



مدل سازی ریاضی درخت الکتریکی در کابل XLPE تحت صاعقه

مرتضی قایدی

استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند، m.ghayedi@birjand.ac.ir

چکیده

پلی اتیلن متقاطع (XLPE)، متداول ترین سیستم عایق مورد استفاده در کابل های زیرزمینی، و پست های عایق شده با گاز اغلب در معرض تنش های ولتاژ بالا با ماهیت متغیر زمان قرار می گیرند. اضافه ولتاژ صاعقه، گذرا سریع، گذرا بسیار سریع و ولتاژ AC رایج ترین اضافه ولتاژهایی هستند که به عایق برخورد می کنند. این تنش ها باعث تخریب عایق می شود که به آن درختکاری می گویند و از عوامل اصلی کاهش عمر عایق به شمار می روند. هدف از کار ما توسعه یک مدل تصادفی برای بازرسی گسترش درختان الکتریکی تحت ولتاژ ضربه صاعقه است. ابتدا حل عددی معادله پواسون در ماده بدست می آید. توزیع میدان الکتریکی به دست آمده بر روی سطح ماده برای محاسبه مسیر انتشار درخت با توسعه برنامه ای بر اساس یک رویکرد احتمالی استفاده می شود.

واژه های کلیدی

الکترومغناطیسی محاسباتی، شکست دی الکتریک، تحلیل میدانی، روش اجزای محدود، مدل تصادفی.

مقدمه

تخریب دی الکتریک و تشکیل درخت به عنوان عامل اصلی شکست عایق پلی اتیلن شبکه ای (XLPE) در نظر گرفته می شود. عایق XLPE به طور گسترده در کابل های زیرزمینی (UG) و پست های عایق گاز (GIS) استفاده می شود. این عایق تحت تنش های مختلفی مانند AC، DC و اضافه ولتاژهای ضربه ای با دامنه های مختلف قرار می گیرد. با توجه به این تنش ها، تخریب در عایق در نقاط عیب یا حفره هایی که در عایق وجود دارد شروع می شود و به مرور زمان باعث خرابی کامل می شود. ساختاری که در عایق با چنین تخریب در غیاب رطوبت تشکیل می شود معمولاً به عنوان درختان الکتریکی شناخته می شود. مکانیسم درختکاری با سه مرحله توصیف می شود که شامل شروع درخت، تکثیر و مرحله تشکیل دو ساختار می باشد. پس از راه اندازی، درخت در طول اعمال ولتاژ ورودی تکثیر می شود و در نهایت، شکاف بین الکترودها را پر می کند و باعث آسیب دائمی به

عایق می شود. برای برقراری مجدد منبع تغذیه، آن قسمت از کابل آسیب دیده باید برداشته شود و با یک کابل جدید جایگزین شود و این باعث ایجاد وقفه های مکرر می شود که بر قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می گذارد. از این رو، طراحی دقیق عایق ضروری است و درختکاری یک منطقه تحقیقاتی کلیدی در طول سال ها بوده است. پارامترهای اصلی که مسئول شروع درخت هستند عبارتند از: بزرگی ولتاژ ورودی، میدان بحرانی، فرکانس ولتاژ و نوع ولتاژ (فرکانس توان یا ولتاژ ضربه). بسته به این پارامترها، انواع مختلف درختان به عنوان درختان درخت مانند، درختان بوته، درختان بوته، درختان تکانشی، و درختان فیبریل طبقه بندی می شوند [۱]. ارزیابی پارامترهای مهم درختان الکتریکی مانند طول درخت و بعد فراکتال در [۲] مورد بحث قرار گرفته است. روش های اصلی که برای بررسی پدیده درختکاری توسعه داده شده بود را می توان به مدل های تجربی و مدل های شبیه سازی طبقه بندی کرد. اهمیت تست درختکاری، در مقایسه با تست شکست برای طراحی ضخامت عایق XLPE، در [۳] مشخص شده است. بررسی ویژگی های درختکاری بین فرکانس های ۲۰ هرتز و ۵۰۰ هرتز در [۴] انجام شده است. ویژگی های درختان در XLPE تحت پالس های ولتاژهای تکراری در [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. خصوصیات دبی و رشد جزئی درختان با ولتاژهای متناوب و مستقیم مرکب در [۶] تحلیل شده است. یک مدل مبتنی بر کلمه بصری باگوف پیشنهاد شده است [۷]. بررسی گسترده ای از تجزیه و تحلیل درخت الکتریکی برای کابل های HVDC و HVAC در [۸] یافت شده است. مدل های فوق مبتنی بر آزمایش ها هستند و در مواردی که تعداد موارد بررسی شده زیاد باشد، چندین مشکل عملی دارند. از این رو، مدل های شبیه سازی توسط محققین مختلف توسعه داده شده است که بر اساس جنبه های نظری مختلف است و در پاراگراف زیر مورد بحث قرار می گیرد.

یکی از مدل های اولیه در مدل میدانی، مدل-استوکاستیک است که در [۹] توسعه یافته است. مدل با افزودن پارامترها اصلاح شده است [۱۰]. در [۱۱]، یک مدل تصادفی برای بزرگی های مختلف ولتاژ AC توسعه یافته است و نتایج به صورت تجربی ارزیابی شده بود. مدلی بر اساس روش تخلیه و شبیه سازی شارژ جزئی که در [۱۲]



از آنجایی که XLPE جزء اصلی عایق را در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند پست های عایق گاز (GIS) تشکیل می دهد، مهم است که ویژگی های رشد را بشناسید.

مواد و روشها

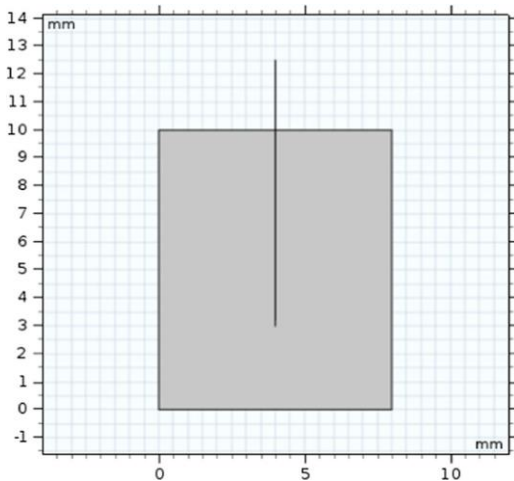
مراحل زیر در توسعه مدل برای ارزیابی ویژگی های انتشار عایق تحت اضافه ولتاژ ضربه ای درگیر است.

ابتدا یک مدل دو بعدی از مواد عایق و الکتروود در COMSOL ایجاد شده است.

ثانیاً، مقادیر میدان الکتریکی در مراحل مختلف زمانی برای ولتاژ ضربه ای ۸۰ کیلوولت با حل معادله پواسون از مدل استخراج شده است.

مرحله سوم شامل ارزیابی مسیر انتشار تخریب در قالب ساختار درختی از طریق عایق از مقادیر میدان الکتریکی استخراج شده است.

در مرحله چهارم، نتایج با رویکرد مبتنی بر هیستوگرام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۱: هندسه مواد عایق پلیمری

ایجاد هندسه و محاسبات میدان الکتریکی در میان مواد عایق

از این رو نمونه عایق پلی اتیلن متقاطع به عنوان یک مستطیل ۱۰ میلی متری $8 \times$ میلی متری در دو بعد در محیط COMSOL در نظر گرفته شده است و در شکل ۱ قابل مشاهده می باشد. ضریب گذردهی الکتریکی XLPE (ϵ_r) به صورت $2/3$ آورده شده است. سوزن فلزی به شکل مورد نیاز ساخته شده و در فاصله ۳ میلی متری از پایین هندسه قرار گرفته است. نوک سوزن به شعاع ۵ میکرومتر ساخته شده است. سوزن دارای خواص مس است که در کتابخانه مواد نرم افزار COMSOL موجود است. یک ضربه ولتاژ بالا ۸۰ کیلو ولت

ایجاد شده بود. در [۱۴]، یک مدل فیزیکی برای توصیف پدیده های شکست در پلیمرهای اکستروود شده توسعه داده شده است. از اتوماتای سلولی برای مدلسازی انتقال استریمر استفاده شده است [۱۵]. بررسی گسترده ای از مدل های موجود در [۱۶] یافت شده است. در [۱۷]، بررسی تنش میدان الکتریکی ساکن در رابط های مشترک کابل HVDC انجام شده است. مروری بر مدل های شبیه سازی در [۱۸] ارائه شده است. انتشار درختان الکتریکی در نانوکامپوزیت ها در [۱۹] مدل شده است.

از بررسی های بیشتر متون، این نتیجه حاصل می شود که مدل هایی که از تغییرات میدان وابسته به زمان ولتاژ اعمالی مراقبت می کنند، کمتر هستند. ما در اینجا می خواهیم تأکید کنیم که رویکرد ما برای ارزیابی ویژگی های انتشار یک درخت الکتریکی تحت ولتاژهای صاعقه در یک ماده عایق پلیمری متمایز است. از این رو، در کار ما، برای یافتن ویژگی های تکاملی درختان الکتریکی که تحت ولتاژ ضربه صاعقه در عایق XLPE رشد می کنند، سعی کردیم این شکاف را با توسعه مدلی مناسب بسازیم. در عمل، یک سیستم قدرت واقعی تحت ولتاژهای متغیر زمانی قرار می گیرد که ممکن است ولتاژ متناوب یا ضربه ای باشند و از این رو، هنگام مدل سازی پدیده ها، جنبه های متغیر زمانی ولتاژ ورودی باید مورد توجه قرار گیرد. از این رو، یک روش جدید، که از جنبه های مختلف زمان میدان های الکتریکی تحت اضافه ولتاژ ضربه ای مراقبت می کند، در کار ما پیشنهاد شده است. ویژگی های رشد یک درخت الکتریکی با حل معادله پواسون برای ورودی های متغیر زمان ارزیابی شده بود. COMSOL در بسیاری از کاربردهای مهندسی برای حل مؤثر بسیاری از مسائل [۲۰، ۲۱] از جمله حل معادلات لاپلاس یا پواسون، برای هر هندسه و تحت ورودی های متغیر با زمان بسیار مفید است و از این رو در مطالعه حاضر استفاده می شود. از این مقادیر توزیع میدان برای یافتن انتشار درخت الکتریکی با نوشتن یک برنامه در MATLAB استفاده شده است. ما از تسهیلات پیوند زنده COMSOL-MATLAB برای بدست آوردن مدلسازی کامل پدیده ها استفاده کرده ایم. این نتایج برای ارزیابی عملکرد پیری الکتریکی مفید خواهد بود.

کرمک های اصلی کار ما بصورت زیر هستند:

۱. توسعه یک روش بی نظیر برای انجام یک مطالعه وابسته به زمان با حل معادله پواسون در تسهیلات پیوند زنده COMSOL-MATLAB برای عایق XLPE.
۲. مدل سازی ویژگی های تکثیر درخت با رویکرد مبتنی بر احتمال از راه حل به دست آمده.
۳. تجزیه و تحلیل انتشار درخت تحت اضافه ولتاژ ضربه صاعقه با رویکرد مبتنی بر هیستوگرام از ۵۰۰۰ نمونه.



نمونه XLPE است. فاصله الکتروود زمین از نوک سوزن ۳ میلی متر در نظر گرفته شده بود که نشان دهنده وضعیت آزمایشی واقعی است. دلیل تغییر ابعاد در طول ردیف و ستون این است که ما ۸ میلی متر \times ۳ میلی متر از نمونه کامل را به عنوان فضای محلول در نظر گرفته ایم. ممکن است در اینجا ذکر شود که درخت فقط در نزدیکی نوک سوزن که ۳ میلی متر از الکتروود زمین فاصله دارد شروع به ایجاد درخت می کند.

مرحله ۴: با شروع ماتریس جواب، هر سلول از ماتریس برای شرایط زیر ارزیابی شده است: (الف) اگر هر یک از سلول های مجاور به عنوان یک درخت شناسایی شود، مقدار شدت میدان محلی سلول برای شرایط بحرانی میدان الکتریکی بررسی می شود. (ب) اگر شرط بحرانی برآورده شود، یک عدد تصادفی (p)، در اینجا به عنوان شرط احتمال اشاره می کند) از یک توزیع نرمال نمونه برداری می شود و اگر $p > 0$ ، آن سلول به سلول درختی موجود اضافه شده است. اگر شرط بحرانی یا احتمال برآورده نشود، به آن سلول اجازه داده شده تا در وضعیت فعلی ادامه یابد. از این شرط احتمال برای نشان دادن تکثیر شاخه درخت در هر جهت استفاده می شود. از آنجایی که بیش از یک سلول که سلول درخت را احاطه کرده است می تواند به مقدار شدت میدان الکتریکی بحرانی برسد، بنابراین درخت بر اساس شرط احتمال تصادفی تکثیر می شود. الگوریتم انتشار درخت به صورت تابع MATLAB نوشته شده است. ما از COMSOL-MATLAB Live Link برای شبیه سازی کامل استفاده کرده ایم که در هر تکرار یا مرحله زمانی، ماتریس های حل از COMSOL گرفته شده و رشد درخت در MATLAB مدل سازی شده است.

نتایج و شبیه سازی

تأثیر اضافه ولتاژ صاعقه بر انتشار درخت با ایجاد هندسه مدل دوبعدی ماده عایق مورد مطالعه قرار گرفته است. ضربه صاعقه با قدرت ۸۰ کیلو ولت به الکتروود بالایی وارد شده و قسمت پایین هندسه زمین شده است. با انجام یک مطالعه وابسته به زمان، توزیع میدان بر روی سطح عایق با حل معادله (۱) به دست آمد. نمودار نمونه ای از توزیع میدان الکتریکی در یک مرحله زمانی در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲، بلوک کامل نشان دهنده نمونه XLPE است و الکتروود مسی در فاصله ۳ میلی متری از الکتروود پایین (زمین) قرار می گیرد. ولتاژ ضربه ای ۸۰ کیلوولت به الکتروود بالایی اعمال شده است، نوک سوزن بیشترین فشار را دارد و تغییرات شدت را می توان مشاهده کرد که از رنگ آبی نشان دهنده کمترین مقدار شدت میدان تا رنگ قرمز نشان دهنده بالاترین مقدار شدت میدان است. نمای بزرگ شده از توزیع میدان الکتریکی در نوک سوزن عایق XLPE را می توان در

به الکتروود بالایی با زمین الکتروود پایینی اعمال شده است. شرایط مرزی زیر برای الکتروودها اعمال شده است. ضمناً روش مورد استفاده تجزیه و تحلیل المان محدود (FEA) است که در تولید مدل های محاسباتی مسائل دنیای واقعی بسیار مفید می باشد.

ارزیابی مسیر تکثیر درخت

قدرت میدان الکتریکی در الکتروود صفحه سوزن با فرض عدم وجود بار فضایی در اطراف نوک درخت با معادله تقریبی زیر بیان می شود [۱].

$$E_{max} = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad (1)$$

که حداکثر میدان می باشد که در نوک سوزن اتفاق می افتد و شعاع نوک سوزن با r و فضای بین نوک سوزن و الکتروود زمین با d نشان داده می شود.

هنگامی که قدرت میدان الکتریکی به یک مقدار بحرانی به نام قدرت میدان بحرانی 4 MV/cm (E_c) رسید، مقدار تنش الکتریکی بر تنش مکانیکی غلبه می کند و درختی شروع می شود [۲۲]. انتشار درختان از طریق عایق عمدتاً به مواد و مقدار قدرت میدان الکتریکی در سلول های پلیمری مجاور بستگی دارد. علاوه بر این، گسترش کانال درختی به عنوان یک پدیده تصادفی مشاهده شده است، و از این رو، یک قانون احتمالی باید برای سلول های اطراف سلول درختی آغاز شده اعمال شود. روش اتخاذ شده در کار ما شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱: یک مدل ۲ بعدی از مواد عایق با ابعاد مورد نیاز در COMSOL Multiphysics ایجاد شده است.

مرحله ۲: ورودی شکل موج ضربه صاعقه یک ضربه استاندارد از پیش و دنباله $1/2/50 \mu\text{s}$ می باشد، همانطور که در معادله (۴) (IS20171) نشان داده شده است. همانطور که در معادله زیر نمایش نمایش داده می شود:

$$u(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

در اینجا، $u(t)$ قدر لحظه ای موج، A دامنه، α و β به ترتیب ثابت دنباله و پیش موج هستند. موج ضربه ای با استفاده از گزینه معادله در COMSOL Multiphysics روی ماده اعمال شده است. شبیه سازی شکل موج ضربه صاعقه $1/2/50 \mu\text{s}$ در لینک ارتباطی COMSOL-MATLAB با نوشتن شکل موج در معادله (۲) انجام شده است. در [۱۶] براحتی می توان ارائه ورودی به عنوان یک موج ضربه و حل معادله پواسون را در نرم افزار COMSOL ایجاد کرد.

مرحله ۳: ماتریس های شدت میدان الکتریکی در مراحل مختلف زمانی پس از انجام یک شبیه سازی وابسته به زمان با ۵۰ مرحله زمانی استخراج شده اند. ماتریس مذکور به عنوان یک شبکه با ابعاد 120×120 (ردیف ها و ستون ها) در نظر گرفته شده است که نشان دهنده

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

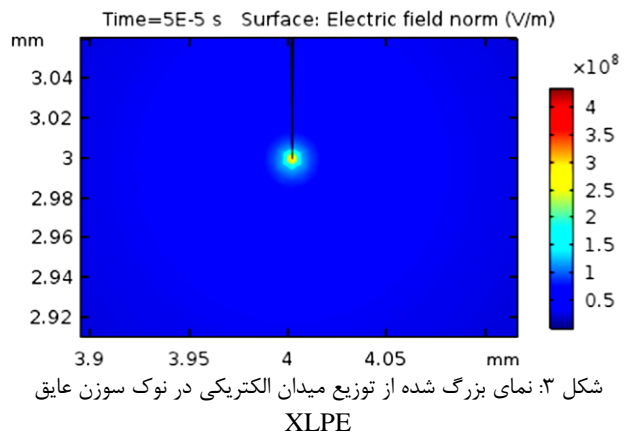
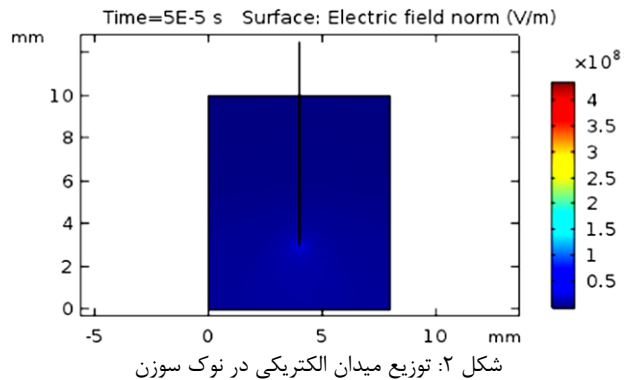
اثر اضافه ولتاژ صاعقه در کابل XLPE توسط یک مدل تصادفی تحلیل شده است. شبیه‌سازی‌هایی برای تولید ساختارهای درختی با دادن ضربه صاعقه به عنوان ورودی در مدل فوق اجرا شده‌اند. این مطالعه را می‌توان به مواد عایق مختلف مورد استفاده در صنعت کابل کشی برای درک تأثیر اضافه ولتاژ صاعقه بدون انجام آزمایشات واقعی گسترش داد. مدل‌های توسعه‌یافته برای صنعت، برای پیش‌بینی دقیق آسیب‌های ایجاد شده در کابل‌ها مفید هستند و در نگهداری پیشگیرانه کمک کامل خواهند کرد. مدل‌های دو بعدی ساده هستند و در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی زمان کمتری برای پیاده‌سازی می‌برند. با این حال، کار برای توسعه یک مدل سه بعدی در آینده برای دقت بهتر گسترش خواهد یافت.

تغییر در پارامترهای آسیب به دست آمده در قالب درختان الکتریکی در XLPE مانند طول درخت، عرض و بعد فراکتال می‌تواند در کارهای آتی مورد تجزیه و تحلیل و بحث قرار گرفته شود.

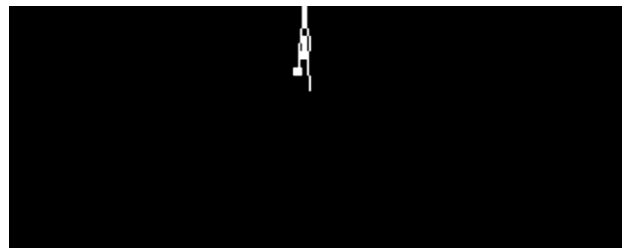
مراجع و منابع

- [1] Sarathi, R.; Oza, K.H.; PavanKumar, C.L.G.; Tanaka, T.: Electrical treeing in XLPE cable insulation under harmonic AC voltages. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 22(6), 3177–3185 (2015).
- [2] Schurch, R.; Ardila-Rey, J.; Montana, J.; Angulo, A.; Rowland, S.M.; Iddrissu, I.; Bradley, R.S.: 3D characterization of electrical tree structures. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 26(1), 220–228 (2019).
- [3] Ying, L.; Xiaolong, C.: A novel method for the insulation thickness design of HV XLPE cable based on electrical treeing tests. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 21(4), 1540–1546 (2014).
- [4] Chen, G.; Tham, C.H.: Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 16(1), 179–188 (2009).
- [5] Du, B.X.; Zhu, L.W.: Electrical tree characteristics of XLPE under repetitive pulse voltage in low temperature. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 22(4), 1801–1808 (2015).
- [6] Liu, H.; Liu, Y.; Li, Y.; Zheng, P.; Rui, H.: Growth and partial discharge characteristics of electrical tree in XLPE under ACDC composite voltage. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 24(4), 2282–2290 (2017).
- [7] Vidya, M.S.; Sunitha, K.; Ashok, S.; Mishra, D.; Chandra, V.: A model based on bag of visual words to predict the category of damage in XLPE insulation under the application of combined AC and repeated

شکل ۳ مشاهده کرد که میدان در نوک نقطه پایین الکتروود بالایی حداکثر می‌باشد و با رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل ۴ یک نمودار نمونه از درخت در حال رشد از ۵۰۰۰ نمونه مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که درخت از وسط الکتروود بالایی که الکتروود قرار می‌گیرد شروع می‌شود و به سمت الکتروود پایین (زمین) انتشار می‌یابد. قسمتی از نوک سوزن (۳ میلی‌متر از پایین) نشان داده می‌شود زیرا درخت فقط از نوک الکتروود شروع به انتشار می‌کند.



شکل ۴: رشد درخت الکتریکی تحت اضافه ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد ۸۰ کیلوولت

- [16] Rodríguez-Serna, J.M.; Albarracín-Sánchez, R.; Carrillo, I.: An improved physical-stochastic model for simulating electrical tree propagation in solid polymeric dielectrics. *Polymers (Basel)* (2020).
- [17] Jörgens, C.; Clemens, M.: "Modeling the electric field at interfaces and surfaces in high-voltage cable systems." *COMPEL – Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.* (2020).
- [18] Satrazanis, C.; Mavrikakis, N.C.; Siderakis, K.G.; Danikas, M.G.: A short review and a comparison of simulation models of electrical treeing development in solid insulation. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 13(4), 69–75 (2020).
- [19] Cai, Z.; Wang, X.; Li, L.; Hong, W.: Electrical treeing: a phase-field model. *Extrem. Mech. Lett.* 28, 87–95 (2019).
- [20] Jayakrishnan, A.; Kavitha, D.; Arthi, A.; Nagarajan, N.; Balachandran, M.: Simulation of electric field distribution in nanodielectrics based on XLPE. *Mater. Today Proc.* 3(6), 2381–2386 (2016).
- [21] Velasco, J.; Frascella, R.; Albarracín, R.; Burgos, J.; Dong, M.; Ren, M.; Yang, L.: Comparison of positive streamers in liquid dielectrics with and without nanoparticles simulated with finite-element software. *Energies* 11(2), 361 (2018).
- [22] El-Zein, A.; Talaat, M.; El Bahy, M.: A numerical model of electrical tree growth in solid insulation. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 16(6), 1724–1734 (2009).
- lightning impulses of both polarities. *Electr. Eng.* 103, 2825–2836 (2021).
- [8] Su, J.; Du, B.; Li, J.; Li, Z.: Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges. *High Voltage* 5(4), 353–364 (2020).
- [9] Niemeyer, L.; Pietronero, L.; Wiesmann, H.J.: Fractal dimension of dielectric breakdown. *Phys. Rev. Lett.* 52(12), 1033–1036 (1984).
- [10] Wiesmann, H.J.; Zeller, H.R.: A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. *J. Appl. Phys.* 60(5), 1770–1773 (1986).
- [11] Sarathi, R.; Ramu, T.S.: Stochastic simulation of tree propagation in XLPE under different voltage profiles. *Solid State Commun.* 87(5), 401–404 (1993).
- [12] Schwab, A.J.; Sack, M.; Malinovski, A.S.; Noskov, M.D.: Selfconsistent modeling of electrical tree propagation and PD activity. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 7(6), 725–733 (2000).
- [13] Barclay, A.L.; Sweeney, P.J.; Dissado, L.A.; Stevens, G.C.: Stochastic modelling of electrical treeing: fractal and statistical characteristics. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 23(12), 1536–1545 (1990).
- [14] Parpal, J.L.; Crine, J.P.; Dang, C.: Electrical aging of extruded dielectric cables: a physical model. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 4(2), 197–209 (1997).
- [15] Kupershtokh, A.L.; Charalambakos, V.; Agoris, D.; Karpov, D.I.: Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 34(6), 936–946 (2001).