



## Protective Performance of Shield Wire and Surge Arrester Against Lightning Strikes in Distribution Networks Considering the Frequency Model of the Grounding System

Aida Gholami<sup>۱</sup>, Masoumeh Khodsouz<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> Master's Degree, Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran. Email: Aida.gholami<sup>۱</sup>@gmail.com

<sup>۲</sup> Associate Professor, Mazandaran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (\*Correspondence: M.khodsouz@mazust.ac.ir)

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Article Type: Research paper

Received: ۰۶ April ۲۰۲۰

Revised: ۲۳ July ۲۰۲۰

Accepted: ۱۱ August ۲۰۲۰

Available online: ۲۳ August ۲۰۲۰

\*Correspondence:

mojtaba.mighani@gmail.com

*Keywords:*

Distribution Network

Frequency-Dependent Grounding

System Model

Zinc Oxide Surge Arrester

Shielding Wire

Lightning

### ABSTRACT

Protection of power network equipment against lightning-induced overvoltages is essential for ensuring the stability and reliability of electrical systems. Interruptions caused by both direct and indirect lightning strikes present significant operational challenges. Therefore, designing and implementing effective lightning protection strategies, particularly at the distribution network level, is crucial to enhancing reliability and mitigating risks associated with natural lightning events.

This study examines the impact of lightning-induced overvoltages on distribution networks and evaluates the effectiveness of protective devices such as zinc oxide surge arresters, overhead shield wires, and grounding systems in controlling these overvoltages. To this end, precise modeling of key network components—including surge arresters, shield wires, insulator strings, and grounding systems—was conducted using EMTP-RV software.

A major focus of the research is the comparison between a frequency-dependent grounding system model and a simple resistive grounding model. Results reveal that the frequency-dependent model provides a more accurate and realistic representation, as grounding resistance varies with frequency, decreasing at higher frequencies. This decrease facilitates the easier discharge of lightning currents, thereby reducing induced overvoltages and lowering the probability of insulation failure. Consequently, the overall protective performance of the network is enhanced.

Simulation results also indicate that overhead shield wires effectively prevent direct lightning strikes on phase conductors. By channeling lightning currents into the grounding system, these wires reduce induced overvoltages and associated insulation failures in network equipment. Furthermore, the combination of zinc oxide surge arresters, shield wires, and accurate grounding system modeling proves vital in mitigating the adverse effects of lightning-induced overvoltages. Without surge arresters, lightning-induced overvoltages can readily cause insulation breakdown in insulator strings. However, strategically installing zinc oxide surge arresters provides a controlled discharge path for lightning currents, preventing excessive voltage rises.

Moreover, employing the frequency-dependent grounding model enhances the dissipation of lightning currents and further reduces induced voltages, thereby improving network safety and reliability. In summary, the findings demonstrate that integrating surge arresters, shield wires, and frequency-dependent grounding systems constitutes an effective approach to minimizing lightning-related damages in distribution networks.

**Cite this article** Gholami, A., Khodsouz M. (۲۰۲۰). Protective Performance of Shield Wire and Surge Arrester Against Lightning Strikes in Distribution Networks Considering the Frequency Model of the Grounding System. Journal of Applied Electromagnetics. ۲۰۲۰; ۱۳ (۱):۱۳۰-۱۵۲.

**DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰.۱.۲۶۴۰۰۱۰۳.۱۴.۴.۱۳.۱.۱۲.۷>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

**Publisher:** Imam Hossein Comprehensive University.



## عملکرد حفاظتی سیم گارد و برق گیر اکسید روی در برابر ضربات صاعقه در شبکه توزیع با در

### نظر گرفتن مدل فرکانسی سیستم زمین

آیدا غلامی<sup>۱</sup>، معصومه خودسوز<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران Aida.gholami77@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران (نویسنده مسئول: M.khodsouz@mazust.ac.ir)

#### مشخصات مقاله

##### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

•

##### کلیدواژه‌ها:

شبکه توزیع

مدل فرکانسی سیستم زمین

برق گیر اکسید روی

سیم گارد

صاعقه

#### چکیده (استایل عنوان چکیده)

حفاظت از تجهیزات شبکه قدرت در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، یکی از الزامات اساسی جهت حفظ پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی محسوب می‌شود. قطعی‌های ناشی از برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه، به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی در بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت مطرح است. از این رو، طراحی و پیاده‌سازی راهکارهای مؤثر برای حفاظت در برابر صاعقه، به‌ویژه در سطح شبکه‌های توزیع، نقشی کلیدی در ارتقا شاخص‌های قابلیت اطمینان و کاهش ریسک‌های ناشی از وقایع طبیعی ایفا می‌نماید. در این پژوهش، تأثیر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر شبکه توزیع بررسی شده و عملکرد تجهیزات حفاظتی از جمله برق گیر اکسید روی، سیم گارد و سیستم زمین در کاهش این اضافه ولتاژها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، مدل‌سازی دقیق اجزای شبکه، از جمله برق گیرها، سیم گارد، زنجیره مقره‌ها و سیستم زمین، در نرم‌افزار EMTP-RV انجام شده است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های این تحقیق، بررسی مدل فرکانسی سیستم زمین در مقایسه با مدل مقاومتی ساده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل فرکانسی سیستم زمین، رفتار واقعی‌تر و دقیق‌تری نسبت به مدل مقاومتی دارد، زیرا مقدار مقاومت سیستم زمین در این مدل متناسب با فرکانس تغییر کرده و در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت باعث می‌شود که جریان صاعقه به‌راحتی تخلیه‌شده و اضافه ولتاژهای القایی کاهش پیدا کند. در نتیجه، احتمال شکست عایقی تجهیزات کاهش یافته و عملکرد حفاظتی شبکه بهبود می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که وجود سیم گارد از برخورد مستقیم صاعقه با هادی فاز جلوگیری کرده و با انتقال جریان صاعقه به سیستم زمین، موجب کاهش اضافه ولتاژهای القایی و کاهش شکست عایقی تجهیزات شبکه می‌شود. همچنین استفاده از برق گیرهای اکسید روی، در کنار نصب سیم گارد و مدل‌سازی دقیق سیستم زمین، نقش کلیدی در کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه دارد. همچنین، مشخص شد که در صورت عدم استفاده از برق گیر، اضافه ولتاژهای القایی ناشی از برخورد صاعقه می‌تواند به‌راحتی باعث شکست عایقی زنجیره مقره‌ها شوند. اما با نصب برق گیرهای اکسید روی در محل‌های مناسب، مسیر تخلیه‌ای برای جریان صاعقه فراهم شده و از افزایش بیش‌از حد ولتاژ جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، استفاده از مدل فرکانسی سیستم زمین منجر به دفع مؤثرتر جریان صاعقه و کاهش ولتاژهای القایی شده و در نهایت، ایمنی و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب تجهیزات حفاظتی شامل برق گیر، سیم گارد و سیستم زمین با مدل فرکانسی، یک راهکار مؤثر برای کاهش اثرات مخرب صاعقه در شبکه‌های توزیع است.

**استناد:** غلامی، آیدا، خودسوز، معصومه. عملکرد حفاظتی سیم گارد و برق گیر اکسید روی در برابر ضربات صاعقه در شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل فرکانسی سیستم زمین. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴)؛ ۱۳ (۱): ۱۳۵-۱۳۵.

<https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۰۵۱۵۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۱۲۷>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).



## ۱- مقدمه

با توجه به نقش حیاتی انرژی الکتریکی در زندگی روزمره انسان و توسعه صنایع، شبکه‌های توزیع به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین و حیاتی‌ترین اجزای سیستم قدرت شناخته می‌شوند. در این میان، یکی از مهم‌ترین انواع اضافه ولتاژها در شبکه قدرت، اضافه ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه به شبکه‌های توزیع است. صاعقه، یک پدیده طبیعی ناشی از تخلیه الکتریکی میان ابرها یا بین ابر و زمین است که می‌تواند موجب بروز اختلالات شدید در عملکرد شبکه گردد. خطوط توزیع که از جمله آسیب‌پذیرترین و حساس‌ترین بخش‌های سیستم قدرت به شمار می‌روند، اغلب در معرض برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه قرار دارند. این برخوردها منجر به القای اضافه ولتاژهایی می‌شود که می‌توانند خسارات جدی به تجهیزات الکتریکی، آسیب به افراد و کاهش چشمگیر قابلیت اطمینان سیستم را به دنبال داشته باشند. از این رو، دستیابی به یک شبکه توزیع با سطح بالای قابلیت اطمینان، نه تنها در جهت حفظ پایداری سیستم و حفاظت از تجهیزات، بلکه در ارائه خدمات پایدار و مطمئن به مشترکین و بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی الکتریکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱].

صاعقه ممکن است مستقیماً به هادی فاز (برخورد مستقیم صاعقه) و یا به سیم گارد (برخورد غیرمستقیم صاعقه) و برخورد کند. هنگام برخورد مستقیم صاعقه با هادی فاز در خطوط توزیع خطای حفاظت (SF) رخ می‌دهد که می‌تواند باعث تخلیه الکتریکی در شبکه توزیع شود. همچنین با برخورد صاعقه به سیم گارد جریان صاعقه از طریق مسیرهایی به سیستم زمین منتقل شده و سپس از سیستم زمین به سمت برج شارش می‌یابد که باعث تخلیه برگشتی در شبکه توزیع می‌شود. که در این مقاله برخورد مستقیم صاعقه و برخورد غیرمستقیم صاعقه مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. جهت حفاظت از شبکه توزیع در برابر ضربات صاعقه راهکارهای حفاظتی متنوعی وجود دارد مانند نصب برق گیر، سیم گارد، میله صاعقه گیر و کاهش مقاومت سیستم زمین وجود دارد که در این مقاله از سیم گارد و برق گیر جهت حفاظت از خطوط توزیع در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از ضربات صاعقه استفاده شده است.

در خصوص حفاظت خطوط توزیع در برابر ضربات صاعقه مطالعات زیادی انجام شده است. در مرجع شماره ۲، نصب برق گیر و سیم گارد و همچنین میله صاعقه گیر در خطوط توزیع ۱۰kV برای حفاظت در برابر ضربه‌ای صاعقه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل عملکرد خطوط توزیع واقع در مناطقی با مقاومت ویژه بالای خاک، با لحاظ کردن و بدون لحاظ کردن تجهیزات حفاظتی نظیر میله صاعقه گیر و

برق گیر، ارائه شده است. همچنین، اثرات ناشی از ولتاژهای القایی در این شرایط مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و چالش‌های مرتبط با آن مورد بحث قرار گرفته‌اند. ولیکن در این مقاله مدل‌سازی سیستم زمین به‌صورت مقاومت استاتیک بوده و از مدل فرکانسی سیستم زمین استفاده نشده است. همچنین در مرجع شماره ۳ از ترکیب سیم گارد و برق گیر برای حفاظت شبکه توزیع ۱۰kV در برابر ضربات صاعقه بررسی و ارزیابی شده است و اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه بر عایق‌ها و نرخ خرابی خط هوایی در صاعقه مستقیم و در صاعقه غیرمستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصله، نصب برق گیر بر روی هر دکل بهترین عملکرد حفاظتی را به همراه دارد، اما می‌تواند هزینه زیادی را در پی داشته باشد به همین دلیل ترکیب سیم گارد و برق گیر عملکرد بسیار بهتری را با هزینه متوسط ارائه می‌دهد. همچنین در این مقاله نیز از مدل فرکانسی سیستم زمین که دقیق‌ترین مدل برای مقاومت سیستم زمین است استفاده نشده است. اما در مرجع شماره ۴ به بررسی عملکرد برق گیرها در شبکه‌های توزیع باهدف حفاظت خطوط در برابر ضربات صاعقه پرداخته شده است. در این مطالعه، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در خطوط توزیع، با در نظر گرفتن فواصل مختلف بین برق گیرها، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله نیز از سیستم زمین استاتیک برای مدل‌سازی سیستم زمین استفاده شده است و از سیستم زمین فرکانسی استفاده نشده است و در مرجع شماره ۵ برای حفاظت از خطوط ۱۰kV در برابر ضربات صاعقه از سیم گارد و برق گیر استفاده شده است. مانند تمامی مقالات قبلی در این مقاله از مدل استاتیک سیستم زمین که یک مدل ساده جهت مدل‌سازی سیستم زمین است استفاده شده است. همچنین در مرجع شماره ۶ به بررسی و ارزیابی سیم گارد در شبکه توزیع ۱۰kV در برابر ضربات صاعقه پرداخته شده است و در این مطالعه پارامترهای طراحی از جمله فاصله تا اتصال زمین، مقاومت سیستم زمین و موقعیت قرارگیری سیم گارد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند و در مرجع شماره ۷ نصب برق گیر و سیم گارد در خطوط ۵۰kV شبکه توزیع با مدل‌سازی سیستم زمین به‌صورت مقاومت ساده و غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است که در این مقاله، عملکرد خطوط توزیع در برابر برخورد غیرمستقیم صاعقه با استفاده از یک پیکربندی واقعی و بهره‌گیری از روش آماری مونت‌کارلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، از مدل‌سازی دقیق برای تحلیل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به‌منظور بررسی تأثیر فواصل میان برق گیرها و ویژگی‌های مرتبط استفاده شده است. شایان ذکر است که در این مطالعه، اثرات سیستم زمین فرکانسی لحاظ نشده است. در مرجع شماره ۸ نیز به بررسی سیم‌های گارد در خطوط توزیع با در نظر گرفتن فاکتورهایی همانند مقاومت زمین، نوع

به منظور ارزیابی عملکرد حفاظتی در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، در این مطالعه از یک شبکه توزیع نمونه شامل هفت دکل بتنی با فواصل ۳۰ m بین هر دکل (مطابق با فاصله استاندارد دکل های ۲۰ kV در شبکه های توزیع ایران) استفاده شده است. برای شبیه سازی ولتاژ نامی شبکه، یک منبع ولتاژ ۲۰ kV در نظر گرفته شده است. مشخصات کلی شبکه مورد مطالعه و نحوه مدل سازی اجزای مختلف از جمله خطوط توزیع، دکل ها، برق گیرها، سیستم زمین و منبع تولید صاعقه، در نرم افزار EMTP-RV پیاده سازی و در ادامه مقاله تشریح شده اند.

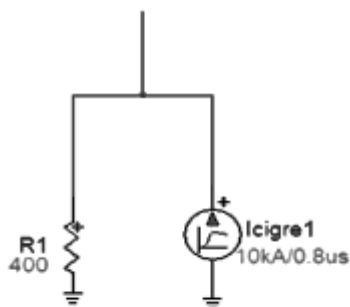


شکل (۱): شبکه مورد مطالعه

## ۱-۲. مدل سازی صاعقه

اولین مرحله در ارزیابی اثرات اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه بر سامانه های توزیع، تولید شکل موج مناسب برای صاعقه است. در این راستا، سه پارامتر کلیدی شامل جریان پیک، زمان پیشانی موج و زمان افت یا پشت موج، نقش تعیین کننده ای در تعریف مشخصات شکل موج صاعقه ایفا می کنند.

برای مدل سازی اثر برخورد صاعقه، مطابق با شکل (۲)، از یک منبع جریان مطابق با مشخصات استاندارد CIGRE به صورت موازی با یک مقاومت  $400\ \Omega$  به عنوان مدل کانال صاعقه استفاده شده است. شکل موج جریان های صاعقه ۱۲۰، ۹۰، ۶۰، ۳۰، ۱۰ در شکل (۳) نشان داده شده است [۴].



خاک، موقعیت سیم های گارد پرداخته شده است. سیستم زمین به کاررفته در این مقاله سیستم زمین مقاومت استاتیک است. در تمامی مقالات سیستم زمین در شبکه توزیع به صورت مقاومت ساده و یا مقاومت غیرخطی مدل سازی شده است و از مدل فرکانسی سیستم زمین برای شبکه توزیع استفاده نشده است. از آنجایی که مدل سازی رفتار مناسب سیستم زمین می تواند نقش مهمی بر عملکرد سیستم حفاظتی شبکه توزیع ایفا نماید، لذا مدل سازی دقیق سیستم زمین می تواند در طراحی شبکه حفاظتی مناسب نقش بسزایی را ایفا نماید. لذا در این مقاله از سیستم زمین مدل فرکانسی ممان [۹] که یک مدل بسیار دقیق برای مدل سازی مقاومت سیستم زمین است استفاده شده است.

در این مقاله، مدل سازی اجزای شبکه توزیع و مدل فرکانسی سیستم زمین در نرم افزار EMTP-RV که یک نرم افزار حالت گذرا است، انجام شده است. یکی از بخش های کلیدی این شبیه سازی، مقایسه مدل فرکانسی سیستم زمین با مدل مقاومتی ساده است. نتایج نشان می دهد که مدل فرکانسی سیستم زمین، به دلیل در نظر گرفتن وابستگی مقاومت به فرکانس، رفتار دقیق تری نسبت به مدل مقاومتی دارد. در این مدل، مقدار مقاومت سیستم زمین در فرکانس های بالا کاهش می یابد که این امر موجب بهبود تخلیه جریان صاعقه به زمین و کاهش اضافه ولتاژهای القایی در شبکه می شود. همچنین، با توجه به سنگلاخی بودن خاک و افزایش مقاومت سیستم زمین، برای بهبود مسیر تخلیه جریان صاعقه، از سیم گارد استفاده شده است. نصب سیم گارد باعث کاهش احتمال برخورد مستقیم صاعقه به هادی فاز شده و از اعمال اضافه ولتاژهای مخرب به دو سر زنجیره مقرر جلوگیری می کند. علاوه بر این، به عنوان آخرین لایه حفاظتی، نصب برق گیر بر روی دکل های شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که برق گیرهای نصب شده بر روی دکل های توزیع، از شکست عایقی زنجیره مقرر جلوگیری کرده و پایداری شبکه را افزایش می دهند. در نهایت، برای عملکرد بهینه سیم های گارد و افزایش اثربخشی سیستم حفاظتی، وجود یک سیستم زمین با مقاومت پایین امری ضروری است. چنین سامانه ای موجب کاهش جریان های صاعقه برگشتی و کاهش اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرر شده و ایمنی شبکه را بهبود می بخشد.

## ۲- مدل سازی اجزای شبکه

بررسی و شبیه سازی دقیق یک شبکه قدرت مستلزم مدل سازی جامع کلیه اجزا و عناصر سازنده آن با استفاده از نرم افزارهای تخصصی تحلیل حالت گذرا است. در این پژوهش، جهت شبیه سازی و تحلیل رفتار گذرای شبکه مورد نظر، از نرم افزار EMTP-RV بهره گرفته شده است.

شکل (۲): مدار معادل تولید موج صاعقه در نرم افزار EMTP-RV



مغناطیسی ایجاد شده در مجاورت برق گیر، از عنصر L بهره گرفته می شود. همچنین، مقاومت R به منظور جلوگیری از نوسانات عددی در هنگام شبیه سازی مدل در نرم افزارهای کامپیوتری به کار می رود. برای محاسبه پارامترهای مدل مداری IEEE، می توان از معادلات زیر استفاده کرد [۱۴].

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (1)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (2)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (3)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (4)$$

$$C_0 = 100 \frac{n}{d} (pF) \quad (5)$$

در معادلات فوق، d نمایانگر ارتفاع ستون برق گیر و n تعداد ستون های موازی اکسید روی در برق گیر است. در برخی مواقع، با جایگذاری مقادیر به دست آمده در این مدل، ممکن است میزان اضافه ولتاژ دو سر برق گیر به دست آمده با مقدار ارائه شده توسط کارخانه سازنده تفاوت داشته باشد. در این شرایط، با تغییر مقدار  $L_1$  می توان به مقدار مطلوب دست یافت [۱۵].

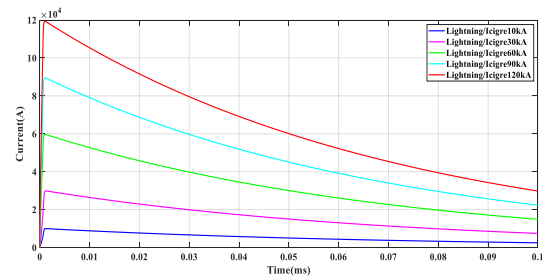
در این مقاله، مشخصات برق گیر اکسید روی ساخت شرکت پارس به عنوان نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه سازی این برگیر در نرم افزار EMTP-RV، به مشخصات فنی برق گیر مطابق با جدول (۱) نیاز است [۱۶].

جدول (۱): مشخصات فنی برق گیر اکسید روی ZNO (پارس)

مشخصات		فشار متوسط	فشار ضعیف
ولتاژ نامی (kV)	۲۵	۰/۳	
ولتاژ کار دائم (kV)	۲۰	۰/۲۴۰	
جریان تخلیه نامی (kA)	۱۰	۱۰	
ولتاژ باقیمانده به ازای جریان ۲۰ / ۸ μs - ۱۰ kA	۷۳	۰/۸۴۰	
ارتفاع ستون برق گیر (m)	۰/۳۷	۰/۰۶۲	

### ۳-۲. مدل سازی خطوط شبکه توزیع

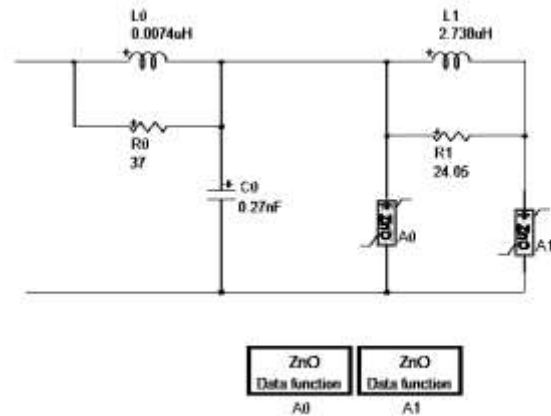
در طراحی خطوط شبکه توزیع، توجه به پارامترهایی نظیر میزان انتقال انرژی، سطح ولتاژ، هماهنگی عایقی، استحکام مکانیکی، مسائل زیست محیطی و سایر عوامل مرتبط امری ضروری است. به همین دلیل، طراحی خطوط شبکه توزیع یکی از



شکل (۳): مدار معادل تولید موج صاعقه در نرم افزار EMTP-RV

### ۲-۲. مدل سازی برق گیر

برق گیر یکی از اجزای حیاتی در حفاظت شبکه های توزیع در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به شمار می آید. رفتار گذرای برق گیر با توجه به ویژگی های خاص شبکه از جمله فرکانس، زمان پیشانی موج اعمالی و جریان عبوری، به صورت غیرخطی تغییر می کند [۱۰]. از این رو، برای شبیه سازی عملکرد برق گیرها، مدل های فرکانسی مختلفی همچون مدل های ارائه شده توسط [۱۱] Fernandez, Penciti [۱۲] و IEEE [۱۳] به کار گرفته شده اند. در این مقاله، مطابق با شکل (۴)، از مدل فرکانسی IEEE استفاده شده است که به طور خاص وابسته به فرکانس است.



شکل (۴): مدار معادل برق گیر IEEE

در این مدل، برای شبیه سازی رفتار غیرخطی ولتاژ و جریان، از دو مقاومت غیرخطی  $A_0$  و  $A_1$  استفاده شده است. این دو مقاومت غیرخطی توسط یک فیلتر RL از یکدیگر جدا می شوند. فیلتر RL در هنگام برخورد صاعقه با پیشانی موج بلند، امپدانس کوچکی ایجاد می کند؛ به عبارت دیگر، دو مقاومت غیرخطی  $A_0$  و  $A_1$  به صورت موازی عمل می کنند. اما در برخورد صاعقه با پیشانی موج کوتاه، این فیلتر امپدانس بالاتری از خود نشان می دهد، به طوری که بخش بیشتری از جریان عبوری از مقاومت  $A_0$  عبور می کند. برای نمایش خاصیت خازنی ارتفاع دو سر ستون برق گیر از عنصر C استفاده می شود، و برای نمایش اندوکتانس

### ▪ مدل سیستم زمین به صورت مقاومت ثابت (R)

در مدل مقاومت ثابت، امپدانس پایه به وسیله یک مقاومت ثابت مدل سازی می شود. ساده ترین مدل برای شبیه سازی سیستم زمین، مدل مقاومتی است که در آن الکتروود زمین به عنوان یک مقاومت ثابت در نظر گرفته می شود. این مدل، اما، وابستگی فرکانسی را در نظر نمی گیرد. در این مقاله، از یک مقاومت  $200 \Omega$  برای بررسی تأثیر مقاومت زمین در مناطق سنگلاخی به منظور حفاظت از شبکه توزیع در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه استفاده شده است [۲۰].

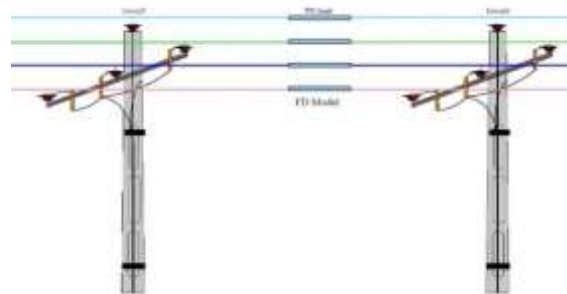
### ▪ مدل سیستم زمین به صورت فرکانسی

در این مقاله، جهت شبیه سازی سیستم زمین مدل فرکانسی، از روش ممان (MoM) استفاده شده است. روش ممان می تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای حل معادلات انتگرال میدان الکتریکی به کار رود. این روش بر توزیع جریان در امتداد هادی های سیستم زمینی نظارت می کند و به عنوان یک فن عددی دقیق و تمام موج برای حل مسائل الکترومغناطیسی شناخته می شود. با استفاده از این فن، می توان تشعشعات الکترومغناطیسی، پراکندگی و انتشار امواج را با زمان های محاسباتی نسبتاً کوتاه و منابع محاسباتی متوسط تجزیه و تحلیل کرد.

برای حل معادلات انتگرال میدان الکتریکی، از روش ممان در حوزه فرکانس بهره برداری می شود. به این منظور، سیستم اتصال به زمین به عنوان سیم های نازکی که به بخش های کوچک تقسیم می شوند، مدل سازی می شود. سپس، برای محاسبه توزیع جریان طولی، میدان الکتریکی مماسی بر روی هر سطح مقطع به ازای هر نمونه جریانی که در محور هادی قرار دارد، محاسبه می گردد. این جریان می تواند به صورت ثابت، تکه ای سینوسی یا تابع شیب دار تخمین زده شود. توزیع جریان در امتداد هادی های زمین و میدان الکتریکی در حوزه فرکانس با حل معادله انتگرال میدان الکتریکی محاسبه می شود. سپس، افزایش ولتاژ در نقطه تحریک با انتگرال گیری از میدان الکتریکی در طول مسیر از پیش تعیین شده به دست می آید. در نهایت، امپدانس سیستم از مقادیر ولتاژ و جریان استخراج می شود. برای به دست آوردن تابع انتقال با مرتبه خاص، برازش برداری برای تقریب پاسخ فرکانسی اعمال می شود. برازش برداری یک فن عددی است که برای محاسبه پاسخ های حوزه فرکانس استفاده می شود و می تواند مدل های فضای حالت را مستقیماً از پاسخ های حوزه فرکانس هر سیستم ورودی - خروجی منفرد یا چندگانه شناسایی کند. تابع انتقال سیستم به صورت مجموع کسره های جزئی نشان داده می شود که هر کدام به عنوان یک مدار انشعاب با مقدار ورودی خاص مدل می شوند. نهایتاً، مدار سنتز شده از شاخه های موازی متصل

چالش برانگیزترین و حیاتی ترین مسائل در سامانه های قدرت به شمار می آید. یکی از اصول بنیادین در طراحی خطوط شبکه توزیع، ارزیابی استحکام عایقی آن ها در برابر تنش های مختلف، به ویژه تنش های الکتریکی، است. سیستم عایقی مورد استفاده در این خطوط باید مقاومت کافی در برابر اضافه ولتاژها داشته و توانایی مقابله با آن ها را از خود نشان دهد. در تحلیل رفتار حالت گذرای شبکه قدرت، خطوط توزیع نقش تعیین کننده ای در شدت دامنه اضافه ولتاژها ایفا می کنند؛ بنابراین، مدل سازی دقیق خطوط توزیع از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مدل تابع فرکانسی خطوط توزیع به عنوان دقیق ترین مدل برای شبیه سازی رفتار حالت گذرا در سامانه های قدرت شناخته می شود.

در این مقاله، برای مدل سازی خطوط شبکه توزیع از مدل J-Marti استفاده شده است. این مدل از یک ماتریس تبدیل ثابت برای تبدیل مقادیر از حوزه مدال به حوزه فرکانسی بهره می برد. این مدل به ویژه برای خطوط هوایی با فرکانس بالا مناسب است و در فرکانس های پایین تر ممکن است رفتار غیر پایدار از خود نشان دهد. مدل J-Marti به دلیل دقت بالاتر نسبت به سایر مدل ها، علی رغم سرعت محاسباتی کندتر، در تحلیل های دقیق تر ترجیح داده می شود. به دلیل دقت بالای این مدل و امکان پیاده سازی آن در نرم افزار EMTP-RV با استفاده از مدل FD، در این مقاله از این روش بهره برداری شده است [۱۷]. شکل (۵) مدل FD را برای نمایش خط شبکه توزیع در نرم افزار EMTP-RV نشان می دهد.



شکل (۵): خطوط توزیع مدل سازی شده در نرم افزار EMTP-RV

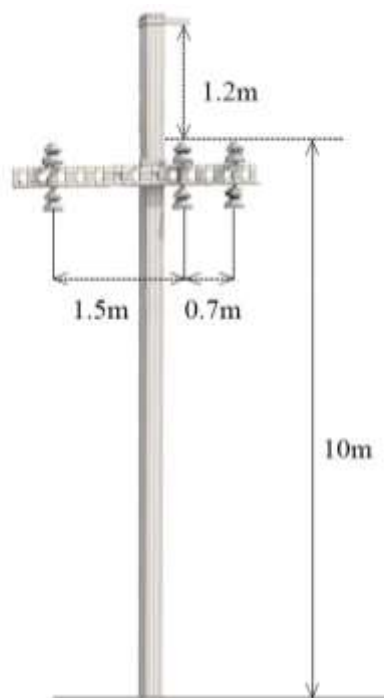
### ۲-۴. مدل سازی سیستم زمین

رفتار سیستم زمین تأثیر قابل توجهی بر احتمال وقوع تخلیه های الکتریکی دارد. از آنجاکه تخلیه صاعقه عمدتاً از طریق سیستم زمین انجام می شود، مدل سازی دقیق امپدانس زمین از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله، به منظور تحلیل رفتار فرکانس بالا سیستم زمین، از یک الکتروود عمودی به طول  $2.5m$  و شعاع  $6mm$  با گذردهی الکتریکی ( $\epsilon_r$ ) برابر ۲۰ استفاده شده است. امپدانس سیستم زمین برای مقاومت ویژه خاک  $250 \Omega m$  در مناطق سنگلاخی، در دو حالت مقاومت ثابت (R) و امپدانس وابسته به فرکانس مدل سازی شده است [۱۸-۱۹].

با طول کمتر از ۳۰m استفاده می‌شود. در این روش برای شبیه‌سازی دکل از یک خط بدون تلفات با امپدانس موجی استفاده می‌شود [۲۱]. دکل‌ها بر اساس یک دکل واقعی در یک شبکه توزیع، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، مدل‌سازی گردیدند. برای دکل‌های کوچک (زیر ۳۰m)، از نظر فیزیکی، شبیه‌سازی با استفاده از مدل خطی ساده به جای مدل خط انتقال، مناسب‌تر است و نتایج حاصل از این‌رو به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است. به منظور مدل‌سازی دکل‌های کوچک، رابطه زیر ارائه شده است.

$$Z = 60 \left[ \ln \left( \frac{H}{R} \right) - 1 \right] \quad (۶)$$

$$R = \frac{r_1 b_2 + r_2 H + r_3 b_1}{2H} \quad (۷)$$



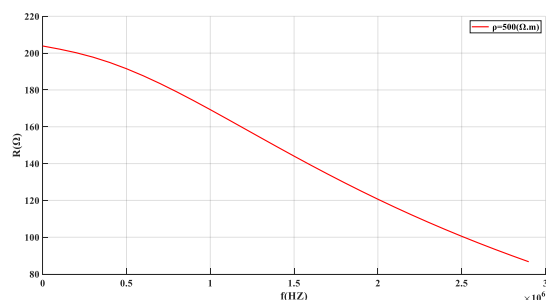
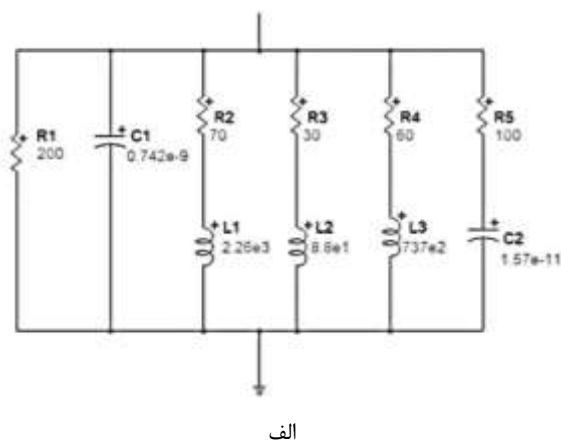
شکل (۷): مشخصات هندسی دکل مورد استفاده در این مقاله

جهت بررسی تأثیر سیم گارد و نصب برق‌گیر در شبکه توزیع در این مقاله دکل بتنی مطابق شکل (۸) شبیه‌سازی شده است.

## ۲-۶. مدل‌سازی مقره

مقره‌ها برای عایق کردن خطوط شبکه توزیع از تیرها استفاده می‌شوند. علاوه بر این، یکی از وظایف مهم مقره‌ها تحمل تنش‌ها و نیروهای مکانیکی ناشی از خطوط است. بنابراین، مقره‌ها برای خطوط هوایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، زیرا در صورت بروز خطابه علت خرابی یا ناکارآمدی مقره، خط از شبکه جدا شده و ممکن است باعث خسارت به مصرف‌کننده یا تولیدکننده گردد [۲۰].

ساخته می‌شود. با توجه به این واقعیت که رسانایی خاک و گذردهی نسبی یک رفتار وابسته به فرکانس را در دامنه فرکانسی نشان می‌دهند، استفاده از یک مدل دقیق از خاک می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر میدان‌های الکترومغناطیسی تابشی صاعقه و ولتاژ باقی‌مانده برق‌گیر کمک کند. از آنجاکه تمام محاسبات در روش ممان در حوزه فرکانس انجام می‌شود، وابستگی فرکانسی پارامترهای خاک به راحتی در محاسبات بیان می‌شود [۲۱]. همان‌طور که بیان شد در این مقاله از یک الکتروود عمودی به طول ۲.۵m و شعاع ۶mm برای مدل‌سازی سیستم زمین فرکانسی استفاده شده است. از آنجایی که استفاده از سیم گارد در مناطق سنگلاخی با مقاومت بالا ضروری است و یکی از اهداف این مقاله تأثیر راهکار حفاظتی سیم گارد است لذا سیستم زمین با مقاومت بالا در نظر گرفته شده است. امپدانس وابسته به فرکانس سیستم زمین و همچنین مدار معادل آن برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTD-RV برای مقاومت ویژه  $500 \Omega m$  در شکل (۶) نشان داده شده است.



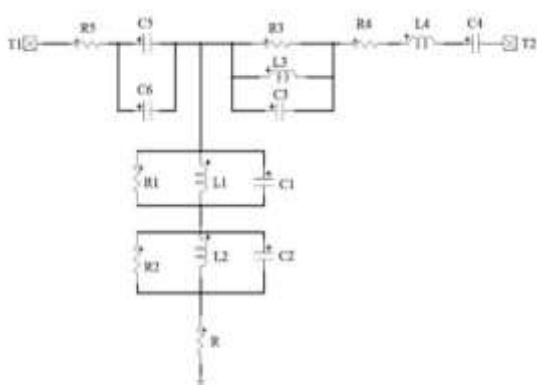
ب

شکل (۶): مدل فرکانسی سیستم زمین با استفاده از روش ممان الف: مدل مداری سیستم زمین فرکانسی ب: منحنی تغییرات  $p$  بر حسب فرکانس

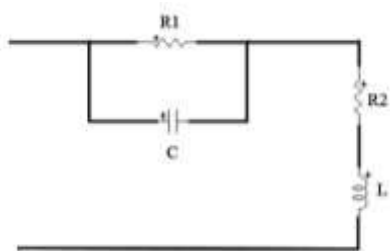
## ۲-۵. مدل‌سازی دکل

برای شبیه‌سازی دکل در این مقاله از مدل خطی دکل استفاده شده است. از مدل خطی دکل جهت مدل‌سازی دکل‌هایی

است. در همین راستا، استفاده از مدلی دقیق‌تر برای ترانسفورماتور منجر به نتایج شبیه‌سازی بهتر و قابل‌اعتمادتر می‌شود. در این مقاله، از مدل RLC برای بارها استفاده شده است. این مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌تواند رفتار گذرای فرکانس بالا را به صورت مؤثرتری بازنمایی کند [۲۵]. مدل بار RLC به صورت گرافیکی در شکل (۱۰) نشان داده شده و مقادیر پارامترهای متناظر آن در جدول (۲) ارائه شده‌اند.



شکل (۹): مدل ترانسفورماتور استفاده شده در این مقاله



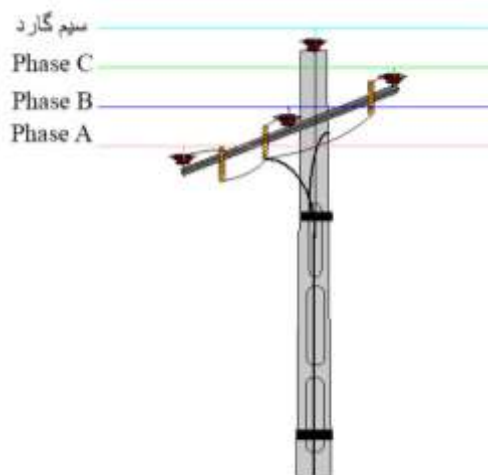
شکل (۱۰): مدل ترانسفورماتور استفاده شده در این مقاله

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مربوط به مدل بار RLC

C (nF)	L (μH)	R <sub>۱</sub> (Ω)	R <sub>۲</sub> (Ω)
۱۰۰	۵	۱۰۰	۲

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

بررسی یک طرح حفاظتی در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه تنها از طریق پیاده‌سازی سناریوهای حفاظتی در شبکه امکان‌پذیر است. در این مقاله، به ارزیابی و تحلیل تأثیر وجود برق‌گیر و سیم‌گارد در شبکه توزیع پرداخته شده است. این بخش به بررسی راهکارهای حفاظتی در حالت برخورد غیرمستقیم (برخورد صاعقه با سیم‌گارد) و برخورد مستقیم صاعقه با هادی فاز اختصاص دارد. هدف این مقاله بررسی سیستم زمین فرکانسی و نصب سیم‌گارد و برق‌گیر در مناطق سنگلاخی است. به همین منظور، از سیستم زمین فرکانسی با امپدانس  $200\ \Omega$  (مقاومت ویژه  $500\ \Omega\text{m}$ ) مناسب برای مناطق سنگلاخی) استفاده شده و نتایج آن ارائه گردیده است.



شکل (۸): دکل شبیه‌سازی شده در این مقاله

برخورد صاعقه با شبکه توزیع موجب ایجاد اضافه ولتاژهایی در زنجیره مفره می‌شود. در صورتی که این اضافه ولتاژها از مقدار CFO بیشتر شوند، اتصال کوتاه در دو سر زنجیره مفره رخ می‌دهد یا به عبارت دیگر، زنجیره مفره دچار شکست عایقی می‌شود و جریان تخلیه از آن عبور می‌کند [۲۲]. شبیه‌سازی زنجیره مفره و محاسبه مشخصات آن به عواملی نظیر مشخصات صاعقه، مشخصات ولتاژ بهره‌برداری و ویژگی‌های دکل بستگی دارد. در نرم‌افزار EMTP-RV برای شبیه‌سازی مفره از معادله (۸) استفاده شده است [۲۳].

$$\int_{t_0}^t \left( |V_{gap}(t)| - V_0 \right) dt \geq D \quad (8)$$

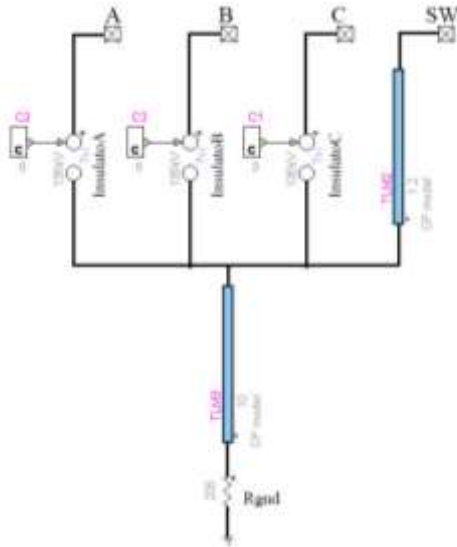
### ۷-۲. مدل‌سازی ترانسفورماتور

برای بررسی اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه در شبکه توزیع، لازم است یک مدل با فرکانس بالا از ترانسفورماتور توزیع توسعه داده شود. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ترانسفورماتورهای سیستم قدرت وجود دارد که در این میان، مدلی که در شکل (۹) به صورت شما تیک نشان داده شده، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی ترانسفورماتور به کاررفته در این تحقیق بر پایه نظریه شبکه دو پورت و معادل‌سازی T استوار است [۲۴]. در این مدل، پارامترهای توصیفی از طریق آزمایش مدارباز و با استفاده از دو مقدار متفاوت فرکانس تشدید تعیین می‌شوند. افزون بر این، این نوع مدل‌سازی ترانسفورماتور برای بازه فرکانسی ۱ kHz تا ۱۰ MHz و در هر دو شرایط بی‌باری و بارداری کامل مناسب است.

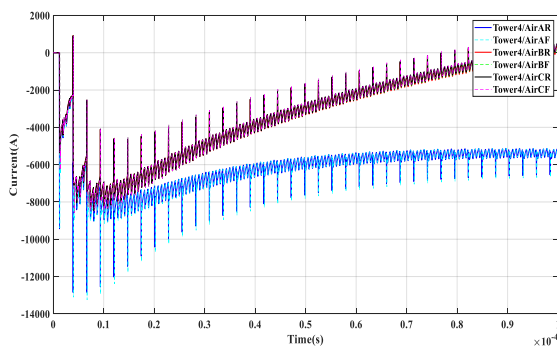
### ۸-۲. مدل‌سازی بار

سطح اضافه ولتاژ در سیستم توزیع به شدت به سطح بار وابسته

### ۳-۱. برخورد غیرمستقیم (برخورد صاعقه باسیم گارد)



شکل (۱۱): مدل سازی دکل حالت اول در نرم افزار EMTP-RV



شکل (۱۲): جریان عبوری از زنجیره مقره های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰kA

در جدول (۳) شکست عایقی زنجیره مقره در کل شبکه در اثر برخورد صاعقه با دامنه های مختلف به سیم گارد نمایش داده شده است. در این جدول برای نمایش شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین مقاومتی ساده با R و شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین فرکانسی با F نمایش داده شده است. به طور مثال هنگام برخورد صاعقه ۱۰kA به سیم گارد جریان ناشی از صاعقه از طریق سیم گارد به سیستم زمین منتقل می شود و جریان برگشتی صاعقه از سیستم زمین به هادی فازها برای شکست عایقی زنجیره مقره کافی نبوده و هیچ شکست عایقی در زنجیره مقره ثبت نشده است.

#### حالت دوم: نصب برق گیر بر روی فازهای A

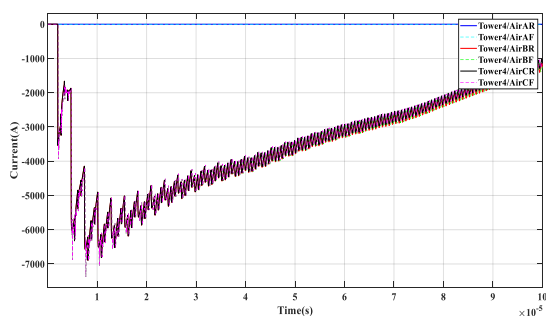
جهت بررسی حالت دوم مطابق شکل (۱۳) بر روی همه ی دکل های مجهز به سیم گارد، برق گیر در فاز A نصب شده است (نصب برق گیر بر روی فازهای A شبکه).

سیم گارد به منظور جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه با هادی فاز استفاده می شود. در بسیاری از موارد، به دلیل فضای حفاظتی که توسط سیم گارد ایجاد می شود، صاعقه ابتدا به سیم گارد برخورد کرده و موجب ایجاد قوس برگشتی می گردد. با برخورد صاعقه به سیم گارد و حرکت موج صاعقه به طرفین، اضافه ولتاژ بر روی فازهای دکل ایجاد می شود. این اضافه ولتاژ وقتی بر روی مقره های متصل به فازها قرار می گیرد، در صورتی که استقامت عایقی کافی وجود نداشته باشد، منجر به اتصال کوتاه خواهد شد. از آنجاکه این اتصال کوتاه از سمت دکل به هادی های فاز رخ می دهد، به آن قوس برگشتی اطلاق می شود. قرار گرفتن سیم گارد بالای سیم های فاز، ناحیه ای حفاظتی را ایجاد می کند که مانع از برخورد مستقیم صاعقه با فازها می شود. در این طرح حفاظتی، احتمال برخورد صاعقه به فازها به طور کامل صفر نیست و در هنگام برخورد صاعقه با گارد، احتمال شکست عایقی در شبکه وجود دارد. با توجه به فاصله کوتاه بین دکل های ۲۰kV (فاصله ۳۰m)، احتمال جذب تمامی صاعقه های تولید شده توسط دکل ها بالا است. در این مقاله در صورت برخورد صاعقه باسیم گارد ۴ حالت مختلف از وجود برق گیر در شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در حالت اول هیچ برق گیری بر روی فازهای شبکه نصب نشده است، در حالت دوم در هر دکل تنها یک برق گیر روی فاز A قرار گرفته است همچنین در حالت سوم در هر دکل دو برق گیر بر روی فازهای A, C نصب شده است و فاز B دارای برق گیر نیست و در نهایت حالت چهارم تمامی فازهای شبکه دارای برق گیر می باشند و نتایج حاصل در ادامه بیان شده است.

#### حالت اول: عدم نصب برق گیر بر روی فازهای شبکه

جهت بررسی حالت اول شبکه ای با ۷ دکل بتنی مطابق شکل (۱۱) استفاده شده است که هر دکل شامل سیم گارد و هر فاز فقط شامل زنجیره مقره است (بدون نصب برق گیر بر روی فازهای شبکه).

در این حالت امواج صاعقه با دامنه های مختلف مطابق جدول (۲) به سیم گارد دکل شماره ۴ برخورد نموده است. پس از برخورد صاعقه به سیم گارد دکل شماره ۴ جریان عبوری از مقره های دکل شماره ۴ در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده برای صاعقه ۶۰kA در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۲) در اثر برخورد صاعقه ۶۰kA به سیم گارد، در شبکه با سیستم زمین مقاومتی ساده و فرکانسی هر ۳ مقره متصل به فازهای دکل شماره ۴ در اثر پدیده صاعقه برگشتی دچار شکست عایقی می شوند (تخلیه صاعقه از طریق سیم گارد به سیستم زمین و شارش جریان برگشتی از سیستم زمین به سمت فازها).



شکل (۱۴): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰ kA

جدول (۴): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مقره ناشی از برخورد صاعقه به سیم گارد (حالت دوم)

شماره دکل	۱۲۰kA	۹۰kA	۶۰kA	۳۰kA	۱۰kA	شماره دکل
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۴
B	RF	RF	RF	-	-	
C	RF	RF	RF	-	-	
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۵ و ۳
B	RF	-	-	-	-	
C	RF	-	-	-	-	
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۶ و ۲
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۷ و ۱
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	

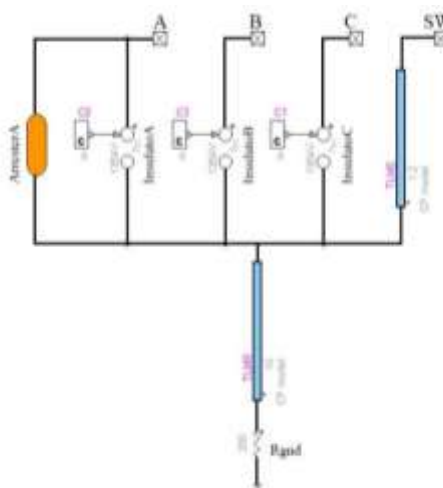
یکی دیگر مواردی که در این مقاله به بررسی و ارزیابی آن پرداخته شده است، انرژی جذب شده برق‌گیرهای شبکه است. به طور مثال در شکل (۱۵) انرژی جذب شده برق‌گیر متصل به فاز A دکل شماره ۴ در اثر برخورد صاعقه ۶۰ kA برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده نشان داده شده است. همچنین جدول (۵) انرژی جذب شده برق‌گیرهای نصب شده بر روی دکل‌ها در این حالت نشان داده شده است.

#### حالت سوم: نصب برق‌گیر بر روی فازهای A, C

جهت بررسی حالت سوم مطابق شکل (۱۴) بر روی همه دکل‌های مجهز به سیم گارد، برق‌گیر علاوه بر فاز A در فاز C نیز نصب شده است (نصب برق‌گیر بر روی فازهای A و C شبکه). در این حالت امواج صاعقه با دامنه‌های مختلف مطابق جدول (۶) به سیم گارد دکل شماره ۴ برخورد نموده است. پس از برخورد صاعقه به سیم گارد دکل شماره ۴ جریان عبوری از مقره‌های دکل شماره ۴ در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده برای صاعقه ۶۰ kA در شکل (۱۷) نمایش داده شده است.

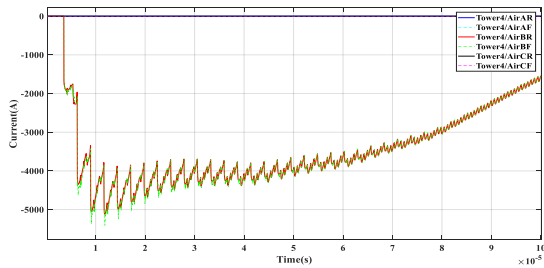
جدول (۳): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مقره ناشی از برخورد صاعقه به سیم گارد (حالت اول)

شماره دکل	۱۲۰kA	۹۰kA	۶۰kA	۳۰kA	۱۰kA	شماره دکل
A	RF	RF	RF	RF	-	دکل شماره ۴
B	RF	RF	RF	RF	-	
C	RF	RF	RF	RF	-	
A	RF	-	-	-	-	دکل شماره ۵ و ۳
B	RF	-	-	-	-	
C	RF	-	-	-	-	
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۶ و ۲
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
A	-	-	-	-	-	دکل شماره ۷ و ۱
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	



شکل (۱۳): مدل‌سازی دکل حالت دوم در نرم‌افزار EMTP-RV

در این حالت امواج صاعقه با دامنه‌های مختلف مطابق جدول (۴) به سیم گارد دکل شماره ۴ برخورد نموده است. پس از برخورد صاعقه به سیم گارد دکل شماره ۴ جریان عبوری از مقره‌های دکل شماره ۴ در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده برای صاعقه ۶۰ kA در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. به دلیل نصب برق‌گیر بر روی فاز A مقره متصل به این فاز دچار شکست عایقی نشده است ولی مقره‌های متصل به فازهای B, C در اثر صاعقه برگشتی از سیستم زمین شکست عایقی رخ داده است. شکست عایقی زنجیره مقره شبکه در اثر برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف به سیم گارد در جدول (۴) نمایش داده شده است. در این جدول برای نمایش شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین مقاومتی ساده با R و شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین فرکانسی با F نمایش داده شده است.



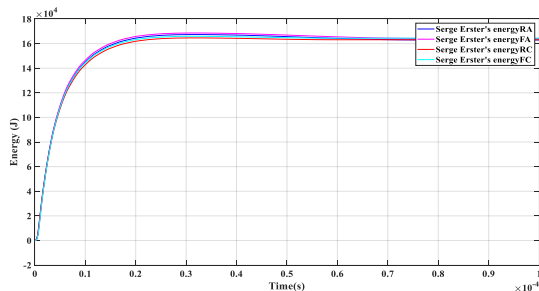
شکل (۱۷): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰kA

جدول (۶): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مقره ناشی از برخورد صاعقه به سیم گارد (حالت سوم)

شماره دکل	۱۰kA	۳۰kA	۶۰kA	۹۰kA	۱۲۰kA
دکل شماره ۴	A	-	-	RF	-
	B	-	-	RF	-
	C	-	-	-	-
دکل شماره ۵ و ۳	A	-	-	-	RF
	B	-	-	-	-
	C	-	-	-	-
دکل شماره ۶ و ۲	A	-	-	-	-
	B	-	-	-	-
	C	-	-	-	-
دکل شماره ۷	A	-	-	-	-
	B	-	-	-	-
	C	-	-	-	-

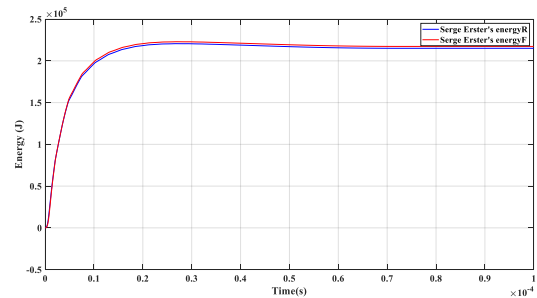
در شکل (۱۸) انرژی جذب شده برق گیر A,C دکل شماره ۴ هنگام برخورد صاعقه ۶۰kA برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده نشان داده شده است.

جدول (۷) انرژی جذب شده برق گیرهای دکل شماره ۴ هنگام برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف هنگام برخورد به سیم گارد را نشان می‌دهد. مطابق این جدول و نتایج حاصل هرچه مقدار پیک جریان صاعقه کمتر باشد انرژی جذب شده ۲ برق گیر A,C اختلاف زیادی دارند ولی هرچه مقدار صاعقه افزایش میابد میزان انرژی جذب شده ۲ برق گیر به هم نزدیک تر می‌شود.



شکل (۱۸): انرژی جذب شده برق گیر A,C در اثر برخورد صاعقه ۶۰kA

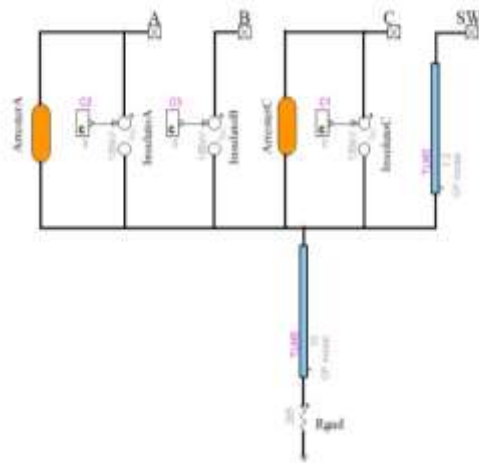
مطابق شکل (۱۷) به دلیل نصب برق گیر بر روی فاز A و C شبکه شکست عایقی در این فازها ثبت نشده است و تنها در فاز B هم در حالت فرکانسی و هم در حالت مقاومتی ساده به دلیل صاعقه برگشتی از سیستم زمین شکست عایقی رخ داده است. در جدول (۶) شکست عایقی زنجیره مقره در کل شبکه در اثر برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف به سیم گارد نمایش داده شده است. در این جدول برای نمایش شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین مقاومتی ساده با R و شکست عایقی مقره در حالت سیستم زمین فرکانسی با F نمایش داده شده است.



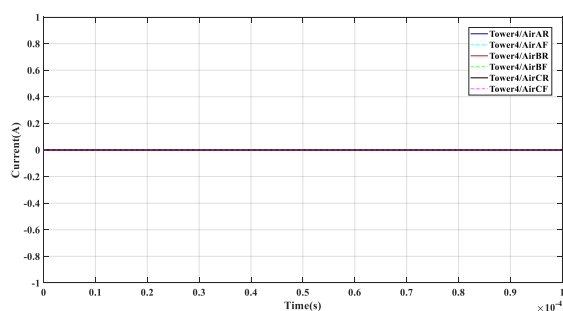
شکل (۱۵): انرژی جذب شده برق گیر A در اثر برخورد صاعقه ۶۰kA

جدول (۵): انرژی برق گیر جذب شده A دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

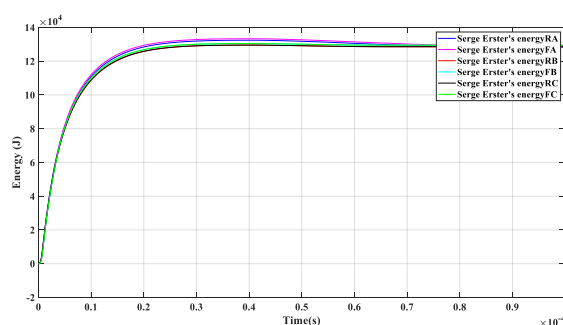
جریان صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۱۰kA	-	-	-	-	$4.745 \times 10^3$	$4.765 \times 10^3$
۳۰kA	-	-	-	-	$6.30 \times 10^4$	$6.25 \times 10^4$
۶۰kA	-	-	-	-	$2.23 \times 10^5$	$2.21 \times 10^5$
۹۰kA	-	-	-	-	$4.80 \times 10^5$	$4.75 \times 10^5$
۱۲۰kA	-	-	-	-	$8.30 \times 10^5$	$8.20 \times 10^5$



شکل (۱۶): مدل سازی دکل حالت سوم در نرم افزار EMTP-RV



شکل (۲۰): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰ kA



شکل (۲۱): انرژی جذب‌شده برق‌گیرهای A,B,C در اثر برخورد صاعقه ۶۰ kA

جدول (۸): انرژی جذب‌شده برق‌گیر دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

جریان صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۱۰kA	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
	۲.۱۰	۲.۱۰	۲.۱۰	۲.۱۰	۳.۱۴	۳.۱۴
۳۰kA	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$
	۳.۰۳	۳.۰۱	۳.۰۳	۳.۰۱	۳.۲۵	۳.۲۲
۶۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۱.۳۰۴۱	۱.۲۹۵	۱.۳۰۴۱	۱.۲۹۵	۱.۳۳	۱.۳۲
۹۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۲.۹۶۰۱	۲.۹۳۶	۲.۹۶	۲.۹۳۶	۳.۰	۲.۹۷
۱۲۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۵.۳۱	۵.۲۶	۵.۳۱	۵.۲۶	۵.۳۵	۵.۳۱

### ۳-۲. برخورد مستقیم (برخورد صاعقه با هادی فاز)

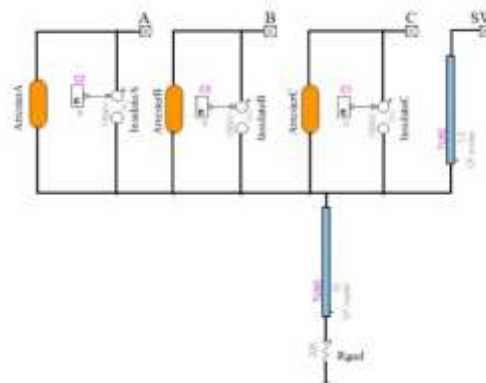
با توجه به زاویه حفاظتی سیم‌گارد نسبت به فاز و عدم توانایی آن در پوشش دهی کامل تمامی صاعقه‌های احتمالی، برخورد صاعقه به خطوط فاز اجتناب‌ناپذیر است. در واقع، زمانی که صاعقه به فاز در حضور سیم‌گارد برخورد می‌کند، سیستم حفاظتی دچار خطا شده و موجب ایجاد اضافه ولتاژ تحمیلی بر روی سیستم عایقی

جدول (۷): انرژی جذب‌شده برق‌گیر دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

جریان صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۱۰kA	$\times 10^3$	$\times 10^3$	-	-	$\times 10^3$	$\times 10^3$
	۳.۷۰	۳.۷۱			۳.۷۲	۲.۷۱
۳۰kA	$\times 10^4$	$\times 10^4$	-	-	$\times 10^4$	$\times 10^4$
	۴.۲۵	۴.۲۰			۴.۰۵	۴.۰۰
۶۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۱.۶۸	۱.۶۷			۱.۶۵	۱.۶۴
۹۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۳.۷۰	۳.۶۶			۳.۶۵	۳.۶۰
۱۲۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	$\times 10^5$	$\times 10^5$
	۶.۵۰	۶.۴۰			۶.۴۵	۶.۳۵

### حالت چهارم: نصب برق‌گیر بر روی تمامی فازها

جهت بررسی حالت چهارم مطابق شکل (۱۹) بر روی همه‌ی دکل‌های مجهز به سیم‌گارد، برق‌گیر در همه‌ی فازها نصب شده است (نصب برق‌گیر بر روی فاز A و B و C شبکه).



شکل (۱۹): مدل‌سازی دکل حالت چهارم در نرم‌افزار EMTP-RV

در این حالت امواج صاعقه با دامنه‌های مختلف به سیم‌گارد دکل شماره ۴ برخورد نموده است. پس از برخورد صاعقه به سیم‌گارد به دلیل نصب برق‌گیر بر روی تمامی فازهای شبکه جریان عبوری از زنجیره مقره‌ها در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده برابر صفر است. پس از برخورد صاعقه به سیم‌گارد تمامی جریان‌های اعمالی به شبکه از طریق برقگیرها به سیستم زمین منتقل می‌شود و زنجیره مقره‌های شبکه دچار شکست عایقی نمی‌شوند (مطابق شکل (۲۰)).

در شکل (۲۱) انرژی جذب‌شده برق‌گیرهای A,B,C دکل شماره ۴ را در اثر برخورد صاعقه ۶۰kA برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده نمایش داده شده است و همچنین در جدول (۸) انرژی جذب‌شده برق‌گیرهای نصب‌شده در این حالت را برای دامنه‌های مختلف صاعقه نشان داده شده است.

سیستم زمین در این مدل متناسب با فرکانس تغییر کرده و در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد این کاهش مقاومت باعث می‌شود که جریان صاعقه به راحتی تخلیه شده و اضافه ولتاژهای القایی کاهش پیدا کند. در نتیجه، احتمال شکست عایقی تجهیزات کاهش می‌یابد. در تمامی حالت‌های بررسی شده در این پژوهش اختلاف ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مفره در حالت مقاومتی بیشتر از حالت فرکانسی است ولیکن در برخی حالت‌ها این اختلاف ولتاژهای اندازه‌گیری شده به قدری نیست که موجب تفاوت در شکست عایقی در دو حالت فرکانسی و مقاومتی ساده شود به همین دلیل در برخی از حالت‌ها شکست‌های عایقی ثبت شده در دو حالت فرکانسی و مقاومتی ساده کاملاً باهم برابر است.

جدول (۹): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مفره ناشی از برخورد صاعقه به فاز C (حالت پنجم)

شماره دکل	۱۰kA	۲۰kA	۶۰kA	۹۰kA	۱۲۰kA
دکل شماره ۴	A	-	-	RF	RF
	B	-	-	RF	RF
	C	RF	RF	RF	RF
دکل شماره ۵۳	A	-	-	-	RF
	B	-	-	-	RF
	C	-	RF	RF	RF
دکل شماره ۶۲	A	-	-	-	-
	B	-	-	-	-
	C	-	RF	RF	RF
دکل شماره ۷۱	A	-	-	-	-
	B	-	-	-	-
	C	-	-	R	R

#### حالت ششم: نصب برق گیر بر روی فاز A شبکه (برخورد مستقیم)

جهت بررسی حالت ششم بر روی همه‌ی دکل‌های مجهز به سیم گارد، برق گیر در فاز A نصب شده است (نصب برق گیر بر روی فازهای A شبکه) و صاعقه مستقیماً به فاز C دکل شماره ۴ برخورد می‌کند.

شکل (۲۳) جریان عبوری از مفره‌های متصل به دکل شماره ۴ را نشان می‌دهد که جریان صاعقه مستقیماً به فاز C شبکه برخورد کرده است. مطابق شکل (۲۳) فقط مفره‌های متصل به فاز C در دو حالت فرکانسی و مقاومتی ساده دچار شکست عایقی شده است و دو مفره متصل به فازهای A, B شکست عایقی رخ نداده است.

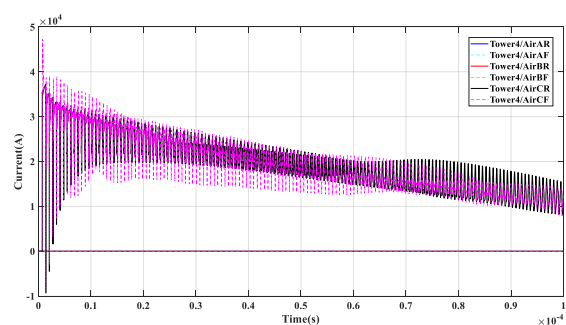
پس از برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف به فاز C دکل شماره ۴ شکست عایقی مفره‌های دکل شماره ۴ در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده در جدول (۱۰) نمایش داده شده است.

در این قسمت یک سؤال مطرح می‌شود که اگر صاعقه به فازی برخورد کند که دارای برق گیر است مفره‌ها در چه وضعیتی قرار می‌گیرند؟

می‌گردد. این پدیده به عنوان خطای حفاظت (SF) شناخته می‌شود. در برخورد مستقیم صاعقه به هادی فاز، یک صاعقه با شدت‌های ۱۰,۳۰,۶۰,۹۰,۱۲۰ kA به یکی از فازهای شبکه برخورد می‌کند که در این مقاله صاعقه به فاز C دکل شماره ۴ برخورد می‌کند و حالت‌های زیر مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### حالت پنجم: عدم نصب برق گیر بر روی فازهای شبکه (برخورد مستقیم)

جهت بررسی حالت پنجم مانند حالت اول بر روی هیچ دکلی برق گیر نصب نشده است با این تفاوت که در این حالت صاعقه به جای برخورد با سیم گارد صاعقه اعمالی مستقیماً به فاز C دکل شماره ۴ برخورد می‌کند. پس از برخورد صاعقه به فاز C دکل شماره ۴ جریان عبوری از مفره‌های دکل شماره ۴ در دو حالت سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده برای صاعقه ۶۰kA در شکل (۲۲) نمایش داده شده است. مطابق شکل (۲۲) در این حالت فقط مفره متصل به فاز C در ۲ حالت فرکانسی و مقاومتی ساده دچار شکست عایقی می‌شوند و جریان صاعقه از طریق مفره متصل به فاز C به سیستم زمین منتقل می‌شود.



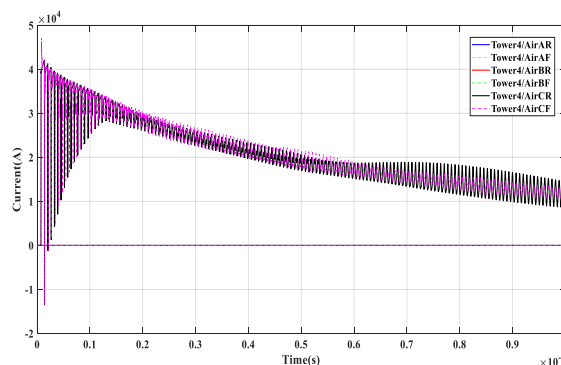
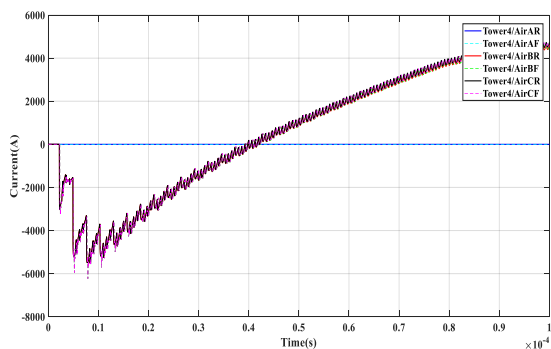
شکل (۲۲): جریان عبوری از زنجیره مفره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰kA

مطابق شکل (۲۲) در اثر برخورد مستقیم ۶۰kA به فاز C تنها مفره متصل به فاز C دچار شکست عایقی شده است و با شکسته شدن زنجیره مفره فاز C جریان صاعقه به سیستم زمین منتقل می‌شود و اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مفره متصل به ۲ فاز دیگر برای شکستن زنجیره مفره کافی نیست.

در جدول (۹) شکست عایقی زنجیره مفره در کل شبکه در اثر برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف به سیم گارد نمایش داده شده است. در این جدول برای نمایش شکست عایقی مفره در حالت سیستم زمین مقاومتی ساده با R و شکست عایقی مفره در حالت سیستم زمین فرکانسی با F نمایش داده شده است.

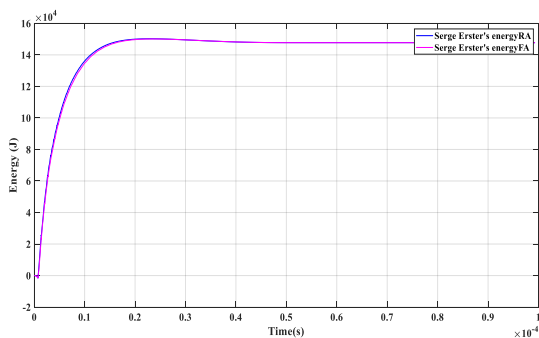
در مدل مقاومتی ساده سیستم زمین به صورت یک مقاومت ثابت مدل سازی شده است. مدل فرکانسی سیستم زمین، رفتار واقعی‌تر و دقیق تری نسبت به مدل مقاومتی دارد، زیرا مقدار مقاومت

انرژی جذب شده برق گیر A دکل شماره ۴ هنگام برخورد صاعقه با دامنه‌های مختلف به فاز C برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده در شکل (۲۵) نشان داده شده است. همچنین انرژی جذب شده برق گیرهای موجود در این حالت در جدول (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۲۳): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰ kA

شکل (۲۴): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰ kA



شکل (۲۵): انرژی جذب شده برق‌گیر A در اثر برخورد صاعقه ۶۰ kA

جدول (۱۱): انرژی جذب شده برق‌گیر دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

جریان صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۱۰kA	$\times 10^2$	$\times 10^2$	-	-	-	-
۳۰kA	۶.۲۵	۶.۵۳	-	-	-	-
۶۰kA	$\times 10^4$	$\times 10^4$	-	-	-	-
۹۰kA	۳.۰۳	۳.۰	-	-	-	-
۹۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	-	-
۹۰kA	۱.۵	۱.۵	-	-	-	-
۹۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	-	-
۹۰kA	۳.۳۳	۳.۳۰	-	-	-	-
۱۲۰kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	-	-	-	-
۱۲۰kA	۶.۰	۵.۹۶	-	-	-	-

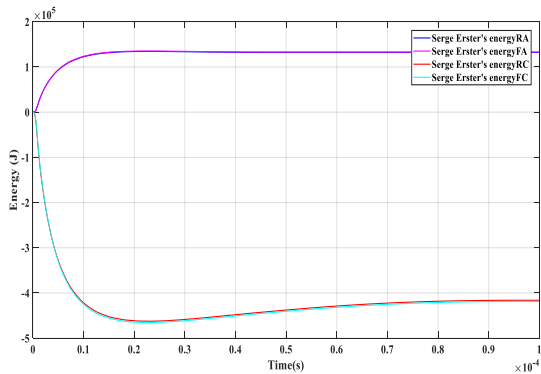
جدول (۱۰): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مقره ناشی از برخورد صاعقه به فاز C (حالت ششم)

شماره دکل	۱۲۰kA	۹۰kA	۶۰kA	۳۰kA	۱۰kA
دکل شماره ۴	-	RF	-	-	-
دکل شماره ۵ و ۳	RF	RF	RF	RF	-
دکل شماره ۶ و ۲	-	RF	RF	RF	-
دکل شماره ۷ و ۱	RF	RF	RF	-	-

برای پاسخ به این سؤال شبیه‌سازی را با برخورد مستقیم صاعقه ۶۰kA به فاز A دکل شماره ۴ که دارای برق‌گیر است تکرار می‌کنیم. در این حالت مطابق شکل (۲۴) در اثر برخورد صاعقه ۶۰kA به فاز A دکل شماره ۴ جریان صاعقه از طریق عبور از برق‌گیر به سیستم زمین منتقل می‌شود و سپس جریان صاعقه برگشتی از سیستم زمین وارد فازهای B,C شده و باعث شکست عایقی مقره‌های متصل به این دو فاز می‌شود.

در حالت ۱ (که صاعقه به فاز C برخورد می‌کند که برق‌گیر ندارد و در این حالت فاز A دارای برق‌گیر است) باحالت ۲ (که صاعقه به فاز A که یک فاز دارای برق‌گیر است برخورد می‌کند)، در این است که در حالت ۱ جریان صاعقه با شکستن مقره متصل به فاز C وارد سیستم زمین شده و جریان برگشتی وارد برق‌گیر فاز A و سیم‌گارد می‌شود و مقره‌های فاز B,C دچار شکست عایقی نمی‌شوند ولی در حالت ۲ صاعقه زمانی که به فاز A برخورد می‌کند با عبور از برق‌گیر وارد سیستم زمین شده و جریان برگشتی از سیم‌گارد و مقره‌های فاز B,C عبور کرده و باعث شکست عایقی در آن‌ها می‌شود.

حالت است. علت منفی شدن انرژی جذب شده برق گیر C برخورد مستقیم صاعقه با فاز C است. در حالت‌هایی که انرژی جذب شده برق گیر مثبت بود صاعقه برگشتی از سیستم زمین به سمت هادی فاز اتفاق می‌افتاد ولی در این حالت به دلیل برخورد مستقیم صاعقه به فاز C و شارش جریان صاعقه از فاز C به سمت سیستم زمین مقادیر انرژی جذب شده برق گیر منفی شده است. همان طور که در این پژوهش بیان شده است، با فرکانسی در نظر گرفتن سیستم زمین جریان صاعقه به راحتی تخلیه شده و اضافه ولتاژهای القایی کاهش پیدا می‌کند یا به عبارتی می‌توان گفت در سیستم زمین فرکانسی جریان بیشتری به سیستم زمین منتقل می‌شود در نتیجه جریان بیشتری از برق گیرهای شبکه عبور می‌کند و به همین دلیل انرژی جذب شده برق گیر در حالت فرکانسی از حالت مقاومتی ساده بیشتر می‌شود که نتایج ارائه شده در جدول (۱۳) به وضوح این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل (۲۷): انرژی جذب شده برق گیرهای A, C در اثر برخورد صاعقه ۶۰ kA

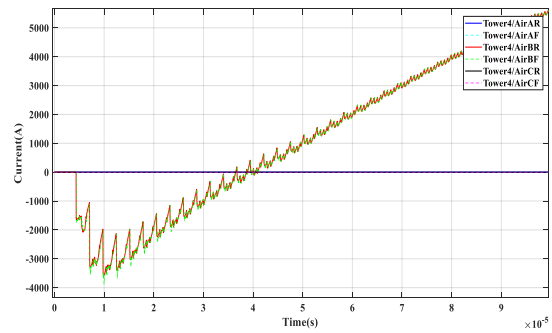
جدول (۱۳): انرژی جذب شده برق گیر دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

فاز C	فاز B		فاز A		جریان صاعقه
	F	R	F	R	
$\times 10^4$ -۱.۰۲	$\times 10^4$ -۱.۰۱	-	-	$\times 10^3$ ۱.۴	$\times 10^3$ ۱.۴
$\times 10^5$ -۱.۱۱	$\times 10^5$ -۱.۱۰	-	-	$\times 10^4$ ۲.۷۵	$\times 10^4$ ۲.۷۵
$\times 10^5$ -۴.۶۵	$\times 10^5$ -۴.۶۳	-	-	$\times 10^5$ ۱.۳۵	$\times 10^5$ ۱.۳۴
$\times 10^6$ -۱.۰۷	$\times 10^6$ -۱.۰۶	-	-	$\times 10^5$ ۳.۱۳	$\times 10^5$ ۳.۱۰
$\times 10^6$ -۱.۹۲	$\times 10^6$ -۱.۹۱	-	-	$\times 10^5$ ۵.۶۸	$\times 10^5$ ۵.۶۵

حالت هفتم : نصب برق گیر بر روی فاز C, A, شبکه (برخورد مستقیم)

جهت بررسی حالت هفتم بر روی تمامی دکل‌های مجهز به سیم گارد، برق گیر در فازهای A, C نصب شده است (نصب برق گیر بر روی فازهای A, C شبکه) و صاعقه مستقیماً به فاز C دکل شماره ۴ برخورد می‌کند.

در شکل (۲۶) جریان عبوری از مقره های دکل شماره ۴ در اثر برخورد مستقیم صاعقه ۶۰ kA به فاز C نمایش داده شده است. مطابق شکل (۲۶) به دلیل نصب برق گیر بر روی فازهای A, C شکست عایقی در زنجیره مقره رخ نداده است ولی به دلیل عدم وجود برق گیر در فاز B شبکه شکست عایقی رخ داده است.



شکل (۲۶): جریان عبوری از زنجیره مقره‌های دکل شماره ۴ ناشی از صاعقه ۶۰ kA

جدول (۱۲): احتمال وقوع شکست عایقی زنجیره مقره ناشی از برخورد صاعقه به فاز C (حالت هفتم)

شماره دکل	۱۰kA	۳۰kA	۶۰kA	۹۰kA	۱۲۰kA
دکل شماره ۴ (A, B, C)	-	-	-	-	-
دکل شماره ۵۳ (A, B, C)	-	-	-	-	-
دکل شماره ۶۲ (A, B, C)	-	-	-	-	-
دکل شماره ۷۱ (A, B, C)	-	-	-	-	-

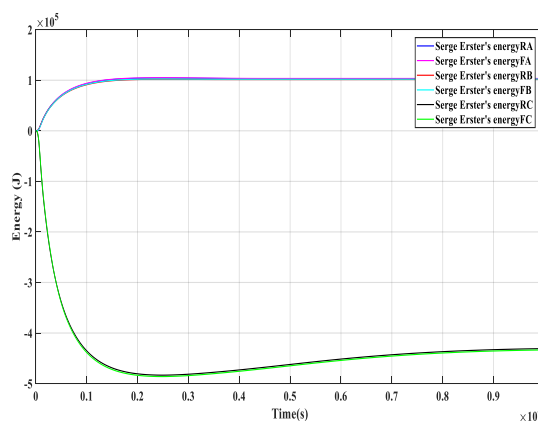
در شکل (۲۷) انرژی جذب شده برق گیر فاز A, C هنگام برخورد صاعقه ۶۰ kA به فاز C دکل شماره ۴ برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده نشان داده شده است و جدول (۱۳) نیز نشان دهنده مقادیر انرژی جذب شده برق گیرهای شبکه در این

۴.۶۷	۴.۷	۴.۶۲	۴.۶۵	-۱.۹۷	-۱.۹۹
------	-----	------	------	-------	-------

**حالت هشتم: نصب برق گیر بر روی تمامی شبکه (برخورد مستقیم)**

جهت بررسی حالت هشتم بر روی تمامی دکل‌های مجهز به سیم گارد، برق گیر در تمامی فازها نصب شده است (نصب برق گیر بر روی فاز A و B و C شبکه). در این حالت صاعقه با دامنه‌های مختلف مستقیماً به فاز C دکل شماره ۴ برخورد می‌کند که به دلیل نصب برق گیر بر روی تمامی فازهای شبکه هیچ شکست عایقی در زنجیره مفره رخ نمی‌دهد و تمامی جریان صاعقه ناشی از برخورد مستقیم به هادی فاز از طریق برقگیرها به زمین منتقل می‌شود.

شکل (۲۸) انرژی جذب شده برق گیرهای A, B, C دکل شماره ۴ را برای صاعقه ۶۰ kA برای سیستم زمین فرکانسی و مقاومتی ساده نشان می‌دهد و همچنین جدول (۱۴) انرژی جذب شده برق گیرهای شبکه در این حالت را برای دامنه‌های مختلف صاعقه نشان می‌دهد.



شکل (۲۸). انرژی جذب شده برق گیرهای A, B, C در اثر برخورد صاعقه ۶۰ kA

جدول (۱۴): انرژی جذب شده برق گیر دکل شماره ۴ در اثر برخورد ضربات صاعقه

جریان صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۱۰ kA	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^4$
۳۰ kA	۱.۲	۱.۲	۰.۸	۰.۸	-۱.۰۴	-۱.۰۳
۶۰ kA	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^5$	$\times 10^5$
۹۰ kA	۲.۱۵	۲.۱۰	۱.۹۹	۱.۹۵	-۱.۱۵۵	-۱.۱۵
۱۲۰ kA	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^6$
	۱.۰۵	۱.۰۵	۱.۰۲۵	۱.۰۲	-۴.۸۶	-۴.۸۳
	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^6$
	۲.۵۵	۲.۵۳	۲.۵	۲.۴۹	-۱.۱۱	-۱.۱۰
	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^6$

**۳-۳. تأثیر زاویه برخورد صاعقه به شبکه توزیع**

یکی از عوامل مهم در تحلیل اثرات صاعقه بر شبکه‌های توزیع، زاویه برخورد صاعقه نسبت به سازه‌ها و خطوط انتقال است. زاویه برخورد می‌تواند توزیع جریان صاعقه، مسیر تخلیه آن و در نهایت میزان ولتاژ القایی و تنش الکتریکی وارد بر تجهیزات را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل برای تحلیل اثر زاویه برخورد صاعقه، سناریوهای ۱ و ۵ که بیانگر وضعیت شبکه در غیاب هرگونه برق گیر بوده و از جمله بحرانی‌ترین حالات ممکن محسوب می‌شوند، مجدداً تحت زوایای مختلف برخورد صاعقه ۶۰ kA شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جدول (۱۵) و جدول (۱۶) جریان عبوری از مقره‌های دکل شماره ۴ را تحت زوایای مختلف برخورد صاعقه نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول، می‌توان نتیجه گرفت، شرایطی که صاعقه به‌صورت عمودی (زاویه نزدیک به ۹۰ درجه) به سیم گارد برخورد می‌کند، بخش اعظم جریان از طریق مسیرهای کم امپدانس مانند سیم گارد و دکل به زمین منتقل می‌شود. در این حالت، ولتاژ القایی بر روی فازها کاهش یافته و احتمال عبور جریان از طریق مقره‌ها کم‌تر است. در مقابل، هنگامی که زاویه برخورد صاعقه نسبت به خط افقی‌تر و مایل‌تر (مثلاً ۴۵ یا ۳۰ درجه) باشد، مسیر برگشت جریان به زمین پیچیده‌تر و دارای امپدانس بیشتری خواهد بود. در نتیجه، بخشی از جریان صاعقه از طریق کوپل الکترومغناطیسی به هادی‌های فاز القاشده و موجب افزایش اختلاف پتانسیل دو سر مقره‌ها می‌گردد. این پدیده می‌تواند جریان عبوری از مقره‌ها را افزایش داده و ریسک تخلیه الکتریکی یا آسیب به تجهیزات عایقی را بالا ببرد. از این‌رو، لحاظ کردن زوایای مختلف برخورد صاعقه در شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از عملکرد حفاظتی شبکه منجر شود.

جدول (۱۵). جریان عبوری از مقره‌های دکل شماره ۴ تحت زوایای مختلف برخورد صاعقه (برخورد صاعقه به سیم گارد)

زاویه برخورد صاعقه	فاز A		فاز B		فاز C	
	F	R	F	R	F	R
۹۰ درجه	۱۳.۲ kA	۱۲.۸ kA	۱.۰۵ kA	۰.۹۸ kA	۱.۱۵ kA	۱.۱ kA
۶۰ درجه	۱۴.۵ kA	۱۵ kA	۱.۱۵ kA	۱.۲۳ kA	۱.۳۴ kA	۱.۲۸ kA
۴۵ درجه	۱۶.۳ kA	۱۶.۸ kA	۱.۳۲ kA	۱.۴ kA	۱.۵۲ kA	۱.۴۵ kA

عملکرد حفاظتی سیم گارد و برق‌گیر اکسید روی در برابر ضربات صاعقه در شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل فرکانسی سیستم زمین؛ آیدامی و معصومه خودسوز

۱.۶۶	۱.۶۰	۱.۵۴	۱.۴۸	۱۸.۵	۱۸.۴	۳۰ درجه
kA	kA	kA	kA	kA	kA	

می‌کند. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب بهینه تجهیزات حفاظتی شامل برق‌گیر، سیم‌گارد و سیستم زمین با مدل فرکانسی، می‌تواند یک راهکار کارآمد برای کاهش اثرات مخرب صاعقه در شبکه‌های توزیع باشد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثرات متقابل تجهیزات حفاظتی در حضور شرایط محیطی مختلف از جمله تغییرات رطوبت خاک و مقاومت ویژه زمین نیز بررسی شود تا بتوان راهکارهای دقیق‌تری برای حفاظت شبکه ارائه داد.

## ۵- مراجع

- [۱] S. Sundarajoo and D. M. Soomro, "Under voltage load shedding and penetration of renewable energy sources in distribution systems: a review," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. ۴۳, no. ۶, pp. ۱۰۰۲-۱۰۲۰, ۲۰۲۳.  
<https://doi.org/10.1080/10228620.2023.2143191>
- [۲] J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, I. J. Lopes, W. C. Boaventura, E. N. Cardoso, and M. F. Guimarães, "Lightning protection of overhead distribution lines installed on high resistivity soil," *Electric Power Systems Research*, vol. ۲۰۹, pp. ۱۰۷۹۵۲, ۲۰۲۲.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107952>
- [۳] J. Cao, Y. Du, Y. Ding, R. Qi, B. Li, M. Chen, and Z. Li, "Comprehensive assessment of lightning protection schemes for ۱۰ kV overhead distribution lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. ۳۷, no. ۳, pp. ۲۳۲۶-۲۳۳۶, ۲۰۲۱.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3110248>
- [۴] D. O. Belko and G. V. Podporkin, "Analysis of current distribution among long-flashover arresters for ۱۰ kV overhead line protection against direct lightning strikes," in *۲۰۱۶ ۳۳rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. ۱-۶, Sept. ۲۰۱۶.  
<https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791511>
- [۵] H. Chen, Y. Du, M. Yuan, and Q. H. Liu, "Lightning-induced voltages on a distribution line with surge arresters using a hybrid FDTD-SPICE method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. ۳۳, no. ۵, pp. ۲۳۵۴-۲۳۶۳, ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2788046>
- [۶] J. Cao et al., "Design consideration of the shielding wire in ۱۰ kV overhead distribution lines against lightning-induced overvoltage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. ۳۶, no. ۵, pp. ۲۳۵۴-۲۳۶۳, ۲۰۲۱.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3031682>
- [۷] A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, and F. Rachidi, "Indirect lightning performance of distribution lines: Influence of protection devices,"

جدول (۱۶). جریان عبوری از مقره‌های دکل شماره ۴ را تحت زوایای مختلف برخورد صاعقه (برخورد صاعقه به هادی فاز)

فاز C		فاز B		فاز A		زاویه برخورد صاعقه
F	R	F	R	F	R	
۴۵.۲ kA	۳۹ kA	.	.	.	.	۹۰ درجه
۴۹.۷ kA	۴۵.۸ kA	.	.	.	.	۶۰ درجه
۵۵.۳ kA	۵۲.۲ kA	.	.	.	.	۴۵ درجه
۶۲.۱ kA	۵۸.۳ kA	۰.۳۵ kA	۰.۳۳ kA	۰.۲۵ kA	۰.۱۲ kA	۳۰ درجه

## ۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در این مقاله اشاره شد، اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه به دکل‌های توزیع یکی از چالش‌های اساسی در شبکه‌های توزیع است. به همین دلیل، برای جلوگیری از مشکلات ناشی از این اضافه ولتاژها، راهکارهای حفاظتی نظیر برق‌گیر و سیم‌گارد مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، تأثیر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر شبکه توزیع بررسی شده و عملکرد تجهیزات حفاظتی از جمله برق‌گیر اکسید روی، سیم‌گارد و سیستم زمین در کاهش این اضافه ولتاژها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از برق‌گیرها در نقاط مناسب شبکه، نقش مؤثری در جلوگیری از شکست عایقی زنجیره مقره‌ها و کاهش دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه دارد (در صورت نصب برق‌گیر بر روی فازهای شبکه هیچ شکست عایقی در زنجیره مقره رخ نمی‌دهد). همچنین، نصب سیم‌گارد در خطوط توزیع باعث کاهش احتمال برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز شده و با انتقال جریان صاعقه به سیستم زمین، موجب کاهش آسیب‌های ناشی از این پدیده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این تحقیق، بررسی و مقایسه عملکرد سیستم زمین در دو حالت مقاومتی ساده و فرکانسی بود. نتایج نشان داد که در مدل مقاومتی، مقدار امپدانس زمین ثابت در نظر گرفته می‌شود و پاسخ آن در برابر فرکانس‌های بالا به‌درستی مدل‌سازی نمی‌شود. در مقابل، مدل فرکانسی سیستم زمین قادر است تأثیر فرکانس‌های بالا را در پاسخ امپدانس زمین لحاظ کند که منجر به کاهش مقدار مقاومت سیستم زمین در برابر تخلیه صاعقه می‌شود. این کاهش مقاومت باعث می‌شود که جریان صاعقه به‌راحتی به زمین تخلیه‌شده و ولتاژهای القایی کاهش یابند، در نتیجه، احتمال شکست عایقی تجهیزات کاهش پیدا

- effect,” IET Generation, Transmission and Distribution, vol. ۱۸, no. ۵, pp. ۱۰۷۲-۱۰۸۹, ۲۰۲۴.  
<https://doi.org/10.1049/gtd.2.13123>
- [۱۷] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatzargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, and V. Vittal, “Causes of the ۲۰۰۳ major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. ۲۰, no. ۴, pp. ۱۹۲۲-۱۹۲۸, ۲۰۰۵.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857942>
- [۱۸] L. Greev, “Modeling of grounding electrodes under lightning currents,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. ۵۱, no. ۳, pp. ۵۵۹-۵۷۱, Aug. ۲۰۰۹.  
<https://doi.org/10.1109/TEM.2009.2025771>
- [۱۹] S. Mehrabi and S. Ostadzadeh, “Validation of the RLC equivalent circuit of grounding electrodes combined with the equivalent resistivity of two-layer soils and its application in transient analysis of overhead lines connected to surge arresters under lightning strike,” Applied Electromagnetics, vol. ۹, no. ۱, pp. ۳۵-۴۲, ۲۰۲۱. (in Persian)  
<https://dor.isc.ac/dor/DOR:20.1001.1.26455153.1400.9.1.17.4>
- [۲۰] S. Ostadzadeh, “Transient analysis of transmission lines connected to surge arresters under direct lightning strike considering nonlinear ionization phenomenon and frequency-dependent effect of lossy ground electrical parameters,” Applied Electromagnetics, vol. ۹, no. ۲, pp. ۱۷-۲۵, ۲۰۲۱. (in Persian)  
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1400.9.2.22>
- [۲۱] M. Khodsuz, “Externally gapped line arrester performance in high voltage transmission line using frequency grounding system absorbed energy and expected life assessment,” IET Science, Measurement and Technology, vol. ۱۶, no. ۷, pp. ۴۲۶-۴۴۰, ۲۰۲۲.  
<https://doi.org/10.1049/smt.2.12116>
- [۲۲] M. Khodsouz and R. Haggoo Rostami, “Investigation and simulation of the effect of disc insulator string deviation on its voltage and electric field distribution using the finite element method,” Applied Electromagnetics, vol. ۱۰, no. ۱, pp. ۹۱-۹۷, ۲۰۲۲. (in Persian)  
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1401.1.1.9.3>
- [۲۳] F. Safaei and M. Niasati, “A new method for surge arrester placement in high-voltage substations considering environmental effects,” IET Science, Measurement and Technology, vol. ۱۸, no. ۷, pp. ۴۸۱-۴۹۴, ۲۰۲۴.  
<https://doi.org/10.1049/smt.2.12208>
- ۲۰۰۵/۲۰۰۶ IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp. ۴۵۵-۴۵۸, ۲۰۰۶.  
<https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668536>
- [۸] A. Piantini, “Analysis of the effectiveness of shield wires in mitigating lightning-induced voltages on power distribution lines,” Electric Power Systems Research, vol. ۱۵۹, pp. ۹-۱۶, Jun. ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.08.022>
- [۹] V. Mashayekhi, S. H. H. Sadeghi, R. Moini, et al., “An adaptive Chebyshev approach for fast computation of grounding system admittance matrix,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. ۵۹, no. ۲, pp. ۱۸۳۰-۱۸۳۵, ۲۰۱۷.  
<https://doi.org/10.1109/TEM.2016.2611675>
- [۱۰] S. Seyedbarzegar, “Analysis and evaluation of the performance of surge arrester with external air gap in ungrounded transmission lines under the influence of lightning and ground parameters,” Applied Electromagnetics, vol. ۱۰, no. ۲, pp. ۱۳-۲۲, ۲۰۲۲. (in Persian)  
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1401.1.1.22.8>
- [۱۱] A. F. Andrade, E. G. da Costa, and G. R. S. Lira, “Methods for field measurement of electrical parameters of soil as functions of frequency,” Electric Power Systems Research, vol. ۱۹۹, pp. ۱۰۷۴۴۷, ۲۰۲۱.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107447>
- [۱۲] M. Saran et al., “Performance analysis of medium voltage overhead distribution line against lightning,” in CIREN, ۱۹th International Conference on Electricity Distribution, ۲۰۰۷.
- [۱۳] S. Zhou et al., “Transient electric field calculation of zinc oxide arrester under lightning impulse voltage,” in Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. ۲۳۱-۲۳۴, ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1109/CEIDP.2018.8544771>
- [۱۴] X. Zhang, L. Dong, G. Zeng, S. Huang, L. Wu, R. Xiong, H. Wang, and Y. Dai, “Optimal location of surge arresters on an overhead distribution network by using binary particle swarm optimization,” in Proceedings of the ۲۰۱۸ Chinese Automation Congress (CAC), Xi’an, China, pp. ۱۸۴۱-۱۸۴۶, ۲۰۱۸.  
<https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623397>
- [۱۵] J. Martinez and D. Durbak, “Parameter determination for modeling systems transients-Part V: Surge arresters,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. ۲۰, no. ۳, pp. ۲۰۷۳-۲۰۷۸, ۲۰۰۵.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848771>
- [۱۶] M. Khodsuz, M. H. Teymourian, and S. Seyedbarzegar, “New criteria for metal oxide surge arrester condition monitoring based on leakage current analysis: Considering nonuniform pollution

lightning overvoltage simulations results,"  
SpringerPlus, vol. ۳, no. ۱, pp. ۱-۱۱, ۲۰۱۴.  
<https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-690>

[۲۴] N. A. Sabiha, I. A. Hend, and L. Matti, "High frequency modeling and experimental verification of distribution transformers using transfer function approach," *Electric Power Systems Research*, vol. ۲۰۴, p. ۱۰۷۶۷۱, ۲۰۲۲.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107671>

[۲۵] W. Bassi, "High frequency input impedance modeling of low-voltage residential installations Influence on