



## بهبود بهره‌وری انجام آزمون‌های تخلیه‌جزئی کابل‌های فشارقوی با استفاده از روش فرکانس خیلی پایین (VLF)

احمدرضا جمالی ابنوی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، حامد هاشمی دزکی<sup>۲\*</sup>، استادیار و عباس کتابی<sup>۳</sup>، استادتمام

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

- [ahmadrezajamali@grad.kashanu.ac.ir](mailto:ahmadrezajamali@grad.kashanu.ac.ir)

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

- [hamed.hashemi@kashanu.ac.ir](mailto:hamed.hashemi@kashanu.ac.ir)

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

- [aketabi@kashanu.ac.ir](mailto:aketabi@kashanu.ac.ir)

### چکیده

پایش وضعیت عایقی سیستم‌های کابلی امر مهمی است که عملکرد سیستم‌های کابلی را تضمین می‌نماید. روش‌های مختلفی برای پایش وضعیت عایقی سیستم‌های کابلی وجود دارد که از میان آن‌ها، آزمون تخلیه‌جزئی به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها شناخته می‌شود که امکان پایش وضعیت عایقی سیستم کابلی و تعیین طول عمر آن را در اختیار قرار می‌دهد. انجام آزمون تخلیه‌جزئی در فرکانس قدرت چالش‌هایی را به همراه دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها جریان شارژ خازنی بالا به خصوص با افزایش طول سیستم کابلی خواهد بود. با توجه به این که جریان شارژ خازنی سیستم کابلی با فرکانس منبع تغذیه رابطه مستقیم دارد، می‌توان با تغییر در فرکانس تغذیه، میزان جریان شارژ خازنی را تا حد مناسبی کاهش داد. اهمیت کاهش جریان خازنی آن جایی مشخص می‌شود که کاهش آن منجر به کاهش ظرفیت توان خروجی منبع تغذیه می‌گردد. این مسئله اذعان می‌کند که با کاهش توان خروجی منبع تغذیه می‌توان از منابع تغذیه کوچکتر با بهره‌وری بیشتر استفاده نمود. در انجام آزمون‌های درمحل این مسئله بسیار پراهمیت بوده و صرفه‌جویی در زمان انجام آزمون و جابجایی ساده‌تر تجهیزات آزمون را در پی خواهد داشت. موضوع مهمی که در فرکانس‌های خیلی پایین مطرح می‌گردد، امکان تشخیص منابع تخلیه‌جزئی است. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که با کاهش فرکانس منبع، علی‌رغم وجود برخی تفاوت‌ها در الگوهای حوزه فاز و هم‌چنین تعدد وقوع تخلیه‌جزئی در سیستم کابلی، امکان تشخیص پدیده تخلیه‌جزئی در سیستم کابلی وجود خواهد داشت. با توجه به اهمیت موضوع و نیاز به منبع تغذیه فشارقوی با فرکانس خیلی پایین، در این مقاله ابتدا رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و سپس مدل مداری برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین ارائه شده است. اگر چه روش‌های مختلفی در این حوزه ارائه گردیده است، با این وجود استفاده از ادوات الکترونیک قدرت به عنوان راه‌حل کلیدی مطرح می‌شود. دلیل استفاده از این ادوات، انعطاف‌پذیری سیگنال تحریک کلیدهای الکترونیک قدرت، امکان بهره‌گیری از فرکانس‌های خیلی بالا (در حدود ۱۰۰kHz) برای کاهش ابعاد و وزن منبع تغذیه و هم‌چنین شکل موج خروجی با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** منبع تغذیه فشارقوی با فرکانس خیلی پایین، کابل فشارقوی، آزمون تخلیه‌جزئی، روش اجزاء محدود، بهره‌وری آزمون‌های درمحل، COMSOL، MATLAB/Simulink.

\* نام نویسنده مسئول: حامد هاشمی دزکی

آدرس نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.



## ۱- مقدمه

سیستم‌های کابلی به عنوان بخش مهمی از سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی محسوب می‌شوند که عملکرد مطمئن این سیستم‌ها نیازمند پایش مداوم می‌باشد [۱، ۲]. پایش مستمر وضعیت عایقی سیستم کابلی، افزایش کیفیت و بهره‌وری سیستم انتقال انرژی الکتریکی را به همراه خواهد داشت. استفاده از آزمون‌های غیرمخرب عایقی به ویژه آزمون تخلیه جزئی یکی از بهترین و رایج‌ترین روش‌های پایش وضعیت عایقی سیستم‌های کابلی می‌باشد [۳، ۴].

آزمون تخلیه جزئی یک روش مناسب برای تشخیص خرابی‌های عایقی و پیشگیری از پیری عایقی در سیستم‌های کابلی می‌باشد [۵، ۶]. با استفاده از آزمون تخلیه جزئی می‌توان مجموعه اقدامات پیشگیرانه‌ای برای کاهش قطعی‌های ناخواسته سیستم انتقال انرژی ناشی از مشکلات عایقی سیستم کابلی صورت داده و طول عمر مفید سیستم کابلی را افزایش داد. یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در انجام آزمون تخلیه جزئی ایجاد می‌شود، نیاز به تأمین توان راکتیو زیاد برای جبران جریان شارژ خازنی سیستم کابلی به خصوص در آزمون‌های درمحل است. در واقع رفتار سیستم کابلی تحت آزمون همانند خازن بزرگی است که با افزایش طول سیستم کابلی ظرفیت آن افزایش خواهد یافت و در نتیجه جریان شارژ خازنی بزرگتر خواهد بود. در این شرایط منبع تغذیه با توان خروجی بیشتری نیاز است که با افزایش حجم منبع تغذیه همراه می‌باشد.

یکی از روش‌هایی که در استانداردها و اسناد علمی مختلف به آن اشاره شده است، استفاده از منابع تغذیه ولتاژ با فرکانس خیلی پایین است [۷، ۸]. به بیان دیگر، جریان شارژ خازنی سیستم کابلی با فرکانس ولتاژ اعمالی به آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین، با کاهش فرکانس می‌توان جریان شارژ خازنی را کاهش داده و به دنبال آن توان مورد نیاز برای انجام آزمون تخلیه جزئی کاهش یافته و در نتیجه می‌توان از منابع تغذیه کم‌حجم و فشرده بهره گرفت. برخی از مطالعات صورت گرفته در این حوزه نشان می‌دهند که علی‌رغم برخی تفاوت‌ها در نتایج اندازه‌گیری نظیر نرخ تکرار تخلیه جزئی، الگوهای حوزه فاز، ولتاژ شروع و اتمام تخلیه جزئی، استفاده از ولتاژ تغذیه با فرکانس خیلی پایین در تشخیص پدیده تخلیه جزئی هم‌چنان کارآمد می‌باشد [۹-۱۱]. از این رو نیاز برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین احساس می‌شود.

روش‌های مختلفی برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین وجود دارد که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. سطح ولتاژ تولید شده در خروجی، هارمونیک مجاز شکل موج خروجی و جریان خروجی منبع تغذیه از مهم‌ترین محدودیت‌هایی است که روش مورد استفاده را تعیین می‌نماید [۷، ۱۲]. علاوه بر این، سادگی جابجایی به خصوص در انجام آزمون‌های درمحل، کم‌حجم و سبک بودن منبع تغذیه نیز دیگر عواملی است که در طراحی این منابع باید در نظر گرفته شوند [۱۳، ۱۴].

استفاده از ادوات الکترونیک قدرت یکی از مناسب‌ترین روش‌هایی است که می‌توان با تکیه بر امکانات آن‌ها شکل موج مورد نظر را در فرکانس‌های مختلف تولید کرد. مزیت این روش، امکان طراحی و ساخت منابع تغذیه فشرده با جریان و ولتاژ مناسب در خروجی می‌باشد [۱۵، ۱۶]. هم‌چنین به واسطه استفاده از فرکانس بالا برای سیگنال حامل، می‌توان با استفاده از فیلتر خروجی با ابعاد کم، اعوجاجات هارمونیک شکل موج خروجی را به مقدار قابل قبولی رساند. بنابراین با استفاده از فناوری ادوات الکترونیک قدرت، می‌توان منابع تغذیه با کیفیت طراحی و ساخت که در بهره‌وری انجام آزمون‌های تخلیه جزئی تأثیر قابل توجهی داشته باشند. علاوه بر این طراحی و ساخت منبع تغذیه با فرکانس خیلی پایین با استفاده از این روش، با کاهش هزینه‌های انجام آزمون تخلیه جزئی درمحل و افزایش کیفیت و بهره‌وری در انجام آزمون‌ها همراه است. هم‌چنین امکان انجام آزمون‌های تخلیه جزئی بر روی سیستم‌های کابلی طویل نیز میسر خواهد شد.

بر این اساس هدف از این مقاله ارائه مدل مداری مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین می‌باشد. بنابراین، در بخش دوم از این مقاله تئوری، روش تحقیق و مدلسازی اجزاء محدود سیستم کابلی صورت گرفته است. در بخش سوم، سیستم کابلی پایه مورد مطالعه بیان می‌گردد. بخش چهارم، به شبیه‌سازی سیستم کابلی در



نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده است. همچنین شرایط مرزی حاکم بر سیستم کابلی و مش‌بندی سیستم کابلی تحت مطالعه در بخش چهارم این مقاله تشریح شده است. در بخش پنجم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری ارائه شده است و رفتار سیستم کابلی در شرایط فرکانس‌های مختلف تشریح گردیده است. در بخش ششم، مدل مداری منبع تغذیه ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی‌پایین ارائه شده و شکل موج‌های خروجی آن بررسی گردیده است. در نهایت در بخش هفتم، به نتیجه‌گیری و بحث پیرامون نتایج حاصل شده پرداخته شده است.

## ۲- روش تحقیق

همانطور که اشاره شد، پایش وضعیت سیستم کابلی با استفاده از آزمون‌های عایقی غیرمخرب، موجب افزایش بهره‌وری در سیستم کابلی و کاهش قطعی‌های ناخواسته می‌گردد. از این رو، نیاز است تا وضعیت عایقی سیستم‌های کابلی به صورت دوره‌ای مطابق با شرایط استانداردهای ملی و بین‌المللی موجود مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از بهترین روش‌هایی که مکرر در استانداردهای موجود داخلی و خارجی به آن اشاره شده است، استفاده از آزمون تخلیه جزئی در سیستم‌های کابلی است.

### ۲-۱- روش انجام آزمون تخلیه جزئی در سیستم کابلی

تخلیه جزئی (PD)<sup>۱</sup>، تخلیه الکتریکی محلی در عایق سیستم کابلی است که منجر به ایجاد ارتباط الکتریکی به دو بخش رسانا می‌گردد [۱۷، ۱۸]. به بیان دیگر، تخلیه جزئی در بخشی از عایق سیستم کابلی که اندازه میدان الکتریکی از مقدار آستانه شکست ماده فراتر می‌رود، رخ می‌دهد. وقوع تخلیه جزئی همراه با ایجاد حرارت نقطه‌ای و یا تجزیه شیمیایی عایق خواهد بود [۱۹، ۲۰]. تداوم تخلیه جزئی در سیستم کابلی منجر به مشکلات عایقی نظیر کاهش طول عمر سیستم کابلی، کاهش قابلیت اطمینان شبکه قدرت و افزایش نرخ خطا می‌گردد و قطعی سیستم انتقال انرژی الکتریکی را به همراه دارد.

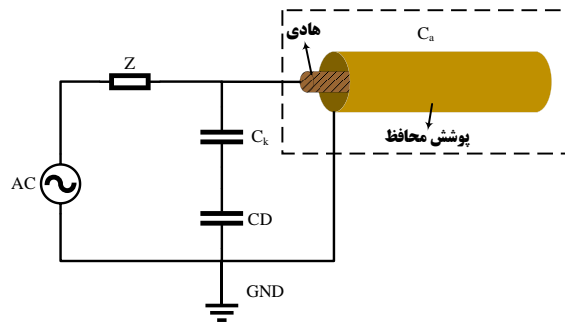
تنش ولتاژی بر روی عایق کابل، نوع و کیفیت ماده عایقی، وجود ناخالصی‌ها و خلل و فرج در عایق کابل، کیفیت ساخت و تولید پایین و شرایط نصب و اجراء نامناسب سیستم کابلی از جمله مواردی هستند که منجر به افزایش تخلیه جزئی در سیستم کابلی و به دنبال آن کاهش بهره‌وری و طول عمر سیستم کابلی خواهند شد. علاوه بر این مسائل، شرایط محیطی نیز می‌تواند در شرایط وقوع تخلیه جزئی تأثیراتی را به همراه داشته باشند. به طوری که در [۲۱] نشان داده شده است که با افزایش رطوبت، میزان تخلیه جزئی در سیستم کابلی افزایش داشته است.

به طور کلی آزمون تخلیه جزئی را می‌توان به دو صورت برخط<sup>۲</sup> و برون‌خط<sup>۳</sup> انجام داد که نحوه انجام آزمون تخلیه جزئی برون‌خط در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Partial Discharge

<sup>2</sup> Online

<sup>3</sup> Offline



شکل ۱: مدار اندازه‌گیری تخلیه جزئی به صورت برون خط

## ۲-۲- مدل‌سازی ریاضی سیستم کابلی در فرکانس خیلی پایین

نکته حائز اهمیت این است که کابل‌ها ظرفیت خازنی بزرگی دارند و افزایش طول سیستم کابلی، افزایش ظرفیت خازنی راه به دنبال دارد. از این رو، برای جبران این توان راکتیو، منبع تغذیه مورد استفاده باید توان بالایی داشته باشد. بنابراین انجام این آزمون‌ها به صورت در محل<sup>۴</sup>، با چالش‌هایی همراه است. یکی از روش‌هایی که می‌توان مطرح نمود، کاهش فرکانس منبع ولتاژ آزمون است که منجر به کاهش امپدانس خازنی سیستم کابلی شده و در نتیجه جریان شارژ خازنی به شکل قابل توجهی کاهش خواهد داشت. این کاهش در جریان شارژ خازنی، منجر به کاهش ابعاد تجهیزات مورد نیاز برای آزمون می‌گردد. رابطه (۱)، جریان شارژ خازنی سیستم کابلی را نشان می‌دهد [۷].

$$I = 2\pi f C V \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $f$  فرکانس منبع تغذیه آزمون،  $C$  ظرفیت خازنی سیستم کابلی،  $V$  دامنه ولتاژ اعمالی به سیستم کابلی می‌باشد.

همانگونه که در رابطه (۱) مشخص است، جریان شارژ خازنی با فرکانس منبع تغذیه رابطه مستقیم دارد. بنابراین با کاهش فرکانس منبع تغذیه، جریان شارژ خازنی با کاهش روبه‌رو خواهد شد که منجر به کاهش ابعاد منبع تغذیه می‌گردد.

بنابراین برای تعیین رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف، نیاز است تا مدل‌سازی ریاضی در حوزه فرکانس صورت گیرد. در این شرایط مدل‌سازی ریاضی بر مبنای قانون پایستگی بار صورت می‌پذیرد. روابط (۲) و (۳) بیان ریاضی قانون پایستگی بار می‌باشد [۲۲].

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j \omega \rho \quad (3)$$

با اعمال ولتاژ به هادی سیستم کابلی و اتصال پوشش محافظ کابل به زمین، سیستم کابلی همانند یک خازن طویل مدل می‌شود. باید توجه داشت که در این شرایط میدان الکتریکی یک میدان پایستار می‌باشد. به بیان دیگر، به دلیل این که سیستم کابلی تحت بار قرار ندارد، جریان عبوری از هادی کابل ناچیز است؛ در نتیجه می‌توان از تغییرات میدان مغناطیسی در شرایط انجام آزمون تخلیه جزئی صرف‌نظر کرد و میدان الکتریکی ایجاد شده در سیستم کابلی را صرفاً ناشی از گرادیان ولتاژ در نظر گرفت. رابطه (۴)، میدان الکتریکی در سیستم کابلی را نشان می‌دهد [۲۳، ۲۴].

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4)$$

علاوه بر این، شرایط میدان الکتریکی پایستار (میدان غیرگردشی)<sup>۵</sup> در رابطه (۵) نشان داده شده است [۲۳، ۲۴].

<sup>4</sup> On-site

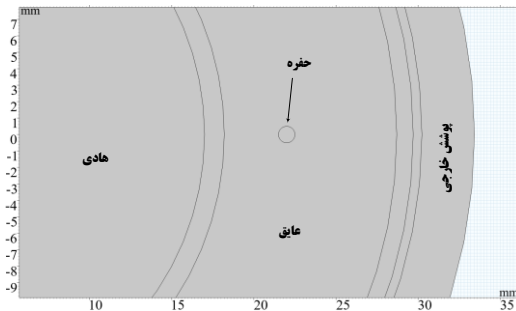
<sup>5</sup> Curl-free

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

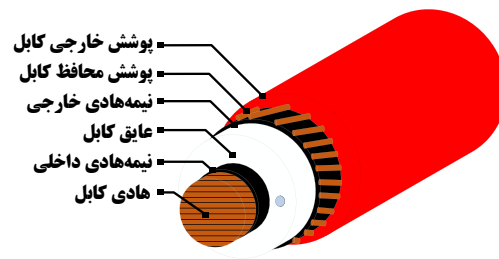
همانگونه که در رابطه‌های (۴) و (۵) بیان شده است، میدان الکتریکی تنها به گرادیان ولتاژ وابسته است. بنابراین، می‌توان گفت که اندازه میدان الکتریکی در فرکانس‌های مختلف تغییرات چشم‌گیری نخواهد داشت و ثابت است. با این حال، مطابق با رابطه (۳) چگالی جریان الکتریکی رابطه مستقیم با فرکانس منبع تغذیه دارد. در نتیجه، تغییرات در فرکانس منبع تغذیه، تغییرات در چگالی جریان الکتریکی در سیستم کابلی را به همراه دارد. این موضوع بیان جریان شارژ خازنی سیستم کابلی است که مشخص می‌کند با کاهش فرکانس منبع تغذیه، جریان شارژ خازنی کاهش می‌یابد.

### ۳- بررسی سیستم کابلی مورد مطالعه

سیستم‌های کابلی معمولاً از اجزاء داخلی مختلفی تشکیل می‌شوند که در شکل (۲) مشخص گردیده است. سیستم کابلی مورد مطالعه از نوع عایق XLPE با سطح مقطع  $1 \times 800$  می‌باشد که ولتاژ فازی برابر با ۳۶ kV متحمل می‌گردد. مشخصات ساختاری سیستم کابلی مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. برای بررسی رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف، یک حفره به قطر ۰/۵ میلی‌متر در عایق کابل به عنوان منبع تخلیه جزئی در نظر گرفته شده است. شکل ۲ این حفره را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۲: ساختمان داخلی سیستم کابلی مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات ساختاری سیستم کابلی مورد مطالعه

ردیف	توضیحات	مقدار
۱	ولتاژ فاز سیستم کابلی	۳۶ کیلوولت
۲	سطح مقطع هادی کابل	۸۰۰ میلی‌متر مربع
۳	ضخامت نیمه‌هادی داخلی	۱/۲ میلی‌متر
۴	ضخامت عایق کابل	۱۰/۵ میلی‌متر
۵	ضخامت نیمه‌هادی خارجی	۱/۲۵ میلی‌متر
۶	سطح مقطع معادل پوشش محافظ کابل	۱۰۰ میلی‌متر مربع
۷	ضخامت پوشش خارجی کابل	۳/۲ میلی‌متر
۸	طول سیستم کابلی	۱۰۰۰ متر
۹	قطر حفره	۰/۵ میلی‌متر
۱۰	ظرفیت خازنی	۰/۲۸۱ میکروفاراد بر کیلومتر
۱۱	نوع سیستم کابلی	Cu/SC/XLPE/SC/Cu/PVC



باید توجه داشت که برای طول مشخص شده (۱۰۰۰ متر) سیستم کابلی، جریان شارژ خازنی در فرکانس قدرت در حدود ۳/۱۸ آمپر جریان نیاز خواهد بود. با این حساب می‌توان گفت که منبع تغذیه باید بتواند در حدود ۱۱۵ kVA توان خروجی ایجاد نماید. در عمل حمل و نقل تجهیزاتی که بتوانند در انجام این آزمون مورد استفاده قرار گیرند، بسیار دشوار خواهد بود. زیرا این تجهیزات از نظر ابعاد بزرگ و وزن بالایی دارند. این در حالی است که در صورتی که آزمون در فرکانس ۰/۱ هرتز صورت گیرد، جریان شارژ خازنی در حدود ۶/۳۶ mA می‌باشد که ۱/۵۰۰ برابر جریان شارژ خازنی در فرکانس قدرت می‌باشد. بنابراین منبع تغذیه در این فرکانس تنها نیاز دارد که ۱۲۱ VA توان در خروجی ایجاد نماید. این تفاوت توان، کیفیت و بهره‌وری در انجام آزمون تخلیه جزئی را افزایش می‌دهد و در هزینه‌های ناشی از آن صرفه‌جویی شایانی می‌نماید. هم‌چنین امکان انجام آزمون‌های درمحل نیز بخصوص برای بخش‌هایی که امکان جابجایی تجهیزات با ابعاد زیاد موجود نیست را فراهم می‌آورد.

#### ۴- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری روشی مناسب برای طراحی و شبیه‌سازی رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف است. بر این اساس، در این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. هدف از این بررسی، تعیین رفتار سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف است. از این رو، مطالعه در حوزه فرکانس در نرم‌افزار صورت گرفته است. بنابراین، سیستم کابلی در حوزه DC و فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۵۰ هرتز مدل‌سازی شده است.

#### ۴-۱- شرایط مرزی حاکم بر سیستم کابلی

با توجه به این موضوع که در شرایط انجام آزمون تخلیه جزئی به صورت برون خط، کابل تحت بار قرار ندارد. از این رو، می‌توان گفت که جریان عبوری از هادی کابل تقریباً صفر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی در این شرایط پایستار (غیرگردشی) است که در رابطه (۲) بیان شده است [۲۳، ۲۴].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

بر این اساس، می‌توان اذعان کرد، میدان الکتریکی ایجاد شده در سیستم کابلی به صورت یکتا به ولتاژ اعمال شده وابسته خواهد بود. در این شرایط، میدان الکتریکی مستقل از تغییرات فرکانس در سیستم کابلی می‌باشد.

#### ۴-۲- ولتاژ اعمالی به سیستم کابلی

مطابق آنچه که در آزمون تخلیه جزئی صورت می‌گیرد، هادی کابل از یک سو به منبع تغذیه ولتاژی متصل شده و از سوی دیگر باز می‌ماند. هم‌چنین پوشش محافظ کابل نیز به زمین متصل می‌گردد. برای اعمال این شرایط مرزی در شبیه‌سازی نرم‌افزاری، دو ویژگی به سیستم کابلی تحت مطالعه اضافه می‌گردد که یکی مربوط به هادی و دیگری مربوط به پوشش محافظ کابل است. رابطه (۳) و (۴) این شرایط مرزی را به ترتیب نشان می‌دهد.

$$V_{con} = 36kV \quad (3)$$

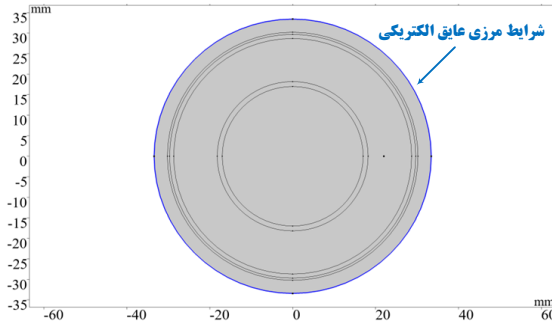
$$V_{scr} = 0 \quad (4)$$

#### ۴-۳- عایق الکتریکی

با توجه به اینکه مطالعه گرادیان ولتاژ و میدان الکتریکی در درون کابل انجام می‌شود، شرایط مرزی در خارج از ساختار کابل به شکل عایق الکتریکی تعریف می‌گردد. در واقع رابطه (۵) بیان می‌کند که جریان در محل مرز خارجی سیستم کابلی برابر با صفر است و هیچ‌گونه منبع بار در این نقطه وجود نخواهد داشت. شکل ۳ محل اعمال این شرایط مرزی را نشان می‌دهد [۲۲].

$$n.J = 0$$

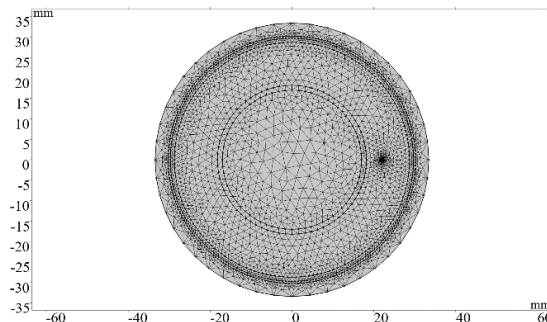
(۲)



شکل ۳: شرایط مرزی عایق الکتریکی بر روی پوشش خارجی سیستم کابلی

#### ۴-۴- مش بندی

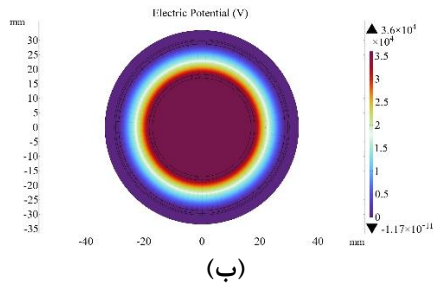
مطالعه فیزیک‌های مختلف مبتنی بر روش اجزاء محدود نیازمند گام‌هایی است که مش‌بندی به عنوان یکی از اصلی‌ترین آن‌ها به‌شمار می‌رود. دقت مش‌بندی می‌تواند دقت نتایج حاصل را تغییر دهد. بنابراین، مش‌بندی مناسب می‌تواند نتایج قابل اعتماد ایجاد نماید. برای این منظور، از ابزار مش‌بندی خودکار نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. برای افزایش قابلیت اطمینان مش ایجاد شده، از ابزار Mesh Adaption استفاده گردیده است که دقت مش‌بندی را افزایش دهد. شکل ۴ مش ایجاد شده بر روی سیستم کابلی را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است برای انجام مطالعات دقیق و بررسی اثرات منبع تغذیه با فرکانس‌های مختلف بر روی سیستم کابلی، مش‌بندی در محل حفره عایق کابل به شکل دقیق‌تری صورت گرفته است.



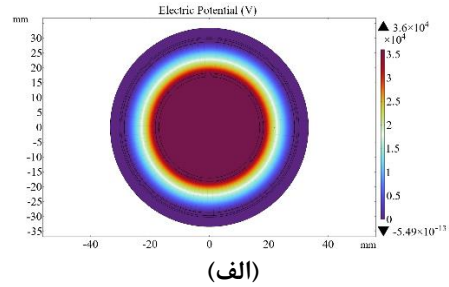
شکل ۴: مش بندی سیستم کابلی مورد مطالعه

#### ۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی

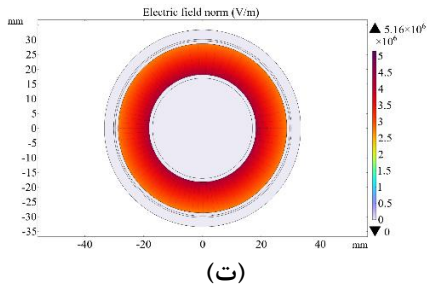
شبیه‌سازی نرم‌افزاری در حوزه زمان و فرکانس صورت گرفته است. ولتاژ در تمامی فرکانس‌ها به صورت یکسان اعمال شده است. میدان الکتریکی برابر گرادیان ولتاژ اعمال شده به هادی سیستم کابلی است و با توجه به این فرض که میدان الکتریکی پایستار (غیرگردشی) است، میدان الکتریکی وابسته به فرکانس نخواهد بود. شکل ۵ توزیع ولتاژ اعمال شده بر سیستم کابلی و میدان الکتریکی در سیستم کابلی را در فرکانس قدرت و فرکانس خیلی پایین (VLF) نشان می‌دهد. هم‌چنین توزیع میدان الکتریکی در اطراف حفره در شکل ۶ نشان داده شده است.



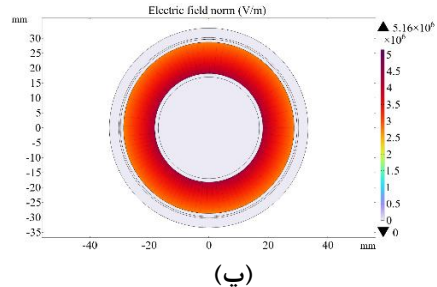
(ب)



(الف)

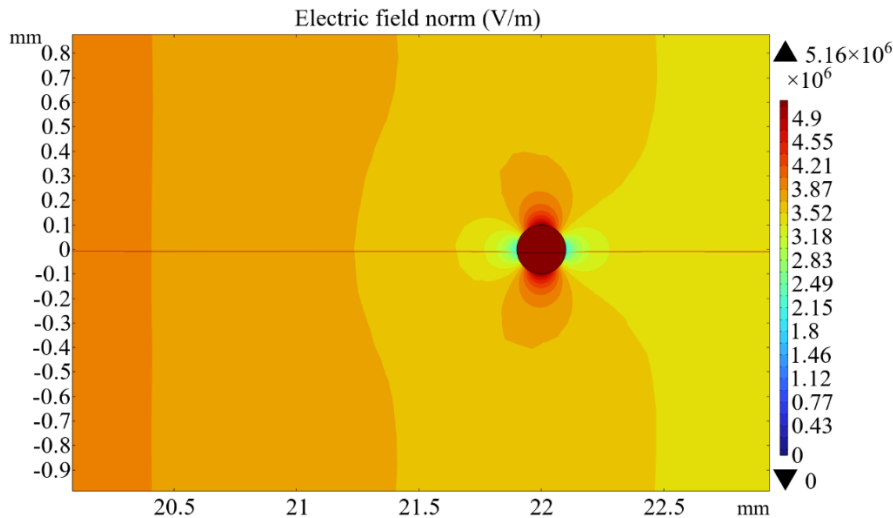


(ت)



(پ)

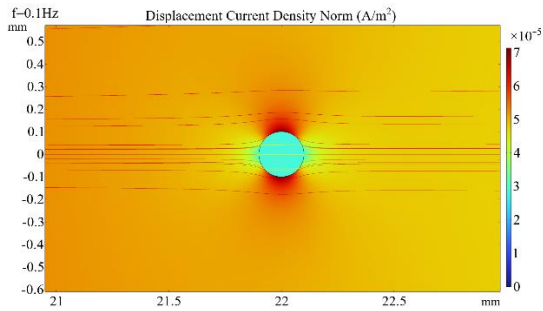
شکل ۵: توزیع ولتاژ و میدان الکتریکی در سیستم کابلی؛ (الف) توزیع ولتاژ در فرکانس ۰/۱ هرتز؛ (ب) توزیع ولتاژ در فرکانس ۵۰ هرتز؛ (پ) توزیع میدان الکتریکی در فرکانس ۰/۱ هرتز؛ (ت) توزیع میدان الکتریکی در فرکانس ۵۰ هرتز.



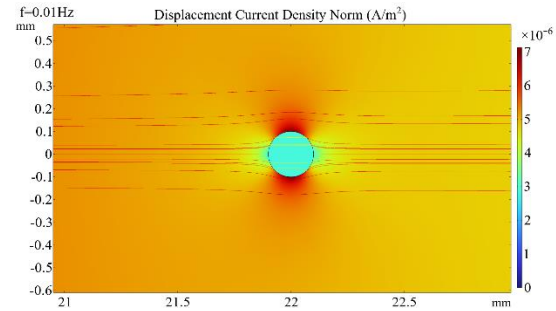
شکل ۶: توزیع میدان الکتریکی در اطراف حفره در عایق سیستم کابلی

علی‌رغم ثابت بودن توزیع میدان الکتریکی در عایق سیستم کابلی، چگالی جریان الکتریکی در حفره در فرکانس‌های مختلف متفاوت خواهد بود. دلیل این است که چگالی جریان جابجایی در سیستم کابلی رابطه مستقیم دارد. بنابراین، با کاهش فرکانس، چگالی جریان جابجایی در حفره کاهش می‌یابد. کاهش چگالی جریان در فرکانس‌های پایین‌تر به معنای جریان شارژ خازنی کمتر در فرکانس‌های پایین است که امکان استفاده از منابع تغذیه فشرده با توان خروجی کم‌تر را در اختیار قرار می‌دهند. شکل ۷ چگالی جریان جابجایی در حفره در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جریان شارژ خازنی مورد نیاز در فرکانس‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

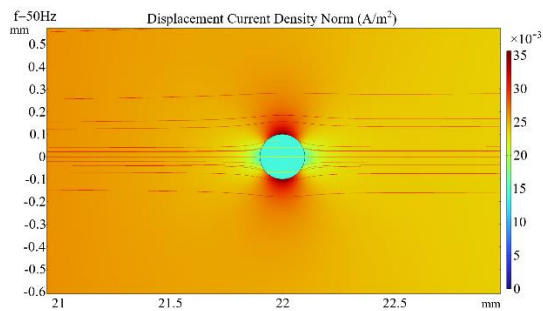




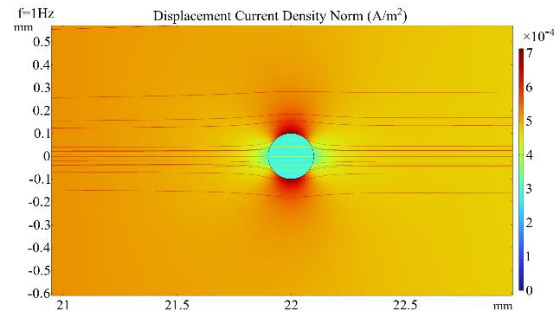
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۷: چگالی جریان جابجایی سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف؛ (الف) فرکانس ۰/۰۱ هرتز؛ (ب) فرکانس ۰/۱ هرتز؛ (پ) فرکانس ۱ هرتز؛ (ت) فرکانس ۵۰ هرتز.

جدول ۲: جریان شارژ خازنی سیستم کابلی در فرکانس‌های مختلف منبع ورودی

فرکانس	جریان شارژ خازنی (A)	امپدانس خازنی کابل (Ω)
۰/۰۱	$6/9040e-4$	$5/2146e+7$
۰/۱	$6/9036e-3$	$5/2146e+6$
۱	$6/9036e-2$	$5/2146e+5$
۱۰	$6/9036e-1$	$5/2146e+4$
۵۰	$3/4518$	$1/0429e+4$

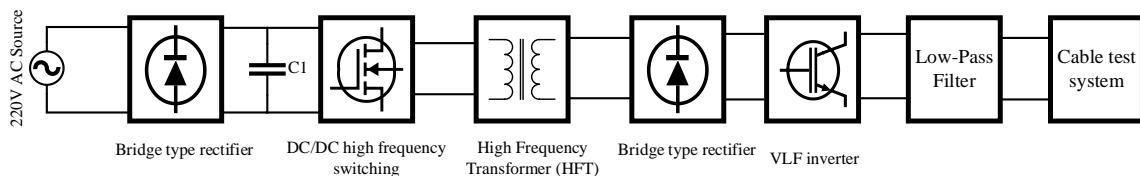
### ۶- مدل مداری پیشنهادی برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین

استفاده از ادوات الکترونیک قدرت یکی از بهترین روش‌ها برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین است. انعطاف‌پذیری در فرمان‌دهی به گیت این تجهیزات باعث می‌شود که امکان تولید ولتاژ با فرکانس‌های مختلف ساده باشد. با این حال، چالش‌هایی وجود دارد که البته قابل حل می‌باشند. در این بخش مدل مداری پیشنهادی ارائه می‌گردد و شکل موج نهایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۸ مدل مداری پیشنهادی برای تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین را نشان می‌دهد. در روش پیشنهادی، ولتاژ ورودی متناوب به کمک یکسوکننده‌ها تبدیل به ولتاژ مستقیم می‌گردد. سپس با استفاده از کلیدهای الکترونیک قدرت، کلیدزنی با فرکانس بالا صورت می‌گیرد (در حدود ۱۰۰ kHz) و این ولتاژ به کمک ترانسفورماتورهای افزایشدهنده فرکانس بالا، تا سطح دلخواه افزایش خواهد یافت. سپس ولتاژ افزایش یافته بار دیگر با استفاده از یکسوسازها تبدیل به ولتاژ فشارقوی مستقیم

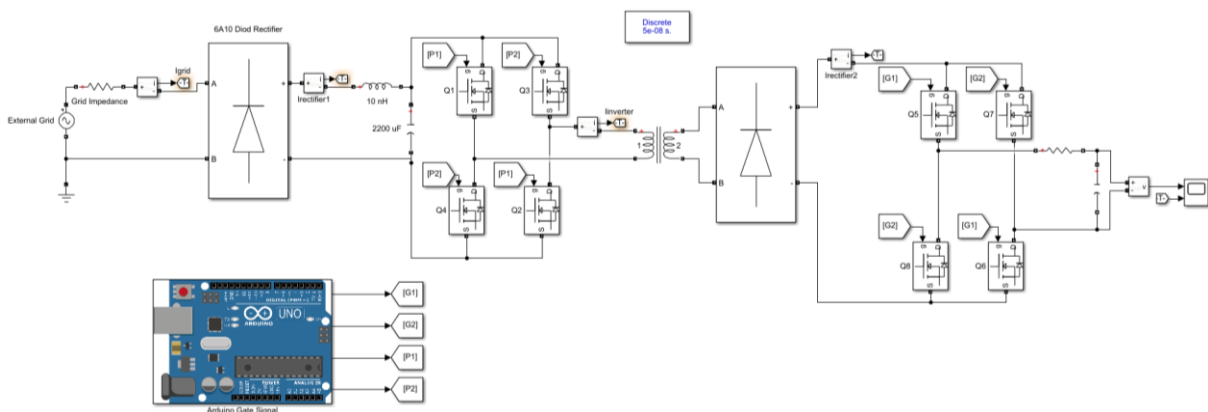
می‌شود. در نهایت با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، شکل موج نهایی با کلیدزنی و به کارگیری فیلتر مناسب، ایجاد می‌گردد.

از مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی می‌توان به ورودی این منبع اشاره کرد. ولتاژ تک‌فاز با مقدار مؤثر  $V_{220}$  به عنوان یک منبع تغذیه در دسترس این امکان را ایجاد می‌کند تا در تمامی شرایط بتوان از این منبع ولتاژ برای انجام آزمون‌های تخلیه جزئی استفاده نمود. به علاوه، کلیدزنی در فرکانس بالا اجازه می‌دهد تا تجهیزات را به صورت فشرده و با کارایی بالا مورد بهره‌برداری قرار داد. علاوه بر این، فرکانس بالای کلیدزنی موجب می‌شود تا بتوان شکل موج نهایی سیگنال مورد نظر را با استفاده از فیلتر با ابعاد خیلی کوچک به بهره‌برداری رساند.



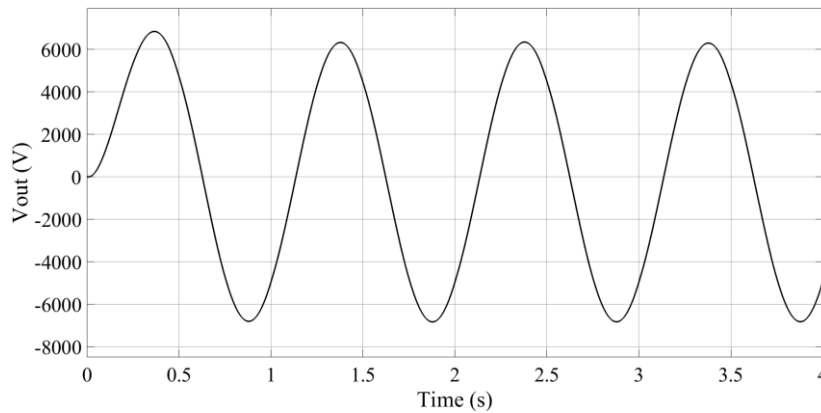
شکل ۸: شمای کلی دستگاه تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین

شبیه‌سازی مداری دستگاه تولید ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink در شکل ۹ نشان داده شده است.



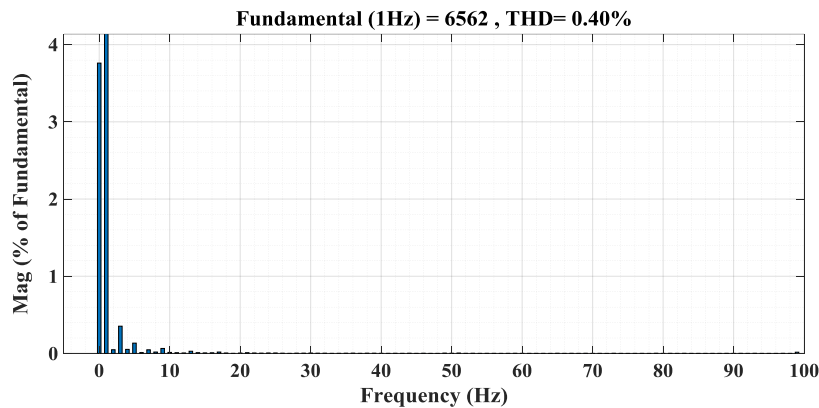
شکل ۹: شبیه‌سازی مداری دستگاه تست فشارقوی با فرکانس خیلی پایین

ولتاژ ورودی  $220\text{VRMS}$ ، با استفاده از پل دیودی 6A10 یکسو شده و برای کاهش ریپل ولتاژ خروجی، از خازن الکتrolیتی با ظرفیت  $2200\text{uF}$  استفاده شده است. سپس با استفاده از آرایش Full-Bridge و بهره‌گیری از MOSFET IRF840 و کلیدزنی در فرکانس  $10\text{kHz}$  انجام می‌شود. ولتاژ پالس فرکانس بالا ایجاد شده، به کمک ترانسفورماتور افزاینده  $1:24$  افزایش می‌یابد. به کمک مدول‌های یکسوسازی ولتاژ بالا، ولتاژ خروجی ترانسفورماتور یکسوشده و ولتاژ مورد نظر، تغذیه کلیدهای الکترونیک قدرت برای تولید ولتاژ مورد نظر می‌شود. سیگنال گیت مدول کلیدزنی نهایی با استفاده از تکنیک Bipolar صورت گرفته است و سیگنال تحریک گیت با استفاده از Arduino UNO R3 اعمال شده است. در نهایت فیلتر پایین‌گذر RC هارمونیک‌های اضافی موجود را حذف کرده و ولتاژ سینوسی با فرکانس مورد نظر را ارائه می‌دهد. شکل ۱۰ نمونه‌ای از ولتاژ خروجی با فرکانس  $1\text{Hz}$  را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: شکل موج ولتاژ خروجی منبع تغذیه فشارقوی با فرکانس ۱Hz

مقدار هارمونیک شکل موج ولتاژ خروجی منبع تغذیه مورد نظر در محدوده استاندارد می‌باشد. شکل ۱۱ مقادیر هارمونیک‌های موجود در شکل موج خروجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ خروجی منبع تغذیه

## ۷- نتیجه‌گیری

انجام آزمون تخلیه‌جزئی به عنوان یکی از رایج‌ترین آزمون‌های غیرمخرب عایقی برای پایش وضعیت عایقی سیستم کابلی شناخته می‌شود که انجام دوره‌ای این آزمون‌ها از مشکلات عایقی در سیستم کابلی پیش‌گیری می‌نماید. نکته حائز اهمیت در انجام این آزمون‌ها، وجود محدودیت در استفاده از منبع تغذیه می‌باشد. در واقع با توجه به جریان شارژ خازنی سیستم کابلی و افزایش آن با طول سیستم کابلی، موجب می‌شود که برای انجام این آزمون‌ها از منابع تغذیه با توان خروجی زیاد و ابعاد بزرگ استفاده شود. این مسئله در انجام آزمون‌های درمحل مشکلات جدی ایجاد می‌نماید. برای حل این مشکل، باید توجه داشت که جریان شارژ خازنی در سیستم کابلی رابطه مستقیمی با فرکانس منبع تغذیه دارد. بنابراین با کاهش فرکانس منبع تغذیه، می‌توان توان راکتیو خروجی را کنترل نمود. مطالعات انجام شده در این مقاله نشان می‌دهند که با کاهش فرکانس از ۵۰ Hz به ۰/۱ Hz جریان شارژ خازنی در حدود ۵۰۰ برابر کوچک‌تر می‌شود. این موضوع کمک می‌کند تا بتوان منابع تغذیه با فرکانس خیلی پایین طراحی کرد که در جابجایی تجهیزات آزمون به خصوص در آزمون‌های درمحل موضوع مهمی تلقی می‌شود. از این رو، در این مقاله یک مدل مداری مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان ولتاژ فشارقوی با فرکانس خیلی پایین، ایجاد نمود. مطابق با شبیه‌سازی‌های انجام شده ولتاژ خروجی از منبع در سطح ولتاژ مناسب با مقدار هارمونیک ۰/۴٪ که در محدوده استانداردهای بین‌المللی می‌باشد، ارائه گردیده است. از مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی



می‌توان به کاهش حجم تجهیزات آزمون، امکان جابجایی ساده، وزن و ابعاد کم و سطح هارمونیک مناسب اشاره کرد. علاوه بر این امکان تولید ولتاژ در سطوح ولتاژ بالاتر نیز با این روش امکان‌پذیر است.

#### ۸- فهرست مراجع و مآخذ

- [1] H. M. Nemati, A. Sant'Anna, S. Nowaczyk, J. H. Jürgensen, and P. Hilber, "Reliability evaluation of power cables considering the restoration characteristic," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 105, pp. 622-631, 2019.
- [3] Y. Song *et al.*, "Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review," *Electric Power Systems Research*, vol. 210, p. 108140, 2022.
- [3] Y. Yan, P. Huo, and H. Li, "Robust on-line partial discharge measurement of 35-kV cables in wind farms via dual sensors," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 9-17, 2023.
- [4] O. Arikan, C. C. Uydur, and C. F. Kumru, "Insulation evaluation of MV underground cable with partial discharge and dielectric dissipation factor measurements," *Electric Power Systems Research*, vol. 220, p. 109338, 2023.
- [5] A. Rodrigo Mor, F. A. Muñoz, J. Wu, and L. C. Castro Heredia, "Automatic partial discharge recognition using the cross wavelet transform in high voltage cable joint measuring systems using two opposite polarity sensors," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105695, 2020.
- [6] N. Morette, T. Ditchi, and Y. Oussar, "Feature extraction and ageing state recognition using partial discharges in cables under HVDC," *Electric Power Systems Research*, vol. 178, p. 106053, 2020.
- [7] "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)," *IEEE Std 400.2-2013*, pp. 1-60, 2013.
- [8] *IEC 60840: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) - Test methods and requirements*, I. E. Commission, 2020.
- [9] P. Donoso, R. Schurch, J. Ardila, and L. Orellana, "Analysis of partial discharges in electrical tree growth under very low frequency (VLF) excitation through pulse sequence and nonlinear time series analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163673-163684, 2020.
- [10] Y. Chen *et al.*, "Voltage equivalence of partial discharge tests for XLPE insulation defects," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 2, pp. 683-692, 2022.
- [11] P. Seri, H. Naderiallaf, and G. C. Montanari, "Modelling of supply voltage frequency effect on partial discharge repetition rate and charge amplitude from AC to DC at room temperature," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 3, pp. 764-772, 2020.
- [12] *IEC Standard 60287-1-1: "Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General"*, I. 60287-1-1, 2014.
- [13] Z. Cao, M. Hu, N. Fröhleke, and J. Böcker, "Modeling and control design for a very low-frequency high-voltage test system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, 2010.
- [14] X. Tan, J. Chen, C. Li, L. Hu, J. Cao, and X. Zeng, "A new type of VLF sinusoidal waveform generator used for AC withstand voltage testing of power cables," in *2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEC)*, 29-31 March 2019.
- [15] S. Seesanga, W. Kongnun, A. Sangswang, and S. Chotigo, "A new type of the VLF high voltage generator," in *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 14-17 May 2008.



- [16] Z. Liu, "Topology and control design of a sinusoidal very low frequency high voltage generator ".*TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES*, 2013.
- [17] *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, I. E. Commission, 2015.
- [18] *Electrical test methods for electric cables - Part 3 :Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables*, I. E. Commission, 2015.
- [19] R. J. V. Brunt, "Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 5, pp. 761-784, 1994.
- [20] Y. Li, K. Zhou, Z. R. Li, and Q. G. Zhang, "Research on the electrical aging characteristics of oil-impregnated pressboard under partial discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 42-48, 2020.
- [21] Y. Ji *et al.*, "Investigation on combined effect of humidity–temperature on partial discharge through dielectric performance evaluation ".*JET Science, Measurement & Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 37-46, 2023.
- [22] COMSOL, *AC/DC Module user guide*. COMSOL, 2020.
- [23] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*. Addison Wesley, 2002.
- [24] J. Pedro, A .Bastos, and N. Sadwski, *Electromagnetic modeling by finit element methods*. CRC Press, 2003.