

تأثیر استفاده از کابل بر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه و نفوذ آن به ترانسفورماتورهای توزیع

محمد منفرد

گئورگ قره‌پتیان

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)

E-mail: monfared81@yahoo.com, grptian@aut.ac.ir

چکیده - بررسی تأثیر اضافه ولتاژهای ناشی از حالات گذرای الکترومغناطیسی بر طراحی عایقی سیستم‌های LV و MV ، ضروری است. در نتیجه، حفاظت از تجهیزات سیستم توزیع، بخصوص ترانسفورماتورهای توزیع نیز از اهمیت بسزایی در طراحی سیستم‌های قدرت برخوردار است. استفاده از کابل در محل اتصال خط هوایی به ترانسفورماتور کاهنده، روشی مرسوم در حفاظت اولیه از ترانسفورماتورها در مقابل این اضافه ولتاژهاست. متأسفانه این روش در کشور ما مورد توجه قرار نگرفته، لذا هدف اصلی این مقاله، جلب توجه متخصصین داخلی به اهمیت کاربرد این روش است. بنابراین در این مقاله، ابتدا به بررسی تحلیلی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد موج گذرا به خطوط هوایی متصل به کابل می‌پردازیم و نتایج را با شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بوسیله $ATP-EMTP$ مقایسه می‌کنیم. ماهیت و عوامل موثر بر این گذراها را تعیین کرده، سپس در مطالعه‌ای جامع، با استفاده از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار $ATP-EMTP$ ، تأثیر نوع، طول و قطر کابل و همچنین شکل موج صاعقه و فاصله از محل برخورد را بر اضافه ولتاژهایی که از طریق این خطوط هوایی مختوم به کابل، به ترانسفورماتورهای کاهنده توزیع می‌رسند، مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین انواع کابل‌های متداول و مشخصات تضعیف آنها برای گذراهای فرکانس بالا، مطالعه می‌گردند. کلیه نتایج، به منظور کاهش سطح و شیب این اضافه ولتاژها در ترمینال‌های ترانسفورماتورهای توزیع، آنالیز شده و هدف یافتن مناسبترین مشخصات کابل، برای تعدیل اضافه ولتاژهاست.

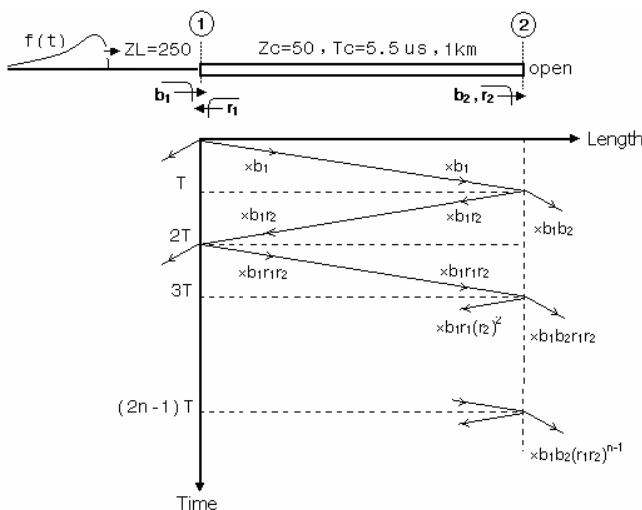
کلید واژه - صاعقه، اضافه ولتاژ، خط هوایی، کابل، ترانسفورماتور، شبکه توزیع، آنالیز گذرا، EMTP

۱- مقدمه

توجه قرار گیرد. به منظور هماهنگی عایقی (Insulation co-ordination) خطوط انتقال، کابلها و سایر تجهیزات پست‌های توزیع، پیش بینی شکل موج و دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در موارد مختلف ضروری است. استفاده از کابل در محل اتصال خطوط هوایی به ترانسفورماتورهای کاهنده در پست‌های توزیع، ایده رایجی است [۱ و ۲]. با استفاده از کابل در محل اتصال خطوط انتقال به ترانسها، اندازه و شکل موج اضافه ولتاژهایی که به پایانه‌های ترانسفورماتور توزیع می‌رسند، به طرز قابل توجهی تعدیل می‌گردند. نوع و طول این کابل‌ها، برحسب پاره‌ای از ملاحظات، همچون محل پست، متغیر است. به سبب اختلاف قابل ملاحظه امپدانس مشخصه کابل و خط انتقال، ضربه صاعقه‌ای که در طول خط به سمت ترانسفورماتور پیش می‌رود، شدیداً کاهش می‌یابد. سطح اضافه ولتاژ قابل تحمل بوسیله تجهیزات سیستم قدرت و از

در خطوط انتقال با ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت، اضافه ولتاژهای حاصل از کلیدزنی، نقش اصلی را در ملاحظات مربوط به طراحی عایقی ایفا می‌کنند. این در حالی است که در خطوط ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت، عامل مهمتر مورد توجه، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه است. در شبکه‌های ۲۰ کیلوولت، امکان برخورد مستقیم صاعقه بسیار نادر است، ولی احتمال بروز برخورد غیرمستقیم و القا ولتاژ در شبکه توزیع، همواره مطرح می‌باشد. موج القا شده در خط توزیع بر اثر ضربه غیرمستقیم صاعقه، پس از رسیدن به ترانسفورماتور، به دلیل وجود تزویج خازنی بین سیم‌پیچ‌های ترانس، به سمت فشار ضعیف نفوذ نموده و ممکن است باعث بروز خسارات در تجهیزات فشار ضعیف گردد. لذا باید حفاظت از تجهیزات سیستم توزیع، بویژه ترانسفورماتورها، در مقابل این اضافه ولتاژهای گذرا، در طراحی سیستم مورد

گذرا، در هر لحظه و هر مکان است. موج سیار در برخورد به مرز دو خط که دارای امپدانس‌های مشخصه متفاوت‌اند، با ضریبی به نام ضریب انعکاس (r)، منعکس شده و ولتاژ در هر لحظه، برابر حاصلجمع موج رفت و برگشت، یا ضریبی از موج رفت به نام ضریب شکست (b)، است. حال با توجه به این مفروضات، به بررسی تحلیلی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه به خطوط هوایی متصل به کابل، با استفاده از روش دیاگرام نردبانی می‌پردازیم. شکل (۱)، سیستم مورد مطالعه و نحوه اعمال روش را نشان می‌دهد. خط انتقال با امپدانس مشخصه 250 اهم و طول به اندازه کافی طولانی به کابلی با امپدانس مشخصه 50 اهم و طول 1 کیلومتر ، متصل است و انتهای کابل باز می‌باشد. انتهای باز، سبب می‌گردد تا موجی که به انتهای کابل می‌رسد، عیناً منعکس شود.



شکل ۱: دیاگرام نردبانی انتشار امواج ضربه

ابتدا به محاسبه ضرایب انعکاس و شکست می‌پردازیم:

$$b_1 = \frac{2 \times Z_c}{Z_c + Z_L} \approx 0.33, r_1 = \frac{Z_L - Z_c}{Z_c + Z_L} \approx 0.66, b_2 = 2, r_2 = 1 \quad (2)$$

همانگونه که از دیاگرام نردبانی برمی‌آید، اندازه ولتاژ در انتهای کابل، در n امین برخورد، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{2,n} = I Z_L b_1 b_2 (r_1 r_2)^{n-1} (e^{-\alpha(t-(2n-1)T)} - e^{-\beta(t-(2n-1)T)}) u(t - (2n-1)T) \quad (3)$$

در نتیجه، ولتاژ باس ۲ در لحظه $t = (2n-1)T$ ، یعنی پس از برخورد n ام، عبارت است از:

جمله ترانسفورماتورها، در تطابق با استانداردها، مقدار معینی است که در طراحی عایقی این تجهیزات، برآورده می‌گردد. این پهنای پهنای استاندارد، BIL (Basic Lightning Impulse Insulation Level) نامیده شده و معیاری از توانایی استقامت تجهیزات در برابر اضافه ولتاژهاست. BIL عموماً با تست بوسیله شکل موج خاصی تعیین می‌گردد. مسلماً کاهش مقدار BIL برای تجهیزات، کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت را در پی دارد، اما ریسک صدمه دیدن تجهیزات را نیز افزایش می‌دهد. در این مقاله، ابتدا به بررسی تحلیلی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد موج گذرا به خطوط هوایی متصل به کابل می‌پردازیم و نتایج را با شبیه سازی‌های انجام گرفته بوسیله ATP-EMTP مقایسه می‌کنیم. ماهیت و عوامل موثر بر این اضافه ولتاژها را تعیین کرده و سپس در مطالعه‌ای جامع، با استفاده از شبیه سازی با نرم افزار ATP-EMTP، تاثیر نوع، طول و قطر کابل و همچنین شکل موج را بر دامنه اضافه ولتاژهایی که به ترانسفورماتورهای توزیع می‌رسند، مورد بررسی قرار می‌دهیم. این نتایج، به منظور کاهش سطح و شیب اضافه ولتاژها، در ترمینال‌های ترانس‌های توزیع، آنالیز شده و هدف، یافتن مناسبترین مشخصات کابل، برای کاهش این اضافه ولتاژهاست.

۲- اهمیت کاربرد کابل در بین خط هوایی و ترانسفورماتور

همانگونه که در [۳] بحث شده است، برای مدلسازی برخورد مستقیم صاعقه در مطالعات، از یک منبع جریان ضربه و برای نمایش برخورد غیر مستقیم، از منبع ولتاژ استفاده می‌گردد. در بررسی تحلیلی و در این بخش از مقاله، از منبع جریان ضربه استاندارد استفاده می‌کنیم، هرچند برای منبع ولتاژ نیز روش یکسان خواهد بود. جریان تزریق شده، با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$f(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

مقدار $I = 10 \text{ kA}$ و α و β مطابق با موج ضربه صاعقه استاندارد، $1.2/50 \text{ }\mu\text{s}$ ، مقداردهی شده‌اند. بررسی تحلیلی موضوع، نیازمند آگاهی از قوانین شکست و انعکاس امواج سیار و آشنایی با دیاگرام نردبانی (Lattice Diagram) برای محاسبه ولتاژهای گذرا در خطوط می‌باشد. روش دیاگرام نردبانی، روشی ترسیمی برای محاسبه ولتاژ از دید حالات

کاربرد کابل به عنوان اصل خط هوایی و ترانس را روشن می‌سازد. این بررسی، هرچند دید بسیار خوبی از ماهیت کلی اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد امواج به خطوط هوایی متصل به کابل در محل انتهایی کابل و پاره‌ای عوامل موثر بر آن داد، اما واضح است که تعمیم این روش به حالات پیچیده‌تر، بسیار سخت و وقت‌گیر است؛ لذا استفاده از برنامه EMTP، به عنوان ابزاری برای مدل کردن، شبیه سازی و تحلیل اینچنین اضافه ولتاژهایی گریزناپذیر است.

۳- اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه

در بخش قبل، مشخص گردید که به سبب اختلاف قابل توجه امپدانس مشخصه‌های کابل و خطوط هوایی، کابل‌های متصل به این خطوط، سبب کاهش قابل ملاحظه اندازه اضافه ولتاژها و حذف قابل توجه فرکانس‌های بالا در شکل این موج‌ها می‌گردند. این ویژگی باعث شده تا عموماً برای اتصال خطوط هوایی به ترانس‌های توزیع از کابل استفاده گردد [۱ و ۲]. خصوصیات کابل‌ها، با تغییر نوع، ضخامت و طول آنها تغییر می‌کنند و در نتیجه این اضافه ولتاژها نیز تابعی از این عوامل هستند. همچنین در برخورد غیر مستقیم صاعقه، ماکزیمم دامنه و شیب تغییرات اضافه ولتاژ القا شده در هادی فاز، به طرز قابل توجهی توسط پارامترهای صاعقه، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این پارامترها عبارتند از: (الف) دامنه جریان ضربه برگشت (Return Stroke) (ب) زمان صعود، t_r و نشست تا نصف مقدار نهایی، t_f (ج) سرعت ضربه برگشت (د) ارتفاع ابر [۴]. فاصله از محل برخورد صاعقه و ارتفاع خط نیز از دیگر عوامل تعیین کننده هستند. در ادامه به مطالعه تاثیر عوامل فوق بر این اضافه ولتاژها می‌پردازیم.

۳-۱- مقایسه خاصیت تضعیف کابل‌های XLPE (Cross-Linked Poly-Ethylene) و EPR (Ethylene Propylene Rubber)

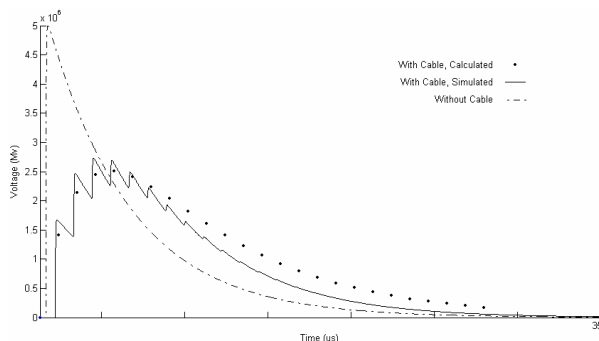
گذراهای ناشی از صاعقه و سوئیچینگ، در انتهایی خطوط هوایی توزیع متصل به ترانسفورماتور، قادر به ایجاد شکل موج‌های گذرای تا دامنه 2.5 pu (متناسب با مقدار پیک ولتاژ فاز سیستم) با زمان صعودی در محدوده 100 ns می‌باشند. در صورتیکه این گذراها که دارای دامنه بسیار بزرگ و زمان صعود بسیار کوچک (شیب زیاد) هستند، به

$$V_2((2n-1)T) = IZ_L b_1 b_2 [(e^{-2\alpha(n-1)T} - e^{-2\beta(n-1)T}) + r_1 r_2 (e^{-2\alpha(n-2)T} - e^{-2\beta(n-2)T}) + \dots + (r_1 r_2)^{n-2} (e^{-2\alpha T} - e^{-2\beta T}) + (r_1 r_2)^{n-1}] \quad (4)$$

این مجموع، یک تصاعد هندسی است که به سادگی می‌توان مجموع همگرا را یافت:

$$V_2((2n-1)T) = IZ_L \left[\frac{b_1 b_2 ((r_1 r_2)^n - e^{-2\alpha n T})}{r_1 r_2 - e^{-2\alpha T}} - \frac{b_1 b_2 ((r_1 r_2)^n - e^{-2\beta n T})}{r_1 r_2 - e^{-2\beta T}} \right] \quad (5)$$

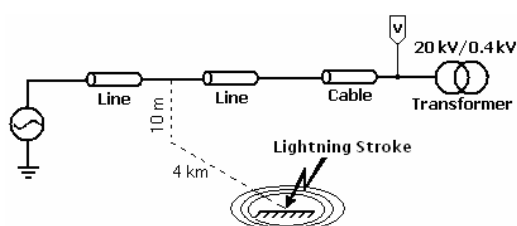
ولتاژ گره ۲، V_2 ، بصورت دندان اره‌ای است و در شکل (۲)، نمایش داده شده است. از دید حالات گذرا، مشتاقیم تا مقدار ماکزیمم V_2 را نسبت به n بدست آوریم. بنابراین مشتق آنرا نسبت به n برابر صفر قرار داده تا مقدار n را که به ازای آن حداکثر ولتاژ رخ می‌دهد، بدست آوریم. همانگونه که در رابطه (۵) مشخص است، این مقدار و همینطور مقدار ماکزیمم اضافه ولتاژ، به طول خط (یا T)، امپدانس مشخصه‌های خط و کابل (یا ضرایب انعکاس و شکست) و شکل موج تحریک (یا مقادیر α و β) وابسته‌اند.



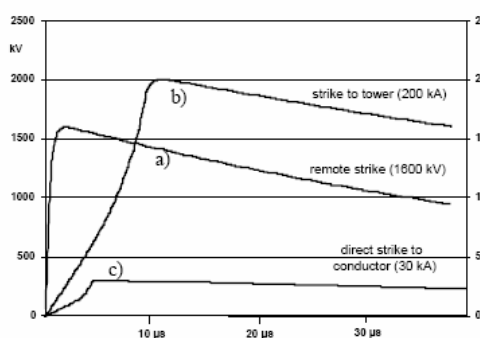
شکل ۲: ولتاژ ایجاد شده در انتهایی کابل و خط باز

شکل (۲)، نتایج حاصل از محاسبات بالا و شبیه‌سازی بوسیله ATP-EMTP را مقایسه می‌کند. علیرغم وجود ساده‌سازی‌ها در دیگرام نردبانی، نتایج بررسی تئوری، انحراف زیادی از نتایج شبیه سازی ندارند، هرچند کمی خوشبینانه‌تر به نظر می‌رسند. در صورت عدم وجود کابل در انتهایی خط، موج ولتاژ ناشی از صاعقه، پس از برخورد به انتهایی خط، کاملاً منعکس شده و حاصلجمع این ولتاژ پسر و ولتاژ پیشرو به ناگهان، همانگونه که در شکل (۲) نمایش داده شده است، سبب دو برابر شدن ولتاژ انتهایی خط می‌گردد. تحلیلی که درباره این مساله انجام گرفت، اهمیت

متصل به ترانسفورماتور توزیع، از سیستمی که در شکل (۴) نمایش داده شده است، استفاده می‌کنیم. در این مطالعه به مدلسازی کانال صاعقه و تئوری و نحوه محاسبه تزویج ولتاژها و جریان‌های القایی در خطوط توزیع، پرداخته نمی‌شود و نتایج کار مراجع [۳، ۴ و ۶]، در مدلسازی مناسب کانال صاعقه و نمایش اضافه ولتاژ القا شده در خطوط توزیع، به صورت منبع ولتاژ مناسب که با امپدانس خط تطبیق یافته است، در نرم افزار EMTP، استفاده می‌گردد (شکل موج (a) در شکل (۵)). خط انتقال از دو قسمت که توسط مدل گسترده خط انتقال با امپدانس مشخصه 250Ω و سرعت انتشار $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ مدل شده‌اند، تشکیل شده است. برای کابل از مدل‌های دقیق J.Marti برای هر دو نوع کابل EPR و XLPE استفاده شده است. مدل دارای جزئیات کامل و شامل مدل غلاف و مقاومت زمین نیز هست. اطلاعات کابل‌ها، در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.



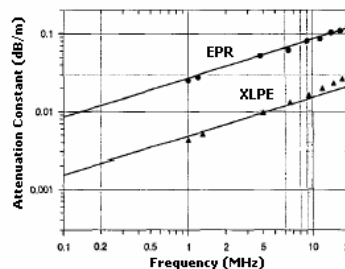
شکل ۴: سیستم شبیه سازی شده برای مطالعه اثر کابل بر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه



شکل ۵: شکل موج انواع مختلف برخورد صاعقه به خطوط توزیع [۳]

فاصله محل برخورد صاعقه تا ترانسفورماتور، کوتاه انتخاب می‌گردد، در نتیجه، تزویج بین فازها، تاثیر چندانی در شبیه‌سازی ندارد و می‌توان هر فاز را مستقل از دیگری در نظر گرفت و یا اینکه تحلیل را بصورت تکفاز انجام داد. از طرف دیگر محل برخورد صاعقه، طول خط را بسیار بلند

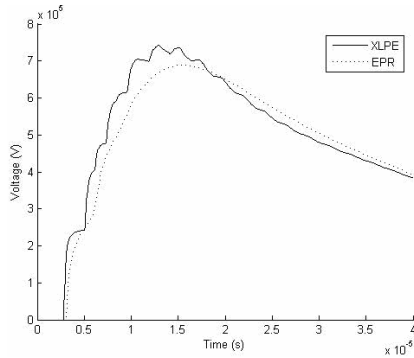
ترانسفورماتور توزیع وارد کردند، گرادیان ولتاژ بزرگی در ابتدای سیم پیچی HV بوجود آورده و منجر به شکست عایقی می‌گردند. همانگونه که در بخش قبل دیدیم، استفاده از کابل، هم باعث کاهش دامنه و هم سبب کاهش نرخ افزایش ولتاژ گذرا (dv/dt) می‌گردد. تضعیف فرکانس بالای کابل‌های قدرت پوشش‌دار، ناشی از سه عامل است: (الف) تلفات پوستی هادی‌ها (ب) تلفات دی‌الکتریک عایق‌بندی‌ها (ج) تلفات دی‌الکتریک نیمه‌هادی‌ها. تلفات پوستی، به سبب استفاده از کابل‌های قطور، قابل توجه نیستند. کابلهایی که دارای ایزولاسیون XLPE هستند، دارای تلفات دی‌الکتریک پایینی بوده، لذا تلفات فرکانس پایین غالب، ناشی از مقاومت هادی‌ها و دی‌الکتریک عایق‌بندی‌ها است و تلفات فرکانس بالای غالب، ناشی از تلفات دی‌الکتریک نیمه‌هادی‌هاست. این تلفات، زمانی ماکزیمم می‌گردند که امپدانس مقاومتی نیمه‌هادی‌ها، برابر امپدانس خازنی آنها باشد [۲ و ۵]. اندازه تضعیف، شدیداً به ثابت دی‌الکتریک نیمه‌هادی‌ها وابسته است، که به سبب بزرگ بودن آن در XLPE، تضعیف کمی را شاهدیم. در کابل‌های EPR، تلفات دی‌الکتریک نسبتاً زیادی در عایق‌بندی‌ها و در محدوده فرکانس‌های بالا داریم که سبب افزایش دامنه تضعیف، در مقایسه با XLPE می‌گردد. شکل (۳)، بخوبی این مقایسه را نشان می‌دهد [۲]. در نتیجه، کابل‌های EPR به سبب تضعیف بیشتر در فرکانس‌های بالا نسبت به کابل‌های XLPE، در حفاظت ترانسفورماتورهای متصل به کابل، موثرترند و استفاده از آنها بجای XLPE، سبب کاهش دامنه و شیب اضافه ولتاژ در خروجی کابل و حفاظت بهتر از ترانسفورماتور توزیع می‌گردد.



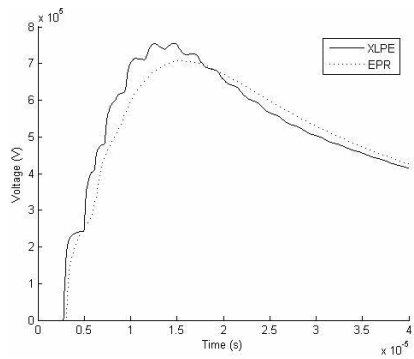
شکل ۳: تضعیف فرکانس بالای کابل EPR و XLPE

۳-۲- بررسی عوامل موثر بر اضافه ولتاژها

برای تعیین نقش دیگر عوامل موثر بر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه به خط هوایی مختوم به کابل



شکل ۷: ولتاژ انتهای کابل مختوم به ترانسفورماتور



شکل ۸: ولتاژ انتهای کابل باز

۳-۲-۲- طول کابل

برای این مطالعه، در شکل (۴)، صاعقه به فاصله 500 m از محل اتصال خط به کابل، اصابت می‌کند. جدول (۲)، حداکثر دامنه ولتاژهای ایجاد شده در انتهای کابل را به ازای طول‌های مختلف، برای دو حالت اتصال باز و اتصال به ترانسفورماتور کاهنده نشان می‌دهد. محدوده وسیع انتخاب شده برای تغییرات طول کابل، جنبه تحقیقاتی دارد و برای وضوح نتیجه‌گیری‌ها منظور شده است. شکل (۹) نیز شکل موج این ولتاژها را به ازای سه طول مختلف نشان می‌دهد. نتایج این بررسی را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

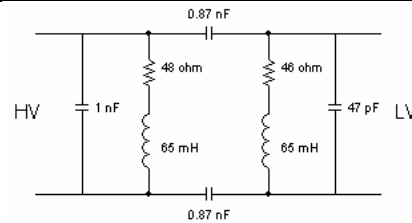
الف) با افزایش طول کابل، هم دامنه اضافه ولتاژها و هم شیب تغییرات ولتاژ، به طرز موثری کاهش می‌یابند.

ب) همانگونه که انتظار می‌رود، کاهش دامنه و هم کاهش شیب تغییرات ولتاژ، بخصوص شیب افزایشی که بیشترین آسیب را ایجاد می‌کند، در کابل‌های EPR در همه طول‌ها، بیش از XLPE است. از سوی دیگر، در طول‌های بلندتر، استفاده از کابل EPR بسیار موثرتر است، بطوریکه در طول 30 m دامنه و شیب موج ولتاژ برای EPR حدود 97% مقادیر متناظر در XLPE است، حال آنکه در طول 2000 m

می‌گیریم تا از انعکاس موج در ابتدای خط هوایی جلوگیری شود و یا می‌توان خط را با امپدانس موجی آن تطبیق نمود. استفاده از مدل‌های ترانسفورماتور استاندارد موجود در EMTTP، برای بررسی گذرهای فرکانس بالا مناسب نیست، لذا از مدل ارائه شده در [۷] که مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور است، استفاده می‌کنیم.

جدول ۱: پارامترهای کابل‌ها

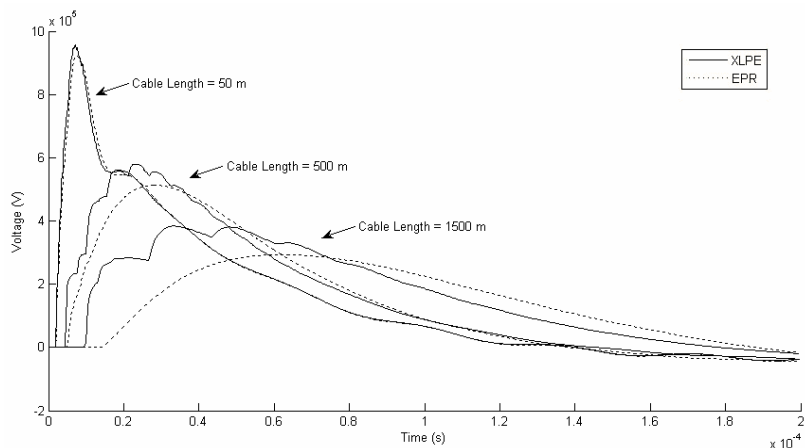
	ضریب دی‌الکتریک	شعاع هادی (mm)	شعاع عایق‌بندی (mm)	مقاومت هادی (ohm.m)
EPR	3.7	6.6	18.86	1E-5
XLPE	2.6	6.2	16	3E-7



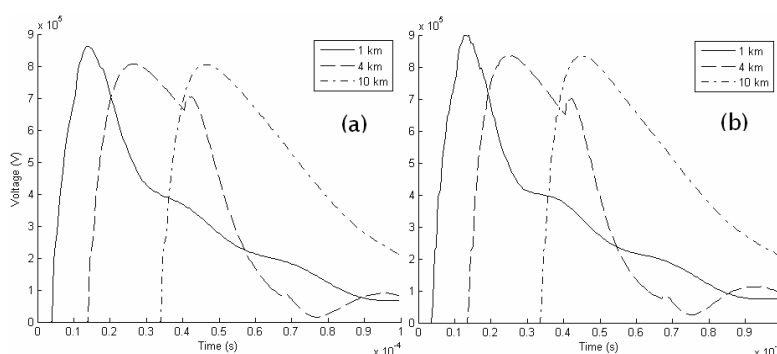
شکل ۶: مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور

۳-۲-۱- نوع کابل

قبلا در مورد خواص کابل‌های EPR و XLPE مطالبی ارائه شد. حال با شبیه‌سازی، به مقایسه اثرات این دو نوع کابل می‌پردازیم. در شکل (۴)، فاصله محل برخورد صاعقه تا محل اتصال به کابل را 500 m و طول کابل را 200 m انتخاب می‌کنیم. به ازای هر دو نوع کابل، ولتاژ سر ترانس، در شکل (۷) رسم شده است. از این مقایسه کاملاً مشخص است که تضعیف بیشتر کابل EPR در مقایسه با XLPE، سبب کاهش دامنه اضافه ولتاژها و همچنین نرخ تغییرات آنها (dv/dt) می‌گردد. هر دوی این عوامل، باعث کاهش گرادیان ولتاژ بر روی دوره‌های ابتدایی سیم‌پیچ ترانسفورماتور و در نتیجه کاهش ریسک شکست عایق آنها می‌شوند. از سوی دیگر، شکل (۸)، ولتاژ انتهای کابل، در حالتی که باز است و به ترانسفورماتور متصل نیست را نشان می‌دهد. در این حالت اندازه اضافه ولتاژها، اندکی افزایش می‌یابد، اما نکته مهمتر در این مورد، افزایش شیب تغییرات ولتاژ است. در نتیجه خود ترانسفورماتور، تا حدودی در تعدیل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و یا سویچینگ موثر است.



شکل ۹: ولتاژهای انتهای کابل متصل به ترانسفورماتور به ازای طولهای مختلف کابل



شکل ۱۰: ولتاژهای انتهای کابل متصل به ترانسفورماتور به ازای فواصل مختلف ترانسفورماتور از محل برخورد صاعقه

XLPE (b) EPR (a)

جدول ۲: رابطه اضافه ولتاژ و طول کابل

طول کابل (m)	حداکثر دامنه ولتاژ (kV)			
	کابل XLPE		کابل EPR	
	اتصال باز	متصل به ترانس	اتصال باز	متصل به ترانس
بدون کابل	1068	1064	1068	1064
30	1060	1026	1037	1002
50	984.9	958.6	954	925
70	930	897	899.5	875
100	874	855	839	818
200	755	743	707	689
500	593	581	530	513
1000	472	465	393	376
1500	389	385	312	294
2000	351	345	255	236.5

۳-۲-۴- فاصله ترانسفورماتور تا محل برخورد صاعقه

برای بررسی این پدیده، در نظر گرفتن تلفات خط هوایی در شبیه‌سازی، الزامی است، لذا تلف خط هوایی را $0.1 \Omega/km$

این نسبت به کمتر از 70% کاهش می‌یابد.

ج) با استفاده از کابل EPR با طول بیش از 1000 m، اضافه ولتاژها به حدی بسیار نزدیک به BIL سیستم توزیع کاهش یافته و با توجه به کاهش شیب تغییرات نیز، با کمک یک برقریگر ساده، حفاظت موثر از ترانسفورماتور امکان‌پذیر می‌شود.

۳-۲-۳- قطر کابل

جداول (۳) و (۴)، رابطه اندازه اضافه ولتاژ و شعاع کابل‌های EPR و XLPE را نشان می‌دهند. از جداول، برمی‌آید که هرچند بزرگتر شدن شعاع کابل‌ها، سبب کاهش دامنه اضافه ولتاژها می‌گردد، اما این تاثیر چندان چشمگیر نیست. مثلاً با افزایش 20% شعاع کابل XLPE، در طول 70 m تنها 3% و به ازای طول 1500 m حدود 10% کاهش دامنه اضافه ولتاژ داریم و در مورد کابل EPR، به ازای طول 70 m حدود 3% و در طول 1500 m حدود 5% کاهش دیده می‌شود.

با زمان صعود کوچک (شیب افزایشده تند)، می‌تواند سبب القای ولتاژی با نرخ افزایش و کاهش شدید در خط هوایی گردد. افزایش سرعت جریان ضربه برگشت، از یکسو باعث کاهش دامنه و از سوی دیگر، سبب کاهش زمان‌های صعود و نشست ولتاژ القایی می‌گردد که هر دوی این عوامل سبب کاهش دامنه و شیب اضافه ولتاژهای ایجاد شده در سر ترانسفورماتور می‌شوند. بعلاوه، هرچه فاصله خط توزیع از محل برخورد صاعقه دورتر باشد، مقدار دامنه اضافه ولتاژ القایی در خط کمتر خواهد بود [۸، ۶، ۴، ۳، ۲].

جدول ۳: رابطه اضافه ولتاژ و شعاع کابل XLPE

XLPE			
طول کابل (m)	شعاع کابل (mm)	حداکثر دامنه ولتاژ (kV)	
		اتصال باز	متصل به ترانس
70	6.2	930	897
	6.8	911	885
	7.4	895	868
1500	6.2	389	385
	6.8	371	362
	7.4	350	342

جدول ۴: رابطه اضافه ولتاژ و شعاع کابل EPR

EPR			
طول کابل (m)	شعاع کابل (mm)	حداکثر دامنه ولتاژ (kV)	
		اتصال باز	متصل به ترانس
70	6.6	899.5	875
	7.2	888	864
	7.8	870	848
1500	6.6	312	294
	7.2	303	287
	7.8	294	278

۴- نتیجه‌گیری

حفاظت از کلیه تجهیزات سیستم توزیع، بخصوص ترانسفورماتورهای توزیع، در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه، ضروری است. استفاده از کابل در محل اتصال خط هوایی به ترانسفورماتور کاهنده در پست‌های توزیع، سبب کاهش موثر دامنه و شیب تغییرات اضافه ولتاژهایی است که به سمت ترانسفورماتور می‌روند. به منظور طراحی عایقی خطوط انتقال، کابل‌ها و سایر تجهیزات شبکه توزیع، پیش‌بینی دقیق شکل و دامنه این

در نظر می‌گیریم. طول کابل، ثابت و برابر 100 m می‌باشد. شکل (۱۰)، ولتاژهای انتهایی کابل‌های EPR و XLPE متصل به ترانسفورماتور به ازای طولهای مختلف خط هوایی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که افزایش فاصله محل برخورد صاعقه تا ترانسفورماتور، سبب کاهش دامنه و شیب اضافه ولتاژها می‌گردد.

۳-۲-۵- ارتفاع خط از سطح زمین و تاثیر سیم گارد

یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده دامنه اضافه ولتاژ القایی در خطوط توزیع، ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه، ارتفاع خط از سطح زمین می‌باشد. بررسی این پدیده، نیازمند انجام مدلسازی دقیق کانال صاعقه است. با مراجعه به مراجع [۸، ۶، ۴، ۳]، ملاحظه می‌گردد که با استفاده از روش‌های مختلف، نتیجه یکسانی برای عبارت ولتاژ القایی بدست آمده است:

$$V_i = (\nabla\phi + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}).h \quad (6)$$

که در آن ϕ, \bar{A} به ترتیب پتانسیل‌های الکترواستاتیکی برداری و اسکالر ضربه برگشت و h ارتفاع خط از سطح زمین می‌باشند. از آنجا که ارتفاع h در مقایسه با ارتفاع ابر از سطح زمین، ناچیز است، در این فاصله از تغییرات ϕ, \bar{A} نسبت به ارتفاع، صرفنظر می‌گردد؛ لذا دامنه و متعاقباً شیب تغییرات ولتاژ القایی در خط، مستقیماً متناسب با ارتفاع خط از سطح زمین است. از سوی دیگر، سیم گارد نیز که عموماً برای حفاظت خطوط در مقابل برخورد مستقیم صاعقه به کار می‌رود، در برخورد غیرمستقیم نیز به عنوان شیلد عمل کرده و باعث کاهش ولتاژ القا شده در سیم‌های فاز می‌گردد. قابل ذکر است که کاربرد سیم گارد در خطوط توزیع بعضی از کشورها مانند مکزیک کاملاً مرسوم است [۶].

۳-۲-۶- تاثیر شکل موج صاعقه بر ولتاژ القا شده در خط

در بخش‌های قبل، شکل موج استاندارد، شکل (۵) را برای ولتاژ القا شده در خط در نظر گرفتیم. در این بخش، تاثیر عوامل مختلف را بر این ولتاژ بررسی می‌کنیم. ولتاژ القایی در هر نقطه از طول خط، مستقیماً متناسب با دامنه جریان ضربه برگشت است. رابطه ولتاژ القایی با شکل موج این جریان، پیچیده‌تر است. ولتاژ القا شده، مستقیماً متناسب با زمان صعود جریان ضربه برگشت است. موج جریان ضربه‌ای

- system", *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 17, No. 2, April 2002, p.p. 569-574
- [3] H. Schmitt and W. Winter, "Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems", *IPST Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001
- [4] P. Chowdhuri, "Parameters of Lightning Strokes and Their Effects on Power Systems", *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001
- [5] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, Wiley & Sons, 1991
- [6] م.ص. رحیمیان امام، "ارزیابی اضافه ولتاژهای القا شده در شبکه‌های توزیع ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه با استفاده از تکنیک معادله انتگرال میدان الکتریکی و EMTP"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹
- [7] A. Keyhani, S.W. Chua and S.A. Sebo, "Maximum Likelihood Estimation of Transformer High Frequency Parameters from Test Data", *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, April 1991, p.p. 858-865
- [8] M. Paolone, E. Perez, A. Borghetti, C.A. Nucci, F. Rachidi and H. Torres, "Comparison of Two Computational Programs for the Calculation of Lightning-induced Voltages on Distribution Systems", *IPST Conference*, Montreal, Canada, June 19-23, 2005

اضافه ولتاژها در شرایط گوناگون، الزامی است. ATP-EMTP، ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل پدیده‌های مربوط به حالات گذرا در سیستم‌های قدرت است و نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها، در تطابق با مفاهیم تئوری است. نوع کابل با توجه به ویژگی‌های تلفات و تضعیف فرکانس بالای آن، تاثیر بسزایی در تعدیل اضافه ولتاژها دارد؛ به نحوی که کابل‌های EPR در مقایسه با انواعی که از عایق‌های XLPE استفاده می‌کنند، به دلیل تضعیف قابل توجهی که در فرکانس‌های بالا دارند و همچنین تلفات دی‌الکتریک نسبتاً زیاد در عایق‌بندی، کاهش بیشتر دامنه و نرخ تغییرات اضافه ولتاژها را در پی داشته و استفاده از آنها بجای XLPE، در شبکه‌های توزیع، سبب حفاظت بهتر از ترانسفورماتور و سایر تجهیزات سیستم توزیع می‌گردد. خود ترانسفورماتور نیز، تا حدودی در تعدیل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و یا سویچینگ موثر است. با افزایش طول کابل، هم دامنه اضافه ولتاژها و هم شیب تغییرات ولتاژ، به طرز موثری کاهش می‌یابند و این در حالی است که تاثیر افزایش قطر کابل بر کاهش اضافه ولتاژها چندان قابل توجه نیست. در صورت استفاده از طول کافی کابل EPR، اضافه ولتاژها به حدی بسیار نزدیک به BIL ترانسفورماتور توزیع کاهش می‌یابند و با توجه به کاهش شیب تغییرات نیز، با استفاده از یک برقریر ساده، حفاظت موثر از ترانسفورماتور امکان پذیر می‌شود. از سوی دیگر، افزایش فاصله محل برخورد صاعقه تا ترانسفورماتور، سبب کاهش دامنه و شیب اضافه ولتاژها می‌گردد. بعلاوه، دامنه و متعاقباً شیب تغییرات ولتاژ القایی در خط، مستقیماً متناسب با ارتفاع خط از سطح زمین است. سیم گارد نیز که عموماً برای حفاظت خطوط در مقابل برخورد مستقیم صاعقه به کار می‌رود، در برخورد غیر مستقیم نیز به عنوان شیلد عمل کرده و باعث کاهش ولتاژ القا شده در سیم‌های فاز می‌گردد. همچنین، هرچه فاصله خط توزیع از محل برخورد صاعقه دورتر باشد، مقدار دامنه اضافه ولتاژ القایی در خط کمتر خواهد بود.

مراجع

- [1] S.A. Probert, Y.H. Song, P.K. Basak and C.P. Ferguson, "Re-appraisal of the Basic Impulse Level (BIL) for 400 kV Underground Cables Using EMTP/ATP", *IPST Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001
- [2] L.M. Zhou and S.A. Boggs, "Effect of shielded distribution cables on lightning induced overvoltages in a distribution