات الکتریکی برق‌گیری که غالباً در برق منطقه‌ای فارس مورداستفاده قرار می‌گیرد، آورده‌شده‌است.

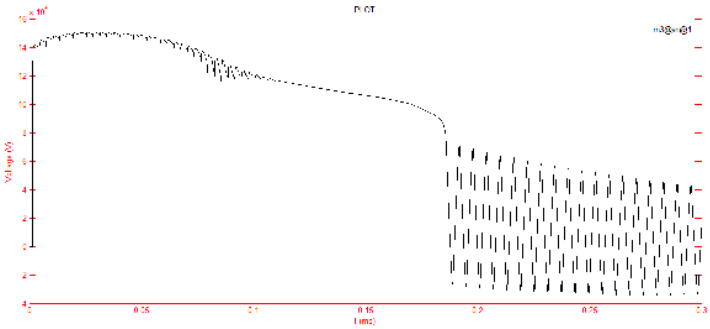
در شکل‌های (۷ الف و ب) به ترتیب اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در دو حالت بدون برقگیر و استفاده از برقگیر نشان داده‌شده است.

Type	SCTPAB1b10SL60/155(e)
Manufacturer	SIMCATEC, IRAN
Ur(KV)	60
Uc(KV)	48
Ures $_{8/20}$	155
In	10

جدول ۱: مشخصات الکتریکی برقگیر مورداستفاده



شکل ۷ الف: اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در حالت بدون برقگیر

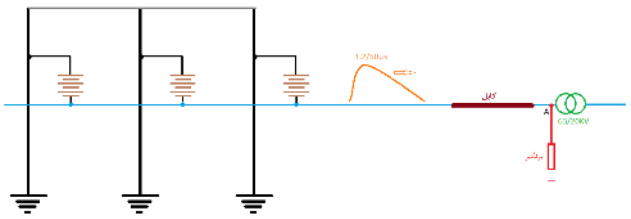


شکل ۷ ب: اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در حالت استفاده از برقگیر

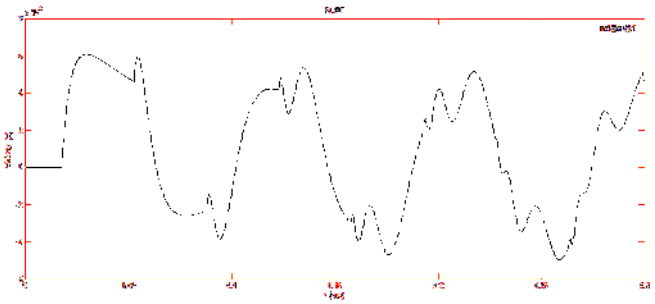
۶.۲. پست AIS ملک مکان با ورودی کابل متصل به خط هوائی

شکل (۸) آرایش ساده پست 400/230/63KV ملک مکان را که شامل یک ترانسفورماتور قدرت 230/63KV و یک کابل زمینی متصل به خط هوایی را نشان می‌دهد. امپدانس موجی کابل زمینی 44Ω و سرعت انتشار موج در آن 80000Km/s می‌باشد.

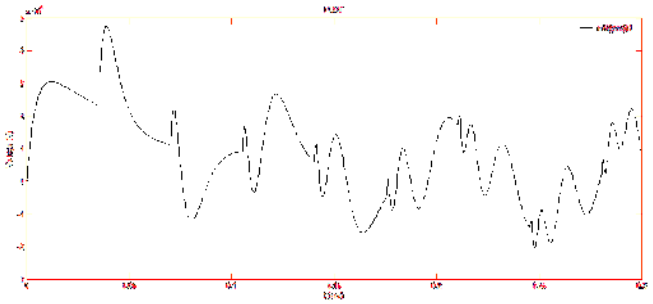
در شکل‌های (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳)، به ترتیب اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور قدرت، برقگیر در سمت اتصال خط هوایی به کابل و در دو طرف کابل نشان داده‌شده است.



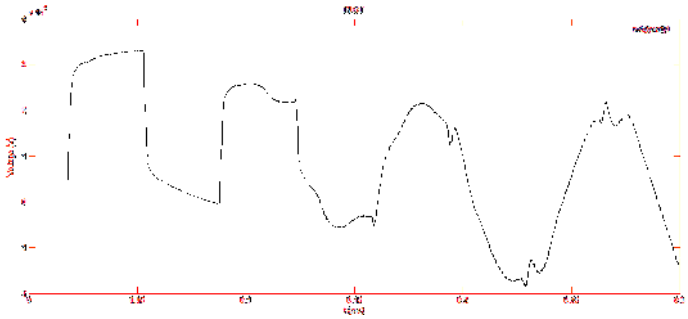
شکل ۸: پست AIS ملک مکان با ورودی کابل متصل به خط هوایی



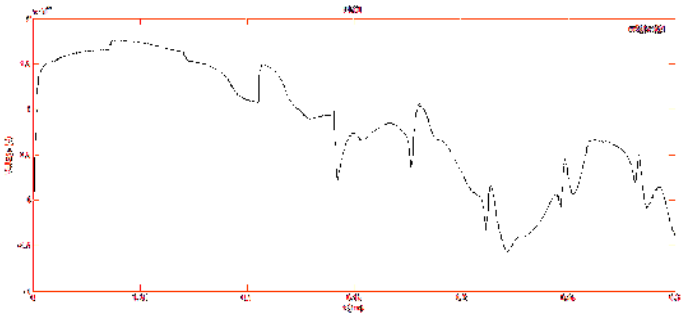
شکل ۹ : اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در حالت بدون برقگیر



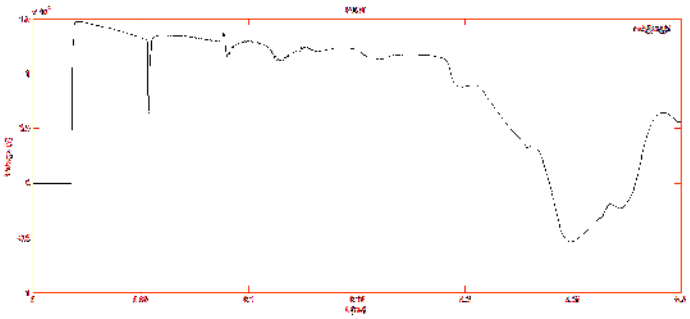
شکل ۱۰: اضافه ولتاژ ظاهرشده در ورودی کابل در حالت بدون برقگیر



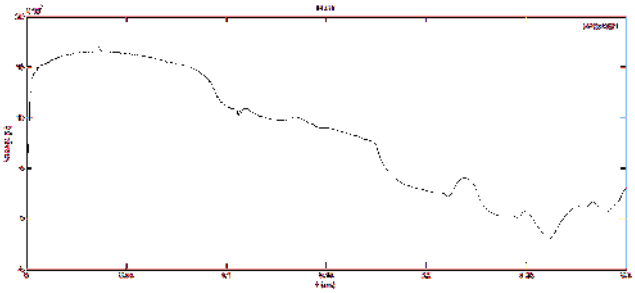
شکل ۱۱: اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در حالت استفاده از برقگیر در محل اتصال خط هوایی به کابل



شکل ۱۲: اضافه ولتاژ ظاهرشده در ورودی کابل در حالت استفاده از برقگیر در محل اتصال خط هوایی به کابل



شکل ۱۳: اضافه ولتاژ ظاهرشده در سمت 63KV ترانسفورماتور در حالت استفاده از برقگیر در ورودی پست و محل اتصال خط هوایی به کابل



شکل ۱۴: اضافه ولتاژ ظاهرشده در ورودی کابل در حالت استفاده از برقگیر در ورودی پست و محل اتصال خط هوایی به کابل

۷. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار EMTP-RV نشان می‌دهد که علیرغم مجهز بودن خطوط هوایی به سیم گارد و پست‌های انتقال به سیستم گارد، تجهیزات پست‌های منتهی به این خطوط خصوصاً ترانسفورماتورهای قدرت مورد تهدید جدی اضافه ولتاژهای قوس برگشتی و القایی ناشی از برخورد صاعقه به خطوط هوایی و زمین اطراف آن‌ها می‌باشند.

نصب برق‌گیرهای اکسید فلزی مناسب، تأثیر فوق‌العاده، در کاهش این اضافه ولتاژها و اثرات مخرب آن‌ها دارد. از سوی دیگر در پست‌هایی که خط هوایی در خارج از پست به کابل زمینی تبدیل می‌شود، ممکن است نصب برقگیر در محل اتصال آن‌ها کافی نبوده و با افزایش طول کابل نیاز به نصب برقگیر در محل ورود کابل زمینی به پست نیز باشد.

منابع

[1] IEC 60071-1 Edition 8.1 2011-03, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules.

[2] Siemens Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems, fundamentals, 3rd edition.

[3] Overvoltage & Insulation Coordination, Lecture6, ELEC-E8409-High Voltage Engineering.

[4] ABB, Overvoltage protection Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems, 6th revised edition: June 2018.

[5] Insulation Coordination for Power Systems, A.R.Hileman, copyright 1999 by Taylor & Erancis Group, LLC

[6] IEC 60099-5 Edition 3.0 2018-01, Surge arresters- part5: Selection and application recommendation.