ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شماره مجوز مجله:۸۰۴۰۰ زمان چاپ:۱۴۰۱/۰۵/۱۰

اثر برخورد صاعقه بر خطوط انتقال برق

دکتر امین اقتداری

دکترای برق صنعتی دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات

چکیده

برخورد صاعقه در خطوط انتقال، منجر به تزریق یک جریان در محل اتصال مـی شـود. درک عملکـرد صـاعقه بـدون استفاده از یک برنامه شبیه ساز می تواند دشوار باشد. لذا یکی از پدیده های رایج طبیعت(به خصوص در برخی مناطق و نواحی)رعد و برق است. رعد و برق عبارت است از ظهور قوس الکتریکی در فاصله ابر ها که همراه با صدای مخوف و وحشتناک است.این پدیده با بارش باران شدید یا تگرگ همراه است. اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از برخورد صاعقه به خطوط انتقال و همچنین عملیات کلید زنی در تعیین سطوح عـایقی تجهیـزات و دسـتگاه هـای محافظـت در مقابـل صاعقه اهمیت زیادی دارند. هنگامی که خط با ثابت های توزیع شده در معرض یک اغتشاش مانند برخورد صـاعقه یـا عمل کلید زنی قرار می گیرد. امواج ولتاژ و جریان بوجود می آیند و این امواج در طول خـط بـا سـرعتی نزدیـک بـه سرعت سیر نور به حرکت در می آیند به محض رسیدن این امواج به ترمینال های خط امواج ولتاژ و جریـان انعکاسـی بوجود می آیند و در طول خط بر می گردند و با امواج اولیه ترکیب می شوند،به خاطر وجود تلفات، امواج سیار بعـد از چند انعکاس تضعیف شده و از بین می روند همچنین اندوکتانس های سری سیم پـیچ هـای ترانسـفورماتور بـه طـور موثری اغتشاشات را بلو که می نمایند و بدین صورت از ورود آنها به سیم پیچی های ژنراتور جلوگیری مـی کننـد. بـه هر حال انعکاس چند باره موج می تواند باعث تقویت اضافه ولتاژ شده و ولتاژ تا سطحی افزایش یابد کـه سـبب ایجـاد جرقه روی عایق ترانسفورماتور یا خط و نهایتا آسیب دیدگی آن شود.

واژگان کلیدی: صاعقه، خطوط، برق، انتقال

۱-مقدمه

به دلیل افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی و گستردگی جغرافیایی مصرف کنندگان از یک سو و محدودیت در تعداد و محل احداث منابع تولید انرژی الکتریکی(نیروگاه ها) از سوی دیگر، شرکت های برق ناگزیر به احداث خطوط انتقال با طول زیاد برای انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید به محل مصرف هستند. علاوه بر هادی های خطوط انتقال که وظیفه اصلی را در برقراری جریان در مسیر مطلوب دارند، نقش و اهمیت زنجیره مقره ها به عنوان عامل جلوگیری کننده از نشت جریان در مسیرهای ناخواسته از اهمیت بالایی برخوردار است. عملکرد مطلوب زنجیره مقره های خطوط انتقال منجر به افزایش قابلیت اطمینان، ایمنی سیستم و انتقال پیوسته انرژی الکتریکی می شود. خطوط انتقال در مسیر خود از مناطق با شرایط جغرافیایی مختلف عبور می کنند که این مناطق از لحاظ میزان بارندگی، وزش باد و طوفان و آلودگی های صنعتی با هم متفاوت هستند(مرادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۲). از انجا که آلودگی های محیطی بر عملکرد مطلوب زنجیره مقره ها تاثیر می گذارند؛ ممکن است کارایی مورد انتظار خطوط انتقال در مناطق آلوده دچار تغییر شود. یکی از عواملی که باعث آسیب به خطوط انتقال و قطعی های ناخواسته در سیستم می شود صاعقه است. صاعقه می تواند در زمان بسیار کوتاه اضافه ولتاژهای بسیار زیادی در خطوط انتقال ایجاد کرده و باعث تحمیل صدمات سنگینی به خطوط انتقال شود. چون استقامت عایقی زنجیره مقره فاکتور مهمی در عملکرد خطوط انتقال در مقابل صاعقه است بررسی عملکرد خطوط انتقال در مقابل صاعقه با در نظر گرفتن اثر آلودگی می تواند در بهبود کارایی سیستم انتقال عبوری از مناطق آلوده تاثیر مهمی داشته باشد. صاعقه یکی از عوامل مهم قطع برق در خطوط انتقال و توزیع نیرو می‌باشد، بررسیهای انجام شده در کشور آمریکا و کانادا در طول ۱۴ سال بهره‌برداری از حدود ۲۵۰۰۰ مایل خطوط انتقال نیرو نشان می دهد که ۲۶ درصد قطعی‌های برق خطوط انتقال ۳۴۵ کیلو ولت در اثر برخورد صاعقه به وجود آمده است و بررسی های مشابه در کشور انگلستان که آنهم در یک دوره ۱۴ ساله انجام گرفته نشان می‌دهد که از حدود ۵۰۰۰ قطعی در خطوط توزیع نیرو تا ولتاژ ۳۳ کیلو ولت ، ۴۷ درصد آنها در اثر صاعقه به وجود آمده‌اند. تأثیر تخلیه جوی الکتریکی بر این خطوط از نظر صدمه موضعی و خسارات ناشی از آن مورد نظر نبوده، اهمیت عمده آن ایجاد اختلال در برق رسانی و قطع سراسری شبکه و انرژی مورد نیاز مصرف کننده ها می باشد. هر گونه تخلیه جوی بر هر نقطه از خطوط انتقال انرژی به صورت قوس الکتریکی در

فواصل هوایی ایزولاسیون خطوط ظاهر گردیده، ایزولاسیون پیش‌بینی شده خطوط را مختل و شبکه را با خاموشی کامل مواجه می سازد(احمین و نیاستی، ۱۳۹۶: ۲).

۲-پیشینه تحقیق

پرهیزگار و شایقی(۱۳۹۶) پژوهشی با عنوان« مدلسازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس۲» انجام داده اند. در این مقاله مدلسازی در حوزه فرکانس یک خط دارای چندین هادی که بر اثر اصابت صاعقه روشن شده، با لحاظ کردن تغییرات پارامترهای خط در امتداد طول آن تعریف شده است. مدلسازی خط روشن شده بر روی رابطه تیلور قرار داده شده است در حالی که میدان الکترومغناطیسی تولید شده از روابط Master و Uman تعریف شده است. الگوریتم تبدیل لاپلاس عددی برای تبدیل فرکانس-زمان بکار برده شده است. برای ارزیابی اولیه روش، نتیجه آن با یک آزمایش منتشر شده قبلی مقایسه شده است. همچنین یک آزمایش نیز برای آنالیز اثر نقطه برخورد بر روی حجم و شکل موج اضافه ولتاژهای گذرای بدست آمده، انجام داده شده است. اثر خط غیر همسان نیز بحث شده است. شربتی و نیاستی(۱۳۹۵) پژوهشی با عنوان «بررسی احتمال خروج همزمان چند مدار در خطوط انتقال چند مداره در اثر اصابت مستقیم صاعقه» انجام داده اند. هدف از این مقاله، بررسی قطعی های همزمان چند مدار در خطوط انتقال چند مداره بر اثر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار EMTP-RV یک خط انتقال چهار مداره با دو سطح ولتاژ متفاوت ۲۲۰ و ۱۱۰ کیلو ولت شبیه سازی شده است. برخورد صاعقه به نوک دکل و تاثیر آرایش فازها و مقاومت پای دکل بر قطعی های همزمان مدارها بررسی شده اند. بهترین آرایش برای فازها که بیشترین کارایی و قابلیت اطمینان را برای خط انتقال در برابر اصابت صاعقه فراهم می کند، مشخص شده است. همچنین اثر اصابت مستقیم صاعقه به فاز و نیز زمان پیشانی موج صاعقه فرعی، بر اضافه ولتاژهای گذرای القا شده در سایر مدارها مورد مطالعه قرارگرفته است. این بررسی ها نشان می دهند مقاومت پای دکل، آرایش فازها و سیم محافظ چه تاثیری بر عملکرد خطوط انتقال در برابر صاعقه دارند. ایگدر و همکاران(۱۳۹۳) پژوهشی با عنوان« بررسی عملکرد خطوط انتقال هوایی در مقابل صاعقه با در نظر گرفتن اثر کرونا» انجام داده اند. برخورد صاعقه به خطوط انتقال میتواند در زمانی بسیار کوتاه اضافه ولتاژهای بزرگی را در قسمتهای مختلف خط به وجود آورد که منجر به تخلیه الکتریکی و اتصال کوتاه گردد. با این حال اگر اضاف هولتاژ به اندازه

کافی برای تولید کرونا بزرگ باشد، در این صورت دامنه موج سیار در طول خط تضعیف شده و شکل آن تغییر میابد. آگاهی از مقدار ماکزیمم و شکل موج اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه برای حفاظت و هماهنگی عایقی مناسب تجهیزات شبکه بسیار مهم است. این مقاله به بررسی عملکرد خطوط انتقال در مقابل صاعقه با در نظر گرفتن اثر کرونا و تغییر امپدانس مشخصه در طول اسپن پرداخته است. عملکرد خطوط انتقال، با در نظر گرفتن اثر کرونا و ماهیت تصادفی پارامترهای صاعقه، با روش شبیهسازی مونت کارلو در نرم افزار EMTP بر روی یک شبکه نمونه بررسی شده و نتایج به دست آمده با حالت عدم حضور کرونا مورد مقایسه قرارگرفته است.

۳-صاعقه و نحوه شکل‌گیری آن

با برقرارشدن ابر و با توجه به بار ابر و ظرفیت بین ابر و زمین یک ولتاژ فشار قوی بین ابر و زمین بوجود میآید که ممکن است به چندین میلیون ولت برسد. ظرفیت خازنی بین ابر و زمین در حد میکروفاراد و شدت میدان الکتریکی بین ابر باردار و زمین به چندین هزار ولت میرسد(مهاجریامی، ۱۳۸۹: ۳). لذا در موقعی که اتمسفر دارای هوای مرطوب است، جریان های متصاعدی توده های هوا را به ارتفاعات برده در این موقع پدیده متراکم شدن ایجاد شده و باران می بارد. چنانچه به علت وجود حرارت، فشار، بخار و علل مشابه این توده های هوای مرطوب به ارتفاع بالاتری متصاعد شوند کنداسه شدن هوا توام با متصاعد شدن حرارت خواهد بود. این امر باعث بالا رفتن مجدد توده های فوق می شود. قسمت فوقانی ابری که بدین شکل تشکیل شده است در منطقه بسیار سرد قرار گرفته و ایجاد کریستال های یخ می نماید. کریستال های یخ تولید الکتریسیته در جو می کند که این عمل مشابه کار یک ژنراتور الکتریسیته ساکن است. در محوطه محدودی که در وسط منطقه صاعقه خیز قرار گرفته است فشار بارومتری از قسمت خارجی این منطقه کمتر است. منطقه فوق را می توان کاملاً به یک لوله گاز شبیه کرد که یکی از الکترودهای آن سطح قاعده ابر و الکترود دیگر آن زمین است. در مواقعی که فعل و انفعالات مربوط به صاعقه در شرف انجام شدن است. ابرها به صورت خاصی در می آیند بدین ترتیب که بار الکتریکی منفی در سطح قاعده ابر و بار مثبت در بالای آن ایجاد می گردد و چنانچه این فعل و انفعالات در بالای زمینی به وجود آید که از حیث ساختمان ژئولوژیکی عایق باشد باعث تجمع بارهای مثبت در آن می گردد.

۴-صاعقه چگونه موجب آسیب به تجهیزات می شود؟

۴-۱ کوپلاژ مقاومتی

با برخورد صاعقه به ساختمان، جریان تخلیه شده به زمین، موجب افزایش زیاد پتانسیل زمین در سیستم های برق و دیتا می شود که بخشی از جریان صاعقه از طریق کابل به ساختمان دیگر منتقل می شود(قاسمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۰).

۴-۲ کوپلاژ سلفی[1]

با عبور جریان صاعقه از هادی میدان مغناطیسی ایجاد می شود. خطوط میدان ایجاد شده هادی های موجود در ساختمان که با هم تشکیل حلقه (لوپ) داده اند را قطع می کند و باعث تولید ولتاژی معادل چند ده کیلو ولت در آن ها می شود.

۴-۳ کوپلاژ خازنی

با ایجاد میدان الکتریکی در نزدیک نقطه تخلیه صاعقه، کابل ها و هادی ها در نقش خازن و هوا به عنوان دی الکتریک بین آن ها قرار می گیرد که در این حالت نیز کابل ها دچار یک افت ولتاژ بالا می شوند

۴-۴ برقگیر حفاظتی یا SPD

به تجهیزاتی که برای حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ و ایجاد محدودیت در اثرات اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه بر روی تجهیزات برقی و حفاظت از آن ها استفاده می شود، برقگیر حفاظتی یا SPD می گویند امروزه برای حفاظت تجهیزات قدرت در برابر اضافه ولتاژهای گذرا، اغلب از برقگیر استفاده می شود. برقگیرها نسبت به سایر وسایل حفاظتی، بهترین حفاظت و بیشترین مقدار حذف امواج گذرا را فراهم می کنند. این وسیله به صورت موازی با وسیلهٔ تحت حفاظت و یا بین فاز و زمین قرار می گیرد. انرژی موج اضافه ولتاژ توسط برقگیر به زمین منتقل شده و افت ولتاژ ناشی از جریان تخلیهٔ برقگیر نیز به یک مقدار معینی (در حد سطح حفاظتی برقگیر) محدود می شود(غفارپور و لونی، ۱۳۹۸).

SPD ها با عنوان سرج ارستر نیز شناخته می شوند و بر دو نوع هستند:

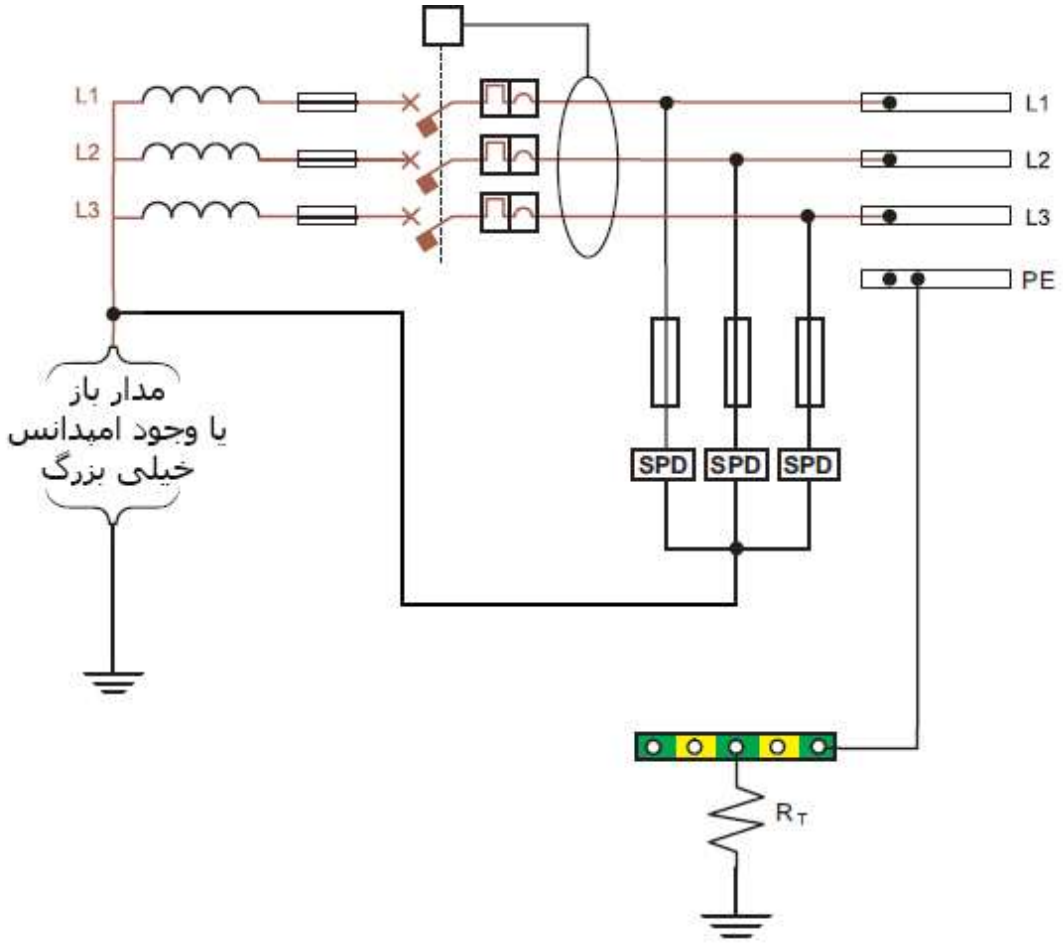
---

[1] **Inductive coupling**

- ارستری که در حالت عادی دارای امپدانس زیاد بوده ولی در هنگام وجود شوک ولتاژ ، به طور ناگهانی امپدانس آن کاهش می یابد.
- ارستری که در حالت عادی دارای امپدانس زیاد بوده ولی در هنگام وجود شوک ولتاژ، به طور پیوسته امپدانس آن کاهش می یابد.

برقگیر حفاظتی (SPD) در صورت عدم وجود ترانس در اولین تابلو برق در نقطه ورودی به ساختمان، و در صورت وجود ترانس در اولین تابلوی برق فشار ضعیف در سیستم توزیع نیرو نصب می شود.

SPDعلاوه بر این که در تابلو ورودی نصب می شود باید برای تابلو تغذیه کننده دستگاه های حساس نصب شود .انتخاب برقگیر با توجه به سطح ولتاژ حفاظت، جریان تخلیه الکتریکی و جریان ضربه صورت می گیرد. حداکثر سطح ولتاژ عملکرد برقگیر حفاظتی در تأسیسات برق ۴۰۰/۲۳۰ ولت، ۵/۲ کیلو ولت است(غفارپور و لونی، ۱۳۹۸). در شکل زیر موقعیت SPD در سیستم IT را مشاهده می کنید:



۵-مراحل مختلف شکل‌گیری صاعقه

چنانچه شدت میدان الکتریکی بین زمین و ابر به قدر کافی بزرگ باشد آنگاه هوا در یک نقطه از سطح ابـر شـروع بـه یونیزه شدن می‌کند. در اثر یونیزاسیون، هوا بصورت یک گاز هادی درمیآید و یک الکترود بصورت میلـه تشـکیل مـی دهد. مسیر یونیزه شدن هوا را کانال هادی میگویند. کانال هادی پس از هر توقف مسیر خود را بسته به شرایط موجود تعیین می‌کند. لذا مسیر هادی شاخه به شاخه می شود. نزدیکترین شاخه به الکترودهای تیز و بلند، ماننـد درختـان و ساختمان ها و خطوط انتقال برق موجب میشود شدت میدان بزرگ در حد یونیزه‌شدن هوا در نوک آنها ایجاد شود در نتیجه یک کانال هادی نیز از این نقاط به طرف کانال هادی پائین صعود میکنـد. در لحظـه‌ای کـه ایـن دو کانـال بـه یکدیگر میرسند، یک مسیر هادی بین ابر باردار و زمین بوجود می آید که از این مسیر جریان الکتریکی شدید در حـد ۲ تا ۳۰۰ کیلو آمپر عبور می‌نماید(افراسیابی، ۱۳۹۳: ۴). انرژی صاعقه در محل برخورد آن به زمین قابل توجه نیست

ولی اگر صاعقه به یک درخت برخورد کند، با توجه به مقاومت اهمی نسبتاً بزرگ درخت، انرژی در تنه درخت به گرما تبدیل میشود و همچنین نیروی الکترومغناطیسی ناشی از این جریان بزرگ صاعقه، سبب شکستن و شکاف خوردن آن می گردد(پیله ور و حسن مرادی، ۱۳۹۴)،

۶- اثرات صاعقه بر روی خطوط انتقال انرژی الکتریکی

صاعقه به دو طریق سیستم انتقال را تحت تاثیر خود قرار میدهد.

الف: ضربه مستقیم [۲]: عبارت از صاعقه‌هایی هستند که مستقیماً به سیستم انتقال برخورد میکنند و در سه حالت ممکن، برخورد مستقیم با هادی فاز، با دکل و با سیم زمین (گارد) خواهد بود

ب: ضربه غیرمستقیم[۳]: در این حالت تخلیه جوی در مجاورت خط انتقال صورت میگیرد و بارهای غیر همنام تجمع یافته در خط انتقال واقع در زیر ابر منجر به بروز اضافه ولتاژ در سیستم می‌گردند(فرخی کیا و همکاران، ۱۳۹۵: ۲).

۷-برخورد صاعقه با سیم زمین

اصولاً سیم گارد خط انتقال جهت برخورد صاعقه با ان طراحی شده است. لذا این حالت مطلوبترین نوع برخورد از انواع برخوردهای مستقیم صاعقه به سیستم انتقال می‌باشد. چرا که با نصب سیم‌های زمین در سرتاسر خطوط انتقال بارهای الکتریکی بطور مستقیم به دکل و زمین متصل می‌شوند بدون آنکه ایزولاسیون اطراف خطوط انتقال را مختل نمایند. سیمهای زمین خط از جنس فولاد بوده و مستقیماً بر بدنه فلزی دکلها متصل میشوند. گاهی برای اتصال بهتر سیم‌ها به زمین، تسمه مسی بر روی برجها نصب شده و سیم زمین را از نقطه راس برج به آن متصل می‌کنند.

۸-مقایسه کارکرد و تفاوت برق گیر با صاعقه گیر، محافظ نوسان و میله صاعقه گیر

- **برق گیر یا سرج ارستر[۴]:** وسیله ای جهت محافظت از تاسیسات الکتریکی و سیستم های برقی در مقابل اضافه ولتاژ گذرا ناشی از خطا های الکتریکی ، سوئیچینگ ، اتصال کوتاه ، جرقه ها و همچنین رعد و برق

[2] Direct- Stroke
[3] Indirect- Stroke
[4] **Surge Arrester**

است. برقگیر در داخل تابلو برق نصب و تاسیسات برقی را از داخل محافظت می کند، اضـافه ولتـاژ گـذرا را شناسایی و انرژی اضافه را به سیم ارت ارسال می نماید.

- **صاعقه گیر**[5]: وسیله ای جهت محافظت از مدار الکتریکی ، سازه و دستگاه های متصل به آن از صاعقه های با ولتاژ بسیار بالا و هدایت اضافه ولتاژ به زمین است. صاعقه گیر ها در خارج از ساختمان و بـالاترین ارتفـاع سازه نصب می شوند تا انرژی ناشی از صاعقه را به صورت ایمن از طریـق گیرنـده بـه داخـل زمـین هـدایت نماید.

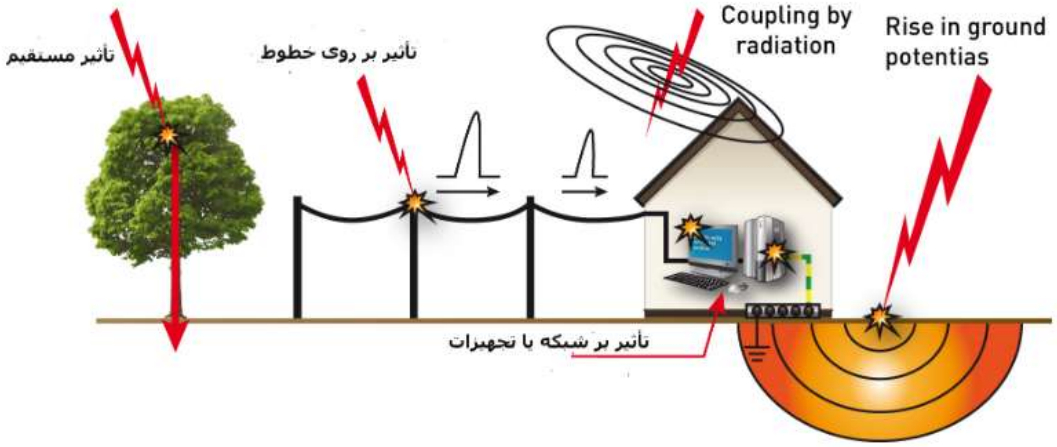
- **برق گیر های خانگی یا ولتاژ ضعیف معروف به محافظ نوسان برق** به عنوان برق گیر های گذرا در تابلو برق خانه نصب می شود تا از تجهیزات الکتریکی در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا محافظت نماید.

- **راد صاعقه گیر، میله صاعقه گیر یا نیزه**: میله ای فلزی رسانا است که در ساختمان و دکل هـای انتقـال برق و پست های فشار قوی نصب می شود تا مسـیری را بـرای ارت کـردن رعـد و بـرق یـا صـاعقه فـراهم نماید(پیله ور و مرادی، ۱۳۹۴: ۵).

۹-حفاظت در برابر اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه

محافظت در برابر اضافه ولتاژ ناشی از اثرات صاعقه در ساختمان و به خصوص سـاختمان هـایی کـه در آن تجهیـزات، دستگاه ها و سیستم های تأسیسات برقی مانند دستگاه های الکترونیکی حساس، شـبکه هـای کـامپیوتری و سیسـتم های IT به طور گسترده و قابل ملاحظه ای مورد استفاده باشند، لازم است.

[5] **Lightning Arrester**



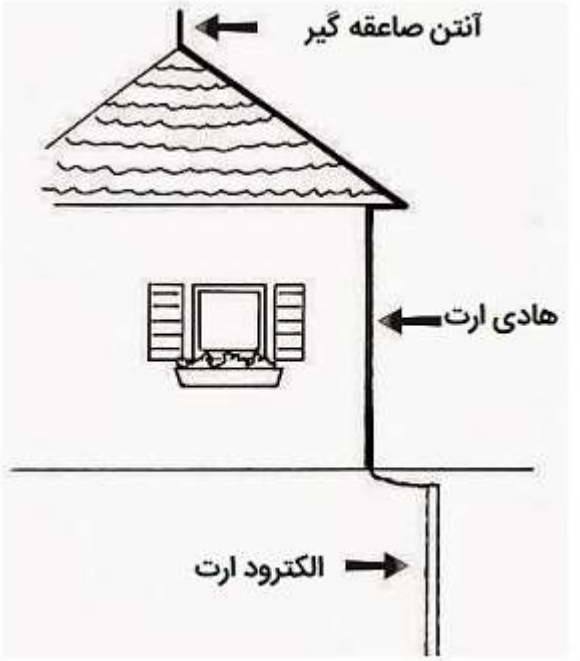
۱۰-اجزاء سیستم حفاظت از صاعقه

در یک سیستم صاعقه اساساً از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که از:

۱-آنتن برقگیر Air termination

۲-هادی هاconductor

۳-الکترود یا سیستم اتصال به زمینEarth termination



۱۱-منطقه بندی حفاظتی ساختمان در برابر صاعقه

منطقه بندی حفاظتی یا LPZ مخفف عبارت Lightning Protection Zone Concept است. طبقه بندی فضاهای متفاوت ساختمان از خارج به داخل و بر مبنای میزان کاهش امواج الکترومغناطیس ناشی از تخلیه صاعقه است که این مناطق از Z0A تا Zn دسته بندی می شوند.

LPZ0A : این ناحیه، ناحیه ای است با حداکثر شدت میدان مغناطیسی، که در معرض مستقیم برخورد صاعقه قرار دارد. در این ناحیه تأسیسات داخلی تحت تأثیر مستقیم جریان اصلی صاعقه که به این منطقه انتقال یافته، هستند.

LPZ0B: ناحیه خارج از ساختمان با شدت حداکثر میدان مغناطیسی است با این تفاوت که خطر برخورد مستقیم صاعقه وجود ندارد. در این شرایط بخشی از تأسیسات داخلی تحت تأثیر جریان صاعقه قرار می گیرند.

LPZ1: ناحیه ای در داخل ساختمان است که در این ناحیه شوک جریان صاعقه توسط هادی ها و تجهیزات حفاظتی (SPD)توزیع شده و شدت میدان هم از طریق هادی موجود در سازه ساختمان و یا شیلدینگ فضاهای داخلی کاهش می یابد.

LPZ2...n: شامل مناطق داخلی ساختمان می شوند که تجهیزات حفاظتی (SPD) محدودیت بیشتری را در مقابل جریان های ضربه ای و القای صاعقه اعمال می کند و شدت میدان هم به وسیله شیلدهای تکمیلی بسیار کاهش پیدا می کند.

۱۲-نتیجه گیری

یش از ایجاد رعد و برق ابرها طی فرآیندهایی به شدت باردار می شوند. رعد و برق عبارت است از ظهور قوس الکتریکی همراه با صدای شدید شبیه به انفجار در فاصله ابرها می باشد، به علت ظهور قوس و صدای شدید«رعد و برق» نامیده می شود. سرویس آموزش و آزمون برق نیوز: صاعقه یا همان آذرخش از تخلیه الکتروستاتیکی میان ابر و زمین به وجود می‌آید بطوریکه همین تخلیه الکتریکی نور و صدا تولید می‌کند. پیش از ایجاد رعد و برق ابرها طی فرآیندهایی به شدت باردار می شوند. رعد و برق عبارت است از ظهور قوس الکتریکی همراه با صدای شدید شبیه به انفجار در فاصله ابرها می باشد، به علت ظهور قوس و صدای شدید«رعد و برق» نامیده می شود. با توجه به ماهیت و نقش شبکه‌های سراسری انتقال انرژی در زندگی امروزی و پیشرفت‌های صنعتی کشورها، خطوط انتقال انرژی و ایستگاه‌های فشار قوی آسیب پذیرترین و حساس‌ترین قسمت های شبکه را در قبال پدیده های طبیعی از جمله رعد و برق یا تخلیه جوی الکتریکی تشکیل می‌دهند. شبکه های سراسری انتقال انرژی به صورت خطوط هوایی با کندوکتورهای تحت ولتاژ در ارتفاع کافی از زمین در معرض برخورد مستقیم رعد و برق و تخلیه جوی الکتریکی واقع می‌باشند. تأثیر تخلیه جوی الکتریکی بر این خطوط از نظر صدمه موضعی و خسارات ناشی از آن مورد نظر نبوده، اهمیت عمده آن ایجاد اختلال در برق رسانی و قطع سراسری شبکه و انرژی مصرف کننده‌ها می‌باشد. هر گونه تخلیه جوی بر هر نقطه از خطوط انتقال انرژی به صورت قوس الکتریکی در فواصل هوایی ایزولاسیون خطوط ظاهر گردیده، ایزولاسیون پیشبینی شده خطوط را مختل و شبکه را با خاموشی کامل مواجه می سازد.

فهرست منابع

۱-مرادی، محمد، کرمی، احسان، عبدی، حمدی، کریمی، شهرام، بررسی خروج خطوط ۲۳۰ کیلوولت به علت برخورد صاعقه با استفاده از روش مونت کارلو: مطالعه موردی در مناطق غرب ایران. ۱۳۹۹

۲-قاسمی، محمدحسین، نادری، پیمان، علیزاده پهلوانی، محمدرضا، مدل سازی خط انتقال هوایی در حوزه لاپلاس برای شبیه سازی پدیده تخلیه بازگشتی، مهندسی مخابرات، دوره ۹، شماره ۳۴. ۱۳۹۹

۳-غفارپور، رضا، لونی، محمد، مروری بر روش های طراحی سیستم زمین و حفاظت صاعقه سیاست های مخابراتی در ارتفاع بالا و زمین های صخره ای، مجله پدافند غیرعامل، سال ۱۱، شماره ۴. ۱۳۹۸

۴-شربتی، علی، نیاستی، محسن، ، بررسی احتمال خروج همزمان چند مدار در خطوط انتقال چند مداره در اثر اصابت مستقیم صاعقه، چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی پژوهش هایی کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک. ۱۳۹۵

۵-احمدیان، اسماعیل، نیاستی، محسن، (۱۳۹۶)، بهبود حفاظت از خطوط انتقال نیروی تک مداره در برابر صاعقه با بکارگیری سیم های زمین پایین دست، دانشگاه علوم و فناوری مازنداران. ۱۳۹۶.

۶-ایگدر، صدیقه، شریعتی نسب، رضا، وحیدی، بهروز، بررسی عملکرد خطوط انتقال هوایی در مقابل صاعقه با در نظر گرفتن اثر کرونا، بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق. ۱۳۹۳.

۷-پرهیزگار، حسین، شایقی، حسین، (۱۳۹۶)، مدلسازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس۲، نشریه مدل سازی در مهندسی ، شماره ۵۰. ۱۳۹۶.

۸-مهاجریامی، سعید، مدلسازی دکل و سیستم زمین جهت بررسی تأثیر صاعقه بر روی خطوط هوایی انتقال، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران. ۱۳۸۹.

۹-افراسیابی، شهاب الدین، مدل سازی و مقایسه دکل های انتقال برق و سیستم زمین آن در برخورد صاعقه، اولین کنفرانس ملی مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنگرود. ۱۳۹۳

۱۰-پیله ور، امین، حسن مرادی، مدلسازی و شبیه سازی تاثیر برخورد صاعقه بر خطوط توزیع ۲۰ کیلووات، کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی درمهندسی برق و علوم کامپیوتر. ۱۳۹۴.

۱۱-فرخی کیا، وحید، حسینی، محمدحسن، کرانی، معین، سیم گارد برای حفاظت خطوط انتقال هوایی در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه، بررسی تاثیر پارامترها، دومین کنفرانس ملی فناوری، انرژی و داده با رویکرد مهندسی برق و کامپیوتر. ۱۳۹۵.