

# امکان‌سنجی تشخیص تغییر شکل شعاعی و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور بصورت برخط و همزمان 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>  
<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی امیرکبیر، <sup>۲</sup>دانشگاه کاشان

واژه‌های کلیدی — تشخیص همزمان عیوب؛ تصویربرداری راداری؛ عیب تغییر شکل شعاعی؛ عیب تخلیه جزئی؛ امواج الکترومغناطیسی

## ۱. مقدمه

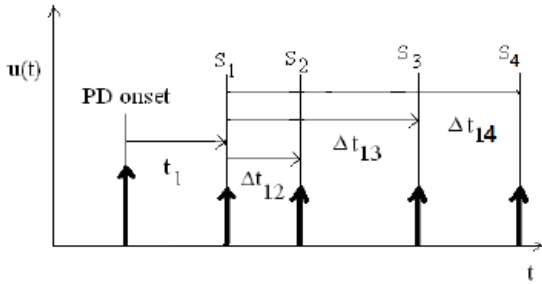
امروزه همه کشورهای صنعتی، به کارکرد و تولید بی‌نقص و انتقال و توزیع پیوسته قدرت الکتریکی وابسته‌اند. ترانسفورماتورها برای ارتباط و اتصال سیستم‌های انرژی با سطوح ولتاژ متفاوت بعنوان مهمترین دستگاه بخش انتقال و توزیع مطرح هستند. در نتیجه خرابی آنها می‌تواند باعث بروز وقفه در تغذیه شبکه و در نتیجه پیامدهای مخرب آن گردد. بسیاری از بهره‌برداران علاقمند هستند که از وضعیت داخل ترانسفورماتورهای قدرت باخبر شوند. به این ترتیب با استفاده از روش‌های برخط مونتورینگ، 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 تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ و تخلیه جزئی هستند. روش‌های پایش برخط موجود برای تشخیص عیوب مکانیکی و تخلیه جزئی، هیچ کدام بمنظور تشخیص همزمان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. همچنین تاثیر تخلیه جزئی در زمان انجام آزمایش تشخیص عیب شعاعی 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 این مقاله با مروری کوتاه در هر یک از این دو روش، امکان

چکیده — پایش برخط ترانسفورماتور یکی از مهمترین مباحث روز دنیا به منظور اطلاع از وضعیت داخل ترانسفورماتور است. با داشتن اطلاعات کامل تر از وضعیت ترانسفورماتور، می‌توان تصمیم مطمئن‌تری برای زمان تعمیرات دوره‌ای، اتخاذ کرد. عیب تخلیه‌جزئی و عیب تغییر شکل شعاعی 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 تغییر شعاعی، 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 شعاعی را با وجود عیب تخلیه جزئی تشخیص داد یا خیر. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تشخیص هر دو عیب با یک مجموعه آنتن نصب شده در بدنه ترانسفورماتور و تفکیک سیگنال‌های تصویربرداری راداری از تخلیه‌جزئی امکان‌پذیر است.

تقاطع دارند. این تفاوت زمان‌ها برای یک سیگنال، در شکل 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

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

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

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

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

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 S1، S2، S3 و S4 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 t1 که نامشخص است به اولین آنتن می‌رسد.

## ۲.۲. شبیه‌سازی روش

به منظور شبیه‌سازی، 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 شبیه‌سازی با نرم افزار، یک مدل آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی این نوع مطالعات استفاده می‌شود که در [۱] بصورت عملی آزمایش گرفته شده و به عنوان مدل جایگزین، استفاده شده است. ابعاد شبیه‌سازی شده در جدول ۱ آورده

سنجی تشخیص همزمان این عیوب و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی 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 می‌نمایم. در بخش چهارم، تأثیر وجود تخلیه جزئی در حین تشخیص عیب شعاعی نشان داده خواهد شد. در بخش پنجم روشی بمنظور تفکیک سیگنال‌ها ارائه شده و نتیجه گیری در بخش ششم ارائه می‌شود.

## ۲. تشخیص تخلیه جزئی با روش الکترومغناطیسی

### ۲.۱. توضیح روش

تشخیص تخلیه جزئی با 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 [۶]، اظهار داشته که بدلیل ایزوله بودن مخزن ترانسفورماتور از PD های اتفاق افتاده در خارج از تانک از لحاظ الکترومغناطیسی، سیگنال به نوبت خوبی داریم. در [۷] 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 مکان‌یابی PD با استفاده از امواج الکترومغناطیسی، روش TDOA<sup>۳</sup> می‌باشد [۴]. در این روش، زمان انتشار سیگنال از منبع تخلیه جزئی به آنتن‌ها را نمی‌توان تشخیص داد اما اختلاف زمانی سیگنال رسیده به یک جفت آنتن کمک می‌کند تا با یک معادله هایپربولیکی بتوان محل عیب را بر پایه روش TDOA تشخیص داد. با وجود چهار آنتن، سه معادله هایپربولیکی تشکیل می‌شود که در یک نقطه

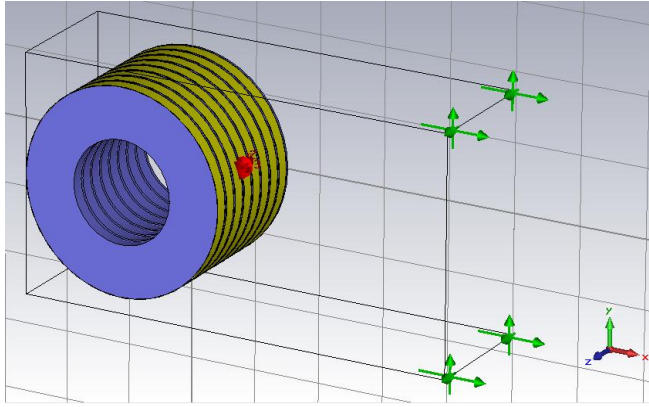
<sup>1</sup> Partial Discharge

<sup>2</sup> Ultra High Frequency

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

امکان‌سنجی تشخیص تغییر شکل شعاعی و مکان‌یابی تخلیه جزئی ترانسفورماتور بصورت برخط و همزمان با استفاده از امواج الکترومغناطیسی

دومین کنفرانس بین‌المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۴ - تهران، ایران



شکل ۳: شبیه‌سازی انجام شده در CST

شده است. لازم بذکر است این شبیه‌سازی‌ها نیز با استفاده از کامپیوتری با Core i7 CPU و 18G RAM انجام شده است.

جدول ۱: پارامترهای مدل شبیه‌سازی شده

مقدار	پارامتر
300mm	قطر دیسک
8	تعداد دیسک‌ها
20mm	ارتفاع هر دیسک
5mm	ارتفاع spacer از جنس pressboard
350mm	فاصله آنتن‌ها از دیسک‌ها

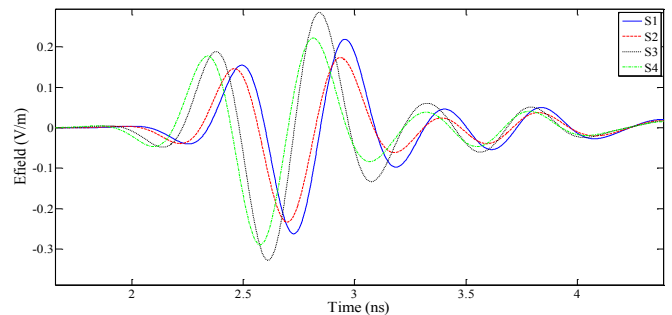
### ۳. تشخیص تغییر شکل شعاعی با استفاده از روش

#### تصویربرداری راداری

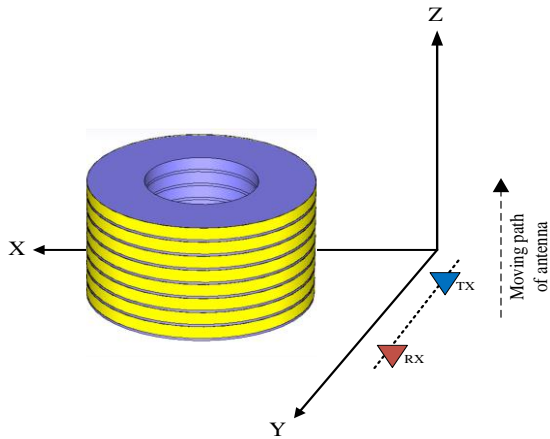
##### ۳.۱. توضیح روش

یکی از بروزترین روش‌های تشخیص عیب شعاعی سیم‌پیچ 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 [۲]. 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 اسکن-گیری 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 [۳] به تفصیل شرح داده شده است. در این مقاله به منظور تبدیل سیگنال‌ها به یک تصویر دو بعدی، از الگوریتم مهاجرت کیرشلف استفاده شده است. طریقه بدست آوردن معادلات مربوطه در [۳] توضیح داده شده است که بدلیل محدودیت تعداد صفحات در اینجا ذکر نشده است.

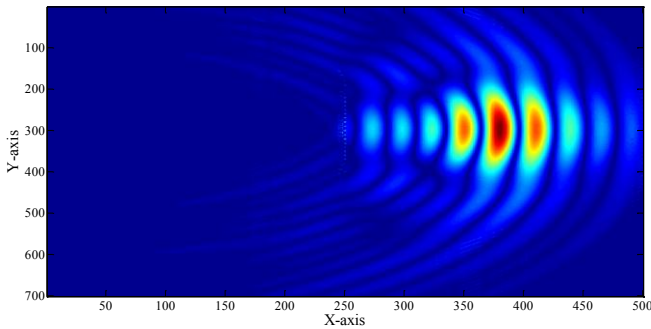
مکان آنتن‌ها در مختصات  $S1(500,-173,10)$ ،  $S2(500,-173,180)$ ،  $S3(500,173,10)$ ،  $S4(500,173,180)$  هستند. سیگنال‌های دریافت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. محیط شبیه‌سازی شده به همراه محل آنتن‌ها (با رنگ سبز) و محل عیب تخلیه جزئی (با رنگ قرمز)، در شکل ۳ نمایش داده شده است. محل عیب تخلیه جزئی در مختصات  $P(146,39,124.5)$  واقع شده است. با توجه به معادلات (۱) تا (۴)، محل تخلیه جزئی در مختصات  $(181.5,38,119)$  تخمین زده شد که با محل عیب واقعی حدود 35mm فاصله دارد. این دقت با توجه به ابعاد شبیه‌سازی شده (در حدود  $650*350*200\text{mm}^3$ ) و با توجه به نمونه عملی انجام شده در [۸] که با خطای 20cm تخمین زده شده است، دقت قابل قبولی می‌باشد.



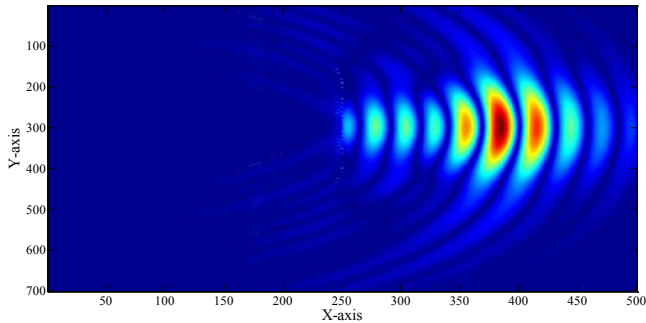
شکل ۲: سیگنال‌های دریافت شده از تخلیه جزئی توسط آنتن‌ها



شکل ۴- (ب): نمای سه بعدی شبیه‌سازی



شکل ۵- (الف) - تصویر حالت سالم



شکل ۵- (ب) - تصویر حالت معیوب

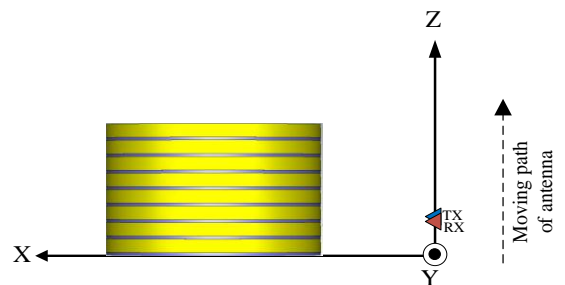
#### ۴. تاثیر تخلیه‌جزیی در تشخیص عیب شعاعی

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد میزان و تعداد نقاط گرم، تعیین‌کننده عیب شعاعی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. اما اگر در حین ارسال و دریافت سیگنال‌ها عیب تخلیه‌جزیی رخ دهد، ترکیب سیگنال ساطع شده از تخلیه‌جزیی و سیگنال مربوط به تشخیص عیب شعاعی موجب تشخیص اشتباه در عیب شعاعی می‌شود. به عنوان نمونه اگر در گام نهم و در حین ارسال و دریافت سیگنال، یک عیب تخلیه‌جزیی رخ دهد، همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، یا تصویر حاصله، عیب را

همچنین تاثیر عواملی همچون تانک ترانسفورماتور و یا روغن ترانسفورماتور در مقالات قبلی بررسی شده است [9-10]. شایان ذکر است که روش ارایه شده در [۳] از باند فرکانسی فرایهن باند شامل حدود فرکانس 3GHz تا 6GHz استفاده شده است. اما همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، بازه فرکانسی در عیب‌های تخلیه‌جزیی ایجاد شده بین 300MHz تا 3GHz 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 شعاعی در بازه فرکانسی 300MHz تا 3GHz انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در این بازه فرکانسی نیز نتایج، مشابه با روش فرایهن باند ارایه شده در [۳] 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 تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ، عیب شعاعی بصورت بیرون‌زدگی در محل (150,0,96.5) با ابعاد 60\*40\*25 ایجاد شد و طبق توضیحات داده شده، آنتن‌ها در ۱۸ گام، از ارتفاع ۱۰ تا ارتفاع ۱۸۰ میلیمتری، فرآیند ارسال و دریافت را انجام می‌دهند. تصویر ایجاد شده برای حالت سالم و معیوب در شکل ۵ نشان داده شده است و بطور بصری می‌توان تخمین زد که میزان نقاط قرمز رنگ (نقاط گرم) در حالت معیوب بیش از حالت سالم است. اگر عدد ۰.۴ به عنوان میزان سنسجش برای مقایسه نقاط گرم باشد، تعداد نقاط در حالت سالم برابر با ۹۵۵۴ و در حالت معیوب برابر ۱۱۶۷۷ می‌باشد که بیانگر وجود عیب شعاعی و قابلیت تشخیص آن از تصاویر است.



شکل ۴- (الف): نمای X-Z از شبیه‌سازی

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 [۳] پیشنهاد شده است، از مجموع چند سیگنال سینوسی برای هر گام از آزمایش تشخیص عیب شعاعی استفاده شود. به این روش به اصطلاح step 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 محدوده ای از فرکانسهای UHF را در محیط منتشر می‌کند و فقط در یک فرکانس خاص در فضا سیگنال منتشر نمی‌کند، 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 می‌یابد 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 می‌یابد.

یک ابهام مهم که در این روش می‌ماند این است که آیا اصلاً امکان دسترسی به سیگنالی که تداخل با سیگنال تخلیه جزئی نداشته باشد امکان پذیر است یا خیر. این سوال وقتی مهمتر خواهد شد که می‌دانیم عیب تخلیه جزئی در طول یک پریود فرکانس 50Hz ممکن است بارها اتفاق بیفتند. 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 شعاعی، و همچنین تعداد تکرار عیب تخلیه جزئی در یک پریود 50Hz بررسی شود. اگر زمان بین دو تخلیه جزئی صورت گرفته به قدری زیاد باشد که سیگنال سینوسی ارسالی از آنتن برای تشخیص عیب شعاعی، در بین دو رخداد متوالی تخلیه جزئی، بتواند ارسال و دریافت شود مشکلی نخواهیم داشت. در تشخیص عیب شعاعی سیگنال فاصله بین آنتن فرستنده تا ترانسفورماتور و پس از برخورد از سطح ترانسفورماتور تا آنتن دریافت کننده را با سرعت نور طی می‌کند. در نتیجه زمان رفت و برگشت سیگنال در حدود چند نانوثانیه (کمتر از 10ns) خواهد بود. از طرف دیگر،

بصورت اشتباه نشان می‌دهد (بطور مثال در این شکل عیب فرورفتگی نشان داده است چون طبق [۳] تعداد نقاط قرمز رنگ کمتر شده است) و یا دیگر تصویری از سیم‌پیچ تشکیل نخواهد داد.

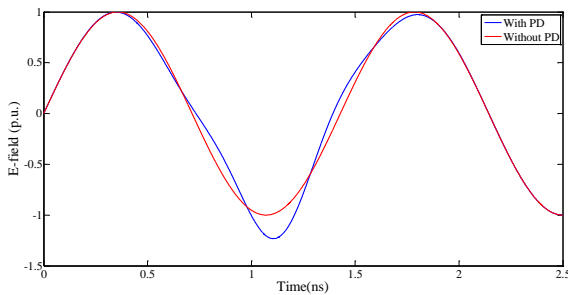
## ۵. تفکیک داده‌های مربوط به عیب تخلیه جزئی و

### تغییر شکل شعاعی

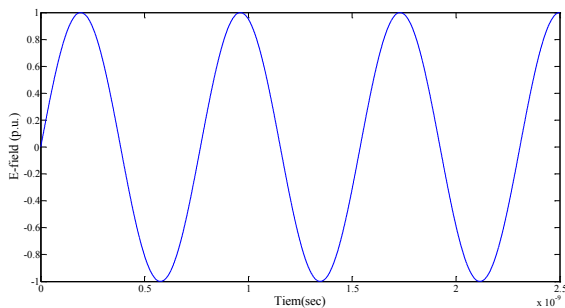
یکی از اقداماتی که در پایش وضعیت ترانسفورماتورها نیاز است انجام گیرد، ترکیب روشهای پیشین و حرکت به سمت پایش کامل ترانسفورماتور می‌باشد. در این مقاله دو روش تشخیص عیب شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور و تخلیه جزئی که هر دو بر پایه روش الکترومغناطیسی می‌باشند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در بخش قبل نشان داده شد که تداخل عیب تخلیه جزئی در هنگام تشخیص عیب مکانیکی موجب تخریب شکل حاصله و تشخیص اشتباه خواهد شد. در نتیجه لازم است تا اطلاعات مربوط به تخلیه جزئی از داده های مورد نیاز برای تشخیص عیب شعاعی تفکیک شوند. بدین منظور، در این مقاله پیشنهاد شده است که در روش تشخیص عیب شعاعی اصلاحی صورت گیرد تا بتوان از تداخل داده‌ها جلوگیری نمود. شایان ذکر است که مشکل ایجاد شده فقط در تشخیص عیب شعاعی است و در تشخیص و مکان‌یابی عیب تخلیه جزئی مشکلی نداریم. زیرا در زمانی که فرستنده و گیرنده مربوط به تشخیص عیب شعاعی 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 شعاعی را تشخیص دهیم به مشکلات ذکر شده در بخش ۴ برخورد می‌کنیم. همانطور در بخش سوم نیز اشاره شد، روش ارایه شده در [۳]، 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 نیز 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 مسیر متفاوت گشته است. در نتیجه اگر سیگنال گوسی بصورت چند سینوسی جداگانه ارسال و دریافت

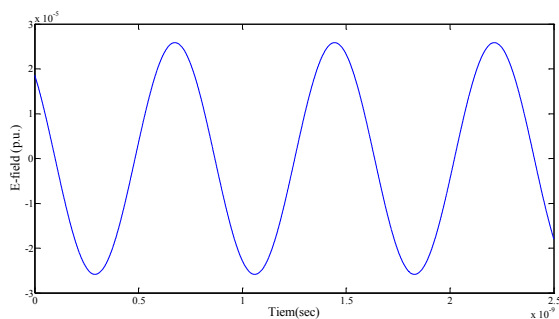
عیب شعاعی ترکیب شود. در بخش ۴ نشان دادیم که در صورت تفکیک نشدن این سیگنالها، جواب نهایی برای عیب شعاعی قابل اعتماد نخواهد بود. سیگنال ترکیب شده در شکل ۷ برای یک نمونه، نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در این فرکانس، سیگنال دریافتی توسط آنتن بصورت سینوسی خالص نبوده و باید آزمایش در این فرکانس به منظور تشخیص درست عیب شعاعی دوباره تکرار شود. تکرار آزمایش تا زمان دست یافتن به یک سیگنال سینوسی خالص ادامه خواهد یافت که امکان پذیری دست‌یابی به همچنین سیگنالی شرح داده شد.



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



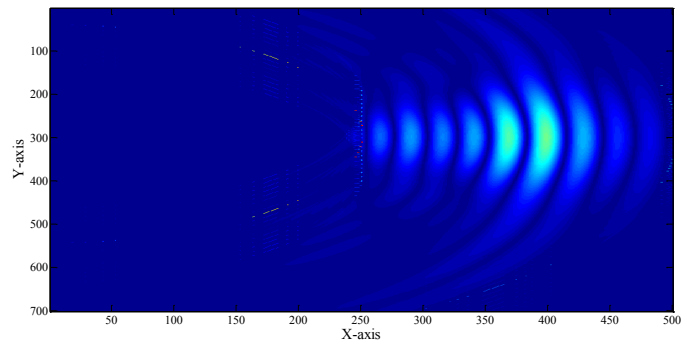
شکل ۸-الف): سیگنال ارسال شده



شکل ۸-ب): سیگنال دریافت شده

شکل ۸ تغییرات فاز و دامنه را برای فرکانس 1.3GHz 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

همانطور که در [۱۲] بیان شده است، در هر سیکل از فرکانس 50Hz شبکه، ممکن است در حدود ۵۰ بار تخلیه جزئی بوقوع پیوندد. بعبارت دیگر بین دو تخلیه جزئی متوالی در حدود 1ms فاصله خواهد بود. با مقایسه این دو زمان می‌توان نتیجه گرفت که اگر در فاصله 1ms، بتوان لاقط ۱۰ بار (مجموعاً در حدود ۰.۱ میکروثانیه که بسیار کمتر از 1ms است) سیگنال سینوسی را ارسال و دریافت کرد، می‌توان 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.



شکل ۹: تاثیر تخلیه جزئی در تصویربرداری راداری

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 می‌باشد. در نتیجه نویز محیطی تاثیری بر عملکرد سیستم ندارد. نویزهای داخل محیط ترانسفورماتور نیز با توجه به آزمایش عملی صورت گرفته بر روی یک ترانسفورماتور 200kV 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 2990 فرکانس بمنظور شبیه سازی در بازه ۳۰۰MHz تا ۳GHz بررسی شد. بمنظور تشخیص عیب شعاعی سیم‌پیچ، در ۱۸ 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 می‌شود. 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 شعاعی، در گام ۹ در حین ارسال و دریافت، فرض کردیم که عیب تخلیه رخ دهد و سیگنال ناشی از تخلیه جزئی با سیگنال تشخیص

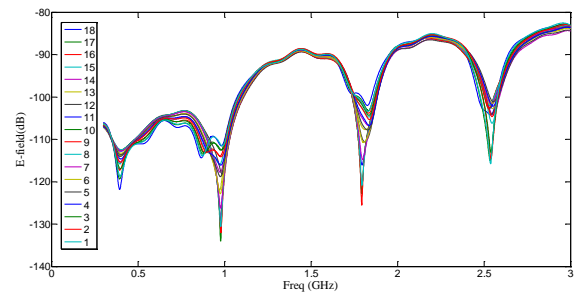
- [1] M.A. Hejazi, J. Ebrahimi, G.B. Gharehpetian, M. Mohammadi, R. Faraji Dana, G. Moradi, "Application of Ultra-Wideband Sensors for On-line Monitoring of Transformer Winding Radial Deformations-A Feasibility Study", IEEE Sensors, Vol. 12, No. 6, pp. 1649-1659, June 2012.
- [2] Raziye Mosayebi, H. Sheikhzadeh, M. S. Golsorkhi, M. A. Hejazi, G. B. Gharehpetian, "Detection of Winding Radial Deformation in Power Transformers by Confocal Microwave Imaging", Electric Power Components and Systems, Vol. 42, Issue 6, April 2014, pp. 605-611.
- [3] M. S. Golsorkhi, G. B. Gharehpetian, 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.
- [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] مریم السادات اخوان حجازی، مریم صباغ پور آرانی، قاسم مختاری، گئورگ قره پتیان، "اندازه گیری اثر تانک در روش تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور توسط امواج الکترومغناطیسی" بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۳ تهران، ایران
- [10] 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).
- [11] 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 Phenomenon, IEEE Conference on, pp. 413-416, 2009.
- [12] 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.

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.

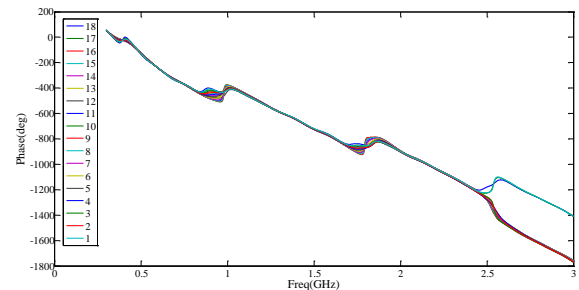
با اعمال روش ذکر شده برای همه گامها و همه فرکانسهای ارسالی و دریافتی، تصاویر بدست آمده پس از تفکیک سیگنالها همانند تصاویر بدست آمده در بخش سوم خواهد بود که می‌توان بدین صورت عیب شعاعی را با وجود عیب تخلیه جزئی تشخیص داد.

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی دو روش مکان‌یابی تخلیه جزئی و تشخیص عیب شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با کمک امواج الکترومغناطیسی، امکان‌سنجی 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 شعاعی 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



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