

ارزیابی احتمالاتی عملکرد حفاظتی برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای در کاهش خاموشی‌های ناشی از صاعقه در خطوط توزیع هوایی

رضانعلی نقی‌زاده

به هزینه نصب برق‌گیرها و لزوم اولویت‌بندی فیدرها یا تعیین بخش‌های حساس فیدر جهت نصب برق‌گیر، محاسبه میزان اثربخشی نصب برق‌گیرها از منظر تحلیل فنی-اقتصادی برای بهره‌برداران شبکه حایز اهمیت بسیاری است. یکی از چالش‌های اساسی در این بحث آن است که تخمین دقیق عملکرد خطوط توزیع در برابر صاعقه شامل عدم قطعیت در پارامترهای زیادی است که حتماً باید در محاسبات مد نظر قرار گیرند.

اثر نصب برق‌گیرها یا بحث جایابی آنها قبلاً در مراجعی مانند [۳] تا [۷] مورد توجه بوده است. اما در این مراجع موضوع استفاده از برق‌گیرهای مرسوم اکسید فلزی (MOV) برای حفاظت خطوط توزیع در برابر صاعقه مد نظر می‌باشد. با توجه به معایب برق‌گیرهای MOV شامل حساسیت این برق‌گیرها به مقاومت مسیر ارت، از کار افتادن آنها به دلیل قطعی و یا سرقت سیم ارت، ظرفیت انرژی قابل تحمل پایین، هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری بالا و حساسیت بالا نسبت به نفوذ رطوبت و نشستی جریان، کاربرد این برق‌گیرها برای حفاظت خطوط توزیع را دچار محدودیت‌ها و مسایل زیادی نموده است [۱].

در سالیان اخیر استفاده از فناوری MCA^۱ به دلیل حساسیت بسیار کم به مقاومت مسیر ارت و عدم نیاز به احداث سیستم ارت مجزا، قابلیت قطع جریان بالا، قابلیت اطمینان بالا و هزینه نصب پایین، عدم حساسیت به رطوبت و هزینه تعمیر و نگهداری بسیار پایین برای کاهش خاموشی‌های ناشی از بروز صاعقه در خطوط توزیع پیشنهاد شده است [۸] تا [۱۱]. عملکرد این برق‌گیرها در [۱۲] و [۱۳] به صورت میدانی در کشورهای مالزی، تایلند، چین، ویتنام، اندونزی و کامبوج مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است این نوع برق‌گیرها در ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به عنوان نمونه در [۱۴] و [۱۵] تجربیات میدانی به کارگیری آنها ارائه شده است.

در این بین، بررسی و مرور منابع و پژوهش‌های موجود مرتبط با برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای نشان می‌دهد که در مراجع و مقالات به محاسبه عملکرد MCA در کاهش میزان خاموشی‌های ناشی از صاعقه در خطوط هوایی شبکه‌های توزیع پرداخته نشده است. ارائه روند مناسب و دقیق و یا ارائه نتایج چنین مطالعه‌ای به منظور ارزیابی عملکرد و به خصوص جایابی MCA می‌تواند برای بهره‌برداران شبکه توزیع جهت کاهش خاموشی‌های ناشی از صاعقه در خطوط توزیع و بهبود حفاظت تجهیزات و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان شبکه بسیار مفید باشد. از این رو در این مقاله یک فرایند آماری و دقیق بر مبنای شبیه‌سازی مونت‌کارلو در محیط ATP-EMTP و ایجاد ارتباط این

چکیده: در این مقاله، یک فرایند محاسباتی احتمالاتی دقیق برای تعیین تعداد خاموشی ناشی از برخورد صاعقه و نیز ارزیابی میزان اثربخشی نصب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای (MCA) به عنوان گزینه جایگزین برای برق‌گیرهای مقاومت-متغیر اکسید فلزی (MOV) مرسوم برای تأمین حفاظت فیدرهای توزیع در برابر صاعقه و جلوگیری از بروز خاموشی پیاده‌سازی شده است. محاسبه اضافه ولتاژ القایی ناشی از برخورد غیر مستقیم بر اساس مدل آگراوال و لحاظ زمین تلفاتی انجام گردیده است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای صاعقه شامل دامنه جریان، زمان پیشانی موج و فاصله برخورد صاعقه از خط توزیع از روش مونت‌کارلو به همراه روش کاهش سناریوی بازگشتی استفاده شده و عملکرد MCA در حفاظت خط توزیع به همراه مدلی مناسب در نرم‌افزار ATP-EMTP شبیه‌سازی گردیده است. همچنین به منظور پیاده‌سازی سناریوهای متعدد ایجاد شده و تحلیل نتایج، ارتباط نرم‌افزاری بین برنامه MATLAB و نرم‌افزار فوق ایجاد شده است. شرایط مختلفی مانند مقادیر استقامت عایقی خط، هدایت ویژه زمین و ضریب حفاظتی عوارض خط توزیع نیز در محاسبات لحاظ شده است. نتایج به دست آمده به نحوی ارائه گردیده تا علاوه بر تخمین تعداد تخلیه‌های ناشی از صاعقه، ارزیابی اثربخشی نصب MCA با توجه به شرایط متنوع هر فیدر با دقت بالا قابل تعیین باشد.

کلیدواژه: ارزیابی عملکرد برق‌گیر، اضافه ولتاژ القایی صاعقه، برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای، حفاظت عایقی خطوط توزیع، عدم قطعیت، هماهنگی عایقی.

۱- مقدمه

صاعقه یکی از عوامل مهم بروز تخلیه و خطاهای ناشی از آن در خطوط توزیع هوایی است. این خطاها ممکن است منجر به قطعی‌های موقت و یا دائمی در شبکه توزیع شوند. اگر خطای موقت توسط عمل بازبست یک کلید قدرت و یا ریکلوزر رفع شود، ممکن است مدار مجدداً برق‌دار شود. اما در دهه‌های اخیر مسایل مربوط به کیفیت توان نیز باعث حساسیت بیشتر نسبت به این موضوع شده و بحث بهبود حفاظت خطوط در برابر برخورد صاعقه به منظور جلوگیری از قطعی‌های موقت و یا افت ولتاژهای لحظه‌ای بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. با توجه به ماهیت و شرایط خطوط توزیع هوایی، استفاده از برق‌گیرها یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد این خطوط در برابر برخورد صاعقه و کاهش تعداد خطاهای موقت یا دائم ناشی از آن است [۲]. طبعاً با توجه

این مقاله در تاریخ ۲۰ مهر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۵ اسفند ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد. این مقاله توسط شرکت توزیع نیروی برق استان همدان بر اساس قرارداد شماره ۲۴۷۳۴ پشتیبانی شده است.

رضانعلی نقی‌زاده (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران، (email: naghizadeh@hut.ac.ir).

1. Metal Oxide Varistor
2. Multi-Chamber Arrester

بالایی برق گیر هستند (شکل ۱). با رسیدن موج اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه به برق گیر، با شکست عایقی هوا در فاصله هوایی و نیز در بین محفظه‌ها، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. در هنگام تخلیه اضافه ولتاژ صاعقه از طریق فاصله هوایی و محفظه‌های برق گیر، هدایت فاصله هوایی به دلیل یونیزاسیون هوا به شدت افزایش می‌یابد و جریان و در نتیجه انرژی موج گذرا از طریق برق گیر تخلیه می‌شود. با کاهش جریان و تخلیه انرژی موج گذرا، با اولین عبور جریان فرکانس قدرت از مقدار صفر، عملکرد خاموش کنندگی محفظه‌های برق گیر منجر به خاموش شدن قوس و قطع جریان شده و شرایط به حالت عادی بازمی‌گردد. این خاصیت اطفاکندگی MCAها با توجه به طراحی خاص آنها ایجاد شده است [۹].

با این تفصیل، با توجه به خاموش شدن قوس در کمتر از یک نیم سیکل یا ۱۰ میلی‌ثانیه، بروز اتصالی منجر به صدور فرمان قطع توسط رله‌های حفاظتی نشده و در نتیجه خاموشی در شبکه ایجاد نخواهد شد. مزایای اصلی این برق گیرها، شامل عدم حساسیت بالا به مقاومت مسیر زمین و تخلیه جریان، عدم نیاز به چاه و سیم ارت (در مدل‌های سری I از جمله مدل i۲۰Z که برای برخوردهای غیر مستقیم صاعقه طراحی و ساخته شده‌اند)، نشتی جریان صفر در شرایط عملکرد عادی شبکه، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری، قابلیت اطفای جریان اتصالی بالا (۱/۵ kA برای مدل i۲۰Z) و در نتیجه قابلیت اطمینان بالای آنها می‌باشد.

انتخاب و تعیین مدل برق گیر MCA مناسب با توجه به ساختار و دسته‌بندی آن برای شبکه برخلاف برق گیرهای MOV پیچیدگی چندانی ندارد [۹]. نحوه نصب این برق گیرها نیز فرایندی ساده است و با پیچ کردن نقطه اتصال (نشان داده شده در شکل ۱) به پایه مقرر و یا کنسول با بهره‌گیری از بست‌های فلزی مخصوص و رعایت فاصله هوایی مجاز بین الکتروود پایانه و هادی خط یا در صورت لزوم، الکتروود متصل به هادی خط (مانند شکل ۲-الف) قابل انجام است. در این بین، بحث تنظیم فاصله هوایی در این برق گیرها مطرح می‌باشد که البته فاصله مناسب توسط سازنده برای شرایط عادی پیشنهاد گردیده است. اما برای لحاظ دقیق‌تر شرایط شبکه و محیط، رابطه زیر برای محاسبه بازه فاصله هوایی مجاز (شکل ۲-الف) برق گیرهای چندمحفظه‌ای پیشنهاد شده است [۱۶]

$$\frac{\sqrt{3}U_n - PFW_{gl}}{U_{bPF}} \leq l \leq \frac{CFO_{Insulator} - CFO_{MCA}^{gl}}{SF} U_{bl} \quad (۱)$$

که U_n ولتاژ مؤثر فاز به فاز شبکه بر حسب kV، PFW_{gl} استقامت اضافه ولتاژ فرکانس قدرت محفظه‌های برق گیرهای چندمحفظه‌ای یا بدنه برق گیر بدون در نظر گرفتن فاصله هوایی بر حسب kV/mm، U_{bPF} ولتاژ شکست هوا در فرکانس قدرت بر حسب kV/mm، l طول فاصله هوایی برق گیر بر حسب mm، $CFO_{Insulator}$ استقامت عایقی مقرر خط بر حسب kV، SF ضریب امنیت لازم برای جلوگیری از تخلیه ناخواسته (بدون واحد و بر اساس پیشنهاد سازنده حدود ۱/۳ در نظر گرفته می‌شود [۹])، CFO_{MCA}^{gl} استقامت اضافه ولتاژ ضربه صاعقه محفظه‌های برق گیرهای چندمحفظه‌ای بدون فاصله هوایی بر حسب kV و U_{bl} ولتاژ شکست هوا در ضربه صاعقه بر حسب kV/mm است. لازم به ذکر است برق گیر مدل i۲۰Z که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته بر اساس پیشنهاد سازنده به صورت تناوبی بین فازها در یک فاز از هر تیر و در کنار مقرر نصب می‌شود (شکل ۲-ب).



شکل ۱: بخش‌های مختلف ساختار برق گیر چندمحفظه‌ای مدل i۲۰Z.

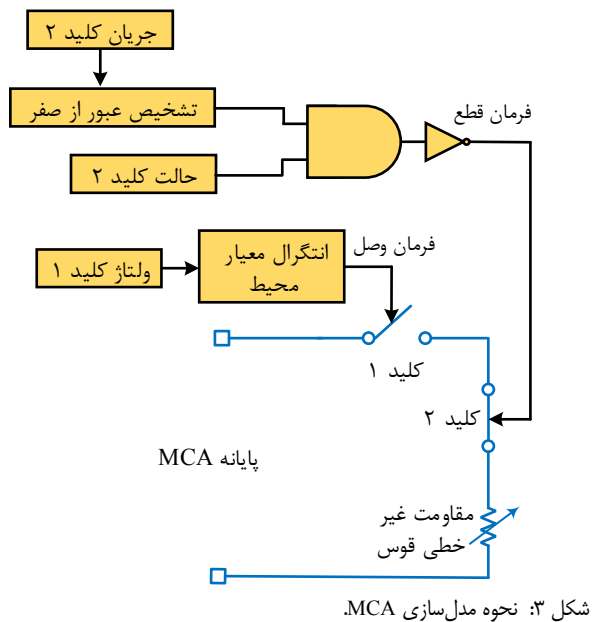
نرم‌افزار با MATLAB پیشنهاد شده تا اثر عملکرد برق گیرهای چندمحفظه‌ای در کاهش خاموشی‌ها به صورت کمی در شرایط مختلف با دقت مناسب ارزیابی گردد. یکی دیگر از بحث‌های اساسی و مهم در این شبیه‌سازی‌ها، محاسبه دقیق اضافه ولتاژهای القایی در برخوردهای غیر مستقیم صاعقه است. بر این اساس، در این مقاله از مدل شناخته‌شده آگروال با لحاظ زمین غیر ایده‌آل یا تلفاتی برای این منظور استفاده گردیده است. در ارائه نتایج نیز نمودارهای مناسب جهت تعیین میزان اثربخشی نصب برق گیرهای چندمحفظه‌ای در کاهش تعداد خاموشی‌ها بر اساس مقادیر مختلف استقامت عایقی (CFO) خط، هدایت ویژه خاک، عوارض مرتفع اطراف خط و سایر پارامترهای مهم ارائه شده است. نوآوری‌های مقاله به شرح زیر است:

- ارائه یک مدل مداری جدید برای شبیه‌سازی رفتار MCA
- ایجاد ارتباط بین نرم‌افزار MATLAB و ATP/EMTP به منظور انجام شبیه‌سازی مونت کارلو
- ارزیابی عملکرد MCA در حفاظت خطوط توزیع در برابر برخورد صاعقه در شرایط مختلف
- لحاظ کردن عدم قطعیت پارامترهای صاعقه و محل برخورد آن و ارائه نتایج بر اساس شرایط مختلف فیدرهای توزیع
- استفاده از روش کاهش سناریوی بازگشتی به منظور کاهش تعداد سناریوها و کاهش زمان محاسبات

نتایج به دست آمده می‌تواند برای بهره‌برداران شبکه توزیع جهت جابجایی یا اولویت‌بندی فیدرهای توزیع جهت نصب این برق گیرها بسیار سودمند و راهگشا باشد. در ادامه مقاله، در بخش دوم به معرفی فناوری MCA پرداخته شده و در بخش سوم نحوه مدل‌سازی اجزای سیستم شرح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها به همراه تفسیر نتایج در بخش چهارم ارائه گردیده و در بخش پنجم نیز جمع‌بندی مقاله آمده است.

۲- معرفی فناوری MCA

برق گیرهای چندمحفظه‌ای دارای یک بدنه سیلیکون رابری با چندین محفظه متوالی و یک فاصله هوایی بین کلمپ متصل به هادی و قسمت



شکل ۳: نحوه مدل‌سازی MCA.

تخلیه در برق‌گیر زمانی انجام می‌گیرد که شرط فوق با بروز اضافه ولتاژ برقرار گردد. با عملکرد برق‌گیر، کلید شماره ۱ که به صورت پیش‌فرض باز است، بسته خواهد شد. در رابطه بالا، $U(\tau)$ ولتاژ اعمالی در پایه‌های MCA در زمان τ ، U ولتاژ مینیمم در حال افزایش قبل از هر تخلیه و t لحظه عبور ولتاژ از مقدار آستانه U است. پارامترهای k ، U و DE ، ثوابتی وابسته به فاصله هوایی و پلاریته اضافه ولتاژ هستند.

برای محاسبه ثوابت فوق روابط مختلفی ارائه گردیده [۱۸] که در اینجا از روابط زیر با فرض $k=1$ برای این منظور استفاده شده است [۱۹]

$$U_c = 0.77 \times CFO_{MCA}^{ag} \quad (3)$$

$$DE = 1.1806 \times (CFO_{MCA}^{ag})^{1.36} \quad (4)$$

که CFO_{MCA}^{ag} مقدار ولتاژ استقامت مجموعه برق‌گیر و فاصله هوایی بر حسب kV است. مقدار این پارامتر بر اساس قواعد تنظیم فاصله هوایی و نکات پیشنهادی شرکت سازنده بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]

$$CFO_{MCA}^{ag} = \frac{CFO_{Insulator}}{1.3} \quad (5)$$

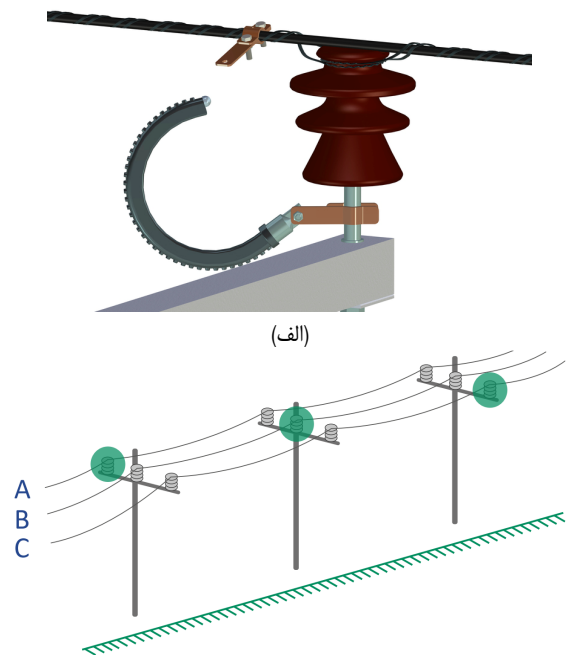
همچنین برای مدل‌سازی اثر قوس در MCA از یک مقاومت غیر خطی با رابطه تجربی زیر استفاده شده است [۲۰]

$$R = \frac{1400}{I^{1.8}} \quad (6)$$

در صورت عملکرد برق‌گیر، جریان در مدار برقرار شده و پس از اتمام حالت گذرای ولتاژ، جریان فرکانس قدرت از قوس عبور خواهد کرد. در اولین عبور از صفر جریان، برق‌گیر قادر به اطفای قوس خواهد بود و کلید شماره ۲ مدار که به صورت پیش‌فرض بسته در نظر گرفته شده است، با خاموش شدن قوس و صدور فرمان قطع، باز می‌شود و عملکرد برق‌گیر به اتمام می‌رسد.

۲-۳ محاسبه ولتاژ القایی در EMTP

معادلات و روش‌های مختلفی برای محاسبه و مدل‌سازی ولتاژ القایی در برخوردی غیر مستقیم صاعقه ارائه شده است. به منظور وارد کردن این مدل‌ها در شبیه‌سازی مداری EMTP، یک یا دو منبع جهت لحاظ کردن اثر میدان‌های الکترومغناطیسی در معادلات تلگرافی خطوط در



(ب)

شکل ۴: نحوه نصب برق‌گیر چندمحفله‌ای مدل $iZ0$ ، (الف) نحوه نصب در کنار مقره با رعایت بازه مجاز فاصله هوایی و (ب) نحوه نصب در طول خط توزیع [۹].

شایان ذکر است که این برق‌گیرها به منظور حفاظت خطوط توزیع در برابر تخلیه ناشی از بروز صاعقه طراحی شده‌اند و استفاده از آنها به صورت مجزا برای حفاظت تجهیزات شبکه توصیه نمی‌شود. البته ترکیب نصب MCA با برق‌گیرهای MOV منجر به کاهش شدت اضافه ولتاژ و همچنین تنش انرژی حرارتی در برق‌گیرهای MOV خواهد شد.

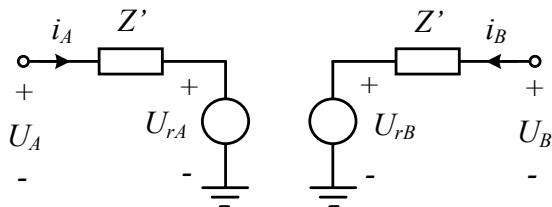
۳- مدل‌سازی اجزای سیستم و عدم قطعیت

سیستم مورد مطالعه، شامل کلیه تجهیزات پست فوق توزیع HV/MV، خط توزیع، مقره‌ها، تیرهای برق، مقاومت پای تیرها و برق‌گیرهای چندمحفله‌ای است. همچنین مدل‌سازی برخورد غیر مستقیم صاعقه و تعیین شکل موج اضافه ولتاژ نیز بخش حائز اهمیتی از شبیه‌سازی انجام شده است. در ادامه این بخش، جزئیات مدل‌سازی MCA، روش استفاده شده برای محاسبه ولتاژ القایی، مدل‌سازی رفتار تصادفی پدیده برخورد صاعقه به خطوط توزیع، بحث تفکیک برخوردهای صاعقه به خط، اثر عوارض مرتفع اطراف خط، روابط و فرایند نحوه ایجاد مقادیر تصادفی و نیز روش اتخاذ شده برای کاهش سناریو ارائه گردیده است. در انتهای بخش نیز فرایند شبیه‌سازی شرح داده شده است. لازم به ذکر است که جزئیات دیگر مدل‌سازی‌ها و تعیین پارامترهای مدل سایر اجزای سیستم در مراجعی مانند [۱۷] در دسترس می‌باشد.

۳-۱ مدل‌سازی MCA

کلیت مدل‌سازی MCA در شکل ۳ نشان داده شده است. با پایش ولتاژ دو سر کلید یا همان ولتاژ دو سر برق‌گیر بر اساس روش انتگرال معیار محیط در صورت عملکرد برق‌گیر، فرمان وصل کلید صادر خواهد شد. در این روش لحظه وقوع تخلیه نیز شبیه‌سازی می‌شود. دقت مناسب در برابر امواج گذرا با پلاریته منفی و مثبت از مزایای این روش است. رابطه زیر مبنای پیاده‌سازی روش انتگرال معیار محیط است

$$\int_t^t (|U(\tau)| - U_c)^k d\tau \geq DE \quad (2)$$



شکل ۵: مدل اصلاح شده خط جهت اعمال ولتاژ القایی در خط [۲۱].

که در آن $A_\sigma = A + A_\Delta$ بردار پتانسیل کل است و A و A_Δ به ترتیب بخش مربوط به حالت بدون تلفات و بخش مربوط به زمین تلفاتی بردار پتانسیل هستند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۲]

$$A(x, z) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I}{j\omega} \int_0^H \left(\frac{e^{-jkR}}{R} + \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \right) e^{-h(\frac{j\omega}{v} + \frac{1}{\lambda})} dh \quad (9)$$

$$A_\Delta(x, z) = \frac{I \cdot f}{j\omega} \int_0^H f_p e^{-h(\frac{j\omega}{v} + \frac{1}{\lambda})} dh \quad (10)$$

که در آن μ ضریب گذردهی خلأ ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)، I دامنه جریان صاعقه، ω فرکانس زاویه‌ای، H ارتفاع کانال صاعقه، k و k_1 به ترتیب ضریب انتقال هوا و زمین، R و R_1 به ترتیب فاصله بین نقطه مشاهده و دو قطبی داخل کانال و تصویر کانال در زمین، v سرعت جریان صاعقه و λ ثابت میرایی جریان در طول کانال صاعقه است. پارامترهای f ، f_1 و f_p نیز به صورت زیر بیان می‌شوند

$$f = -\frac{\mu}{4\pi} \gamma u \sqrt{\frac{jk\pi}{2}} \quad (11)$$

$$f_1 = \sqrt{R_1} \frac{e^{-jkR_1}}{r} \quad (12)$$

$$f_p = e^{-p} \operatorname{erfc}(j\sqrt{p}) \quad (13)$$

که در این روابط u نسبت ضریب انتقال ($u = k/k_1$)، p فاصله عددی در رابطه مورد استفاده تابع میرایی سامرفیلد و erfc تابع خطای گوسی مکمل می‌باشد. تعریف مدل ولتاژ القایی صاعقه در محیط ATP-EMTP توسط زبان برنامه‌نویسی MODELS انجام شده است. نحوه پیاده‌سازی در [۲۱] برای حالت ساده‌تر بدون تلفات شرح داده شده است، ولی همان گونه که قبلاً اشاره گردید، در مقاله حاضر تلفات زمین در نظر گرفته شده است.

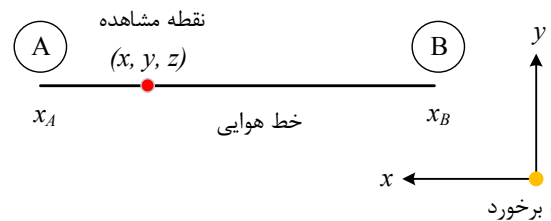
۳-۳ تفکیک برخوردها و تعیین حداکثر فاصله برخورد

در کل مجموعه رخداد‌های تصادفی ایجاد گردیده در فرایند شرح داده شده در بخش قبلی، دو حالت برخورد مستقیم و برخورد غیر مستقیم ایجاد خواهد شد. با فرض عدم وجود عوارض مرتفع در اطراف خط توزیع، نحوه تعیین نوع برخورد بر اساس مدل هندسی برخورد صاعقه یا مدل الکتروژئومتریکی (EGM) انجام می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده است [۱]. در این شکل فواصل برخورد به صورت زیر بیان می‌شود

$$r_s = 1.0 I^{0.65} \quad (14)$$

$$r_g = 0.9 r_s$$

که در آن r_s فاصله برخورد به هادی خط، r_g فاصله برخورد به زمین و I حداکثر جریان ضربه اول صاعقه بر حسب kA است.



شکل ۴: ساختار فرضی برای تلفیق ولتاژ القایی در مدل خط.

نظر گرفته می‌شود. یکی از روش‌هایی که دقت کافی را در بازه فرکانسی ۱۰ kHz تا ۱ MHz به همراه سهولت نسبی در پیاده‌سازی فراهم می‌کند، مدل آگراوال است که فرضیات مورد استفاده در آن منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های دیگر مانند مدل راسک یا چاودوری می‌گردد. در این مدل، مؤلفه افقی میدان الکتریکی به عنوان منبع و مؤلفه عمودی میدان الکتریکی به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود [۲۱] و [۲۲]. به همین دلیل در این مقاله از این مدل جهت شبیه‌سازی ولتاژ القایی ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه استفاده شده و جزئیات وارد کردن این مدل در این بخش ارائه گردیده است.

ساختار کلی سیستم در شکل ۴ آمده است. سمت A خط هوایی به نحوی در نظر گرفته شده که $x_A > x_B$ باشد. منظور از z نیز بعد سوم مختصات می‌باشد که برای نشان دادن ارتفاع از سطح زمین استفاده شده است.

از طرف دیگر، مدل الکتریکی خط در محیط EMTP به صورت رابطه زیر اصلاح می‌گردد [۲۲]

$$U_{rA}(t) = U_{indA}(t) + U_B(t - \tau) + Z' \cdot i_B(t - \tau) \quad (15)$$

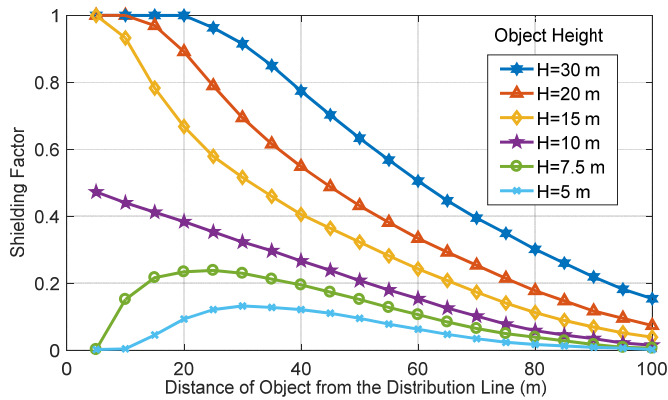
$$U_{rB}(t) = U_{indB}(t) + U_A(t - \tau) + Z' \cdot i_A(t - \tau)$$

که در آن Z' امپدانس مشخصه خط و τ زمان سیر موج در خط است. شایان ذکر است که مدل‌سازی خطوط با تعداد فاز دلخواه با بیان معادله فوق به صورت ماتریسی قابل پیاده‌سازی است.

اثر ولتاژهای القایی ناشی از میدان الکترومغناطیسی منتشر شده از کانال صاعقه یا به عبارتی کوپلینگ کانال صاعقه و خط در ترم‌های U_{indA} و U_{indB} (ولتاژهای القایی) لحاظ می‌شود. همین دو عبارت به صورت منابع ولتاژ در مدل مداری خط اعمال می‌شوند. وارد کردن این منابع ولتاژ با استفاده از مدل لحاظ شده در شکل ۵ در محیط EMTP قابل انجام است. معادلات ولتاژهای القایی با فرض زمین بدون تلفات و خط بدون تلفات منجر به عبارات ساده‌تری در حوزه زمان خواهند شد. اما در مقاله حاضر به منظور لحاظ کردن اثر هدایت ویژه زمین در محاسبات و افزایش دقت و اهمیت هدایت ویژه زمین در بحث حاضر، زمین اطراف خط به صورت تلفاتی و خط هوایی نیز با مقاومت لحاظ شده است. از آنجا که در این حالت، حل معادلات کوپلینگ در حوزه زمان مقدور نیست، معادلات در حوزه فرکانس حل می‌شوند و پس از به دست آوردن معادلات نهایی، از تبدیل فوریه معکوس برای حصول نتیجه در حوزه زمان استفاده می‌گردد. معادلات ولتاژ القایی با مفروضات فوق به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]

$$U_{indA}(j\omega) = \frac{c^v}{j\omega} \left[\frac{\partial A_\sigma(x_A, \cdot)}{\partial z} - \frac{\partial A_\sigma(x_A, \cdot)}{\partial z} \right] e^{-\gamma l} - \gamma \int_{x_B}^{x_A} \frac{\partial A_\sigma(x_A, \cdot)}{\partial z} e^{-\gamma(x_A - x)} dx \quad (16)$$

$$+ j\omega z (A_\sigma(x_A, \cdot) - A_\sigma(x_B, \cdot)) e^{-\gamma l}$$



شکل ۷: نمودار ضریب S_f با حضور ساختارهای نزدیک خط برای یک خط با ارتفاع ۱۰ متر [۱].

۳-۴ اثر عوارض مرتفع اطراف خط

با توجه به ارتفاع کم خطوط توزیع، عوارض مرتفع و نزدیک به این خطوط در تعیین نوع برخورد صاعقه به خط (مستقیم یا غیر مستقیم) بسیار تعیین‌کننده هستند. به منظور لحاظ کردن اثر عوارض مرتفع اطراف خط از نمودار ضریب حفاظت [۱] استفاده گردیده و فرایند شرح داده شده در بخش ۳-۳ اصلاح می‌شود. به این صورت که در صورت وجود عناصر حفاظتی و عوارض بلندمرتبه طبیعی در اطراف خط هوایی توزیع و در حالی که فاصله برخورد صاعقه از خط در بازه $(0, d_{min})$ قرار گیرد، برخی از این صاعقه‌ها مستقیماً به خط برخورد نخواهند کرد و به این عوارض مرتفع برخورد خواهند کرد و نوع برخورد صاعقه از نوع برخورد غیر مستقیم خواهد بود. سهم این نوع صاعقه‌ها از کل صاعقه‌های بازه $(0, d_{min})$ با ضریب کاهش $(1 - S_f)$ تعیین خواهد شد که در آن S_f ضریب حفاظت است و مقداری بین ۰ تا ۱ دارد. اگر $S_f = 0$ باشد، نشان‌دهنده این است که خط توزیع در یک محیط باز و بدون حفاظت در برابر برخورد صاعقه توسط اشیای اطراف قرار دارد (این حالت همان پیش‌فرض فرایند بخش ۳-۳ است). در نقطه مقابل، $S_f = 1$ به معنی حفاظت کامل خط از برخورد مستقیم صاعقه توسط ساختارهای بلند اطراف است. مقدار ضریب حفاظت بر اساس منحنی‌های شکل ۷ به دست می‌آید. در این محاسبات فرض شده که عناصر حفاظتی (مانند ساختمان‌ها یا درختان) در یک ردیف یکنواخت به صورت موازی با خط و در یک سمت آن قرار دارند.

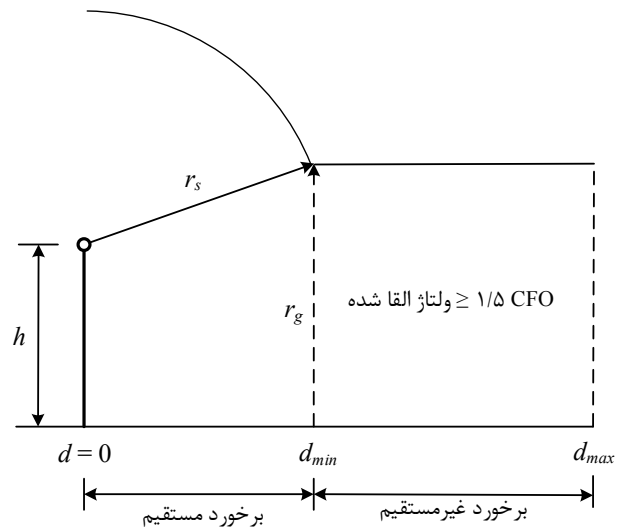
لازم به ذکر است در صورتی که عناصر حفاظتی در هر دو سمت چپ و راست خط وجود داشته باشند، ضریب حفاظتی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]

$$S_f = \min \{ S_{f_{Right}} + S_{f_{Left}}, 1 \} \quad (18)$$

که در آن $S_{f_{Right}}$ و $S_{f_{Left}}$ به ترتیب ضریب حفاظتی سمت راست و چپ خط توزیع هوایی هستند. پس از تعیین تعداد برخورد مستقیم صاعقه به خط، با توجه به مقدار پایین CFO مقهره‌های توزیع در مقایسه با دامنه بسیار بیشتر اضافه ولتاژهای ایجادشده، می‌توان فرض کرد که تمامی این برخوردها به بروز تخلیه منجر می‌شوند.

۳-۵ توابع توزیع آماری

به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت پارامترهای مربوط به رخداد صاعقه باید به تعداد کافی سناریوی شبیه‌سازی به صورت تصادفی ایجاد گردد. هر رخداد n ام از تعداد کل n_{tot} رخداد صاعقه ایجادشده با سه پارامتر I_{pn} ، t_{fn} و d_n توصیف می‌شود که به ترتیب حداکثر جریان صاعقه،



شکل ۸: مدل الکتروژئومتریکی برای تعیین نوع و حداکثر فاصله برخورد صاعقه [۱].

به منظور تعیین حداکثر فاصله برخورد d_{max} ، از معادله ساده‌شده راسک برای تخمین ولتاژ القایی استفاده گردیده است

$$V_{max} = \frac{Z I h}{d} \left(1 + \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{2 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) \quad (15)$$

که در آن $Z = 1/(\pi \epsilon) \sqrt{\mu/\epsilon}$ (تقریباً برابر ۳۰ اهم)، μ و ϵ به ترتیب ضریب ویژه نفوذپذیری و گذردهی فضای آزاد، I جریان حداکثری ضربه اول صاعقه بر حسب kA ، h ارتفاع متوسط هادی خط توزیع از سطح زمین (مرتفع‌ترین هادی)، d نزدیک‌ترین فاصله (عمود) بین محل برخورد صاعقه و خط، v سرعت ضربه صاعقه بر حسب متر بر ثانیه (نوعاً برابر $c/3$) و c سرعت نور در فضای آزاد که برابر 3×10^8 متر بر ثانیه است، می‌باشد. به ازای هر سناریوی موج صاعقه، دو فاصله از خط باید محاسبه گردد: d_{min} حداقل فاصله که نشان‌دهنده حداقل فاصله برخورد صاعقه برای عدم برخورد مستقیم به خط است و d_{max} حداکثر فاصله d_{max} که نشان‌دهنده ایجاد اضافه ولتاژ القایی کافی در خط جهت بروز تخلیه در آن است. اضافه ولتاژ آستانه برای این حالت بر اساس 1.5 برابر میزان CFO خط در نظر گرفته می‌شود. مقدار d_{min} بر اساس معیار EGM به شرح زیر محاسبه می‌گردد [۱]

$$d_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad \text{for } h < r_g \quad (16)$$

$$d_{min} = r_s \quad \text{for } h \geq r_g$$

مقدار d_{max} نیز بر اساس رابطه ساده‌شده راسک که قبلاً در (۱۵) ارائه گردید قابل محاسبه است

$$d_{max} = \frac{Z I h}{1.5 \times CFO} \left(1 + \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{2 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) \quad (17)$$

اگر فاصله برخورد صاعقه از خط در بازه $(0, d_{min})$ قرار گیرد، برخورد از نوع مستقیم خواهد بود و اگر خط مجهز به برق‌گیر نباشد، با توجه به شدت بالای اضافه ولتاژ و استقامت عایقی پایین خطوط توزیع، همیشه منجر به تخلیه می‌شود. اما در صورتی که فاصله برخورد صاعقه از خط در بازه $[d_{min}, d_{max}]$ قرار گیرد، برخورد از نوع غیر مستقیم خواهد بود و محاسبه اضافه ولتاژ القایی بر اساس مدل آگراوال در محیط EMTF انجام خواهد شد.

با به کارگیری روش تبدیل معکوس در [۲۵]، اگر U_n ، U_{n+1} و U_{n+2} سه متغیر تصادفی در بازه $(0,1)$ باشند، مقادیر I_{pn} ، t_{fn} و d_n از روابط زیر به دست می‌آید

$$\begin{cases} F_v(I_p) = U_n \\ F_v(t_f | I_p) = U_{n+1} \\ F_v(d) = U_{n+2} \end{cases} \quad (26)$$

که F_i ($i=1, 2, 3$) تابع تجمعی توزیع مربوط به f_i و $F_v(t_f | I_p)$ تابع تجمعی توزیع شرطی t_f به ازای I_p معلوم است. اما از آنجا که f_v و f_v توابع توزیع نرمال لگاریتمی هستند، مرسوم است که به جای U_n و U_{n+1} از متغیرهای تصادفی نرمال استاندارد Z_n و Z_{n+1} استفاده شود. بنابراین (۲۶) طی گام‌های زیر حل می‌شود:

گام (۱) برای محاسبه I_{pn} :

۱-۱ یک متغیر نرمال استاندارد Z_n در بازه $(0,1)$ تولید می‌شود.

۲-۱ I_{pn} بر اساس رابطه $I_p = e^{a_n}$ ایجاد می‌شود که در آن $a_n = \mu_{\ln I_p} + \sigma_{\ln I_p} Z_n$ است.

گام (۲) برای محاسبه t_{fn} :

۱-۲ $\mu_{\ln t_{fn}}^*$ و $\sigma_{\ln t_{fn}}^*$ بر اساس (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌شوند.

۲-۲ یک متغیر نرمال استاندارد Z_{n+1} در بازه $(0,1)$ تولید می‌شود.

۳-۲ $t_{fn} = e^{b_n}$ که در آن $b_n = \mu_{\ln t_{fn}}^* + \sigma_{\ln t_{fn}}^* Z_{n+1}$ است.

گام (۳) در نهایت برای محاسبه d_n :

۱-۳ یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت U_n در بازه $(0,1)$ ایجاد می‌شود.

۲-۳ $d_n = U_n d_{\max}$

اگر تعداد رخدادهایی را که بر اساس شبیه‌سازی EMTP منجر به وقوع تخلیه (در حداقل یک مقره) گردند با n_{FO} نشان دهیم، آن گاه تعداد تخلیه سالانه به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر از خط توزیع (F_p) از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$F_p = 200 \times \frac{n_{FO}}{n_{tot}} \times GFD \times d_{\max} \quad (27)$$

که در آن منظور از GFD، چگالی سالیانه برخورد صاعقه به زمین بر حسب $\text{km}^{-1} \text{yr}^{-1}$ می‌باشد. ضریب ۲۰۰ در رابطه فوق برای تبدیل واحد و نیز لحاظ برخورد صاعقه در سمت دیگر خط به جهت تقارن شکل ۶ در نظر گرفته شده است.

۳-۷ کاهش سناریو

با توجه به شبیه‌سازی کامل فرایند با جزئیات بالا در نرم‌افزار EMTP و نیاز به تنظیم گام‌های زمانی کوچک برای حصول دقت کافی، زمان لازم برای سناریوهای با تعداد زیاد در روش مونت کارلو بسیار قابل توجه خواهد بود. به منظور رفع این مشکل، از تکنیک‌های کاهش سناریو استفاده می‌شود که در آنها سناریوهای تولیدشده مشابه حذف می‌گردند تا از تکرار شبیه‌سازی‌هایی که به نتایج نزدیک به هم منجر می‌شوند جلوگیری گردد. در این مقاله برای کاهش تعداد سناریوها از روش کاهش سناریوی بازگشتی استفاده شده است [۲۶]. کاهش سناریوی بازگشتی مبتنی بر ۵ مرحله است که این مراحل عبارتند از:

مرحله اول: محاسبه فاصله بین سناریوها

مرحله دوم: مشخص کردن نزدیک سناریو به هر سناریو بر اساس فاصله بین سناریوها

جدول ۱: پارامترهای توزیع لگاریتمی نرمال برای صاعقه پایین‌رونده منفی [۲۳].

پارامتر	مقدار میانه		مقدار انحراف معیار	
	$I_p > 20 \text{ kA}$	$I_p \leq 20 \text{ kA}$	$I_p > 20 \text{ kA}$	$I_p \leq 20 \text{ kA}$
I_p (kA)	۶۱	۳۳٫۳	۱٫۳۳	۰٫۶۰۵
t_f (μs)	۳٫۸۳	۰٫۵۵۳		

زمان پیشانی موج و فاصله محل برخورد صاعقه از خط توزیع هستند. تابع چگالی احتمالی مشترک بین متغیرهای تصادفی I_{pn} و t_{fn} به صورت نرمال لگاریتمی فرض می‌شود

$$f(I_p, t_f) = \frac{1}{2\pi \times I_p \times t_f \times \sigma_{\ln I_p} \times \sigma_{\ln t_f} \times (1-\rho)^2} e^{(-A)} \quad (19)$$

$$A = \frac{1}{2(1-\rho)^2} \left[\left(\frac{\ln I_p - \mu_{\ln I_p}}{\sigma_{\ln I_p}} \right)^2 + \left(\frac{\ln t_f - \mu_{\ln t_f}}{\sigma_{\ln t_f}} \right)^2 - 2\rho \frac{\ln I_p - \mu_{\ln I_p}}{\sigma_{\ln I_p}} \times \frac{\ln t_f - \mu_{\ln t_f}}{\sigma_{\ln t_f}} \right]$$

که ρ ضریب همبستگی، $\mu_{\ln I_p}$ مقدار متوسط $\ln I_p$ ($\mu_{\ln I_p} = \ln \bar{I}_p$) که \bar{I}_p مقدار میانه I_p است، $\sigma_{\ln I_p}$ انحراف معیار $\ln I_p$ ، $\mu_{\ln t_f}$ مقدار متوسط $\ln t_f$ ($\mu_{\ln t_f} = \ln \bar{t}_f$) که \bar{t}_f مقدار میانه t_f است) و $\sigma_{\ln t_f}$ انحراف معیار $\ln t_f$ است. مقادیر پارامترهای توابع توزیع در جدول ۱ آمده و ضریب همبستگی بین I_p و t_f نیز ۰٫۴۷ در نظر گرفته شده است. فاصله محل برخورد صاعقه نیز به صورت یکنواخت از ۰ تا d_{\max} بر حسب کیلومتر در نظر گرفته شده است.

۳-۶ فرایند ایجاد مقادیر تصادفی صاعقه

برای ایجاد مقادیر تصادفی، تابع چگالی احتمال مشترک سه متغیر تصادفی (I_p, t_f, d) را می‌توان به صورت حاصل ضرب تابع چگالی احتمال I_p یا همان $f_v(I_p)$ ، تابع چگالی احتمال شرطی t_f یا همان $f_v(t_f | I_p)$ و تابع چگالی احتمال فاصله برخورد یا $f_v(d)$ به دست آورد. در نتیجه به طور خلاصه [۲۴]

$$f(I_p, t_f, d) = f_v(I_p) \times f_v(t_f | I_p) \times f_v(d) \quad (20)$$

که در آن توابع چگالی احتمال f_v تا f_v به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند [۲۴]

$$f_v(I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times I_p \times \sigma_{\ln I_p}} \exp\left[-\frac{(\ln I_p - \mu_{\ln I_p})^2}{2\sigma_{\ln I_p}^2}\right] \quad (21)$$

$$f_v(t_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times t_f \times \sigma_{\ln t_f}^*} \exp\left[-\frac{(\ln t_f - \mu_{\ln t_f}^*)^2}{2\sigma_{\ln t_f}^{*2}}\right] \quad (22)$$

$$f_v(d) = \begin{cases} \frac{1}{d_{\max}} & , 0 < d < d_{\max} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

و همچنین

$$\mu_{\ln t_f}^* = \mu_{\ln t_f} + \rho \frac{\sigma_{\ln t_f}}{\sigma_{\ln I_p}} (\ln I_p - \mu_{\ln I_p}) \quad (24)$$

$$\sigma_{\ln t_f}^* = \sigma_{\ln t_f} + \sqrt{1-\rho^2} \quad (25)$$

- مرحله سوم: تعیین معیار اهمیت برای هر سناریو بر اساس فاصله از نزدیک‌ترین سناریو و احتمال وقوع سناریو
- مرحله چهارم: حذف سناریویی که کمترین معیار اهمیت را دارد.
- مرحله پنجم: تکرار مراحل ۲ الی ۴ تا زمانی که تعداد سناریوهای باقیمانده برابر با مقدار مورد نظر شود.

ابتدا فاصله بین سناریوها محاسبه می‌گردد. تعداد سناریوها برابر k و احتمال وقوع سناریوها ρ_s در نظر گرفته می‌شود. در اینجا نیاز به تعریف $d_{s,s'}$ است که فاصله بین سناریوهای s و s' را نشان می‌دهد و مقدار آن مطابق (۲۸) محاسبه می‌گردد. در این رابطه \bar{s} مقدار میانگین تمام سناریوها است و فرض می‌شود که S مجموع اولیه کل سناریوها بوده و J نیز مجموعه سناریوهایی است که باید پاک شوند. برای هر سناریو، شماره نزدیک‌ترین سناریو به آن بر اساس (۲۹) مشخص می‌شود. در ادامه معیار اهمیت هر سناریو یا $\rho d_k(r)$ بر اساس فاصله آن از نزدیک‌ترین سناریو و احتمال وقوع آن، مطابق (۳۰) به دست می‌آید. نهایتاً بر اساس (۳۱) و (۳۲)، سناریوهایی که کمترین معیار اهمیت را داشته باشند، حذف می‌شوند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد سناریوها برابر با تعداد سناریوهای مورد نظر شود

$$d_{s,s'} = \max\{\|s - \bar{s}\|, \|s' - \bar{s}\|\} \|s - s'\| \quad (28)$$

$$dt_k(r) = \min(d_{s,s'}, s', k \in S \text{ and } s' \neq k) \quad (29)$$

$$\rho d_k(r) = \rho_k \times dt_k(r) \quad (30)$$

$$\rho d_d = \min \rho d_k, k \in S \quad (31)$$

$$S = S - \{d\} \quad (32)$$

$$J = J + \{d\}$$

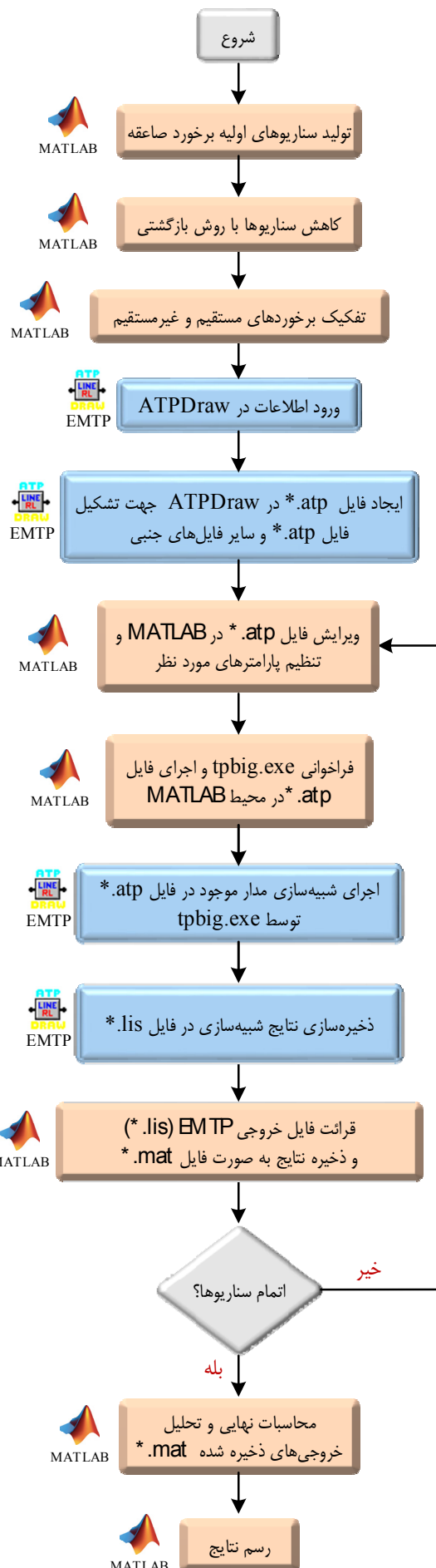
$$\rho_r = \rho_r + \rho_d$$

۳-۸ روند شبیه‌سازی آماری

فرایند نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده جهت شبیه‌سازی سناریوها در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مقاله از ارتباط نرم‌افزاری پایدار و خودکار بین ATP-EMTP و MATLAB استفاده شده است. از شناخته‌شده جهت شبیه‌سازی پدیده‌های حالت گذرا به عنوان ابزار محاسباتی جهت محاسبه اضافه ولتاژها و ارزیابی عملکرد MCA استفاده شده است. همچنین از قابلیت‌های بالای نرم‌افزار MATLAB جهت ایجاد و مدیریت سناریوها، تفکیک برخوردهای مستقیم و غیر مستقیم صاعقه و تحلیل آماری و ارائه نتایج استفاده شده است. سپس مجموعه پارامترهای سناریوهای برخورد صاعقه بر اساس روابط بخش‌های ۳-۶ و ۳-۷ آماده می‌شوند.

در مرحله بعد یک فایل شبیه‌سازی اولیه در محیط ATP ایجاد می‌شود. وارد کردن کلیه پارامترهای المان‌ها، تنظیمات شبیه‌سازی، ایجاد فایل‌های جنبی مدل‌ها، تدوین برنامه‌های لازم جهت محاسبه اضافه ولتاژ القایی در محیط MODELS، نمونه‌برداری نتایج و شکل موج‌ها و سایر موارد دیگر در حین تهیه این فایل اولیه انجام می‌شود. لازم به ذکر است که تهیه این فایل باید با دقت کافی و صحت‌سنجی دقیق انجام شود تا در حلقه تکرار شبیه‌سازی، خطایی ایجاد نشده و نتایج حاصل در مراحل بعدی قابل اطمینان باشند.

سپس متن اولیه محتوای فایل متنی حاوی اطلاعات لازم جهت شبیه‌سازی در ATP (*.atp) توسط MATLAB بر اساس پارامترهای تعیین‌شده در سناریوی مورد نظر ویرایش می‌شود. سپس برنامه اجرایی



شکل ۸: روندنمای پیاده‌سازی شبیه‌سازی سناریوها.

جدول ۲: پارامترهای خط هوایی توزیع شبیه‌سازی شده.

طول خط	نوع کراس آرم	ارتفاع خط	قطر هادی	مقاومت DC هادی
۲ km	۱٫۵ متری	۱۰ m	۱۰٫۹۸ mm	۰٫۴۵۴۵ Ω/km

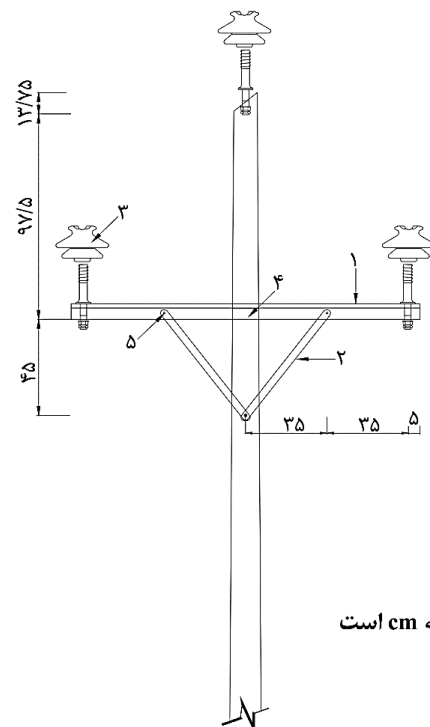
با توجه به تنوع مقره‌ها، جنس تیرها و کنسول‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار بر استقامت عایقی خط، مقدار CFO به صورت پله‌های ۲۵ کیلوولت از ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوولت فرض شده تا نتایج محدود به یک حالت خاص نباشد. چگالی برخورد صاعقه به زمین (GFD) برابر ۱ صاعقه در هر کیلومتر مربع در هر سال فرض شده است. از آنجا که تعداد تخلیه در خطوط با این پارامتر نسبت مستقیم دارد، نتایج ارائه‌شده به سادگی برای مناطق مختلف با GFDهای متفاوت قابل تعمیم است. با توجه به این که ارتفاع تیرهای خطوط توزیع تغییرات محدودی دارند، می‌توان رابطه تعداد تخلیه‌ها با ارتفاع تیرها را به صورت خطی در نظر گرفت [۲۸]؛ و لذا نکته قبلی در مورد تیرهای با ارتفاع متفاوت (از فرض ۱۰ متر) نیز قابل تعمیم است. پارامتر اساسی دیگر، هدایت ویژه زمین است که حالت زمین ایده‌آل (هدایت ویژه بی‌نهایت) و زمین با هدایت ویژه ۱۰ mS/m و ۱ mS/m برای آن لحاظ گردیده است. اثر ضریب حفاظت عوارض اطراف خط به صورت اعداد مختلف در بازه ۰ تا ۱ در نظر گرفته شده است. این مفروضات می‌توانند علاوه بر این که ارزیابی مناسبی از حالات محتمل را فراهم نمایند، کاربرد نتایج به دست آمده برای تعیین اثربخشی نصب MCA در خطوط توزیع با ساختارها و پارامترهای متفاوت را نیز تسهیل کنند.

۴-۲ نتایج و بحث

با توجه به تعدد و تنوع نتایج و خاصیت آماری بودن خروجی‌های شبیه‌سازی، روش‌های مختلفی را می‌توان جهت نمایش آنها در نظر گرفت. در این بخش سعی بر این بوده که نتایج به نحوی در قالب نمودارهای مناسب ارائه گردد که علاوه بر ارائه کلیت نتایج کار، تعمیم‌پذیری مناسبی برای کاربردهای عملی جهت استفاده بهره‌برداران شبکه‌های توزیع نیز داشته باشد. در اینجا نتایج به دو بخش، تقسیم‌بندی گردیده که در ادامه شرح داده شده است.

۴-۲-۱ نرخ تخلیه در خطوط در اثر برخورد غیر مستقیم

در بخش اول نمودارها تعداد خاموشی خط توزیع ناشی از برخورد غیر مستقیم در حالت بدون برق‌گیر بر حسب CFO خط و حالت‌های مختلف هدایت زمین و ضریب حفاظت ارائه شده است. این نمودارها به منظور تخمین تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه بدون لحاظ اثر برق‌گیرها قابل استفاده است. شش نمودار اول به صورت شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ ارائه شده است. در این شکل‌ها تعداد تخلیه به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر در هر سال بر حسب CFO خط و به ازای سه حالت هدایت ویژه زمین در ضرایب حفاظتی مختلف رسم گردیده است. تعداد تخلیه در صورت متفاوت بودن GFD از مقدار مفروض ۱، با توجه به ارتباط خطی نتایج با این پارامتر به سهولت قابل تعیین خواهد بود. همچنین برخوردهای مستقیم صاعقه به خط توزیع مفروض برابر ۱۱/۱۶ تخلیه در هر ۱۰۰ کیلومتر در هر سال به ازای ضریب حفاظتی صفر ($S_r = 0$) به دست می‌آید. نکته دیگر این که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند رابطه تعداد برخورد مستقیم صاعقه نیز مانند GFD با ارتفاع خط به صورت خطی بوده و تعمیم این عدد به شرایط دیگر به سهولت قابل انجام است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ می‌توان دریافت که با افزایش ضریب حفاظت ناشی از عوارض مرتفع و نزدیک اطراف



شکل ۹: خط توزیع با کراس آرم ۱٫۵ متری تک‌مداره [۲۷].

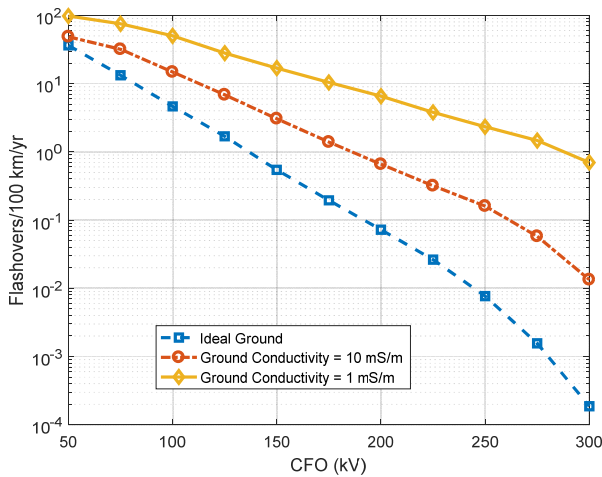
موتور محاسباتی EMTP (فایل tpbig.exe) توسط MATLAB جهت اجرای فایل *.atp فراخوانی می‌شود. در این مرحله، شبیه‌سازی توسط موتور محاسباتی EMTP انجام گردیده و نتایج طبق تنظیمات اولیه به صورت متنی در فایل *.lis ذخیره می‌شود. در ادامه، پس از اتمام شبیه‌سازی EMTP، برنامه MATLAB نتایج شبیه‌سازی را از این فایل قرائت نموده و داده‌ها در فایل‌های *.mat ذخیره می‌شوند. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تمام سناریوهای تعریف‌شده اجرا گردند. در انتهای فرایند نیز تحلیل نتایج ذخیره‌شده در فایل‌های *.mat به صورت آماری انجام شده و نمودارهای لازم رسم و ذخیره می‌شوند.

۴-۳ نتایج و بحث

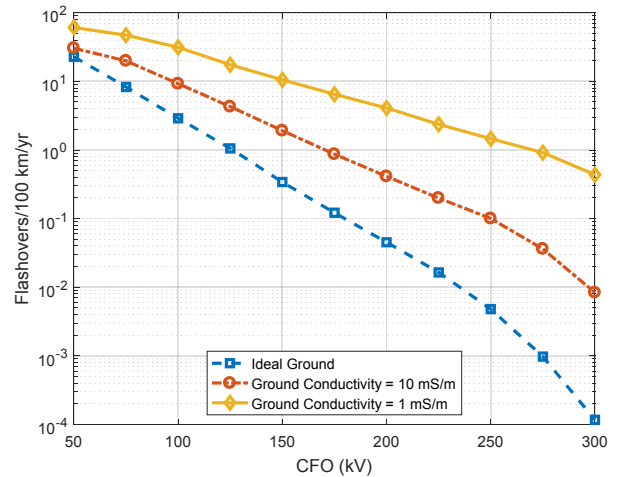
در این بخش از مقاله، ابتدا جزئیات سیستم مورد مطالعه ارائه گردیده و در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودار به همراه مباحث و نتیجه‌گیری‌های مربوط مطرح شده است.

۴-۳-۱ سیستم مورد مطالعه

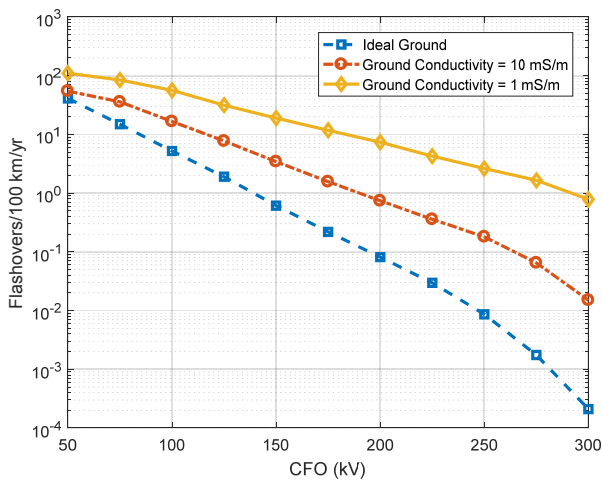
در این مقاله یک خط توزیع تک‌مداره با مشخصات مندرج در جدول ۲ و شکل ۹ برای شبیه‌سازی انتخاب گردیده است. دلیل انتخاب این ساختار آن است که بررسی اطلاعات فیدرها نشان می‌دهد اکثر مسیرهای فیدرهای توزیع به خصوص در مناطق دورافتاده و کوهستانی که احتمال برخورد صاعقه در آنها نیز معمولاً بیشتر است، در عمل از این نوع است. تعداد سناریوهای اولیه ایجادشده برای این مطالعه شامل ۵۰ حالت برای هر کدام از پارامترهای دامنه جریان صاعقه، زمان پیشانی موج و فاصله برخورد صاعقه می‌باشد و در کل ۱۲۵۰۰۰ سناریوی شبیه‌سازی ایجاد گردیده و سپس با روش کاهش سناریوی بازگشتی، تعداد فوق به ۲۰۰۰ کاهش داده شده است. همچنین برای لحاظ مقادیر مختلف CFO، مقادیر مقاومت ویژه زمین، مقادیر مختلف ضریب حفاظتی و نیز دو حالت بدون برق‌گیر و با برق‌گیر، نهایتاً تعداد شبیه‌سازی‌های کل برابر ۷۹۲۰۰۰ عدد بوده است.



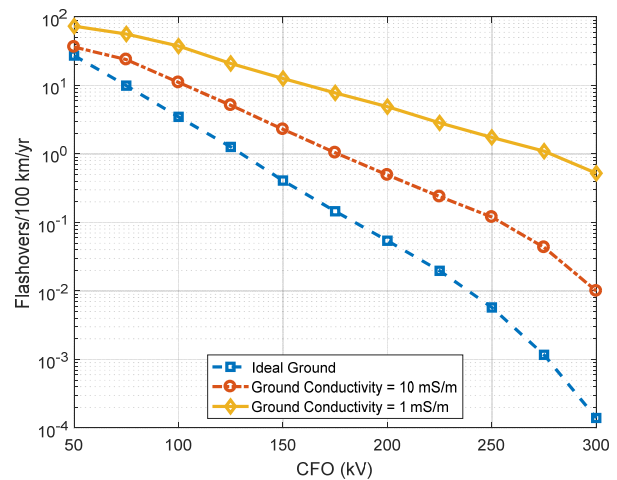
شکل ۱۳: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی ۰٫۶.



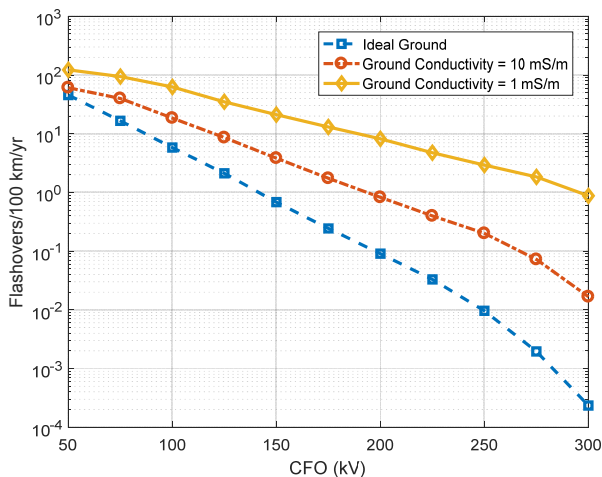
شکل ۱۰: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی صفر.



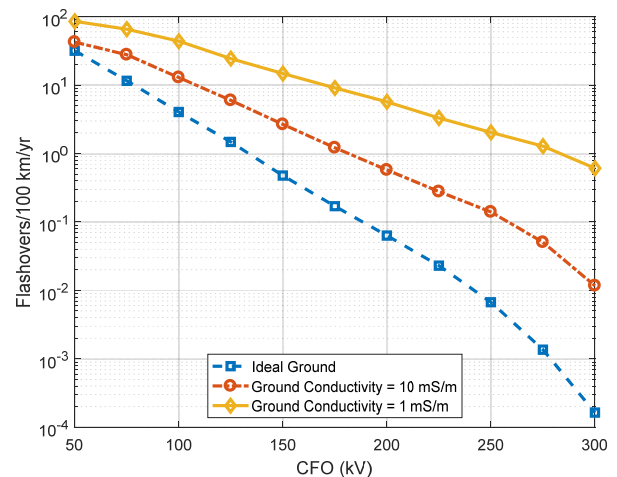
شکل ۱۴: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی ۰٫۸.



شکل ۱۱: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی ۰٫۲.



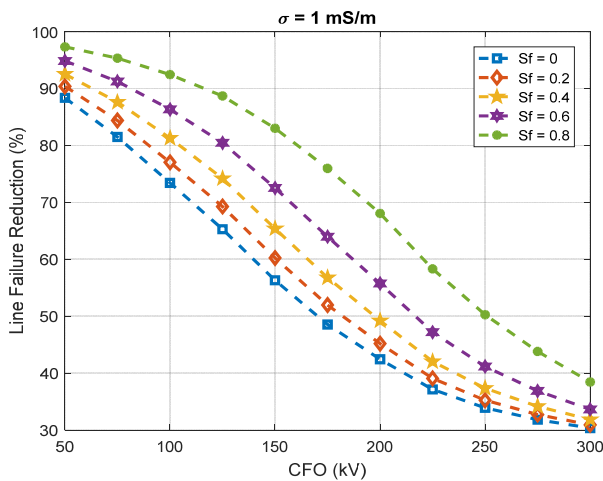
شکل ۱۵: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی ۰٫۱.



شکل ۱۲: نمودار تعداد تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خط توزیع بر حسب CFO خط با ضریب حفاظتی ۰٫۴.

در نقطه مقابل، در خطوطی که عوارض کمتری در اطراف آنها وجود داشته باشد، آسیب‌پذیری خط به دلیل درصد بیشتر برخوردهای مستقیم جذب‌شده توسط خط بیشتر خواهد بود. نکته دیگر این که با افزایش مقاومت ویژه زمین، تعداد تخلیه‌های ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد و این موضوع نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این پارامتر در عملکرد خطوط توزیع در برابر برخوردهای غیر

خط، نرخ تخلیه ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در خطوط توزیع افزایش می‌یابد، زیرا که برخوردهای مستقیم تبدیل به برخوردهای غیر مستقیم می‌گردد. بدیهی است که حفاظت از خطوط توزیع با افزایش ضریب حفاظت به دلیل تبدیل بخشی از برخوردهای مستقیم (که بسیار مخرب هستند) به برخورد غیر مستقیم، ساده‌تر خواهد بود؛ هرچند به دلیل فاصله کم این برخوردها، شدت اضافه ولتاژ القایی ایجادشده بالا می‌باشد.



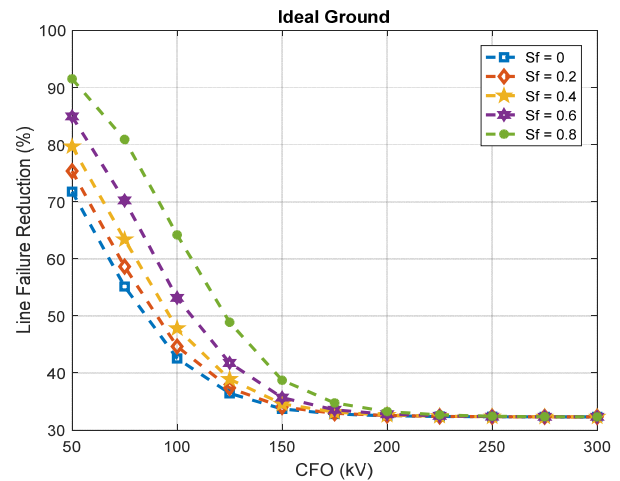
شکل ۱۸: میزان کاهش تخلیه در خط توزیع با نصب MCA با مقاومت ویژه زمین ۱ mS/m.

ازای مقادیر مختلف هدایت ویژه زمین اطراف خط و ضریب حفاظتی در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ ارائه شده است. لازم به ذکر می‌باشد که عملکرد برق‌گیر در کاهش تخلیه‌های ناشی از برخوردهای مستقیم صاعقه نیز در این نمودارها لحاظ گردیده است. این نمودارها به خوبی میزان کاهش خاموشی‌های ناشی از نصب MCA در خط توزیع را نشان می‌دهند. به عنوان نمونه، با توجه به شرایط معمول فیدهای توزیع در ایران، در خطوط توزیع با تیرهای بتنی، کنسول‌های فلزی و مقره‌های با CFO حدود ۱۷۵ کیلوولت و زمین با هدایت ویژه کم به میزان ۱ mS/m و فرض ضریب حفاظتی ۰/۴ برای اطراف خط، میزان کاهش تخلیه‌های ناشی از نصب MCA طبق نمودار شکل ۱۸ برابر ۵۷ درصد خواهد بود. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهند که عملکرد MCA در خطوط با CFO کم، زمین‌های با هدایت ویژه بالا و مناطق با ضریب حفاظتی بالا بسیار بیشتر است.

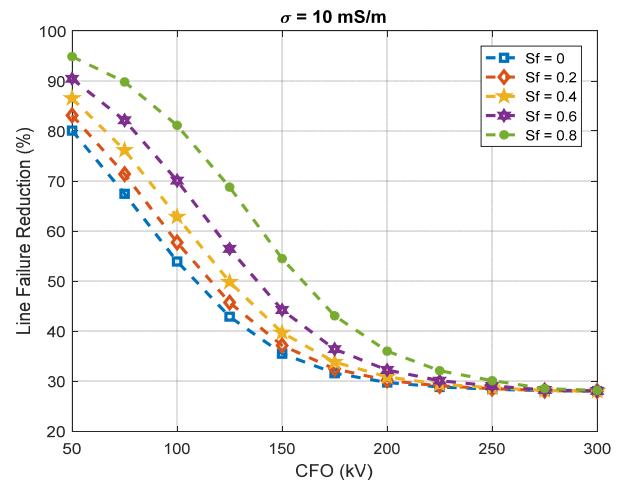
نهایتاً نتایج به دست آمده بر اساس روابط آماری و مدل‌سازی عدم قطعیت و شبیه‌سازی دقیق سیستم در EMTP قابلیت اطمینان بالایی دارند و می‌توان از آنها برای تعیین میزان خاموشی‌های ناشی از صاعقه و نیز میزان اثربخشی نصب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای در خطوط توزیع استفاده نمود. همچنین این نتایج به منظور جابجایی مناسب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای نیز قابل استفاده هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارزیابی عملکرد نصب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای در یک ساختار مرسوم فیدهای توزیع فشارممتوسط به منظور محاسبه تعداد خاموشی‌ها و میزان کاهش خاموشی‌های ناشی از صاعقه ارزیابی گردیده است. عدم قطعیت پارامترهای صاعقه شامل دامنه جریان، زمان پیشانی موج و نیز فاصله برخورد صاعقه از خط توزیع به صورت توابع توزیع آماری لحاظ گردیده و شبیه‌سازی بر اساس روش مونت کارلو و کاهش تعداد سناریوها با روش بازگشتی انجام شده است. اثر عوارض مرتفع اطراف خط نیز به عنوان یک عامل مؤثر و حائز اهمیت در محاسبات در نظر گرفته شده و از روش دقیق انتگرال آگروال به همراه مدل‌سازی زمین بدون تلفات در محاسبه اضافه ولتاژ القایی صاعقه استفاده گردیده است. شبیه‌سازی‌ها بر اساس ارتباط نرم‌افزارهای ATP/EMTP و MATLAB انجام و نتایج به نحوی ارائه شده که در مرحله اول، نرخ تخلیه در اثر برخورد صاعقه در خط توزیع تعیین شود و سپس ارزیابی کمی مناسبی از



شکل ۱۶: میزان کاهش تخلیه در خط توزیع با نصب MCA با زمین ایده‌آل.



شکل ۱۷: میزان کاهش تخلیه در خط توزیع با نصب MCA با مقاومت ویژه زمین ۱۰ mS/m.

مستقیم صاعقه است. بر این اساس در مناطقی که رطوبت خاک کم و یا جنس خاک دارای مقاومت ویژه بالا باشد، آسیب‌پذیری خطوط توزیع در برابر برخورد غیر مستقیم صاعقه بیشتر خواهد بود و لازم است که تمهیدات بیشتری برای چنین شرایطی در نظر گرفته شود. نکته شایان ذکر دیگر این است که نرخ تخلیه، وابستگی قابل توجهی به CFO خط دارد و با افزایش CFO، نرخ تخلیه با شیب قابل توجهی کاهش خواهد یافت. ذکر این نکته ضروری است که CFO خط لزوماً با CFO مقره یکسان نیست. به عنوان نمونه CFO خط در خطوط با تیرهای بتنی و کنسول‌های فلزی با CFO مقره یکسان است، زیرا فلز و بتن مسلح خاصیت عایقی چندانی ندارند. ولی در خطوط با کراس آرم‌ها و یا تیرهای غیر فلزی، CFO خط شامل مجموع CFO مقره و CFO ناشی از خاصیت عایقی تیرها و کنسول‌ها خواهد بود و مقدار CFO خط بیش از مقدار CFO مقره خواهد شد [۱]. این نمودارها به منظور اولویت‌بندی فیدها یا بخش‌بندی و اولویت‌بندی قسمت‌های مختلف یک فیدر از منظر آسیب‌پذیری در برابر صاعقه و جابجایی برق‌گیر می‌توانند بسیار مفید واقع شوند. اثر نصب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای در بخش بعدی نتایج ارائه شده است.

۴-۲-۲-۴ اثربخشی نصب MCA در کاهش تخلیه‌ها

در این بخش اثربخشی نصب MCA بر حسب درصد کاهش خاموشی و جلوگیری از بروز تخلیه در مقره‌ها در طول خط بر حسب CFO خط و به

[۱۴] م. شریعتی و همکاران، "تجربیات میدانی به کارگیری برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای و بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع در مناطق تحت پوشش استان هرمزگان"، مجموعه مقالات سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق، ۹ صص، تهران، ایران، ۱۳-۱۱ آبان ۱۳۹۴.

[۱۵] ا. احمدی جنیدی و همکاران، "حفاظت خطوط هوایی توزیع فشارمتوسط در برابر صاعقه، بدون نیاز به سیستم زمین با استفاده از برق‌گیرهای نوین چندمحفظه‌ای در مناطق منتخب تحت پوشش شرکت توزیع نواحی تهران"، مجموعه مقالات بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، ۹ صص، ۱۵-۱۳ آبان ۱۳۹۲.

[۱۶] ر. نقی‌زاده، ع. ا. اشرفی و س. چترآذر، "مقایسه عملکرد فناوری برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای با برق‌گیرهای اکسید فلزی در حفاظت خطوط شبکه توزیع در برابر صاعقه همراه با ارائه مدل جدید"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی فناوری‌های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر، ۱۴ صص، اصفهان، ایران، ۳۰ شهریور ۱۴۰۰.

[17] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, CRC Press, 2014.

[18] M. Rioual, Short and Long Air Gaps (Insulator Strings and Spark Gaps) Modelling for Lightning Studies with EMT Program (EPRI-DCG version 2.0), Research Project, Final Report, Mar. 1988.

[19] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, Marcel Dekker Inc., New York, 1999.

[20] D. O. Belko and G. V. Podporin, "Analysis of current distribution among long-flashover arresters for 10 kV overhead line protection against direct lightning strikes," in *Proc. 33rd Int. Conf. on Lightning Protection, ICLP'16*, 6 pp., Estoril, Portugal 25-30 Sept. 2016.

[21] H. K. Hoidal, "Calculation of lightning-induced overvoltages using MODELS," in *Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients, IPST'03*, 6 pp. 359-364, New Orleans, LA, USA, 28 Sept.-2 Oct. 2003.

[22] H. K. Hoidal, *Lightning Induced Voltages in Low-Voltage Systems*, Ph.D. Thesis, University of Trondheim, 1997.

[23] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering application," *Electra*, vol. 69pp. 65-102, Jan. 1980.

[24] Cigré Working Group 01 of SC 33, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines Cigré, Ref. no. 63, 1991.

[25] R. Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo Method*, New York: Wiley, 1981.

[26] H. Holger and W. Romisch, "Scenario reduction algorithms in stochastic programming," *Computational Optimization and Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 187-206, Feb. 2003.

[۲۷] - مشخصات فنی عمومی و اجرایی خطوط توزیع برق هوایی و کابلی فشارمتوسط و فشارضعیف، نشریه ۳۷۴، معاونت امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و دفتر بازرسی، کنترل کیفی و تدوین استانداردهای سازمان توانیر، ۱۳۸۶.

[28] P. Chowdhuri, "Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, pp. 1982-1989, Jul. 1989.

رمضانعلی نقی‌زاده مدرک کارشناسی مهندسی برق در گرایش قدرت را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در سال ۱۳۸۳ و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق گرایش قدرت را نیز به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت کرده است. وی در حال حاضر، عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی همدان است و زمینه‌های علاقه‌مندی او شامل حالت گذرا و هماهنگی عایقی، بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر و شبکه‌های توزیع می‌باشد.

عملکرد نصب برق‌گیرهای چندمحفظه‌ای در شرایط محتمل عملی بر اساس مقادیر مختلف استقامت عایقی خط، مقاومت ویژه زمین و ضریب حفاظتی عوارض اطراف خط انجام گیرد. نتایج به دست آمده می‌تواند به عنوان یک معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد نصب MCA و نیز جایابی مناسب این برق‌گیرها در طول فیدرهای فشارمتوسط بر اساس شرایط هر بخش یا هر تیر برق در طول مسیر خط در نظر گرفته شوند. کلیت روند مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارائه‌شده می‌تواند برای ارزیابی عملکرد سایر ساختارها نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] IEEE Std. 1410, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2010.
- [2] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating Current Systems, 2009.
- [3] R. J. Cabral, R. C. Leborgne, A. S. Bretas, G. D. Ferreira, and J. A. Morales, "Lightning protection system design for distribution networks based on system average interruption frequency minimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 160, pp. 1-12, Jul. 2018.
- [4] X. S. Zhang, et al., "Optimal location of surge arresters on an overhead distribution network by using binary particle swarm optimization," in *Proc. Chinese Automation Congress, CAC'18*, pp. 1841-1846, Xi'an, China, 30 Nov.-2 Dec. 2018.
- [5] B. M. Eduard, A. Sumper, R. Villafafila-Robles, and J. Rull-Duran, "Optimization of surge arrester locations in overhead distribution networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 674-683, Apr. 2015.
- [6] R. G. Vianna Soares, et al., "Optimized surge arrester allocation based on genetic algorithm and ATP simulation in electric distribution systems," *Energies*, vol. 12, no. 21, 15 pp., Oct. 2019.
- [7] L. Zhang, Z. Zhang, S. Fang, and A. A. Bretas, "An optimization model for distribution networks lightning protection system design: a reliability indexes and cost-based solution," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, PESGM'20*, 5 pp., Montreal, Canada, 2-6 Aug. 2020.
- [8] L. Simin, L. Luan, Y. Cui, S. Xu, Q. Guo, and T. Liu, "Simulation research on lightning protection effect of distribution line lightning protection measures," *J. of Physics: Conf. Series*, vol. 1802, no. 4, 9 pp., Aug. 2021.
- [9] Line Lightning Protection Devices for Medium-Voltage Networks, Streamer® International AG, 2020.
- [10] P. Erlangga, S. Hidayat, and R. Zoro, "Lightning protection system on overhead distribution line using multi chamber arrester," in *Proc. 2nd IEEE Conf. on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE'14*, pp. 70-74, Bali, Indonesia, 9-11 Dec. 2014.
- [11] G. V. Podporin, V. E. Pilshikov, E. S. Kalakutsky, and A. D. Sivaev, "Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 214-221, Oct. 2010.
- [12] M. Zinck and B. Frain, "Multi-chamber arrester field test experience on medium voltage overhead line in Asia," in *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients, IPST'15*, 7 pp., Cavtat, Croatia, 15-18 Jun. 2015.
- [13] Z. Reynaldo and T. Leo, "Multi-chamber arrester study at tropical area for 20 kV lines lightning protection system," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI'15*, pp. 197-201, Denpasar, Indonesia, 10-11 Aug. 2015.