بررسی عملکرد پروب‌های UHF در آشکارسازی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای فشار قوی

حمید جهانگیر[۱] اصغر اکبری ازیرانی[۲] پیتر ورله[۳]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران
jahangir@ee.kntu.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران
akbari@kntu.ac.ir

۲- استاد- انستیتو فشارقوی شرینگ- دانشگاه لایبنیتز - هانوفر- آلمان
peter.werle@ifes.uni-hannover.de

چکیده: اخیراً آشکارسازی تخلیه‌جزئی به روش UHF در ترانسفورماتورهای فشار قوی توجه زیادی به خود جلب کرده است. در مورد ترانسفورماتورهای موجود در شبکه قدرت، تنها راه دریافت سیگنال‌های UHF از طریق پروب‌هایی است که از طریق شیر تخلیه روغن نصب می‌شوند. با اینکه این پروب‌ها بصورت تجاری نیز ساخته شده‌اند، اطلاعات کمی در مورد مشخصات و ویژگی‌های این پروب‌ها در آشکارسازی تخلیه‌جزئی در دسترس است. در این مقاله ویژگی‌های این پروب‌ها به عنوان یک آنتن UHF شامل فرکانس مناسب آشکارسازی، تاثیر محل نصب پروب، الگوی تشعشعی، پلاریزاسیون و تاثیر عمق نفوذ پروب بر آشکارسازی تخلیه-جزئی با استفاده از حجم وسیعی از داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بسیاری از پارامترهای مورد بررسی برای اولین بار در زمینه آشکارسازی تخلیه‌جزئی به روش UHF مطرح شده‌اند. پس از آشنایی با پارامترهای موثر، وضعیت بهینه هر پارامتر برای اندازه‌گیری ارائه می‌شود. بکارگیری نتایج ارائه شده در این مقاله منجر به جلوگیری از اندازه‌گیری و تحلیل نادرست تخلیه‌جزئی و تصمیم‌گیری اشتباه در مورد وضعیت عایقی ترانسفورماتور قدرت می‌گردد.

کلمات کلیدی: پروب‌های UHF، تخلیه‌جزئی، ترانسفورماتور قدرت، ویژگی‌های آنتن.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۴/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر اصغر اکبری ازیرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – تهران – سید خندان – دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۱- مقدمه

تخلیه جزئی به تخلیه‌های الکتریکی که بین دو الکترود پل نمی‌زنند و بصورت محلی رخ می‌دهند اطلاق می‌گردد [۱]. وجود تخلیه‌جزئی در تجهیزات فشار قوی عموماً نشان از وجود ضعف عایقی داشته و به تخریب سریع‌تر سیستم عایقی نیز کمک می‌نماید. از این جهت، آشکارسازی تخلیه‌جزئی در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان بهترین عامل ارزیابی سیستم عایقی تجهیزات فشار قوی شناخته می‌شود [۲و ۳].

آشکارسازی تخلیه‌جزئی در رنج فرکانسی بسیار بالا (UHF) دارای مزایایی از قبیل امکان مکانیابی تخلیه‌جزئی، امکان اندازه‌گیری آنلاین و استقامت بیشتر در مقابل نویز نسبت به روش مرسوم استاندارد IEC 60270 است [۴]. این مزایا باعث شده است آشکارسازی تخلیه جزئی به روش UHF مورد توجه زیاد قرار گرفته و اخیراً برای ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده واقع گردد. اولین امکانسنجی استفاده از سیستم اندازه‌گیری UHF تخلیه‌جزئی برای ترانسفورماتورهای قدرت به سال ۱۹۹۷ برمی‌گردد [۵].

برای ترانسفورماتورهایی که قبلاً در شبکه قدرت نصب شده‌اند، تنها راه اندازه‌گیری UHF تخلیه‌جزئی استفاده از آنتن‌های موسوم به پروب UHF است که از طریق شیر تخلیه روغن ترانسفورماتور نصب می‌شوند. با وجود اینکه این پروب‌ها اخیراً بصورت تجاری ساخته شده‌اند، بسیاری از ویژگی‌های این پروب‌ها برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی مورد ارزیابی واقع نشده است. در [۶] چند پروب با شکل‌های مختلف به عنوان آنتن گیرنده در مقابل یک آنتن دو قطبی متناوب لگاریتمی[۱] به عنوان فرستنده قرار داده شده است و با مقایسه سیگنال‌های دریافتی، پروب مخروطی شکل به عنوان بهترین گزینه معرفی شده است. به همین صورت، دامنه سیگنال‌های دریافتی برای سه مقدار عمق نفوذ[۲] بدست آمده است و مشاهده شده است دامنه سیگنال دریافتی با افزایش عمق نفوذ بیشتر می‌گردد اما علت تغییر حساسیت پروب با تغییر عمق نفوذ آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. مطالعه مشابه‌ای نیز روی تغییر دامنه سیگنال دریافتی به ازای مقادیر مختلف عمق نفوذ پروب در [۷] انجام شده است. در این مرجع، الگوی تشعشعی[۳] پروب مخروطی شکل نیز شبیه‌سازی شده است اما تاثیر آن بر اندازه‌گیری تخلیه جزئی بررسی نشده است. مطالعات مقایسه‌ای بین روش‌های IEC و UHF از دیگر موارد مورد بحث در این مرجع است. در بیشتر تحقیقات انجام شده از جمله [۸و ۹] اگر چه از پروب‌های UHF برای اندازه‌گیری استفاده شده است اما مطالعات روی مکانیابی تخلیه جزئی متمرکز شده است. در [۹] طراحی نوعی از این پروب‌ها و ساخت یک نمونه اولیه از آن برای اولین بار در داخل کشور انجام شد. در این مرجع، دو پارامتر تلفات بازگشتی[۴] و الگوی تشعشعی برای طراحی آنتن‌ها مورد استفاده قرار گرفته اما تاثیر این پارامترها بر اندازه‌گیری تخلیه جزئی بررسی نشده است. در [۱۰] پلاریزاسیون[۵] تخلیه جزئی به عنوان عاملی که در امکانسنجی کالیبراسیون روش UHF نقش دارد مطرح شده است اما نحوه پلاریزاسیون آنتن‌های مورد استفاده و چگونگی و میزان تاثیر پذیری اندازه‌گیری تخلیه جزئی از آن مشخص نشده است.

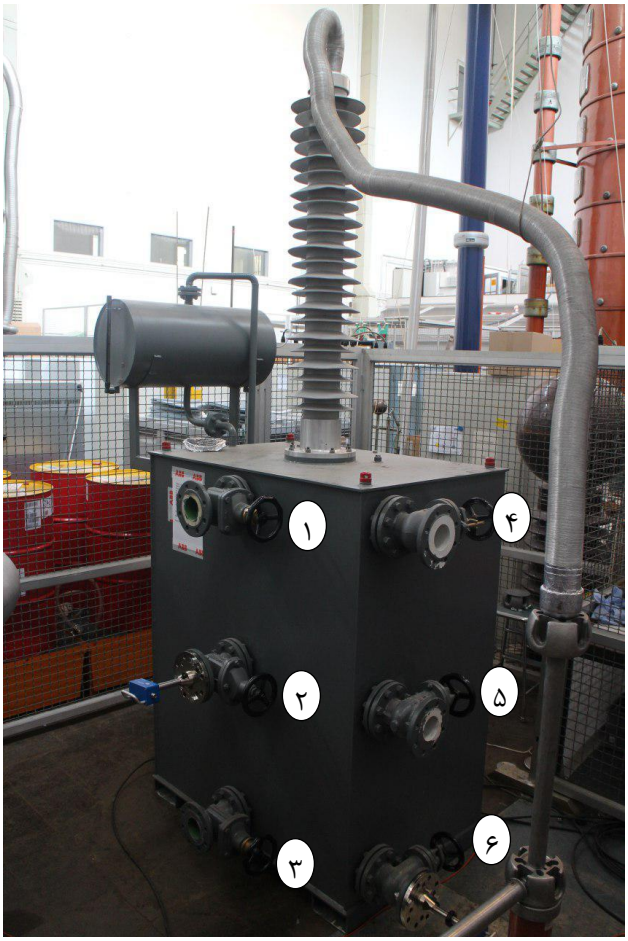
در این مقاله مشخصات مختلف پروب UHF نه تنها از منظر یک آنتن UHF بلکه بصورت کاربردی برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی و به همراه تاثیر تانک ترانسفورماتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فرکانس مناسب آشکارسازی و اندازه‌گیری (و نه مکانیابی) تخلیه جزئی که تا کنون در مقالات بررسی نشده است پیشنهاد می‌شود. در محدوده فرکانسی پیشنهادی، کمترین تاثیر پذیری اندازه‌گیری از پارامترهای مختلف فراهم گردیده و در نتیجه از نقطه نظر ارایه یک روش کالیبراسیون برای روش UHF بسیار حائز اهمیت است. دلیل تاثیرپذیری حساسیت اندازه‌گیری از عمق نفوذ پروب که تا کنون نامشخص بوده است از دیگر موارد مطروحه در مقاله است. الگوی تشعشعی پروب UHF با تعریف دو پارامتر کلیدی و کاربردی بررسی شده و برای نخستین بار تاثیر آن بر اندازه‌گیری تخلیه جزئی در حضور تانک ترانسفورماتور و برای فرکانس‌های مختلف مشخص می‌شود. مطالعه پلاریزاسیون پروب UHF با استخراج نسبت محوری[۶] که تا کنون نامشخص نبود انجام گرفته و مشاهده شده است تاثیر پلاریزاسیون بر اندازه‌گیری تخلیه جزئی در حضور تانک ترانسفورماتور برای محدوده شروع سیگنال UHF (نخستین بیشینه سیگنال) و کل سیگنال دریافتی متفاوت است. از دیگر نوآوری‌های مقاله بررسی محل شیر روغن تانک ترانسفورماتور می‌باشد که تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته بود. بررسی این مشخصات به کمک انجام اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌های مختلف صورت گرفته است. به منظور انجام آزمایشات، یک مدل تانک ترانسفورماتور قدرت که بصورت اختصاصی برای مطالعات UHF فراهم شده و شامل بوشینگ فشار قوی و شش عدد شیر تخلیه روغن DN80 می باشد استفاده گردیده است. در تمامی اندازه‌گیری‌ها از پروب‌های UHF ساخت شرکت Omicron استفاده شده است [۱۱]. لازم به ذکر است پروب‌های ساخت شرکت‌های دیگر نیز مشخصاتی مشابه با پروب‌های مورد استفاده داشته که این به دلیل کوچک بودن ابعاد شیرهای تخلیه روغن ترانسفورماتور است که پارامترهای طراحی را بسیار محدود و در نتیجه مشابه می‌سازد.

بخش دوم مقاله به مطالعه هر یک از مشخصات فوق پرداخته و مدارهای اندازه‌گیری و نتایج بدست آمده را شامل می‌شود. در بخش سوم مقاله، وضعیت بهینه هر یک از پارامترهای معرفی شده در بخش دوم ارائه می‌گردد. بکارگیری نتایج این بخش کمک شایانی به اندازه‌گیری، تحلیل و تفسیر بهتر تخلیه‌جزئی با استفاده از پروب UHF خواهد نمود. در بخش چهارم، نتیجه‌گیری کلی مقاله ارائه شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]

۲- بررسی مشخصات پروب UHF

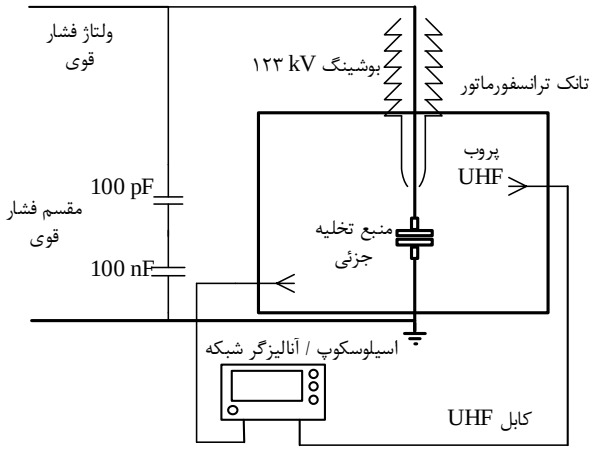
در این بخش، مشخصات مختلف پروب UHF که بصورت تجاری عرضه شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پروب یک نوع آنتن منوپل مخروطی با قطر مقطع ۳۹ mm و طول محور ۵۵ mm است. قطر مقطع مخروط طوری در نظر گرفته شده است تا قابل استفاده برای شیرهای تخلیه روغن ترانسفورماتور که اغلب از نوع DN50 و DN80 هستند، باشد.



شکل (۱): مدل تانک ترانسفورماتور مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها

از آنجا که سعی شده است مطالعات انجام شده روی پروب UHF تا حد امکان به کاربرد آن در تخلیه‌جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت متمرکز شود، انجام آزمایشات بایستی در شرایط نزدیک به تست واقعی رخ دهد. بدین منظور، از یک مدل تانک ترانسفورماتور که برای مطالعات UHF طراحی و فراهم شده، استفاده می‌گردد. شکل (۱) مدل تانک ترانسفورماتور به همراه دو پروب UHF نصب شده در آن را نشان می‌دهد. تانک دارای ابعاد ۱۵۹۶×۸۵۶×۱۲۳۶ mm بوده و یک بوشینگ ۱۲۳ kV در بالای آن نصب شده است. شش عدد شیر تخلیه روغن در تانک تعبیه شده است که در شکل با شماره‌های ۱ تا ۶ نامگذاری شده‌اند. در تست‌های انجام شده در این مقاله، ترانسفورماتور خالی از روغن بوده است. از آنجا که شیرهای ۱ و ۴ وضعیتی مشابه با شیرهای ۳ و ۶ دارند و شیر ۵ نیز در ترانسفورماتورهای واقعی موجود نیست، فقط سه شیر ۲، ۳، و ۶ در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارتفاع شیر ۲ از کف تانک برابر با ۷۵۰ mm و شیرهای ۳ و ۶ برابر با ۱۲۰ mm است. فاصله شیر ۶ از دیواره کناری برابر با ۱۱۸ mm است. فاصله شیرهای ۲ و ۳ از دیوارهای کناری برابر با ۶۰۰ mm می‌باشد. تمامی شیرها DN80 هستند.

شکل (۲) شماتیک مدار اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. برای بررسی مشخصات پروب UHF، ترمینال‌های دو پروب مورد استفاده به یک آنالیزگر شبکه چهار کاناله ۸ GHz متصل می‌شود و در بخش‌هایی که اندازه‌گیری تخلیه جزئی انجام شده است، خروجی آنتن‌ها به اسیلوسکوپ چهار کاناله ۳/۵ GHz و ۱۰ Gs/s متصل می‌شود.



شکل (۲): شماتیک مدار اندازه‌گیری پارامترهای پروب و تخلیه جزئی

۲-۱- پارامترهای پراکندگی[۷]

پارامترهای پراکندگی رفتار یک سیستم الکتریکی را بدون توجه به ساختار آن و تنها با استفاده از سیگنال‌هایی که در ترمینال‌های آن وجود دارد توضیح می‌دهند. برای یک آنتن گیرنده، چون تنها یک ترمینال برای دریافت سیگنال وجود دارد تنها پارامتر موجود S_{11} خواهد بود. برای یک ترانسفورماتور با دو پروب نصب شده، پارامتر S_{12} نیز برای پروب ۱ تعریف می‌شود معادلات (۱) و (۲) به ترتیب دو پارامتر فوق را تعریف می‌کنند.

$$S_{11} = \sqrt{\frac{P_{r1}}{P_{i1}}} \qquad (۱)$$

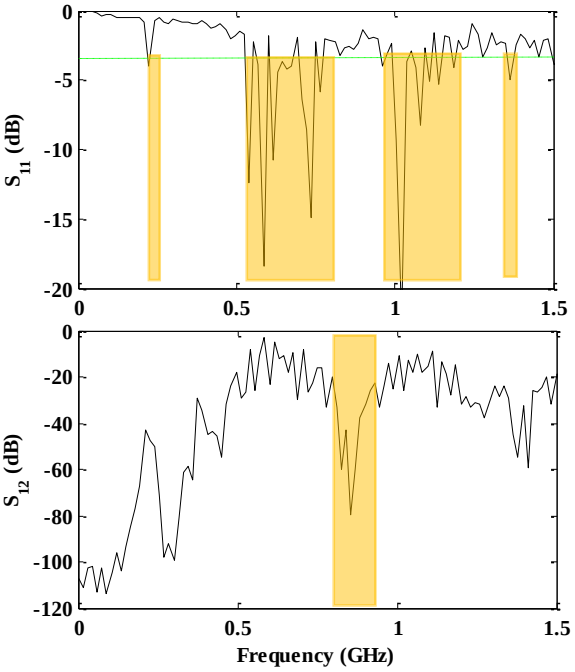
$$S_{12} = \sqrt{\frac{P_{r2}}{P_{i1}}} \qquad (۲)$$

در روابط فوق، P_{r1} توان بازگشتی در ترمینال پروب ۱ ناشی از تغذیه این پروب با توان ورودی P_{i1} نشان می‌دهد و P_{r2} توان دریافتی در ترمینال پروب ۲ را ناشی از تغذیه پروب ۱ با توان ورودی P_{i1} است. با توجه به روابط (۱) و (۲)، S_{11} پارامتر نشان‌دهنده میزان توان بازگشتی از ترمینال پروب است که به دلیل عدم تطبیق امپدانس

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

پروب و کابل UHF متصل به آن (عموماً ۵۰ Ω) رخ می‌دهد. S_{12} مربوط به میزان توان دریافت شده در ترمینال پروب ۲ در حالی که پروب ۱ به عنوان فرستنده عمل می‌کند، می‌باشد در نتیجه شامل تاثیرات ناشی از عدم تطبیق امپدانس و همچنین سایر عوامل موثر در انتقال انرژی بین دو پروب مانند الگوی تشعشعی، پلاریزاسیون و ... می‌باشد. پارامترهای S_{22} و S_{21} برای پروب ۲ به طریقی مشابه تعریف می‌شوند.

به منظور اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی فوق، پروب اول در موقعیت ۶ (در شکل (۱)) و پروب دوم در موقعیت ۵ نصب می‌شوند. عمق نفوذ هر دو پروب برابر با ۹/۵ cm تنظیم شده است. ترمینال پروب با استفاده از یک کابل UHF با امپدانس ۵۰ Ω به آنالیزگر شبکه متصل می‌شود. شکل (۳) پارامترهای پراکندگی ثبت شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳): پارامترهای پراکندگی S11 (شکل بالا) و S12 (شکل پایین) اندازه‌گیری شده برای پروب UHF

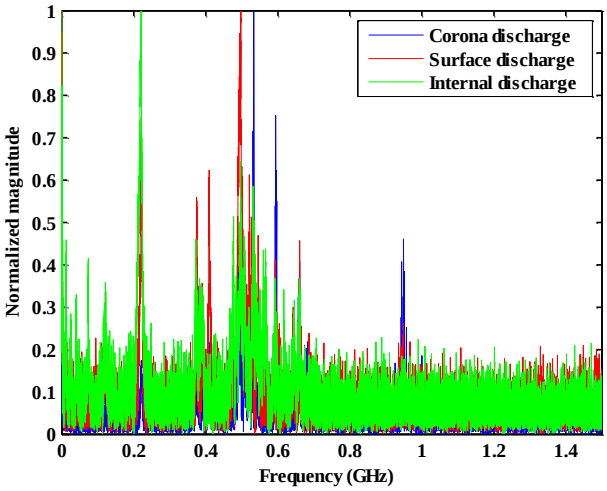
در تئوری طراحی آنتن، معمولاً رنج فرکانسی قابل استفاده آنتن با استفاده از منحنی S_{11} تعیین می‌شود. در این حالت، فرکانس‌های دارای S_{11} کوچکتر از ۱۰ dB- به عنوان فرکانس‌های قابل آشکارسازی در نظر گرفته می‌شوند [۱۲]. در ترانسفورماتورهای فشار قوی، به دلیل محدودیت قطر شیرهای تخلیه روغن و همچنین عمق نفوذ پروب، طراحی آنتن در حالت ایده‌آل نمی‌تواند صورت گیرد. در نتیجه برای آشکارسازی تخلیه جزئی معمولاً به S_{11} کمتر از ۳/۵ dB- می‌توان اکتفا نمود [۱۳]. بنابراین محدوده‌های فرکانسی که پروب UHF حساسیت بالایی در آشکارسازی تخلیه‌جزئی دارد مطابق قسمت‌های رنگ‌شده منحنی S_{11} در شکل (۳) می‌باشد. با توجه به شکل، پایین‌ترین فرکانس قابل آشکارسازی در هوا برابر با ۱۹۰ MHz است. با در نظر گرفتن تاثیر شیفت روغن بر منحنی S_{11}، پایین‌ترین فرکانس آشکارسازی در روغن حدوداً برابر با ۱۳۰ MHz خواهد بود [۷ و ۱۴].

با مقایسه منحنی‌های S_{11} و S_{12}، مشاهده می‌شود برای فرکانس‌های تا حدود ۷۰۰ MHz پیک‌های محلی S_{12} در فرکانس‌هایی اتفاق می‌افتد که S_{11} کمینه است. به عبارت دیگر وابستگی زیادی بین دو پارامتر S_{12} و S_{11} ملاحظه می‌گردد. اما در فرکانس‌های بالاتر و مخصوصاً در قسمت رنگ‌شده منحنی S_{12} در شکل (۳)، وابستگی بین دو پارامتر کمتر شده بصورتی که کاهش شدیدی در S_{12} رخ می‌دهد در حالی که S_{11} در همان بازه فرکانسی تقریباً ثابت است. همانطور که قبلاً گفته شد، علاوه بر میزان تطبیق امپدانس که تماماً توسط S_{11} نشان داده می‌شود، پارامترهای دیگری نیز نظیر الگوی تشعشعی، پلاریزاسیون و ... در S_{12} دخالت دارند. بنابراین مطابق شکل (۳)، برای فرکانس‌های زیر ۷۰۰ MHz پارامتر اصلی در انتقال توان بین دو پروب تطبیق امپدانس دو پروب است اما در فرکانس‌های بالاتر از آن تاثیر پارامترهای دیگر شدیدتر می‌شود. این موضوع در بخش‌های بعدی مقاله بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور اعتبارسنجی نتایج فوق، از سه منبع تولید کننده انواع مختلف تخلیه جزئی (کرونا، سطحی و داخلی) که در داخل تانک قرار گرفته و ولتاژ فشار قوی از طریق بوشینگ به آن اعمال می‌شود، استفاده شده است. تخلیه کرونا توسط یک سیستم سوزن-صفحه در حالی که سوزن به فشار قوی متصل می‌شود، ایجاد می‌گردد. تخلیه سطحی با قرار دادن سوزن روی یک قرص پلی اتیلن و استفاده از الکترود روگوفسکی به عنوان الکترود زمین تولید می‌شود. برای ایجاد تخلیه داخلی از چند لایه ورق کاغذ ترانسفورماتور که روی یکدیگر قرار گرفته و لایه وسط دارای یک حفره استوانه‌ای است استفاده شده است. برای جلوگیری از تخلیه سطحی در این حالت، در اطراف حفره و بین ورق‌های کاغذ و در بالاترین و پایین‌ترین لایه از رنگ هادی بصورت یک قرص دایره‌ای شکل استفاده شده است. ترمینال پروب UHF به یک اسیلوسکوپ چهار-کاناله با فرکانس ۳/۵ GHz و نرخ نمونه‌برداری ۱۰ Gs/s متصل شده و سیگنال‌ها در حوزه زمان و فرکانس ثبت می‌شوند. شکل (۴) سیگنال‌های ثبت‌شده در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد.

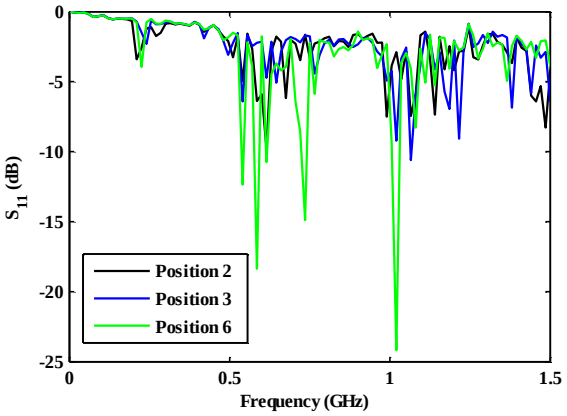
با مقایسه شکل (۳)و (۴)، مشاهده می‌شود فرکانس‌های آشکارسازی شده از تخلیه‌جزئی کاملاً با نتایج بدست آمده از آنالیزگر شبکه تطابق دارد. اولین مولفه قابل توجه در شکل (۴) در فرکانس حدود ۲۰۰ MHz و بخش عمده دیگر در فرکانس ۵۰۰ MHz و بیشتر رخ داده است که با قسمت‌های رنگ‌شده منحنی S_{11} و یا محل‌های بیشینه منحنی S_{12} در شکل (۳) تطابق دارد. نکته قابل ملاحظه دیگر این است که بخش عمده انرژی سیگنال‌های دریافتی پس از ۷۰۰ MHz میرا شده و از بین رفته است. بنابراین در انتخاب فرکانس آشکارسازی طبق قسمت‌های رنگ‌شده منحنی S_{11} در شکل (۳)، ترجیحاً باید فرکانس‌های پایین‌تر انتخاب شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]



شکل (۴): سیگنال‌های UHF اندازه‌گیری شده در حوزه فرکانس از سه نوع تخلیه‌جزئی کرونا، سطحی و داخلی

شکل (۵) منحنی‌های S_{11} اندازه‌گیری شده برای سه محل نصب پروب ۲، ۳ و ۶ نشان می‌دهد. در هر سه حالت عمق نفوذ پروب برابر با cm ۹/۵ است. همانطور که دیده می‌شود محل نصب پروب تاثیری در فرکانس‌های رزونانس پروب نداشته و بنابراین مطالب بیان شده در بالا برای هر سه محل نصب پروب صادق می‌باشد.



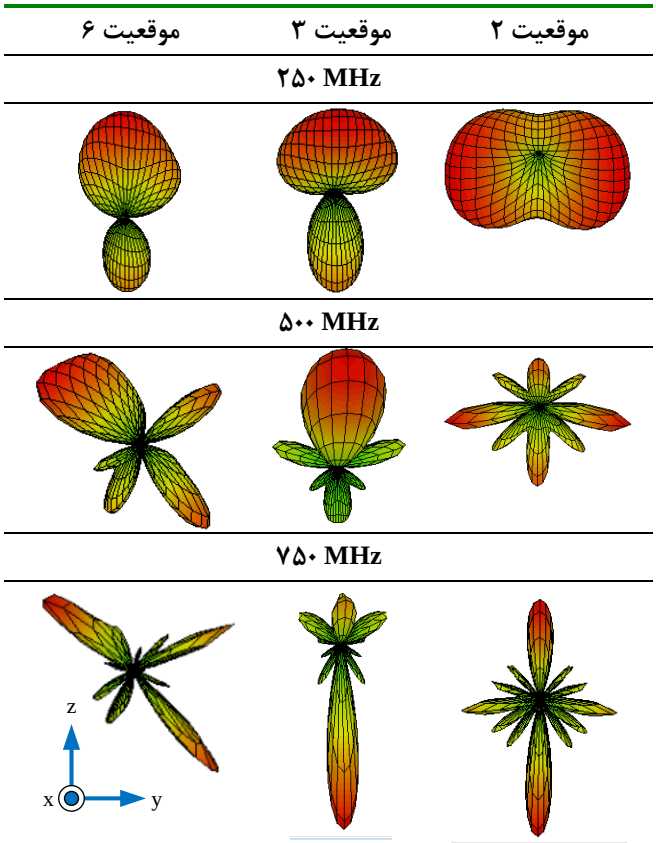
شکل (۵): منحنی‌های اندازه‌گیری شده S_{11} پروب UHF در سه محل نصب ۲، ۳ و ۶ شکل (۱)

۲-۲- الگوی تشعشعی

شدت امواج تشعشع شده از یک آنتن در فضای اطراف آن اصطلاحاً الگوی تشعشعی آن آنتن گفته می‌شود. الگوی تشعشعی آنتن را می‌توان برای میدان الکتریکی، توان، جهت‌دهی و ... رسم کرد اما عموماً برای توان تشعشع شده رسم می‌شود.

بنابراین الگوی تشعشعی توان آنتن مشخص می‌سازد آن آنتن در چه جهاتی از فضای اطراف قابلیت ارسال و یا دریافت چه میزان توان را داراست. در مورد آشکارسازی تخلیه‌جزئی، آنتنی ایده‌آل است که توان را به مقدار مساوی در فضای اطراف دریافت کند. چنین آنتنی را اصطلاحاً ایزوتروپیک می‌نامند که فقط بصورت تئوری وجود دارد و در عمل غیر ممکن است. پروب‌های UHF از نوع آنتن‌های منوپل مخروطی بوده که دارای الگوی تشعشی همه‌جهتی[۸] می‌باشد به این معنی که در صفحه افقی متناظر با صفحه زمین پروب توان را یکنواخت دریافت می‌کنند. اما این شرایط تنها در حضور صفحه زمین با هادی ایده‌آل و با ابعاد بینهایت حاصل می‌شود [۱۵]. برای پروب‌های UHF، دیواره‌های تانک ترانسفورماتور باعث جهت‌دهی الگوی آنتن شده و الگوی حاصل همه‌جهتی نخواهد بود.

شکل (۶) الگوی تشعشعی سه بعدی پروب UHF شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CST را در سه محل نصب مورد بررسی مقاله و در سه فرکانس ۲۵۰ MHz، ۵۰۰ و ۷۵۰ نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی، ضریب دی‌الکتریک عایق پوشاننده سر پروب برابر با ۲/۱ و ابعاد پروب و تانک برابر با مقادیر واقعی در نظر گرفته شده است. در تمامی الگوهای ارائه شده در این شکل، مرکز الگو روی نوک پروب قرار داده شده و الگوها هنگامی که از مقابل به پروب نگاه شود رسم شده‌اند.



شکل (۶): الگوی تشعشعی پروب UHF در سه محل نصب ۲، ۳ و ۶ شکل (۱)

با توجه به شکل (۶)، پروب UHF در موقعیت نصب ۲ نزدیک‌ترین الگوی تشعشعی را به الگوی تشعشعی همه‌جهتی داراست. در موقعیت نصب ۳، کف ترانسفورماتور باعث می‌شود الگوی تشعشعی بیشتر در راستای قائم جهت دهی شود. با اضافه شدن دیواره کناری در موقعیت ۶، الگوی تشعشعی هم از کف ترانسفورماتور و هم از این دیواره تاثیر پذیرفته و در جهت نیمساز این دو دیواره جهت‌دهی می‌شود. همانطور

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

که در این شکل ملاحظه می‌شود، تاثیر دیواره‌های اطراف پروب در فرکانس‌های بالاتر بیشتر مشهود است. در نتیجه مجدداً انتخاب پایین‌ترین فرکانس‌های ممکن برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی ارجحیت پیدا می‌کنند چرا که در اینصورت حساسیت آشکارسازی برای تخلیه‌های جزئی در محل‌های مختلف ترانسفورماتور یکنواخت‌تر خواهد بود.

برای تحلیل دقیق‌تر الگوهای تشعشعی بدست آمده، استخراج پارامترهای مناسب از آن‌ها ضروری است. بدین منظور دو پارامتر زیر تعریف می‌شود:

- **جهت‌دهی[9] آنتن (*D*)**: جهت‌دهی یک پارامتر شناخته شده در تئوری آنتن‌ها است که برابر است با نسبت چگالی توان در جهتی که بیشترین تشعشع را دارد (U_{max}) به چگالی توان آنتن ایزوتروپیک با همان توان کل قبلی (U_0). رابطه (۳) جهت‌دهی آنتن را بصورت ریاضی بیان می‌کند. از انجا که چگالی توان آنتن ایزوتروپیک برابر با تقسیم توان کل تشعشعی (P_{rad}) بر استرادیان کل یک کره در بر گیرنده آنتن است، ارتباط جهت‌دهی با توان کل تشعشعی نیز قابل حصول بوده و در رابطه (۳) داده شده است. جهت‌دهی برابر با ۱ نشان دهنده توزیع مساوی توان آنتن در تمامی جهات و جهت‌دهی بزرگتر از ۱ مربوط به آنتن‌هایی با توزیع بیشتر توان در یک جهت خاص می‌باشد. برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی، آنتن با کمترین جهت‌دهی عملکرد بهتری دارد چرا که حاسیست یکسانی را در سراسر ترانسفورماتور ایجاد می‌نماید.

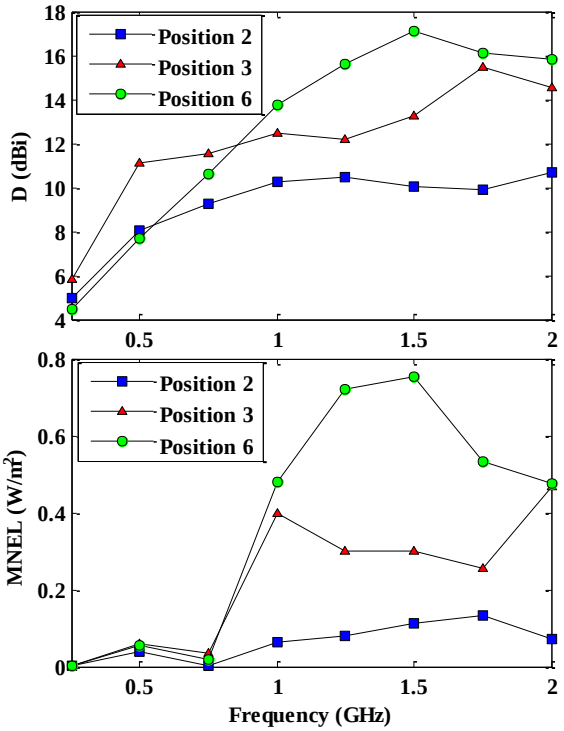
$$D = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \qquad (۳)$$

- **بیشینه گلبرگ‌های[10] ناکارآمد (*MNEL*[11])**: همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود برخی از گلبرگ‌های تشعشعی آنتن به سمت خارج تانک ترانسفورماتور می‌باشد. این گلبرگ‌ها در اینجا به نام گلبرگ‌های ناکارآمد شناخته شده و ماکزیمم توان آن‌ها به عنوان پارامتر دوم استخراج می‌گردد. رابطه (۴) بیان ریاضی این پارامتر را ارائه می‌دهد. مراجع زوایای مختصاتی θ و φ طبق دستگاه مختصات داده شده در شکل (۶) است و U چگالی توان تشعشعی آنتن را نشان می‌دهد.

$$MNEL = \begin{cases} \max(U \mid \neg 0 \le \theta \le 180\,, -90 \le \varphi \le 90) & \text{Pos.2} \\ \max(U \mid \neg 0 \le \theta \le 90\,\ , -90 \le \varphi \le 90) & \text{Pos.3} \\ \max(U \mid \neg 0 \le \theta \le 90\,\ , \ -90 \le \varphi \le 0) & \text{Pos.6} \end{cases} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، برای هر یک از موقعیت‌های شیر تخلیه روغن ۲، ۳ و ۶، زوایای معادل با ناحیه محصور به داخل تانک ترانسفورماتور داده شده است. بدیهی است آنتن با کمترین گلبرگ‌های ناکارآمد دارای توان بیشتری در جهات مطلوب بوده و عملکرد بهتری را برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی فراهم می‌آورد.

شکل (۷) دو پارامتر فوق را بر حسب فرکانس برای پروب نصب شده در سه موقعیت مورد بررسی مقاله نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر پارامترها، نمودارها تا فرکانس ۲ GHz رسم شده‌اند.



شکل (۷): جهت‌دهی (شکل بالا) و بیشینه گلبرگ‌های ناکارآمد (شکل پایین) برای پروب UHF در سه موقعیت نصب ۲، ۳ و ۶

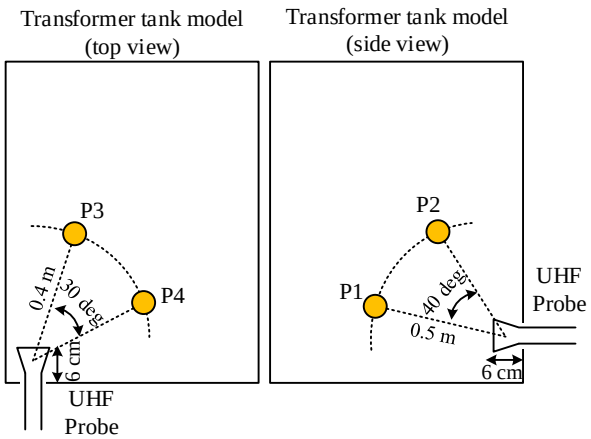
با توجه شکل (۷)، برای فرکانس‌های بالاتر از ۷۰۰ MHz پروب در موقعیت ۶ دارای بیشترین جهت‌دهی و گلبرگ‌های ناکارآمد است. در سمت مقابل، پروب در موقعیت ۲ کمترین مقدار این دو پارامتر و در نتیجه بهترین عملکرد را حاصل می‌نماید. پروب در موقعیت ۳ شرایطی بین دو وضعیت فوق را داراست. اما برای فرکانس‌های کمتر از ۷۰۰ MHz، منحنی‌ها به یکدیگر نزدیک بوده و تفاوت چندانی ملاحظه نمی‌شود. این موضوع با پهن بودن الگوی تشعشعی در فرکانس‌های ۲۵۰ MHz و ۵۰۰ در شکل (۶) و تیز بودن آن در فرکانس ۷۵۰ MHz قابل انتظار بود. در نتیجه، مجدداً بر اولیت آشکارسازی در فرکانس‌های پایین نسبت به فرکانس‌های بالا تاکید می‌گردد.

۲-۲-۱- تاثیر تانک ترانسفورماتور بر الگوی تشعشعی پروب

الگوی تشعشعی توان دریافتی از تخلیه‌جزئی را در هر ناحیه ترانسفورماتور در صورتیکه امواج مستقیماً به پروب برسند نشان می‌دهد. اما تانک ترانسفورماتور باعث ایجاد بازتاب امواج از دیواره‌ها شده در نتیجه امواج تولید شده توسط منبع تخلیه‌جزئی تنها از مسیر مستقیم به پروب نمی‌رسند بلکه از جهات گوناگون و پس از بازتاب هم دریافت می‌شوند. در این بخش، این تاثیر با در نظر گرفتن منبع

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]

تخلیه‌جزئی در دو محل مختلف برای پروب در موقعیت ۳ و ۶ و مقایسه نتیجه بدست آمده از الگوی تشعشعی و سیگنال‌های دریافتی بررسی می‌شود. شکل (۸)، موقعیت منبع تخلیه‌جزئی را که بصورت یک پورت تطبیق امپدانس شده (به عبارت دیگر یک پالس جریانی فضایی) با جریان گوسی شکل با دامنه نرمالیزه شده در نرم افزار CST شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد. در شکل سمت راست، پروب در موقعیت ۳ نصب شده است و نمای کناری تانک نشان داده شده است در حالی که در شکل سمت چپ پروب در موقعیت ۶ و نمای بالایی تانک داده شده است. سعی شده است محل‌های منبع PD به‌گونه‌ای انتخاب شود که مطابق شکل (۶) بیشترین تغییرات در الگوی تشعشعی بین دو محل حاصل گردد.



شکل (۸): موقعیت پروب و منبع تخلیه‌جزئی شبیه‌سازی شده برای بررسی اثر تانک ترانسفورماتور روی الگوی تشعشعی

جدول (۱) نسبت بین دامنه سیگنال‌های دریافتی در هر یک از موقعیت‌های منبع تخلیه‌جزئی را در فرکانس ۲۵۰ MHz نشان می‌دهد. هر ردیف جدول مربوط به یک پروب است و اندیسهای یک تا چهار منابع مختلف PD را نشان می دهد.

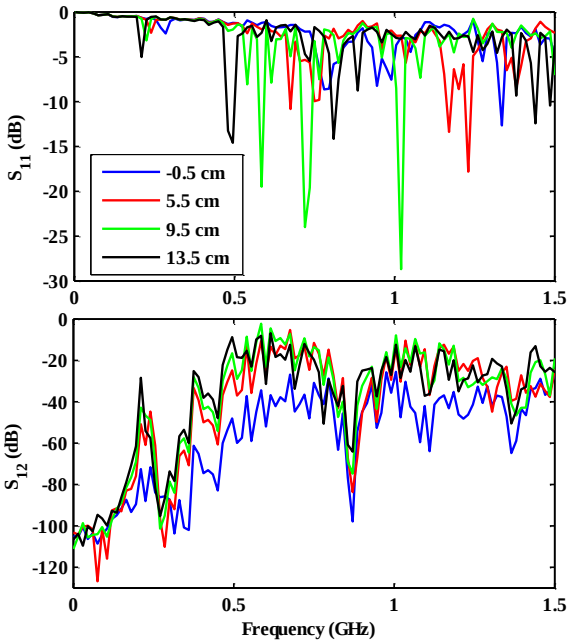
طبق الگوی تشعشعی داده شده در شکل (۶)، انتظار می‌رود پروب نصب شده در موقعیت ۳ منبع تخلیه‌جزئی در محل P1 را نسبت به محل P2 بهتر رصد کرده و در نتیجه سیگنال دریافتی آن در حالت P1 بزرگتر از حالت P2 باشد. طبق شکل (۶) نسبت دامنه ولتاژ بدست آمده در حالت P1، بایستی ۵۳ برابر حالت P2 باشد. اما این نسبت در نتایج بدست آمده تنها ۳/۴ برابر است. همین مورد برای پروب در موقعیت ۶ نیز تکرار می‌شود (ردیف دوم جدول (۱)). این موضوع نقش مهم تانک ترانسفورماتور و بازتاب امواج از آن را نشان می‌دهد. امواج بازتاب یافته می‌توانند از جهاتی به پروب برسند که پروب الگوی تشعشعی خوبی در آن جهات دارد بنابراین نسبت بین دامنه سیگنال-های دریافتی با مقادیر بدست آمده از شکل (۶) که بازتاب‌های تانک را نادیده می‌گیرد تفاوت زیادی دارد. در واقع تانک ترانسفورماتور به کاهش اثر الگوی تشعشعی پروب کمک می‌نماید اما آن را بطور کلی از بین نمی‌برد و الگوی تشعشعی همچنان یک پارامتر مهم در ایجاد حساسیت‌های متفاوت نسبت به تخلیه‌های جزئی در محل‌های مختلف می‌باشد.

جدول (۱): تاثیر الگوی تشعشعی پروب روی سیگنال‌های دریافتی از منابع تخلیه‌جزئی در موقعیت‌های نشان داده شده شکل (۸)

نسبت مورد بررسی	با استفاده از الگوی تشعشعی	با استفاده از سیگنال‌های دریافتی
V_{p1}/V_{p2}	۵۳	۳/۴
V_{p4}/V_{p3}	۱۰/۴	۴

۲-۳- عمق نفوذ پروب

عمق نفوذ پروب به داخل تانک ترانسفورماتور یک پارامتر مهم در اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی به کمک پروب‌های UHF است. در گزارشاتی که در [۶] آمده است، حساسیت آشکارسازی با بیشتر کردن عمق نفوذ پروب افزایش یافته است اما دلیل این امر بیان نشده است. در [۷] الگوی تشعشعی پروب که دارای حساسیت بیشتری در اطراف پروب نسبت به مقابل آن است به عنوان دلیل این موضوع ذکر شده است. برای بررسی این موضوع بصورت دقیق‌تر، منحنی‌های S_{11} و S_{12} در عمق نفوذهای مختلف اندازه‌گیری شده است که شکل (۹) نتایج حاصل را نشان می‌دهد.



شکل (۹): منحنی‌های اندازه‌گیری شده S11 (شکل بالا) و S12 (شکل پایین)در مقادیر عمق نفوذ مختلف

با توجه به شکل (۹) نتایج زیر مشهود است:

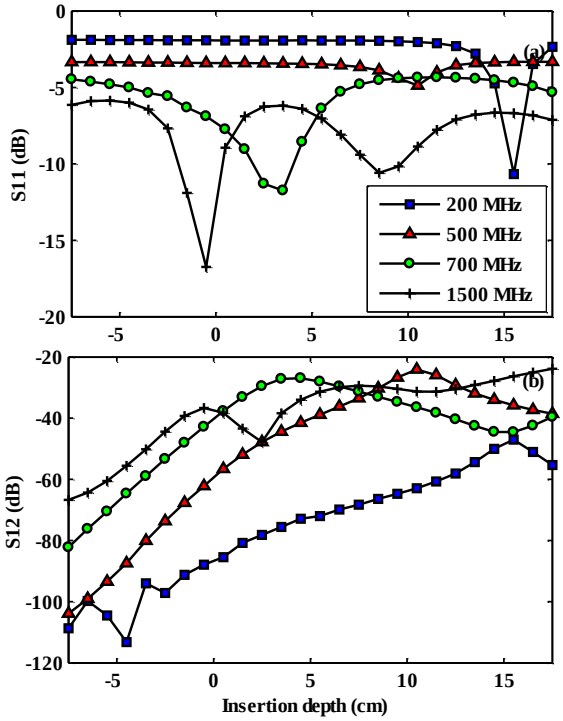
- با بیشتر شدن عمق نفوذ پروب، فرکانس‌های رزونانس به مقادیر کمتر شیفت پیدا می‌کنند. با دقت در منحنی S_{11} شکل (۹)، ترتیب فرکانس‌های رزونانس مشکی-زرد-قرمز-آبی از سمت چپ منحنی حفظ شده و مرتباً تکرار می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

- با بیشتر شدن عمق نفوذ پروب، تعداد فرکانس‌های رزونانس در یک بازه فرکانسی ثابت بیشتر می‌شود. به عنوان مثال در بازه فرکانسی ۱٫۵ GHz-۰ پروب با عمق نفوذ ۱۳/۵ cm دارای ۴ دسته فرکانس رزونانس و پروب با عمق نفوذ ۵/۵ cm دارای ۳ دسته فرکانس رزونانس است.

در فرکانس‌های زیر ۷۵۰ MHz همبستگی بیشتری بین دو منحنی S_{11} و S_{12} مشاهده می‌شود اما در فرکانس‌های بالاتر از آن این همبستگی کاهش می‌یابد. این موضوع در ادامه بیشتر بررسی شده است.

شکل (۱۰)، پارامترهای S_{11} و S_{12} را بر حسب عمق نفوذ پروب در فرکانس‌های ۲۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۵۰۰ MHz نشان می‌دهد که حاوی یک نتیجه‌گیری مهم در مورد تاثیر عمق نفوذ پروب می‌باشد.



شکل (۱۰): پارامترهای پراکندگی بر حسب عمق نفوذ پروب UHF

با توجه به شکل (۱۰)، برای فرکانس‌های ۷۰۰ MHz و پایین‌تر از آن، عمق نفوذ بهینه از نظر S_{11} و S_{12} یکسان است. به عنوان مثال در فرکانس ۵۰۰ MHz عمق نفوذ برابر با ۱۱ cm علاوه بر کمترین مقدار S_{11} بزرگترین S12 را نیز فراهم می‌آورد. بنابراین این عمق نفوذ از دیدگاه هر دو پارامتر بهینه است. اما در فرکانس‌های بالاتر این اتفاق رخ نمی‌دهد. به عنوان مثال در فرکانس ۱۵۰۰ MHz کمترین مقدار S_{11} متناظر با عمق نفوذ ۱- cm است در حالی که بیشترین مقدار S_{12} در عمق نفوذ ۱۷/۵ cm رخ داده است. این موضوع با توجه به نتایج شکل (۷) قابل تفسیر است. در فرکانس‌های بالا، جهت‌دهی آنتن زیاد بوده در نتیجه الگوی تشعشعی تیز می‌باشد. بنابراین تغییر در الگوی تشعشعی به دلیل تغییر عمق نفوذ تاثیر بیشتری از تغییر تطبیق امپدانس دارد و از آنجا که S_{11} تنها اثر تطبیق امپدانس را شامل شده و S_{12} هم تطبیق امپدانس و هم الگوی تشعشعی را شامل می‌شود، در فرکانس‌های بالا عدم همبستگی این دو پارامتر دور از انتظار نیست.

۲-۴- پلاریزاسیون

در یک موج الکترومغناطیسی، بردار میدان الکتریکی در جهت انتشار ممکن است در یک راستا منتشر شود یا با زمان بچرخد. در حالت اول پلاریزاسیون موج خطی و در حالت دوم بیضوی نامیده می‌شود. پلاریزاسیون دایروی حالت خاصی از پلاریزاسیون بیضوی است که در آن اندازه بردار میدان الکتریکی در طی چرخش ثابت می‌ماند. پلاریزاسیون یک آنتن همان پلاریزاسیون امواج ارسالی از آن می‌باشد [۱۵]. هنگامی که آنتن در حالت گیرنده عمل می‌کند، در صورتی که پلاریزاسیون امواج با پلاریزاسیون آنتن متفاوت باشد آنتن نمی‌تواند تمامی انرژی امواج را دریافت نماید و دارای تلفات معادل با معادله (۵) خواهد بود:

$$PLF = \left|\cos\psi\right|^2 \qquad (۵)$$

که در رابطه فوق، ψ زاویه بین بردار میدان الکتریکی موج رسیده به آنتن و بردار پلاریزاسیون آنتن و PLF ضریب تلفات پلاریزاسیون را نشان می‌دهند. در صورت یکسان بودن پلاریزاسیون آنتن و امواج رسیده به آن، PLF برابر با ۱ بوده و آنتن بیشینه توان ممکن را دریافت خواهد کرد و در صورتی زاویه بین بردار پلاریزاسیون آنتن و امواج رسیده به آن ۹۰ درجه باشد یا اصطلاحاً امواج رسیده به آنتن در پلاریزاسیون مخالف با آنتن باشند، آنتن سیگنالی دریافت نخواهد کرد. نحوه پلاریزاسیون یک آنتن معمولاً با پارامتر نسبت محوری مطابق معادله (۶) مشخص می‌شود [۱۵]:

$$AR = \frac{E_{\text{major axis}}}{E_{\text{minor axis}}} \qquad (۶)$$

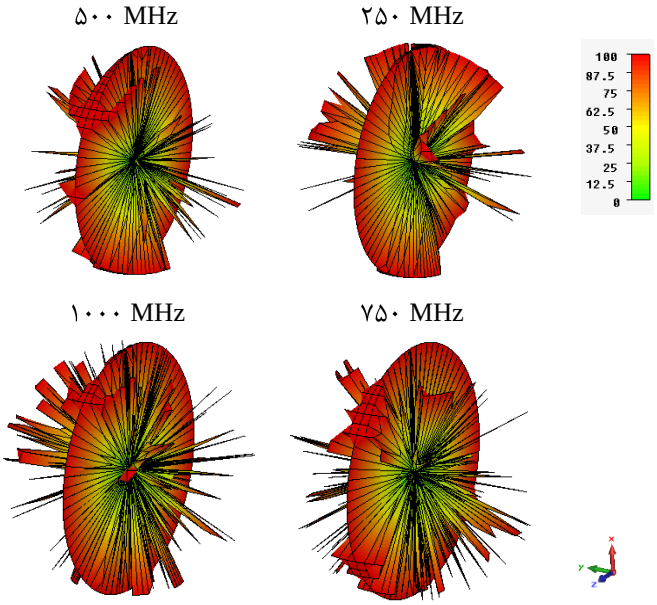
که در واقع برابر با نسبت دو مولفه عمودی بردار میدان در حین چرخش است. در صورتی که این دو مولفه با یکدیگر برابر باشند، AR برابر با یک و پلاریزاسیون دایروی خواهد بود. در پلاریزاسیون خطی، چون فقط یک مولفه موجود بوده و مولفه دیگر صفر است، AR معادل با بینهایت بدست می‌آید. برای پلاریزاسیون بیضوی، AR عددی بین یک و بینهایت بدست می‌آید.

پروب UHF یک آنتن منوپل مخروطی است. پلاریزاسیون این نوع آنتن که بسیار شناخته‌شده است، بصورت خطی و هم راستا با محور مخروط است [۱۵]. اما در ترانسفورماتور، به دلیل وجود دیواره‌های اطراف پروب، نمی‌توان پلاریزاسیون پروب UHF را خطی فرض کرد. بنابراین در اینجا با انجام شبیه‌سازی پروب در نرم افزار CST، AR بصورت سه‌بعدی در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ MHz بدست آمده که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در تمامی شکل‌ها، مبداء مختصات روی نوک پروب قرار داده شده است.

با توجه به شکل (۱۱)، پروب در ناحیه مقابل خود در جهت عمودی (به موازات سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور) دارای پلاریزاسیون تقریباً خطی است اما در جهات دیگر پلاریزاسیون بیضوی می‌باشد. علاوه بر این

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]

مشاهده می‌شود، پلاریزاسیون تغییرات شدیدی نسبت به فرکانس ندارد.

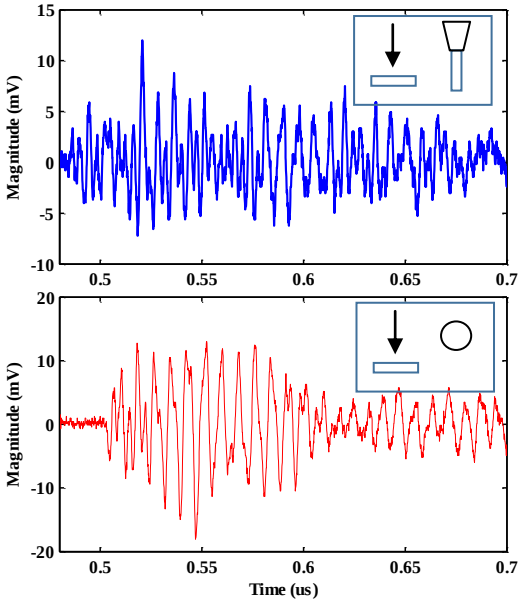


شکل (۱۱): نسبت محوری (*AR*) بدست آمده برای پروب شبیه‌سازی شده در CST

۲-۴-۱- تاثیر تانک ترانسفورماتور بر پلاریزاسیون پروب UHF

برای بررسی اثر تانک ترانسفورماتور بر پلاریزاسیون پروب UHF، یک آزمون تخلیه‌جزئی با استفاده منبع تخلیه کرونا که در قسمت ۲-۲ معرف شد، انجام می‌گیرد. آزمون در دو حالت انجام می‌شود که در حالت دوم پروب UHF نسبت به حالت اول ۹۰ درجه چرخانده می‌شود در حالی که منبع تخلیه‌جزئی بدون تغییر باقی می‌ماند. پلاریزاسیون منبع کرونا را می‌توان خطی و به موازات الکترود سوزنی آن فرض کرد [۱۰]. شکل (۱۲) نحوه قرارگیری پروب و منبع تخلیه‌جزئی و سیگنال‌های دریافتی در هر حالت را نشان می‌دهد.

جدول (۲) مشخصات سیگنال‌های دریافتی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، اولین بیشینه سیگنال در حالت پلاریزاسیون موافق ۴/۱ برابر این پارامتر برای پلاریزاسیون مخالف است. با توجه به پلاریزاسیون بیضوی پروب UHF در بیشتر نواحی، این مقدار اختلاف بین دو حالت قابل انتظار بوده است. اما مقدار پیک تا پیک کل سیگنال دریافتی در حالت پلاریزاسیون موافق فقط ۱/۶ برابر معادل آن در پلاریزاسیون مخالف است. این موضوع نشان می‌دهد اثر پلاریزاسیون تنها در قسمت‌های ابتدایی سیگنال‌های دریافتی شدید بوده و هنگامی که بازتاب‌ها از دیواره‌های تانک ترانسفورماتور به پروب می‌رسند کاهش می‌یابد. دلیل این امر رسیدن امواج بازگشتی از سمت دیواره‌های ترانسفورماتور با پلاریزاسیون متفاوت با پلاریزاسیون موج اصلی (که مستقیماً به پروب می‌رسد)، است. در نتیجه، پلاریزاسیون می‌تواند یک عامل تاثیرگذار در مکانیابی تخلیه‌جزئی که بر اساس نقطه شروع سیگنال‌های UHF دریافتی است باشد اما تانک ترانسفورماتور به آشکارسازی تخلیه‌هایی که در پلاریزاسیون مخالف هستند کمک می‌نماید و از دیدگاه آشکارسازی مشکل خاصی ایجاد نمی‌شود.



شکل (۱۲): سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در دو حالت پلاریزاسیون مخالف (شکل بالا) و پلاریزاسیون موافق (شکل پایین)

جدول (۲): مشخصات سیگنال‌های دریافتی شکل (۱۲)

پلاریزاسیون	اولین بیشینه سیگنال (mV)	پیک تا پیک کل سیگنال (mV)
مخالف	۱/۴	۱۹/۲
موافق	۵/۷۴	۳۱/۱

۳- تاثیرپذیری اندازه‌گیری UHF از پارامترهای پروب

در بخش ۲ مقاله پارامترهایی از پروب که روی اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی به روش UHF تاثیر می‌گذارند مورد بررسی قرار گرفتند. در این بخش، به عنوان خروجی مطالعات انجام شده، میزان تاثیر هر یک از پارامترها در مقایسه با یکدیگر و مقدار بهینه هر یک در اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی با استفاده از پروب‌های UHF ارائه می‌گردد. برای هر پارامتر، وضعیتی وجود دارد که در آن سیگنال‌های UHF با بیشترین انرژی دریافت می‌شوند. این وضعیت به عنوان "بهترین شرایط" شناخته‌شده و مقدار پیک تا پیک سیگنال دریافتی در آن با V_{bs} نشان داده می‌شود. در سمت مقابل، در صورت تنظیم بد پارامترها یا بدلیل ویژگی‌های ذاتی خود پروب UHF، در وضعیت "بدترین شرایط" سیگنال‌های UHF با کمترین انرژی دریافت شده و مقدار پیک تا پیک این سیگنال‌ها با V_{ws} نمایش داده می‌شود. نسبت $\frac{V_{bs}}{V_{ws}}$ برای هر پارامتر، معیاری از مقدار تاثیرپذیری اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی از آن پارامتر می‌باشد. جدول (۳)،

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

این نسبت را برای هر یک از چهار پارامتر مورد بررسی نشان می‌دهد. در مورد هر پارامتر، ستون سوم جدول محدوده مورد بررسی را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، در پارامتر اول و سوم، فرکانس یکی از متغیرها است در حالی که محل نصب پروب و عمق نفوذ آن نیز به عنوان متغیر به ترتیب در هر یک لحاظ شده است.

با توجه به مقادیر بدست آمده در ستون چهارم جدول (۳)، مشاهده می‌شود اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی می‌تواند به شدت از پارامترهای ارائه شده مخصوصاً تطبیق امپدانس و عمق نفوذ پروب تاثیر بپذیرند. در نتیجه، فقدان اطلاعات کافی در مورد عملکرد هر یک از پارامترها که در بخش ۲ مقاله ارائه شد می‌تواند منجر به یک اندازه‌گیری نادرست و تصمیم‌گیری اشتباه در مورد وضعیت عایقی ترانسفورماتور قدرت شود. به منظور جلوگیری از این امر، مقدار بهینه هر پارامتر استخراج شده و در ستون پنجم این جدول نمایش داده شده است. بکارگیری این مقادیر بهینه موجب اندازه‌گیری با شرایطی تا حد امکان نزدیک به "بهترین شرایط" و با حساسیت آشکارسازی مناسب در تمامی نقاط ترانسفورماتور می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، از دیدگاه هر دو پارامتر تطبیق امپدانس و الگوی تشعشعی، فرکانس‌های پایین‌تر برای آشکارسازی تخلیه‌جزئی مناسب‌ترند. از جمله مزایای این امر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- الگوی تشعشعی پروب در فرکانس‌های پایین‌تر بیشتر به الگوی همه‌جهتی نزدیک بوده و دارای جهت‌دهی و گلبرگ‌های ناکارآمد کوچکتر می‌باشد.
- هم تطبیق امپدانس پروب و هم الگوی تشعشعی آن در فرکانس‌های پایین‌تر کمتر تحت تاثیر محل نصب پروب و یا به عبارت دیگر دیواره‌های تانک ترانسفورماتور قرار می‌گیرند.
- انواع مختلف تخلیه‌جزئی دارای محدوده‌های مختلف فرکانسی بوده و با انتخاب فرکانس‌های بالا حساسیت آشکارسازی برخی از آن‌ها کاهش یافته و ممکن است از بین برود.
- در فرکانس‌های پایین، عمق نفوذ بهینه موجب تطبیق امپدانس بهینه نیز می‌گردد. این امر در فرکانس‌های بالا صادق نیست.
- علاوه بر موارد فوق، آشکارسازی در یک بازه فرکانسی محدود و در مقادیر فرکانس پایین‌تر نیاز به تجهیزات ارزان‌تر و در دسترس‌تر نسبت به آشکارسازی پهن‌باند و در فرکانس‌های بالا دارد.

مقدار بهینه عمق نفوذ در هر فرکانس آشکارسازی در جدول (۳) داده شده است. تا فرکانس ۷۰۰ MHz عمق نفوذ معادل با مقداری است که اولین فرکانس رزونانس را ایجاد می‌نماید در نتیجه با افزایش فرکانس، مقدار عمق بهینه کاهش می‌یابد. اما برای فرکانس‌های بالاتر مانند ۱۵۰۰ MHz این موضوع برقرار نیست.

تنها پارامتری که حالت بهینه آن خارج از کنترل است پلاریزاسیون است. هم راستا کردن پروب با جهت جریان تخلیه‌جزئی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات نحوه پلاریزاسیون تخلیه‌جزئی امکان‌پذیر نیست. البته خوشبختانه تاثیر این پارامتر به دلیل بازتاب‌های ناشی از تانک ترانسفورماتور کم بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مهمترین مشخصات پروب UHF با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. بسیاری از این مشخصات برای اولین بار در مورد آشکارسازی تخلیه‌جزئی معرفی شده و مقدار تاثیر هر یک روی اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی به روش UHF تخمین زده شد. بر این اساس، تطبیق امپدانس، عمق نفوذ پروب، الگوی تشعشعی و سپس پلاریزاسیون پروب به ترتیب بیشترین تاثیر را روی اندازه‌گیری‌ها دارند. تاثیر سه پارامتر اول در محدوده‌ای است که بدون توجه به آن‌ها، اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی می‌تواند بصورت نادرست انجام شده و موجب تصمیم‌گیری‌های اشتباه در مورد وضعیت عایقی ترانسفورماتور گردد. برای جلوگیری از بروز مشکل فوق، در بخش پایانی مقاله وضعیت بهینه پارامترهای مورد بررسی بر اساس حجم وسیعی از داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی ارائه گردید. مشاهده شد با استفاده از انتخاب محدوده فرکانسی مناسب که عموماً مربوط به اولین فرکانس‌های رزونانس پروب UHF است، پارامترهایی نظیر الگوی تشعشعی و پارامترهای پراکندگی پروب در وضعیت مناسب‌تری قرار گرفته و حساسیت یکنواخت‌تری در سراسر تانک ترانسفورماتور حاصل می‌گردد. همچنین مقدار عمق نفوذ بهینه پروب در هر فرکانس داده شده است. بکارگیری نتایج بدست آمده در مقاله، به اندازه‌گیری و تحلیل دقیق‌تر تخلیه‌جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از پروب‌های UHF کمک می‌نماید.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت ABB Group Co. و انستیتو شرینگ آلمان به جهت آماده‌سازی تانک ترانسفورماتور و دیگر تجهیزات اندازه‌گیری کمال تشکر را دارند.

مراجع:

[1] IEC 60270, High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements, International Electrotechnical Commission (IEC), 3rd Edition, 2000.

[2] S. Chakravorti, D. Dey, B. Chatterjee, Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers, First Edition, Springer: London, 2013.

[۳] علی مذهب جعفری، اصغر اکبری ازیرانی، "مدلسازی سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل خط انتقال چند سیمه بمنظور مکانیابی تخلیه‌جزئی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران (jiaeee)، سال ششم، شماره اول، ۱۳۸۷.

[4] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gokenbbach, K. Miralikhani, "Advancing New Techniques for UHF PD Detection and Localization in Power Transformers in the Factory Tests", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 22, pp. 448-455, 2015.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]

جدول (۳): تاثیرپذیری اندازه‌گیری تخلیه جزئی از پارامترهای پروب UHF

ردیف	پارامتر	محدوده مورد بررسی	مقدار تاثیر روی اندازه‌گیری ($\frac{V_{bs}}{V_{ws}}$)	مقدار بهینه	توضیحات
۱	تطبیق امپدانس	۱۵۰-۱۵۰۰ MHz محل نصب پروب ۲، ۳ و ۶ شکل (۱)	۶/۵×۱۰^{۴}	۱۹۰-۲۶۰ MHz	تاثیر روی اندازه‌گیری، هنگامی که پروب در موقعیت ۶ قرار دارد از روی منحنی S_{12} در بازه فرکانسی مورد بررسی تعیین می‌شود.
۲	الگوی تشعشعی	۲۵۰ MHz داخل تانک با ابعاد ۱۲۳۶×۸۵۶×۱۵۹۶ mm	۴	۱۹۰-۲۶۰ MHz	دیواره‌های تانک ترانسفورماتور مقدار تاثیر الگوی تشعشعی روی سیگنال‌های اندازه‌گیری را به شدت (از ۵۳ بدون حضور تانک تا ۴ با حضور آن در مورد مطالعه انجام شده) کاهش می‌دهند.
۳	عمق نفوذ	۰-۱۷/۵ cm ۲۰۰-۱۵۰۰ MHz	۱/۲×۱۰^{۳}	۱۵/۵ cm :۲۰۰ MHz ۱۰/۵ cm :۵۰۰ MHz ۴/۵ cm :۷۰۰ MHz ۱۷/۵ cm :۱۵۰۰ MHz	بدترین موقعیت در شرایط عمق نفوذ صفر و فرکانس ۲۰۰ MHz و بهترین شرایط در عمق نفوذ ۱۰/۵ cm و ۵۰۰ MHz رخ می‌دهد.
۴	پلاریزاسیون	PLF=[0 1]	۱/۶	هم راستا با محور پروب	بدترین شرایط در حالتی که زاویه بین بردار میدان الکتریکی رسیده به پروب و بردار پلاریزاسیون پروب ۹۰ درجه است رخ می‌دهد. بهترین شرایط در حالتی که این زاویه برابر با صفر است ایجاد می‌شود. تانک ترانسفورماتور نسبت سیگنال‌های دریافتی را در بهترین و بدترین شرایط بطور قابل ملاحظه کاهش می‌دهد.

مراجع

[5] W. R. Rutgers, Y. H. Fu, "UHF PD-detection in a Power Transformer", 10th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) , Vol. 4, pp. 219-222, Montreal, 1997.

[6] J. Lopez-Roldan, T. Tang, M. Gaskin, "Optimization of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharge in Power Transformers by the UHF Method", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, 2008.

[7] S. Coenen, "Measurement of Partial Discharge in Power Transformers Using Electromagnetic Signals", Ph.D. dissertation, Institute for power transmission and high voltage technique, Stuttgart, 2012.

[8] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, "Detection and Location of Partial discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, 2008.

[۹] حسن رضا میرزائی، "مدل‌سازی تخلیه‌جزئی جهت آشکارسازی در باند UHF در ترانسفورماتور قدرت"، رساله دکتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۹۲.

[10] A. Akbari, P. Werle, M. Akbari, H. R. Mirzaei, "Challenges in Calibration of Partial Discharges at Ultrahigh Frequencies in Power Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 32, pp. 27-34, 2016.

[11] Omicron UVS 610 Catalogue, Available in www.omicronenergy.com

[12] T. S. Bird, "Definition and Misuse of Return Loss", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, Issue 2, pp. 166-167, 2000.

[13] J. Li, P. Wang, T. Jiang, L. Bao, Z. He, "UHF Stacked Hilbert Antenna Array for Partial Discharge Detection", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, Issue 11, pp. 5798-5801, 2013.

[14] S. Coenen, S. Tenbohlen, T. Strehl, S. Markalous, "Fundamental Characteristics of UHF PD Probes and the Radiation Behavior of PD Sources in Power Transformers", International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), South Africa, 2009.

[15] C. A. Balanis, Antenna Theory-Analysis and Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

زیرنویس‌ها

۱ Log-periodic dipole
۲ Insertion depth
۳ Radiation pattern
۴ Return loss
۵ Polarization
۶ Axial ratio
۷ Scattering parameters
۸ Omnidirectional
۹ Directivity
۱۰ Lobes
۱۱ Maximum of non-effective lobes

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.4.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018