

## **Analysis and Evaluation of the External Gap Line Arrester Performance under the Effect of Lightning and Ground Parameters in Transmission Lines with no Shielding Wire**

**S. M. Seyed Barzegar\***

\* Assistant Professor, Faculty of Electrical and Robotics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 21/12/2020; Accepted: 20/11/2021)

### **Abstract**

*Surge arresters are used for the protection of high voltage equipment and power transmission lines. Regardless of the presence or absence of the shielding wire in transmission lines, surge arresters play an important role in reducing the overvoltage. In this paper, the performance of an external gap arrester is investigated by considering different values of ground resistance and also the effect of soil ionization. The effect of lightning strike parameters such as the rise time and tail time on overvoltage, insulator failure and the energy absorbed in surge arrester for a 63 kV transmission line with no shielding wire is simulated and studied in EMTP-ATP software. Considering the effect of the ground system, the use of external gap line arresters provides better results compared to conventional arresters. Besides, the surge arresters in the transmission line with a shielding wire have a different function compared to the transmission line without it. The results show that in this type of transmission line, the surge arrester with an external gap has a better protective performance in absorbing energy and reducing the overvoltage compared to the surge arrester without gap.*

**Keywords:** External Gap Line Arrester, Ground Resistance, Flashover, Lightning Strike, Absorbed Energy.

## تحلیل و ارزیابی عملکرد برقگیر با فاصله هوایی خارجی در خطوط انتقال بدون سیم گارد تحت اثر پارامترهای صاعقه و زمین

سید میثم سیدبرزگر<sup>\*</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵)

### چکیده

برقگیرها در راستای حفاظت عایقی تجهیزات فشار قوی و خطوط شبکه قدرت به کار گرفته می‌شوند. با توجه به وجود و یا عدم وجود سیم گارد در خطوط انتقال، برقگیرها به منظور کاهش اضافه ولتاژهای ایجاد شده نقش مهمی را ایفاء می‌کنند. در این مقاله عملکرد برقگیر با فاصله هوایی خارجی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف مقاومت زمین و همچنین اثر یونیزاسیون خاک مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای ضربه صاعقه از جمله زمان پیشانی و پشت موج بر اضافه ولتاژهای ایجاد شده، شکست عایقی زنجیره مقره و انرژی جذب شده در برقگیر برای خط انتقال ۶۳ کیلوولت بدون سیم گارد در نرم‌افزار EMTP-ATP شبیه‌سازی و مطالعه شده است. با در نظر گرفتن اثر شبکه زمین، استفاده از برقگیر با فاصله هوایی نتایج بهتری را در مقایسه با برقگیر معمولی برای شبکه دارد. همچنین، برقگیرها در شبکه انتقال بدون سیم گارد دارای عملکردی متفاوت از شبکه دارای سیم گارد است. نتایج نشان داده است که برقگیر با فاصله هوایی خارجی در مقایسه با برقگیر بدون فاصله هوایی از عملکرد حفاظتی بهتری در جذب انرژی و کاهش اضافه ولتاژ در این نوع از شبکه‌ها برخوردار است.

### کلیدواژه‌ها: برقگیر با فاصله هوایی خارجی، مقاومت زمین، تخلیه الکتریکی، ضربه صاعقه، انرژی جذب شده

#### ۱- مقدمه

یکی از مزایای اصلی استفاده از برقگیر مطرح می‌باشد. به‌طور کلی سطح ایزوکرونیک بالا و همچنین مقاومت ویژه خاک از عواملی تأثیرگذار بر دامنه ولتاژ بازگشتی هستند که استفاده از برقگیر به‌عنوان عاملی محدود کننده، قابلیت استقامت عایقی خط را در برابر امواج گذرا افزایش می‌دهد. به‌منظور طراحی سامانه حفاظت عایقی مناسب، محاسبه دقیق قابلیت جذب انرژی برقگیر بسیار مهم می‌باشد [۵-۹]. این شرایط برای خطوط با سیم گارد و بدون سیم گارد متفاوت بوده که بر این اساس بررسی رفتار برقگیر در این خطوط به دلیل عدم وجود سیم گارد جای بحث و مطالعه دارد.

مطالعات صورت گرفته در این زمینه در راستای استفاده از برقگیرهای اکسیدروی در خطوط دارای سیم گارد به‌منظور محدودسازی اضافه ولتاژهای برگشتی بوده است [۱۰ و ۱۱]. این در حالی است که به تازگی به دلیل مزایای برقگیرهای اکسیدروی با فاصله هوایی خارجی<sup>۱</sup> از جمله عمر طولانی‌تر، افزایش قابلیت اطمینان و عدم وجود جریان نشتی در حالت کار نرمال، استفاده از این نوع برقگیرها در سطوح ولتاژهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

ضربه‌های صاعقه یکی از عوامل اصلی خروج خطوط انتقال در شبکه سراسری برق می‌باشند. برخورد صاعقه به خطوط انرژی الکتریکی می‌تواند منجر به اضافه ولتاژ، قطعی برق مشترکین، خرابی تجهیزات و هزینه‌های گزاف گردد. به‌طور کلی بهبود سطح عایقی خط، کاهش مقاومت زمین و استفاده از سیم گارد برای دکل از جمله روش‌هایی هستند که به‌عنوان راهکارهایی مؤثر در کاهش اثرات مخرب صاعقه مطرح شده‌اند. با این وجود هر یک از این روش‌ها با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی همچون افزایش هزینه‌های احداث، تعمیر و نگهداری در صورت افزایش سطح عایقی شبکه، بالا بودن مقاومت ویژه خاک به‌منظور کاهش مقاومت زمین و درنهایت محدودیت در استفاده از سیم گارد با توجه به ساختار دکل، اشاره نمود [۴-۱].

با توجه به محدودیت‌های پیش رو، استفاده از برقگیرهای اکسید روی به‌عنوان یک وسیله حفاظتی مناسب در محدودسازی اضافه ولتاژ و کاهش اثرات مخرب امواج گذرا، به کار گرفته شد. محدود کردن دامنه اضافه ولتاژها در یک سطح معین به‌عنوان

<sup>۱</sup> Externally Gapped Surge Arrester (EGLA)

\* نویسنده پاسخگو: Seyyedbarzegar@shahroodut.ac.ir

## ۲-۲- شبیه‌سازی دکل و خط انتقال

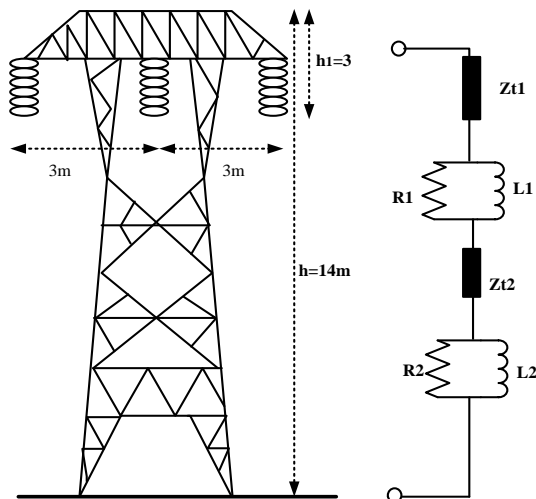
در مطالعات اضافه ولتاژهای صاعقه به‌منظور بررسی اثرات صاعقه بر خط انتقال و سیم‌گارد مدل‌سازی دکل‌های فشار قوی با توجه به اثر امپدانس موجی آن بر جریان صاعقه، بسیار حائز اهمیت است. شکل (۱) شماتیک دکل ۶۳ کیلوولت مورد مطالعه به انضمام مدل multistory آن را نشان می‌دهد. در مدل multistory، امپدانس موجی بین بازوی فاز دکل با پای دکل بوده و شاخه RL موازی برای مدل‌سازی میرایی و اغتشاش موج سیار از دکل لحاظ شده است [۱۸].

$$R_i = \Delta R_i \cdot h_i \ (\Omega), \quad L_i = 2\tau R_i \ (\mu H)$$

$$\Delta R_1 = \frac{2Zt}{h_1} \ln(1/0.89) \quad (2)$$

$$\Delta R_2 = \frac{2Zt}{h} \ln(1/0.89)$$

در رابطه فوق،  $h$  ارتفاع دکل،  $\tau = h/c$  زمان عبور موج از دکل و  $c$  سرعت نور در خلأ می‌باشد. خط انتقال بر اساس مدل وابسته به فرکانس  $J_{marti}$  به وسیله پنج اسپن با طول ۴۰۰ متر در هر طرف از نقطه برخورد مدل شده است. برای اجتناب از انعکاس موج ضربه که بر اضافه ولتاژهای شبیه‌سازی شده حول نقطه برخورد تأثیر می‌گذارد، خطی با طول ۳۰ کیلومتر به ابتدا و انتهای مدل شبیه‌سازی شده اضافه شده است.



شکل (۱): آرایش ظاهری خط انتقال ۶۳ کیلوولت مورد مطالعه بدون سیم‌گارد

## ۲-۳- مدل شکست الکتریکی در زنجیره مقره

با توجه به نقش عایقی مقره‌ها در شبکه قدرت، میزان تحمل عایقی مقره از اهمیت بالایی برخوردار است. بر این اساس مدل‌سازی مقره می‌بایست به گونه‌ای صورت گیرد که بیانگر حداکثر قابلیت تحمل عایق به کار رفته باشد. با این دید لازم است

از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه EGLA، بررسی مزایا و معایب و عملکرد آن‌ها در هماهنگی عایقی است. در مرجع [۱۲] طراحی برقگیر با فاصله هوایی مورد مطالعه قرار گرفته است و عملکرد آن در یک شبکه ۱۱۰ کیلوولت بررسی شده است. مطالعه مروری بر روی این نوع از برقگیرها و مشخصات آن‌ها در مرجع [۱۳] صورت گرفته است. در مرجع [۱۴] به بررسی و جمع‌بندی مزایای برقگیرها با فاصله هوایی پرداخته شده است. اثر مکان نصب برقگیر با فاصله هوایی بر روی هماهنگی عایقی شبکه انتقال و اثر برقگیر بر هماهنگی عایقی در خط انتقال در ناحیه کوهستانی به ترتیب در مراجع [۱۵] و [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این مقاله عملکرد برقگیر اکسیدروی بدون فاصله هوایی با در نظر گرفتن مقاومت‌های زمین مختلف و یونیزاسیون خاک به‌صورت تابعی از دامنه جریان شارشی پای دکل در یک خط ۶۳ کیلوولت بدون سیم‌گارد مورد بررسی قرار گرفته و خروجی‌های حاصله با نتایج حاصل از برقگیر با فاصله هوایی مقایسه شده است. در این راستا تأثیر پارامترهای ضربه صاعقه از جمله دامنه جریان صاعقه، زمان پیشانی و پشت موج بر دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده، شکست عایقی زنجیره مقره و انرژی جذب برقگیر، مطالعه و در نرم‌افزار EMTP-ATP شبیه‌سازی شده است.

## ۲-۲- ساختار شبکه و مدل‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد صاعقه در یک شبکه لازم است تا برخی پارامترهای اساسی مدل‌سازی گردند. از جمله این پارامترها می‌توان به مدل‌سازی صاعقه، دکل و خط انتقال، مقاومت زمین، شکست الکتریکی زنجیره مقره و برقگیر اشاره کرد. از آنجایی که دقت رویه بررسی عملکرد صاعقه به شرایط مدل‌سازی هر یک از این پارامترها وابسته می‌باشد، لذا در این بخش به بررسی چگونگی مدل‌سازی هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

## ۲-۱- شبیه‌سازی صاعقه

برای نمایش شکل موج صاعقه از مدل هیدرلر به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها در مدل‌سازی صاعقه با پارامترهایی غیر استاندارد مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

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

در رابطه فوق،  $I_p$  پیک دامنه جریان،  $n$  فاکتور شیب جریان،  $\eta$  ضریب تصحیح و  $k = t/\tau_1$  می‌باشد.  $\tau_1$  و  $\tau_2$  ثابت‌های زمانی هستند که زمان پیشانی موج و پشت موج شکل موج ضربه صاعقه را مشخص می‌کنند [۱۷].

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (۴)$$

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2}$$

در رابطه فوق،  $I$  جریان عبوری از مقاومت پای دکل،  $R_0$  مقاومت زمین در جریان کم و فرکانس پایین،  $I_g$  جریان لازم برای یونیزاسیون خاک و  $E_0$  شدت میدان لازم برای شکست الکتریکی خاک (۴۰۰ کیلوولت) می‌باشد.  $\rho$  مقاومت ویژه خاک بوده که در این مقاله مقدار آن بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر متغیر در نظر گرفته شده است.

## ۲-۵- مدل برقگیر با فاصله هوایی خارجی

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است برقگیر با فاصله هوایی خارجی از دو قسمت شامل قرص‌های اکسید روی و فاصله هوایی تشکیل شده است. تنظیم فاصله هوایی این نوع برقگیرها از اهمیت خاصی برخوردار است. این فاصله هوایی باید تا حدی بزرگ باشد که توانایی تحمل اضافه ولتاژهای فرکانس شبکه قدرت را داشته و از طرفی در حدی کوچک باشد که بتواند زنجیره مفره را در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه قبل از وقوع تخلیه الکتریکی در دو سر زنجیره مفره محافظت نماید. حداقل فاصله هوایی به بیشینه ولتاژ فرکانس قدرت واقع در ترمینال‌های فاصله هوایی وابسته بوده و حداکثر فاصله هوایی تابعی از استقامت عایقی زنجیره مفره در شرایط برخورد صاعقه است [۲۱]. به‌طور کلی فاصله هوایی در نظر گرفته شده نباید بزرگ‌تر از ۸۵٪ استقامت عایقی زنجیره مفره در شرایط برخورد صاعقه باشد. همچنین کمترین مقدار فاصله هوایی نیز باید قابلیت تحمل ۱۶۸٪ بیشینه اضافه ولتاژ فاز به زمین را دارا باشد. به‌منظور به‌دست آوردن کمترین حد فاصله هوایی در برقگیر EGLA از رابطه (۵) استفاده شده است [۱۶].

$$S_{min} = 39.37 \left[ \frac{e^{\left(\frac{CFO_{pf}}{750} - 1\right)} - 1}{0.55} \right]^{0.833} \quad (۵)$$

$$CFO_{pf} = \left( \frac{E_{sys}}{1.73} \right) TOV_{factor} \times SF_1$$

در این رابطه،  $S_{min}$  کمترین مقدار فاصله هوایی بر حسب اینچ،  $CFO_{pf}$  کمترین ولتاژ تخلیه فرکانس قدرت،  $E_{sys}$  بیشینه مقدار ولتاژ خط به خط،  $TOV_{factor}$  مطابق با جدول (۱) و  $SF_1$  ضریب اطمینان که عموماً ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود.

تا در حالت گذرا، مفره به گونه‌ای مدل شود که قابلیت مقایسه ولتاژ اعمال شده به دو سر آن و مقدار ولتاژ آستانه شکست را داشته باشد. هنگامی که تنش الکتریکی بین هادی و بازوی دکل که از طریق زنجیره مفره‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند از حد تحمل عایقی مفره‌ها بیشتر گردد، تخلیه الکتریکی از طریق زنجیره مفره ایجاد می‌شود. با توجه به پارامترهای صاعقه و تغییر آن‌ها در هر بار اصابت صاعقه به خط، سطح تحمل عایقی زنجیره مفره در برابر امواج ضربه مقدار ثابتی نمی‌باشد. زنجیره مفره گاه‌ا قادر به تحمل اضافه ولتاژهای ناشی از برخوردهای صاعقه با دامنه زیاد و دوره کم است. با این حال ضربه‌هایی با دوره طولانی و دامنه کم ممکن است موجب تخلیه الکتریکی در زنجیره مفره گردند.

در راستای شبیه‌سازی زنجیره مفره و شکست عایقی آن، زنجیره مفره توسط یک خازن موازی با کلید کنترل شده با ولتاژ مدل شده است. اگر دامنه ضربه صاعقه از جریان بحرانی زنجیره مفره فراتر رود، در دو سر زنجیره مفره تخلیه رخ داده و کلید موازی با خازن بسته می‌شود. برای شبیه‌سازی تخلیه الکتریکی دو سر زنجیره مفره از مدل پیش رونده خط مطابق با رابطه (۳) استفاده می‌شود [۱۹].

$$\frac{dL}{dt} = K_L \cdot V(t) \left[ \frac{V(t)}{d-L} - E_{L0} \right] \quad (۳)$$

که در آن،  $V(t)$  ولتاژ دو سر زنجیره مفره،  $d$  طول زنجیره مفره،  $E_{L0}$  گرادیان شروع تخلیه و  $K_L$  ضریب ثابت می‌باشد. زمانی که طول لیدر  $L$  با طول زنجیره مفره برابر گردد، شکست الکتریکی در دو سر زنجیره مفره رخ می‌دهد.

## ۲-۴- مقاومت زمین

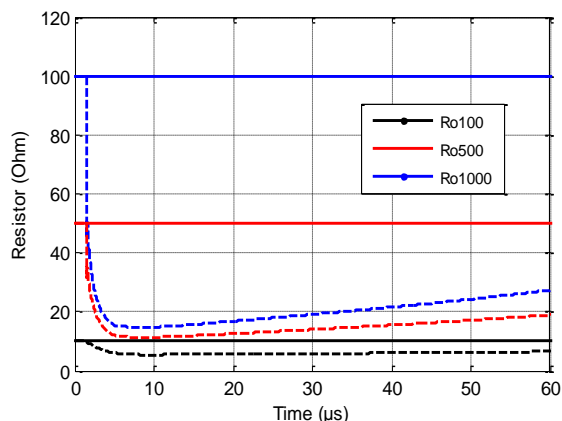
فهم و اندازه‌گیری مقاومت پای دکل در حالت گذرا بسیار مشکل می‌باشد. مقدار مقاومت زمین در این حالت کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده و یا مقدار محاسبه شده است. در واقع، جریان زمین قابل توجه موجب می‌شود تا گرادیان ولتاژ کافی برای تجزیه خاک اطراف مسیر زمین فراهم گردد. در این صورت مقاومت زمینی متغیر و وابسته به دامنه جریان ضربه حاصل خواهد شد. بنابراین در این مقاله امیدانس پای دکل به‌صورت مقاومت غیر خطی وابسته به جریان و مستقل از فرکانس توسط رابطه (۴) مدل شده است. همچنین در این مقاله برای نشان دادن نحوه تأثیرگذاری یونیزاسیون خاک بر جریان گذرای EGLA، تأثیر مقاومت ثابت در فرکانس ۵۰ هرتز علاوه بر مقاومت غیر خطی وابسته به جریان، بر عملکرد برقگیر مورد مطالعه، بررسی و شبیه‌سازی شده است [۲۰].

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

خط انتقال ۶۳ کیلوولت برای بررسی عملکرد برقگیر مورد مطالعه در صورت برخورد صاعقه به هادی فاز (فاز A) در نرم‌افزار EMTP-ATP شبیه‌سازی گردید. دکل‌ها بر مبنای مدل multistory و خط انتقال توسط مدل وابسته به فرکانس شبیه‌سازی شده است. برقگیر با فاصله هوایی به منظور مطالعه نحوه عملکرد آن در برابر صاعقه، اضافه ولتاژهای تولیدی و همچنین انرژی جذب شده در خط انتقال در نظر گرفته شده است. در این مقاله به منظور سنجش عملکرد EGLA، برقگیر بدون فاصله هوایی در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت نیز در تمامی حالت‌های در نظر گرفته شده شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن استخراج شده است. شبیه‌سازی‌ها بر اساس ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ میکروثانیه انجام شده است که تغییرات پارامترهای دامنه، زمان پیشانی موج و زمان پشت موج به ترتیب بر اساس مقادیر پایه ۳۱kA، ۷μs و ۵۰μs لحاظ شده است.

#### ۳-۱- بررسی اثر برقگیر با فاصله هوایی بر اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه

در شکل (۳) مقاومت پای دکل با مقاومت‌های ویژه مختلف ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ اهم-متر، برای دو حالت مقاومت ثابت و مقاومت وابسته به یونیزاسیون خاک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون خاک، مقاومت پای دکل با توجه به مقدار جریان شارشی دکل، غیر خطی بوده و این در حالیست که در حالت استاتیک مقدار مقاومت ثابت می‌ماند.



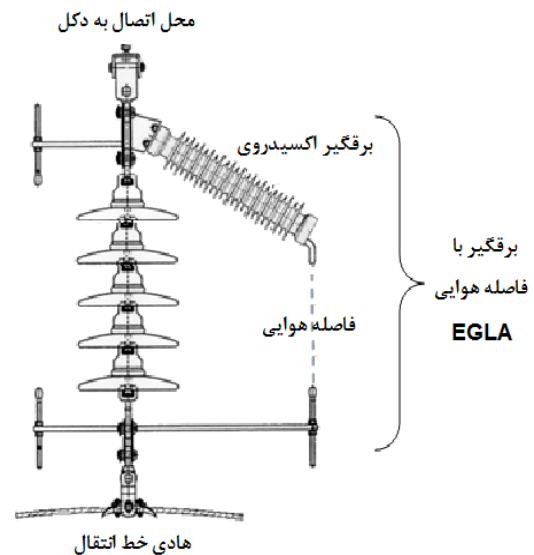
شکل (۳): مقاومت پای دکل برای مقاومت‌های ویژه مختلف (خط چین): مقاومت غیر خطی با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون خط. (خط ممتد): مقاومت ثابت

برای بررسی اثر نصب EGLA بر عملکرد شبکه، ضربه صاعقه به خط اصابت کرده و اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرر و انرژی جذب شده توسط برقگیر نصب شده در آن اسپن، اندازه‌گیری

برای مدل‌سازی قسمت فعال این نوع برقگیر که شامل قرص‌های اکسید روی می‌باشد از مدل وابسته به فرکانس IEEE استفاده شده است [۲۲]. همچنین بیشترین مقدار برای فاصله هوایی بر اساس رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$S_{\max} = \left[ \frac{CFO_{Ins} \times 0.85}{15kV \times K} \right] \quad (6)$$

در این رابطه،  $S_{\max}$  بیشترین مقدار فاصله هوایی در برقگیر EGLA،  $CFO_{Ins}$  مقدار بحرانی ولتاژ تخلیه الکتریکی مقرر بر حسب کیلوولت و  $K$  ضریب فاصله هوایی می‌باشد که برای الکترودهای میله به صفحه برابر ۱ است. اطلاعات مربوط به مشخصات برقگیر قابل استفاده در شبکه ۶۳ کیلوولت در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): برقگیر با فاصله هوایی خارجی شامل قرص‌های اکسیدروی سری با یک فاصله هوایی

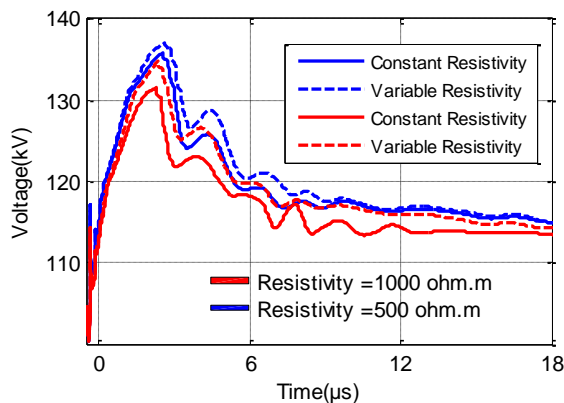
جدول (۱): مقدار  $TOV_{factor}$  برای انواع آرایش مداری شبکه

نوع مدار	$TOV_{factor}$
۴ سیمه با زمین کامل	۱/۳۵-۱/۲۵
۳ سیمه زمین شده در منبع	۱/۴
۳ سیمه با امپدانس زمین شده	۱/۷۳-۱/۵
۳ سیمه مثلث	۱/۷۳

جدول (۲): مشخصات برقگیر قابل استفاده در شبکه ۶۳ کیلوولت

ولتاژ شبکه	۶۳ kV
بیشینه مقدرا ولتاژ کار دائم EGLA	۴۲kV rms
ولتاژ بحرانی تخلیه الکتریکی مقرر	۲۹۰ kV
بیشینه اضافه ولتاژ جرقه EGLA	۲۴۷ kV
بیشینه طول فاصله هوایی	۴۱۷ mm
کمترین طول فاصله هوایی	۲۳۸ mm
مقدار فاصله هوایی پیشنهادی	۳۲۸ mm
بازه تغییرات فاصله هوایی	۸۹/۵ ± mm

به منظور بررسی اثر نوع زمین در اضافه ولتاژ ایجاد شده، شکل (۵) و جدول (۳) نشان داده شده است. شکل (۵) اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرره مورد اصابت ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ میکروثانیه برای مقاومت ویژه ۵۰۰ و ۱۰۰۰ اهم متر و همچنین مقاومت ثابت در حالتی که EGLA بر روی دکل متصل باشد را نشان داده است. با توجه به شکل (۵)، اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرره مورد اصابت، در حالت مقاومت غیر خطی وابسته به یونیزاسیون خاک بیشتر از مقاومت ثابت است که این امر به دلیل وابستگی مقاومت غیر خطی به جریان عبوری از دکل بوده که موجبات گذر جریان تخلیه بیشتری را فراهم می‌سازد. برای مقایسه بیشتر تأثیر نوع مقاومت، در جدول (۳) دامنه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره برای مقاومت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، عبور جریان بیشتر به دلیل رفتار غیر خطی مقاومت زمین موجب افزایش جریان عبوری از برقگیر شده است که با توجه به مشخصه ولتاژ جریان برقگیر، مقدار ولتاژ باقیمانده آن و در نهایت اضافه ولتاژ ایجاد شده در دوسر زنجیره مقرره را افزایش داده است.

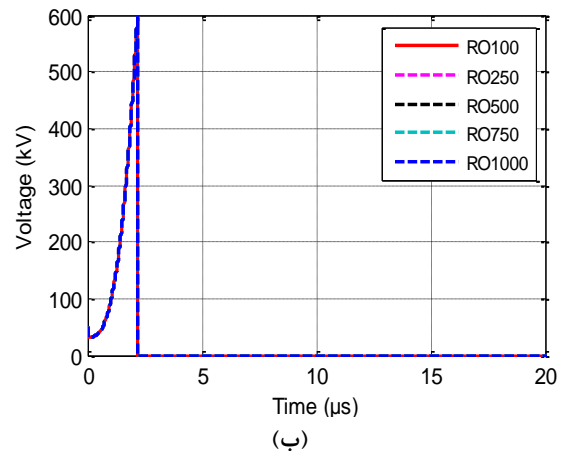
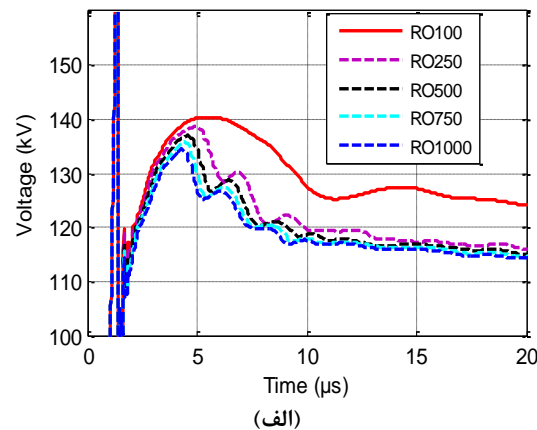


شکل (۵): اضافه ولتاژ ایجاد شده دو سر زنجیره مقرره در صورت اصابت ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ میکروثانیه

جدول (۳): اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره برای دو نوع مقاومت زمین مورد مطالعه

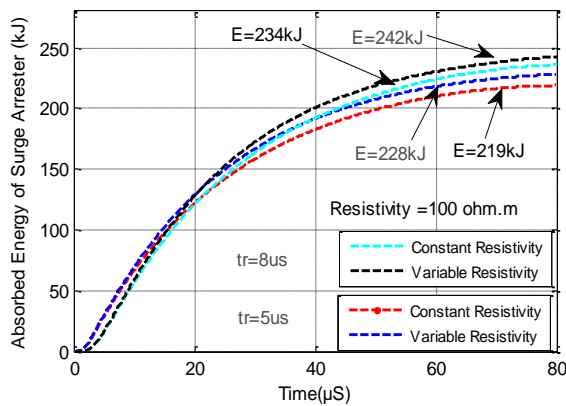
دامنه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره (کیلوولت)		
مقاومت ثابت	مقاومت غیر خطی	مقدار مقاومت ویژه خاک (Ω-m)
۱۴۰	۱۴۰/۴	۱۰۰
۱۳۸/۱	۱۳۸/۸	۲۵۰
۱۳۵/۷	۱۳۷	۵۰۰
۱۳۱/۵	۱۳۵/۹	۷۵۰
۱۳۰/۲	۱۳۴/۷	۱۰۰۰

شده است. شکل (۴) اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره در حالت مقاومت غیر خطی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴-الف) دیده می‌شود وجود برقگیر بر روی دکل مذکور موجب گردیده که اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرره محدود شده و شکست الکتریکی رخ ندهد. همچنین با توجه به این شکل مشخص است که مقاومت ویژه خاک تأثیر به‌سزایی بر اضافه ولتاژ زنجیره مقرره دارد. با توجه به شکل (۴-الف) با کاهش مقاومت ویژه خاک، اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره به دلیل گذر جریان بیشتر از مقاومت زمین افزایش می‌یابد. این در حالی است که، با توجه به نتایج مقالات [۲۳ و ۲۴]، در صورت وجود سیم گارد و اصابت ضربه صاعقه، با افزایش مقاومت ویژه خاک به دلیل جریان برگشتی بالاتر، اضافه ولتاژ القایی افزایش می‌یابد. تفاوت در اندازه اضافه ولتاژ ایجاد شده در ازای عملکرد دو نوع برقگیر، ضرورت اهمیت بررسی خطوط بدون سیم گارد و عملکرد برقگیر در این خطوط را بیش از پیش مشخص می‌نماید. با توجه به شکل (۴-ب) عدم وجود برقگیر بر روی دکل مورد اصابت، به دلیل جریان صاعقه با دامنه زیاد، موجبات شکست عایقی زنجیره مقرره را برای مقاومت‌های مختلف پای دکل فراهم نموده است.



شکل (۴): اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرره در صورت اصابت ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ میکروثانیه: الف) وجود برقگیر بر روی دکل مورد اصابت و ب) عدم وجود برقگیر

شکل (۷) روند تغییرات انرژی تخلیه برقی با فاصله هوایی خارجی و همچنین مقدار نهایی آن برای مقاومت پای دکل ثابت و غیر خطی به ازای زمان‌های پیشانی موج مختلف را نشان می‌دهد. در این حالت مقاومت مخصوص خاک ۱۰۰ اهم-متر بوده و ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپری ۵/۷۰ و ۸/۷۰ میکروثانیه می‌باشد. با توجه به شکل (۷)، انرژی تخلیه برقی با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون خاک، به دلیل عبور جریان تخلیه بیشتر از برقی و پای دکل، مقداری بزرگ‌تر از مقاومت ثابت را به دست آورده است. با مقایسه عددی مشخص است که به علت افزایش بازه زمانی مؤثر ضربه جریان و ولتاژ باقیمانده برقی در شرایط یکسانی از زمان پشت موج و دامنه صاعقه، انرژی تخلیه برقی افزایش یافته است. مطابق با این شکل، تأثیر تغییر نوع مقاومت زمین کمتر از تأثیر زمان صعود صاعقه است. این به معنای اثرپذیری بیشتر انرژی جذب شده برقی از افزایش دوره گذرا در مقایسه با دامنه ولتاژ و جریان مطابق رابطه (۸) است.



شکل (۷): انرژی تخلیه EGLA با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون خاک و تغییر زمان صعود ضربه صاعقه

شکل (۸) تأثیر دامنه موج ضربه صاعقه تا ۱۰۰ کیلوآمپر و زمان صعود تا ۱۰ میکروثانیه را بر انرژی تخلیه برقی در حالت مقاومت وابسته به یونیزاسیون خاک نشان داده شده است. با توجه به شکل با ثابت ماندن زمان صعود موج ضربه و افزایش دامنه و یا با ثابت ماندن دامنه و افزایش زمان صعود، انرژی تخلیه برقی افزایش یافته است. بررسی روند تغییرات انرژی جذب شده برقی نشان می‌دهد که اثر افزایش زمان پیشانی موج به مراتب از اثر افزایش دامنه جریان بیشتر است. به طور کلی این شرایط ناشی از افزایش اثر بخشی هم‌زمان دامنه جریان صاعقه بر ولتاژ باقیمانده مطابق با مشخصه V-I برقی است.

تأثیر زمان پشت موج ضربه صاعقه بر انرژی تخلیه برقی با فاصله هوایی خارجی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این حالت مقاومت مخصوص خاک ۱۰۰ اهم-متر بوده و ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپری ۵/۷۰ و ۵/۳۵ میکروثانیه می‌باشد. کاهش زمان

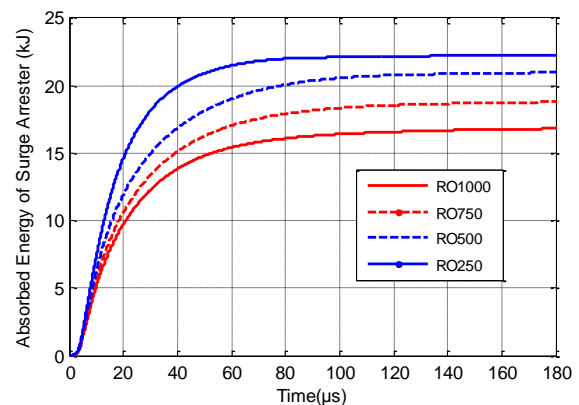
## ۲-۳- بررسی انرژی جذب شده در برقی‌های با فاصله هوایی

برقی‌های موجود در شبکه به دلیل برخورد صاعقه و عدم تحمل مقدار انرژی تحمیل شده به آن‌ها دچار شکست و خرابی می‌شوند. انتخاب برقی با قابلیت جذب انرژی کافی به دلیل استرس‌های ولتاژی غیر خطی ایجاد شده توسط ضربه صاعقه و مشخصه V-I برقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقدار انرژی عبوری از برقی بدون آنکه برقی دچار خرابی یا از کارافتادگی گردد قابلیت جذب انرژی برقی نامیده می‌شود و از رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد [۲۴]:

$$E = \int_{t_0}^t V_{s(t)} \cdot I_{s(t)} \cdot dt \quad (7)$$

که در آن،  $V_{s(t)}$  ولتاژ گذرای ترمینال برقی،  $I_{s(t)}$  جریان تخلیه عبوری از برقی و  $t_0$  زمان وقوع ضربه صاعقه می‌باشد. انرژی تخلیه برقی مورد مطالعه ۳۷۸ کیلوژول است. در زمان وقوع اضافه ولتاژ، انرژی جذب شده توسط برقی به عواملی از قبیل شکل موج، دامنه و زمان اضافه ولتاژ وابسته است. این امر در مورد EGLA علاوه بر موارد گفته شده به میزان فاصله هوایی و تنظیم آن نیز بستگی دارد.

در شکل (۶) انرژی جذب شده برقی با فاصله هوایی خارجی برای مقاومت پای دکل مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که با افزایش مقاومت پای دکل، به دلیل کاهش جریان تخلیه عبوری از برقی، انرژی تخلیه برقی کاهش می‌یابد.

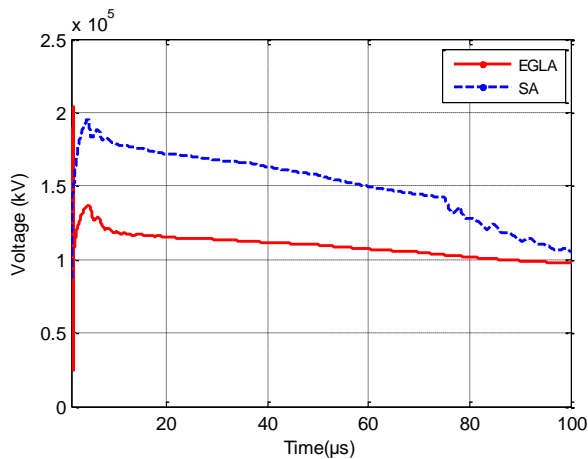


شکل (۶): انرژی جذب شده EGLA برای مقاومت مختلف پای دکل

## ۳-۳- بررسی اثر پارامترهای صاعقه

در این بخش به بررسی اثر زمان پیشانی موج، پشت موج و دامنه ضربه صاعقه بر انرژی جذب شده برقی متناسب با تغییرات جریان عبوری از برقی و ولتاژ باقیمانده آن پرداخته شده است.

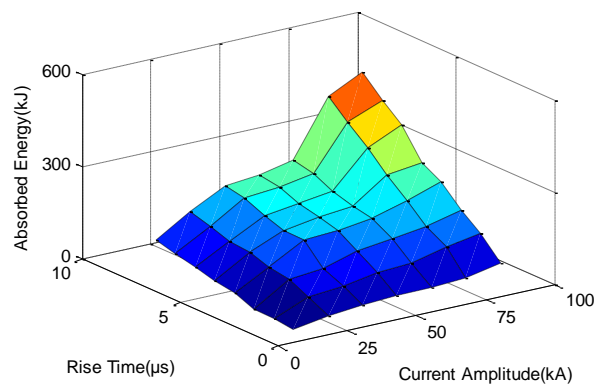
در شکل (۱۰) اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرر به ازای برخورد ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ به هادی فاز نشان داده شده است. در این حالت مقاومت ویژه خاک ۵۰۰ اهم-متر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۱۰) دیده شده است که ولتاژ دو سر EGLA نسبت به برقگیر اکسید روی بدون فاصله هوایی محدودتر است. یکی از مهم‌ترین پیامدهای استفاده از EGLA نسبت به برقگیر معمولی، اضافه ولتاژ ایجاد شده در لحظه اولیه عملکرد آن است. مطابق با شکل (۱۰) این اضافه ولتاژ تا بیش از ۲۰۰ کیلوولت افزایش داشته در حالی که ولتاژ باقیمانده برقگیر پس از آن در حدود ۱۳۰ کیلوولت و پایین‌تر از ولتاژ باقیمانده برقگیر معمولی است. در واقع وجود فاصله هوایی در EGLA و ایجاد تخلیه الکتریکی در فاصله هوایی در صورت عملکرد آن موجب ایجاد این دوره گذرای بسیار سریع می‌گردد که با توجه به دوره زمانی بسیار کوتاه، خلی در عملکرد آن ایجاد نمی‌کند.



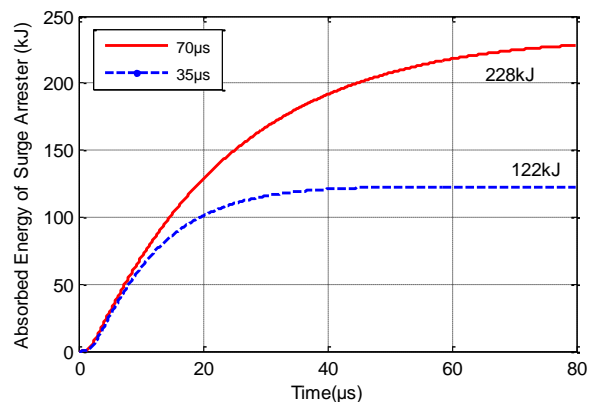
شکل (۱۰): اضافه ولتاژ ایجاد شده در صورت اصابت ضربه صاعقه ۳۱ کیلوآمپر ۵/۷۰ میکروثانیه

انرژی تخلیه برقگیر به ازای تغییر در مقاومت ویژه خاک برای دو نوع برقگیر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با افزایش مقاومت خاک به دلیل گذر جریان تخلیه کمتر از دکل، انرژی تخلیه هر دو نوع برقگیر کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود انرژی تخلیه برقگیر بدون فاصله هوایی از برقگیر با فاصله هوایی خارجی در شرایط یکسان بیشتر بوده که بر اساس آن EGLA در شرایط بهره‌برداری یکسان می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به برقگیر بدون فاصله هوایی داشته باشد. به‌طور کلی گذر انرژی تخلیه زیاد از برقگیر می‌تواند زمینه مشکلات حرارتی و ناپایداری برقگیر را به همراه داشته باشد. از طرفی انرژی تخلیه بیشتر برقگیر در گذر زمان موجب افزایش نرخ خطای برقگیر و کاهش عمر مورد پیش‌بینی برقگیر خواهد شد.

پشت موج موجب کاهش دوره گذرا در برقگیر خواهد شد. بنابراین تداوم جریان صاعقه و ولتاژ باقیمانده مطابق با مشخصه V-I برقگیر، کاهش یافته و از آنجایی که محاسبات در یک دوره زمانی انجام می‌گردد، انرژی جذب شده برقگیر افت خواهد کرد. این امر موجب شده است تا کاهش انرژی جذب شده در برقگیر نسبت به تغییرات زمان پیشانی موج بیشتر گردد. همان‌طور که در نتایج آمده است، افزایش ۶۰ درصدی در زمان پیشانی موج تنها موجب افزایش ۶ درصدی انرژی جذب شده برقگیر گردید. این در حالی است که کاهش ۵۰ درصدی در زمان پشت موج تا ۴۶ درصد این پارامتر را کاهش داده است.



شکل (۸): تأثیر دامنه موج ضربه صاعقه و زمان صعود بر انرژی تخلیه در EGLA در حالت مقاومت وابسته به یونیزاسیون خاک



شکل (۹): تأثیر زمان پشت موج ضربه صاعقه بر انرژی تخلیه برقگیر

#### ۴. مقایسه عملکرد برقگیر با فاصله هوایی و بدون فاصله هوایی

برای بررسی و مقایسه عملکرد برقگیر اکسید روی بدون فاصله هوایی با برقگیر اکسید روی با فاصله هوایی خارجی، اضافه ولتاژ ایجاد شده، جریان تخلیه عبوری از برقگیر و انرژی تخلیه در صورت اصابت ضربه صاعقه با پارامترهای مختلف و همچنین برای مقاومت ویژه خاک مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



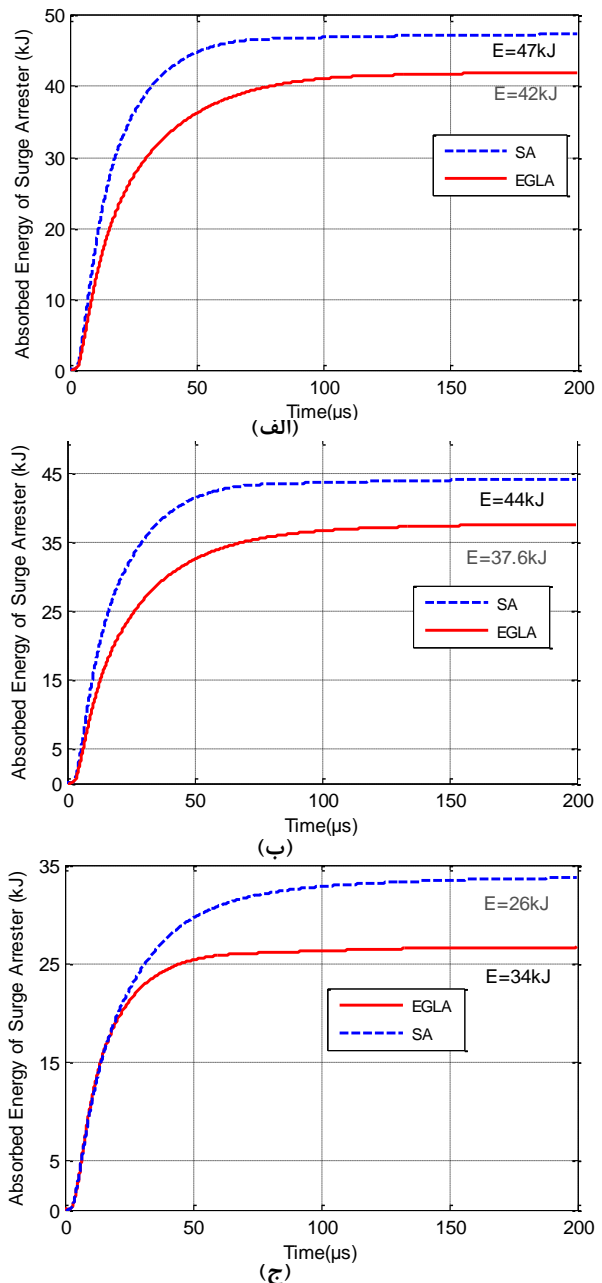
می‌دهد که به ازای افزایش مقاومت ویژه خاک، اختلاف مقدار انرژی جذب شده برای دو نوع برقگیر مورد مطالعه از ۵ کیلو ژول به ۸ کیلوژول افزایش یافته است. این شرایط به علت روند تغییرات متفاوت اضافه ولتاژ ایجاد شده در برقگیر بدون فاصله هوایی و EGLA است که برای مقاومت زمین بزرگ‌تر مقدار آن به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. این شرایط با توجه به مقدار جریان عبوری از برقگیر در نهایت موجب افزایش اختلاف انرژی جذب شده در برقگیرها شده است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله انرژی جذب شده و عملکرد برقگیر با فاصله هوایی خارجی در خط انتقال ۶۳ کیلوولت بدون سیم گارد شبیه‌سازی و مطالعه شده است. شبکه زمین به دو صورت مقاومت ثابت و مقاومت وابسته به یونیزاسیون خاک مطالعه شده است. مهم‌ترین نتایج حاصله از این مقاله در زیر آمده است:

- وجود برقگیر بر روی دکل مورد اصابت صاعقه، اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقرر را محدود و از بروز شکست الکتریکی جلوگیری می‌کند. همچنین با کاهش مقاومت ویژه خاک، اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مقرر به دلیل گذر جریان بیشتر از مقاومت زمین، افزایش می‌یابد.
- اضافه ولتاژ ایجاد شده در زنجیره مقرر مورد اصابت، در حالت مقاومت غیر خطی وابسته به یونیزاسیون خاک بیشتر از مقاومت ثابت می‌باشد که این امر به دلیل وابستگی مقاومت غیر خطی به جریان عبوری از مقاومت زمین بوده که موجبات گذر جریان تخلیه بیشتری را نسبت به مقاومت ثابت فراهم می‌آورد.
- انرژی تخلیه برقگیر با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون خاک، به دلیل گذر جریان تخلیه بیشتر از برقگیر بیشتر از مقاومت ثابت می‌باشد.
- کاهش زمان صعود ضربه صاعقه و با کاهش زمان پشت موج آن، موجب کاهش انرژی تخلیه عبوری از EGLA می‌شود.
- انرژی تخلیه برقگیر بدون فاصله هوایی از EGLA در شرایط یکسان بیشتر بوده بنابراین استرس وارده بر برقگیر بدون فاصله هوایی بیشتر از EGLA است. بنابراین برقگیر با فاصله هوایی خارجی در شرایط یکسان می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به برقگیر بدون فاصله هوایی داشته باشد. زیرا گذر انرژی تخلیه زیاد از برقگیر می‌تواند موجبات مشکلات حرارتی، ناپایداری برقگیر، افزایش نرخ خطا و کاهش عمر برقگیر را به همراه داشته باشد.

تغییر در مقاومت زمین منجر به کاهش ۲۶ درصدی در انرژی جذب شده برقگیر معمولی بدون فاصله هوایی و کاهش ۳۸ درصدی در انرژی جذب شده برقگیر با فاصله هوایی شده است.



شکل (۱۱): مقایسه انرژی تخلیه برقگیر بدون فاصله هوایی با EGLA: (الف) مقاومت زمین ۱۰۰۰ Ω.m (ب) ۵۰۰ Ω.m (ج) ۷۵۰ Ω.m

این امر نشان دهنده تأثیرپذیری بیشتر EGLA از تغییرات مقاومت زمین به دلیل کاهش هم‌زمان جریان عبوری و اضافه ولتاژ ایجاد شده در آن است. بر این اساس تنش حرارتی وارده به EGLA در شرایط یکسانی از بهره‌برداری به مراتب کمتر بوده که این امر منجر به استفاده بهتر و مطمئن‌تر از این نوع برقگیر خواهد شد. بررسی عددی مقدار نهایی انرژی جذب شده نشان

## ۶. مراجع

- [11] 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*, vol. 60, pp. 917-925, 2018.
- [12] J. He, J. Hu, S. M. Chen, and R. Zeng, "Influence of Series Gap Structures on Lightning Impulse Characteristics of 110-kV Line Metal-Oxide Surge Arresters" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, April 2008.
- [13] J. Woodworth, "Externally Gapped Line Arresters A Critical Design Review," 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 14-17 April 2014.
- [14] F. Giraudet, "Various Benefits for Line Surge Arrester Application and Advantages of Externally Gapped Line Arresters," 2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET), 7-8 Feb. 2019.
- [15] T. H. Pham, S. A. Boggs, H. Suzuki, and T. Imai, "Effect of Externally Gapped Line Arrester Placement on Insulation Coordination of a Twin-Circuit 220 kV Line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1991-1997, October 2012
- [16] M. E. Ahmadi, M. Niasati, and M. R. Barzegar-Bafrooei, "Enhancing the Lightning Performance of Overhead Transmission Lines with Optimal EGLA and Downstream Shield Wire Placement in Mountainous Areas: A Complete Study," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 14, pp. 564-575, 2020.
- [17] F. Heidler, J. M. Cvetic, and B. V. Stanic, "Calculation of Lightning Current Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, pp. 399-404, Apr. 1999.
- [18] S. Grebovic and N. Oprasic "Influence of Lightning Channel Impedance and Nonuniform Tower Footing Resistance Distribution on Line Surge Arrester Energy Duty" 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2018.
- [19] A. Ametani and T. Kawamura, "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 867-875, 2005.
- [20] M. R. Alemi and K. Sheshyekani, "Wide-band Modeling of Tower Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, pp. 1627-1636, Dec. 2015.
- [1] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, and F. Tossani, "Influence of the Return Stroke Current Waveform on the Lightning Performance of Distribution Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, pp. 1800-1808, 2017.
- [2] A. Ibrahim, M. Metwally, M. Eladawy, and E. A. Feilat, "Online Condition Monitoring of Surge Arresters Based on Third-Harmonic Analysis of Leakage Current," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, pp. 2274-2281, 2017.
- [3] K. Raju and V. Prasad, "Modelling And Validation Of Metal Oxide Surge Arrester For Very Fast Transients," *High Voltage*, vol. 3, pp. 147-153, 2018.
- [4] M. Khodsuz, M. Mirzaie, and S. M. Seyedbarzegar, "Metal Oxide Surge Arrester Condition Monitoring Based on Analysis of Leakage Current Components," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 66, pp. 188-193, 2015.
- [5] 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. 33, pp. 2354-2363, 2018 .
- [6] P. Liu, G. N. Wu, B. Sui, R. F. Li, and X. B. Cao, "Modeling Lightning Performance of Transmission Systems Using PSCAD," 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, pp. 168-171, 2008.
- [7] Y. Späck-Leigsnering, E. Gjonaj, and H. de Gerssem, "Electrothermal Optimization of Field Grading Systems of Station Class Surge Arresters," *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, vol. 4, pp. 29-36, 2019.
- [8] D. Wang, B. He, W. Zhong, B. Lin, D. Wang, and T. Li "Application and Analysis for Surge Arrester on Lightning Protection of Distribution Network," *MATEC Web of Conferences*, 2016.
- [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 Generation, Transmission & Distribution* vol. 3, pp. 129-144, Feb. 2009.
- [10] R. Shariatinasab, F. Ajri, and H. Daman-Khorshid, "Probabilistic Evaluation of Failure Risk of Transmission Line Surge Arresters Caused by Lightning Flash," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, , pp. 193-202, Feb. 2014.

- [23] 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, Aug. 2014.
- [24] M. S. Savic, "Estimation of the Surge Arrester Outage Rate Caused By Lightning Overvoltages," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, pp. 116-12, 2005.
- [21] M. T. Chen and S. J. Hsiao, "Lightning Transient Simulation and Analysis of EGLA under Single-Ended Circuit Breaker Open System," *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, Chengdu, China. 1-4 November 2011,
- [22] IEEE Working Group, "Modeling of Metal-Oxide Surge Arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, pp. 302-309 January 1992.