

تخمین اثر صاعقه برگشتی بر روی ریسک عایقی ترانسفورماتورهای قدرت در پست‌های فشارقوی با در نظر گرفتن اثر آلودگی

فریدالدین صفایی^۱، محسن نیاستی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی: هماهنگی عایقی، اضافه ولتاژهای صاعقه، روش ترکیبی مونت کارلو- پارامتر محدودکننده، صاعقه برگشتی ترانسفورماتور.	این مقاله به تخمین اثر صاعقه برگشتی و ارائه معیار ارزیابی ریسک عایقی ترانسفورماتور در پست فشارقوی ناشی با استفاده از روش پارامتر محدودکننده بهبودیافته مونت کارلو می‌باشد. بطوریکه ضمن در نظر گرفتن شرایط محیطی حاکم بر پست فشارقوی، برای جلوگیری از بار محاسباتی شبیه‌سازی حالت گذرا، روش شبیه‌سازی مونت کارلو با روش پارامتر محدودکننده ترکیب شده است. در نتیجه این روش، محاسبات را فقط بر اساس تنش‌های محتمل وارد به ترانسفورماتور انجام خواهد داد. از طرف دیگر، هر تنش ناشی از اضافه ولتاژ با توجه به دامنه و زمان ماندگاری اش اثرات مخرب ساختاری ایجاد می‌کند. بطوریکه ممکن است رفتار عایقی بعد و قبل از اعمال تنش متفاوت گردد. همچنین بررسی رفتار آلودگی بر دامنه اضافه ولتاژ صاعقه برگشتی و پیری عایقی در سیستم‌های قدرت ضروری است. برای مثال در رابطه با خطوط انتقال قدیمی مازندران شامل (خطوط ناریوران، جلال و خطوط پست فشارقوی ۲۳۰ کیلوولت قائم‌شهر) و با طول عمر حدود ۲۰ سال از قدیمی‌ترین خطوط آن منطقه می‌باشند و تعدد مسائل و مشکلاتی که در این خطوط وجود دارد نشان‌دهنده کاهش قابلیت اطمینان خطوط مذکور می‌باشد. در این مقاله، با توجه به رفتار غیر خود-ترمیم ترانسفورماتور در برابر تنش‌های عایقی مختلف، مشخصه استقامتی تجمیعی ولتاژ-زمان توسعه داده شده است. روش ناحیه محدود-مونت کارلو پیشنهادی با انتخاب صحیح توزیع آماری ضربات محتمل و لحاظ کردن اثر آلودگی بر روی مقره‌ها، ریسک عایقی ترانسفورماتور را بر مبنای اضافه ولتاژ گذرای ظاهر شده در سر ترانسفورماتور تخمین می‌زند. علاوه بر این، رابطه بین صاعقه برگشتی و وضعیت آلودگی سطح عایق تحت تنش‌های ناشی از ضربات صاعقه مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این مقاله، مبتنی بر اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی بوده و در دو شبکه نمونه واقعی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با لحاظ نمودن اثر عوامل محیطی بر پست فشارقوی، میزان ریسک عایقی تا ۱۸ درصد افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

قبول، هماهنگی عایقی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. پست‌های بیرونی تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارند. اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه برگشتی یکی از عوامل اصلی خاموشی در

پست‌های فوق فشارقوی (UHV) یکی از اجزای اصلی شبکه‌های انتقال توان می‌باشند. لذا به منظور حفظ قابلیت اطمینان پست‌های فوق فشارقوی در سطح قابل

*^۲ mniasati@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان

پست‌ها می‌باشند [۲]. بدین‌صورت که تنش‌های ناشی از این اضافه ولتاژها در پست‌های روباز موجب یونیزاسیون هوای اطراف مقره‌ها شده و با ایجاد جرقه و وقوع اتصال کوتاه باعث خاموشی می‌شود. بنابراین باید سطح استقامت عایقی تجهیزات پست‌های UHV به‌طور مناسب انتخاب گردد [۳].

آلودگی روی سطح عایقی مقره‌ها موجب افزایش احتمال جرقه می‌شود. در شرایط خشک، آلودگی روی سطح عایق اهمیتی چندانی ندارد اما در شرایط باران، مه یا شبنم، میزان یونیزاسیون سطحی عایق افزایش می‌یابد. مدل‌سازی آلودگی به دلایل متعددی از جمله چگالی آلودگی متفاوت در مناطق مختلف، توزیع ناهمگن آلودگی در سطوح مقره و اثر ناشناخته رطوبت بر آلودگی، بسیار پیچیده است [۴].

ابعاد مسئله هماهنگی عایقی شامل دو بخش تنش و استقامت عایقی است [۵]. هوا به‌عنوان عایق خطوط انتقال دارای خاصیت خود-ترمیمی می‌باشند. بنابراین مشخصه عایقی آن‌ها در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه بنا معیار احتمالاتی BIL^2 (سطح استقامت عایقی پایه) مشخص می‌شود. در واقع BIL سطح ولتاژی است که عایق در مواجهه با آن به‌احتمال ۹۰٪ مقاومت خواهد کرد و به‌احتمال ۱۰٪ جرقه اتفاق خواهد افتاد [۶]. استقامت عایقی ترانسفورماتور به‌عنوان مشخصه مهم پست، پیچیده‌تر از عایق خط خواهد بود. در [۷] روش استخراج تقریبی مشخصه استقامتی ولتاژ-زمان ترانسفورماتور ارائه شده است. این مشخصه شامل ولتاژهای پیشانی، برش، BIL ، BSL^3 و نقطه معادل ۲۰۰۰ میکروثانیه می‌باشند. در [۸] آزمایش‌های ترانسفورماتور فشارقوی به‌ازای ضربات مختلف صاعقه انجام شده است. در این مطالعه بر اساس صحت قانون توان معکوس ولتاژ-زمان برای ترانسفورماتور، برای تنش‌های ولتاژی با دامنه متفاوت ضرایب مشخصه ولتاژ-زمان استخراج شده است. سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده هماهنگی عایقی انجام داده است.

تمرکز این مطالعه بر بخش استقامت عایقی است. در [۹] اگرچه هماهنگی عایقی روی منحنی‌های دقیق استقامت عایقی اجرا شده است؛ اما تنش اضافه ولتاژی ثابتی مطابق [۱۰] در طول عمر بهره‌برداری فرض شده است. در [۱۱] ابتدا تنش‌های عایقی که در طول دوره بهره‌برداری به ترانسفورماتور وارد می‌گردد، را تعیین کرده است. سپس مقدار شاخص ولتاژ-زمان این تنش‌ها را محاسبه کرده است. در نهایت آزمایش‌ها فشارقوی را طوری تعیین کرده که مجموع شاخص ولتاژ-زمان آن‌ها با شاخص ولتاژ-زمان تنش‌های تخمین زده شده متناسب باشد. علی‌رغم مطالعات فوق، اغلب مطالعات هماهنگی عایقی صاعقه در بررسی بخش تنش تمرکز داشته و برای بررسی رفتار بخش استقامت عموماً ساده‌سازی صورت گرفته است. در استاندارد IEEE998 [۱۲] برای بررسی دقیق محل برخورد موج صاعقه و نوع اضافه ولتاژ منتج از مدل الکتروهندسی (EGM^4) استفاده شده است. مطابق آن، در خطوط هوایی موج گذرای صاعقه چنانچه به هادی محافظ برخورد کند موجب اضافه ولتاژهای برگشتی خواهد شد. زیرا اگر محل وقوع موج صاعقه در شعاع پوششی سیم محافظ قرار بگیرد، جذب آن خواهد شد. البته رفتار پست در مقابل موج صاعقه با رفتار خطوط هوایی تفاوت اساسی دارد [۱۳]. سیم محافظ پست طوری طراحی می‌شود که تقریباً احتمال برخورد ضربات مستقیم صاعقه به تجهیزات برقی آن بسیار ناچیز است [۱۴]. از طرفی سیستم زمین پست نیز طوری طراحی می‌شود که امپدانس موجی سیستم زمین بسیار اندک بوده و دامنه اضافه ولتاژهای برگشتی و القایی پایین باشد. بنابراین مسئله اساسی، خطوط هوایی وارد شده به پست خواهند بود. همچنین اگر صاعقه برگشتی در نزدیکی پست فشارقوی رخ دهد، ممکن است برق‌گیرهای نصب‌شده در ورودی پست قادر نباشند اضافه ولتاژها را به زمین انتقال دهند. برای بررسی مسئله ریسک عایقی صاعقه، روش مونت کارلو

با بررسی کلیه ابعاد مسئله و حالات ممکن ضمن صرف زمان زیاد و تعداد تکرار خیلی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقالات متعددی [۱۵-۱۸] مدل‌های مختلفی برای هماهنگی عایقی پست در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه ارائه شده است.

در [۱۹] راهکاری برای محدودسازی ابعاد گسترده مطالعه تنش اضافه ولتاژی صاعقه پیشنهاد شده است، که توانسته پیچیدگی بررسی مسئله را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. اما در این مطالعه بخش استقامت به‌صورت قطعی در نظر گرفته که البته دقت مسئله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدین‌صورت که اگر دامنه تنش از سطح استقامت BIL ترانسفورماتور تجاوز کند، ترانسفورماتور دچار جرقه خواهد شد. در [۲۰] از شبکه عصبی برای مدل‌سازی اثر آلودگی مفره‌ها در برابر اضافه ولتاژ صاعقه استفاده شده است. در [۲۱] هدف بررسی تأثیر پروفیل‌های آلودگی و رطوبت بر ویژگی‌های الکتریکی جرقه روی عایق‌های آلوده انجام شد. در [۲۲] تخمین ریسک عایقی متناسب با تنش اضافه ولتاژی محتمل لحاظ نشده است. بنابراین ممکن است ریسک عایقی برای تنش‌های عایقی طراحی گردد که در طول عمر بهره‌برداری اتفاق نیافتد. در نتیجه محاسبات بسیار وابسته به مشخصه BIL وابسته به زمان خواهد بود. همچنین در [۲۳] علی‌رغم محاسبه ریسک عایقی ترانسفورماتور قدرت، اثر آلودگی و شرایط محیطی لحاظ نشده است.

هدف این مقاله، ارائه معیار ارزیابی ریسک عایقی ترانسفورماتور در پست فشارقوی ناشی از اضافه ولتاژهای گذرای برگشتی صاعقه با لحاظ نمودن اثر آلودگی است. بطوریکه بتوان با استفاده از مشخصه ولتاژ-زمان و در نظر گرفتن ماهیت عدم قطعیت اضافه ولتاژ صاعقه ریسک عایقی را محاسبه نمود. بدین منظور روش ترکیبی مونت کارلو، پارامتر محدودکننده برای تعیین کلیه تنش‌های محتمل

وارد به ترانسفورماتور را ارائه می‌دهد. این روش ضمن به‌کارگیری حداقل بار محاسباتی لازم، با دریافت داده‌های ساختاری پست، خطوط متصل شده به آن و ترانسفورماتور می‌تواند هماهنگی عایقی ترانسفورماتورها را انجام داده و تخمین دقیقی از ریسک پست ارائه دهد. شبیه‌سازی‌های حالت گذرا با نرم‌افزار EMTP-RV انجام شده و برای محاسبات ریسک عایقی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی گذرای اجزای پست فشارقوی

۲-۱- مدل دکل خط انتقال

برای مدل‌سازی دکل خطوط انتقال اگر صرفاً پایه اصلی مدنظر باشد (مانند دکل‌های ۶۳ کیلوولت) از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{H}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{H} \right) - 60 \quad (1)$$

که در آن، Z_T امپدانس موجی پایه دکل، H ارتفاع پایه و r شعاع هادی زمین می‌باشد [۴].

در صورت استفاده از هادی‌های مهار برای دکل‌ها، حدوداً ۱۰٪ از امپدانس موجی پایه‌های اصلی کاهش می‌یابد. مقدار امپدانس موجی هادی‌های مهار دکل از رابطه (۲) تعیین می‌گردد [۱۶].

$$Z_{Lk} = 9 Z_{Tk} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

امپدانس موجی هادی‌های افقی دکل‌ها یا بازوها (Z_{A1} و Z_{A2} و Z_{A3} و Z_A) از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2h_k}{r_{Ak}} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

مدل امپدانس ثابت دکل ۴۰۰ کیلوولت در نرم‌افزار EMTP-RV در شکل (۲) نشان داده شده است.

در مدل دکل توزیع شده شکل (۱)، پارامترهای موج صاعقه که با ارتفاع تغییر می‌کنند در نظر گرفته شده‌اند بنابراین نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های دیگر به دست می‌آید. همچنین این مدل برای شبیه‌سازی دکل‌هایی که دارای ارتفاع بلند و ساختار پیچیده هستند مناسب است. این مدل، موجی که دکل را طی می‌کند، ساختارهای دکل و

خط یا ZC و ثابت انتشار می‌باشند که به ترتیب از روابط (۴) به دست می‌آیند. البته هر دو رابطه وابسته به فرکانس می‌باشند [۱۶].

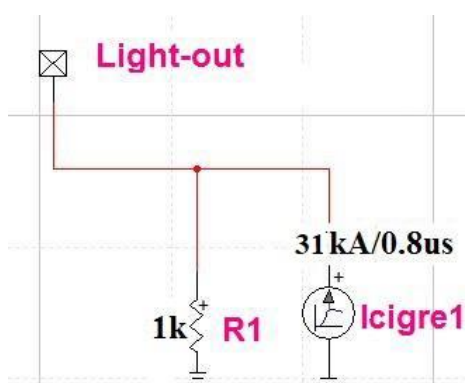
$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (۴)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

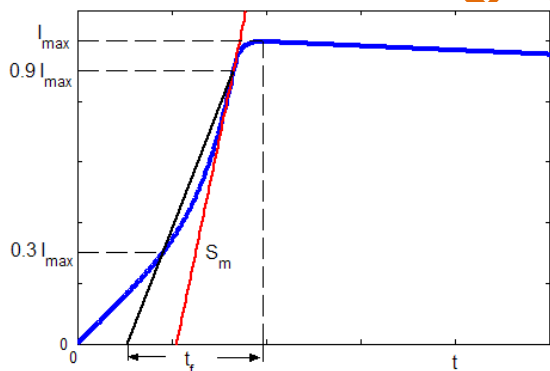
چنانچه خط بدون تلفات فرض شود روابط (۴) به صورت روابط ساده (۵) خواهد بود.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۵)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC}$$



شکل (۲): مدل مداری موج صاعقه (مدل سیگره)



CIGRE concave lightning current source

t_{start}	40	μs
I_{max}	200	kA
t_f	3	μs
S_m	90	kA/ μs
t_{th}	100	μs
t_{stop}	300	μs

شکل (۳): پارامترهای نمونه مدل سیگره موج صاعقه در

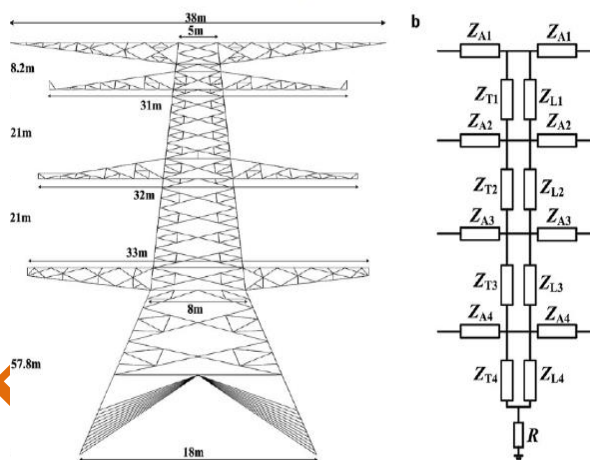
نرم‌افزار EMTP-RV

تغییرات اندوکتانس و کاپاسیتانس ارتفاع‌های مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد [۱۴].

مقادیر امپدانس مدل دکل در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول (۱): مقادیر امپدانس مدل دکل

K	$Z_{AK}(\Omega)$	$Z_{TK}(\Omega)$	$Z_{LK}(\Omega)$
1	307	142	1287
2	313	135	1215
3	298	117	1053
4	280	80	720



شکل (۱): مدل امپدانس دکل مورد مطالعه

۲-۲- مدل شکل موج صاعقه

مدل سیگره منبع جریان از لحاظ مقدار پیک جریان صاعقه، پیشانی موج، پشت موج و حداکثر شیب شکل موج به شکل موج طبیعی صاعقه بسیار نزدیک است. از این رو، در این مقاله از مدل سیگره منبع جریان موازی با یک مقاومت (به عنوان مقاومت کانال صاعقه) استفاده می‌شود. همچنین مقاومت کانال صاعقه با توجه به ماهیت صاعقه اعمالی بین ۶۰۰ تا ۲۵۰۰ اهم می‌باشد ولی عموماً مقدار ۱۰۰۰ اهم در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. مدل‌سازی شکل موج صاعقه بر اساس مدل سیگره، مطابق شکل‌های (۲) و (۳) می‌باشد.

۲-۳- مدل خط انتقال

برای مدل‌سازی خط انتقال نیرو در EMTP می‌توان از مدل وابسته به فرکانس (FD^6) خط انتقال استفاده نمود. که در فرکانس‌های مختلف مقادیر پارامترهای خط محاسبه می‌شوند. دو پارامتر مهم در این مدل، امپدانس مشخصه

۲-۴- مدل سیستم زمین

به منظور مدل سازی شبکه زمین پای دکل، از مدل مداری مطابق شکل (۴) استفاده شده است. مقادیر مدل سازی برای الکتروود عمودی از رابطه (۶) به دست می آید [۴].

$$R_0 = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot l}{a} - 1 \right) \quad (6)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2 \pi} l \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 \right]$$

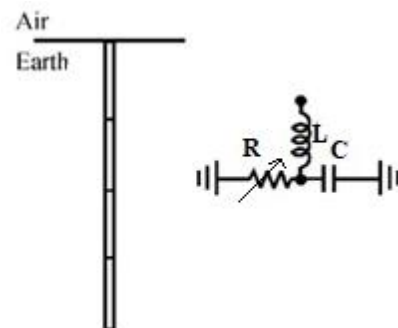
$$C = 2\pi\epsilon l \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 \right], \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (7)$$

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}}$$

$$I_g = \frac{E_{cr} \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2}$$

l و a به ترتیب طول و شعاع الکتروود برحسب متر و ρ_s مقاومت مخصوص خاک بوده (در اینجا ۱۲۰ اهم.متر در نظر گرفته شده است). ϵ ضریب گذردهی خاک و برابر ۱۰ فرض شده است. I_R جریان صاعقه اعمال شده به شبکه زمین و I_g مقدار حد جریان یونیزاسیون خاک می باشند (هر دو برحسب آمپر). E_{cr} مقدار شدت میدان الکتریکی بحرانی است که اغلب برابر ۳۰۰ kV/m در نظر گرفته می شود.

در این مطالعات از مدل مقاومتی برای شبکه زمین دکل های خطوط با میله عمودی به طول ۱/۵ متر و قطر ۲/۵۴ سانتی متر استفاده شده است.

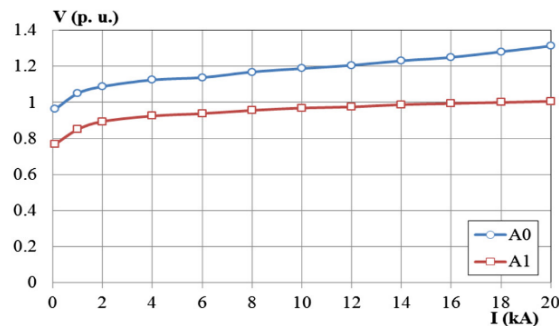


شکل (۴): مدل مداری سیستم زمین

۲-۵- مدل سازی برق گیر

به دلیل دقت بالای مدل IEEE نسبت به سایر مدل ها، برای مدل سازی برق گیرها از مدل IEEE با مشخصه غیر خطی V-I، A_1 و A_0 مطابق شکل (۵) استفاده شده است. مقادیر ارائه شده در شکل (۵) برحسب پریونیت نسبت به V_{reff} آمده است. V_{reff} ضریب مقدار یکایی A_1 و A_0 است که برای تطبیق خوب برحسب ولتاژ تخلیه شکل موج جریان ضربه ای تنظیم می شود [۴].

در این مدل برای تعیین مشخصه ولتاژ - جریان A_1 و A_0 از اطلاعات ارائه شده توسط سازنده برق گیر به ازای جریان با شکل موج 8/20 μsec با دامنه های متفاوت استفاده شده است:



شکل (۵): مشخصه ولتاژ-جریان مقاومت غیرخطی برق گیر [۴].

در این مدل مشخصه غیر خطی ولتاژ - جریان با دو مقاومت غیر خطی A_1 و A_0 مدل شده است که با یک فیلتر پایین گذر RL از هم جدا شده اند. پارامترهای مدل فرکانسی برق گیر مطابق شکل (۶)، از روابط (۸) الی (۱۲) به دست می آیند [۱۶]:

$$L_0 = \frac{0.2 d}{n} \mu H \quad (8)$$

$$R_0 = \frac{100 d}{n} \Omega \quad (9)$$

$$L_1 = \frac{15 d}{n} \mu H \quad (10)$$

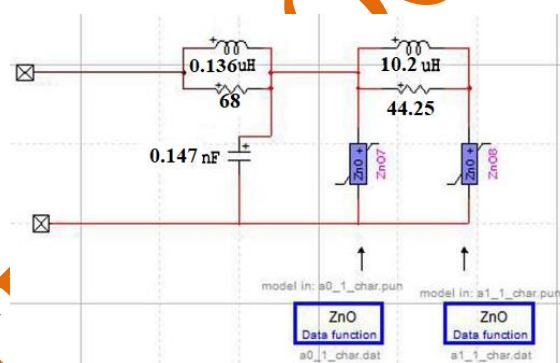
$$R_1 = \frac{65 d}{n} \Omega \quad (11)$$

(۱۲)

$$C = \frac{100 n}{d} PF$$

که در آن:

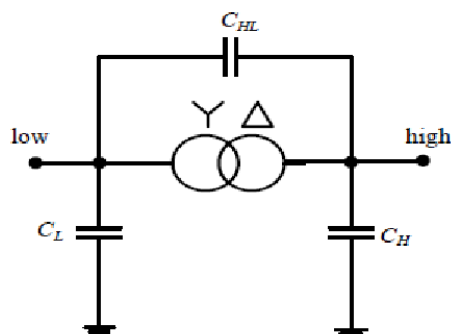
d طول برق‌گیر برحسب متر، n تعداد ستون‌های موازی برق‌گیر متشکل از قرص‌های اکسید فلزی، $L0$ اندوکتانس مغناطیسی ناشی از میدان‌های مجاور برق‌گیر یا اندوکتانس حلقه شامل ترانسفورماتور و برق‌گیر، $R0$ مقاومت برای پایدارسازی محاسبات انتگرال‌گیری و C ظرفیت خازنی دو سر برق‌گیر می‌باشند. جدول (۲)، مشخصات برق‌گیرهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۶): مدل IEEE برق‌گیر پیشنهادی برای مطالعات [۱۶]

آزمون بر روی ترانسفورماتورها وجود ندارد، لذا در این پژوهش مطابق شکل (۷) از مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور استفاده شده است. این مدل برای طیف فرکانسی مختلف مناسب می‌باشد. همچنین این مدل از اعتبار خوبی برخوردار است و در بسیاری از مطالعات مربوط به صاعقه از این مدل استفاده شده است [۱۲].

همان‌طور که مشاهده می‌شود C_L ظرفیت خازنی فشارضعیف، C_H ظرفیت خازنی سیم‌پیچ فشارقوی و C_{HL} ظرفیت خازنی کوپلینگ می‌باشد. که مقادیر این پارامترها به تفکیک ظرفیت ترانسفورماتورهای معمولی مطابق مرجع در [۱۲] در جدول (۳) آمده است.



شکل (۷): مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور [۱۴]

جدول (۳): مقادیر ظرفیت خازنی مدل فرکانس بالای

ترانسفورماتورها

CHL (nF)	CH (nF)	CL (nF)	توان ترانسفورماتور (MVA)
۶-۱۴	۷-۱۹	۵-۳۰	۱۰۰
۴-۱۸/۵	۸-۲۵	۵-۲۷	۲۰۰
۵-۲۱/۵	۱۱-۲۲	۲۰-۴۰	۳۰۰
۸-۲۴	۱۴-۲۱	۱۷-۴۵	۴۰۰

۲-۷ - مدل صاعقه برگشتی

استقامت عایقی زنجیره مقرر در برابر امواج صاعقه یک عدد ثابت نیست [۴]. بر اساس مشخصه ولت-زمان عایق، استقامت عایقی یک عایق تابع دامنه و شکل موج ولتاژ و مدت زمان اعمال آن به عایق می‌باشد. برای شبیه‌سازی زنجیره مقرر از مدل کلید جرقه زن استفاده شده است.

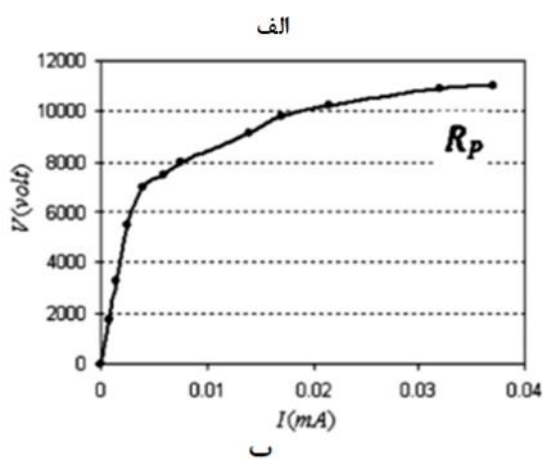
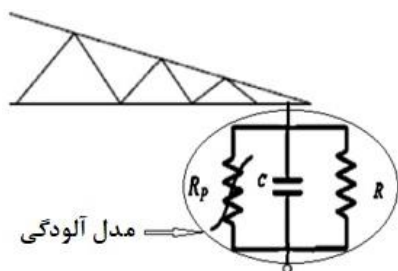
جدول (۲): مشخصات برق‌گیرهای مورد مطالعه

سطح ولتاژ (kV)			پارامترهای برق‌گیر
۴۰۰	۲۳۰	۶۳	
			$R0 (\Omega)$
۱۳۹/۶	۱۴۵/۷۵	۶۸	$R1 (\Omega)$
۰/۲۸	۰/۲۹۳	۰/۱۳۶	$L0 (\mu H)$
۲۰/۹۵	۲۱/۸۶	۱۰/۲	$L1 (\mu H)$
۰/۰۷۱	۰/۶۸۶	۰/۱۴۷	$C (nF)$

۲-۶ - مدل فرکانسی ترانسفورماتور

با توجه به اینکه استفاده از مدل‌های ترانسفورماتور استاندارد موجود در نرم‌افزار حالت گذرای EMTP، برای بررسی حالت‌های گذرای فرکانس بالا مناسب نیستند، همچنین از آنجا که امکان انجام آزمایش‌ها و تست‌های

نمک و خاک رس محلول در آب یا همان چگالی نمک نشست بر روی مقره می‌باشد [۶]. مطابق استانداردهای IEC ۶۰۸۱۵ مقدار حداقل فاصله خزشی نامی مقره با توجه به سطح آلودگی، مطابق جدول (۶) تعیین می‌شود [۱۸]. شکل (۸) مدار معادل یک مقره آلوده را نشان می‌دهد که از یک مقاومت خطی R و خازن C به صورت موازی تشکیل شده است.



شکل (۸): مدل مقره با در نظر گرفتن اثر آلودگی (الف) مدل مداری (ب) مشخصه ولتاژ جریان مقاومت غیرخطی [۴] ظرفیت خازنی هر مقره (بیل کلاهدک تا سوزن مقره) برابر با ۱۰۰ پیکوفاراد بوده و ظرفیت خازنی کل زنجیره مقره ۴۰۰ کیلوولت با ۲۶ مقره، معادل ۳/۸۴ پیکوفاراد و مقاومت معادل آن ۴۴۲۱ مگا اهم می‌باشد. برای لحاظ کردن اثر آلودگی از یک مقاومت غیرخطی با مشخصه ولتاژ-جریان مطابق شکل (۸) استفاده شده است [۴].

مقدار ضریب اصلاح رطوبت (H_C) طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$H_C = 1 + 0.0096 \left[\frac{H}{\delta} - 11 \right] \quad (14)$$

می‌توان برای سادگی، فرض نمود ولتاژ تحمل مقره در برابر موج ضربه صاعقه به اندازه کافی بالا باشد که شکست عایقی رخ ندهد. اما در عمل برای مطالعات هماهنگی عایقی بر اساس منحنی‌های $V-t$ برای یک فاصله هوایی یا زنجیره مقره، ولتاژ جرعه صاعقه برگشتی بر روی مقره از رابطه (۱۳) به دست تعیین می‌گردد [۱۳].

$$V_{fo} = (400 + \frac{710}{t^{0.75}})l \quad (13)$$

که در آن V_{fo} ولتاژ جرعه بر حسب کیلوولت، L طول زنجیره مقره بر حسب متر و t زمان سپری شده پس از صاعقه بر حسب میکروثانیه است.

۲-۸- مدل CT، CVT و PT

مطابق استاندارد IEEE و پیشنهاد کارگروه سیگره، ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی در شبیه‌سازی‌های ناشی از اضافه ولتاژهای گذرا به صورت یک خازن مطابق جدول (۴) مدل می‌شوند.

جدول (۴): پارامترهای مدل‌سازی ترانسفورماتور ولتاژ [۱۴]

مقادیر خازنی (پیکوفاراد)			تجهیز
<۱۱۵kV	<۴۰۰kV	<۷۶۵kV	
۸۰۰۰	۵۰۰۰	۴۰۰۰	CVT
۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	PT

۲-۹- مدل ترانسفورماتور جریان (CT)

مطابق استاندارد IEEE و پیشنهاد کارگروه سیگره، ترانسفورماتورهای جریان و اتوترانسفورماتورها در شبیه‌سازی‌های ناشی از اضافه ولتاژهای گذرا به صورت یک خازن مطابق جدول (۵) مدل می‌شوند.

جدول (۵): پارامترهای مدل‌سازی ترانسفورماتور جریان [۱۴]

مقادیر خازنی (پیکوفاراد)			تجهیز
۱۱۵kV	۴۰۰kV	۷۶۵kV	
۲۵۰	۶۸۰	۸۰۰	ترانسفورماتور جریان
۳۵۰۰	۲۷۰۰	۵۰۰۰	اتو ترانسفورماتور

۲-۱۰- مدل‌سازی اثر آلودگی

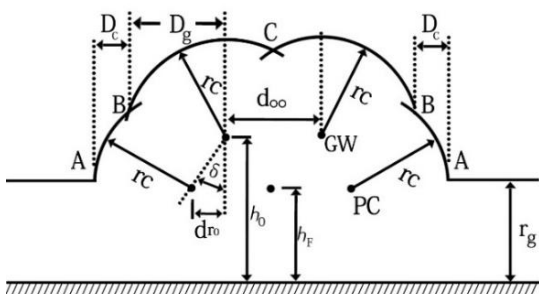
استاندارد IEC ۶۰۰۷۱ چهار سطح کیفی آلودگی را مطابق جدول (۶) مشخص کرده است. شاخص ESDD میزان

ضریب اصلاح چگالی هوا در شرایط مختلف آب و هوایی بر اساس استاندارد مطابق جدول (۷) تعیین می‌شود.

جدول (۷): ضریب اصلاح چگالی هوا [۱۸]

شرایط آب و هوایی	ضریب اصلاح چگالی هوا (δ)
طوفانی مستعد صاعقه	$1.000 e^{-A/8.59}$
غیر طوفانی مستعد صاعقه	$1.025 e^{-A/9.82}$
غیر ابری	$1.030 e^{-A/8.65}$

$A(km)$: ارتفاع منطقه از سطح آب‌های آزاد



شکل (۹): مدل EGM ترسیم شده با توجه به محل قرارگیری سیم‌های محافظ و هادی‌های فاز

۲-۱۱- مدل الکتریکی - هندسی

برای بررسی عملکرد پست در برابر صاعقه از مدل الکتریکی - هندسی (EGM) مطابق شکل (۹) استفاده می‌شود. مدل EGM با توجه به ابعاد سازه زمین شده، ارتفاع و محل قرارگیری سیم محافظ و هادی‌های فاز و همچنین نقاط تلاقی شعاع جذب هادی‌های فاز، سیم‌های محافظ و زمین مجاور ترسیم می‌شود. با توجه به مدل EGM اگر صاعقه عمودی به فاصله D_c برسد حتماً به هادی فاز و اگر به فاصله D_g برسد به سیم محافظ برخورد می‌کند. در بیرون این فواصل، صاعقه به زمین مجاور برخورد می‌کند [۱۱].

مقدار D_c و D_g از روابط زیر به دست می‌آید [۵ و ۱۱].

$$D_c = R_c [\cos(\theta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (15)$$

$$D_g = R_c [\cos(\alpha - \beta)]$$

که زوایای α و β در شکل (۹) نشان داده شده است. اگر I_p دامنه پیک موج صاعقه باشد شعاع R_c برابر است با:

$$R_c = 8 \times I_p^{0.65} \quad (16)$$

جدول (۶): مقدار حداقل فاصله خزشی نامی بر اساس

سطح آلودگی IEC ۶۰۸۱۵

سطح آلودگی	شاخص ESDD (mg/cm ²)	فاصله خزشی فاز به زمین (mm/kV)	حداقل فاصله خزشی فاز به زمین (mm/kV)
خیلی سبک	< ۰/۰۱	۲۲	-
سبک	۰/۰۱ - ۰/۰۴	۲۸	۱۶
متوسط	۰/۰۴ - ۰/۱۵	۳۵	۲۰
سنگین	۰/۱۵ - ۰/۴۰	۴۴	۲۵
خیلی سنگین	> ۰/۴۰	۵۵	۳۱

۳- نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTP-RV

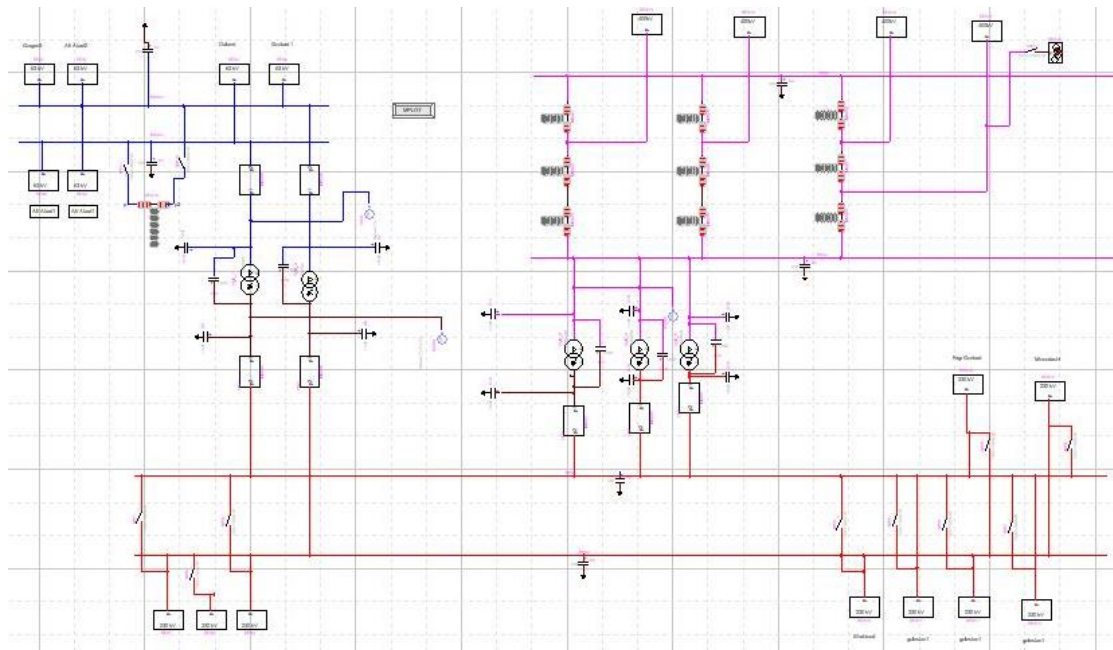
در این بخش نتایج شبیه‌سازی حالت گذرای پست‌های فشارقوی علی‌آباد کتول و شهید سلیمی نکا (شرکت برق منطقه‌ای مازندران و گلستان) با مشخصات ساختاری مطابق جدول‌های (الف) و (ب) در پیوست، ارائه شده است.

۳-۱- مطالعات صاعقه به ازای برخورد صاعقه به سیم

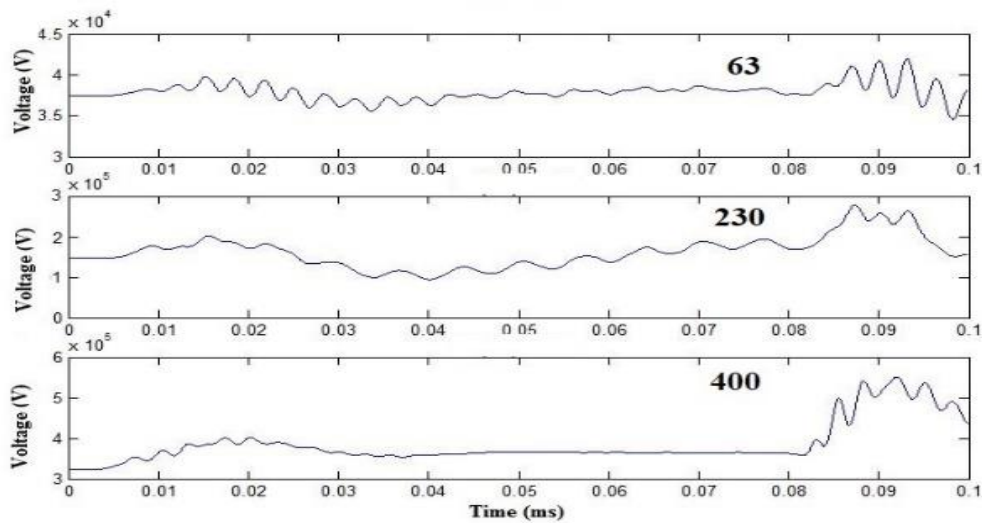
محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت (پست علی‌آباد)

برای بررسی و ارزیابی دامنه اضافه ولتاژ صاعقه بر پست فشارقوی در اثر برخورد صاعقه به خط ۴۰۰ کیلوولت، فرض شده است که محل برخورد صاعقه به سیم محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت شهید سلیمی نکا و در فاصله ۳۰۰ متری از پست فشارقوی علی‌آباد می‌باشد. شکل (۱۰) شبیه‌سازی انجام شده در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV را نشان می‌دهد. در این صورت اضافه ولتاژهای تولیدشده در سر بوشینگ ترانسفورماتورهای ۴۰۰ کیلوولت (ترانسفورماتور T3)، ۲۳۰ کیلوولت (ترانسفورماتور T5) و ۶۳ کیلوولت (ترانسفورماتور T6) به ازای برخورد صاعقه با جریان‌های ۳۰، ۸۰، ۹۶ و ۱۵۰ کیلو آمپر به سیم محافظ خط ۴۰۰

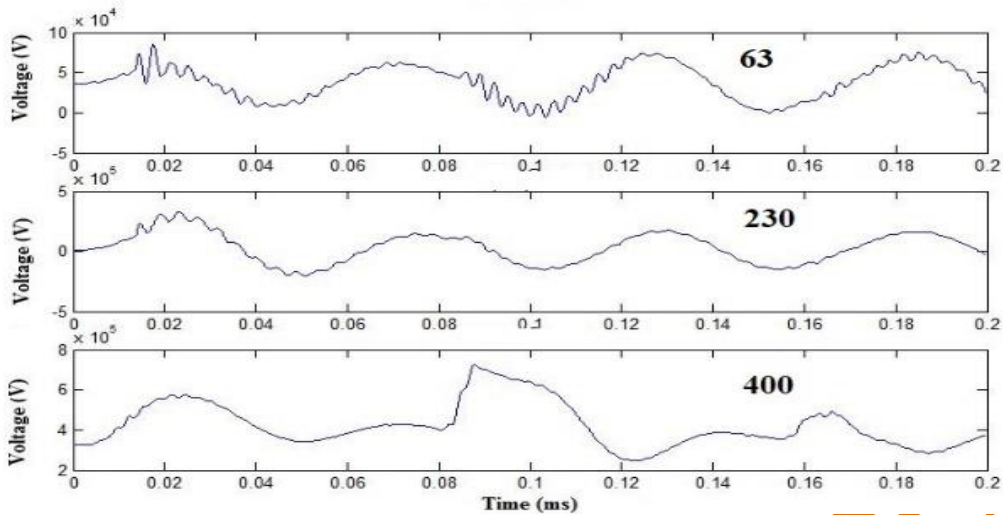
کیلوولت شهید سلیمی نکا با در نظر گرفتن اثر آلودگی، به ترتیب مطابق شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) می‌باشند.



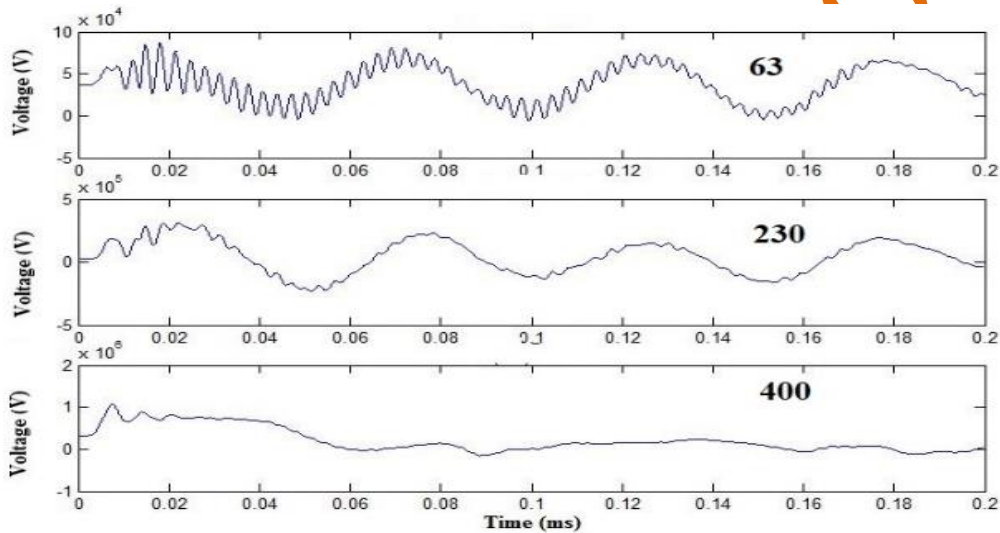
شکل (۱۰): شبیه‌سازی پست فشارقوی علی‌آباد در محیط EMTP-RV



شکل (۱۱): اضافه ولتاژهای تولید شده در سر ترمینال ترانسفورماتورهای پست فشارقوی ناشی از برخورد صاعقه ۳۰ کیلوآمپری



شکل (۱۲): اضافه ولتاژهای تولید شده در سر ترمینال ترانسفورماتورهای پست فشارقوی ناشی از برخورد صاعقه ۹۶ کیلوآمپری



شکل (۱۳): اضافه ولتاژهای تولید شده در سر ترمینال ترانسفورماتورهای پست فشارقوی ناشی از برخورد صاعقه ۱۵۰ کیلوآمپری

جدول (۸): حداکثر دامنه ولتاژ تولید شده در سر ترمینال

ترانسفورماتورهای پست (حالت اول: بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی، حالت دوم: با لحاظ کردن اثر شرایط محیطی)

دامنه موج جریان صاعقه (کیلو آمپر)	حداکثر ولتاژ سر ترمینال ترانسفورماتورها (کیلوولت)					
	۶۳ کیلوولت (T6)		۲۳۰ کیلوولت (T5)		۴۰۰ کیلوولت (T3)	
	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم
۳۰	۳۸	۳۹	۱۹۰	۲۲۰	۳۵۰	۳۶۵
۸۰	۶۶	۸۰	۱۹۵	۲۷۵	۵۸۲	۶۳۵
۹۶	۶۹	۸۳	۱۹۷	۳۱۰	۶۸۵	۷۲۰
۱۵۰	۷۰	۸۸	۱۹۸	۳۲۵	۸۶۰	۹۹۸

همان طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، با لحاظ نمودن اثر شرایط محیطی دامنه اضافه ولتاژها افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر میزان استقامت عایقی مقره‌ها کاهش یافته و در پیک جریان‌های پایین‌تر جرقه رخ می‌دهد. به طوری که با در نظر گرفتن اثر آلودگی، در خطوط ۴۰۰ کیلوولت متصل به پست‌های فشارقوی نکا و علی آباد به ازای جریان ۳۰ کیلوآمپری نیز جرقه رخ می‌دهد.

۲-۳- مطالعات صاعقه به ازای برخورد صاعقه به سیم

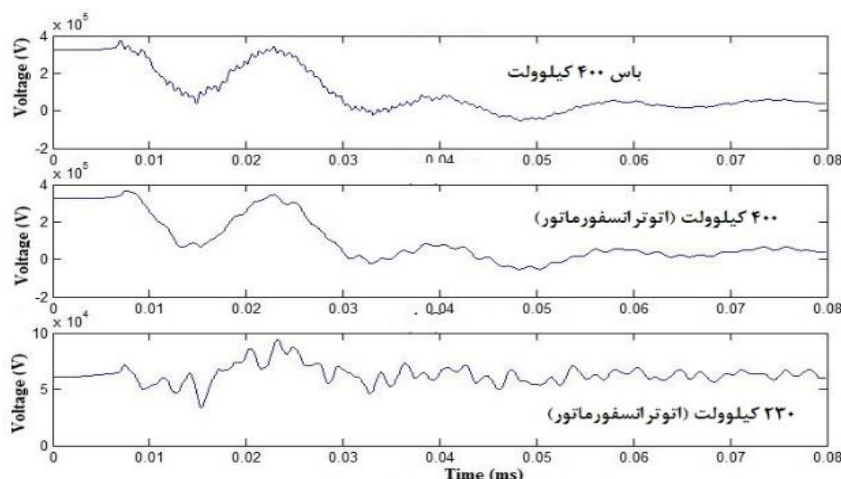
محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت (پست شهید

سلیمی نکا)

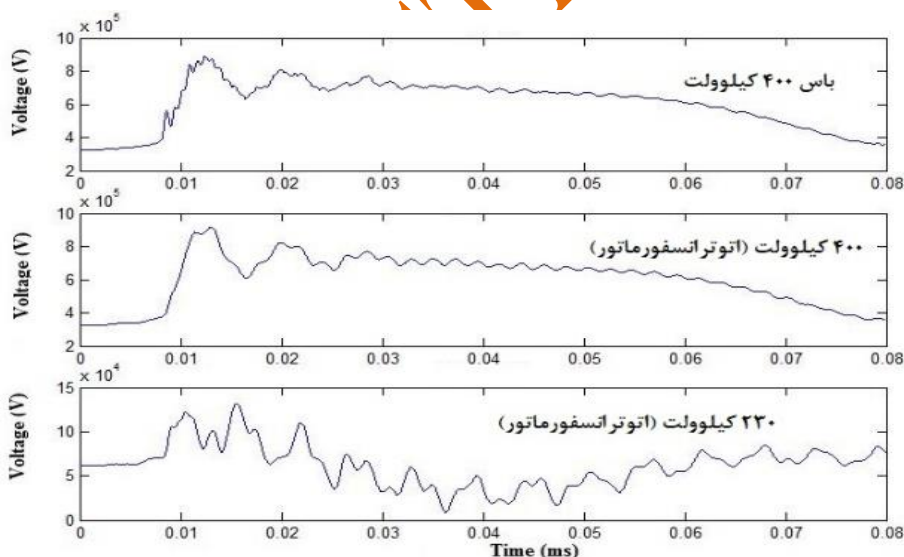
برای بررسی و ارزیابی دامنه اضافه ولتاژ صاعقه بر پست فشارقوی در اثر برخورد صاعقه به خط ۴۰۰ کیلوولت، فرض

کیلوولت ناریوران و آهوان سمنان به ترتیب مطابق شکل- های (۱۴) تا (۱۶) می‌باشند. لازم به ذکر است تمام نتایج به‌دست‌آمده با فرض عملکرد صحیح برق‌گیرها و در نظر گرفتن اثر آلودگی می‌باشد. جدول (۹) حداکثر دامنه ولتاژ تولید شده در اثر برخورد صاعقه به خط آهوان با در نظر گرفتن شرایط محیطی و بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی را نشان می‌دهد.

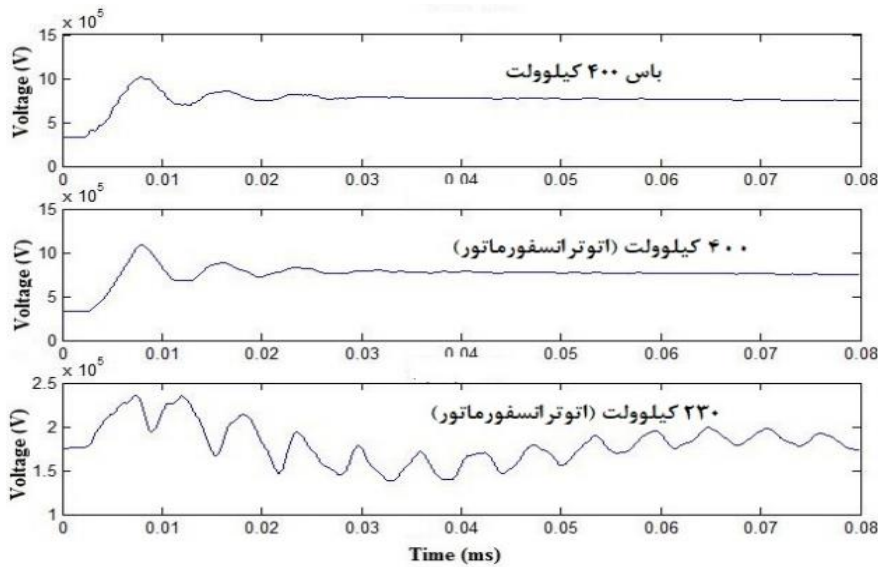
شده است که محل برخورد صاعقه به سیم محافظ خطوط ۴۰۰ کیلوولت ناریوران و آهوان سمنان در فاصله ۲۰۰ متری از پست فشارقوی نکا باشد. در این صورت اضافه ولتاژهای تولید شده در سر بوشینگ اتوترانسفورماتورهای ۴۰۰ کیلوولت (T6)، ۲۳۰ کیلوولت (T6) و همچنین باس- بار ۴۰۰ کیلوولت به ازای برخورد صاعقه با جریان‌های ۳۰، ۸۰، ۹۶ و ۱۵۰ کیلو آمپر به سیم محافظ خطوط ۴۰۰



شکل (۱۴): اضافه ولتاژهای تولید شده در اثر برخورد صاعقه ۳۰ کیلوآمپری به سیم محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت آهوان



شکل (۱۵): اضافه ولتاژهای تولید شده در اثر برخورد صاعقه ۹۶ کیلوآمپری به سیم محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت آهوان



شکل (۱۶): اضافه ولتاژهای تولید شده در اثر برخورد صاعقه ۱۵۰ کیلوآمپری به سیم محافظ خط ۴۰۰ کیلوولت آهوان

مقره‌های خط، از توزیع یکنواخت و یا نرمال برای توصیف رفتار تصادفی آن استفاده می‌شود. خطر عایقی مطابق توزیع ویبول از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P(V^n t) = 1 - \exp(-KV^m t^a) \quad (17)$$

که مقدار ثابت است و ضرایب m و a از تست ولتاژ-زمان در آزمایشگاه فشارقوی طبق شرایط استاندارد IEC حاصل می‌شود [۱۰]. برای آنکه بتوان رفتار عایقی ترانسفورماتور را در پست پیش‌بینی کرد؛ لازم است اضافه‌ولتاژهای محتمل در طول عمر سرویس آن پیش‌بینی شود. پس از تعیین تنش‌های احتمالی، تست‌های ولتاژی مناسب برای آن انتخاب می‌شود [۱۰]. تست‌های ولتاژی طوری انتخاب می‌شوند که نسبت مناسبی بین شرایط تست و تنش‌های اعمالی در سرویس وجود داشته باشد [۹].

$$V_t^m T_t^a = V_s^m T_s^a \frac{\ln R_t}{\ln R_s} \quad (18)$$

که اندیس s مربوط به زمان سرویس، t مربوط به تست و R هم قابلیت اطمینان ($R=1-P$) است. شرایط تست مطابق شکل (۱۷) شامل سه قسمت است. دوره زمانی t_1 و t_3 یک‌ساعته بوده و v_1 برابر ۱.۵ پریونیت است. در حالی که t_2 به مدت یک دقیقه بوده و دامنه v_2 بستگی به مجموعه تنش‌هایی که ترانسفورماتور احتمالاً در طول عمر خود تجربه خواهد کرد، بستگی دارد.

برای محاسبه خطر عایقی اثر تجمعی تنش‌های محتمل در طول عمر بهره‌برداری، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

جدول (۹): حداکثر دامنه ولتاژ تولید شده در اثر برخورد صاعقه به خط آهوان (حالت اول: بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی، حالت دوم: با لحاظ کردن اثر شرایط محیطی)

دامنه موج جریان صاعقه (کیلو آمپر)	حداکثر ولتاژ سر ترمینال ترانسفورماتورها (کیلوولت)					
	۴۰۰ کیلوولت (T6)		۲۳۰ کیلوولت (T6)		۴۰۰ باس کیلوولت	
	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم
۳۰	۳۴۸	۳۶۵	۷۶	۹۱	۳۷۸	۳۴۸
۸۰	۷۷۰	۸۲۰	۱۰۰	۱۲۲	۸۳۶	۷۷۰
۹۶	۸۱۴	۸۹۵	۱۲۰	۱۴۸	۹۱۲	۸۱۴
۱۵۰	۱۰۰۵	۱۰۹۵	۲۱۸	۲۴۷	۱۱۴۰	۱۰۰۵

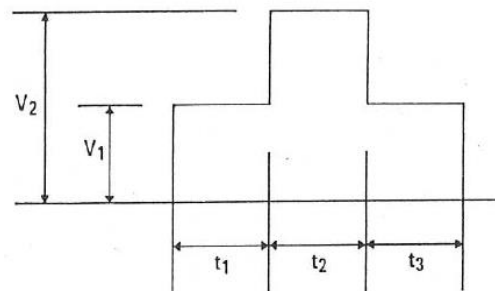
۴- محاسبه خطر تخریب عایقی

۴-۱- مشخصه ولتاژ-زمان ترانسفورماتور

وقتی یک ماده عایق غیرخود-ترمیم مانند ترانسفورماتور به‌طور مداوم تحت تنش الکتریکی قرار بگیرد با گذشت زمان خصوصیات آن تغییر می‌کند [۳]. خطر عایقی ترانسفورماتورهای قدرت از قانون توان معکوس تبعیت می‌کند [۵]. بدین منظور بهترین توزیع آماری که رفتار تصادفی خطر عایقی ترانسفورماتور را تحت ولتاژ تنش توصیف می‌کند، توزیع آماری ویبول است [۷]. این مسئله در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار نمی‌گیرد؛ و معمولاً همانند

$$P_t = 1 - \exp\{-AV_t^m T_t^a\} \quad (19)$$

$$P_s = 1 - \exp\left\{-A \sum_{i=1}^N (V_{si}^m T_{si}^a)\right\}$$



شکل (۱۷): شرایط تست ترانسفورماتور [۱۰]

که N تعداد کل تنش‌های محتمل در طول عمر سرویس ترانسفورماتور است. P_t از مجموعه ولتاژهای اعمالی در دوره‌های زمانی t_1 ، t_2 و t_3 به دست می‌آید. عموماً برای طراحی ترانسفورماتور سطح قابلیت اطمینان مورد نظر اهمیت بالایی دارد. در مطالعات گذشته سطح قابلیت اطمینان مورد نظر را ۹۵٪ و ۹۹.۸٪ در نظر گرفته‌اند [۱۰].

۲-۴- روش پیشنهادی

روش پارامتر محدودکننده ارائه شده در مطالعات قبل دارای چند نقطه ضعف اساسی می‌باشد. برای مثال، تنش‌هایی که در تشکیل خطر حضور دارند لزوماً در طول دوره عمر بهره‌برداری از ترانسفورماتور اتفاق نخواهند افتاد. بنابراین در نظر گرفتن همه اضافه ولتاژهای ناحیه خطر در هماهنگی عایقی ترانسفورماتور ایجاد خطا خواهد کرد. رفتار عایقی ترانسفورماتور در برابر تنش اضافه ولتاژ ناشی از جرعه برگشتی صاعقه معمولاً به دو صورت در نظر گرفته می‌شود. حالت اول: مقداری ثابت برای آن در نظر گرفته می‌شود [۵]، که با ماهیت غیرخودبازیاب آن در تناقض است و بایستی به گونه‌ای در نظر گرفته شود که با تغییر دامنه تنش و زمان اعمال آن تغییر کند [۷]. حالت دوم: منحنی‌های استقامت مبتنی بر منحنی‌های تقریبی غیردقیق ولتاژ-زمان بوده و با استفاده از روش‌های فیتینگ وابسته به ضرایب آن استخراج می‌گردد [۸]. همچنین توزیع آماری مورد استفاده در این مطالعات برای محاسبه خطر، اغلب یکنواخت و یا نرمال بوده است، در حالی که در این مقاله اشاره شد، خطر عایقی مبتنی بر توزیع آماری ویبول خواهد بود. در اکثر مطالعات اثرات تجمعی تنش‌ها دیده نشده است و معمولاً اثر تنش‌ها تاکنون به صورت مستقل لحاظ می‌گردید.

در حالی که اثرات تخریبی هر تنش تحمل شده قبلی بر ویژگی استقامتی ترانسفورماتور تأثیر خواهد گذاشت.

اصولاً شاخص اصلی مشخصه استقامتی روش پیشنهادی، بر اساس میزان تنش وارده به عایق ترانسفورماتور و با مقدار $V^m T^a$ می‌باشد. که V و T به ترتیب ولتاژ تنش و زمان ماندگاری آن است. m و a ضرایب مشخصه ولتاژ-زمان است و از آزمایش‌ها مربوط به آن مطابق [۲۲] به دست می‌آید. پس هرگاه تنش‌های وارده به ترانسفورماتور در طول عمر بهره‌برداری آن مشخص باشند، شاخص $V^m T^a$ کلیه تنش‌ها و شاخص کل باید محاسبه گردد. در این صورت اثر تجمعی تمامی تنش‌ها بر مشخصه استقامتی اعمال می‌شود. در حالی که در مطالعات گذشته استقامت عایقی ترانسفورماتور طوری فرض می‌شد که اثرات تنش‌های قبلی بر ترانسفورماتور لحاظ نمی‌گردید. در این مطالعه برای تعیین تنش‌های وارده، روش پیشنهادی پارامتر محدودکننده-مونت کارلو استفاده شده است. به این ترتیب که اگر N تعداد متوسط جرعه سالانه باشد و ۳۰ سال بازه مورد نظر برای بهره‌برداری از ترانسفورماتور باشد، تعداد $30N$ ضربه در طول زمان بهره‌برداری به ترانسفورماتور اعمال خواهد شد. اما واضح است تمامی ضربات صاعقه مخرب نخواهند بود. لذا شبیه‌سازی حالت گذرا فقط برای ضرباتی اجرا می‌شود که در ناحیه خطر قرار داشته باشند. بدین ترتیب به میزان قابل توجهی حجم محاسبات کاهش پیدا می‌کند. از طرفی برای انتخاب دامنه و نرخ افزایش جریان ضربات، از توزیع آماری جدول (۱۰) استفاده خواهد شد. این مقادیر احتمالاتی بوده و لزوم استفاده از یک روش شبیه‌سازی احتمالاتی مانند مونت کارلو را لازم می‌دارد. پس در هر بار تکرار، $30N$ ضربه از توزیع‌های آماری مذکور استخراج شده، سپس ضرباتی که در ناحیه ریسکی قرار می‌گیرند در شبیه‌سازی EMTP شرکت می‌کنند تا شکل موج اضافه‌ولتاژ حاصله سر ترانسفورماتور به دست آید. برای موج‌های اضافه‌ولتاژ، شاخص $V^m T^a$ محاسبه و در نهایت با استفاده از معادله (۱۹) میزان خطر خرابی به دست می‌آید. معیار توقف شبیه‌سازی مونت کارلو همگرایی خطر عایقی خواهد بود. خطر عایقی ترانسفورماتور از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است. همچنین از آنجا که ولتاژ حاصل از شبیه‌سازی EMTP با زمان تغییر می‌کند، بایستی V_2 مطابق شکل (۱۷) تعیین شود. مقدار V_2 برای شرایط تست و بهره‌برداری از رابطه زیر به دست می‌آید:

اطلاعات جمع آوری شده از آزمایش‌های مختلف نشان داده- اند که رفتار آماری هر کدام از پارامترهای صاعقه را می‌توان با یک تابع لگاریتمی نرمال تقریب زد [۲۳]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right\} \quad (22)$$

که \bar{x} و $\sigma_{\ln x}$ مقدار میانه و انحراف معیار لگاریتمی استاندارد هستند. بعضی از پارامترهای صاعقه مانند زمان پیشانی و دامنه جریان به یکدیگر وابسته هستند. با فرض توزیع نرمال هر کدام از متغیرهای صاعقه، تابع چگالی احتمال مشترک دو متغیر X و Y را می‌توان به صورت زیر به دست آورد.

$$p(x, y) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f_1 - f_2 + f_3}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right)^2\right]}{2\pi\sqrt{1 - \rho^2}\sigma_{\ln x}\sigma_{\ln y}} \quad (23)$$

$$f_1 = \left(\frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2, \quad f_2 = 2\rho\left(\frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma_{\ln x}}\right)\left(\frac{\ln y - \ln \bar{y}}{\sigma_{\ln y}}\right)$$

$$f_3 = \left(\frac{\ln y - \ln \bar{y}}{\sigma_{\ln y}}\right)^2$$

که در آن $\ln \bar{x}$ و $\ln \bar{y}$ مقدار میانه و $\sigma_{\ln x}$ و $\sigma_{\ln y}$ انحراف معیار متغیرهای تصادفی X و Y بوده و ρ نیز ضریب همبستگی متغیرهای مذکور است. X و Y به ترتیب دامنه پیک و نرخ افزایش جریان است و مقادیر آن مطابق جدول (۱۰) استخراج شده است [۲۳].

جدول (۱۰): توزیع‌های آماری دامنه پیک و نرخ افزایش جریان

I_m (kA)	$\sigma_{\ln(I)}$ (pu)	S_m (kA/ μ s)	$\sigma_{\ln(S)}$ (pu)	ρ (pu)
۳۰	۰/۶۸	۱۴	۰/۵۵	۰/۳۶

$$V_2 = \sqrt[m]{\frac{IND_{V-T} - 2V_1^m \times t_1^a}{t_2^a}} \quad (20)$$

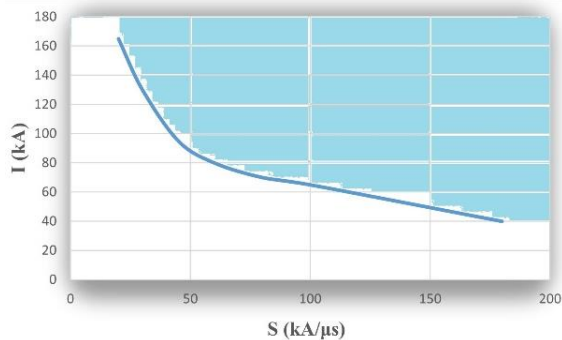
که IND_{V-T} شاخص مجموع $V^m T^a$ برای هر 30N ضربه در هر تکرار مونت کارلو است. بنابراین با ترکیب رابطه (۲۰) با رابطه (۱۹)، خطر عایقی ترانسفورماتور به صورت زیر خواهد بود:

$$P = D_g \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{V_2}{V_{base}}\right)^m\right\}\right] \quad (21)$$

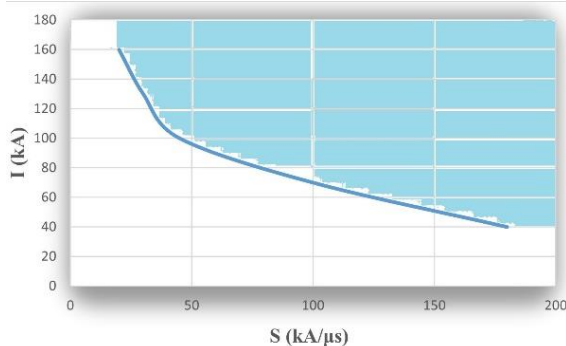
که V_{base} مقداری انتخاب می‌شود که به ازای اعمال V_2 برابر $BIL/0.7$ قابلیت اطمینان (R) برابر ۹۰٪ شود. مقدار ۰.۷ از آن جهت انتخاب شده که منحنی مشخصه ولتاژ-زمان بایستی ۳۰٪ بالاتر از سطح استقامت BIL باشد [۲۴]. مطابق فلوجارت روش پیشنهادی در شکل (۱۸)، در ابتدا لازم است اطلاعات پست شامل، امپدانس‌های موجی شینه-ها برای مدل‌سازی در EMTP، تعداد روزهای صاعقه دار، مشخصات دکل برای محاسبه امپدانس موجی و به کارگیری در مدل EGM، امپدانس پای دکل و BIL را دریافت کرد. سپس پست مورد مطالعه و خطوط ورودی آن را در EMTP پیاده‌سازی کرد. در مرحله بعد باید مطابق روند قسمت (۵) مشخصه S-I و ناحیه محدود آن را مشخص گردد. بدین وسیله می‌توان ضرباتی که موجب تنش برگشتی سر ترانسفورماتور شوند را جدا کرد. بنابراین با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) نمونه‌های تصادفی ضربات صاعقه از توزیع آماری جدول (۱۰) تولید خواهد شد. متغیرهای ورودی شبیه‌سازی مونت کارلو شامل توزیع آماری جریان و نرخ افزایش آن است. در گام بعد شبیه‌سازی مونت کارلو با اعمال نمونه‌های تصادفی جریان صاعقه به دکل اول نزدیک پست آغاز می‌شود. در هر تکرار شبیه‌سازی تعداد 30N ضربه تولید خواهد شد و تنها ضرباتی که در ناحیه محدود S-I قرار می‌گیرند، به EMTP برای شبیه‌سازی حالت گذرا اعمال می‌شوند. تا با ولتاژ ظاهر شده سر ترانسفورماتور، شاخص $V^m T^a$ محاسبه و با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) میزان خطر محاسبه شود. از دامنه جریان نیز برای محاسبه D_g مطابق رابطه (۱۵) استفاده می‌شود. پس از همگرایی شبیه‌سازی مونت کارلو، روند فوق برای دیگر دکلهای تکرار خواهد شد. در نهایت خطر کلی از مجموع مقادیر خطر دکل‌ها حاصل خواهد گردید.

جدول (۱۱): ضرایب m و a ترانسفورماتور [۸]

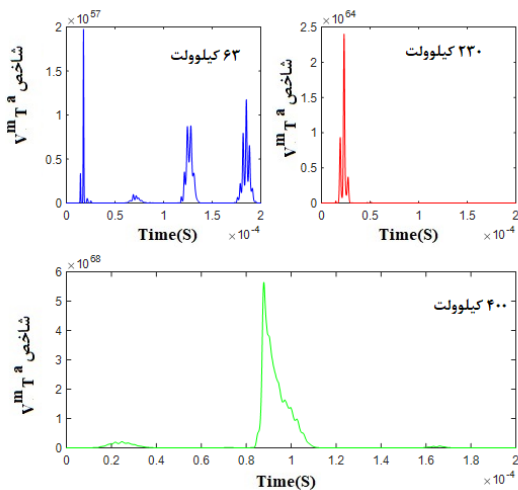
ضریب m	ضریب a	ضریب n
۱۲	۰/۳۹	۳۰



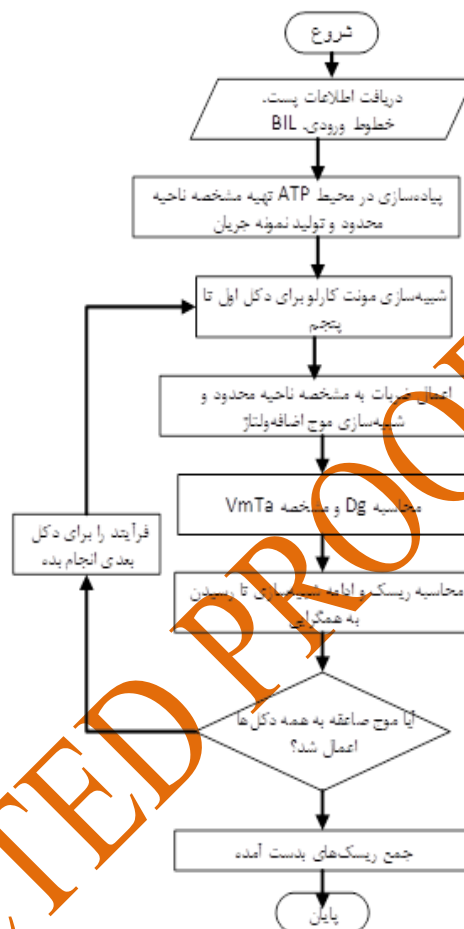
شکل (۱۹): منحنی $S-I$ برای پست فشارقوی علی‌آباد



شکل (۲۰): منحنی $S-I$ برای پست فشارقوی نکا



شکل (۲۱): نمودار شاخص $V^m T^a$ برای شکل (۱۱)



شکل (۱۸): فلوجارت روش پیشنهادی

۳-۴- روش توسعه یافته خطر عایقی

با تشکیل مشخصه $I-S$ برای ۱۰۰۰ نمونه تولیدی روش مونت کارلو موجود در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) خروجی ضربات مونت کارلو که در نواحی سایه‌دار قرار بگیرند مورد ارزیابی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب تعداد شبیه‌سازی EMTP و بار محاسباتی به میزان چشمگیری کاسته خواهد شد. بطوریکه نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده که برای ۲۰۰ ضربه در طول دوره بهره‌برداری خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت آهوان، حداکثر ۸ ضربه از آن در ناحیه بحرانی واقع می‌شود. زیرا ضربات از توزیع لوگ-نرمال مطابق مقادیر جدول (۱۱) استخراج شده است و در توزیع لوگ-نرمال مقادیر حول ناحیه با دامنه کمتر متراکم‌تر است. ضربات صاعقه‌ای که پس از وقوع اضافه‌ولتاژ برگشتی به ترانسفورماتور می‌رسد، به‌ازای وقوع در دکل‌های اول تا پنجم بعد از پست، برحسب دامنه ماکزیمم و زمان وقوع ماکزیمم اضافه‌ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است.

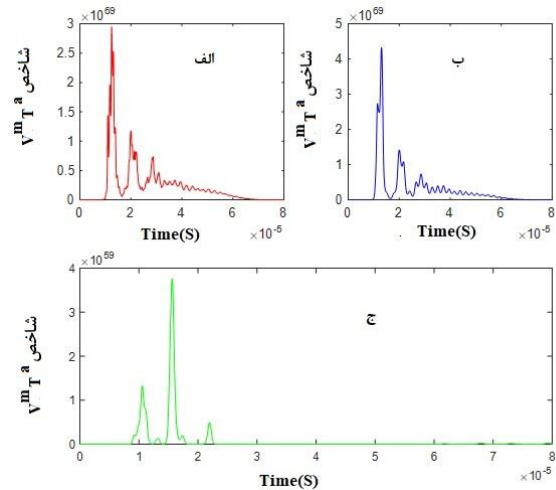
جدول (۱۳): خطر عایقی ترانسفورماتور پست فشارقوی علی آباد

سطح ولتاژ (kV)	۶۳	۲۳۰	۴۰۰
ریسک عایقی بدون لحاظ کردن اثر محیطی	$۸/۴۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۶۴ \times ۱۰^{-۵}$
ریسک عایقی با لحاظ اثر محیطی	$۹/۳۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۶۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۹۱ \times ۱۰^{-۵}$

مطابق یافته‌های جدول (۱۲) و (۱۳) میزان خطر عایقی با در نظر گرفتن شرایط محیطی افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله به محاسبه خطر عایقی ترانسفورماتورهای قدرت با در نظر گرفتن اثر آلودگی پرداخته است. بدین منظور دو پست فشارقوی نمونه در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV پیاده‌سازی شده است. به منظور دستیابی به نتایج دقیق با توجه به داده‌های موجود در پست‌های فشارقوی نمونه از مدل‌های گذرای دقیق استفاده شده است. برای ارزیابی خطر عایقی روش توسعه یافته‌ای ارائه شده است تا بار محاسباتی به‌طور محسوسی کاهش یابد. در روش ارائه شده برخلاف روش‌های قبلی، اثر تجمعی تنش‌ها بر روی محاسبه خطر عایقی با توجه به رفتار غیر خود-ترمیم عایق ترانسفورماتور لحاظ شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد برای طراحی دقیق عایقی و هماهنگی عایقی در پست‌های فشارقوی، اثر تجمعی تنش‌ها و مشخصه ولتاژ زمان (V-T) با توجه به استحکام عایق ترانسفورماتور در نظر گرفته شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با در نظر گرفتن اثر آلودگی میزان جرعه صاعقه و به تبع آن خطر عایقی به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. مطابق نتایج شبیه‌سازی دامنه اضافه ولتاژهای روی مقره‌ها نسبت به حالت مقره‌های تمیز افزایش می‌یابد. به طوری که با لحاظ کردن اثر آلودگی میزان خطر عایقی در پست فشارقوی علی‌آباد ۱۰ درصد و پست فشارقوی نکا ۱۶ درصد افزایش پیدا کرده است. لذا در نظر گرفتن شرایط محیطی به‌ویژه آلودگی محیطی برای



شکل (۱۲): نمودار شاخص $VmTa$ برای شکل (۱۵) الف) باس ۴۰۰ کیلوولت ب) اتوترانسفورماتور (۴۰۰ ج) اتوترانسفورماتور (۲۳۰)

از آنجا که برای جریان ناحیه حداقل و حداکثری انتخاب شده، بطوریکه ناحیه خطر در داخل آن قرار می‌گیرد، بنابراین با انتگرال‌گیری جریانی در این محدوده می‌توان خطر عایقی را به‌صورت زیر محاسبه کرد [۲۲].

$$R = 0.6 N_g L \int_{RiskArea} D_g f(I) dl \quad (24)$$

$$N_g = 0.04 (T_d)^{1.25}$$

همان‌طور که در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) مشاهده می‌گردد مقدار شاخص $VmTa$ برای تنش‌های اضافه ولتاژی برای خطوط مختلف استخراج می‌شود و با توجه به روش پیشنهادی خطر عایقی مطابق جدول‌های (۱۲) و (۱۳) تعیین می‌شود. محاسبات خطر عایقی در دو حالت (با در نظر گرفتن اثر آلودگی منطقه و بدون لحاظ کردن آن) انجام شده است.

جدول (۱۲): خطر عایقی ترانسفورماتور پست فشارقوی نکا

سطح ولتاژ (kV)	۶۳	۲۳۰	۴۰۰
ریسک عایقی بدون لحاظ کردن اثر محیطی	$۹/۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۷۴ \times ۱۰^{-۵}$
ریسک عایقی با لحاظ اثر محیطی	$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۵۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۱۸ \times ۱۰^{-۵}$

مراجع

- [۱] محسن نیاستی، احمد غلامی، اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در شبکه‌های قدرت، چاپ اول، انتشارات دانشگاه سمنان، ایران، ۱۳۹۵.
- [2] F. Deyhim, and R. Ghanizdeh, "Insulation risk assessment of controlled switching considering pre-strike voltage and line trapped charge", IET Science, Measurement & Technology, Vol. 13, NO. 2, March 2019, pp. 139-148.
- [3] A. Rahiminejad and B. Vahidi, "LPM-Based Shielding Performance Analysis of High-Voltage Substations Against Direct Lightning Strokes," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, NO. 5, October 2017, pp. 2218-2227.
- [4] A. Said, "Analysis of 500kV OHTL polluted insulator string behavior during lightning strokes", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 95, February 2018, pp. 405-416.
- [5] M. S. Savic, "Engineering method for high-voltage substations lightning performance estimation", IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 136, No. 4, July 1989, pp. 222-229.
- [6] IEC 60071-2, "Insulation co-ordination part2: application guidelines", International Standard, 2018.
- [7] M. Qais, and U. Khaled, "Evaluation of V-t characteristics caused by lightning strokes at different locations along transmission lines", Journal of King Saud University-Engineering Sciences, Vol. 30, NO. 2, April 2018, pp. 150-160.
- [8] S. Okabe, "Voltage-time and voltage-number characteristics of insulation elements with oil-filled transformers in EHV and UHV classes", IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, Vol. 13, NO. 2, April 2006, pp. 436-444.
- [9] S. Okabe, T. Tsuboi and J. Takami, "Reliability evaluation with weibull distribution on AC withstand voltage test of substation equipment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, NO. 5, October 2008, pp. 1242-1251.
- [10] Y. Shu, and W. Chen, "Research and application of UHV power transmission in China". High voltage, Vol. 3, NO. 1, March 2018, pp.1-13.
- [11] IEEE Std. 998, "IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations", (Revision of IEEE Std. 998-1996), April 2013, pp.1-227.
- [12] F. A. M. Rizk, "Modeling of Substation Shielding Against Direct Lightning Strikes", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 52, NO. 3, August 2010, pp. 664-675.
- [13] R. G. Deshagani, "Design and Analysis of Earthing System for Wind Turbine Generators from Lightning Discharge Currents". Research Archive at Victoria University of Wellington, Published 2020.
- [14] J. A. Martinez-Velasco "Transient Analysis of Power Systems". A Practical Approach. John Wiley & Sons, 2020.
- [15] M. S. Savic, and A. M. Savic, "Substation lightning performance estimation due to strikes into connected overhead lines". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, NO. 4, February 2015, pp. 1752-1760.
- [16] S. A. Hosseini, M. Mirzaie, and T. Barforoshi, "The Effects of Surge Arrester Location and Tower Footing

Resistance on 230/63 kV Substation Under Lightning Overvoltage”, International Conference on Protection and Automation of Power Systems.

[17] M. S. Savic, and A. M. Savic, “Substation lightning performance estimation due to strikes into connected overhead lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, NO. 4, February 2015, pp. 1752-1760.

[18] U. Schubert, A. Shirvani, U. Schmidt, S. Kornhuber, and E. Kynast, “Proposal for a General Atmospheric Correction Method of Breakdown and Withstand Voltages of Air-Gap Insulated Configurations Based on a Streamer-Leader Differentiated Model of the Breakdown Process” Energies, Vol. 11, NO. 4, March 2018, pp. 776.

[19] A. S. Meliopoulos, and G. J. Cokkinides, “Substation lightning shielding and risk assessment. European transactions on electrical power”, Vol. 13, NO 6, November 2003, pp. 407-412.

[20] H. Hirose, “A Method to Estimate the Lifetime of Solid Electrical Insulation”, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 22, December 1987, pp. 745-753.

[21] A. A. Salem, R. Abd-Rahman, W. Rahiman, S. A. Al-Gailani, S. M. Al-Ameri, M. T. Ishak, and U. U. Sheikh, “Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: Numerical and experiment investigation”, IEEE Access, Vol. 9, March 2021, pp. 37800-37812.

[22] M. Ikeda, T. Yanari, and H. Okubo, “PD and BD Probability Distribution and Equi-Probabilistic V-t Characteristics of Oil-filled Transformer Insulation”, IEEE, Vol. PAS-101, August 1982, pp. 2728-2735.

[23] F. Safaei, and M. Niasati, “Calculation of UHV transformer insulation risk by extended Monte Carlo method”, Electric Power Systems Research, Vol. 218, May 2023, pp. 109219.

[24] B. Thomas, and U. Savadamuthu, “Impulse breakdown characteristics of aged oil impregnated paper”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, NO. 4, September 2017, pp. 2354-2361.

UNCORRECTED PROOF

Analysis of transformer insulation risk due to back flashover lightning on high voltage substations by considering the effect of environmental pollution

Faridoddin Safaei¹ Mohsen Niasati^{2*}

1. PhD Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, farid.safaii@semnan.ac.ir.
2. Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, mniasati@semnan.ac.ir.

*Corresponding Author: Mohsen Niasati

ARTICLE INFO

Keywords:

Insulation
Coordination of
Substation,
Power Transformer,
BF Lightning over-
voltages,
Insulation risk,
Pollution.

ABSTRACT

The improved limiting parameter method of Monte Carlo is used in this study to estimate the impact of back-flashover (BF) due to lightning and provide an evaluation criterion for the insulation risk of the transformer in the high-voltage substation. In order to avoid the computational burden of the transient-state simulation, the Monte Carlo (MC) simulation method is combined with the limiting parameter method while taking into account the environmental conditions governing the high-voltage substation. On the other hand, depending on its amplitude and duration, any stress brought on by an excess of voltage causes destructive structural effects. Insulating behavior may be different before or after applying stress. Additionally, it is necessary to consider how the presence of environmental pollutants affects on BF lightning overvoltage amplitude. Therefore, the voltage-time-dependent strength accumulation characteristic has been developed in this study based on the transformer's non-self-healing behavior when exposed to various insulation stresses. By selecting appropriate distribution of expected strokes to estimate insulation risk, the finite area MC method that is being proposed calculates the insulation risk of the transformer based on the transient overvoltage that appears at the transformer terminals. Also discussed is the relationship between BF lightning and the contamination level of the insulation surface under the stresses brought on by lightning strikes. In this manner, the insulation coordination of the transformer can be known with the least number of calculations by using the structural data of the substation, the lines connected to it, and the transformer. The simulation results presented in this study were performed in a real sample network using the field and experimental data. The results showed an 18 percent increase in insulation risk considering the effect of environmental condition.

جدول (الف). اطلاعات کلی دکل خط ۴۰۰ کیلوولت علی آباد

(پست نکا)

مقدار	واحد	مشخصات خط
۴۰۰	کیلوولت	ولتاژ نامی
۴۲۰	کیلوولت	حداکثر ولتاژ
۲	عدد	تعداد مدار
۱۶۰	کیلومتر	طول خط
سنگین و خیلی	-	کلاس آلودگی منطقه
سنگین	درجه	حداقل / حداکثر دمای منطقه
-۲۰/۴۰	سانتی گراد	
۶۴	متر	ارتفاع از سطح دریا (برای مطالعات کل خط)
۱۶	روز	تعداد روزهای صاعقه دار در سال (IKL)
۶۸	درصد	رطوبت نسبی
۳۰	متر بر ثانیه	سرعت باد
۳۰۰	متر	اسپن اقتصادی خط (متوسط)
۳۰	متر	ارتفاع دکل
۱۳۰	اهم	امپدانس موجی دکل
۳۰	اهم	حداکثر مقاومت سیستم زمین پای دکل (مجاز)
۳۲۶۴	میلی متر	طول تقریبی زنجیر مقره

جدول (ب). اطلاعات کلی دکل خط ۴۰۰ کیلوولت شهید

سلیمی (پست علی آباد)

مقدار	واحد	مشخصات خط
۴۰۰	کیلوولت	ولتاژ نامی
۴۲۰	کیلوولت	حداکثر ولتاژ
۲	عدد	تعداد مدار
	کیلومتر	طول خط
متوسط و سنگین	-	کلاس آلودگی منطقه
-۲۰/۴۲	درجه	حداقل / حداکثر دمای منطقه
	سانتی گراد	
۴۰	متر	ارتفاع از سطح دریا (برای مطالعات کل خط)
۱۶	روز	تعداد روزهای صاعقه دار در سال (IKL)
۵۵	درصد	رطوبت نسبی
۳۰	متر بر ثانیه	سرعت باد
۳۰۰	متر	اسپن اقتصادی خط (متوسط)
۳۰	متر	ارتفاع دکل
۱۳۰	اهم	امپدانس موجی دکل
۳۰	اهم	حداکثر مقاومت سیستم زمین پای دکل (مجاز)
۳۲۶۴	میلی متر	طول تقریبی زنجیر مقره

پاورقی

- 1 Ultra-High Voltage
- 2 Basic Impulse Insulation Level
- 3 Basic Switching Impulse Insulation Level
- 4 Electro-geometric method
- 5 Electromagnetic Transient Program
- 6 Frequency Dependent