

پیاده‌سازی روش تصویربرداری راداری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی بمنظور تشخیص تغییر شکل شعاعی در یک ترانسفورماتور تعمیری 30MVA

حسین کریمی^۱، محسن قراط^۱، گئورگ قره پتیان^۱، مریم السادات اخوان حجازی^۲، یاسر نوروزی^۱، علی اکبر رجلی^۳
^۱ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، y.norouzi@aut.ac.ir, grptian@aut.ac.ir, h.karami@aut.ac.ir
^۲ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه کاشان mhejazi@kashanu.ac.ir
^۳ تحقیقات و استانداردها، برق منطقه ای تهران

چکیده — جابجایی مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور یکی از عوامل اصلی خرابی و از بین رفتن آن می باشد. این جابجایی ممکن است در راستای عمودی (جابجایی محوری) و یا در راستای شعاع (تغییر شکل شعاعی) سیم پیچ باشد. تاکنون روش های مختلفی برای تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ارائه شده است که برخی از آن ها نیاز به خارج از مدار نمودن ترانسفورماتور داشته و برخی دیگر در حین عملکرد ترانسفورماتور و به صورت برخط قابل پیاده سازی هستند. هر یک از این روش ها قادر به تشخیص وجود یا عدم وجود تغییر شکل شعاعی بوده ولی قابلیت تشخیص میزان عیب را ندارند. در این مقاله روش تصویربرداری راداری با استفاده از الگوریتم مهاجرت کیرشرف برای تشخیص محل تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور ارائه شده است. در این روش که می تواند به صورت برخط عمل می کند، با استفاده از یک دستگاه فرستنده و گیرنده UWB، امواج به سمت هدف (سیم پیچ ترانسفورماتور) ارسال شده و پالس بازتاب آن اندازه گیری می گردد. با جابجا کردن آنتن های فرستنده و گیرنده، سیگنال های بازتاب شده از هدف در نقاط مختلف اندازه گیری می گردد. سیگنال های اندازه گیری شده با استفاده از الگوریتم مهاجرت کیرشرف به یک تصویر دوبعدی از هدف تبدیل می گردند و تغییر شکل شعاعی مشخص می گردد. در این مقاله عملکرد این سیستم بر روی یک ترانسفورماتور 30MVA تعمیری و دچار تغییر شکل است بررسی می شود.

واژه‌های کلیدی — تشخیص عیوب؛ تصویربرداری راداری؛ عیب تغییر شکل شعاعی؛ امواج الکترومغناطیسی؛ ترانسفورماتور واقعی

۱. مقدمه

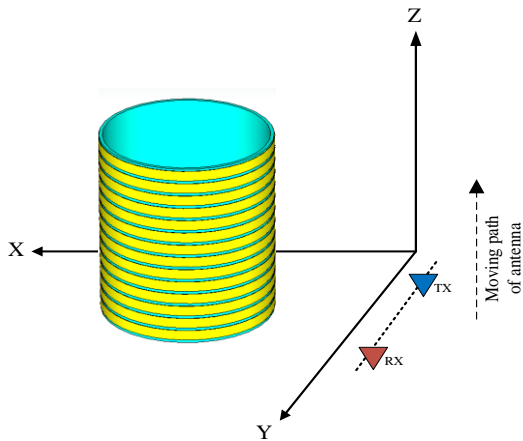
داشته و برخی دیگر به صورت برخط اجرا می گردند [۱-۴]. روش استفاده از امواج الکترومغناطیسی، امکان تشخیص عیوب مکانیکی ترانسفورماتور را به صورت برخط و توسط یک دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فراپهن باند (UWB)، فراهم می سازد. در این روش یک پالس UWB به طرف سیم پیچ ترانسفورماتور ارسال شده و بازتاب آن توسط دستگاه گیرنده دریافت، ذخیره و به کامپیوتر ارسال می گردد. با تجزیه و تحلیل امواج دریافتی تغییر شکل هندسی سیم پیچ ترانسفورماتور تشخیص داده می شود [۵-۸].

ترانسفورماتورهای قدرت از مهمترین و گرانقیمت ترین تجهیزات سیستم های قدرت می باشند. این تجهیزات ممکن است دچار عیب های مختلفی شوند. عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور شامل تغییر شکل شعاعی و تغییر شکل محوری سیم پیچ می گردند. تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور در اثر نیروهای مکانیکی شعاعی در لحظه ی اتصال کوتاه و یا در هنگام حمل و نقل رخ می دهد.

در این مقاله سعی بر آن است تا روش ارائه شده در مقالات قبلی را بر روی یک ترانسفورماتور واقعی پیاده کرده و نتایج با استفاده از الگوریتم کیرشرف تحلیل گردد تا وجود عیب مکانیکی در سیم پیچ مشخص گردد. در [۹] به مزایای فنی و اقتصادی این طرح نسبت به روش های دیگر تشخیص عیب مکانیکی سیم پیچ استفاده شده است. در بخش بعدی تصویربرداری راداری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی توضیح داده خواهد شد. سپس الگوریتم مهاجرت کیرشرف توضیح

این عیوب به مرور زمان ممکن است باعث تضعیف قدرت عایقی بین سیم پیچ ها و ایجاد اتصال کوتاه و خسارت دیدن ترانسفورماتور گردند. تشخیص به موقع این عیوب می تواند از وارد آمدن خسارت بیشتر به ترانسفورماتور جلوگیری کرده و این امکان را ایجاد می کند که ترانسفورماتور طبق برنامه و در زمان مناسب از مدار خارج و تعمیر گردد. روش های مختلفی برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم پیچ ارائه شده اند که برخی از آن ها نیاز به خارج از مدار کردن ترانسفورماتور

بخش های crosstalk و بازتاب محیط مقدار زیادی کلاتر و اعوجاج در تصویر ایجاد نموده و کیفیت آن را به شدت تحت تأثیر قرار می دهند.



شکل ۱: نمای سه بعدی شبیه سازی

برای به دست آوردن تصویر با کیفیت مطلوب از سیگنال های دریافتی، چند مرحله کالیبراسیون و پردازش بر روی آن ها انجام می گیرد. در مرحله اول، مبدأ زمانی هر یک از سیگنال دریافتی در موقعیت های مختلف آنتن تعیین شده و سیگنال ها به مبدأ زمانی شیفت داده می شوند. به عبارت دیگر همه اسکن ها با یکدیگر همزمان می گردند. با توجه به اینکه معیار تشخیص تصویر براساس تأخیر زمانی پالس های دریافتی می باشد، این همزمانی اهمیت زیادی در کیفیت تصویر خواهد داشت. برای تشخیص مبدأ زمان از اولین پیک سیگنال دریافتی کمک گرفته می شود. تأخیر اولین پیک سیگنال دریافتی (بخش crosstalk) نسبت به اولین پیک ارسال (مبدأ زمان) برابر فاصله بین دو آنتن تقسیم بر سرعت موج می باشد. با دانستن این تأخیر و زمان اولین پیک سیگنال دریافتی، مبدأ زمان محاسبه می گردد.

در مرحله دوم بخش های ناخواسته سیگنال دریافتی شامل crosstalk و اثر محیط حذف شده و سیگنال بازتاب شده از هدف، جدا می گردد. برای این کار، پنجره زمانی مناسب در برگزیده هدف انتخاب شده و تنها بخشی از سیگنال که در این پنجره قرار می گیرد، ذخیره شده و بقیه بخش ها حذف می گردند. با دانستن محدوده ای که هدف در آن قرار گرفته، می توان 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.

داده شده و نتایج آزمایشات بر روی یک ترانسفورماتور تعمیری نمایش داده خواهد شد.

۲. تشخیص تغییر شکل شعاعی با استفاده

از روش تصویربرداری راداری

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 می گردد. این روش ها بسته به نوع پالس ارسالی و تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده به انواع مختلفی دسته بندی می گردند. 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 می گردد.

نحوه تصویربرداری به روش آنتن با دهانه مصنوعی (SAR) در ((شکل ۱)) توضیح داده شده است. در این شکل به منظور سادگی، تنها یک آنتن نشان توسط آنتن ارسال داده شده است. هنگامی که پالس UWB ارسال می گردد، امواج ارسالی به هدف برخورد نموده و در تمام جهات به طور یکنواخت منعکس می گردد. با توجه به زاویه دید وسیع آنتن، سیگنال منعکس شده از هدف در تمام حالتی که شیء توسط آنتن دیده می شود، دریافت می گردد. برای به دست آوردن یک تصویر دو بعدی از هدف، موقعیت آنتن بر روی محور Z تغییر داده شده و در نقاط مختلف محور Z فرآیند ارسال پالس و دریافت بازتاب آن تکرار می گردد [۷-۸].

سیگنال دریافتی در هر موقعیت آنتن یک اسکن نامیده می شود. هر اسکن یک سیگنال زمانی بوده که با نمونه برداری از امواج دریافتی در یک موقعیت خاص به دست می آید. با اسکن های مختلفی به تغییر موقعیت آنتن در طول محور Z دست می آید. مجموعه سیگنالهای دریافت شده در فرآیند اسکن گیری به عنوان داده های خام برای به دست آوردن تصویر به کار گرفته می شوند.

۲.۱. کالیبراسیون و پردازش داده های خام

پالس UWB ارسالی توسط فرستنده به اشیای مختلف برخورد کرده و بازتاب آن به گیرنده می رسد. بنابراین موج ارسالی چندین مسیر مختلف از فرستنده تا گیرنده را طی می نماید. به این فرآیند چند مسیری ۱ گفته می شود. شکل ۲ یک نمونه سیگنال دریافتی در گیرنده را نشان می دهد.

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 می باشد 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، و بازتاب محیط میز و ...) می باشد.

رابطه فوق معادله انتشار موج ناشی از یک منبع نقطه‌ای می‌باشد که در مختصات $r = r'$ قرار گرفته و در لحظه‌ی $t = t'$ یک پالس دلتای دیراک (δ) منتشر می‌کند. پس از روابط ریاضی توضیح داده شده در [۷-۸]، در صورتی که تابع گرین در مرز صفر باشد، رابطه به صورت (۳) خلاصه می‌گردد:

$$\forall r \in \Omega$$

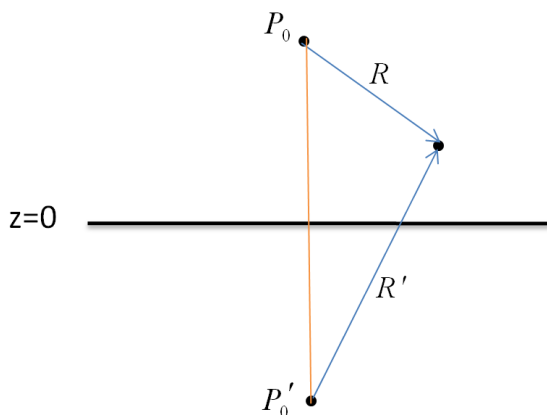
$$\Psi(r, t) = -\frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \int_{\partial\Omega} f(r', t') \partial_n \Gamma(r, t, r', t') da' dt' \quad (3)$$

که در آن r' مکان منبع نقطه‌ای ناشی از تابع موج گرین بوده و t' زمان ارسال پالس دلتای دیراک از سوی منبع می‌باشد. همانطور که در بخش قبل گفته شد، برای اینکه انتگرال کیرشهف ساده گردد، باید تابع گرینی یافت که مقدار آن یا مشتق عمودی آن در همه نقاط مرز، صفر باشد. با توجه به تقارن مسئله، همانطور که در (شکل ۴) نشان داده شده، دو منبع موج نقطه‌ای در نقاط $P_0 = (x', y', z')$ و $P'_0 = (x', y', -z')$ که قرینه نقطه P_0 نسبت به صفحه $Z=0$ می‌باشد، قرار داده می‌شود. این دو منبع در لحظه‌ی $t = t'$ یک پالس دلتای دیراک با دامنه‌ی $+1$ و -1 منتشر می‌نمایند. هر یک از منابع یک موج کروی ایجاد می‌کنند که با گذشت زمان، در فضا منتشر می‌شود. تقارن این دو منبع نسبت به صفحه $Z=0$ باعث می‌شود که امواج ساطع شده از آن‌ها روی سطح $Z=0$ یکدیگر را خنثی نموده و میدان حاصل از تابع گرین روی این سطح، صفر باشد.

تابع گرین ناشی از این دو منبع به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\Gamma_r(r, t, r', t') = \frac{\delta(t - t' - R/c)}{R} - \frac{\delta(t - t' - R'/c)}{R'} \quad (4)$$

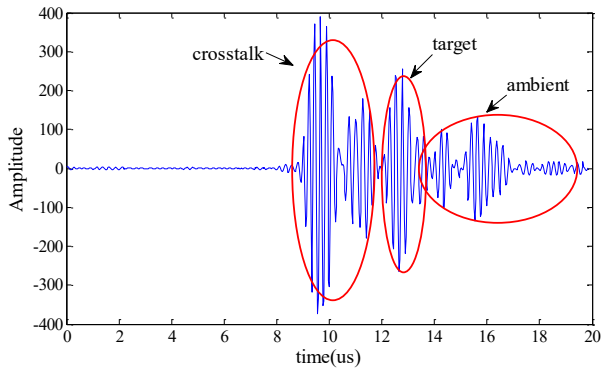
$$\Gamma_a(r, t, r', t') = \frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} - \frac{\delta(t - t' + R'/c)}{R'} \quad (5)$$



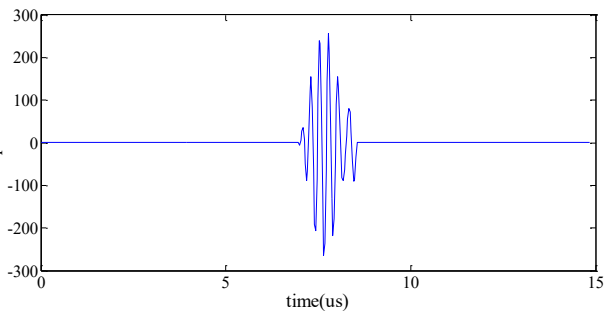
شکل ۴: هندسه توابع گرین انتخاب شده

که در آن

$$R = (x - x', y - y', z - z')$$



شکل ۲: یک نمونه سیگنال دریافتی در گیرنده



شکل ۳: سیگنال بدست آمده بعد از دو مرحله پردازش

این عملیات برای هر یک از موقعیت‌های آنتن روی محور Z تکرار می‌شود.

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

۳. الگوریتم مهاجرت کیرشهف

با فرض اینکه محیط انتشار موج همگن باشد، می‌توان از جهت میدان صرف‌نظر کرده و آن را به صورت یک کمیت اسکالر در نظر گرفت. معادله موج اسکالر در یک محیط بدون منبع در (۱) نشان داده شده است.

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \Psi = 0 \quad (1)$$

که در آن تابع اسکالر $\Psi(r, t)$ اندازه میدان در نقاط مختلف فضا می‌باشد. هدف، یافتن پاسخ معادله موج اسکالر در داخل یک حجم بسته Ω با دانستن شرایط مرزی روی مرز پیوسته $\partial\Omega$ می‌باشد. یک تابع گرین که به مختصات منبع و نقطه مشاهده وابسته است، را به عنوان پاسخ معادله زیر تعریف می‌نماییم. ($\Gamma(r, t, r', t')$)

$$\nabla^2 \Gamma - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \Gamma = -4\pi \delta(r - r') \delta(t - t') \quad (2)$$

$$\Psi(r) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{z'=0} f\left(r', \frac{2R}{c}\right) da' \quad (13)$$

توجه کنید که در رابطه فوق R فاصله بین هر نقطه دلخواه از فضای پشت صفحه $r', z'=0$ نقطه ای از صفحه $z' = 0$ که در داده‌ها در آن ثبت شده می‌باشد.

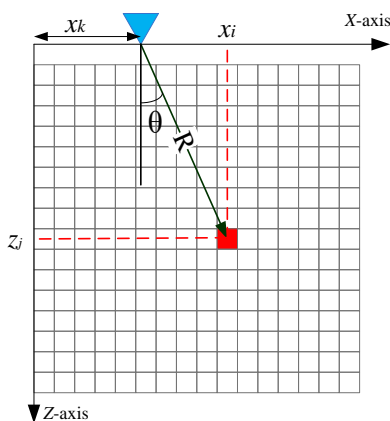
با تعریف متغیر مجازی $t' = 2R/c$ رابطه داخل انتگرال به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f\left(r', \frac{2R}{c}\right)}{R} \right) = \frac{\cos\theta}{Rc} \left(\frac{\partial}{\partial t'} f(r', t') - \frac{c}{R} f(r', t') \right) \Bigg|_{t'=2R/c} \quad (14)$$

با جایگذاری خواهیم داشت:

$$\Psi(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{z'=0} \frac{\cos\theta}{R.c} \left[\frac{\partial}{\partial t'} f(r', t') + \frac{c}{R} f(r', t') \right] \Bigg|_{t'=2R/c} da' \quad (15)$$

در رابطه فوق $\Psi(r)$ شدت موج بازتاب شده از نقطه P واقع در مختصات $r(x_p, y_p, z_p)$ می‌باشد. R فاصله نقطه مشاهده و نقطه P، θ زاویه بین خط عمود بر صفحه $z=0$ و خط اتصال نقطه P و نقطه مشاهده می‌باشد. پاسخ معادله موج در روی صفحه $z=0$ بوده که به صورت یک سیگنال زمانی-مکانی می‌باشد. جمله دوم داخل براکت، به دلیل تقسیم شدن بر R، در مقابل جمله اول ناچیز بوده و معمولاً از آن صرف نظر می‌شود. رابطه بالا که اساس مهاجرت به روش کیرشیف بوده، در دوبعد به صورت زیر خلاصه می‌گردد:



شکل ۵: کارکرد رابطه کیرشیف در فضای دو بعدی

$$\Psi(r) = \frac{1}{2\pi} \int_x \frac{\cos\theta}{R.c} \left[\frac{\partial}{\partial t'} f(r', t') \right] \Bigg|_{t'=2R/c} dl' \quad (16)$$

((شکل ۵)) نحوه به دست آوردن تصویر دو بعدی با استفاده از الگوریتم کیرشیف را نشان می‌دهد:

$$R' = (x - x', y - y', z + z')$$

حال یکی از توابع گرین فوق را در انتگرال کیرشیف قرار می‌دهیم. با توجه به اینکه در الگوریتم مهاجرت، هدف باز گرداندن امواج دریافتی به نقطه‌ی می‌باشد، از تابع گرین Γ_a استفاده می‌نماییم. با توجه به (z') $R(-z') = R(z')$ خواهیم داشت:

$$\Psi(r, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{z'=0} \int f(r', t') \frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} da' dt' \quad (6)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\Psi(r, t) = -\frac{1}{4\pi} \int_{z'=0} \int f(r', t') \frac{\partial}{\partial z'} \left[\frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} - \frac{\delta(t - t' + R'/c)}{R'} \right] da' dt' \quad (7)$$

با توجه به اینکه $R'(z') = R(-z')$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial z'} (R'(z')) = \frac{\partial}{\partial z'} (R(-z')) = -\frac{\partial}{\partial z'} (R(z')) \quad (8)$$

با مشتق گیری از جملات داخل آکولاد انتگرال فوق به صورت ساده شده زیر در می‌آید:

$$\Psi(r, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{z'=0} \int f(r', t') \frac{\partial}{\partial z'} \left[\frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} \right] da' dt' \quad (9)$$

به علاوه چون متغیر z' در R تنها در جمله $(z - z')$ ظاهر می‌شود، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial z'} \left[\frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} \right] = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} \right] \quad (10)$$

در نتیجه رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\Psi(r, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{z'=0} \int f(r', t') \frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} da' dt' \quad (11)$$

در نهایت با استفاده از خاصیت غربالگری تابع δ انتگرال در حوزه زمان حذف می‌شود.

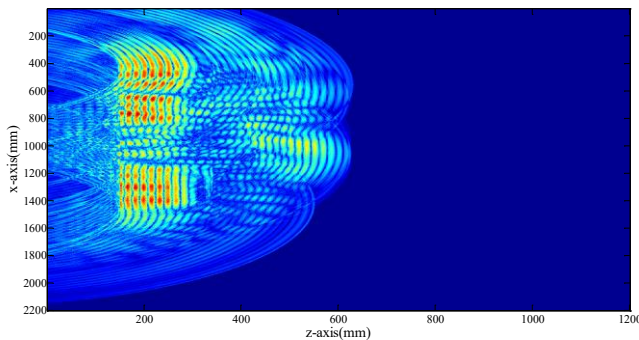
$$\Psi(r, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{z'=0} \frac{f(r', t + R/c)}{R} da' \quad (12)$$

در فرآیند ثبت داده‌ها در حقیقت موج به سمت شیء ارسال شده و از آن بازتاب می‌گردد، بنابراین این فرآیند یک آزمایش بازتابی است، در صورتی که در بدست آوردن معادله فوق فرض شده که موج از شیء منتشر می‌گردد. بنابراین مدت زمان انتشار موج در فرآیند ثبت داده‌ها دو برابر است. به منظور تطبیق فرآیند جمع آوری داده‌ها با مسئله واقعی، سرعت انتشار موج، C را نصف می‌نماییم و $t=0$ قرار می‌دهیم. در نتیجه معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

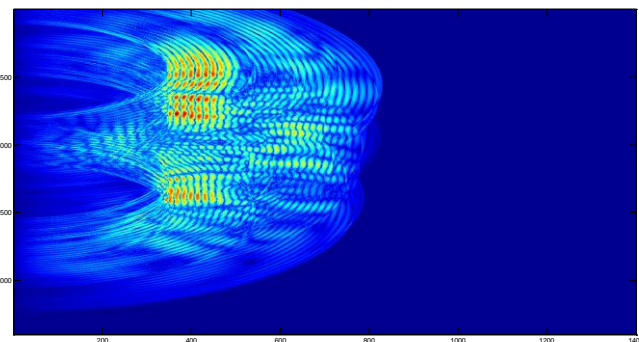
ارتفاع آنتنها از زمین در انتها	۱۸۲ سانتی متر
فاصله هر دو اسکن متوالی	۲ سانتی متر
تعداد گام های اندازه گیری	۵۵
تعداد فازهای ترانسفورماتور	۳ فاز
فاصله آنتنها از ترانسفورماتور	۵۰ سانتی متر
تعداد اسکن ها در هر گام	۱۰۰
فاصله زمانی بین پالسهای ارسالی	50ms
نوع آنتنها	ویوالدی
توان ترانسفورماتور مرجوعی	30MVA

همانطور که از شکل مشخص است پس از نصب آنتن‌ها بر روی یک پایه از جنس فوم (قابلیت انعکاس سیگنال ضعیفی داد)، گام به گام آنتن‌ها بالا برده شد و در هر گام در حدود ۱۰۰ بار اسکن گرفته شد. پس از انجام مراحل پردازش شامل یکسان سازی زمانی و انتخاب پنجره مناسب، از این ۱۰۰ اسکن داده های نامناسب خارج شده و برای هر گام میانگین گیری انجام شده است. سیم پیچ مورد مطالعه دارای دو حالت سالم و معیوب می باشد. در حالت سالم تصویر ترانسفورماتور بدست آمده و در حالت معیوب نیز یک تغییر شکل (فرورفتگی) در بالای سیم پیچ ایجاد شده است (شکل ۷).

تصویر حالت سالم و معیوب ترانسفورماتور بصورت شکل زیر است:



شکل ۶: تصویر حالت سالم



شکل ۷: تصویر حالت معیوب

با جابجا نمودن آنتن بر روی محور X، پاسخ معادله موج بر روی نقاط مختلف محور X با فاصله یکسان اندازه‌گیری و ذخیره می‌گردد. سیگنال اندازه‌گیری شده در نقطه X_k با $f(x_k, t')$ نشان داده می‌شود. فضای پایین محور X را به المان های کوچک مربع شکل تقسیم کنیم. سپس هر المان را با اندیس (i, j) مشخص می‌نماییم که i شماره قسمت متناظر روی محور X و j شماره قسمت روی محور Y می‌باشد. مختصات نقطه مرکز هر المان را با $r=(x_i, z_j)$ نشان می‌دهیم. هر المان دلخواه از فضای پایین محور X را می‌توان به عنوان یک منتشر کننده احتمالی موج در نظر گرفت. فرض می‌شود که یک منتشر کننده موج در نقطه مرکز المان با اندیس (i, j) قرار گرفته‌است. در این صورت امواج منتشر شده از آن به مرز رسیده و توسط آنتن جذب می‌گردند. بنابراین می‌توان با استفاده از انتگرال کیرشیف موج اولیه منتشر شده از آن را محاسبه نمود. در این رابطه، R فاصله المان از آنتن بوده و θ زاویه بین خط اتصال آنتن و المان موردنظر، با محور Z می‌باشد (شکل ۵). در صورتی که در نقطه مفروض جسمی قرار داشته باشد، انتگرال کیرشیف در آن نقطه مقدار خواهد داشت. در غیر این صورت حاصل انتگرال کیرشیف در آن نقطه تقریباً صفر خواهد بود. با تکرار فرآیند فوق برای تمام نقاط صفحه، تصویر دوبعدی از هدف به دست می‌آید.

توجه کنید که سیگنال‌های ذخیره شده در هر موقعیت آنتن، توابع گسسته-زمان می‌باشند. در نتیجه مشتق زمانی در رابطه‌ی بالا با تفریق، جایگزین می‌شوند به علاوه، تعداد نقاطی که داده‌ها بر روی آن ثبت می‌گردد، بر روی محور X محدود بوده و در رابطه فوق انتگرال روی محور X به Σ تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر:

$$\Psi(r) = \frac{1}{2\pi} \sum_{xk} \frac{\cos \theta}{R.c} [f(x_k, t+1) - f(x_k, t)] \Big|_{t=2R/c} \quad (17)$$

۴. تست بر روی یک ترانسفورماتور 30MVA

در بخش قبل الگوریتم کیرشیف بمنظور بدست آوردن یک تصویر دو بعدی از ترانسفورماتور ارائه گردید. در این بخش، نشان داده خواهد شد که با پیاده سازی این الگوریتم بر روی یک ترانسفورماتور واقعی 30MVA، که یک سیم‌پیچ تعمیری از طرف برق منطقه ای تهران بود، می‌توان عیب شعاعی سیم پیچ را تشخیص داد. مشخصات سیم پیچ و ست آپ آزمایش در ((جدول ۱)) آمده است.

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور و سیستم آزمایش

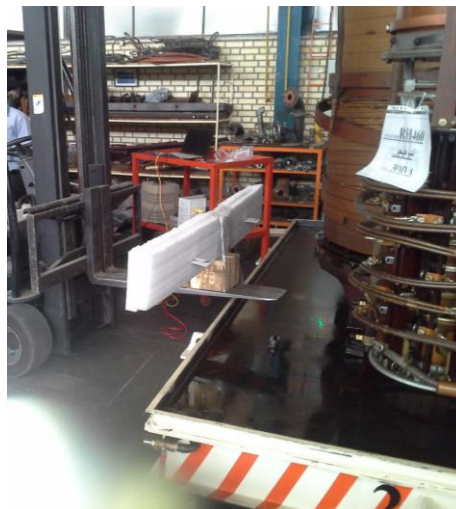
قطر استوانه ترانسفورماتور	۱۰۰ سانتی متر
فاصله آنتن ها از یکدیگر	۸۰ سانتی متر
ارتفاع آنتنها از زمین در ابتدا	۷۲ سانتی متر

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, 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.
- [7] 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.
- [8] M. S. Golsorkhi1, 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.

[9] مریم السادات اخوان حجازی، "تشخیص جابجایی و تغییر شکل سیم پیچی ترانس قدرت بوسیله امواج فرایهین باند"، پایان نامه دکتری مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰، تهران، ایران.

همانطور که در شکل مشخص است حالت سالم نقاط گرم یا قرمز کمتری دارد و نشاندهنده فرورفتگی در بخشی از ترانسفورماتور می باشد. اگر شاخص مقایسه را عدد رنگی ۰,۴ در نظر بگیریم، تعداد نقاط بالای ۰,۴ در حالت سالم برابر ۱۶۵۳۱۲، و این تعداد برای حالت معیوب برابر ۱۵۶۵۹۳ می باشد. مقایسه این دو عدد نیز بیانگر فرورفتگی بخشی از ترانسفورماتور است. تصویر ترانسفورماتور واقعی و ست آپ آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: اسکن ترانسفورماتور با دو آنتن فرستنده و گیرنده

۵. نتیجه گیری

در این مقاله روش ارائه شده در مقالات قبلی برای تشخیص عیب مکانیکی بر روی یک سیم پیچ مرجوعی از طرف برق منطقه ای تهران آزمایش شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر به تشخیص عیب در یک ترانسفورماتور واقعی نیز می باشد. در این آزمایش سیم پیچ دارای فرورفتگی بوده که با انجام آزمایش و رسم تصویر دوبعدی از ترانسفورماتور، تشخیص عیب تغییر شکل شعاعی امکان پذیر است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از زحمات برق تهران مخصوصاً جناب آقای مهندس رجلی از برق منطقه ای تهران و گروه ماشین انتقال قدرت بابت زحماتی که در فراهم آمدن محیط و شرایط آزمایش فراهم نموده اند کمال سپاسگذاری را دارند.

منابع

- [1] D.K.Xu and Y.M.Li , "A simulating research on monitoring of winding deformation of power transformer by on-line measurement of shortcircuit 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