تخمین عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از ضربات مستقیم صاعقه با استفاده از روش ترکیبی جدید مبتنی بر روش مونت کارلو

رضا شریعتی‌نسب[1] پویا تدین رودی[2]

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
shariatinasab@birjand.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
pooya.tadayon@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک روش ترکیبی جدید مبتنی بر روابط تحلیلی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای ارزیابی عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از برخورد مستقیم صاعقه ارائه شده است. در روش پیشنهادی، یک رابطه تحلیلی برای تخمین اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه استخراج شده است. سپس برای محاسبه اضافه‌ولتاژها و عملکرد صاعقه، روش مونت‌کارلو بجای شبیه‌سازی شبکه واقعی، روی رابطه‌ی استخراج شده پیاده‌سازی شده است. در روش ارائه شده، تمامی پارامترهای صاعقه و شبکه قدرت که دارای ماهیتی تصادفی هستند بصورت آماری در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی EMTP/ATP، عملکرد صاعقه و ریسک عایقی بدست آمده در روش پیشنهادی قابل قبول است. تمامی مراحل روش پیشنهادی در محیط MATLAB کدنویسی شده و به شبیه‌سازی نرم‌افزاری نیازی نمی‌باشد. با توجه به زمان بسیار کم برای محاسبه اضافه‌ولتاژهای صاعقه، این روش برای انجام مطالعات صاعقه و بهینه‌سازی شبکه‌های قدرت بزرگ بسیار مناسب است.

کلمات کلیدی: عملکرد صاعقه، آنالیز ریسک، روش مونت کارلو، خطوط هوائی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۹/۲۵
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رضا شریعتی‌نسب
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – بیرجند – انتهای بولوار شهید آوینی– دانشگاه بیرجند– دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۱- مقدمه

اضافه‌ولتاژ صاعقه یکی از مهم‌ترین دلایل شکست عایقی در شبکه‌های قدرت است. انتخاب مناسب سطح عایقی ضربه صاعقه، BIL[۱]، برای تجهیزات شبکه منجر به کاهش نرخ تخلیه الکتریکی ناشی از صاعقه، LFOR[۲]، می‌شود. صاعقه می‌تواند هم از طریق برخورد مستقیم و هم ولتاژهای القایی ناشی از ضربات غیرمستقیم منجر به تخلیه الکتریکی شود. عموما استقامت عایقی خطوط انتقال برای در امان بودن از ولتاژهای القایی کافی است. از اینرو ولتاژهای القایی بیشتر در خطوط توزیع دارای اهمیت است [۱]. LFOR خطوط هوائی در اثر ضربات مستقیم برابر مجموع قطعی‌های ناشی از برخورد صاعقه به هادی فاز، SFFOR[۳]، و برخورد به سیم گارد یا دکل، BFR[۴]، می‌باشد [۲].

معمولا دو روشِ تحلیلی-انتگرالی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه تنش‌های صاعقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های تحلیلی-انتگرالی مرسوم برای محاسبه اضافه‌ولتاژها با استفاده از انتگرال‌گیری عددی حل می‌شوند که دقت قابل قبولی ندارد [۳]. بعلاوه این روشها مقاومت غیرخطی زمین را نیز درنظر نمی‌گیرند. بنابراین برای محاسبه دقیق اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه از روشهای آماری مبتنی بر مونت‌کارلو استفاده می‌شود که نیازمند تولید تعداد بسیار زیادی از پارامترهای صاعقه و شبکه قدرت و همچنین شبیه‌سازی سیستم واقعی توسط یک نرم‌افزار حالت گذرا مانند EMTP/ATP است [۶-۴]. روند شبیه‌سازی مونت‌کارلو شامل مراحل زیر است:

- تولید اعداد تصادفی برای بدست آمدن پارامترهای ضربه صاعقه و خطوط هوایی که ماهیتی تصادفی دارند؛
- اعمال یک مدل برخورد برای تعیین نقطه برخورد هر ضربه؛
- محاسبه اضافه‌ولتاژ بوجود آمده از هر ضربه با توجه به نقطه برخورد؛ و
- محاسبه نرخ تخلیه الکتریکی صاعقه.

علی‌رغم دقیق بودن روش مونت‌کارلو [۹-۷]، به‌دلیل تعداد زیاد شبیه‌سازی موردنیاز، بویژه برای شبکه‌های بزرگ با تعداد نقاط بسیار زیاد، پیاده‌سازی آن مشکل و زمان‌بر می‌باشد؛ چرا که برای هر کدام از نقاط مورد علاقه در شبکه قدرت بایستی شبیه‌سازی‌ها انجام شوند.

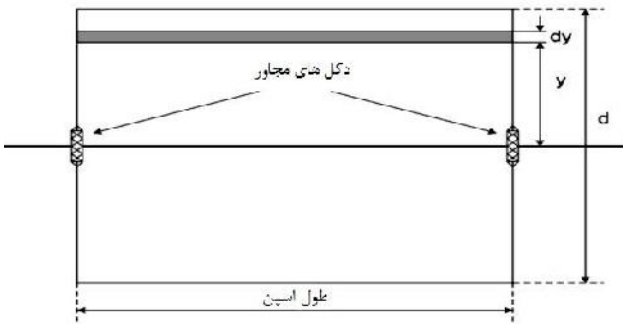
در این مقاله یک روش ترکیبی ارائه شده است که در آن نخست روابط تحلیلی مناسب برای محاسبه اضافه‌ولتاژهای ناشی از ضربات مستقیم صاعقه با استفاده از مفهوم تئوری امواج سیار بدست آمده است. سپس بجای اینکه روش مونت‌کارلو همانطور که تاکنون مرسوم بوده با استفاده از شبیه‌سازی EMTP/ATP پیاده‌سازی شود؛ به روابط تحلیلی بدست آمده اعمال شده و دامنه اضافه‌ولتاژها، عملکرد خطوط و ریسک عایقی منتجه محاسبه می‌شود.

در روش ترکیبی ارائه شده به انتگرال‌گیری عددی یا شبیه‌سازی شبکه واقعی نیاز نمی‌باشد. به علاوه، استقامت عایقی زنجیره مقره برای شکل‌موج‌های غیراستاندارد صاعقه و همچنین تغییرات غیرخطی مقاومت زمین نیز درنظر گرفته می‌شود که باعث دقیق شدن محاسبات می‌گردد. تمامی مراحل روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده و توزیع آماری تمامی پارامترهای صاعقه و شبکه قدرت که دارای رفتاری آماری هستند در نظر گرفته می‌شود.

۲- مفهوم مدل الکتروهندسی (EGM[۵])

۲-۱- ناحیه برخورد صاعقه به زمین

معمولا فرض بر این است که نقطه اصابت ضربه عمودی موج صاعقه بروی زمین، بصورت یکنواخت روی یک ناحیه برخورد مطابق شکل (۱) توزیع می‌شود [۱۰,۱۱]. طول این ناحیه برابر با طول اسپن و عرض آن، d، با توجه به ماکزیمم جریان صاعقه تعیین می‌شود.



شکل (۱): سطح برخورد صاعقه به زمین

۲-۲- نقطه نهائی اصابت صاعقه به خط

نقطه نهائی ضربه صاعقه (سیم گارد، دکل و هادی فاز) را می‌توان با استفاده از مدل EGM خطوط هوایی، شکل (۲)، تعیین کرد. فواصل برخورد در این مدل توسط روابط زیر تعیین می‌شوند [۲]:

(۱)

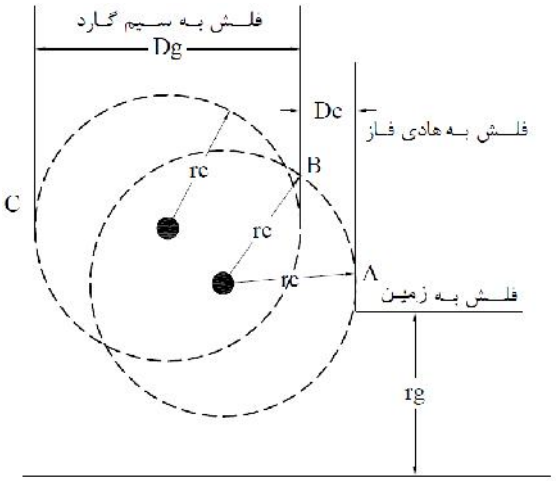
$$r_c = 10I^{0.65}$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

$$y_c \le 40m \qquad y_c \ge 40m \qquad r_g = \begin{cases} \left[3.6+1.7\ln\left(43-y_c\right)\right] I^{0.65} \\ 5.5I^{0.65} \end{cases} \quad (۲)$$

برای هر جریان صاعقه I می‌توان فواصل r_c و r_g که به‌ترتیب فاصله برخورد به سیم گارد و زمین هستند را محاسبه کرده و یک مدل EGM به‌دست آورد. با فرض عمودبودن ضربات صاعقه، چنانچه شاخه پیشرونده صاعقه در ناحیه D_c (فاصله برخورد سیم هادی) یا D_g (فاصله برخورد سیم گارد) به خط برخورد کند، به‌ترتیب خطای حفاظت (SF [۶]) و تخلیه برگشتی (BF [۷]) بوجود می‌آید[۱۲].



شکل (۲): فواصل برخورد به هادی فاز و سیم گارد در مدل EGM

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر تئوری امواج سیار و دیاگرام نردبانی می‌باشد که در آن یک معادله برای تعیین حداکثر ولتاژ نوک دکل و دو سر زنجیره مقره بدست آمده است. معادله بدست آمده شامل انعکاس و انکسار موج ولتاژ از دکل‌های مجاور نیز می‌باشد. با توجه به تئوری امواج سیار، هنگامی که یک موج به یک نقطه ناپیوستگی (مرز بین دو ناحیه که دارای امپدانس موجی متفاوتی هستند) می‌رسد، دو موج منعکس شده و انتقال یافته بوجود می‌آورد. با معلوم بودن ضرایب انعکاس و شکست در هر نقطه ناپیوستگی، ولتاژ در آن نقطه برابر مجموع موج‌های رفت و برگشت خواهد بود.

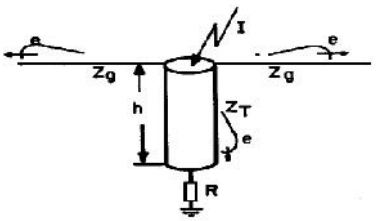
در صورت اصابت صاعقه به خط، ولتاژ در نقطه برخورد را می‌توان با اضافه‌کردن امواج ولتاژ منعکس شده از نقطه‌های ناپیوستگی در طول سیر موج به موج ولتاژ ناشی از صاعقه در نقطه اصابت محاسبه کرد. درصورت درنظر نگرفتن دکلهای مجاور، نقاط ناپیوستگی تنها پای دکل و نوک دکل مورد اصابت است (شکل (۳)-(الف)). در غیر اینصورت، علاوه بر نقاط مذکور، مقاومت زمین و نوک دکلهای مجاور نیز بایستی بعنوان نقاط ناپیوستگی درنظر گرفته شوند (شکل (۳)-(ب)).

پس از برخورد صاعقه به نوک دکل، یک ولتاژ "e" در نوک دکل تولید می‌شود که موج گذرای ناشی از آن در طول دکل و از طریق سیم‌های گارد به دو طرف گسیل می‌شود[۱۳]. با توجه به شکل (۳)-(الف)، ولتاژ e بصورت زیر بدست می‌آید:

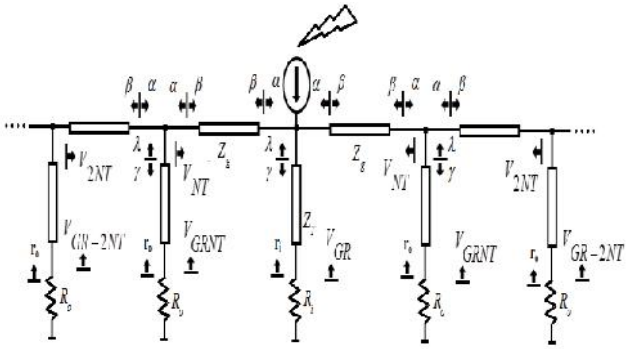
$$e(t) = \left((Z_g/2)\|Z_T\right) \times I(t) \quad (۳)$$

که Z_g امپدانس موجی سیم گارد برحسب اهم، Z_T امپدانس موجی دکل برحسب اهم و $I(t)$ جریان لحظه‌ای صاعقه است. با توجه به انعکاس از دکل‌های مجاور مطابق شکل(۳)-(ب)، ولتاژ ایجاد شده در نوک دکل مورد اصابت صاعقه به زمان سیر موج در طول دکل، T_T، زمان سیر موج در طول سیم گارد، T_g، مقاومت پای دکل مورد اصابت صاعقه، R_i و مقاومت پای دکل‌های مجاور، R_o، بستگی دارد. در نتیجه ولتاژ در نوک دکل مورد اصابت از رابطه‌ای زیر بدست خواهد آمد:

$$V_T = e(t) + V_{GR} + V_{GR-NT} + V_{GR-NT(2)} + V_{1NT} + V_{2NT} + V_{3NT} + \ldots + V_{GR1NT} + V_{GR2NT} + \ldots \quad (۴)$$



(الف): برخورد صاعقه به نوک دکل



(ب): تاثیر دکل های مجاور در پیک ولتاژ دکل مورد اصابت

شکل (۳): محاسبه پیک ولتاژ در نوک دکل

که V_{iNT} (i=1,2,3,…) ولتاژی است که با برخورد به iامین دکل مجاور از آن منعکس شده و به سمت دکل مورد اصابت صاعقه باز می‌گردد؛ V_{GRiNT} (i=1,2,3,…) ولتاژی است که با برخورد به مقاومت پای iامین دکل مجاور منعکس شده و به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

سمت دکل مورد اصابت باز می‌گردد؛ V_{GR} ولتاژ منعکس شده از مقاومت پای دکل مورد اصابت صاعقه به سمت نوک آن است؛ $V_{GR\text{-}NT}$ ولتاژ منعکس شده از مقاومت پای دکل مورد اصابت به سمت نوک دکل است که از آنجا به سمت دکل‌های مجاور منتقل شده و مجددا با انعکاس از دکل‌های مجاور به سمت دکل مورد اصابت بر می‌گردد؛ $V_{GR\text{-}NT(2)}$ ولتاژ منعکس شده از دکل مجاور به سمت نوک دکل مورد اصابت صاعقه است که از آنجا به سمت مقاومت پای دکل مورد اصابت منتشر شده و سپس با انعکاس از پای دکل به سمت نوک آن بر می‌گردد.

هر مؤلفه ولتاژ بایستی با توجه به شیفت زمانی که نسبت به لحظه برخورد صاعقه داشته است به ولتاژ منتجه اضافه گردد. مشخص است که این زمان باید کمتر از زمان پیشانی موج صاعقه باشد. یعنی انعکاس ولتاژها تا زمانی در نظر گرفته می‌شوند که زمان سیر موج در هر قسمت، کمتر از زمان پیشانی موج صاعقه باشد. هر کدام از مؤلفه‌های ولتاژی فوق از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_{1NT} = \beta\alpha e\left(t-2T_g\right) + \beta^3\alpha e\left(t-4T_g\right) + \beta^5\alpha e\left(t-6T_g\right) + \ldots \quad (۵)$$

$$V_{2NT} = \alpha^3\beta e\left(t-4T_g\right) + \alpha^5\beta^3 e\left(t-8T_g\right) + \alpha^7\beta^5 e\left(t-12T_g\right) + \ldots \quad (۶)$$

$$V_{GR1NT} = \alpha^2 r_\circ\lambda e\left(t-2T_g-2T_T\right) + \alpha^3 r_\circ\lambda\beta e\left(t-4T_g-2T_T\right) + \ldots \quad (۷)$$

$$V_{GR2NT} = \alpha^4 r_\circ\lambda e\left(t-4T_g-2T_T\right) + \alpha^7 r_\circ\lambda\beta e\left(t-8T_g-2T_T\right) + \ldots \quad (۸)$$

$$V_{GR} = r_i\lambda e\left(t-2T_T\right) + r_i^2\lambda\gamma e\left(t-4T_T\right) + r_i^3\lambda\gamma^2 e\left(t-6T_T\right) + \ldots \quad (۹)$$

$$V_{GR-NT} = r_i\lambda\beta\alpha e\left(2-2T_T-2T_g\right) + r_i^2\lambda^2\beta^2\alpha^2 e\left(t-4T_T-4T_g\right) + \ldots \quad (۱۰)$$

$$V_{GR-NT(2)} = r_i^2\gamma\lambda\beta\alpha e\left(t-4T_T-2T_g\right) + r_i^3\gamma^2\lambda\beta\alpha e\left(t-6T_T-2T_g\right) + \ldots \quad (۱۱)$$

که ضرایب انعکاس و انتقال آنها بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_i = \frac{R_i - Z_T}{R_i + Z_T} \qquad r_\circ = \frac{R_\circ - Z_T}{R_\circ + Z_T} \quad (۱۲)$$

$$\gamma = \frac{Z_g/2 - Z_T}{Z_g/2 + Z_T} \qquad \lambda = \frac{Z_g}{Z_g/2 + Z_T} \quad (۱۳)$$

$$\alpha = \frac{2(Z_g \| Z_T)}{(Z_g \| Z_T) + Z_g} \qquad \beta = \frac{(Z_g \| Z_T) - Z_g}{(Z_g \| Z_T) + Z_g} \quad (۱۴)$$

در صورت بوجود آمدن خطای حفاظت در اثر برخورد صاعقه به هادی فاز (SF)، حداکثر اضافه‌ولتاژ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V = Z_c\frac{I_p}{2} \quad (۱۵)$$

که در آن Z_c امپدانس موجی هادی فاز برحسب اهم و I_p پیک جریان موج صاعقه است. رابطه فوق مشخص می‌کند که اضافه‌ولتاژهای ناشی از SF عملا به دامنه جریان صاعقه و ابعاد دکل بستگی داشته (چراکه Z_c از روی ابعاد دکل محاسبه می‌شود) و نیاز به محاسبه مداری خاصی ندارند.

۴- روش مونت‌کارلو

پس از بدست آمدن رابطه (۴)، روش مونت کارلو برای محاسبه اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه به‌صورت زیر خواهد بود:

- اعداد تصادفی برای تمامی متغیرهائی که دارای طبیعت تصادفی هستند تولید می‌شود. پارامترهای اصلی صاعقه برای محاسبه اضافه‌ولتاژ شامل ماکزیمم دامنه جریان، I_p، زمان پیشانی موج، t_r، و زمان پشت موج جریان صاعقه، t_f، است که تابع توزیع احتمالی آنها به صورت توزیع لگاریتمی نرمال فرض می‌شود [۱۴]:

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln u}u}.\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln u - \ln\bar{u}}{\sigma_{\ln u}}\right)^2\right\} \quad (۱۶)$$

که در این رابطه $\sigma_{\ln u}$ انحراف معیار استاندارد و $\bar{u}$ مقدار میانه پارامتر u است. در این مقاله ضربه صاعقه منفی در نظر گرفته شده که مشخصات آماری آن در جدول (۱) نشان داده شده است [۱۴].

جدول (۱): پارامترهای آماری ضربه صاعقه منفی

پارامتر	t_f (μs)	t_r (μs)	I_p (μs)
$\bar{u}$	۷۷/۵	۲	۳۴
σ_{lnu}	۰/۵۷۷	۰/۴۹۴۳	۰/۷۴

همچنین فرض بر این است که مقاومت پای دکل دارای توزیع نرمال با مقدار متوسط ۵۰ Ω در جریان کم و فرکانس پایین و انحراف استاندارد ۵ Ω است [۴].

- سپس یک مدل برخورد EGM برای تعیین نقطه نهایی برخورد ضربه صاعقه به خط (هادی فاز، سیم گارد و نوک دکل) به کار گرفته می‌شود. در این مقاله برای سادگی، برخورد صاعقه در وسط اسپن و بالای دکل در نظر گرفته شده است.
- پس از تعیین نقطه برخورد توسط مدل EGM، اضافه‌ولتاژ محاسبه می‌گردد. درصورت وقوع BF از معادله‌های (۴) تا (۱۴) و درصورت وقوع SF از معادله (۱۵) برای تخمین اضافه‌ولتاژ استفاده می‌شود. در محاسبه BF، ماهیت تصادفی و غیرخطی مقاومت پای دکل نیز درنظر گرفته می‌شود.
- از مقایسه ولتاژ منتجه با ولتاژ تخلیه بحرانی، CFO، عایق خط، وقوع یا عدم وقوع تخلیه الکتریکی قابل نتیجه‌گیری است. بنابراین بسته به نقطه برخورد، BFR و SFFOR به‌دست می‌آید.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

۵- شبیه‌سازی و نتایج

روش پیشنهادی به یک خط هوایی 400 kV با BIL=1050kV اعمال شده که مشخصه دکل آن در شکل (۴) ارائه شده است. طول اسپن برابر با 400m می‌باشد. امپدانس پای دکل با یک مقاومت غیرخطی مدل می‌شود [۱۵]:

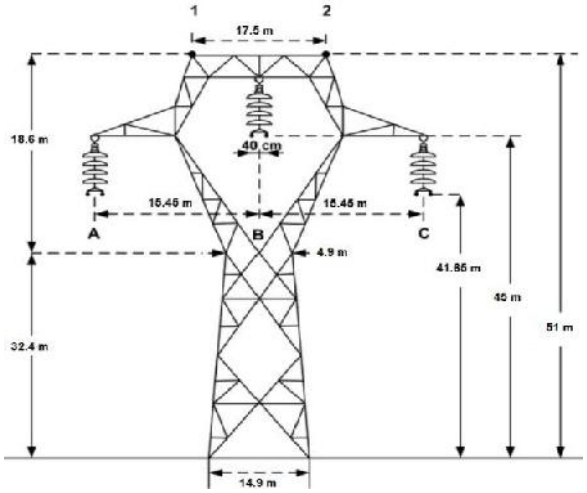
$$R_i = \frac{R_t}{\sqrt{1+I/I_g}} \quad (۱۷)$$

که I جریان عبوری از مقاومت پای دکل، R_t مقاومت زمین در جریان‌های کم و I_g جریان لازم برای یونیزاسیون خاک است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_g = \frac{\rho E_o}{2\pi R_t^2} \quad (۱۸)$$

که در آن E_o (=400 kV/m) [۱۶] شدت میدان شروع یونیزاسیون خاک و ρ مقاومت ویژه خاک است. از روابط فوق معلوم است که برای یک R_t مشخص، با افزایش ρ جریان لازم برای یونیزاسیون و به دنبال آن مقاومت معادل زمین، R_i، بزرگتر می‌شود. مقاومت غیرخطی زمین R_i که بصورت لحظه‌ای متناسب با مقدار جریان تغییر می‌کند در ضرایب انعکاس و انتشار (۱۲) مورد استفاده می‌گیرد.

مقدار مقاومت ویژه خاک در اصل بایستی با اندازه‌گیری توسط شرکت برق مشخص شود. با این حال برای بدبینانه‌تر بودن نتایج، مقدار ρ برابر 1000 Ω.m در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): آرایش دکل نمونه خط 400 kV

برای مدل‌سازی صاعقه از مدل هیلدر استفاده شده است:

$$I(t) = \frac{I_p}{\eta}\frac{k^n}{1+k^n}e^{-t/\tau_2} \quad (۱۹)$$

که در آن I_P پیک جریان، η ضریب تصحیح پیک جریان، n ضریب ثابت و $k=t/\tau_1$ می‌باشد. τ_1 و τ_2 ثوابت زمانی هستند که به ترتیب زمان‌های پیشانی و دنباله پشت موج را مشخص می‌کنند. رابطه فوق به‌عنوان ورودی معادله (۳) استفاده می‌شود.

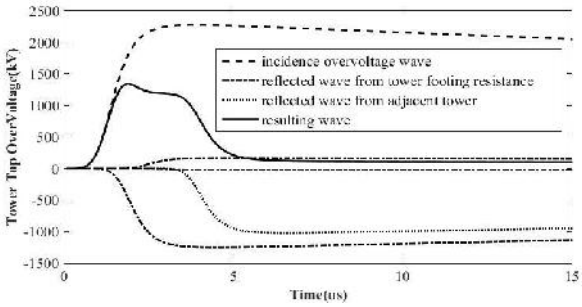
شکل (۵) موج ولتاژ ناشی از BF در دو سر زنجیره مقره را نشان می‌دهد که برای یک جریان صاعقه $40kA, 3.1/70\mu s$ از معادله (۴) بدست آمده است. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده، پیشانی و دنباله موج ولتاژ منتجه غیرخطی است. علاوه بر این، شکل‌موج ولتاژ در دو سر زنجیره مقره به میزان قابل توجهی نسبت به ضربه استاندارد $1.2/50\mu s$ که CFO استاندارد بر اساس آن تعریف می‌شود متفاوت است. بنابراین CFO غیراستاندارد (CFO_{NS}) توسط رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\frac{CFO_{NS}}{CFO} = \left[0.977+\frac{2.82}{\tau}\right]\left[1+\frac{V_{TM}-V_R}{V_R}\right]\left[1-0.2(1+\frac{V_{TM}-V_R}{V_R})\frac{V_{PF}}{CFO}\right]$$
$$\left[1-0.09(1+\frac{10}{\tau})\frac{V_{TM}-V_R}{V_R}\right]\exp\left[-\frac{V_{TM}-V_R}{V_R}\frac{t_f}{13}\right] \quad (۲۰)$$

که V_{TM} ماکزیمم ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقره، V_R ولتاژ در مقاومت پای دکل، V_{LL} ولتاژ نامی خط و τ ثابت زمانی است. V_{PF} نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{PF} = \sqrt{2/3}K_{PF}V_{LL} \quad (۲۱)$$

که در آن K_{PF}=0.7 ضریب ثابتی است که به نسبت ولتاژ نامی سیستم به مقدار CFO بستگی دارد.



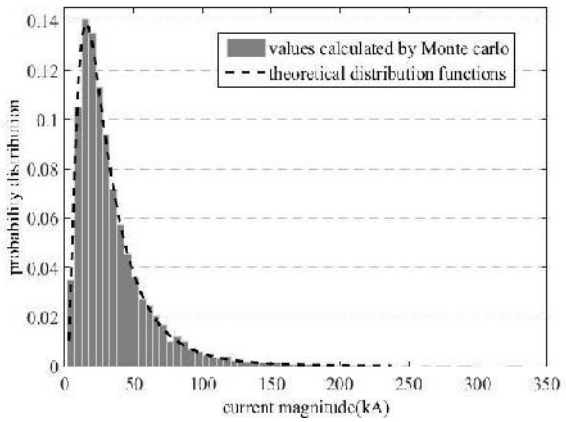
شکل (۵): شکل‌موج ولتاژ دو سر زنجیره مقره در اثر تخلیه الکتریکی برگشتی با استفاده از روش پیشنهادی

به‌منظور بررسی دقت روش ارائه شده، نتایج روش پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی ATP مقایسه شده است. متغیرهای تصادفی تولیدشده به‌روش مونت کارلو و مشخصات شبکه، شامل پارامترهای خط و تعداد اسپن‌های واقع در دو طرف دکل مورد اصابت، در هر دو روش یکسان است. نتایج به‌دست آمده برای دو حالتِ برخورد به دکل و برخورد به خط هوایی (دکل، سیم گارد و هادی‌های فاز) مقایسه شده‌اند.

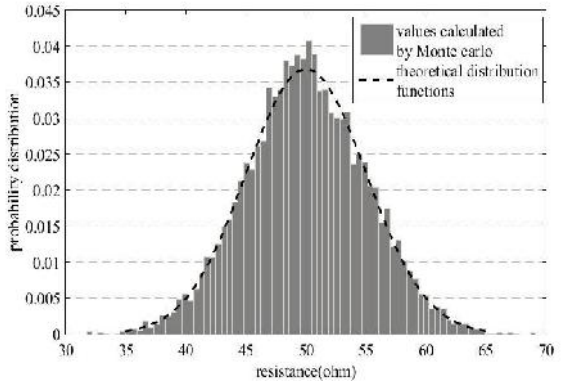
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۵-۱- برخورد ضربات صاعقه به دکل

در این حالت ۱۰۰۰۰ مقدار تصادفی برای پارامترهای صاعقه و مقاومت پای دکل تولید شده و به منظور محاسبه اضافه‌ولتاژ ناشی از BFR به معادله (۴) اعمال می‌شوند. همگرایی پارامترهای تصادفی تولیدشده با مقایسه تابع چگالی احتمال هر کدام از متغیرها با تابع توزیع نظری آنها بررسی می‌شود. برای نمونه، شکل (۶) همگرائی مقادیر تصادفی تولیدشده برای دامنه جریان و مقاومت پای دکل را نشان می‌دهد. به‌ازای تولید این تعداد متغیر، خطای ایجاد شده بین مقادیر تصادفی حاصل از روش مونت کارلو و تایع تئوری نظری آنها ۳٪ بوده است.



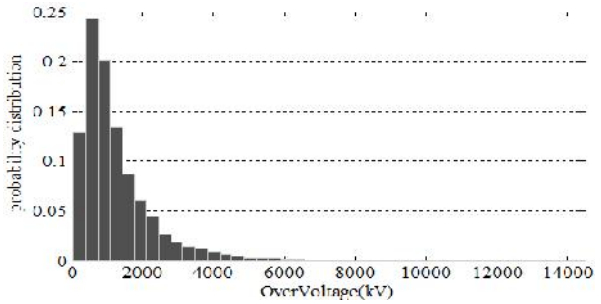
(الف) توزیع مقدار دامنه جریان



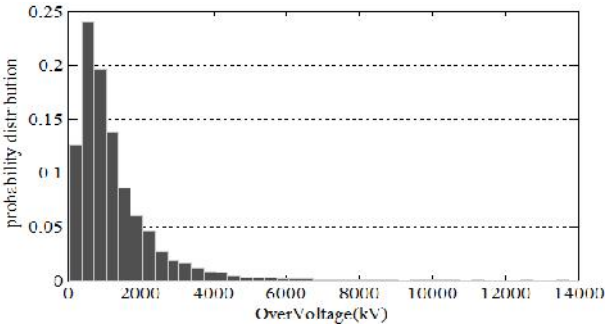
(ب) توزیع مقاومت پای دکل

شکل(۶): همگرایی مقادیر تصادفی تولید شده در روش مونت کارلو

شکل‌های (۷) و (۸) توزیع اضافه‌ولتاژهای صاعقه با فرض اصابت تمامی ضربات صاعقه به نوک دکل را نشان می‌دهند که با استفاده از شبیه‌سازی ATP و روش پیشنهادی به‌دست آمده و مقایسه شده‌اند. حداکثر اضافه‌ولتاژ، مقدار میانگین و انحراف استاندارد تمامی اضافه‌ولتاژهای صاعقه که به نوک دکل اصابت کرده‌اند، در جدول (۲) ارائه شده است. در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی ATP، روش پیشنهادی توانسته است علاوه بر سرعت بالای محاسبه، ماکزیمم اضافه‌ولتاژ و تعداد قطعی‌های خط (LFOR) را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که مقدار حداکثر اضافه‌ولتاژها و هم‌چنین نسبت مقدار متوسط به انحراف استاندارد اضافه ولتاژها در هر دو روش تقریبا یکسان است.

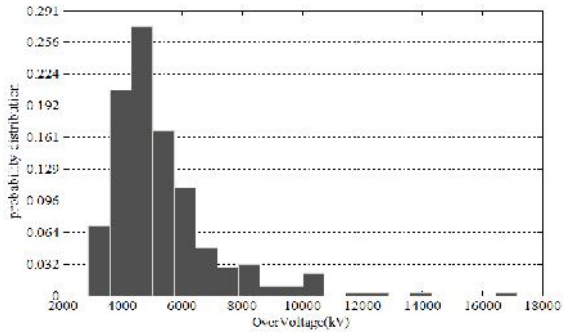


(الف) شبیه‌سازی ATP

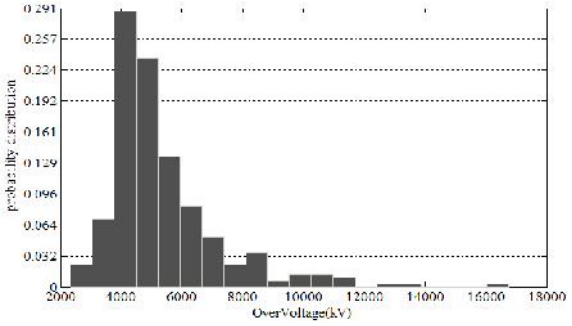


(ب) روش پیشنهادی

شکل (۷): توزیع تمامی اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در نوک دکل



(الف) شبیه‌سازی ATP



(ب) روش پیشنهادی

شکل (۸): توزیع اضافه‌ولتاژهای منجر به تخلیه الکتریکی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]

جدول(۲): توزیع اضافه‌ولتاژهای صاعقه (در صورت برخورد به دکل)

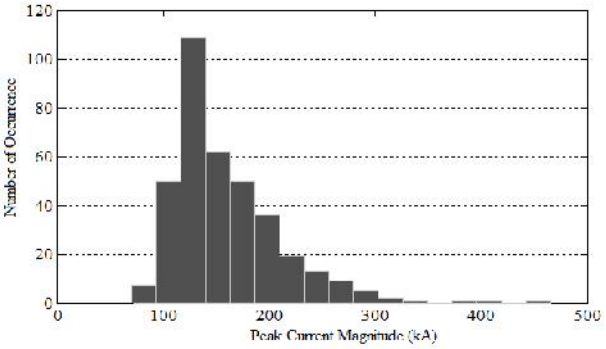
	شبیه‌سازی ATP	روش پیشنهادی
حداکثر اضافه‌ولتاژ (kV)	۱۴۲۱۹	۱۴۹۷۸
مقدار میانگین (kV)	۱۰۷۴/۷	۱۱۳۴/۶
انحراف معیار استاندارد (kV)	۹۴۴/۵۶	۹۸۸/۵
نسبت میانگین به انحراف معیار	۱/۱۳۷	۱/۱۴۷
تعداد قطعی ناشی از صاعقه (LFOR)	۰/۰۹۷۷	۰/۰۹۷۲
زمان انجام محاسبات(S)	۲۷۰۰۰	۶۵

۵-۲- برخورد ضربات صاعقه به خط هوایی

برای مطالعه عملکرد صاعقه ابتدا باید نقطه برخورد صاعقه (دکل، سیم گارد و هادی فاز) مشخص شود. نقطه نهائی اصابت با استفاده از مدل EGM تعیین شده و سپس با توجه به وقوع SF یا BF، معادله مناسب برای محاسبه اضافه‌ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا فرض می‌شود که ضربات صاعقه بطور یکنواخت روی ناحیه برخورد شکل (۱) توزیع شده است. طول ناحیه برخورد برابر طول اسپن، ۴۰۰ متر، و عرض آن متناسب با حداکثر جریان صاعقه که ممکن است رخ دهد، ۴۰۰ kA، بدست می‌آید. درنتیجه d=۱۰۰۰ m است. درعمل امکان وقوع جریان ۴۰۰ kA وجود ندارد اما از نظر تئوری این بزرگترین مقداری است که از داده‌های تولیدشده در روش مونت کارلو به‌دست آمده است. برای محاسبه اضافه‌ولتاژ در این حالت ۴۰۰۰۰ مقدار تصادفی برای پارامترهای صاعقه و مقاومت پای دکل تولید شده است.

پس از تعیین نقطه برخورد در هر بار اجرای برنامه، اضافه‌ولتاژهای دو سر زنجیره مقره ناشی از BF از رابطه (۴) بدست می‌آیند. از آنجا که شکل‌موج جریان صاعقه اعمالی با شکل‌موج استاندارد تفاوت دارد، استقامت عایقی در شرایط غیراستاندارد نیز در هر اجرا متناسب با پارامترهای صاعقه در آن اجرا از (۲۰) محاسبه می‌گردد. در صورتیکه ولتاژ ناشی از صاعقه در دو سر زنجیره مقره از استقامت عایقی متناظر در آن مرحله بیشتر شود، خطای BFR تشخیص داده می‌شود.

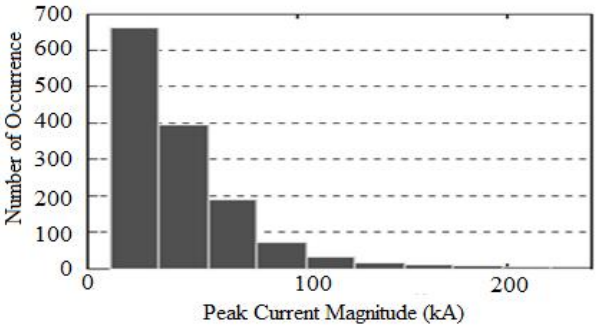
تمامی ضربات اصابت شده به خط منجر به تخلیه الکتریکی نمی‌شوند، بلکه تنها ضرباتی که دامنه آنها از جریان بحرانی خط بزرگتر است باعث فروپاشی می‌شوند. توزیع آماری جریان‌هایی که منجر به BFR یا SFFOR می‌گردند در شکل (۹):نشان داده شده است.



(الف) جریان‌های منجر به BFR

شکل (۹): نرخ وقوع جریان‌هایی که منجر به تخلیه شده‌اند

نتایج شکل (۹) را می‌توان برای درک عملکرد خطوط مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال دامنه جریان‌هائی که مطابق شکل (۹)-ب به SFFOR منجر شده‌اند به ۲۰۰ kA هم رسیده که غیرطبیعی بوده و نشان می‌دهد که حفاظت خط در برابر صاعقه ضعیف است.



(ب) جریان‌های منجر به SFFOR

حفاظت ضعیف خط از نرخ LFOR آن که درحدود ۶ است، جدول ۳، نیز قابل نتیجه‌گیری می‌باشد. چراکه این تعداد قطعی برای خطوط انتقال خیلی زیاد است. همچنین نتایج شکل (۹)-الف نیز نشان می‌دهند که درصدی از BFR ناشی از جریان‌های بزرگتر از ۲۰۰ kA است. این مقادیر بزرگ جریان ناشی از توزیع آماری تئوری پارامترهای صاعقه است که در عمل چندان اتفاق نمی‌افتد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیز به‌ترتیب توزیع اضافه-ولتاژهای صاعقه در نوک دکل را در اثر BFR و SFFOR نشان می‌دهند.

در جدول (۳) توزیع اضافه‌ولتاژهای ناشی از SF و BF که از روش پیشنهادی و شبیه‌سازی ATP بدست آمده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت نیز زمان اجرای محاسبات در روش پیشنهادی بسیار کمتر از شبیه‌سازی ATP است؛ این مزیت در شبکه‌های بزرگ با تعداد نقاط زیاد، بخصوص درصورت نیاز به انجام بهنیه‌سازی برای جایابی ادوات حفاظتی ارزشمند است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

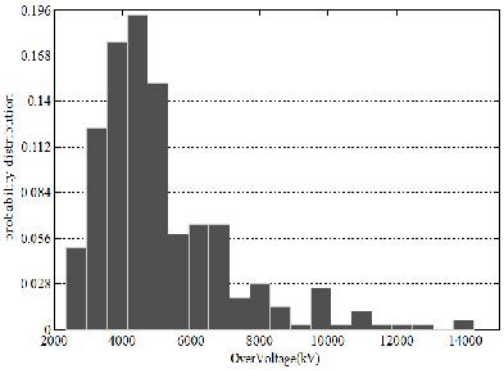
عملکرد صاعقه خط هوایی توسط نرخ تخلیه الکتریکی صاعقه بیان می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است [۵]:

$$LFOR = N_g.100.d.F/N \qquad (۲۲)$$

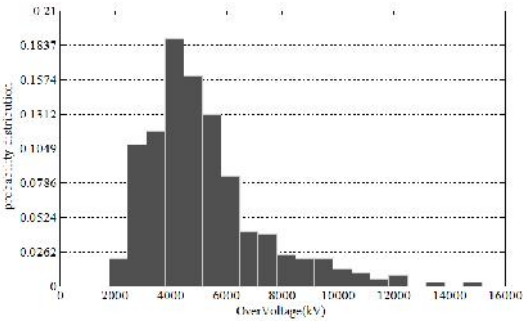
که d (=۱۰۰۰ m) عرض ناحیه برخورد، F تعداد تخلیه بوجود آمده، N (=۴۰۰۰۰) تعداد شبیه‌سازی‌ها و N_g چگالی صاعقه در سطح زمین است. جدول (۳) مقادیر LFOR، SFFOR و BFR خط هوایی را برای N_g=1fl/km^2/year نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی ATP مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی می‌تواند عملکرد خط انتقال را با دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کند.

جدول(۳): توزیع اضافه‌ولتاژهای صاعقه (در صورت برخورد به خط)

	شبیه‌سازی ATP		روش پیشنهادی	
	SF	BF	SF	BF
مقدار حداکثر (kV)	۸۸۲۳۸	۱۴۲۵۴	۹۵۴۲۶	۱۵۱۸۳
مقدار میانگین (kV)	۷۴۹۰/۶	۱۳۸۷/۱	۸۶۵۵/۶	۱۴۱۴/۵
انحراف معیار استاندارد (kV)	۶۷۴۰/۳	۱۲۴۸	۷۵۶۶/۴	۱۳۰۳/۳
نسبت میانگین به انحراف معیار	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۴	۱/۰۸
نسبت میانگین به انحراف معیار تمامی اضافه‌ولتاژها	۱/۱۱		۱/۱۱	
LFOR	۶/۱۲۲۵		۶/۴۳۵	
SFFOR	۳/۳۰۵		۳/۴۷۲۵	
BFR	۲/۸۱۷۵		۲/۹۶۲۵	
ریسک عایقی (٪)	۴۳/۴۱		۴۴/۰۸	
زمان انجام محاسبات (s)	۲۰۰۰۰		۵۰	
تعداد ضربات صاعقه	۴۰۰۰۰			



(الف) شبیه‌سازی ATP



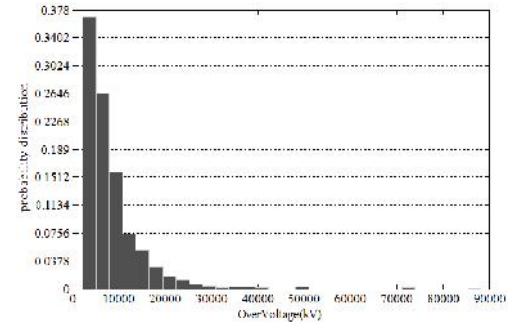
(ب) روش پیشنهادی

شکل (۱۰): توزیع اضافه‌ولتاژهای منجر به BFR

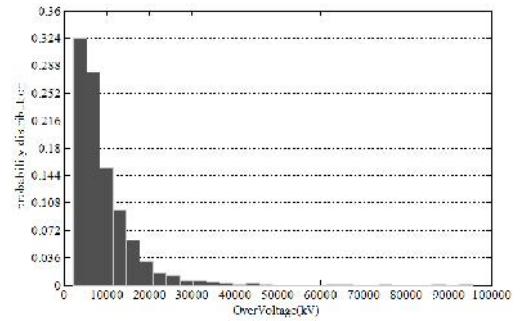
بعد از تخمین تعداد قطعی‌های ناشی از صاعقه، مرحله بعدی مطالعات، ارزیابی احتمال شکست عایقی ناشی از ضربات صاعقه است. با توجه به استاندارد IEC 71-2، ریسک عایقی ناشی از اضافه‌ولتاژهای صاعقه را می توان از رابطه زیر بدست آورد [۱۷]:

$$R = \int_0^\infty f(V)P(V)dV \qquad (۲۳)$$

که $f(v)$ تابع چگالی احتمال وقوع اضافه‌ولتاژ و $P(V)$ احتمال تخلیه‌الکتریکی عایق می‌باشد. با مشخص بودن مقدار میانه و انحراف معیار اضافه‌ولتاژها در جدول (۳)، تابع چگالی احتمال وقوع اضافه‌ولتاژ $f(v)$ مشخص است. مقدار متوسط تابع احتمال شکست عایقی، $P(V)$، نیز برابر با مقدار CFO عایق خط و انحراف معیار استاندارد آن برابر با ۲٪ است [۳]. بنابراین تابع احتمال شکست نیز مشخص است.



(الف) شبیه‌سازی ATP



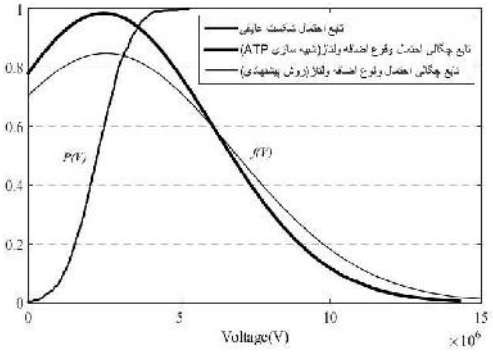
(ب) روش پیشنهادی

شکل (۱۱): توزیع اضافه‌ولتاژهای منجر به SFFOR

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]

با فرض تابع چگالی احتمال گوسی برای تخلیه الکتریکی و اضافه‌ولتاژ [۸و۱۸]، ریسک عایقی بدست‌آمده از شبیه‌سازی ATP و روش پیشنهادی با استفاده از معادله (۲۲) به‌ترتیب برابر ۴۳/۴۱٪ و ۴۴/۰۸٪ است. خطای روش پیشنهادی نسبت به شبیه‌سازی ATP برای محاسبه ریسک عایقی برابر ۱/۵۴٪ می‌باشد که قابل قبول است.

لازم به ذکر است که اگرچه تخمین ماکزیمم مقدار اضافه‌ولتاژ در روش پیشنهادی نسبت به شبیه‌سازی ATP، خصوصا در تنش‌های ناشی از SF، دارای مقداری خطا است؛ اما نسبت مقدار میانگین به انحراف معیار استاندارد تمامی اضافه-ولتاژهای منتجه در هر دو روش باهم برابر می‌باشد. بنابراین مطابق شکل (۱۲)، مساحت ناحیه ریسک منتجه در هر دو روش که برابر سطح زیر نمودار تابع چگالی احتمال شکست و تابع وقوع اضافه‌ولتاژ می‌باشد تقریبا برابر بوده و در نتیجه مقدار ریسک عایقی مشابه خواهد بود.



شکل (۱۲): احتمال شکست عایقی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای تخمین عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از ضربات مستقیم صاعقه ارائه شده است. در روش ارائه شده که ترکیبی از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی مونت کارلو است؛ نخست روابط مناسب برای تخمین اضافه‌ولتاژها بدست آمده و سپس با اعمال روش مونت‌کارلو به روابط تحلیلی مذکور، عملکرد خط انتقال، ماکزیمم دامنه اضافه‌ولتاژها و ریسک عایقی صاعقه محاسبه می‌گردد. مقادیر اضافه‌ولتاژ پس از تعیین محل اصابت صاعقه با کمک یک مدل الکتروهندسی خط محاسبه می‌شوند. روش ترکیبی ارائه شده در این مقاله بدلیل استفاده از روش مونت‌کارلو، برخلاف روشهای تحلیلی- انتگرالی مرسوم از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. به علاوه چون در آن به مدلسازی و پیاده‌سازی شبکه قدرت واقعی در EMTP/ATP نیازی نیست، پیاده‌سازی آن ساده بوده و دارای زمان پردازش بسیار کمتری نیز می‌باشد؛ که برای مطالعه شبکه‌های قدرت واقعی بزرگ با تعداد نقاط زیاد و مشخصات متفاوت یک مزیت عمده محسوب شده و به‌ویژه برای مسائل بهینه‌سازی، جایابی برقگیرها و ... بسیار سودمند خواهد بود.

طبق نتایج، روش پیشنهادی قادر است تعداد قطعی‌های خط و همچنین ریسک عایقی تجهیزات شبکه را با دقت قابل قبولی نسبت به حالتی که شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسط نرم‌افزار ATP انجام می‌شود پیش‌بینی کند.

مراجع

[1] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410, 2004.

[2] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std. 1243, 1997.

[3] Hileman, A. R., Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker: New York, 1999.

[4] Anderson, J. G., "Monte Carlo computer calculation of transmission line lightning performance", AIEE Trans., Vol. 80, pp. 414-420, August 1961.

[5] Martinez, J.A., Aranda, F.C., "Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP", IEEE Trans. Power Del., vol 20, No. 3, pp. 2200–2210, July 2005.

[۶] احمد غلامی، محمد مرادی "بررسی پدیده فرورزونانس و تاثیر پارامترهای موثر بر آن در ترانسفورماتورهای توزیع به کمک نرم افزار EMTP"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال اول، شماره اول، بهار ۱۳۸۳.

[7] Currie, J. R., Choy, L.A., Darveniza, M., "Monte Carlo determination of the frequency of lightning strokes and shielding failures on transmission lines", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, No. 9, pp. 2305-2312, Sept.1971.

[8] Shariatinasab, R., Vahidi, B., Hosseinian, S. H., "Statistical evaluation of lightning-related failures for the optimal location of surge arresters on the power networks", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, No. 2, pp.129-144, Feb 2009.

[9] Shariatinasab, R., Vahidi, B., Hosseinian, S. H., Ametani, A., "Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arresters on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges", IEEE Trans. Power Del., Vol. 24, No. 4, pp. 1903-1911, Oct. 2009.

[10] Shariatinasab, R., Ghayur, J., "Probabilistic Evaluation of Lightning Performance of Overhead Distribution Lines Using Monte Carlo Method", in Proc. 17th Electric Power Distribution network Conference (EPDC), 3-4 May, 2012, Tehran, Iran.

[11] Shafaei, A., Gholami, A., Shariatinasab, R., "Probabilistic evaluation of lightning performance of overhead transmission lines considering non-vertical strokes", Scientia Iranica Trans. D, Vol. 19, No. 3, pp. 812–819, 2012.

[12] Vahihi, B., Shaddel. A.R., "A New Approach To Lightning Protection Of Wind Turbine", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.2 – No.1 – Spring and Summer 2005.

[13] Moini, R., Sadeghi, S.H.H., Rachidi, F., "An Antenna-Theory Approch for Modeling Inclined Lightning Strock

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

Channels", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.1 – No.1 – Spring 2004.
[14] IEEE TF on Parameters of Lightning Strokes, "Parameters of lightning strokes: a review", IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No. 1, pp. 346-358, 2005..
[15] Mousa, A. M., "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. Power Del., Vol. 9, No. 3, pp. 1669–1677, July 1994.
[16] Heidler, F. , Cvetic, J. M., Stanic, B. V., "Calculation of lightning current parameters", IEEE Trans. Power Del., Vol. 14, No. 2, pp. 399-404, 1999.
[17] Insulation Coordination Application Guide, IEC 71-2 Std., 1996.
[18] Orille-Fernández, A. L., Bogarra, S., Gotés, M. A., "Optimization of Surge Arrester's Location", IEEE Trans. Power Del., Vol. 19, No. 1, pp. 145-150, Jan. 2004.

زیرنویس‌ها

[1] Basic lightning impulse insulation level
[2] Lightning Flashover Rate
[3] Shielding Failure Flashover Rate
[4] Back Flashover Rate
[5] Electro-Geometric Model
[6] Shielding Failure
[7] Back Flashover

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.8.2]