

تشخیص میزان تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور با استفاده از تصویربرداری راداری

محمد صادق گل‌سرخ‌ی اصفهانی^۱ مریم‌السادات اخوان حجازی^۲ گئورگ قره‌پتیان^۱
^۱ دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
^۲ دانشکده برق، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده

جابجایی مکانیکی سیم‌پیچ ترانس یکی از عوامل اصلی خرابی و از بین رفتن آن می‌باشد. این جابجایی ممکن است در راستای عمودی (جابجایی محوری) و یا در راستای شعاع (تغییر شکل شعاعی) سیم‌پیچ باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ارائه شده است که برخی از آن‌ها نیاز به خارج نمودن ترانس داشته و برخی دیگر در حین عملکرد ترانس و به صورت برخط قابل پیاده‌سازی هستند. هر یک از این روش‌ها قادر به تشخیص وجود یا عدم وجود تغییر شکل شعاعی بوده ولی قابلیت تشخیص میزان عیب را ندارند. در این مقاله روش تصویربرداری راداری برای تشخیص محل تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور ارائه شده است. این روش علاوه بر اینکه به صورت برخط عمل می‌کند، قابلیت تشخیص میزان تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ را نیز دارد. در این روش، با استفاده از یک دستگاه فرستنده و گیرنده امواج UWB، یک پالس UWB به سمت هدف (سیم‌پیچ ترانس) ارسال شده و بازتاب آن اندازه‌گیری می‌گردد. با

جابجایی مکانیکی سیم‌پیچ ترانس یکی از عوامل اصلی خرابی و از بین رفتن آن می‌باشد. این جابجایی ممکن است در راستای عمودی (جابجایی محوری) و یا در راستای شعاع (تغییر شکل شعاعی) سیم‌پیچ باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ارائه شده است که برخی از آن‌ها نیاز به خارج نمودن ترانس داشته و برخی دیگر در حین عملکرد ترانس و به صورت برخط قابل پیاده‌سازی هستند. هر یک از این روش‌ها قادر به تشخیص وجود یا عدم وجود تغییر شکل شعاعی بوده ولی قابلیت تشخیص میزان عیب را ندارند. در این مقاله روش تصویربرداری راداری برای تشخیص محل تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور ارائه شده است. این روش علاوه بر اینکه به صورت برخط عمل می‌کند، قابلیت تشخیص میزان تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ را نیز دارد. در این روش، با استفاده از یک دستگاه فرستنده و گیرنده امواج UWB، یک پالس UWB به سمت هدف (سیم‌پیچ ترانس) ارسال شده و بازتاب آن اندازه‌گیری می‌گردد. با

۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از مهمترین و گرانقیمت‌ترین تجهیزات سیستم‌های قدرت می‌باشند. این تجهیزات ممکن است دچار عیب‌های مختلفی شوند. عیوب مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور شامل تغییر شکل شعاعی و تغییر شکل محوری سیم‌پیچ می‌گردند. تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور در اثر نیروهای مکانیکی شعاعی در لحظه‌ی اتصال کوتاه و یا در هنگام حمل و نقل رخ می‌دهد.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

امواج UWB عمل می‌کنند، با این تفاوت که برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر از سیم‌پیچ ترانس (نوع، محل و میزان عیوب مکانیکی)، آنتن‌های فرستنده و گیرنده جابجا شده و هدف اصطلاحاً از نقاط مختلف دیده می‌شود. به عبارت دیگر بازتاب هدف به پالس ارسالی از نقاط مختلف دریافت و ثبت می‌گردد. به این فرآیند جمع آوری اطلاعات اصطلاحاً تصویر برداری به روش آنتن با دهانه مصنوعی³ (SAR) گفته می‌شود [9]-[11]. با استفاده از سیگنال‌های دریافت شده در این فرآیند و با کمک الگوریتم‌های مهاجرت، می‌توان تصویری از سیم پیچ ترانسفورماتور به دست آورده که با تجزیه و تحلیل آن محل و میزان تغییر شکل شعاعی سیم پیچ مشخص می‌گردد [12].

در بخش دوم این مقاله تصویربرداری به کمک امواج UWB معرفی می‌گردد. در بخش سوم، روش مهاجرت اختلاف فاز برای به دست آوردن تصویر از داده‌های خام، شرح داده می‌شود. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، فرآیند تصویربرداری راداری بر روی یک نمونه آزمایشگاهی از ترانسفورماتور، پیاده‌سازی شده‌است. در بخش چهارم جزئیات این آزمایش به همراه تصاویر به دست آمده از آن آمده‌است.

۲. تصویر برداری با استفاده از امواج

الکترومغناطیسی

الف- معرفی روش

در روش‌های تصویربرداری به کمک امواج الکترومغناطیسی، یک پالس باریک توسط آنتن فرستنده به سمت هدف ارسال شده و امواج بازتاب شده از هدف توسط آنتن گیرنده، دریافت می‌گردد. این روش‌ها بسته به نوع پالس ارسالی

این عیوب به مرور زمان ممکن است باعث تضعیف قدرت عایقی بین سیم پیچ‌ها و ایجاد اتصال کوتاه و خسارت دیدن ترانسفورماتور گردند. تشخیص به موقع این عیوب می‌تواند از وارد آمدن خسارت بیشتر به ترانس جلوگیری کرده و این امکان را ایجاد می‌کند که ترانس طبق برنامه و در زمان مناسب از مدار خارج و تعمیر گردد.

روش‌های مختلفی برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم پیچ ارائه شده‌اند که برخی از آن‌ها نیاز به خارج از مدار کردن ترانس داشته و برخی دیگر به صورت برخط¹ اجرا می‌گردند [1]-[4]. روش استفاده از امواج الکترومغناطیسی، امکان تشخیص عیوب مکانیکی ترانس را به صورت برخط و توسط یک دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فرایهن باند² (UWB) فراهم می‌سازد. در این روش یک پالس UWB به طرف سیم پیچ ترانسفورماتور ارسال شده و بازتاب آن توسط دستگاه گیرنده دریافت، ذخیره و به کامپیوتر ارسال می‌گردد. با تجزیه و تحلیل امواج دریافتی تغییر شکل هندسی سیم پیچ ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود [5]-[8].

مرحله بعد از تشخیص عیب، تعیین نوع، محل و میزان عیوب مکانیکی سیم پیچ می‌باشد. هدف از این مقاله به دست آوردن تصاویری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌باشد که با تجزیه و تحلیل آن‌ها بتوان عیوب مکانیکی سیم‌پیچ را تشخیص داد. این تصاویر به صورت برخط، در حین بهره‌برداری از ترانس و بدون ایجاد اختلال در کار آن تهیه می‌شوند. توجه کنید که تصویربرداری از سیم‌پیچ ترانس که داخل تانک و در میان روغن قرار گرفته، با استفاده از دوربین‌های اپتیک امکان پذیر نیست. بنابراین برای به دست آوردن تصاویر مناسب از سیم‌پیچ از روش‌های تصویربرداری راداری کمک گرفته می‌شود. این روش‌ها همانند روش استفاده از امواج الکترومغناطیسی براساس

¹ online

² Ultra Wide Band

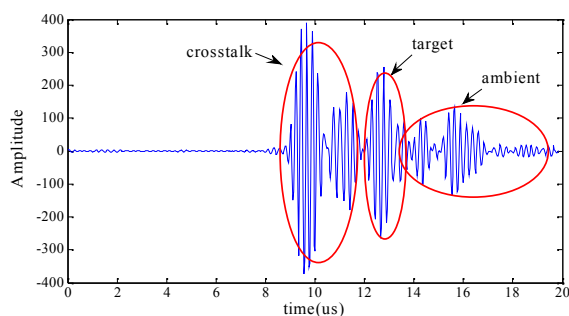
³ Synthetic Aperture Radar (SAR)

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

موقعیت آنتن در طول محور X 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.

ب- کالیبراسیون و پردازش داده‌های خام

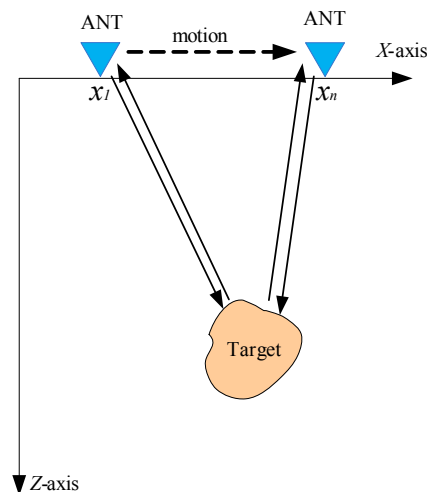
پالس UWB ارسالی توسط فرستنده به اشیای مختلف برخورد کرده و بازتاب آن به گیرنده می‌رسد. بنابراین موج ارسالی چندین مسیر مختلف از فرستنده تا گیرنده را طی می‌نماید. به این فرآیند چند مسیری^۱ گفته می‌شود. شکل ۲ یک نمونه سیگنال دریافتی در گیرنده را نشان می‌دهد. این سیگنال از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول (crosstalk) که کمترین تأخیر را دارد، کوتاهترین مسیر را طی کرده و مستقیماً از فرستنده به گیرنده رسیده است. بخش دوم موج بازتاب شده از هدف می‌باشد که تأخیر آن متناظر با فاصله هدف تا آنتن است. بخش سوم که بیشترین تأخیر را دارد، بازتاب ناشی از برخورد امواج به محیط اطراف (دیوار، میز و ...) می‌باشد. بخش‌های crosstalk و بازتاب محیط مقدار زیادی کلاتر و اعوجاج در تصویر ایجاد نموده و کیفیت آن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.



شکل ۲: یک نمونه از سیگنال دریافتی در گیرنده

و تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به انواع مختلفی دسته بندی می‌گردند. در این مقاله پالس ارسالی از نوع پالس UWB بوده و تنها از یک آنتن فرستنده و یک آنتن گیرنده برای ارسال و دریافت پالس استفاده می‌گردد.

نحوه تصویربرداری به روش SAR در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل به منظور سادگی، تنها یک آنتن نشان داده شده است. هنگامی که پالس UWB توسط آنتن ارسال می‌گردد، امواج ارسالی به هدف برخورد نموده و در تمام جهات به طور یکنواخت منعکس می‌گردد. با توجه به زاویه دید وسیع آنتن، سیگنال منعکس شده از هدف در تمام حالتی که شیء توسط آنتن دیده می‌شود، دریافت می‌گردد. برای به دست آوردن یک تصویر دو بعدی از هدف، موقعیت آنتن بر روی محور X تغییر داده شده و در نقاط مختلف محور X ، فرآیند ارسال پالس و دریافت بازتاب آن تکرار می‌گردد [13].



شکل ۱: تصویربرداری به روش SAR

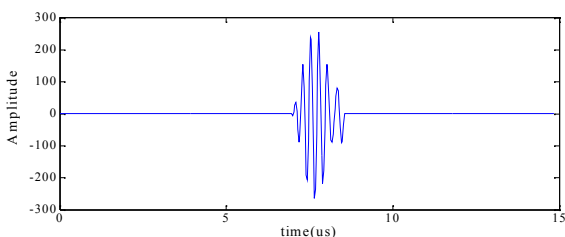
سیگنال دریافتی در هر موقعیت آنتن یک اسکن نامیده می‌شود. هر اسکن یک سیگنال زمانی بوده که با نمونه برداری از امواج دریافتی در یک موقعیت خاص به دست می‌آید. با تغییر

¹ Multipath

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

با توجه به اینکه تغییرات محیط در دو نقطه متوالی کم است، اثر محیط با این کار حذف می‌گردد.

سیگنال به دست آمده پس از این دو مرحله پردازش، در شکل ۳: نشان ۳ نشان داده شده است. این سیگنال در مرحله بعد برای به دست آوردن تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳: سیگنال به دست آمده پس از دو مرحله پردازش

۳. الگوریتم مهاجرت اختلاف فاز

یکی از ساده ترین روش های مهاجرت روش اختلاف فاز^۱ می‌باشد. این روش براساس تأخیر انتشار موج از آنتن فرستنده به هدف و از هدف به آنتن گیرنده بنا شده است. در صورتی که T تأخیر زمانی ارسال موج به سمت هدف و بازگشت آن به گیرنده باشد، $T/2$ زمان لازم برای حرکت موج از فرستنده تا هدف و یا از هدف تا فرستنده خواهد بود. بنابراین در صورتی که یک منبع نقطه ای فرضی در مکان هدف در نظر بگیریم که در لحظه $T/2$ اقدام به ارسال پالس می‌نماید، سیگنال دریافتی در گیرنده معادل سیگنال دریافتی آزمایش SAR خواهد بود. به طور مشابه می‌توان سرعت انتشار موج را نصف فرض نموده و یک منبع نقطه ای در مکان هدف که در زمان $t=0$ پالس ارسال میکند، در نظر گرفت. بنابراین در صورتی که بتوان داده های دریافتی را در حالی که سرعت انتشار موج نصف در نظر گرفته شده، در زمان به عقب برد، می‌توان مکان منبع یا همان هدف نقطه ای را پیدا کرد. به عبارت دیگر با ایجاد شیفت زمانی

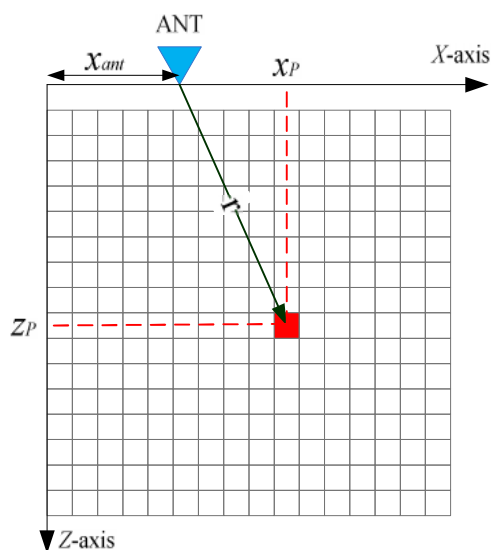
برای به دست آوردن تصویر با کیفیت مطلوب از سیگنال‌های دریافتی، چند مرحله کالیبراسیون و پردازش بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. در مرحله اول، مبدأ زمانی هر یک از سیگنال دریافتی در موقعیت‌های مختلف آنتن تعیین شده و سیگنال‌ها به مبدأ زمانی شیفت داده می‌شوند. به عبارت دیگر همه اسکن‌ها با یکدیگر همزمان می‌گردند. با توجه به اینکه معیار تشخیص تصویر براساس تأخیر زمانی پالس‌های دریافتی می‌باشد، این همزمانی اهمیت زیادی در کیفیت تصویر خواهد داشت. برای تشخیص مبدأ زمان از اولین پیک سیگنال دریافتی کمک گرفته می‌شود. تأخیر اولین پیک سیگنال دریافتی (بخش crosstalk) نسبت به اولین پیک سیگنال ارسالی (مبدأ زمان) برابر فاصله بین دو آنتن تقسیم بر سرعت موج می‌باشد. با دانستن این تأخیر و زمان اولین پیک سیگنال دریافتی، مبدأ زمان محاسبه می‌گردد.

در مرحله دوم بخش‌های ناخواسته سیگنال دریافتی شامل crosstalk و اثر محیط حذف شده و سیگنال بازتاب شده از هدف، جدا می‌گردد. برای این کار، پنجره زمانی مناسب در برگزیده هدف انتخاب شده و تنها بخشی از سیگنال که در این پنجره قرار می‌گیرد، ذخیره شده و بقیه بخش‌ها حذف می‌گردند. با دانستن محدوده‌ای که هدف در آن قرار گرفته، می‌توان حداکثر و حداقل مسیری که سیگنال از آنتن تا هدف طی نموده را تعیین کرده و پنجره زمانی که پالس بازتاب شده از هدف در آن قرار گرفته را تعیین نمود. این عملیات برای هر یک از موقعیت‌های آنتن روی محور X تکرار می‌گردد.

برای حذف اثر محیط همچنین می‌توان پردازش های دیگری را نیز انجام داد. به عنوان مثال می‌توان یکبار بدون حضور هدف از محیط اسکن گرفت و سیگنال‌های دریافتی در حضور هدف را از آن کم نمود. در یک روش دیگر که در مرجع [14] ارائه شده، هر دو اسکن متوالی از یکدیگر کسر می‌گردند.

¹ Phase Difference

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۴: تصویربرداری دوبعدی به روش SAR

شکل ۴ نحوه به‌دست آوردن تصویر با استفاده از امواج UWB را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی اول، آنتن‌های فرستنده و گیرنده به صورت همزمان بر روی محور X جابجا شده و در نقاط مختلف با فاصله منظم از هدف اسکن گرفته می‌شود (تصویربرداری به روش SAR). در صورتی که فاصله بین هر دو نقطه اندازه‌گیری برابر L باشد، طول هر یک از نقاط اندازه‌گیری به صورت زیر خواهد بود:

$$x_k = L \times k \quad (4)$$

اسکن دریافتی در نقطه مشاهده k ام (x_k) را با $b_k(t)$ نشان می‌دهیم.

در مرحله دوم همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، کل محدوده‌ای را که هدف در آن قرار دارد، به تعداد زیادی قسمت مربعی (پیکسل) تقسیم می‌کنیم. هر پیکسل را می‌توان به عنوان یک هدف فرضی در نظر گرفت. پیکسل دلخواه P با مختصات (x_i, y_i) را در نظر بگیرید. فرض کنید هدف در این پیکسل قرار داشته باشد. در این صورت امواج ارسالی توسط آنتن فرستنده به

مناسب در سیگنال دریافتی می‌توان به نقطه ای ارسال موج رسید.

اولین مرحله در تصویربرداری به روش PD، محاسبه تأخیر انتشار موج در محیط است. هنگامی که سرعت موج ثابت باشد، به سادگی با ضرب سرعت موج در زمان، عمق محاسبه می‌گردد. اما در صورتی که سرعت موج در عمق‌های مختلف متغیر باشد، زمان تأخیر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_d = \int_0^z \frac{dz}{V(z)} \quad (1)$$

در صورتی که سرعت انتشار موج نصف فرض گردد $(V=C/2)$ ، تأخیر انتشار موج از فرستنده تا هدف و بازگشت آن به گیرنده را از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

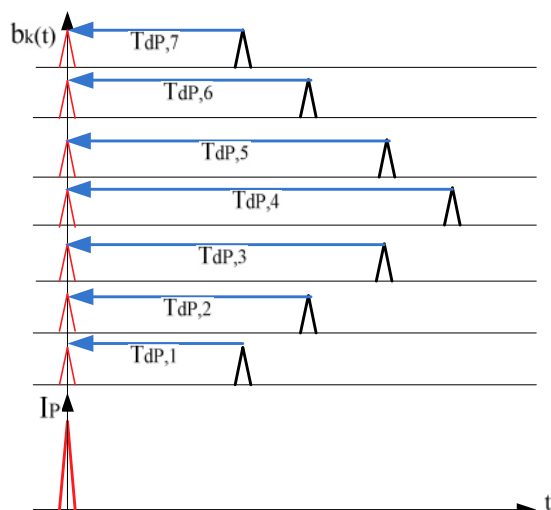
$$T_d = \int_0^R \frac{2dr}{c(r)} \quad (2)$$

و در سرعت ثابت خواهیم داشت:

$$T_d = \frac{2R}{c} \quad (3)$$

که در آن R فاصله هدف از آنتن می‌باشد.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۵: تعیین موج بازتاب شده از هر نقطه، با ایجاد شیفت زمانی مناسب در سیگنال دریافتی

برای به دست آوردن تصویر از هدف، مراحل فوق در مورد تمام پیکسل‌های مورد نظر تکرار می‌گردد. حاصل جمع نشان داده شده در رابطه (۶) یک تابع دو متغیره گسسته $I(x, z)$ می‌باشد که مقدار آن در هر نقطه نماینده شدت بازتاب امواج از آن نقطه می‌باشد. با رسم این تابع، تصویر دوبعدی هدف به دست آید. الگوریتم فوق به روش بازتاب معکوس^۱ معروف است [15].

در صورتی که در الگوریتم بازتاب معکوس، اسکن‌های دریافتی را به کمک تبدیل فوری به حوزه فرکانس منتقل کنیم و شیفت زمانی را با شیفت فاز جایگزین نماییم، الگوریتم اختلاف فاز^۲ (PD) به دست می‌آید [16]. با توجه به اینکه تأخیر زمانی - T_d معادل شیفت فاز $e^{+j\omega T_d}$ می‌باشد، با گرفتن تبدیل فوری زمانی از رابطه (3-4) خواهیم داشت:

$$I_f(x, y) = \sum_{x_k} A_k(f) \cdot \exp(j 2\pi f T_{dp,k}) \quad (7)$$

آن برخورد کرده و بازتاب آن‌ها به آنتن باز می‌گردد. در صورتی که آنتن در نقطه x_k قرار داشته باشد، تأخیر پالس دریافتی اسکن k ام به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$T_{dp,k} = \frac{2R}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{(x_k - x_i)^2 + y_j^2} \quad (5)$$

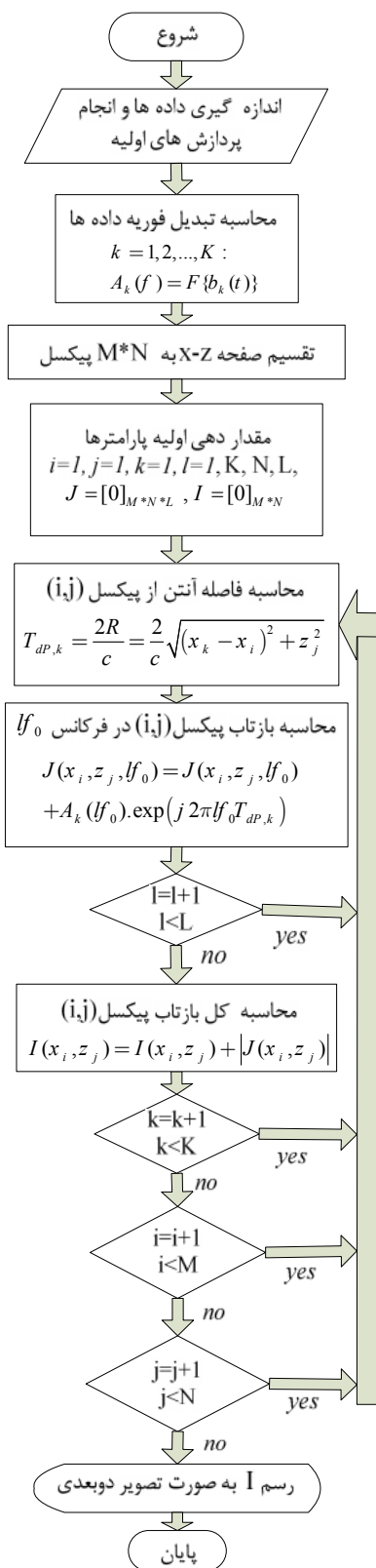
همانطور که در شکل ۵ نشان داده در صورتی که سیگنال دریافتی را به اندازه $-T_{dp,k}$ در زمان شیفت دهیم، مقدار آن در مبدأ زمان برابر پیک پالس دریافتی خواهد بود. عملیات محاسبه تأخیر و ایجاد شیفت زمانی مناسب برای هریک از اسکن‌ها در مورد پیکسل P تکرار می‌گردد. سپس مجموع سیگنال‌های شیفت داده شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$I(x_p, z_p) = \sum_k b_k(t + T_{dp,k}) \Big|_{t=0} \quad (6)$$

در صورتی که هدف واقعاً در نقطه‌ی P قرار داشته باشد، در تمامی اسکن‌ها میزان شیفت زمانی با تأخیر پالس دریافتی مطابقت داشته و اندازه سیگنال مجموع در مبدأ عددی بزرگ خواهد بود. در غیر اینصورت اندازه سیگنال مجموع در مبدأ عددی کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. بنابراین، اندازه سیگنال مجموع در مبدأ نشان دهنده میزان بازتاب امواج از نقطه P می‌باشد.

¹ Back Projection
² Phase Difference

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۶: فلوچارت الگوریتم اختلاف فاز

که $A_k(f)$ تبدیل فوریه گسسته‌ی اسکن b_k می‌باشد. اما $A_k(f)$ پهنای باند بزرگی داشته و تمام مؤلفه های فرکانسی آن باید در تشکیل تصویر سهیم باشند، بنابراین رابطه فوق به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$I(x, z) = \sum_l \sum_{x_k} A_k(f) \cdot \exp(j 2\pi l f_0 T_{dp,k}) \quad (8)$$

که در آن f_0 فرکانس متناظر با زمان نمونه‌برداری سیگنال دریافتی (T_s) بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$f_0 = \frac{1}{T_s} \quad (9)$$

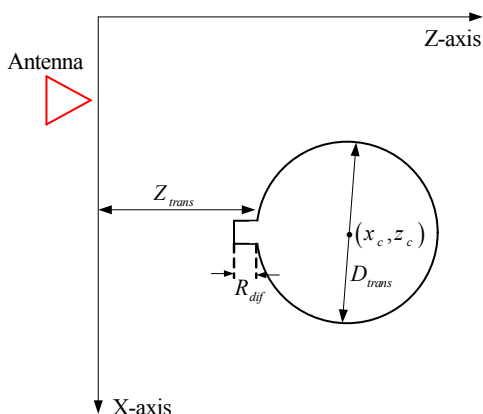
فلوچارت الگوریتم مهاجرت PD در **Error! Reference source not found.** در این فلوچارت شدت بازتاب موج از هر یک از پیکسل‌های تصویر (تابع I) محاسبه شده و در نهایت با رسم تابع I، تصویر دوبعدی هدف به دست می‌آید.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

۴. نتایج آزمایشات عملی

تانک ترانس ایجاد شده که امواج از طریق آن به داخل تانک ارسال می‌گردد. البته امواج در طی مسیر عبور از پنجره عایقی و روغن داخل ترانس تضعیف می‌گردند ولی این تضعیف تغییری در ماهیت تصاویر به دست آمده ایجاد نخواهد کرد. بنابراین روش پیشنهادی در مورد یک ترانسفورماتور واقعی نیز قابل اجرا می‌باشد.

نمای از بالای آزمایش، در شکل ۸ نشان داده شده است. در ادامه خواهیم دید که تصاویر مدل، مشابه آنچه در شکل ۵-۲ نشان داده شده، می‌باشند. در این تصاویر سطح مقطع استوانه مدل به صورت یک دایره در صفحه $X=Z$ قابل مشاهده می‌باشد. زائده مکعب شکل نیز در این تصویر به صورت یک ناهمگنی ظاهر می‌گردد. با توجه به اینکه امواج نمی‌توانند به داخل استوانه که از جنس مس و هادی است، عبور نمایند، تنها نصف استوانه دیده شده که در تصویر به صورت یک نیم دایره ظاهر می‌گردد.



شکل ۸: آزمایش تصویر برداری از مدل سیم پیچ ترانسفورماتور-نمای از بالا

آزمایش تصویر برداری بر روی دو مدل سیم پیچ با قطرهای 30cm و 60cm انجام شده است. در هر یک از آزمایش‌ها یکبار از حالت سالم که همه دیسک‌ها در وضعیت عادی قرار دارند و یکبار هم از حالت معیوب که زائده مکعب شکل از دیسک

مدل ترانسفورماتور با قابلیت ایجاد تغییرات شعاعی و محوری بر روی آن طراحی و ساخته شده است که می‌توان تغییرات شعاعی و محوری را بر روی آن اعمال نمود. قطعاً با توجه به پیچیدگی های مدل ترانسفورماتور و ابعاد آن، شبیه‌ساز طراحی شده بسیار ساده تر، در ابعاد کوچکتر و به صورت تک‌فاز ساخته شده است. شکل ۷ نمای مدل را نشان می‌دهد. مدل با جنس پلکسی گلسی که روی لایه خارجی آن لایه ای از مس کشیده شده در نظر گرفته شده است. مدل ترانسفورماتور به صورت دیسکی ساخته شده است که مابین هر دیسک صفحات فاصله انداز قرار گرفته است. برای انجام تغییرات شعاعی، شیارهایی بر روی دیسک دوم ایجاد شده است که قابلیت حرکت بصورت رفت و برگشتی را داشته‌باشد. با جابجا نمودن زائده‌های تعبیه شده در این شیارها، تغییر شکل شعاعی ترانسفورماتور شبیه‌سازی می‌گردد. مدل ترانسفورماتور در دو سایز مختلف با قطرهای ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر ساخته شده و از آن‌ها برای شبیه سازی تغییر شکل شعاعی سیم پیچ استفاده شده است.



شکل ۷: نمای بیرونی ترانسفورماتور شبیه سازی شده

توجه کنید که برای پیاده‌سازی فرآیند تصویربرداری راداری در مورد یک ترانسفورماتور واقعی، یک پنجره عایقی بر روی

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

معیوب بیرون آورده شده، اسکن گرفته می‌شود. پارامترهای هریک از این آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

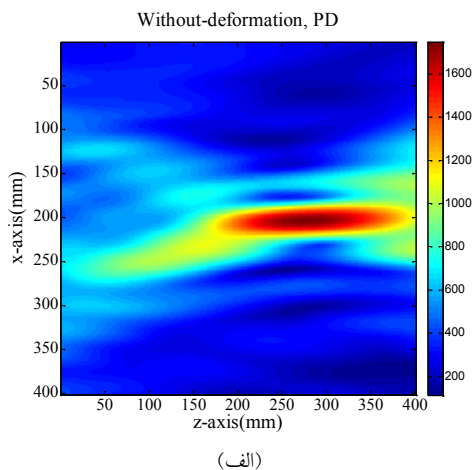
جدول ۱: پارامترهای آزمایش

نام پارامتر	نماد	اندازه در آزمایش اول	اندازه در آزمایش دوم
قطر استوانه مدل ترانس	Dtrans	30cm	60cm
فاصله آنتن‌ها از یکدیگر	Dsep	35cm	35cm
ارتفاع آنتن فرستنده از زمین	Htx	16.5cm	12.5cm
ارتفاع آنتن گیرنده از زمین	Hrx	51.5cm	47.5cm
ارتفاع مدل ترانس از زمین	Htrans	14cm	16cm
فاصله مدل ترانس از محور X	Ztrans	60cm	87cm
فاصله بین هر دو اسکن متوالی روی محور X	Dscan	5cm	5cm
مختصات مرکز مدل ترانس	Xc	75cm	117cm
	Zc	50cm	80cm
میزان تغییر شکل شعاعی	Rdif	3*4cm	3*8cm
شماره دیسک معیوب	Ndif	2	1
فاصله زمانی بین پالس‌های ارسالی	Tpulse	50ms	50ms
نوع آنتن‌ها	Ant_type	vivaldi	vivaldi

آزمایش دوم مشابه آزمایش اول تکرار می‌گردد با این تفاوت که تغییر شکل شعاعی در سمت بالای دیسک ایجاد می‌گردد. شکل ۱۰: تصاویر به دست آمده از آزمایش دوم را با استفاده از الگوریتم P.D را نشان می‌دهد. مدل سیم‌پیچ در حالت سالم در شکل ۱۰-الف به صورت یک بیضی با دو عدد لکه در سمت راست آن دیده می‌شود. شکل ۱۰-ب مدل سیم‌پیچ را در حالت معیوب نشان می‌دهد. در این شکل نیز مانند آزمایش قبل، تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ به صورت یک لکه قهوه‌ای رنگ در سمت چپ سیم پیچ دیده می‌شود. توجه کنید اندازه بزرگتر لکه نمایانگر میزان زیادتر تغییر شکل شعاعی می‌باشد که منطبق با واقعیت است.

بنابراین تصاویر به دست آمده از الگوریتم اختلاف فاز اطلاعات زیر را از مدل سیم پیچ به ما می‌دهند:

۱. سالم بودن یا معیوب بودن سیم‌پیچ
۲. میزان تقریبی تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ



در آزمایش اول شعاع مدل ترانسفورماتور، ۱۵cm می‌باشد. در این آزمایش یکبار از مدل سیم‌پیچ در حالت سالم و بدون تغییر شکل شعاعی تصویربرداری شده است. سپس با جابجا نمودن زائده‌های تعبیه شده در مدل، یک تغییر شکل شعاعی در مرکز دیسک دوم ایجاد شده است. در ۰ تصاویر به دست آمده از مدل، برای دو حالت سالم و معیوب، نشان داده شده‌است. مدل سیم‌پیچ در حالت سالم در شکل ۱۰-الف به صورت یک بیضی با قطر تقریباً ۲۰۰ میلی‌متر دیده می‌شود. با مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۹-ب می‌توان تفاوت تصویر مدل در دو حالت سالم و معیوب را تشخیص داد. در حالت معیوب یک لکه قهوه‌ای رنگ در سمت چپ بیضی دیده می‌شود که نشان دهنده تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانس می‌باشد.

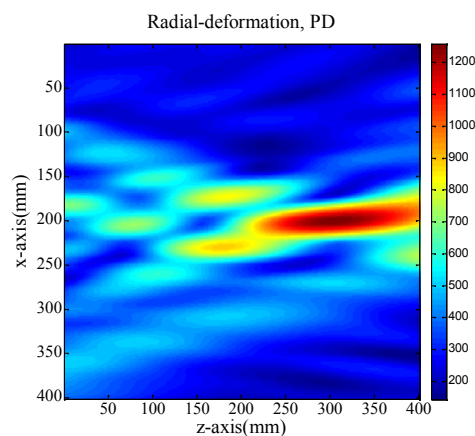
بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شد. در این روش که بر اساس تصویربرداری راداری عمل می‌کند، با به‌دست آوردن تصاویری از سیم‌پیچ ترانسفورماتور، تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی بر روی یک مدل آزمایشگاهی ترانسفورماتور پیاده‌سازی شده‌است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که روش ارائه شده در تشخیص عیب مؤثر بوده و میزان تقریبی عیب را نیز مشخص می‌سازد.

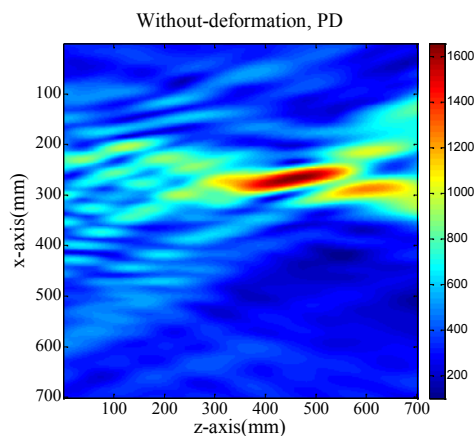
مراجع

- [1] D.K.XU AND Y.M.LI, "A SIMULATING RESEARCH ON MONITORING OF WINDING DEFORMATION OF POWER TRANSFORMER BY ON-LINE MEASUREMENT OF SHORT-CIRCUIT REACTANCE", IEEE 1998, pp.167-171
- [2] J.CHRISTIAN AND K.FESER, "PROCEDURES FOR DETECTING WINDING DISPLACEMENTS IN POWER TRANSFORMERS BY THE TRANSFER FUNCTION METHOD", IEEE TRANSACTION OF POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 1, JAN. 2004, PP.214-220
- [3] M. WANG, A.J.VANDERMAAR, K.D.SRIVASTAVA "CONDITION MONITORING OF TRANSFORMERS IN SERVICE BY THE LOW VOLTAGE IMPULSE TEST METHOD" ELEVENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 1999 (CONF.PUBL.No.467)VOLUME 1, ISSUE , 1999 PAGE(S):45 - 48 VOL.1
- [4] J. CHRISTIAN, K. FESER , U. SUNDERMANN , T. LEIBFRIED "DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS BY USING THE TRANSFER FUNCTION METHOD" HIGH VOLTAGE ENGINEERING SYMPOSIUM, 22-27 AUGUST 1999 CONFERENCE PUBLICATION No. 467, IEE, 1999
- [5] 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 (ISI-RANKED)
- [6] M. A. HEJAZI, J. EBRAHIMI, G. B. GHAREHPETIAN, R. FARAJI-DANA AND M. DABIR, "FEASIBILITY STUDIES ON ON-LINE MONITORING OF TRANSFORMER WINDING MECHANICAL DAMAGE USING UWB SENSORS", XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, ICEM 2010, SEPTEMBER 6-8, 2010, ROME, ITALY

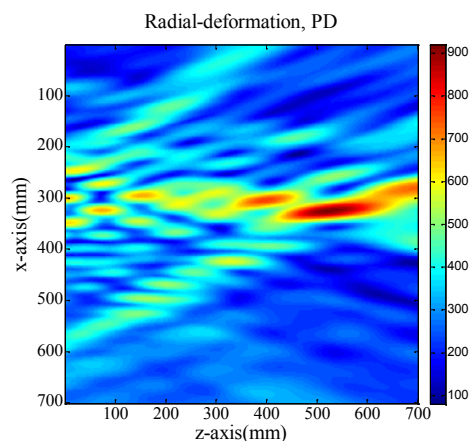


(ب)

شکل ۹: تصاویر به دست آمده از سیم پیچ شماره ۱. الف: حالت سالم ب: حالت معیوب



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: تصاویر به دست آمده از سیم پیچ شماره ۲. الف: حالت سالم ب: حالت معیوب

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [7] G. MOKHTARI, M. A. HEJAZI AND G. B. GHAREHPETIAN, "SIMULATION OF ON-LINE MONITORING OF TRANSFORMER WINDING AXIAL DISPLACEMENT USING UWB WAVES", XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, ICEM 2010, SEPTEMBER 6-8, 2010, ROME, ITALY
- [8] J. EBRAHIMI, G. B. GHAREHPETIAN, H. AMINDAVAR AND M. A. HEJAZI, "ANTENNAS POSITIONING FOR ON-LINE MONITORING OF TRANSFORMER WINDING RADIAL DEFORMATION USING UWB SENSORS", 3RD INTERNATIONAL POWER AND ENERGY CONFERENCE (PECON), NOV. 29- DEC. 1, 2010, KUALA LUMPUR, MALAYSIA]
- [9] HENRI MAÎTRE: "PROCESSING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES", JOHN WILEY & SONS, INC., 2008.
- [10] COLIN GILMORE, IAN JEFFREY, AND JOE LOVETRI: "DERIVATION AND COMPARISON OF SAR AND FREQUENCY-WAVENUMBER MIGRATION WITHIN A COMMON INVERSE SCALAR WAVE PROBLEM FORMULATION", IEEE TRANS. GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 44, No. 6, JUNE 2006.
- [11] LARS M. H. ULANDER, HANS HELLSTEN ,GUNNAR STENSTROM: "SYNTHETIC-APERTURE RADAR PROCESSING USING FAST FACTORIZED BACK-PROJECTION", IEEE TRANS. ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 39, No. 3 JULY 2003.
- [12] M. S. ZHDANOV: "GEOMETRPHYSICAL INVERSE THEORY AND REGULARIZATION PROBLEMS", METHODS IN GEOCHEMISTRY AN GEOPHYSICS, 36, ELSEVIER, PP. 354-357, 2002.
- [13] ING. MICHAL AFTANAS: "THROUGH WALL IMAGING WITH UWB RADAR SYSTEM", PH.D THESIS, AUGUST, 2009
- [14] M. DEHMOLLAIAN AND K. SARABANDI, "REFOCUSING THROUGH BUILDING WALLS USING SYNTHETICAPERTURE RADAR," IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 46, PP.1589-1599, JUNE 2008.
- [15] G. T. Herman: "Image reconstruction from projections", Berlin, Germany, Spriner-Verlag, Oct. 1980.
- [16] JOHN A. SCALES: "THEORY OF SEISMIC IMAGING", SAMIZDAT PRESS, JANUARY 1997.