

## بررسی همزمانی و برخط بودن تشخیص جابجایی محوری و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از امواج الکترومغناطیسی

حسین کرمی<sup>۱</sup>، گئورگ قره‌پتیان<sup>۱</sup>، یاسر نوروزی<sup>۱</sup>، مریم السادات اخوان حجازی<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، [y.norouzi@aut.ac.ir](mailto:y.norouzi@aut.ac.ir)، [grptian@aut.ac.ir](mailto:grptian@aut.ac.ir)، [h.karami@aut.ac.ir](mailto:h.karami@aut.ac.ir)

دانشگاه کاشان [mhejazi@kashanu.ac.ir](mailto:mhejazi@kashanu.ac.ir)

چکیده — پایش برخط ترانسفورماتور یکی از مهمترین مباحث روز دنیا به منظور اطلاع از وضعیت داخل ترانسفورماتور است. با داشتن اطلاعات کامل‌تر از وضعیت ترانسفورماتور، می‌توان تصمیم مطمئن‌تری برای زمان تعمیرات دوره‌ای، اتخاذ کرد. عیب تخلیه‌جزئی و عیب جابجایی محوری سیم‌پیچ ترانسفورماتور، از عیوب شاخص و تاثیرگذار در پایش وضعیت ترانسفورماتور هستند. در میان روش‌های موجود در تشخیص این عیوب، استفاده از امواج الکترومغناطیسی به عنوان یکی از ابزارهای تشخیص این دو عیب، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. روش تصویربرداری راداری در تشخیص عیب جابجایی محوری، و روش اختلاف زمانی رسیدن امواج الکترومغناطیسی حاصل از تخلیه‌جزئی به آنتن‌های نصب شده در بدنه برای تشخیص تخلیه‌جزئی، هنوز در حال مطالعه و بهبود هستند. تاکنون روش‌های زیادی برای تشخیص این عیوب معرفی شده‌اند ولی هیچکدام به سمت تشخیص همزمان این دو عیب حرکت نکرده‌اند. در جهت حرکت به سمت یک پایش وضعیت کامل و جامع، نیاز به بررسی همزمان عیوب احساس می‌شود. این مقاله، به امکان‌سنجی تشخیص همزمان این دو عیب در ترانسفورماتورها می‌پردازد. به عبارت دیگر بررسی می‌شود که آیا می‌توان عیب جابجایی محوری را با وجود عیب تخلیه‌جزئی تشخیص داد یا خیر. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تشخیص هر دو عیب با یک مجموعه آنتن نصب‌شده در بدنه ترانسفورماتور و تفکیک سیگنال‌های تصویربرداری راداری از تخلیه‌جزئی امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی — امواج الکترومغناطیسی، تشخیص همزمان عیوب ترانسفورماتور، تصویربرداری راداری، عیب جابجایی محوری، عیب تخلیه‌جزئی

### ۱. مقدمه

در زمان انجام آزمایش تشخیص جابجایی محوری هنوز بررسی نشده است. استفاده از امواج الکترومغناطیسی به عنوان یکی از ابزارهای تشخیص این دو عیب، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲-۴]. در [۳] در مورد عیب شعاعی و تخلیه‌جزئی صحبت شد، اما در مورد عیب جابجایی محوری همراه تخلیه‌جزئی تا کنون بحثی انجام نشده است. در این مقاله با مروری کوتاه در هر یک از این دو روش، امکان‌سنجی تشخیص همزمان این عیوب و مکان‌یابی عیب تخلیه‌جزئی بطور همزمان با استفاده از یک مجموعه آنتن نصب شده روی بدنه ترانسفورماتور، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در دو بخش بعدی به روش تشخیص هر کدام از این عیوب توسط امواج الکترومغناطیسی اشاره‌ای کوتاه می‌نماییم. در بخش چهارم، تاثیر وجود تخلیه‌جزئی در حین تشخیص عیب محوری نشان داده خواهد شد. در بخش پنجم روشی بمنظور تفکیک سیگنال‌ها ارائه شده و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه می‌شود.

امروزه همه کشورهای صنعتی، به کارکرد و تولید بی‌نقص و انتقال و توزیع پیوسته قدرت الکتریکی وابسته‌اند. ترانسفورماتورها برای ارتباط و اتصال سیستم‌های انرژی با سطوح ولتاژ متفاوت بعنوان مهمترین دستگاه بخش انتقال و توزیع مطرح هستند. در نتیجه خرابی آنها می‌تواند باعث بروز وقفه در تغذیه شبکه و در نتیجه پیامدهای مخرب آن گردد. بسیاری از بهره‌برداران علاقمند هستند که از وضعیت داخل ترانسفورماتورهای قدرت باخبر شوند. به این ترتیب با استفاده از روش‌های برخط مونیوتورینگ، علاوه بر جلوگیری از وارد آمدن خسارات جدی به ترانسفورماتور، با اطلاع‌رسانی به موقع می‌توان موجب تداوم انتقال انرژی الکتریکی شد [۱].

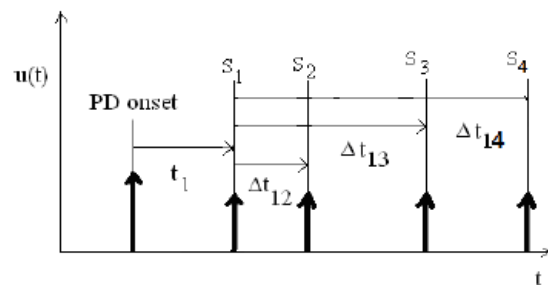
دو دسته از عیوب ترانسفورماتورهای قدرت که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، عیوب جابجایی محوری سیم‌پیچ و تخلیه‌جزئی هستند. روش‌های پایش برخط موجود برای تشخیص عیوب مکانیکی و تخلیه‌جزئی، هیچ کدام بمنظور تشخیص همزمان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. همچنین تاثیر تخلیه‌جزئی

## ۲. تشخیص تخلیه جزئی با روش الکترومغناطیسی

### ۲.۱. توضیح روش

تشخیص تخلیه جزئی یا PD<sup>۱</sup> به کمک امواج الکترومغناطیسی UHF<sup>۲</sup> در ترانسفورماتورهای قدرت، روشی جدید بوده و چند سالی است که به طور جدی مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۵]. در ترانسفورماتورها، آشکارسازی امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالای PD در محدوده امواج UHF (بین ۳۰۰MHz تا ۳GHz) توسط آنتن‌هایی که مستقیماً در داخل مخزن ترانسفورماتور از طریق شیر روغن یا در دیواره‌های خارجی آن نصب می‌شود، امکان‌پذیر است [۵-۷]. در [6]، اظهار داشته که دلیل ایزوله بودن مخزن ترانسفورماتور از PD های اتفاق افتاده در خارج از تانک از لحاظ الکترومغناطیسی، سیگنال به نویز خوبی داریم. در [7] به صورت تجربی نشان داده شده است که انتشار امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی UHF در روغن ترانسفورماتور، در شرایط عادی چندان متأثر از عواملی نظیر پیری، وجود رطوبت و تغییرات دمایی آن در شرایط معمولی نیست.

یکی از رایج‌ترین روشهای مکان یابی PD با استفاده از امواج الکترومغناطیسی، روش TDOA<sup>۳</sup> می‌باشد [۴]. در این روش، با وجود چهار آنتن، سه معادله هایپربولیکی تشکیل می‌شود که در یک نقطه تقاطع دارند. این تفاوت زمان‌ها برای یک سیگنال، در شکل ۱ بصورت شماتیک برای چهار آنتن نمایش داده شده است. در روش TDOA، معادلات هایپربولیکی به صورت زیر است [۴]:



شکل ۱: تفاوت زمان‌های رسیدن سیگنال از محل عیب به آنتن‌ها

$$(c * t_1)^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (1)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{12}))^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (2)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{13}))^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (3)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{14}))^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \quad (4)$$

<sup>1</sup> Partial Discharge

<sup>2</sup> Ultra High Frequency

<sup>3</sup> Time Difference Of Arrival

در این معادله  $c$  بیانگر سرعت نور در محیط و  $\Delta t_{12}$ ،  $\Delta t_{13}$  و  $\Delta t_{14}$  بیانگر اختلاف زمانی سیگنال رسیده از محل عیب به آنتن اول نسبت به سیگنال رسیده به آنتن‌های بعدی است. مکان آنتن‌ها که با  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  شناخته می‌شوند به ترتیب به صورت  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ،  $(X_2, Y_2, Z_2)$ ،  $(X_3, Y_3, Z_3)$  و  $(X_4, Y_4, Z_4)$  نمایش داده می‌شوند. مکان عیب در ابتدا به صورت  $(X, Y, Z)$  و نامشخص است و سیگنال با زمان  $t_1$  نامشخص به اولین آنتن می‌رسد.

### ۲.۲. شبیه سازی روش

به منظور شبیه سازی، از نرم افزار CST Studio استفاده شده است. به علت بزرگ بودن ابعاد یک ترانسفورماتور و محدودیت سخت افزاری کامپیوتری (اشغال زیاد RAM و CPU توسط نرم افزار CST) در شبیه سازی با نرم افزار، یک مدل آزمایشگاهی برای شبیه سازی این نوع مطالعات استفاده می‌شود که در [۱] بصورت عملی آزمایش گرفته شده و به عنوان مدل جایگزین، استفاده شده است. ابعاد شبیه سازی شده در جدول ۱ آورده شده است. لازم بذکر است این شبیه سازی‌ها نیز با استفاده از کامپیوتری با 18G RAM و Core i7 CPU انجام شده است.

جدول ۱: پارامترهای مدل شبیه سازی شده

مقدار	پارامتر
300mm	قطر دیسک
۱۴	تعداد دیسک‌ها
20mm	ارتفاع هر دیسک
6mm	فاصله بین دو دیسک متوالی
350mm	فاصله آنتن‌ها از دیسک‌ها

آنتن‌ها در مختصات  $S_1(500, -173, 120)$ ،  $S_2(500, -173, 170)$ ،  $S_3(500, 173, 120)$ ،  $S_4(500, 173, 170)$  هستند. سیگنال‌های دریافت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. محیط شبیه سازی شده به همراه محل آنتن‌ها (با رنگ سبز) و محل عیب تخلیه جزئی (با رنگ قرمز)، در شکل ۳ نمایش داده شده است. محل عیب تخلیه جزئی در مختصات  $P(151, 0, 19, 5)$  واقع شده است. با توجه به معادلات (۱) تا (۴)، محل تخلیه جزئی در مختصات  $(153, 0, 3, 26)$  تخمین زده شد که با محل عیب واقعی حدود ۷ میلی‌متر فاصله دارد. این دقت با توجه به ابعاد شبیه‌سازی شده (در حدود  $40 * 37 * 67$  میلی‌متر مکعب) و با توجه به نمونه عملی انجام شده در [۸] که با خطای ۲۰ سانتیمتر تخمین زده شده است، دقت قابل قبولی می‌باشد.

## ۳. تشخیص جابجایی محوری سیم پیچ با استفاده از روش تصویربرداری راداری

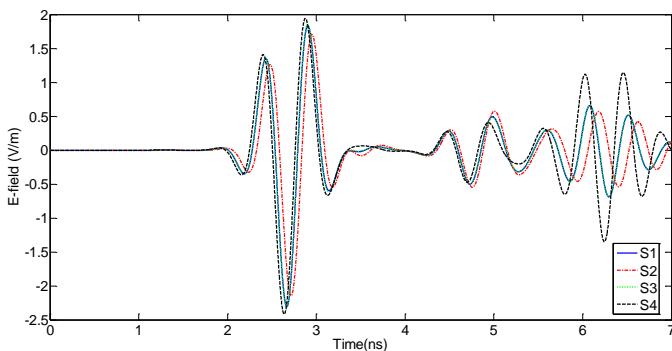
### ۳.۱. توضیح روش

یکی از بروزترین روش‌های تشخیص عیب جابجایی محوری سیم-پیچ ترانسفورماتور که در حال مطالعه و بهبود می‌باشد، روش تصویربرداری راداری می‌باشد. نحوه تصویربرداری در شکل ۴ نشان داده شده است. هنگامی که پالس توسط آنتن فرستنده ارسال می‌گردد، امواج ارسالی به هدف (ترانسفورماتور) برخورد نموده و در تمام جهات منعکس می‌گردد. پالس منعکس شده توسط آنتن گیرنده دریافت می‌گردد. برای به دست آوردن یک تصویر دو بعدی از هدف، موقعیت آنتن‌ها تغییر داده شده و در نقاط مختلف محور Z فرآیند ارسال پالس و دریافت بازتاب آن تکرار می‌گردد [۹]. سیگنال دریافتی در هر موقعیت آنتن یک اسکن نامیده می‌شود. هر اسکن یک سیگنال زمانی بوده که با نمونه‌برداری از امواج دریافتی در یک موقعیت خاص به دست می‌آید. با تغییر موقعیت آنتن در طول محور اسکن‌های مختلفی به دست می‌آید. مجموعه سیگنال‌های دریافت شده در فرآیند اسکن‌گیری به عنوان داده‌های خام برای به دست آوردن تصویر به کار گرفته می‌شوند. به علت اینکه در سیگنال‌های دریافت شده مواردی همچون چند مسیری وجود دارد، نیاز به پردازش اولیه سیگنال‌های خام داریم. این پردازش‌ها در [۹] به تفصیل شرح داده شده است. در این مقاله به منظور تبدیل سیگنال‌ها به یک تصویر دو بعدی، از الگوریتم مهاجرت کیرشهف استفاده شده است. طریقه بدست آوردن معادلات مربوطه در [۹] توضیح داده شده است که بدلیل محدودیت تعداد صفحات در اینجا ذکر نشده است. همچنین تأثیر عواملی همچون تانک ترانسفورماتور و یا روغن ترانسفورماتور در مقالات قبلی بررسی شده است [۱۰-۱۱]. شایان ذکر است که روش ارایه شده در [۹] از باند فرکانسی فرایه‌ن باند شامل حدود فرکانس ۳GHz تا ۶GHz استفاده شده است. اما همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، بازه فرکانسی در عیب‌های تخلیه‌جزیی ایجاد شده بین ۳۰۰MHz تا ۳GHz می‌باشد. از آنجا که در این مقاله هدف ما استفاده از یک مجموعه آنتن در بدنه ترانسفورماتور برای تشخیص همزمان هر دو عیب است، در نتیجه شبیه‌سازی تشخیص عیب جابجایی محوری در بازه فرکانسی ۳۰۰MHz تا ۳GHz انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این بازه فرکانسی نیز نتایج، مشابه با روش فرایه‌ن باند ارایه شده در [۹] می‌باشد و استفاده از این بازه فرکانسی نیز قابل قبول می‌باشد.

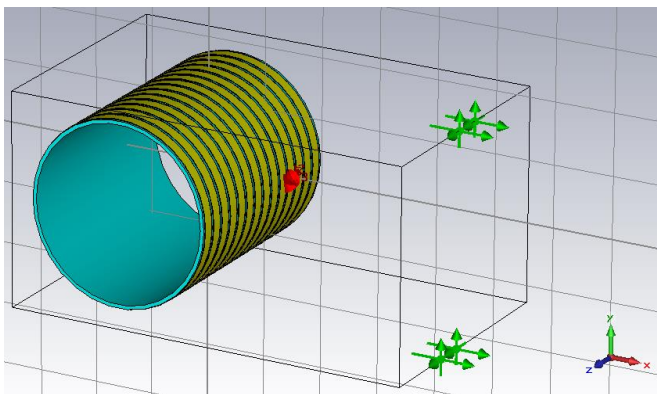
### ۳.۲. شبیه‌سازی روش

اطلاعات شبیه‌سازی در جدول ۱ در قسمت قبلی توضیح داده شد. در این بخش بمنظور بررسی جابجایی محوری سیم پیچ، سیم پیچ

را به میزان ۲۰ میلی‌متر به سمت پایین جابجا نمودیم و طبق توضیحات داده شده، آنتن‌ها در ۳۰ گام، از ارتفاع ۱۰ تا ارتفاع ۱۸۰ میلی‌متری، فرآیند ارسال و دریافت را انجام می‌دهند. تصویر ایجاد شده برای حالت سالم و معیوب (دارای جابجایی محوری) در شکل ۵ نشان داده شده است. اگر عدد ۰,۴ به عنوان میزان سنجش برای تخمین مکان مرکز سیم پیچ باشد، خطوط مربوط حد بالا (اولین نقطه بالای شکل با عدد رنگی ۰,۴)، حد پایین (آخرین نقطه پایین شکل با عدد رنگی ۰,۴) و متوسط این دو خط به عنوان معیار نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با مقایسه دو شکل بدست آمده می‌توان وجود جابجایی محوری را مشاهده نمود. شبیه‌سازی‌ها مقدار جابجایی ۱۶ میلی‌متر به سمت پایین را نشان می‌دهند.



شکل ۲: سیگنال‌های دریافت شده از تخلیه جزیی توسط آنتن‌ها



شکل ۳: شبیه‌سازی انجام شده در CST

## ۴. تأثیر تخلیه جزیی در تشخیص عیب

### محوری

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد با یافتن حد بالا و حد پایین سیم پیچ، می‌توان عیب محوری را در سیم پیچ ترانسفورماتور پیدا کرد. اما اگر در حین ارسال و دریافت سیگنال‌ها عیب تخلیه جزیی رخ دهد، ترکیب سیگنال ساطع شده از تخلیه جزیی و سیگنال مربوط به تشخیص عیب محوری موجب تشخیص اشتباه در عیب محوری می‌شود. به عنوان نمونه اگر در برخی از گام‌ها و در حین ارسال و دریافت سیگنال، یک عیب تخلیه جزیی رخ دهد، همانطور که در شکل

## ۵. تفکیک داده‌های مربوط به عیب تخلیه-

### جزیی و عیب محوری

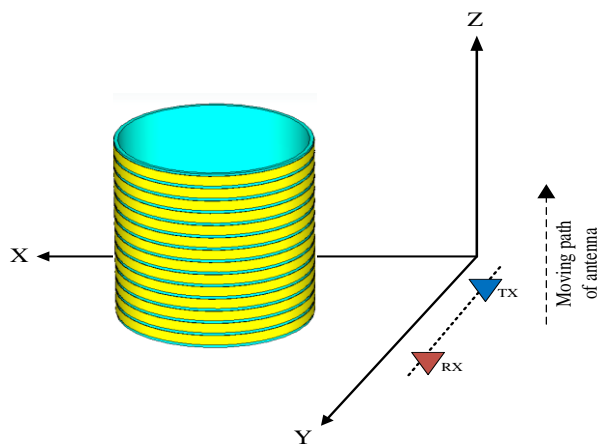
یکی از اقداماتی که در پایش وضعیت ترانسفورماتورها نیاز است انجام گیرد، ترکیب روشهای پیشین و حرکت به سمت پایش کامل ترانسفورماتور می‌باشد. در این مقاله دو روش تشخیص عیب محوری سیم‌پیچ ترانسفورماتور و تخلیه جزئی که هر دو بر پایه روش الکترومغناطیسی می‌باشند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در بخش قبل نشان داده شد که تداخل عیب تخلیه جزئی در هنگام تشخیص عیب محوری موجب تخریب شکل حاصله و تشخیص اشتباه خواهد شد. در نتیجه لازم است تا اطلاعات مربوط به تخلیه جزئی از داده‌های مورد نیاز برای تشخیص عیب محوری تفکیک شوند. بدین منظور، در این مقاله پیشنهاد شده است که در روش تشخیص عیب محوری اصلاحی صورت گیرد تا بتوان از تداخل داده‌ها جلوگیری نمود. شایان ذکر است که مشکل ایجاد شده فقط در تشخیص عیب محوری

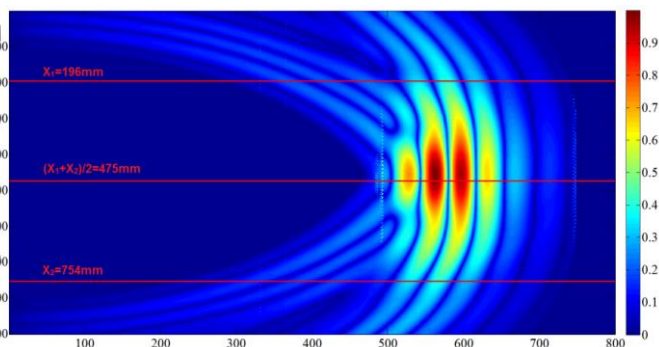
است و در تشخیص و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی مشکلی نداریم. زیرا در زمانی که فرستنده و گیرنده مربوط به تشخیص عیب محوری خاموش می‌باشد، سیگنالهای تخلیه جزئی همانند توضیحات بخش دوم دریافت شده و مکان‌یابی صورت می‌گیرد. ولی در زمانی که عیب تخلیه جزئی وجود دارد، بخواهیم عیب محوری را تشخیص دهیم به مشکلات ذکر شده در بخش ۴ برخورد می‌کنیم. همانطور در بخش سوم نیز اشاره شد، روش ارایه شده در [۹]، از یک سیگنال گوسی که تمامی فرکانسهای بازه مورد مطالعه را دارد، استفاده می‌نماید. بعبارت دیگر اگر در حوزه فرکانس به این سیگنال نگاه شود، این سیگنال حاصل جمع مجموعی از سیگنالهای سینوسی با فرکانسهای مختلف در بازه مورد مطالعه است. سیگنال دریافت شده پس از بازخورد از جسم به همین صورت مجموعی از سیگنالهای سینوسی با فرکانسهای مختلف است که حاصل، بصورت یک سیگنال گوسی نمایش داده می‌شود. در واقع سیگنالهای دریافتی برای تشخیص عیب مکانیکی همان سیگنالهای سینوسی ارسالی می‌باشند که اندازه و فاز آنها در حین تغییر متفاوت گشته است. در نتیجه اگر سیگنال گوسی بصورت چند سینوسی جداگانه ارسال و دریافت شود و سپس سیگنالهای سینوسی با هم جمع شوند به همان سیگنال گوسی خواهیم رسید.

با توجه به توضیحات ذکر شده، در این مقاله پیشنهاد می‌شود بجای استفاده از یک سیگنال گوسی که در [۹] پیشنهاد شده است، از مجموع چند سیگنال سینوسی برای هر گام از آزمایش تشخیص عیب محوری استفاده شود. به این روش به اصطلاح stepped-frequency می‌گویند. مزیت این روش در این است که زمانیکه سیگنال سینوسی با فرکانس  $f$  ارسال کردیم، توقع داریم سیگنال دریافتی نیز سینوسی با فرکانس  $f$  باشد و فقط دامنه و فاز آن تغییر یافته باشد. با توجه به اینکه عیب تخلیه جزئی محدوده‌ای از فرکانسهای UHF را در محیط

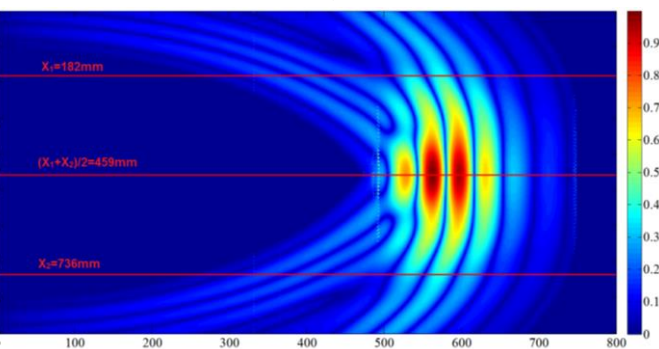
۶ نمایش داده شده است، تصویر حاصله عیب را بصورت اشتباه نشان می‌دهد (بطور مثال در این شکل عیب را در مقایسه با تصویر شکل ۵-الف، بصورت 8.5mm به سمت بالا نشان می‌دهد. در صورتیکه عیب واقعی، 16mm به سمت پایین است).



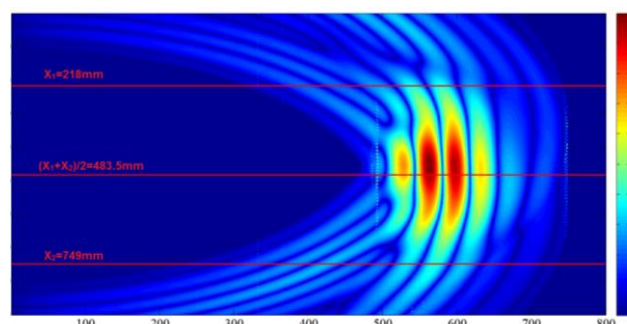
شکل ۴: نمای سه بعدی شبیه سازی



شکل ۵-الف- تصویر حالت سالم



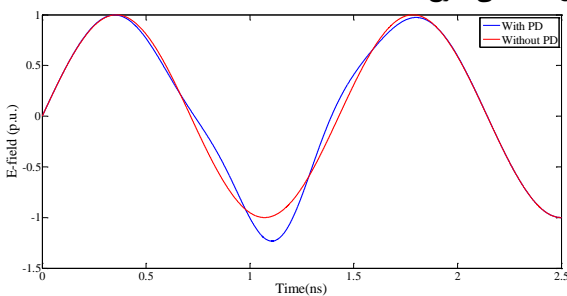
شکل ۵-ب- تصویر حالت معیوب



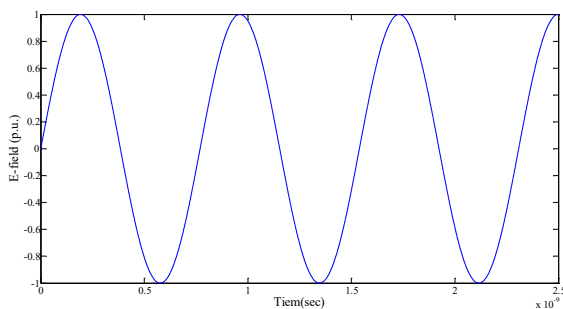
شکل ۶: تاثیر تخلیه جزئی در تصویربرداری راداری

محیط ترانسفورماتور نیز با توجه به آزمایش عملی صورت گرفته بر روی یک ترانسفورماتور ۲۰۰ کیلوولت واقعی در [۱۱]، بر روی عملکرد الکترومغناطیسی سیستم تشخیص تاثیر قابل ملاحظه ای ندارد.

بمنظور شبیه سازی روش ارایه شده در این مقاله، از مدل ذکر شده در بخش دوم استفاده شده است. بجای استفاده از سیگنال گوسی، در ۲۹۹۰ فرکانس بمنظور شبیه سازی در بازه ۳۰۰MHz تا ۳GHz بررسی شد. بمنظور تشخیص عیب محوری سیم پیچ، در ۳۰ گام با فواصل ۱۰ میلیمتری از هم، ۲۹۹۰ سیگنال سینوسی در ۲۹۹۰ فرکانس مختلف در بازه فرکانسی ۳۰۰MHz تا ۳GHz برای ارسال و دریافت هر گام بررسی می شود. در هر سیگنال سینوسی، سیگنال دریافتی باید نسبت به سیگنال ارسالی فقط در دامنه و فاز متفاوت باشد. بمنظور بررسی تاثیر عیب تخلیه جزئی در حین تشخیص عیب محوری، در گام ۹ در حین ارسال و دریافت، فرض کردیم که عیب تخلیه رخ دهد و سیگنال ناشی از تخلیه جزئی با سیگنال تشخیص عیب محوری ترکیب شود. در بخش ۴ نشان دادیم که در صورت تفکیک نشدن این سیگنالها، جواب نهایی برای عیب محوری قابل اعتماد نخواهد بود. سیگنال ترکیب شده در شکل ۷ برای یک نمونه، نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود در این فرکانس، سیگنال دریافتی توسط آنتن بصورت سینوسی خالص نبوده و باید آزمایش در این فرکانس به منظور تشخیص درست عیب محوری دوباره تکرار شود. تکرار آزمایش تا زمان دست یافتن به یک سیگنال سینوسی خالص ادامه خواهد یافت که امکان پذیری دست یابی به همچنین سیگنالی شرح داده شد.



شکل ۷: تاثیر تخلیه جزئی در سیگنال دریافتی برای یک فرکانس

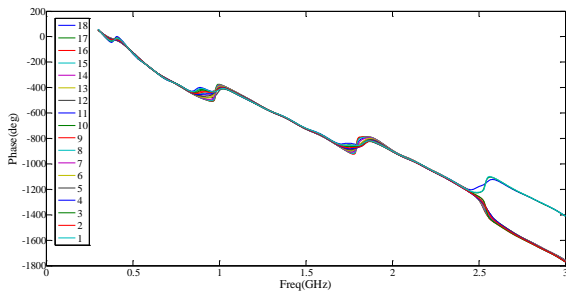


شکل ۸-الف): سیگنال ارسال شده

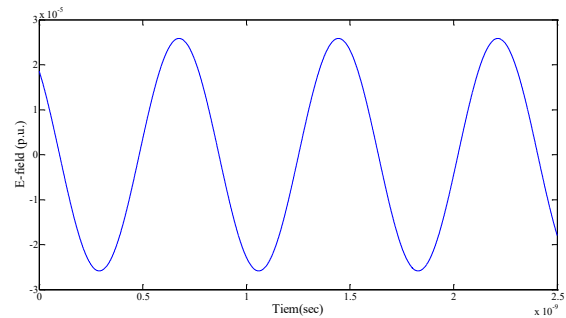
منتشر می کند و فقط در یک فرکانس خاص در فضا سیگنال منتشر نمی کند، اگر عیب تخلیه جزئی در حین ارسال و دریافت یکی از موجهای سینوسی رخ بدهد، سیگنال دریافت شده در آنتن دریافت کننده، سینوسی با یک فرکانس خالص نیست. در نتیجه در حین ارسال و دریافت این آزمایش یک تخلیه جزئی رخ داده است و ارسال و دریافت سیگنال سینوسی برای این فرکانس باید تکرار شود. این تکرار تا زمانی ادامه می یابد تا یک سیگنال سینوسی ارسال شود و سیگنال دریافتی هم سینوسی با همان فرکانس باشد. بعبارت دیگر تا زمانی که تشخیص داده شود سیگنال دریافتی بدون حضور تخلیه جزئی است، این تکرار ادامه می یابد.

یکی از ابهامات مهم که در این روش می ماند این است که آیا اصلا امکان دسترسی به سیگنالی که تداخل با سیگنال تخلیه جزئی نداشته باشد امکان پذیر است یا خیر. این سوال وقتی مهمتر خواهد شد که می دانیم عیب تخلیه جزئی در طول یک پریود فرکانس ۵۰ هرتز ممکن است بارها اتفاق بیفتد. بعبارت دیگر با توجه به تکرار داشتن عیب تخلیه جزئی و سیگنال آن در محیط، آیا امکان دارد که سیگنال سینوسی ای ارسال شود و سیگنال دریافتی نیز سینوسی با یک فرکانس خالص باشد تا تداخل سیگنال عیب تخلیه جزئی وجود نداشته باشد یا خیر. در جواب، لازم است زمان رفت و برگشت سیگنال برای تشخیص عیب محوری، و همچنین تعداد تکرار عیب تخلیه جزئی در یک پریود ۵۰ هرتز بررسی شود. اگر زمان بین دو تخلیه جزئی صورت گرفته به قدری زیاد باشد که سیگنال سینوسی ارسالی از آنتن برای تشخیص عیب محوری، در بین دو رخداد متوالی تخلیه جزئی، بتواند ارسال و دریافت شود مشکلی نخواهیم داشت. در تشخیص عیب محوری سیگنال فاصله بین آنتن فرستنده تا ترانسفورماتور و پس از برخورد از سطح ترانسفورماتور تا آنتن دریافت کننده را با سرعت نور طی می کند. در نتیجه زمان رفت و برگشت سیگنال در حدود چند نانوثانیه (کمتر از ۱۰ نانوثانیه) خواهد بود. از طرف دیگر، همانطور که در [۱۲] بیان شده است، در هر سیکل از فرکانس ۵۰ هرتز شبکه، ممکن است در حدود ۵۰ بار تخلیه جزئی بوقوع پیوندد. بعبارت دیگر بین دو تخلیه جزئی متوالی در حدود یک میلی ثانیه فاصله خواهد بود. با مقایسه این دو زمان می توان نتیجه گرفت که اگر در فاصله یک میلی ثانیه، بتوان لاقل ۱۰ بار (مجموعاً در حدود ۰٫۱ میکروثانیه که بسیار کمتر از 1ms است) سیگنال سینوسی را ارسال و دریافت کرد، می توان به گرفتن سیگنالی بدون تداخل با تخلیه جزئی اطمینان حاصل نمود. بطوریکه اگر سیگنال دریافتی بصورت سیگنال سینوسی خالص نبود طبق توضیحات بالا باید فرآیند ارسال و دریافت برای آن فرکانس دوباره تکرار شود.

یکی از مزایای این روش، تاثیر نداشتن نویز بر این سیستم است. همانطور که در مطالعات قبلی نشان داده شده است [۱۱،۶]، داخل ترانسفورماتور نسبت به محیط اطراف خود کاملاً شیلد می باشد. در نتیجه نویز محیطی تاثیری بر عملکرد سیستم ندارد. نویزهای داخل



شکل ۹- (ب): تغییرات فاز در گامها و فرکانسهای مختلف



شکل ۸- (ب): سیگنال دریافت شده

## منابع

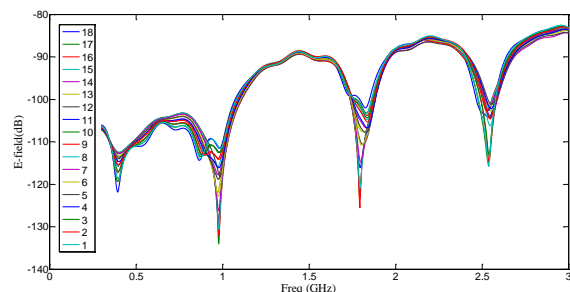
- [1] M.A. Hejazi, J. Ebrahimi, G.B. Gharehpetian, M. Mohammadi, R. Faraji Dana, G. Moradi, "Application of Ultra-Wideband Sensors for On-line Monitoring of Transformer Winding Radial Deformations—A Feasibility Study", IEEE Sensors, Vol. 12, No. 6, pp. 1649-1659, June 2012.
- [2] G. Mokhtari, G. B. Gharehpetian, R. Faraji-dana, M. A. Hejazi, "On-line Monitoring of Transformer Winding Axial Displacement Using UWB Sensors and Neural Network", International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 5, No. 5, October 2010.
- [۳] حسین کرمی، گنورک قره‌پتیان، یاسر نوروزی، مریم السادات اخوان حجازی، "امکان-سنجی تشخیص تغییر شکل شعاعی و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی در سیم پیچ ترانسفورماتور بصورت برخط و همزمان با استفاده از امواج الکترومغناطیسی" دومین کنفرانس بین‌المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۴ - تهران، ایران.
- [4] H. Karami, M.S.A. Hejazi, M.S. Naderi, G.B. Gharehpetian, S. Mortazavian, "Three-dimensional Simulation of PD Source Allocation Through TDOA Method", 4th Conference on Thermal Power Plants (Gas, Combined Cycle, and Steam), Dec. 18-19, 2012.
- [5] Lopez-Roldan, J., Tang, T., Gaskin, M., "Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method", Dielec. & Elec. Insul., IEEE Trans. on, Vol. 15, Issue 6, 2008.
- [6] S. Tenbohlen, D. Denisov and S. M. Hoek, "Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range", Dielec. and Elec. Insul., IEEE Trans. on, Vol. 15, Issue: 6, pp. 1544-1552, 2008.
- [7] Convery, A.R. and Judd, M.D. (2003) Measurement of propagation characteristics for UHF signals in transformer insulation materials. In: 2003 13th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 2003-08-25 - 2003-08-29, Delft.
- [8] H. H. Sinaga, B. T. Phung and T. R. Blackburn, "Partial Discharge Localization in Transformers Using UHF Detection Method", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 6; December 2012.
- [9] M. S. Golsorkhi, G. B. Gharepetian, M. Dehmollaian, M. A. Hejazi, "A Feasibility Study on Application of Radar Imaging for Detection of Transformer Winding Radial Deformation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, Oct. 2012, pp. 2113-2121.
- [۱۰] مریم السادات اخوان حجازی، مریم صباغ پور آرانی، قاسم مختاری، گنورک قره‌پتیان، "اندازه‌گیری اثر تانک در روش تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور توسط امواج الکترومغناطیسی" بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۳ - تهران، ایران.
- [11] M. Akhavan Hejazi, G.B. Gharehpetian, and A. Mohammadi, "Effect of Oil on Transformer Monitoring Using Electromagnetic Waves", 21-th International Power System Conference, Nov. 13-15, 2006, Tehran, Iran (in Persian).
- [12] Wenzhi, C., Zhiguo, T., Chengrong, L., Hao, W., Yuan, Y., & Yimin, J., "A novel sensor for UWB RF PD location and experimental investigation on a 220kV transformer" Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Conference on, pp. 413-416, 2009.

شکل ۸ تغییرات فاز و دامنه را برای فرکانس ۱,۳ GHz در گام ۹ نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است نه تنها دامنه بر اثر تلفات محیط کاهش داشته است بلکه فاز آن نیز تغییر یافته است. همچنین شکل ۹ تغییرات دامنه و فاز سیگنال‌های سینوسی دریافت شده در همه گام‌ها را نسبت به سیگنال ارسالی (پارامتر  $S_{21}$ )، بعد از تفکیک سیگنال‌ها از سیگنال تخلیه جزئی، در فرکانسهای مختلف، نشان داده است.

با اعمال روش ذکر شده برای همه گام‌ها و همه فرکانسهای ارسالی و دریافتی، تصاویر بدست آمده پس از تفکیک سیگنال‌ها همانند تصاویر بدست آمده در بخش سوم خواهد بود که می‌توان بدین صورت عیب محوری را با وجود عیب تخلیه جزئی تشخیص داد.

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی دو روش مکان‌یابی تخلیه جزئی و تشخیص عیب محوری سیم‌پیچ ترانسفورماتور با کمک امواج الکترومغناطیسی، امکان سنجی استفاده همزمان سیستم نصب شده بر روی بدنه تانک بمنظور تشخیص همزمان این دو عیب با استفاده از این سیستم مطالعه شد. نتایج نشان داد که تغییر الگوی ارسال و دریافت سیگنال در روش تشخیص عیب محوری به کمک تصویربرداری راداری، می‌توان این عیب را در زمانی که تخلیه جزئی نیز صورت بگیرد تشخیص داد.



شکل ۹- (الف): تغییرات دامنه در گامها و فرکانسهای مختلف

- [13] J. Li, W. Si, X. Yao, Y. Li, "Partial Discharge Characteristics over Differently Aged Oil/pressboard Interfaces", IEEE Trans. on Dielec. & Elec. Insul., Vol. 16, No. 6, pp. 1640-1647, 2009.