

مروری بر مسئله پایش سیم پیچی ترانسفورماتور قدرت جهت تشخیص جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی با استفاده از امواج الکترومغناطیسی



نویسندگان: مریم السادات اخوان حجازی ، گئورک قره پتینان
پست الکترونیکی: grptian@aut.ac.ir

واژه های کلیدی: ترانسفورماتور قدرت؛ پارامتر پراکندگی؛ شناسایی
الگو؛ رادار فرایهین باند؛ تصویربرداری راداری؛ روش هذلولوی

چکیده

ترانسفورماتورهای قدرت یکی از گرانترین اجزاء سیستم قدرت محسوب می شوند. تشخیص به موقع خطاهای به وجود آمده در ترانسفورماتور می تواند از خروج ناخواسته آن و تحمیل هزینه های تعمیرات و خاموشی جلوگیری نماید. در این مقاله گزیده ای از تحقیقات، آزمایش ها و شبیه سازی های انجام شده در زمینه پایش سیم پیچ ترانسفورماتور با استفاده از امواج الکترومغناطیسی به منظور تشخیص عیوب محوری و شعاعی در حوزه فرکانس و زمان و روش تصویربرداری راداری برای بازرسی دقیق از ترانس و الگوریتم استفاده از روش هذلولوی ارائه شده است.

۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از عناصر اصلی شبکه تولید، انتقال و توزیع نیروی برق می باشند و کارکرد درست آنها نقش مهمی در اتصال شبکه ها خواهد داشت. مونتورینگ ترانسفورماتورهای قدرت به معنی نظارت بر عملکرد قسمت های مختلف آن بمنظور جلوگیری از بوجود آمدن عیب و یا تشخیص به موقع آن می باشد. بسیاری از بهره برداران علاقمند هستند که از وضعیت داخل ترانسفورماتورهای قدرت

با خبر شوند. به این ترتیب علاوه بر جلوگیری از وارد آمدن خسارات جدی به ترانسفورماتور، با اطلاع‌رسانی به موقع می‌توان موجب تداوم انتقال انرژی الکتریکی، افزایش قابلیت اطمینان، بهره‌برداری بهینه از ظرفیت ترانسفورماتور و افزایش طول عمر بهره‌برداری ترانسفورماتور خواهد شد.

از روش‌های موجود برای مانیتورینگ سیم‌پیچ می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- روش تست اتصال کوتاه
- روش آزمایش ضربه فشار ضعیف
- روش تحلیل پاسخ فرکانسی یا تابع تبدیل
- روش امواج مافوق صوت

روش تست اتصال کوتاه، هیچ اطلاعاتی در مورد محل و نوع تغییر شکل سیم‌پیچ‌ها در اختیار نمی‌گذارد. همچنین ادعا می‌شود که تأثیر جابجایی سیم‌پیچ‌ها بر راکتانس اتصال کوتاه ناچیز است [۱]. روش آزمایش ضربه فشار ضعیف، که درحین انجام این روش ترانسفورماتور باید از شبکه جدا شود. همچنین هرگونه تغییر در شکل موج تولید شده توسط منبع باعث تغییر در شکل موج پاسخ خروجی شده و می‌تواند موجب نتیجه‌گیری اشتباه گردد [۲]. روش تحلیل پاسخ فرکانسی یا تابع تبدیل، که برای انجام آزمایش می‌بایست ترانسفورماتور را بی‌بار نمود. روش دیگری که درحال حاضر در مرحله تحقیقاتی می‌باشد، روش امواج مافوق صوت است. در این روش امواج مافوق صوت توسط وسیله‌ای به داخل ترانس فرستاده شده و پس از انعکاس از روغن و سیم‌پیچی‌ها دوباره توسط همان وسیله دریافت می‌شود. در نهایت با توجه به سرعت سیر و زمان رفت و برگشت امواج و حرکت‌دادن وسیله موردنظر، می‌توان فاصله سیم‌پیچی از بدنه ترانسفورماتور را در نقاط مختلف تعیین کرد [۳].

با توجه به نواقص روش‌های پیشین، ارائه روشی که دارای دو مشخصه زیر باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است: اولاً به صورت برخط اجرا شود تا از وجود عیب در ترانس در کمترین زمان ممکن مطلع شویم و بیشترین امکان تکرارپذیری را داشته باشد، ثانیاً نوع و محل عیب سیم‌پیچ را نشان دهد. لذا استفاده از امواج الکترومغناطیسی بهترین گزینه برای سیستم‌های مانیتورینگ می‌باشد. در این روش، برپایه همجوشی اطلاعات^۱ سنسورهای مختلف، وضعیت سیستم ارزیابی می‌شود. در ترانس به علت اینکه با یک سیستم ساکن سروکار داریم، در صورتی که بتوان اثر محیط انتشار موج را ثابت در نظر

1 Information fusion

گرفت و یا رفتار آن را پیش بینی نمود، می توان ادعا کرد که تغییر دامنه و فاز امواج برگشتی تنها تابع تغییر شکل در سیم پیچی های ترانس خواهد بود.

تحقیقات انجام شده در زمینه مونیتورینگ ترانسفورماتور قدرت با استفاده از امواج الکترومغناطیسی در سال ۲۰۰۶ شروع شد. روش الکترومغناطیسی ابتدا در حوزه فرکانس بر پایه استفاده از آنتن های UHF برای ارسال و دریافت سیگنال و تحلیل سیگنال های برگشتی انجام شد. این گیرنده ها اولین بار برای تشخیص تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت تعبیه شدند. با استفاده از اتصال یک نتورک آنالیزر به مدل ترانس و اندازه گیری پارامتر پراکندگی، می توان از آن به عنوان اثر انگشت ترانس استفاده نمود. برای تشخیص وجود عیب از شاخص های مختلف و برای تشخیص نوع و محل عیب از سیستم های یادگیری هوشمند استفاده می شود.

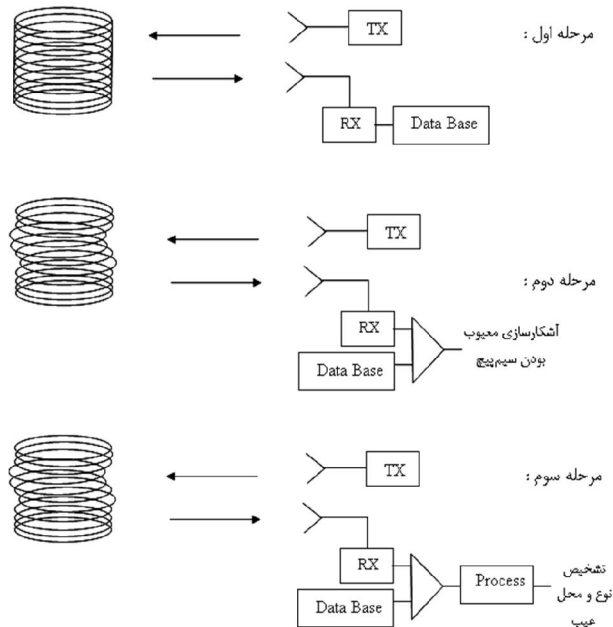
در حوزه زمان از آنتن های فرایه باند که برای اندازه گیری در محیط های دارای چند مسیری مناسبند، استفاده می شود. پالس های باریک با استفاده از آنتن های فرایه باند به سمت ترانس تابانده شده و بازتاب آن ذخیره می شود. ابتدا برای تشخیص وجود عیب، از شاخص و در نهایت برای بازرسی دقیق از ترانس، از روش تصویر برداری راداری استفاده شد. در این روش، عیوب تغییر شکل شعاعی و جابجایی محوری با دقت قابل بررسی است [۴].

۲. تحلیل در حوزه فرکانس

روش ارائه شده مبتنی بر پاسخ یک دستگاه یک یا چنددهنه ای به امواج الکترومغناطیسی است. در این روش با گذاشتن یک فرستنده موج UHF کنار ترانس و تاباندن امواج به سیم پیچ ها توسط آنتن های UHF از دریچه ای به داخل ترانس و گرفتن انعکاس ناشی از آن بوسیله گیرنده و پردازش اطلاعات می توان تحلیلی از وضعیت سیم پیچ های ترانس نمود. شایان ذکر است این روش در مورد تشخیص تخلیه جزئی اجرا شده و عملی می باشد.

روش استفاده شده در حوزه فرکانس، غیرتماسی و بر پایه اندازه گیری ضریب انعکاس (دامنه و فاز) می باشد. ضریب انعکاس، نسبت موج انعکاسی از ماده به موج ارسالی است. هدف این روش، استخراج اطلاعات (اشکارسازی، تعیین موقعیت، شکل و سایز خطا) از طریق اندازه گیری میدان نزدیک ضریب انعکاس توسط یک موجبر مستطیلی است.

در شکل ۱، به طور کلی روند به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. در مرحله اول تشکیل یک پایگاه داده برای پارامتر پراکندگی سیم‌پیچ در حالت سالم، در مرحله دوم آشکارسازی معیوب بودن سیم‌پیچ از مقایسه پارامتر پراکندگی آن با سیم‌پیچ در حالت سالم، مرحله سوم تشخیص نوع و محل عیب از طریق مقایسه و پردازش صورت می‌گیرد.



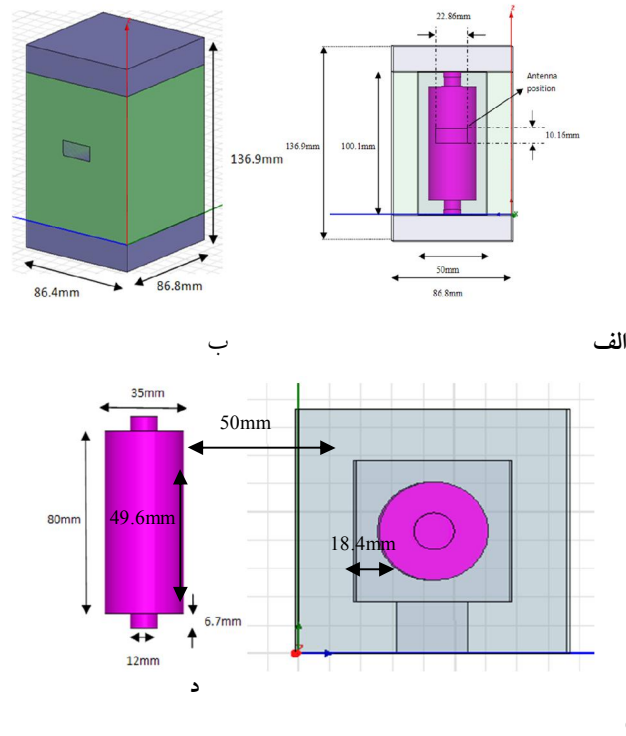
شکل ۱: طرحواره مراحل انجام مانیتورینگ به کمک پارامتر پراکندگی

۲.۱. مشخصات نمونه آزمایشگاهی ساخته شده جهت آزمایش و شبیه‌سازی در حوزه فرکانس

ساخت مدلی در ابعاد واقعی ترانسفورماتور قدرت برای تست این روش مقرون به صرفه نمی‌باشد. از این رو ترانس در مقیاس ۰/۰۵ ساخته شد. در مدل‌سازی به علت تقارن به جای سه فاز فقط یک فاز مدل شده و محیط انتشار موج، هوا در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار HFSS استفاده شده است.

فرکانس استفاده شده بین ۷ تا ۱۲ گیگاهرتز انتخاب شد تا بتوان تصویری از عملکرد موجی در فرکانس ۳۵۰ تا ۶۰۰ مگاهرتز در یک ترانسفورماتور واقعی داشت و همچنین یک موجبر باند X برای تحریک فضای داخل ترانس استفاده شد.

همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، مجموعه هسته و سیم پیچ‌های فشار ضعیف و فشار قوی بصورت یک استوانه فلزی دیده می‌شوند و مدل نمودن داخل سیم پیچ‌ها ضرورتی ندارد. مدل شبیه سازی شده دقیقاً مطابق با مدل ساخته شده است.

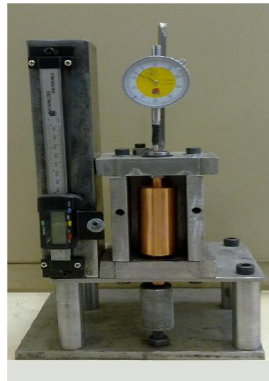


شکل ۲: مدل ترانسفورماتور در حوزه فرکانس
الف) نمای خارجی ب) نمای جانبی ج) نمای جانبی مدل سیم پیچ د) نما از بالا

شکل ۳ (الف و ب) نمای داخلی و نمای خارجی مدل ترانس ساخته شده جهت آزمایش در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

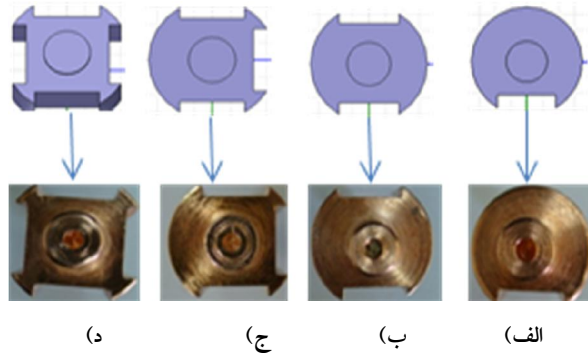
شکل ۳: الف) نمای داخلی و ب) نمای خارجی مدل ترانس ساخته شده جهت آزمایش در حوزه فرکانس

۲,۲. جابجایی محوری

جهت تست جابجایی محوری استوانه را در راستای عمودی توسط پیچی که در پایین آن بدین منظور تعبیه شده است، از پایین‌ترین تا بالاترین موقعیت با گام‌های ۰,۱ میلی‌متر جابجا نموده و برای هر موقعیت پارامتر پراکندگی سیم‌پیچ ترانس از فرکانس ۷ تا ۱۲ گیگاهرتز با گام‌های ۲۵ مگاهرتز را توسط تحلیل گر شبکه اندازه‌گیری می‌شود.

۲,۳. تغییر شکل شعاعی

ساختار اصلی همانند مدل محوری است و تنها سیم‌پیچ با چهار نمونه دارای تغییر شکل شعاعی تعویض شده است. در شکل ۴ چهار مدل شبیه‌سازی شده و ساخته شده جهت اندازه‌گیری تغییر شکل شعاعی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: ۴ ساختار مختلف شبیه‌سازی شده و ساخته شده برای تغییر شکل شعاعی:
(الف) نمونه یک (ب) نمونه دو (ج) نمونه سه (د) نمونه چهار

این مدل‌ها حالتی را توصیف می‌کند که به ترتیب یک، دو، سه و یا چهار فرورفتگی در یک جهت بطور سراسری در سیم‌پیچ ترانس رخ داده باشد [۵].

۲.۴. شاخص‌های پیشنهادی جهت تشخیص عیوب سیم‌پیچ

مبنای شاخص‌های پیشنهادی جهت تشخیص عیوب سیم‌پیچ، مقایسه دامنه و فاز پارامتر پراکندگی حالت مجهول با حالت سالم است. بدین منظور پارامتر پراکندگی مربوط به حالت سالم سیم‌پیچ باید قبلاً اندازه‌گیری شده باشد. شاخص‌های آشکارسازی به صورت زیر می‌باشد:

۱- شاخص متوسط قدر مطلق اختلاف دامنه و فاز

این شاخص برای مقایسه دامنه و فاز پارامتر پراکندگی اندازه‌گیری شده در N فرکانس مختلف در حالت‌های معیوب و سالم استفاده شده است. شاخص متوسط قدر مطلق اختلاف دامنه (MAMD) ۱ و متوسط قدر مطلق اختلاف فاز (MAPD) ۲ می‌باشد که برای موقعیت X نسبت به موقعیت مرجع بترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MAMD(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \left| |S_i(x)| - |S_i(0)| \right|}{N} \quad (1)$$

1 Mean Absolute Magnitude Difference
2 Mean Absolute Phase Difference

$$MAMD(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \left| |S_i(x)| - |S_i(0)| \right|}{N} \quad (2)$$

که در آن $|S_i(x)|$ و $|S_i(0)|$ به ترتیب، دامنه پارامتر پراکندگی در فرکانس i -ام، $\angle S_i(x)$ و $\angle S_i(0)$ به ترتیب فاز پارامتر پراکندگی در فرکانس i -ام در موقعیت X و موقعیت مرجع می باشند.

۲- شاخص فاصله اقلیدسی

فاصله اقلیدسی دامنه ۱ (MED) و فاصله اقلیدسی فاز ۲ (PED) پارامتر پراکندگی، در N فرکانس مختلف اندازه گیری برای موقعیت X نسبت به موقعیت مرجع به ترتیب بصورت زیر تعریف می شود:

$$MED(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(|S_i(x)| - |S_i(0)| \right)^2}{N}} \quad (3)$$

$$PED(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\angle S_i(x) - \angle S_i(0) \right)^2}{N}} \quad (4)$$

۳- اندیس همبستگی متقابل

در اندیس همبستگی میزان شباهت دو شکل موج را تعیین می نماید. شباهت در شکل موج دامنه و فاز به صورت جداگانه اندازه گیری می شود. همبستگی دامنه پارامتر پراکندگی ۳ (CSM) و فاز پارامتر پراکندگی ۴ (CSP) بصورت زیر تعریف می شوند:

$$CSM(x,0) = \text{corr}(|S_x|, |S_0|) = \frac{\sum_{i=1}^N \left(|S_x(i)| - \bar{|S_x|} \right) \left(|S_0(i)| - \bar{|S_0|} \right)}{\sigma_1 \sigma_2 N} \quad (5)$$

$$CSP(x,0) = \text{corr}(\angle S_x, \angle S_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\angle S_x(i) - \bar{\angle S_x} \right) \left(\angle S_0(i) - \bar{\angle S_0} \right)}{\sigma_1 \sigma_2 N} \quad (6)$$

- 1 Magnitude Euclidean Distance
- 2 Phase Euclidean Distances
- 3 Correlation of the S-parameters Magnitude
- 4 Correlation of the S-parameters Phase

۴- شاخص هم بستگی ماتریسی:

در شاخص‌های قبلی پاسخ دامنه و پاسخ فاز به صورت جداگانه بررسی می‌شود. با استفاده از شاخص ماتریسی می‌توان از اطلاعات دامنه و فاز یا قسمت حقیقی و موهومی پارامتر پراکنندگی به صورت هم‌زمان جهت محاسبه شاخص استفاده نمود.

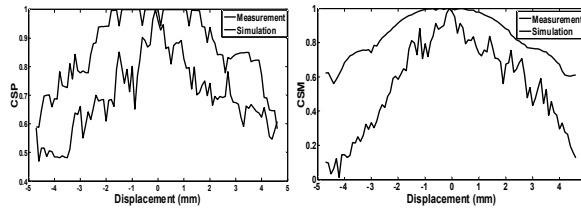
شاخص هم بستگی ماتریسی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CSF(\theta) = \text{corr}_2(S(\theta) |, |S0 |) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (|S_{nm}(\theta) - \bar{S}(\theta)|)(|S0_{nm} - \bar{S0}|)}{\sqrt{(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (S_{nm}(\theta) - \bar{S}(\theta))^2) (\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (S0_{nm} - \bar{S0})^2)}} \quad (7)$$

باتحلیل نتایج تست‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی و مقایسه شاخص‌های مختلف موارد زیر برای حوزه فرکانس بدست آمدند:

از اندیس‌های CSM و CSP می‌توان برای آشکار کردن جابجایی محوری و تخمین میزان جابجایی محوری به صورت تقریبی استفاده نمود.

شکل‌های ۵ (الف و ب) CSM و CSP را بر حسب جابجایی محوری اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ۲۰۱ نقطه فرکانسی نشان می‌دهد. فرض شده است که نقطه مرکزی استوانه، نقطه مرجع است و استوانه، جابجایی محوری مثبت یا منفی (بالا یا پایین) داشته باشد [۶].



(ب)

(الف)

شکل ۵: الف) CSM و ب) CSP بر حسب جابجایی محوری اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (mm)

از شاخص همبستگی ماتریسی (CSF) برای تشخیص وجود عیب تغییر شکل شعاعی (مدل ۱ تا ۴) برای عیب در زوایای صفر تا ۳۶۰ درجه استفاده شد.

۳. تحلیل در حوزه زمان

در حوزه زمان با استفاده از دو آنتن فرستنده و گیرنده، امواج (پالس‌های گوسی فرایپهن باند (UWB) به طرف سیم‌پیچ ارسال می‌شوند و با تحلیل موج برگشتی وجود عیب در سیم‌پیچ آشکار می‌شود. اندازه-گیری‌ها با دستگاه PulseOn 220 و شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST انجام شده است.

۳.۱. مفهوم سیستم‌های رادار UWB

با توجه به استانداردهای وضع شده سیستم‌های UWB برای پهنای باند مطلق حداقل ۵۰۰ مگاهرتز یا بطور نسبی پهنای باند بزرگتر از ۲۰٪ تعریف شده است. پهنای باند نسبی توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$2 \frac{(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \quad (۸)$$

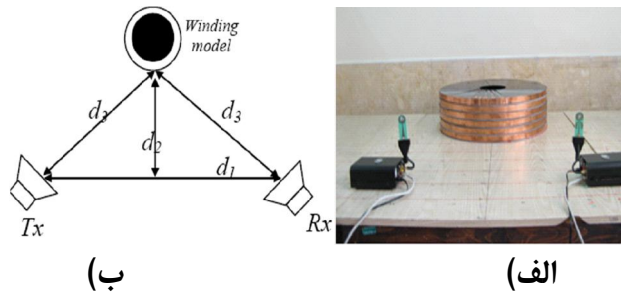
در رابطه فوق f_H فرکانس قطع $-10dB$ بالایی و f_L فرکانس قطع $-10dB$ پایینی است. علت استفاده از عدد $-10dB$ به جای مقدار $-20dB$ پایین بودن سطح توان سیستم‌های UWB و نزدیک بودن توان آن‌ها به سطح نویز است که سبب می‌شود اندازه‌گیری فرکانس قطع $-20dB$ بسیار مشکل شود. سیستم‌های UWB پالس‌هایی بسیار باریک با پهنای در حدود نانو ثانیه را ارسال می‌کنند.

یکی از قابلیت‌های مهم UWB توانایی انتقال اطلاعات با سرعت خیلی بالا در مسافت‌های کم است. سیستم‌های UWB پالس‌هایی بسیار باریک با پهنای در حدود نانو ثانیه را ارسال می‌کنند. این پالس خیلی کوتاه با زمان صعود و نزول کم، دارای طیف خیلی وسیع و محتویات انرژی کم هستند.

از ویژگی‌های این سیستم‌ها توانایی عبور پالس‌ها از اشیاء، عدم نیاز به پهنای باند اختصاصی، هزینه کم تجهیزات، سرعت تبادل اطلاعات بالا، توان مصرفی پایین می‌باشد.

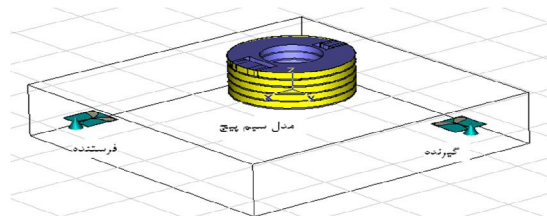
۳.۲. چیدمان آزمایش و شبیه‌سازی

همانطور که در شکل ۶ (الف و ب) ملاحظه می‌شود، نحوه قرارگیری آنتن‌های فرستنده و گیرنده با توجه به قابلیت‌های دستگاه PulseON به صورت بای‌استاتیک چیده می‌شوند. فاصله دو آنتن از هم d_1 ، فاصله مدل از مرکز خط واصل دو آنتن d_2 و d_3 فاصله فرستنده و گیرنده از مدل، می‌باشند. فاصله آنتن‌ها از زمین d_4 است.



شکل ۶: نحوه قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری و مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور

شکل ۷ مدل‌سازی این چیدمان در نرم‌افزار CST را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این مدل، مدل سیم‌پیچ در مرکز قرار گرفته و آنتن‌های فرستنده و گیرنده به فاصله ۶۰ سانتی‌متر از مرکز جسم و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به آن قرار گرفته‌اند (قابل ذکر است که فواصل، زاویه فوق و محل دیسک معیوب قابل تغییر است).



شکل ۷: مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CST

۳.۳. آنتن‌های فرستنده و گیرنده

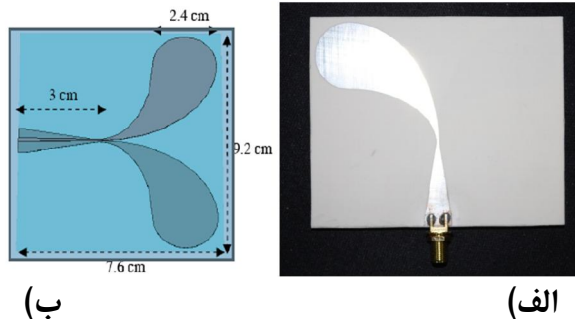
برای ارسال و دریافت سیگنال‌ها از آنتن‌های زیر استفاده می‌شود:

- آنتن دستگاه PulsON 220
- آنتن ویوالدی

آنتن دستگاه PulsON 220 امواج را در همه جهات ارسال می‌کند و نیز مالتی‌پس‌هایی از همه جهات دریافت می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود موج‌ارسالی از فرستنده در سطح وسیعی پخش

شود و درصد کمی از انرژی آن به مدل سیم پیچ برسد. علاوه بر این آنتن گیرنده مالتی پس هایی از تمام محیط دریافت می کند که پردازش سیگنال های دریافتی را مشکل تر می سازد. بنابراین از دو آنتن ویوالدی طراحی شده، استفاده شده است که الگوی تابشی محدودی دارند و کاربردهای زیادی در سیستم های UWB دارند [۷]. از مزیت مهم این آنتن ها تمرکز انرژی بیشتر و مقدار آن در واحد سطح می باشد و در این حالت بخش عمده ای از آن به هدف مورد نظر می رسد.

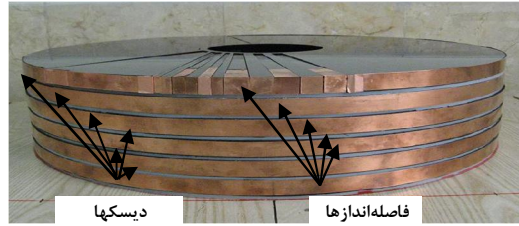
این آنتن در اصل یک آنتن شکافی تیپر شده می باشد و یکی از ویژگی های ذاتی آن پهنای باند امیدانسی خوب است. فرکانس کار آنتن های استفاده شده بین ۳ تا ۱۰ گیگا هرتز می باشد. از آنتن مذکور در فرکانس ۳٫۲ تا ۶٫۱ گیگا هرتز استفاده می شود. ساختار و ابعاد آنتن استفاده شده به صورت شکل ۸ می باشد.



شکل ۸: الف) آنتن ویوالدی ساخته شده ب) آنتن ویوالدی شبیه سازی شده

۳٫۴. جابجایی محوری

مدل سازی جابجایی محوری سیم پیچ ترانسفورماتور در چیدمان شکل ۹ و پارامترهای پیشنهادی جدول ۱ صورت می گیرد. با توجه به چیدمان معرفی شده، به منظور مدل سازی جابجایی محوری سیم پیچ ترانسفورماتور، کل مدل سیم پیچ به صورت یکجا و با هم با گام های جابجایی محوری برابر ۰٫۲ میلی متر شده به سمت بالا یا پایین حرکت داده می شوند (محل آنتن های فرستنده و گیرنده تغییر نمی کنند). میزان جابجایی محوری برابر ۳ سانتی متر (بازه ی ۱۵- میلی متر تا ۱۵+ میلی متر) می باشد. حال سیگنال ارسالی توسط آنتن فرستنده ارسال و پس از عبور از محیط انتشار و برخورد به مدل سیم پیچی، توسط آنتن گیرنده دریافت می شود.



شکل ۹: نمایی از مدل نمونه آزمایشگاهی ساخته شده

جدول ۱: مشخصات دیسک‌های ساخته شده برای مدل سیم پیچ

قطر دیسک اصلی	۶۰ cm
قطر دیسک فاصله انداز	۶۰ cm
ضخامت دیسک اصلی	۲ cm
ضخامت دیسک فاصله انداز	۰,۵ cm

۳,۵. تغییر شکل شعاعی

برای مدل کردن تغییر شکل شعاعی قطعه‌هایی با پهنای ۰,۵، ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متر بر روی یکی از دیسک‌ها ایجاد شده است. در این مدل قطعه‌ها قابلیت حرکت در بازه ۲,۵- تا ۲,۵+ سانتی‌متر را دارا هستند. جدول ۲ ابعاد قطعه‌های ایجا شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مساحت شیارهای ایجاد شده بر روی شبیه ساز

شیارهای ایجاد شده	ابعاد قطاع (cm×cm)	مساحت قابل جابجایی
S _۱	۲×۰,۵	۱
S _۲	۲×۱	۲
S _۳	۲×۲	۴
S _۴	۲×۴	۸

باتوجه به شکل ۱۰ که نمایی از بالای مدل سیم‌پیچی ساخته شده است، مشخص است که شیارهای ایجادشده عمود بر قطر دیسک می‌باشند. بنابراین برای مدل کردن تغییر شکل شعاعی قطاع‌ها مستقیماً به سمت بیرون کشیده می‌شوند.

قابل ذکر است که برای تفکیک عیوب تغییر شکل شعاعی مختلف مجموع حجم برآمدگی قطاع‌ها در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۰: نمونه از قطاع‌های ایجاد شده بر روی مدل سیم‌پیچ

۳.۶. شاخص‌های پیشنهادی جهت تشخیص عیوب سیم‌پیچ

از شاخص فاصله اقلیدسی دامنه MED، در N نمونه زمانی مختلف، برای موقعیت X نسبت به موقعیت مرجع، برای تشخیص جابجایی محوری سیم‌پیچ استفاده شده است.

با اندازه‌گیری‌های انجام شده مشخص شد که تغییر شاخص MED با تغییر شکل شعاعی متناسب بوده و از آن می‌توان به منظور تشخیص و تغییر شکل شعاعی استفاده کرد.

با ایجاد تغییرات بر روی مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور و اندازه‌گیری‌ها روی مدل تغییر یافته می‌توان از معیار میانگین قدر مطلق فاصله^۱ (MADC) وجود عیب در سیم‌پیچ را اندازه‌گیری نمود. تحلیل داده‌های ذخیره شده برای آشکارسازی تغییرات مکانیکی که بر روی سیم‌پیچ ایجاد شده شامل دو بخش اساسی به شرح ذیل می‌باشند:

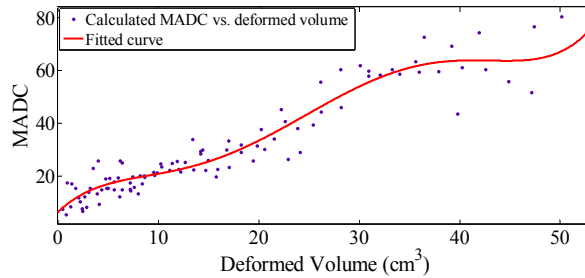
(۱) انتخاب یک پنجره زمانی مناسب با روش TOA^۲ [۸]

(۲) مقایسه شکل موجهای مربوط به هر آزمایش با حالت مرجع با استفاده از (MADC)

1 Mean Absolute Distance Criterion

2 Time Of Arrival

بنابراین اندازه MADC می‌تواند به عنوان معیاری برای تفکیک عیوب جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی و تخمین حجم تغییر شکل شعاعی به کار رود. به طور مثال پارامتر MADC برای حجم‌های مختلف تغییر شکل شعاعی که به ترتیب صعودی مرتب در شکل ۱۱ ارائه شده است [۹].

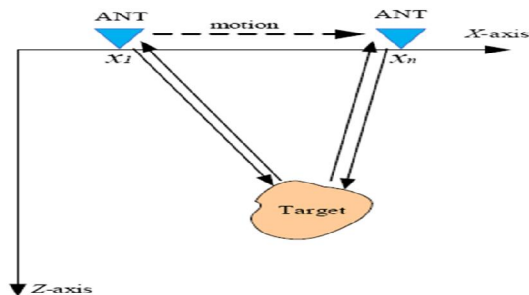


شکل ۱۱: شاخص MADC محاسبه شده برای حجم‌های مختلف تغییر شکل

۴. تصویربرداری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی

تصویربرداری از سیم‌پیچ ترانس که داخل تانک و در میان روغن قرار گرفته، با استفاده از دوربین‌های اپتیک امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای بدست آوردن تصاویر مناسب از سیم‌پیچ از روش‌های تصویربرداری راداری کمک گرفته میشود. این روش‌ها همانند روش استفاده از امواج الکترومغناطیسی براساس 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 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 تصویربرداری به روش آنتن با دهانه مصنوعی^۱ (SAR) گفته می‌شود. نحوه‌ی تصویربرداری به روش SAR در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

^۱ Synthetic Aperture Radar (SAR)



شکل ۱۲: تصویربرداری به روش SAR

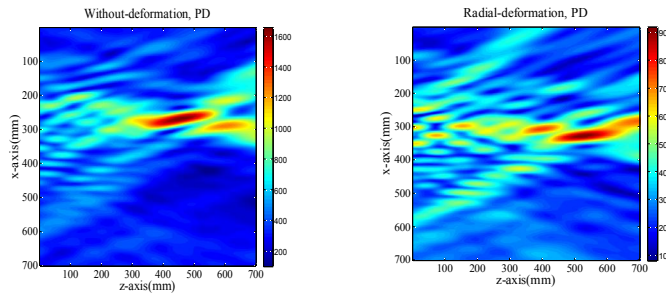
در روش‌های تصویربرداری به کمک امواج الکترومغناطیسی، یک پالس باریک، از نوع پالس UWB توسط آنتن فرستنده به سمت هدف ارسال شده و امواج بازتاب شده از هدف توسط آنتن گیرنده، دریافت می‌گردد.

این روش‌ها بسته به نوع پالس ارسالی و تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به انواع مختلفی دسته‌بندی می‌گردند.

سیگنال زمانی دریافتی در هر موقعیت آنتن یک اسکن نامیده می‌شود. مجموعه سیگنال‌های دریافت شده در فرآیند اسکن‌گیری به عنوان داده‌های خام برای به‌دست آوردن تصویر به کار گرفته می‌شوند.

پالس UWB ارسالی توسط فرستنده به خاطر وجود پدیده چند مسیری به اشیای مختلف برخورد کرده و بازتاب آن به گیرنده می‌رسد. بنابراین موج ارسالی چندین مسیر مختلف از فرستنده تا گیرنده را طی مینماید. برای بدست آوردن تصویر با کیفیت مطلوب از سیگنال‌های دریافتی، چند مرحله کالیبراسیون و پردازش بر روی آنها انجام می‌گیرد.

با استفاده از سیگنال‌های دریافت شده در این فرآیند و با کمک الگوریتم‌های مهاجرت فاز والگوریتم مهاجرت کیرشهف، میتوان تصویری از سیم‌پیچ ترانسفورماتور به دست آورده که با تجزیه و تحلیل آن محل و میزان تغییر شکل شعاعی سیم پیچ مشخص می‌گردد. به طور مثال تصویر بدست آمده از یک مدل سیم پیچ با استفاده از روش اختلاف فاز در دو حالت سالم حالت معیوب را در شکل ۱۳ مشاهده می‌نمایید [۸].



(ب)

(الف)

شکل ۱۳: تصویر به دست آمده از سیم پیچ مدل یک با استفاده از روش اختلاف فاز. الف: حالت سالم ب: حالت معیوب

۵. الگوریتم استفاده از روش هذلولوی برای تعیین دقیق محل عیوب شعاعی

این روش، با تحلیل و پردازش سیگنالهای دریافتی به منظور تعیین مکان دقیق عیب تغییر شکل شعاعی ایجاد شده در راستای عمودی مدل سیم پیچ ترانس است. روش مطرح شده بر مبنای مکان هندسی اشکال در فضا است. در فضا مکان هندسی نقاطی که اختلاف فاصله آنها از دو نقطه ثابت مقدار ثابتی باشد هذلولوی گون نام دارد که آن دو نقطه ثابت کانون‌های آن هذلولوی گون می‌باشند. برای انجام آزمایش از دو آنتن گیرنده و یک آنتن فرستنده استفاده شده است.

اگر یک عیب در سیم پیچ ترانس رخ دهد دو آنتن گیرنده با فواصل زمانی متفاوت (t_1 و t_2) عیب را می‌بینند. می‌توان از این ویژگی استفاده کرد و مکان وقوع عیب را تشخیص داد. با داشتن سرعت انتشار سیگنال‌ها که همان سرعت نور است می‌توان اختلاف زمانی سیگنالهای دریافتی را به اختلاف فاصله تبدیل کرد. یعنی عیب از دید آنتن گیرنده اول در فاصله x_1 از آنتن گیرنده اول و از دید آنتن گیرنده دوم در فاصله x_2 از آنتن گیرنده دوم قرار دارد. اندازه x_1 و x_2 از رابطه زیر بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} x_1 &= t_1 \times c \\ x_2 &= t_2 \times c \end{aligned} \quad (9)$$

که C سرعت نور می‌باشد. بنابراین با داشتن t_1 و t_2 می‌توان فاصله عیب از دو آنتن گیرنده را بدست آورد.

اختلاف فاصله‌ها بدست آمده از دید آنتن‌های گیرنده است که ثابت هستند. بنابراین برای یک عیب که در یک مکان معینی اتفاق افتاده، اختلاف فاصله از دو نقطه ثابت (آنتن‌های گیرنده) بدست می‌آید. مکان هندسی نقاطی که اختلاف فاصله آنها از دو نقطه ثابت مقدار ثابتی باشد در فضا یک هذلولی گون است که کانون‌های آن آنتن‌های گیرنده هستند. بنابراین متناسب با یک عیب تغییرشکل شعاعی می‌توان یک هذلولی گون در نظر گرفت که عیب مورد نظر روی یک نقطه از آن قرار گرفته است. همچنین برای سیم پیچ ترانس که عیبها در یک راستای عمودی قرار گرفته اند و با توجه به اینکه هدف تعیین مکان عیب در این راستا می‌باشد و همچنین شکل چیدمان آزمایش، مکان هندسی مربوط به آن که باید با مکان هندسی هذلولی گون تلاقی داده شود یک مستطیل خواهد بود.

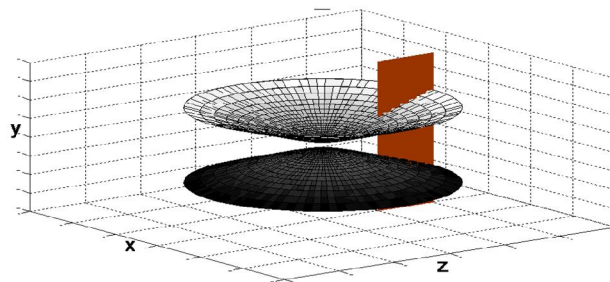
اگر محور ترانس را در راستای محور y ها در نظر بگیریم، به طور مثال اگر قطر مدل ترانس ۳۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۶۵ سانتی‌متر باشد معادله هذلولی گون و سطح مستطیل به صورت زیر است:

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} z = 0 \\ d \leq x \leq d + 32 \\ -32.5 \leq y \leq +32.5 \end{cases} \quad (11)$$

همان طور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد و از حل معادلات (۱۰) و (۱۱) منحنی بدست آمده از تلاقی دو مکان هندسی بخشی از یک هذلولی است که معادله آن به صورت زیر است:

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (12)$$



شکل ۱۴: تلاقی مکان هندسی ترانس و هذلولی گون

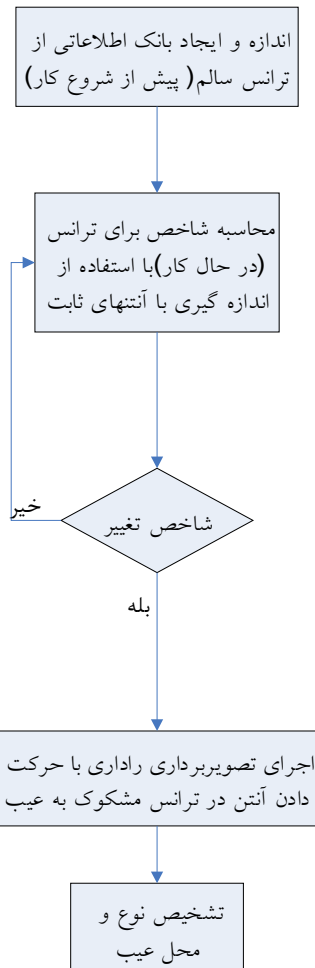
برای بدست آوردن هذلولی مربوط به یک عیب، حاصل از تلاقی مکان هندسی‌ها نیاز به اختلاف فاصله از آنتن‌های گیرنده است [۱۰]. نحوه بدست آوردن اختلاف فاصله به صورت زیر است: ابتدا در دو حالت سالم و عیب مدل سیم پیچ ترانس آنتن فرستنده سیگنال ارسالی را منتشر می‌کند و توسط دو آنتن گیرنده دریافت می‌شود. با توجه به فاصله عیب از آنتن گیرنده زمان وقوع اختلاف بین سیگنال حالت عیب و حالت سالم مدل سیم پیچ ترانس متفاوت خواهد بود. می‌توان از اختلاف سیگنال حالت عیب و حالت سالم سیم پیچ ترانس برای بدست آوردن زمان وقوع تغییرات در سیگنال‌های دریافتی استفاده نمود. چون فاصله آنتن‌های گیرنده نسبت به مکان وقوع عیب متفاوت می‌باشد، زمان وقوع تغییرات در سیگنال‌های دریافتی دو آنتن گیرنده یکسان نمی‌باشد. اختلاف زمان وقوع تغییرات از دید دو آنتن گیرنده برای یک عیب مشخص یک عدد ثابت است. می‌توان این اختلاف زمانی را با ضرب در سرعت انتشار سیگنال که سرعت نور است به اختلاف مکانی تبدیل کرد. و با استفاده از این اختلاف مکانی هذلولی مورد نظر بدست می‌آید [۱۱].

عمر نتیجه‌گیری

در این مقاله روش کلی پایش سیم‌پیچی ترانسفورماتور قدرت با استفاده از امواج الکترومغناطیسی در دو حوزه فرکانس و زمان جهت تشخیص جابجایی و تغییر شکل شعاعی بررسی شد. در حوزه فرکانس روش استفاده از پارامتر پراکندگی تنها در صورت برخورداری بودن ترانسفورماتور از سیستم مونتورینگ تخلیه جزئی به روش UHF، و فقط برای تشخیص وجود عیب توجیه‌پذیر است. در حوزه زمان از آنتن‌های فرایهن باند که برای اندازه‌گیری در محیط‌های دارای چند مسیری مناسبند، استفاده شد.

مراحل انجام کار بدین صورت می‌باشد که نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با نتایج اندازه‌گیری در دو حوزه تطبیق داده شده و با استفاده از تعریف شاخص، تشخیص وجود عیب جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی انجام شد. سپس با فرض دانستن عیب از نوع محوری، میزان عیب با استفاده از روش درخت تصمیم‌گیری، نزدیکترین همسایگان k و شبکه عصبی تخمین زده شد. در آخرین مرحله با فرض دانستن نوع عیب با استفاده روش شناسایی الگو و کلاسه‌بندی شامل بیزین، شبکه عصبی، نزدیکترین همسایگان k ، پنجره پارزن و ماشین بردار پشتیبان تشخیص نوع، میزان و محل عیب انجام می‌شود و در نهایت میتوان از تعدد آنتن برای افزایش کیفیت تشخیص عیب و از بین بردن وابستگی به بانک اطلاعاتی و تصویر برداری راداری برای بازرسی دقیق از ترانس استفاده نمود.

با توجه به روش‌های ارائه شده فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص عیوب جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی به شکل زیر پیشنهاد می شود:



شکل ۱۴: فلوجارت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص عیوب جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی

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 Short-Circuit Reactance," in Proc. International Conference on Power System Technology, 1998.
- [2] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava "Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse test method," in Proc. 11th International Symposium on High Voltage Engineering, 1999.
- [3] S.Naiqiu, Z.Can, H.Fang, L.Qisheng and Z.Lingwei, „Study on Ultrasonic Measurement Device for Transformer Winding Deformation", IEEE ,2002,pp.1401-1404.
- [4] م. اخوان حجازی، "تشخیص جابجایی و تغییر شکل سیم پیچی ترانس قدرت بوسیله امواج الکترومغناطیسی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شهریور ۱۳۸۵، تهران، ایران.
- [5] مریم السادات اخوان حجازی علی آل حسینی و گئورگ قره پتیان، "ارائه شاخص جهت تشخیص میزان جابجایی محوری سیم پیچ ترانسفورماتور به روش استفاده از پارامترهای پراکندگی"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۷-۱۹ آبان ۱۳۸۹ تهران - ایران.
- [6] م. اخوان حجازی، "اندازه گیری جابجایی محوری و شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور به کمک امواج الکترومغناطیسی بر روی یک مدل آزمایشگاهی" رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شهریور ۱۳۹۰، تهران، ایران.
- [7] Mehdipour, K. Mohammadpour- Aghdam, R. Faraji- Dana, "Complete Dispersion Analysis of Vivaldi Antenna for Ultra Wide Band," Progress In Electromagnetic Research, PIER 77, 85-96, 2007.
- [8] M. Aftanas, J. Rovnakova, M. Drutarovsky, D. Kocur, "Efficient method of TOA estimation for through wall imaging by UWB radar," IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2008.

- [9] 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 Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1649-1659, June 2012 (ISI-ranked)
- [10] Hesam Rahbari Magham M.A. Hejazi M. S. Naderi and G.B. Gharehpetian, “Radial Deformation Location Determination in Axial Direction of Power Transformer Winding using UWB Static Antennas and Hyperbolic Method”, 27-th International Power System Conference, Nov. 12-14, 2012, Tehran, Iran.
- M.A. Hejazi, J. Ebrahimi and G.B. Gharehpetian, “Determination of Radial Deformation Location in Power Transformer Winding Using UWB Antennas and Hyperbolic Method”, 26-th International Power System Conference, 31 Oct.-2 Nov. 2011, Tehran, Iran.