

بررسی خروج خطوط ۲۳۰ کیلوولت به علت برخورد صاعقه با استفاده از

روش مونت کارلو: مطالعه موردی در مناطق غرب ایران

محمد مرادی^۱، استادیار؛ احسان کریمی^۲، کارشناسی ارشد؛ حمدی عبدی^۳، دانشیار؛ شهرام کریمی^۴، استادیار

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه- ایران - mmoradi@razi.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران - ehsankarami@aut.ac.ir

۳- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه رازی- کرمانشاه- ایران - hamdiabdi@razi.ac.ir

۴- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه- ایران - shahramkarimi@razi.ac.ir

چکیده: طراحی نامناسب برج‌های خطوط انتقال در مناطق با چگالی صاعقه بالا سبب افزایش نرخ خروج خط به علت اصابت صاعقه می‌گردد. در این مقاله، با مطالعه داده‌های هواشناسی در مناطق تحت پوشش برق منطقه ای غرب ایران در ۵ سال اخیر، سطح ایزوکرونیک و چگالی صاعقه ناحیه‌های مختلف محاسبه و سپس نرخ خروج خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت دودمداره با یک سیم محافظ (طرح موجود) به علت اصابت صاعقه مورد بررسی قرار گرفته‌است. آمار خروج خطوط ارائه شده توسط برق منطقه‌ای غرب و همچنین نتایج محاسبات انجام شده، نشان دهنده نرخ بالای خروج خطوط در این مناطق است. نتایج این محاسبات با مقادیر مشابه طرح برج در صورت استفاده از دو سیم محافظ مقایسه شده و نتایج نشان دهنده اختلاف بالای این دو طرح در مقدار نرخ خروج خطوط می‌باشد. با توجه به مقدار چگالی صاعقه در مناطق مورد مطالعه، شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده عدم کفایت طرح برج با یک سیم محافظ برای رسیدن به نرخ خروجی برابر مقادیر استاندارد است. به منظور اصلاح طرح موجود راهکارهای مختلف استفاده از برق گیرها، تغییر ساختار برج در طرح موجود و طرح‌های آتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به طبیعت تصادفی صاعقه، از روش مونت کارلو برای تولید سناریوهای مختلف در نرم افزار MATLAB و اجرای شبیه‌سازی در نرم افزار EMTP استفاده شده‌است.

واژه‌های کلیدی: سطح ایزوکرونیک، چگالی صاعقه، خطوط ۲۳۰ کیلوولت دودمداره، برق گیر، روش مونت کارلو.

Investigating Outage Rates of 230 kV Transmission Lines Due to Lightning Strike Using Mont Carlo Method: Case Study in West Regions of Iran

Mohammad Moradi¹, Professor; Ehsan Karami², MSc; Hamdi Abdi³, Professor; Shahram karimi⁴, Professor

1- Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: mmoradi@razi.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: ehsankarami@aut.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: hamdiabdi@razi.ac.ir

4- Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: shahramkarimi@razi.ac.ir

Abstract: Inappropriate design of transmission line towers in areas with high lightning density increases the outage rate of the line due to direct lightning strikes. In this paper, The lightning activities of areas covered by western regional electricity company during five recent years were collected from weather stations. Based on collected datasets, the Isokeraunic level and the lightning density of different areas have been computed. This information were further used to investigate and predict the outage rate of double circuit 230 kV transmission lines with one shield wire (existing plan) due to direct lightning strikes. Due to high density of lightning activities in some areas, the calculation results show high outage rate in these areas, which has been confirmed by actual experiences. In order to overcome this problem, a tower design with two shield wires was proposed for new developments. The outage rate of the transmission line with the two shield wire design with extracted lightning densities were compared with the existing tower installed. The results show high degree of improvement in outage rates. In order to modify the existing transmission line outage rates, installation of surge arresters and their capabilities were studied. Due to statistic nature of lightning, Monte Carlo method along with EMTP simulations were used in investigations. Simulations results show placement of surge arresters on two upper phases can reduce the shielding failure outage rates in the transmission line, significantly. The pros and cons of surge arrester installations in transmission line to compensate inappropriate tower design are discussed. Results of this study can be used for further transmission line developments in these areas.

Keywords: Isokeraunic level, lightning density, 230 kV twin circuit transmission lines, surge arrester, Mont Carlo method.

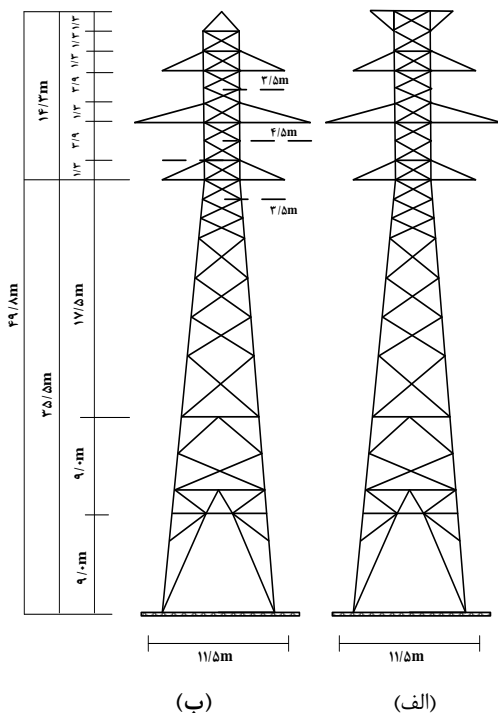
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴ و ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

نام نویسنده مسئول: محمد مرادی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.



شکل ۱: طرح خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت با دو آرایش برج شماره ۱: یک سیم محافظ (طرح موجود) و برج شماره ۲: با دو سیم محافظ

وجود ندارد. در این صورت یک راه کار مناسب، نصب برق گیر می باشد [۸]. در [۹-۱۰] استفاده از برق گیر برای بهبود کارایی سیستم حفاظتی صاعقه مورد بررسی واقع شده است. در این مراجع نشان داده شده که با استفاده از برق گیر با ظرفیت انرژی مناسب و همچنین نصب آن در مکان بهینه، میزان خروج خط به دلیل برخورد صاعقه، تا حد بسیار مطلوبی کاهش می دهد.

آمارهای ارائه شده در بخش ۲، نشان می دهند که نرخ خروج خطوط انتقال دو مداره ۲۳۰ کیلوولت برق منطقه ای غرب بر اثر برخورد صاعقه مقدار بالایی است. در این مقاله، با استفاده از اطلاعات مربوط به تعداد روزهای صاعقه خیر در ایستگاه های هواشناسی سه استان تحت پوشش برق منطقه ای غرب در فاصله پنج سال گذشته، میزان کارایی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت مورد ارزیابی واقع شده است. همچنین طراحی برج در خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت با طرح خط مشابه ولی با دو سیم محافظ مقایسه می شود. با در نظر گرفتن تصادفی بودن پارامترهای صاعقه (مانند مقدار قله، پیشانی موج و محل اصابت صاعقه)، در شبیه سازی ها از طبیعت تصادفی شبیه سازی مونت کارلو استفاده می شود. از آنجاکه امکان تغییر ساختار برج به دلایل اقتصادی و فنی ممکن نیست، نتایج حاصل می تواند به عنوان مرجعی در طراحی خطوط در آینده به کار گرفته شود. همچنین، نتایج اندازه گیری مقاومت زمین در تعدادی برج نمونه نشان دهنده مناسب بودن مقدار این پارامتر می باشد. به همین جهت در مطالعات انجام شده، راهکار مبتنی بر نصب برق گیرها به منظور کاهش نرخ خروج خط به کمک شبیه سازی EMTP مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله با توجه به طراحی

۱- مقدمه

خطوط انتقال فشارقوی ۲۳۰ کیلوولت سهم بسیار زیادی در قابلیت اعتماد سیستم قدرت در ایران دارند. در نتیجه، عملکرد پیوسته آن ها به منظور انتقال توان بسیار حائز اهمیت است. از مهم ترین عوامل خروج این خطوط انتقال از شبکه، خروج به علت برخورد صاعقه می باشد. امکان خروج خط به علت برخورد صاعقه به دو نحو ممکن است: (۱) اصابت مستقیم صاعقه به هادی های خطوط انتقال ناشی از خطای سیم گارد^۱ که این امر سبب افزایش ولتاژ قرار گرفته بر روی هادی های خط شده و منجر به تخلیه الکتریکی بر روی مقره های فشارقوی می شود. (۲) اصابت صاعقه به برج ممکن است باعث افزایش ولتاژ در محل برج شده و منجر به بروز جرقه برگشتی^۲ شود. (۳) اصابت صاعقه به سیم گارد نیز ممکن است به علت افزایش ولتاژ سبب خروج خط شود [۱].

به منظور محافظت از خطوط انتقال در برابر صاعقه، معمولاً مطابق با شرایط فنی مورد نیاز تشریح شده در استاندارد IEEE-1243، از سیم های محافظ با آرایش مناسب استفاده می شود [۲]. با نصب سیم محافظ در بالای خطوط انتقال با زاویه حفاظتی مناسب، تعداد زیادی از صاعقه ها به سیم های محافظ برخورد نموده و خطوط انتقال تا حد قابل توجهی در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه محافظت می شوند. در این شرایط استفاده از سیم محافظ، باعث تخلیه جریان صاعقه از طریق برج های مختلف و در نتیجه کاهش ولتاژ سر فازها و بالای برج می شود [۳]. لازم به ذکر است که در این شرایط و با هدایت صاعقه به سمت زمین از طریق برج ها، مقدار مقاومت پای برج در میزان اضافه ولتاژ حاصل شده و در نتیجه احتمال خروج خط انتقال به علت اضافه ولتاژ برگشتی بسیار اهمیت می یابد [۴-۵].

ارتفاع برج و تعداد سیم های محافظ و در نتیجه آن زاویه سیم محافظ در میزان اصابت مستقیم صاعقه به خطوط انتقال بسیار حائز اهمیت است. به منظور افزایش حفاظت خطوط انتقال در برابر صاعقه مخصوصاً در نقاطی که تعداد صاعقه های در سال و یا سطح ایزوکرونیک بالاتری دارد، زاویه حفاظتی سیم محافظ پایین انتخاب می گردد [۶]. طراحی خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت معمولاً با یک یا دو سیم محافظ انجام می شود. شکل ۱ نمایی از دو نوع طراحی متفاوت برج خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت با یک یا دو سیم محافظ را نشان می دهد [۷]. در خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت در غرب کشور از برج هایی با یک سیم محافظ استفاده شده است (برج ۲). در این حالت، زاویه حفاظتی ایجاد شده توسط سیم محافظ در طرح با دو سیم محافظ کمتر از 30° و در طرح مورد استفاده در اجرای خطوط برق غرب حدود 36° می باشد. تعداد سیم های گارد و آرایش آن ها بر روی برج همراه با میزان مقاومت زمین، عمل کرد سیستم در برابر صاعقه را مشخص می سازد. گاهی کاهش مقاومت پای برج به مقدار مطلوب، به ویژه در نواحی کوهستانی امکان پذیر نیست. همچنین در شرایطی که طراحی سیستم حفاظت از صاعقه به نحو مطلوبی انجام نشده باشد، امکان ایجاد تغییر در ساختار برج و اصلاح آن (اضافه نمودن سیم گارد و یا تغییر آرایش آن)

جدول ۱: چگالی صاعقه در ایستگاه‌های مختلف برق منطقه‌ای غرب

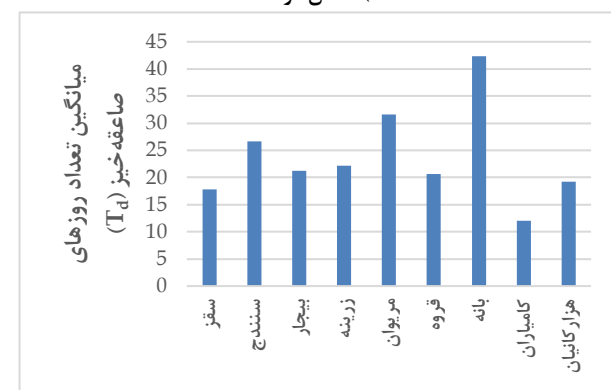
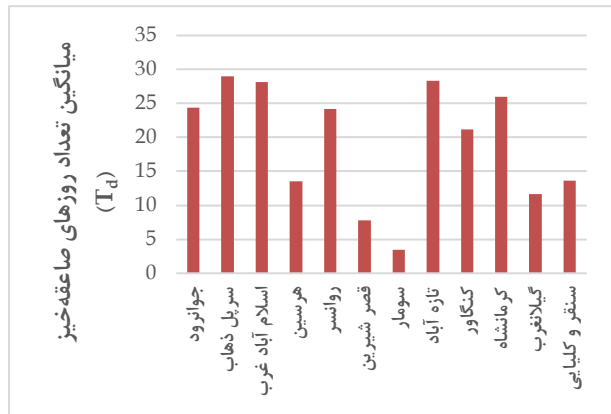
گردستان	N_g	ایلام	N_g	کرمانشاه	N_g
سقز	۱/۴۶	ایلام	۲/۸۵	جواترود	۲/۱۶
سنندج	۲/۴۲	مهران	۰/۹۱	سرپل ذهاب	۲/۶۹
بیجار	۱/۸۲	دهلران	۱/۲۸	اسلام‌آباد غرب	۲/۵۹
زرینه	۱/۹۳	دره شهر	۰/۵۷	هرسین	۱/۰۳
مریوان	۲/۹۹	ایوان	۱/۲۴	روانسر	۲/۱۴
قروه	۱/۷۵	لومار	۱/۲۶	قصرشیرین	۰/۵۲
بانه	۴/۳۳	سرابله	۱/۰۱	سومار	۰/۱۹
کامیاران	۰/۸۹	آبدانان	۱/۶۵	تازه آباد	۲/۶۱
هزارکانیان	۱/۶۱			کنگاور	۱/۸۱
				کرمانشاه	۲/۳۵

قرمز بیشتر از ۲، سبز کمتر از ۲ و مشکی حداکثر

صاعقه به کمک روابط مختلف است [۱]. در شکل ۲ تعداد روزهای صاعقه‌خیز در ۵ سال اخیر در ایستگاه‌های مختلف سه استان کرمانشاه، کردستان، و ایلام به تفکیک هر شهر نشان داده شده است. این آمار به کمک داده‌های دریافتی از ایستگاه‌های مختلف هواشناسی جمع‌آوری شده است. چگالی صاعقه در ایستگاه‌های مورد نظر به کمک رابطه اریکسون محاسبه شده است [۱].

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (1)$$

در این رابطه T_d میانگین تعداد روزهای صاعقه‌خیز در سال است. مقادیر محاسبه شده چگالی صاعقه در ایستگاه‌های مختلف سه استان به تفکیک هر شهر در جدول ۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است چگالی صاعقه در بعضی از ایستگاه‌ها مانند سنندج در استان کردستان، مقدار میانگین چگالی صاعقه فراتر از ۲ می‌باشد که مطابق با استاندارد IEEE-1243 مقدار بالایی محسوب می‌شود [۲]. لازم به توضیح است که خطوط ۲۳۰ کیلوولت برق منطقه‌ای غرب دارای ۲۶۴۶ کیلومتر طول در سه استان بوده که بخش قابل توجهی از این خطوط از نواحی با چگالی صاعقه بالا عبور می‌کند. همچنین باتوجه به آمار ارائه شده از سوی برق منطقه‌ای غرب، تعداد قطعی خطوط ۲۳۰ کیلوولت در هر ۱۰۰ کیلومتر برابر ۱/۱۷ بوده که مقداری قابل توجه می‌باشد [۱۲]. تعداد روزهای صاعقه‌خیز استان‌های کرمانشاه، کردستان و ایلام، در بازه زمانی پنج ساله اخیر به ترتیب برابر ۱۹/۳۲، ۲۳/۷۳ و ۱۶/۴ در سال می‌باشند. از طرفی تعداد خروج خطوط ۲۳۰ کیلوولت در استان کردستان برابر ۱۷ بوده در حالی که در استان‌های کرمانشاه و ایلام این مقدار برابر ۷ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر بودن تعداد روزهای صاعقه‌خیز در سال با افزایش میزان احتمال تعداد قطعی‌های ناشی از وقوع پدیده صاعقه رابطه مستقیمی دارد؛ به طوری که هرچه تعداد روزهای صاعقه‌خیز (که شدیداً تابع شرایط محیطی است) مقدار بیشتری باشد، احتمال خروج خطوط انتقال افزایش می‌یابد.



شکل ۲: میانگین تعداد روزهای صاعقه‌خیز در شهرهای مختلف استان‌های الف) کرمانشاه ب) کردستان و ج) ایلام

نامناسب خط و بالابودن خطای سیستم حفاظتی سیم محافظ برای اصلاح آن از برق‌گیر استفاده می‌شود.

۲- مطالعات هواشناسی و تعیین سطح ایزوکرونیک در مناطق مورد مطالعه

وقوع پدیده صاعقه تابع بسیاری از پارامترهای جغرافیایی است. به عنوان مثال می‌توان ارتفاع از سطح دریا، کوهستانی بودن یا واقع شدن در منطقه مسطح، وضعیت وزش باد، رطوبت محل، ارتفاع ابر و نوع آب‌وهوا از قبیل استوایی، مدیترانه‌ای، قطبی و یا کویری بودن منطقه را نام برد [۱۱]. در نظر گرفتن تمامی فاکتورهای فوق کار مطالعاتی را در سطح وسیع بسیار مشکل می‌نماید. راه کار دیگر استخراج رفتار صاعقه، جمع آوری تعداد روزهای صاعقه‌خیز در مناطق مختلف و محاسبه چگالی

جدول ۲: پارامترهای موج جریان صاعقه براساس مرجع [۱۴]

پارامتر	مقدار متوسط	انحراف از معیار
دامنه جریان (kA)	۳۱/۱	۰/۴۸
زمان پیشانی (μs)	۳/۸۳	۰/۵۵
زمان پشت موج (μs)	۷۷/۵	۰/۵۸

آن را در اندازه‌گیری کاهش داد. به این منظور می‌توان برای افزایش دقت از اندازه‌گیری امپدانس استفاده نمود. در این صورت با توجه به تریق سیگنال فرکانس بالا به صورت پالس و میرایی شدید موج هنگام عبور موج از مسیره‌های دیگر با طول اسپن بالا، می‌توان با دقت بسیار بالایی فرض نمود که تنها مسیر موجود مسیر زمین و مقاومت اندازه‌گیری شده مقاومت زمین است. در این شرایط، اثر سیم‌محافظ حداقل می‌باشد. در صورتی که از این روش استفاده نشود میزان مقاومت اندازه‌گیری شده به واسطه وجود مسیره‌های موازی فراهم شده از طریق سیم‌های محافظ، مقدار کمتری خواهد بود که این نسبت با توجه به شرایط فیزیکی متغیر خواهد بود.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری به کمک دستگاه نشان می‌دهد که حداکثر امپدانس پای برج اندازه‌گیری شده در بخش‌هایی از خط تحت مطالعه، برابر ۳/۷۶ اهم بوده و مقدار میانگین برابر ۲/۵۰ اهم می‌باشد. در استاندارد IEC 62305-3 مقدار مناسب برای مقاومت زمین در برابر صاعقه ۱۰ اهم عنوان شده است. لازم به ذکر است که مقدار ۱۰ اهم عنوان شده کاملاً کلی بوده و در این مرجع به‌طور خاص به سیستم زمین خطوط انتقال اشاره نشده است. به‌منظور در نظرگیری بدترین شرایط مقدار مقاومت پای برج در شبیه‌سازی‌ها برابر ۴ اهم در نظر گرفته شده است.

۴- اصابت صاعقه به سیم‌محافظ

محاسبات مربوط به کارایی سیستم حفاظت از صاعقه خط انتقال، مطابق استاندارد IEEE-1243 انجام می‌شود که در این حالت برای هر جریان صاعقه‌ای مطابق معادله (۲) شعاع برخورد به صورت تابعی از دامنه جریان صاعقه استخراج می‌گردد.

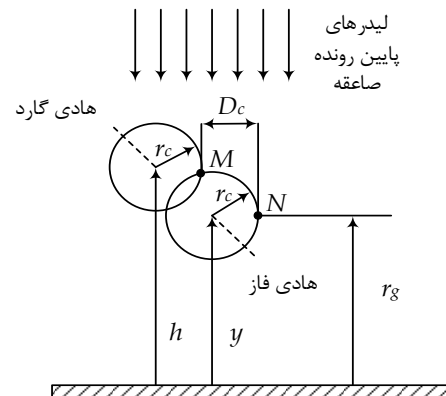
$$r_c = 10I^{0.65} \quad (2)$$

$$r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h)] I^{0.65} & h < 40 \\ 5.5 I^{0.65} & h \geq 40 \end{cases}$$

با محاسبه شعاع برخورد به سیم‌محافظ و خطوط فشارقوی و همچنین شعاع برخورد به زمین مطابق شکل ۴، بخشی از فاصله D_c بالای فاز در مقابل اصابت صاعقه توسط سیم‌محافظ حفاظت نمی‌شود. این فاصله در جریان‌های مختلف صاعقه متغیر بوده و با افزایش جریان صاعقه کاهش می‌یابد. در یک مقدار جریان بحرانی فاصله D_c به صفر می‌رسد و در صاعقه‌ای با مقدار این جریان و جریان‌های بالاتر قطعاً به سیم‌محافظ برخورد می‌نماید. محاسبات مربوط به جریان بحرانی I_m که به‌ازای جریان‌های بالاتر از آن صاعقه به برج و یا سیم‌محافظ برخورد می‌نماید



شکل ۳: دستگاه MRU-200 به منظور اندازه‌گیری مقاومت پای برج



شکل ۴: مدل الکتریکی هندسی برای یک خط محافظ

۳- اندازه‌گیری مقاومت پای برج

به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت پای برج در خطوط مختلف مورد مطالعه در این پروژه از دستگاه MRU-200 (نشان داده شده در شکل ۳) ساخت شرکت Sonei استفاده شده است. اطلاعات تکمیلی در ارتباط با امکانات دستگاه و همچنین راهنمای استفاده از آن در شرایط مختلف سایت شرکت سازنده در دسترس است [۱۳]. به‌منظور افزایش دقت نتایج، از روش ۴ میله‌ای استفاده شده است. در روش استفاده شده به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت، دو میله به یکی از چهار پایه برج مورد بررسی متصل می‌شوند. میله جریان با توجه به طول سیم (حدوداً ۴۰ متر) و به منظور کاهش تداخلات الکترومغناطیسی تا حد امکان به صورت عمود بر مسیر خط انتقال کشیده شده و در زمین کوبیده می‌شود. با توجه به توان نسبتاً بالای عبوری از خطوط مورد مطالعه و عدم امکان خاموشی خطوط، اندازه‌گیری‌ها در شرایط برقرار بودن خطوط مورد مطالعه انجام شده است. میله ولتاژ نیز تا حد امکان عمود بر مسیر خط انتقال و در مقابل میله جریان نصب می‌شود.

نکته مهم رعایت حداقل طول سیم ولتاژ می‌باشد که به‌منظور رسیدن به میدان یک‌نواخت ضروری است. وجود سیم‌محافظ به واسطه فراهم آوردن مسیر زمین از طریق اتصال بین دکل‌های مختلف، بر روی میزان مقاومت اندازه‌گیری شده تأثیر داشته و موجب حاصل شدن مقاومتی کمتر از مقاومت زمین خواهد شد. به همین منظور لازم است که به نوعی تأثیر

بزرگ‌تر باشد منجر به بروز قوس الکتریکی می‌شود. این رویداد که تخلیه برگشتی نامیده می‌شود ماهیتی احتمالاتی دارد و برحسب تعداد برخورد منجر به خروج^۲ در ۱۰۰ کیلومتر در سال به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$BFR = 0.6N_L P(I > I_C) \quad (7)$$

I_C نشان‌دهنده جریان بحرانی وقوع تخلیه برگشتی در عایق‌های خط انتقال و $P(I > I_C)$ احتمال رخداد جریان‌های بزرگ‌تر از جریان بحرانی است که از رابطه (۶) به دست می‌آید. ضریب ۰/۶ نیز به دلیل تفاوت ولتاژ القایی به واسطه برخورد صاعقه به برج با ولتاژ القایی ناشی از برخورد صاعقه در طول اسپن در نظر گرفته می‌شود. N_L که تعداد صاعقه‌های برخوردی به سیم محافظ را نشان می‌دهد برحسب تعداد برخورد در ۱۰۰ کیلومتر در سال از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

$$N_L = N_g \frac{28h^{0.6} + S_g}{10} \quad (8)$$

که در آن h ارتفاع سیم محافظ، S_g فاصله افقی بین سیم‌های محافظ و N_g چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین است.

۵- مراحل انجام شبیه‌سازی و نتایج

۵-۱- مراحل شبیه‌سازی

۵-۱-۱- تعیین محل برخورد

به منظور تعیین محل برخورد موج جریان صاعقه که ماهیتی تصادفی دارد، کانالی با طولی برابر با طول اسپن و عرضی با توجه به دامنه حداکثر صاعقه در نظر گرفته شده در محاسبات و سطح ایزوکرونیک منطقه مورد مطالعه، انتخاب می‌گردد. در این مقاله، به منظور در نظر گرفتن بدترین حالت، برای تمام خطوط مورد مطالعه طول کانال برابر با ۴۵۰ متر و عرض آن برابر با ۷۱۲ متر انتخاب می‌گردد. همچنین، در این حالت، آرایش خطوط انتقال در طول اسپن بدون شکم و توزیع ریاضی محل برخورد صاعقه داخل کانال به صورت یک نواخت انتخاب شده است [۱۴].

۵-۱-۲- الگوریتم مونت کارلو

باتوجه به تصادفی بودن پارامترهای صاعقه از الگوریتم مونت کارلو استفاده می‌شود. مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه برداری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. ایده اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو، ایجاد یک مجموعه از نمونه‌های تجربی با استفاده از دنباله تصادفی اعداد است. مطابق قضیه حد مرکزی یا قانون اعداد بزرگ، زمانی که تعداد نمونه‌های مورد بررسی به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌توان از میانگین نمونه‌ای استفاده کرد [۱۶]. در این روش، واریانس مربوط به میانگین نمونه‌ای، دقت تخمین را نشان می‌دهد. دو راه کاهش انحراف معیار تخمین به دست آمده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو شامل افزایش

به وسیله محاسبات مربوط مدل الکترومهندسی انجام شده و تنها نتایج محاسبات در این مقاله ذکر شده است.

احتمال وقوع صاعقه با توزیع نرمال با مقدار میانگین و مقدار انحراف در نظر گرفته می‌شود. تمامی پارامترهای صاعقه (پارامترهایی همچون شکل موج، حداکثر دامنه، زمان پیشانی موج و شیب یا تندی پیشانی موج ضربه صاعقه و ...) را می‌توان با استفاده از یک توزیع لگاریتم طبیعی که دارای تابع چگالی احتمالی به فرم زیر است، تقریب زد:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} e^{-0.5z^2} \quad (3)$$

$$z = \frac{\ln(x/m)}{\beta}$$

که در این رابطه، x پارامتر مشخصی از صاعقه، m مقدار میانه و β مقدار انحراف از معیار می‌باشد. با در نظرگیری [۱۴]، ویژگی‌های صاعقه مطابق پارامترهای نشان داده شده در جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور محاسبه فراوانی تجمعی جهت محاسبه تعداد قطعی‌های ناشی از خطای سیستم حفاظت (SFFOR) از صاعقه در سال، از رابطه (۴) استفاده می‌شود. احتمال وقوع صاعقه با جریان بیشتر از جریان I برابر است با:

$$SFFOR = 2N_g L \int_{I_C}^{I_m} D_c f(I) dI \quad (4)$$

مقدار D_c از مقدار صفر تا مقدار حداکثر D_{cc} متغیر است. باتوجه به این که مقدار D_c برای I_m برابر صفر و مقدار آن برای جریان I_C برابر مقدار ثابت D_{cc} است، رابطه فوق به صورت رابطه زیر ساده می‌شود [۱]:

$$SFFOR = 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} \int_{I_C}^{I_m} f(I) dI$$

$$= 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} (F(I_m) - F(I_C)) \quad (5)$$

$$= 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} (Q(I_C) - Q(I_m))$$

که در آن N_g چگالی وقوع صاعقه برحسب تعداد برخورد صاعقه به هر کیلومتر مربع از سطح زمین در سال، $F(I)$ نشان‌دهنده احتمال این که حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد کوچک‌تر از مقدار I بوده و $Q(I)$ احتمال این که حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد برابر یا بزرگ‌تر از مقدار I باشد را نشان می‌دهند. موسسه IEEE رابطه‌ای به فرم زیر برای $Q(I)$ پیشنهاد نموده است:

$$Q(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31.1}\right)^{2.6}} \quad (6)$$

$Q(I)$ و $F(I)$ توسط رابطه $Q(I) = 1 - F(I)$ به هم مرتبط می‌شوند. به طور کلی طراحی محل قرارگیری سیم محافظ به نحوی انجام می‌گیرد که تعداد صاعقه‌های برخوردی هادی فاز حداقل گردد. به همین دلیل محدوده بسیار زیادی از جریان‌های صاعقه به سیم محافظ برخورد کرده و در طول سیم محافظ و برج به گردش درمی‌آیند و سبب القای ولتاژ در زنجیر مفرها می‌شود. اگر این ولتاژ القایی از مقدار استقامت عایقی

۲- به کمک نتایج حاصل از مرحله ۱، محاسبات مربوط به فواصل برخورد که در بخش ۴ مطرح شد با هدف تعیین برخورد صاعقه به زمین، سیم فاز و یا سیم گارد و ذخیره جریان‌های متناظر در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد. در این مرحله با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۴، تنها دامنه جریان موردنیاز است. پس از تعیین فواصل برخورد، پیشانی و پشت موج صاعقه به صورت تصادفی با در نظر گرفتن جدول ۲ تولید می‌گردد.

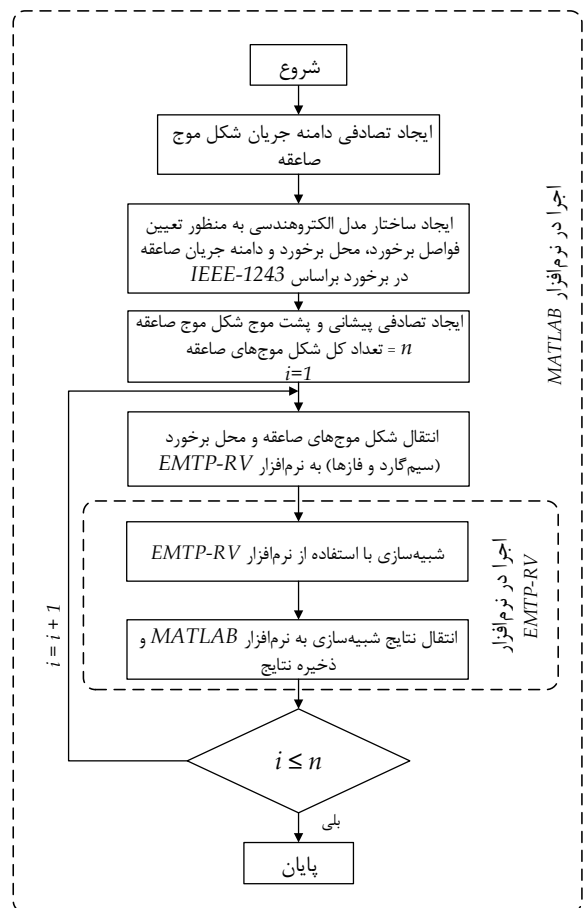
۳- نتایج مرحله ۲ (محل برخورد و مشخصات جریان صاعقه) به کمک برنامه‌نویسی انجام شده به نرم‌افزار EMTP-RV منتقل شده و شبیه‌سازی با هدف مشاهده رخداد و یا عدم رخداد شکست انجام می‌گیرد و نتایج هر بار انجام شبیه‌سازی به نرم‌افزار MATLAB منتقل شده و ذخیره می‌شوند.

۵-۱-۴- مدل‌سازی صاعقه و تجهیزات

شکل موج صاعقه به راحتی در نرم‌افزار EMTP-RV مدل می‌شود. در این مقاله، صاعقه با ICIGRE مدل می‌گردد که یک جریان ضربه با دامنه، پیشانی و پشت موج معین است. همچنین، برای در نظر گرفتن امیدانس مسیر تخلیه یک مقاومت با منبع جریان صاعقه تا زمین موازی شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از مدل وابسته به فرکانس جهت مدل‌سازی خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت به منظور بررسی دقیق پدیده صاعقه استفاده شده است که شامل اطلاعات نوع سیم‌ها (مقاومت و قطر) و آرایش آن‌ها بر روی برج می‌باشد [۱۷]. مدل وابسته به فرکانس، تاثیرات پارامترهای وابسته به فرکانس و اثرات الکترومغناطیسی هادی‌ها بر روی هم را به خوبی مدل‌سازی می‌کند. در مدل‌سازی برج انتقال، از مدل Multistory استفاده شده است که در آن برج‌های سیستم به صورت مجموعه‌ای از امیدانس‌های سری با مدارهای R-L موازی مدل شده‌اند. اساس کار این مدل استفاده از یک خط بی‌اتلاف سری است که باتوجه به آرایش برج به چند قسمت (اسپن) تقسیم می‌شود [۱۸]. تعداد ۷ برج که با اسپن ۴۲۰ متری به هم متصل شده‌اند، قرار داده شده و به هر یک از دو برج انتهایی، یک خط به طول ۹۰ کیلومتر متصل شده است. شماتیک آرایش موردنظر در پیوست ارائه شده است.

مدل تخلیه بازگشتی جهت مدل‌سازی شکست در فاصله هوایی به کار می‌رود. زمانی که اضافه ولتاژ سر ترمینال‌های فاصله هوایی بیش‌تر از حد تحمل عایقی دی‌الکتریک می‌شود هوا یونیزه شده و شروع به هدایت می‌کند. شرایط یونیزاسیون به عوامل زیادی بستگی دارد. مهم‌ترین این شرایط شکل موج و پلاریته لحظه‌ای ولتاژ و شکل فاصله هوایی است. یکی از بهترین روش‌ها برای مدل‌سازی رفتار فاصله هوایی در برابر صاعقه استفاده از روش انتگرالی است که در آن عایق به صورت زیر مدل می‌شود [۱۹]:

$$\int_{t_0}^t [|v_{gap}(t) - v_0]^k > D \quad (9)$$



شکل ۵: فلوچارت مورد استفاده در مقاله

تعداد نمونه‌ها و کاهش واریانس نمونه‌ای می‌باشد. روش‌های متعددی به منظور کاهش واریانس ارائه شده‌اند که با هدف بهبود کارایی شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده می‌باشند؛ اما نمی‌توان واریانس را به صفر رساند و در نتیجه لازم است که تعداد نمونه‌ها در حد کافی بزرگ باشد. در بخش شبیه‌سازی مونت کارلو، فرض بر این است که ۳۰۰۰۰ صاعقه با ویژگی‌های مشخص شده در جدول ۲ تولید گردد که همگی در کانال برخورد قرار دارند. حضور صاعقه در کانال برخورد به معنی برخورد صاعقه به سیم محافظ، سیم فاز و یا زمین می‌باشد.

۵-۱-۳- فلوچارت انجام شبیه‌سازی

فلوچارت شکل ۵ نشان‌دهنده روند اجرای شبیه‌سازی با استفاده از لینک دو نرم‌افزار MATLAB و EMTP-RV می‌باشد. براساس این فلوچارت، مشاهده می‌شود که اجرای شبیه‌سازی شامل چند قسمت مرتبط می‌باشد که در هر قسمت محاسباتی انجام گرفته و سپس به منظور ادامه مراحل شبیه‌سازی و همچنین ذخیره و در انتها تحلیل نتایج، خروجی‌ها به نرم‌افزار دیگر انتقال می‌یابد.

مراحل انجام شبیه‌سازی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

۱- در نرم‌افزار MATLAB، ۳۰۰۰۰ صاعقه با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ تولید می‌گردد.

جدول ۴: پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات قطعی خط ۲۳۰ کیلوولت مورد مطالعه با یک سیم محافظ

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
I_{CBFR}	۴۲/۳۴ (kA)	D_{CC}	۸/۰۵۴۸
I_{CSFFOR}	۸/۰۳ (kA)	I_m	۴۸/۸۱ (kA)
h	۴۹/۸ (m)	سطح کروینیک	۲۶/۵
L	۱۸۲/۷ (km)	چگالی صاعقه زمین	۱/۴
N_L	۴۰/۸۹ (flashes/100 km-year)		

جدول ۳: پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات قطعی خط ۲۳۰ کیلوولت مورد مطالعه با دو سیم محافظ

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
I_{CBFR}	۹۱/۴۱ (kA)	D_{CC}	۱/۷۲۱۱
I_{CSFFOR}	۸/۰۳ (kA)	I_m	۲۵/۱۰ (kA)
h	۴۹/۸ (m)	سطح کروینیک	۲۶/۵
L	۱۸۲/۷ (km)	چگالی صاعقه زمین	۱/۴
N_L	۴۱/۶۷۴ (flashes/100 km-year)		

جرقه زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار انتگرال از D بیشتر شود. t_0 زمانی است که v_{gap} از v_0 بیشتر می‌شود. در صورتی که مقدار v_{gap} از مقدار v_0 قبل از وقوع جرقه کمتر شود، انتگرال‌گیری متوقف می‌گردد. در این مقاله، مقادیر v_0 ، k و D به ترتیب برابر ۱/۳۶، ۱۲۴۲/۵ کیلوولت و ۰/۰۲۶۵۰۶ انتخاب شده‌اند [۲۰].

همچنین نتایج خروجی مشخص می‌سازند که در این حالت ۶۳۹ برخورد از ۶۴۳ برخورد صاعقه به فازهای بالایی یعنی ۹۹/۳۸٪، منجر به بروز قوس شده‌اند. لازم به ذکر است که کمترین دامنه جریانی که به فاز برخورد کرده و سبب بروز قوس بر روی مقره می‌شود برابر با ۸/۰۳ کیلوآمپر با زمان پیشانی موج صاعقه برابر ۱/۳۰ میکروثانیه و زمان پشت موج صاعقه برابر با ۵۶/۰۳ میکروثانیه می‌باشد.

۵-۲- محاسبه نرخ خروج خطوط ۲۳۰ کیلوولت

۵-۲-۱- استفاده از یک سیم محافظ

با در نظر گرفتن آرایش خط مطابق برج (ب) در شکل ۱ که در برق منطقه‌ای غرب مورد استفاده واقع شده‌است، تعداد ۳۰۰۰۰ صاعقه مطابق آنچه که در جدول ۱ و تمام آن‌ها به داخل کانال برخورد وارد می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود. از این میان، تعداد ۶۷۷۴ صاعقه به سیم محافظ (۲۲/۵۸٪) از تعداد کل صاعقه‌های در نظر گرفته شده، در مجموع ۶۴۳ صاعقه به دو فاز بالایی (۲/۱۴٪) از تعداد کل صاعقه‌های در نظر گرفته شده (و مابقی به زمین برخورد می‌کنند. دامنه کم‌ترین و بیش‌ترین جریانی از صاعقه که به سیم‌محافظ برخورد نموده به ترتیب برابر با ۵/۶۶ و ۲۱۵/۵۱ کیلوآمپر بوده و همچنین دامنه کم‌ترین و بیش‌ترین جریان صاعقه که به هادی فاز برخورد می‌کند به ترتیب برابر با ۸/۰۴ و ۴۸/۸۱ کیلوآمپر می‌باشد.

باتوجه به مدل الکتروهندسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبتنی بر مونت کارلو، جدول ۳ حاصل می‌گردد که به کمک آن و مطابق روابط (۵) و (۷) می‌توان احتمال خروج خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت با یک سیم محافظ را محاسبه نمود. در این شرایط و با در نظر گرفتن طول خط، مقدار $SFFOR$ (تعداد کل خروج خط انتقال به علت خطای سیم محافظ) برابر ۱/۳۴ flashes/year و مقدار BFR (تعداد کل خروج خط انتقال به علت ولتاژ برگشتی ناشی از اصابت صاعقه به برج) برابر با ۱۳/۸۰ flashes/year در کل خط می‌باشد.

نرخ خروج خطوط انتقال به علت اصابت مستقیم صاعقه به خط انتقال (خطای سیم محافظ) مطابق محاسبات فوق دارای مقدار بالایی است. این موضوع به علت زاویه بالای حفاظت خط انتقال و نیز چگالی بالای صاعقه در مناطقی که خطوط انتقال از آن‌ها می‌گذرد، می‌باشد. در محاسبات فوق مقدار چگالی صاعقه برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده است که مقدار میانگین چگالی صاعقه در مناطقی است که خطوط انتقال از آنها عبور می‌نماید.

۵-۲-۲- استفاده از دو سیم محافظ

در صورت استفاده از دو سیم محافظ برای محافظت از خط انتقال در برابر اصابت صاعقه، باتوجه به چگالی بالای صاعقه در منطقه مورد مطالعه، لازم است از دو سیم محافظ استفاده شود. استفاده از دو سیم محافظ، مطابق برج (الف) در شکل ۱ باعث کاهش زاویه حفاظتی شده و این موضوع مطابق محاسبات مکانی حداکثر جریانی که به خط انتقال برخورد می‌کند را به شدت کم می‌نماید.

در این قسمت مشابه آنچه که در بخش قبل انجام شد، فلوجارت نشان داده شده در شکل ۵ همراه با فرضیات مطرح شده دنبال می‌شود. همان‌طور که قبلاً در بخش فرضیات مورد استفاده عنوان شد، تعداد ۳۰۰۰۰ صاعقه با مشخصات مطابق جدول ۲ به داخل کانال برخورد وارد

با اجرای کامل روند ارائه شده در بخش ۵-۱ به همراه در نظرگیری شکل ۵، مشخص می‌گردد که تعداد ۸۵۰ صاعقه از ۶۷۷۴ صاعقه برخوردی به سیم محافظ یعنی ۱۲/۵۵٪، سبب بروز تخلیه برگشتی بر روی برج محل برخورد و در نتیجه ایجاد اتصال کوتاه می‌شود. کمترین دامنه جریانی که سبب بروز تخلیه برگشتی بر روی مقره می‌شود یا جریان بحرانی شکست، برابر با ۴۲/۳۴ کیلوآمپر با زمان پیشانی موج صاعقه برابر ۳/۱۰ میکروثانیه و زمان پشت موج صاعقه برابر با ۲۸/۲۸ میکروثانیه می‌باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که برای خط ۲۳۰ کیلوولت مورد مطالعه، عمل کرد سیستم حفاظت در برابر برخورد مستقیم صاعقه یعنی سیم محافظ چندان مناسب نبوده به طوری که با در نظرگیری تمام صاعقه‌های برخوردی به کانال که شامل برخورد موج صاعقه به سیم محافظ، برخورد به هادی فاز و برخورد به زمین می‌باشد، ۴/۹۶٪ از صاعقه‌های برخوردی به برج موجب بروز اتصال کوتاه در خط شده‌اند.

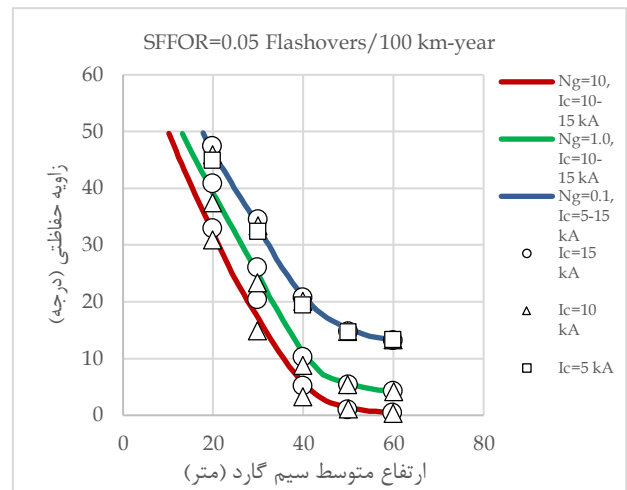
این مقدار درهنگامی که تنها یک سیم محافظ مورد استفاده قرار گیرد ۴/۹۶ درصد می‌باشد. همچنین نتایج خروجی مشخص می‌سازند که در این حالت تنها ۱۰۳ برخورد از ۱۶۳ برخورد صاعقه به فازهای بالایی یعنی ۶۳/۱۹ درصد، منجر به بروز قوس شده‌اند. دلیل این امر کم‌تر بودن دامنه صاعقه‌های برخوردی به هادی فاز در مقایسه با برج ۲۳۰ کیلوولت با یک سیم محافظ می‌باشد. این در حالی است که تعداد برخوردهایی که در برج ۲۳۰ کیلوولت (با یک سیم محافظ) منجر به بروز قوس شده‌اند بیش از ۹۹٪ می‌باشد. لازم به ذکر است که کمترین دامنه جریانی که به فاز برخورد کرده و سبب بروز قوس بر روی مقره می‌شود برابر با ۸/۰۳ کیلوآمپر با زمان پیشانی موج صاعقه برابر ۲/۹۷ میکروثانیه و زمان پشت موج صاعقه برابر با ۶۶/۷۸ میکروثانیه می‌باشد.

همانند قسمت قبل، باتوجه به مدل الکتروهندسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبتنی بر مونت کارلو، جدول ۴ حاصل می‌گردد که به کمک آن و مطابق روابط (۵) و (۷) می‌توان احتمال خروج خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت با دو سیم محافظ را محاسبه نمود. در این شرایط و با در نظر گرفتن طول خط، مقدار SFFOR برابر ۰/۱۹۹۳۱ flashes/year بوده و مقدار BFR برابر با ۲/۵۹۰۴ flashes/year می‌باشد.

مقایسه نتایج در دو حالت، به‌خوبی اثر استفاده از دو سیم محافظ را به منظور حفاظت خط ۲۳۰ کیلوولت در منطقه‌ای با چگالی صاعقه بالا را مشخص می‌سازد. واضح است که اصلاح برج‌های خطوط انتقال نصب شده و اضافه‌نمودن یک سیم محافظ به برج مستلزم هزینه و صرف زمان بسیار زیاد بوده و هیچ‌گونه توجیه اقتصادی ندارد. نتایج این مطالعه برای طراحی و نصب خطوط انتقال جدید در منطقه مورد مطالعه بسیار مفید است.

۶- مقایسه نتایج با استاندارد IEEE-1243

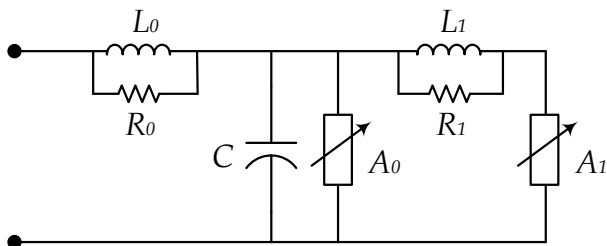
در استاندارد IEEE-1243 با فرض در نظر گرفتن مقدار SFFOR=0.05/100 km-year در سه ناحیه با مقادیر چگالی صاعقه زمین ۰/۱، ۱/۰ و ۱۰، می‌توان براساس ارتفاع سیم‌محافظ و جریان بحرانی تخلیه برگشتی، زاویه حفاظتی لازم برج را مطابق شکل ۶ تعیین نمود. در خط ۲۳۰ کیلوولت نیز که ارتفاع سیم‌محافظ ۴۸/۸ متر، زاویه حفاظتی ۳۴/۶۹ درجه و جریان بحرانی ۸/۰۳ کیلوآمپر است، براساس استاندارد IEEE-1243 در صورتی که چگالی صاعقه زمین در حدود ۰/۱ باشد، می‌توان به مقدار SFFOR=0.05/100 km-year رسید. اما در منطقه مورد مطالعه چگالی صاعقه زمین ۱/۴ است و مقدار SFFOR محاسبه شده ۰/۷۳۱۷ در هر ۱۰۰ کیلومتر در سال است که به دلیل زاویه حفاظتی نامناسب و استفاده از یک سیم محافظ میزان قابل قبولی برای مقدار SFFOR نمی‌باشد. اما در خط ۲۳۰ کیلوولت با دو سیم محافظ نیز که ارتفاع سیم‌محافظ ۴۸/۸ متر، زاویه حفاظتی ۱۴/۹۸ درجه و جریان بحرانی ۸/۰۳ کیلوآمپر است، براساس استاندارد IEEE-1243 در صورتی که چگالی صاعقه زمین در حدود ۰/۱ باشد می‌توان به مقدار SFFOR=0.05/100 km-year رسید. ولی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶: زاویه حفاظتی بر حسب ارتفاع سیم محافظ به منظور دستیابی به مقدار SFFOR ثابت [۲]

می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود. از این میان، تعداد ۷۸۱۸ صاعقه به سیم محافظ (۲۶/۰۶٪ از تعداد کل صاعقه‌های در نظر گرفته شده)، در مجموع ۱۶۳ صاعقه به دو فاز بالایی (۰/۵۴٪ از تعداد کل صاعقه‌های در نظر گرفته شده) و مابقی به زمین برخورد می‌کنند. دامنه کم‌ترین و بیش‌ترین جریانی از صاعقه که به سیم محافظ برخورد نموده به ترتیب برابر با ۵/۶۴ و ۲۱۵/۵۱ کیلوآمپر بوده و همچنین دامنه کم‌ترین و بیش‌ترین جریان صاعقه که به هادی فاز برخورد می‌کند به ترتیب برابر با ۶/۶۴ و ۲۵/۱۰ کیلوآمپر می‌باشد. مقایسه استفاده از یک سیم محافظ و دو سیم محافظ به منظور حفاظت خط به‌خوبی مشخص می‌سازد که در صورت استفاده از دو سیم محافظ در برج ۲۳۰ کیلوولت، میزان برخورد موج جریان صاعقه به هادی محافظ حدود ۱۵٪ افزایش و به صورت همزمان میزان برخورد موج جریان صاعقه به هادی فاز حدود ۷۵٪ کاهش می‌یابد.

همانند قسمت قبل، با اجرای کامل روند ارائه شده در بخش ۵-۱ مطابق شکل ۵، مشخص می‌گردد که تعداد ۷۶ صاعقه از ۷۸۱۸ صاعقه برخوردی به سیم محافظ یعنی ۰/۹۷٪، سبب بروز تخلیه برگشتی بر روی برج محل برخورد و در نتیجه ایجاد اتصال کوتاه می‌شود که مقایسه این تعداد با آنچه که برای برج ۲۳۰ کیلوولت با یک سیم محافظ محاسبه گردید کاهش چشمگیر حدود ۹۱٪ را نشان می‌دهد. در این حالت، کمترین دامنه جریانی که سبب بروز تخلیه برگشتی بر روی مقره می‌شود یا جریان بحرانی شکست، برابر با ۹۱/۴۱ کیلوآمپر با زمان پیشانی موج صاعقه برابر ۱/۱۷ میکروثانیه و زمان پشت موج صاعقه برابر با ۸۱/۵۶ میکروثانیه می‌باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که برای خط ۲۳۰ کیلوولت مورد مطالعه و در صورتی که از دو سیم محافظ استفاده شود، عمل کرد سیستم حفاظت در برابر برخورد مستقیم صاعقه یعنی سیم محافظ مناسب بوده به طوری با در نظر گرفتن تمام صاعقه‌های برخوردی به کانال که شامل برخورد موج صاعقه به سیم محافظ، برخورد به هادی فاز و برخورد به زمین می‌باشد، تنها ۰/۶٪ درصد از صاعقه‌های برخوردی به برج موجب بروز اتصال کوتاه در خط شده‌اند و این در حالی است که



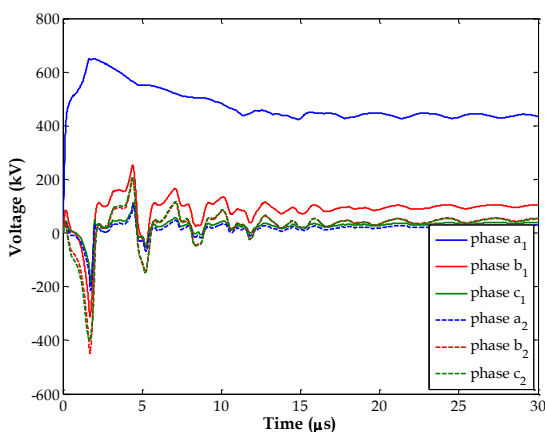
شکل ۷: مدل مورد استفاده برای برق گیر

جدول ۵: مشخصات برق گیرهای مورد استفاده در [۲۲]

ولتاژ نامی	کیلوولت
ولتاژ کاری پیوسته	۱۵۴ کیلوولت
ولتاژ باقیمانده در اعمال جریان ۱۰ کیلوآمپر	۴۳۲ کیلوولت
۸/۲۰ میکروثانیه	
کلاس انرژی خط	۴
قابلیت تحمل انرژی خط	۱۰ کیلوژول بر کیلوولت ولتاژ نامی

جدول ۶: مشخصه غیر خطی برق گیرهای مورد استفاده [۲۳]

جریان (آمپر)	A_0	A_1
۱۰	۰/۸۷۵	-
۱۰۰	۰/۹۶۳	۰/۷۶۹
۱۰۰۰	۱/۰۵	۰/۸۵۰
۲۰۰۰	۱/۰۸۸	۰/۸۹۴
۴۰۰۰	۱/۱۲۵	۰/۹۲۵
۶۰۰۰	۱/۱۳۸	۰/۹۳۸
۸۰۰۰	۱/۱۶۹	۰/۹۵۶
۱۰۰۰۰	۱/۱۸۸	۰/۹۶۹
۱۲۰۰۰	۱/۲۰۶	۰/۹۷۵
۱۴۰۰۰	۱/۲۳۱	۰/۹۸۸
۱۶۰۰۰	۱/۲۵۰	۰/۹۹۴
۱۸۰۰۰	۱/۲۸۱	۱/۰۰۰
۲۰۰۰۰	۱/۳۱۳	۱/۰۰۶



شکل ۸: ولتاژ فازهای مختلف برج دارای برق گیر در هنگام برخورد صاعقه با دامنه جریان ۴۸ کیلوآمپر به فاز a_1

چگالی صاعقه زمین برابر با ۱/۴ است و مقدار SFFOR محاسبه شده ۰/۰۶۳۶ در هر ۱۰۰ کیلومتر در سال است که اختلاف چندانی با مقدار پیشنهادی IEEE-1243 ندارد. بنابراین می توان دریافت که در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت با استفاده از دو سیم محافظ و زاویه حفاظتی مناسب حتی اگر مقدار چگالی صاعقه زمین منطقه مورد مطالعه بسیار بیشتر از ۰/۱ باشد، امکان رسیدن به مقدار قابل قبولی برای SFFOR وجود دارد.

۷- راهکار پیشنهادی به منظور کاهش تعداد قطعی ها

در اولین مرحله از طرح خطوط، لازم است که تمامی ملاحظات لازم مکانیکی و الکتریکی در نظر گرفته شود. در این مرحله، با در نظر گرفتن استاندارد مورد استفاده، می توان تعداد سیم های محافظ و آرایش آنها را به منظور رسیدن به شرایط مطلوب تعیین نمود. با این وجود، برای اصلاح نرخ خروج خطوط انتقال به علت اصابت صاعقه به خط انتقال راه کارهای مختلفی ارائه شده است که به صورت خلاصه می توان به نصب برق گیر و اصلاح مقاومت پای برج اشاره نمود. در حالی که اصلاح مقاومت پای برج تأثیر بسیار زیادی بر کاهش نرخ خروج خط انتقال در نتیجه ولتاژ برگشتی دارد، این موضوع تأثیر چندانی بر کاهش نرخ خروج در هنگام اصابت مستقیم صاعقه ندارد. اما قرار دادن برق گیر در خط انتقال بین فاز و برج می تواند در اصلاح خروج خط به واسطه ولتاژ برگشتی و یا خطای شیلد مؤثر باشد. البته راه کارهای دیگر شامل نصب یک سیم محافظ دیگر ارائه شده است که هزینه اجرای آن بسیار زیاد است.

از جمله روش های متداول و مؤثر برای حفاظت خطوط در برابر صاعقه می توان به استفاده از برق گیرهای موازی با مقره ها اشاره نمود. برق گیر یک تجهیز غیر خطی است که به منظور حفاظت شبکه در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا استفاده می گردد. مقاومت غیر خطی برق گیر در هنگام ولتاژهای گذرای بالا به شدت کاهش یافته و سطح اضافه ولتاژها را در مقدار پایینی محدود می کند و در نتیجه به تجهیزات شبکه آسیب وارد نمی شود و یا احتمال آن تا حد قابل قبولی کاسته می شود. واضح است در صورتی که بروی خط انتقال برق گیر نصب نشود، اصابت صاعقه مستقیم به خط انتقال به احتمال زیاد، موجب خروج آن از شبکه می شود. از طرف دیگر در صورت اصابت مستقیم صاعقه، هر برق گیری توانایی جذب مقدار مشخصی انرژی را دارد و در صورت بالا بودن جریان صاعقه احتمال ناپایداری در برق گیر وجود دارد. در [۲۱] نحوه انتخاب تعداد برق گیر برای حفاظت بهینه در سیستم توزیع ارائه شده است. با توجه به تفاوت های بسیار خطوط توزیع و خطوط انتقال فشار قوی، در این بخش استفاده از برق گیر برای اصلاح نرخ خروج خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت به علت اصابت مستقیم صاعقه بررسی می شود. در این حالت مطابق محاسبات انجام شده از روش الکتروهندسی، فرض بر این است در خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت دومداره حداکثر جریانی که به خط انتقال برخورد می نماید برابر ۴۸ کیلو آمپر باشد.

باتوجه به شرایط قرار گرفتن سه فاز خط انتقال دومداره، در صورت برخورد صاعقه (با فرض اصابت صاعقه از بالا)، این صاعقه به یکی از دو

منظور شبیه‌سازی برق‌گیر، از مدل استاندارد IEEE مطابق شکل ۷ استفاده شده‌است. رفتار برق‌گیر با دو مقاومت غیرخطی A_0 و A_1 که با فیلتر RL از هم جدا شده‌اند، شبیه‌سازی می‌شود. برای موج ضربه با پیشانی طولانی، امپدانس فیلتر بسیار کوچک بوده لذا دو مقاومت در عمل موازی می‌شوند. اما برای بررسی موج ضربه سوزنی‌تر و دارای زمان پیشانی کوتاه، امپدانس فیلتر افزایش یافته و توزیع جریان‌ها بین دو مقاومت را کنترل می‌کند. جریان با فرکانس بالا موجب می‌شود تا امپدانس فیلتر زیاد شده و در نتیجه سهم جریان A_0 افزایش می‌یابد و در این شرایط ولتاژ بیشتری دو سر A_0 نسبت به A_1 می‌افتد. بنابراین هر چه قدر فرکانس بیشتر باشد ولتاژ پیک افزایش یافته و در نتیجه ولتاژ باقیمانده نیز بالا می‌رود.

مشخصات نوعی برق‌گیرهای فاز به زمین بدون فاصله هوایی خط انتقال، تولیدی شرکت زیمنس [۲۲] با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. همچنین مقادیر پارامترهای غیرخطی مورد استفاده در مدل برق‌گیر در جدول ۶ نشان داده شده است.

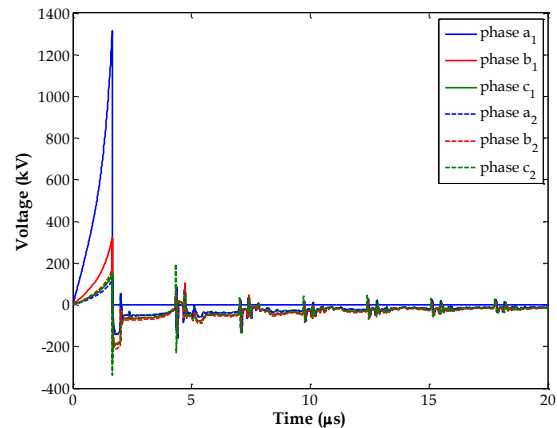
۲-۷- برخورد صاعقه به برج دارای برق‌گیر

در این مرحله از شبیه‌سازی، فقط در دو فاز بالایی یک برج از خط انتقال برق‌گیرهای اکسید روی با مشخصات ارائه شده نصب می‌شوند. موج صاعقه جریان استاندارد $1/2/\mu s 50$ با قله $48/8kA$ (حداکثر جریان صاعقه‌ای که هنگام برخورد به هادی فاز در صورت استفاده از یک سیم محافظ باعث خروج خط انتقال می‌شود) به هادی فاز بالا اعمال شده است. شکل موج ولتاژ فازهای مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از برق‌گیر عملکرد خط را هنگام برخورد صاعقه به هادی فاز به‌علت خطای شیلد به مقدار قابل توجهی بهبود می‌بخشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، می‌توان دید که برخورد صاعقه با بیش‌ترین دامنه به هادی فاز به‌علت خطای شیلد، در صورت استفاده از برق‌گیر موجب خروج خط نخواهد شد.

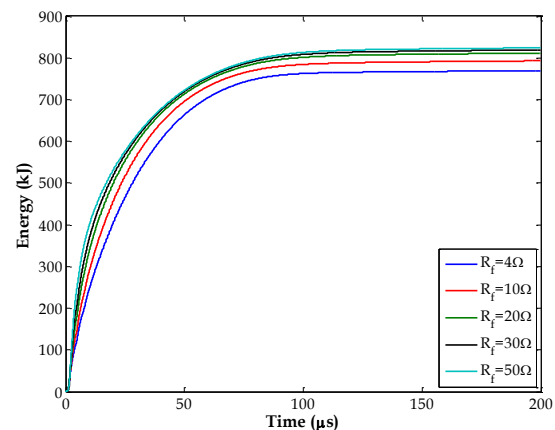
همچنین، براساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، برخورد صاعقه به دامنه جریان ۸ کیلوآمپر در صورت عدم استفاده از برق‌گیر، خروج خط رخ می‌دهد در حالی که با وجود برق‌گیر و برخورد صاعقه با دامنه جریان $48/8$ کیلوآمپر، خروج خط رخ نمی‌دهد.

۲-۷- برخورد صاعقه به برج بدون برق‌گیر

به‌منظور جایابی مکان مناسب نصب برق‌گیرها، در این حالت لازم است که رفتار برج‌های کناری در صورت اصابت صاعقه به آنها زمانی که برج مورد بررسی دارای برق‌گیر نبوده ولی تنها یکی از برج‌های کناری آن دارای برق‌گیر در دو فاز بالا است، بررسی شوند. به‌همین منظور، شبیه‌سازی‌های بخش قبل با در نظر گرفتن برخورد صاعقه به هادی فاز برج بدون برق‌گیر دوباره تکرار می‌شوند. در این شرایط با توجه به این‌که بیش‌ترین اضافه ولتاژ در محل برخورد صاعقه رخ می‌دهد انتظار می‌رود که نصب برق‌گیر تأثیری بر کاهش اضافه ولتاژ ایجاد شده نداشته باشد.



شکل ۹: ولتاژ فازهای مختلف برج بدون برق‌گیر در هنگام برخورد صاعقه با دامنه جریان ۸ کیلوآمپر به فاز a_1



شکل ۱۰: انرژی تخلیه‌شده در برق‌گیر فاز a_1 در هنگام اصابت صاعقه به این فاز برای مقادیر مختلف مقاومت پای برج

فاز بالا برخورد می‌نماید. لذا قرارداد برق‌گیر در دو فاز بالا در این قسمت بررسی می‌شود. شرط حفاظت خط انتقال و کاهش خروج آن به واسطه برخورد صاعقه به خط انتقال، توانایی تحمل انرژی صاعقه توسط برق‌گیر و عدم انفجار آن است. در صورت انهدام برق‌گیر، خروج خط انتقال از مدار قطعی است. در نتیجه باید بررسی شود که برق‌گیر با شرایط و آرایش مورد نظر خط، در ولتاژهای ناشی از چه جریان‌هایی از صاعقه پایدار می‌ماند و به افزایش پایداری خط می‌انجامد و همچنین در چه مقدار جریانی دچار ناپایداری حرارتی می‌شود تا به کمک نصب آن نرخ خروج خط را از مدار کاهش داد.

۱-۷- شبیه‌سازی عملکرد خط با وجود برق‌گیر

باتوجه به مناسب بودن مقدار مقاومت پای برج و عدم تأثیر آن در بهبود نرخ خطای سیم محافظ و عدم امکان اضافه‌نمودن سیم‌محافظ، به منظور اصلاح و بهبود کارایی خط انتقال در مقابل صاعقه، تنها راه‌کار استفاده از برق‌گیر و نصب آن‌ها در فازهای بالایی برج‌های خطوط انتقال می‌باشد. در نتیجه در این بخش، کارایی برق‌گیر در محدود نمودن اضافه ولتاژهای صاعقه و همچنین تعداد برق‌گیرهای لازم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به

۱۹۲۰ کیلوولت می‌باشد که بسیار بیشتر از حداکثر انرژی تلف‌شده در برق‌گیر در شکل ۱۰ می‌باشد.

۷-۳-۷- ارزیابی اقتصادی اصلاح ساختار برج و نصب برق‌گیر

در قسمت‌های قبل، تغییر ساختار برج و اضافه‌نمودن سیم‌گارد و همچنین نصب برق‌گیر بر روی دو فاز بالا، به‌عنوان راه‌کار جهت کاهش خروج خطوط ناشی از برخورد صاعقه مطرح شدند. به‌منظور مقایسه این دو مورد در جدول ۷ هزینه‌های انجام هر دو مورد فوق ارائه شده‌است. مطابق جدول مشاهده می‌شود که از نظر قیمتی خرید و نصب سیم‌های محافظ جدید و اصلاح برج‌های ۲۳۰ کیلوولت بر خرید و نصب برق‌گیر ۲۳۰ کیلوولت بر دو فاز بالای خط انتقال ارجحیت دارد. در عمل، خرید برق‌گیر و نصب آن بر دو فاز تمامی برج‌ها مستلزم هزینه بسیار است. این در حالی است که اصلاح ساختار برج تأثیر طولانی مدت‌تری دارد و مانند نصب برق‌گیرها به عملیات تعمیر و نگهداری نیاز ندارد. البته نصب برق‌گیر بر نرخ خروج خط بر اثر ولتاژهای برگشتی ناشی از اصابت صاعقه به برج و سیم‌محافظ نیز مؤثر است. نکته دیگری که باید در نظر گرفته شود تخریب برق‌گیرها به واسطه اعمال صاعقه به آنها و یا مشکلات ساخت و پیری برق‌گیر است که ممکن است باعث خروج خط انتقال در طولانی مدت شود. در مجموع می‌توان گفت که اصلاح ساختار برج کاری علمی‌تر، فنی‌تر و با قابلیت اطمینان بالاتر و البته کم‌هزینه‌تر نسبت به نصب برق‌گیر است. هر چند این عملیات برای خطوط انتقالی که در حال بهره‌برداری می‌باشند غیر ممکن می‌نماید ولی برای طراحی خطوط جدید در نواحی با چگالی صاعقه بالا لازم است این موضوع در نظر گرفته شود.

بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت‌های مختلف، هزینه‌های برج عموماً مربوط به هزینه آهن مورد استفاده در ساختار برج است. در این رابطه وزن برج با دو طراحی مختلف اشاره شده فوق، بسیار به هم نزدیک است و مستلزم هزینه زیادی نمی‌شود. همچنین هزینه نصب خود سیم‌محافظ و قیمت آن در مقابل افزایش قابل توجه قابلیت اطمینان خط ۲۳۰ کیلوولت هم بسیار کم است. اما نکته قابل توجه که باعث محدودیت جدی در طراحی برج با دو سیم‌محافظ می‌شود، هزینه‌های تحمیلی مربوط به معارضاتی است که خط انتقال از زمین‌های کشاورزی آنها عبور می‌کند. در این مورد در مسیرهای عبوری خط لازم است مطالعاتی در زمینه برآورد آنها صورت گیرد که خارج از مبحث این مقاله است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با جمع‌آوری و مطالعه اطلاعات هواشناسی غرب کشور و محاسبه سطوح ایزوکرونیک می‌توان استنتاج نمود که سطح ایزوکرونیک در بعضی از نقاط غرب کشور دارای مقادیر بالایی است. اما طراحی خطوط ۲۳۰ کیلوولت دو مداره غرب کشور عمدتاً با آرایش با یک سیم‌محافظ انجام شده‌است. محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد در حالت استفاده از این خط انتقال با یک سیم‌محافظ مقدار جریان بحرانی که در مقادیر بالاتر از آن صاعقه به سیم‌محافظ برخورد می‌کند در حدود ۴۸

جدول ۷: مقایسه هزینه روش‌های مختلف کاهش نرخ خروج خطوط ۲۳۰ کیلوولت ناشی از برخورد صاعقه [۱۲]

عنوان	هزینه (تومان)
هزینه نصب برق‌گیر ۲ عدد در هر ۴۰۰ متر	۲۴/۰۰۰/۰۰۰
هزینه خرید و نصب سیم‌محافظ در هر ۴۰۰ متر	۱/۸۰۰/۰۰۰

شکل ۹ ولتاژ فازهای مختلف برج بدون برق‌گیر مورد مطالعه را بعد از برخورد صاعقه ۸ کیلوآمپر به هادی فاز را نشان می‌دهد. چنان‌چه مشخص است اصابت صاعقه با دامنه ۸ کیلوآمپر به این برج باعث بروز شکست عایقی در زنجیره مقرر شده و خط خارج می‌شود. بنابراین در شرایط بروز خطای شیلد، نصب برق‌گیر در برج کناری عملاً هیچ تأثیری در بهبود وضعیت برج بدون برق‌گیر حتی در جریان‌های پایین صاعقه نخواهد داشت. بنابراین در صورت نیاز به اصلاح وضعیت خط به دلیل بالا بودن نرخ خروج خط ناشی از بروز خطای شیلد، لازم است که در تمامی برج‌ها برق‌گیر نصب شود.

۷-۳-۷- تأثیر مقاومت پای برج بر قابلیت تحمل انرژی برق‌گیر

باتوجه به محدودیت‌های مربوط به اندازه‌گیری مقاومت‌های پای برج‌های خط مورد مطالعه، مقاومت پای برج تعداد محدودی برج مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به عبور خط انتقال از مناطق مختلف و امکان تغییر مقدار مقاومت پای برج، لازم است اثر تغییر مقاومت پای برج بر عمل کرد برق‌گیر هنگام خطای شیلد و برخورد صاعقه به خط انتقال مورد ارزیابی قرار گیرد. شبیه‌سازی‌های بخش قبل با مقادیر متفاوت مقاومت پای برج در محدوده ۵۰-۴ اهم، نتایج مشابهی به دنبال دارد؛ بدین معنی که اصابت صاعقه در جریان ۴۸ kA به برجی که دارای برق‌گیر است با هر مقدار مقاومت پای برجی، باعث خروج نمی‌شود و اصابت صاعقه با این دامنه به برجی که دارای برق‌گیر نیست، حتی اگر برج‌های کناری مجهز به برق‌گیر باشند، باعث خروج خط خواهد شد.

همان‌گونه که مشخص است برق‌گیرهای نصب‌شده روی فازهایی که احتمال برخورد مستقیم صاعقه به آنها وجود دارد، توانایی محدود نمودن اضافه ولتاژها را در محدوده‌ای که از شکست مقررها جلوگیری نمایند را دارند. علاوه بر محدود نمودن اضافه ولتاژها برق‌گیرها لازم است که در هنگام تخلیه جریان صاعقه از نظر حرارتی نیز پایدار باشند، در غیر این صورت انفجار آنها باعث خروج خط خواهد شد. به‌منظور بررسی قابلیت تحمل انرژی برق‌گیرها در این شرایط مقدار انرژی تلف شده در برق‌گیر در هر شبیه‌سازی محاسبه شده‌است. شکل ۱۰ مقدار انرژی تلف‌شده در برق‌گیر در مقادیر مقاومت پای برج در هنگام اصابت صاعقه با دامنه ۴۸ کیلوآمپر می‌باشد. با توجه به شکل، مشخص است که مقدار انرژی تلف شده در برق‌گیر در بدترین شرایط و بالاترین مقدار مقاومت پای برج بسیار کمتر از قابلیت جذب انرژی نامی برق‌گیر است و برق‌گیر در این حالت پایدار است. مقدار انرژی قابل تحمل برق‌گیرهای انتخاب‌شده باتوجه به کلاس تخلیه خط آنها، مطابق جدول ۵، برابر

- [9] R. Shariatinasab, B. Vahidi, and S. H. Hosseinian, "Statistical evaluation of lightning-related failures for the optimal location of surge arresters on the power networks," IET Gener., Transmiss. Distrib., vol. 3, no. 2, pp. 129-144, Feb. 2009.
- [10] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, and A. Ametani, "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.
- [۱۱] مصطفی یحیی آبادی، علیرضا صدوقی، «تعیین نواحی با بیشترین احتمال برخورد صاعقه در ساختارهای پیچیده به منظور بهینه‌سازی سیستم حفاظت» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۲۶ شماره ۲، صفحات ۳۷۷-۳۶۹، تابستان ۱۳۹۵.
- [۱۲] محمد مرادی، بررسی و شبیه‌سازی قطعی‌های خطوط انتقال و فوق توزیع ناشی از پدیده صاعقه و ارائه راهکارهای اصلاحی پیشگیرانه، قرارداد شماره ۲۵۹۴۰۳۹، برق منطقه‌ای غرب، محل اجرا: دانشگاه رازی، اسفند ۱۳۹۶.
- [13] Earth Resistance and Resistivity Meter, MRU-200-GPS, Catalog, <https://www.sonel.pl/en/product/earth-resistance-resistivity-meter-sonel-mru-200-gps/> 2018-12-15
- [14] P. Chowdhuri, J. Anderson, W. Chisholm, T. Field, M. Ishii, J. Martinez, et al., "Parameters of lightning strokes: a review," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, pp. 346-358, 2005.
- [15] R. Shariatinasab, J. Gholinezhad and K. Sheshyekani., "Estimation of Energy Stress of Surge Arresters Considering the High-Frequency Behavior of Grounding Systems," IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, DOI: 10.1109/TEMC.2017.2756700, 2017.
- [16] W. R. Gilks, S. Richardson, and D. Spiegelhalter, Markov chain Monte Carlo in practice, CRC Press, 1995.
- [17] J. A. Martinez, "Parameter determination for power systems transients", Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, pp. 1-6, 2007.
- [18] T. Hara and O. Yamamoto, "Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, pp. 283-289, 1996.
- [19] Z. Zhang, W. Sima, X. Jiang, C. Sun, L. Shu, "Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV&EHV transmission lines," Proceedings of the Csee, vol. 10, p. 000, 2005.
- [20] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmission lines," Electric Power Systems Research, vol. 113, pp. 141-150, 2014.
- [۲۱] خلیل گرگانی فیروزجاه، «امکان سنجی حذف برق‌گیر از نقاط غیرضروری شبکه توزیع از طریق مطالعه حداکثر شعاع حفاظتی» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸ شماره ۱، صفحات ۲۷۱-۲۶۱، تابستان ۱۳۹۵.
- [22] Siemens, Siemens HV surge arrester Cataloge, <https://www.siemens.com/energy/arrester>, page 72, Model 3EP6./ 2018-12-15
- [23] K. Munukutla, V. Vittal, G. T. Heydt, D. Chipman, and B. Keel, "A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line lightning protection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 1742-1748, 2010.
- کیلوآمپر است درحالی‌که در طرح با دو سیم محافظ، مقدار این جریان بحرانی در حدود ۲۵ کیلوآمپر است. باتوجه‌به بالابودن چگالی صاعقه در محدوده‌های مورد مطالعه، استفاده از چنین آرایش برجی موجب فراترفتن نرخ خروج خط به‌علت اصابت مستقیم صاعقه به هادی فاز می‌شود. در این شرایط تنها راه‌کار اصلاح شرایط استفاده از برق‌گیر در فازهای بالایی که بیشترین احتمال برخورد صاعقه را دارند، می‌باشد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در این حالت برای جلوگیری از خروج خط، نصب برق‌گیر در دو فاز بالایی تمامی برج‌ها الزامی است. همچنین شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، برق‌گیرهایی که به صورت معمول و با کلاس تخلیه خط ۴ ساخته می‌شوند، حتی در هنگامی که مقاومت پای برج دارای مقدار بالایی است توانایی تحمل انرژی صاعقه را دارند و در این حالت پایدار می‌مانند. البته قراردادن برق‌گیر بر دو فاز بالایی خط انتقال در تمامی برج‌ها به معنای حجم سرمایه‌گذاری بالاست. در صورت احداث خطوط جدید در این نواحی لازم است بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش در نظر گرفته شود و خطوط جدید با آرایش با دو سیم محافظ و زاویه حفاظت پایین‌تر نصب شوند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری صمیمانه پرسنل محترم شرکت برق منطقه‌ای غرب در اندازه‌گیری مقاومت پای برج و ارائه سایر اطلاعات مورد نیاز صمیمانه تشکر می‌نمایم.

مراجع

- [1] A. R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems", New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1999.
- [2] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines," IEEE Std 1243-1997, pp. 1-44, 1997.
- [3] T. Ito, T. Ueda, H. Watanabe, T. Funabashi, and A. Ametani, "Lightning flashovers on 77-kV systems: observed voltage bias effects and analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, pp. 545-550, 2003.
- [4] T. A. Short, Electric power distribution handbook: CRC press, 2014.
- [5] V. Cooray, Lightning protection: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [6] F. Young, J. Clayton, and A. Hileman, "Shielding of transmission lines," IEEE Trans. on PAS, vol. 83, p. 132, 1963.
- [۷] وزارت نیرو- توانیر، مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال نیرو، نشریه شماره ۲-۴۴۰، بهمن ۸۷.
- [8] IEC 60099-4, "Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c systems". part 4, second edition, 2004-5.

زیر نویس‌ها

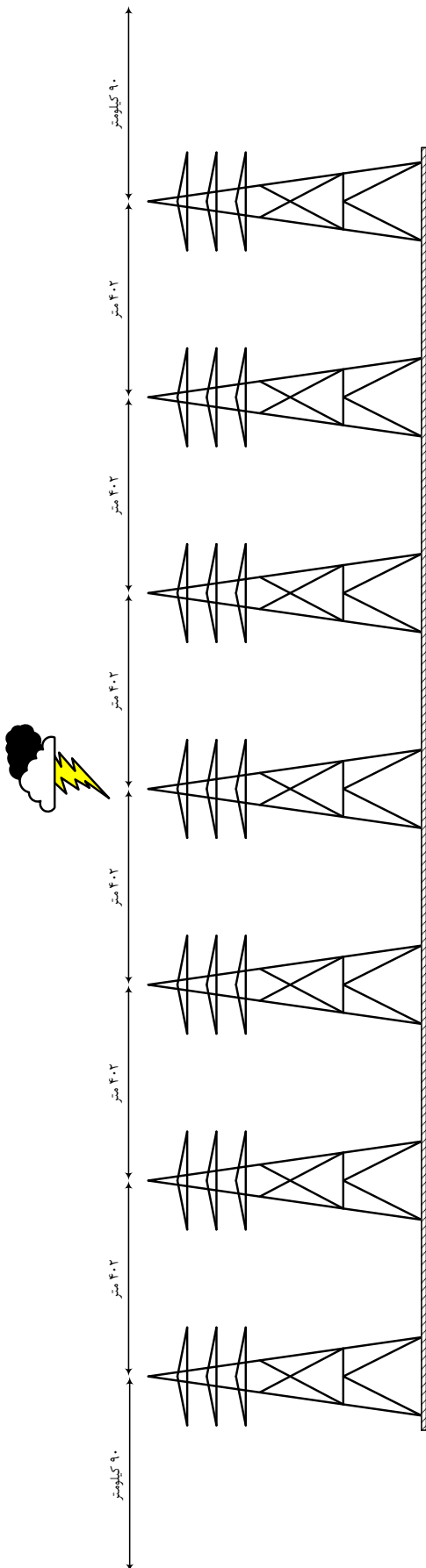
¹Shielding Failure Flash Over Rate

²Back Flashover Rate

پیوست

شماتیک شبکه تحلیل شده در نرم افزار EMTP-RV در شکل پ

۱ نمایش داده شده است.



شکل پ ۱: شبکه شبیه سازی شده در نرم افزار EMTP-RV