

## تشخیص عیب تغییر شکل شعاعی با استفاده از روش های تحلیل پاسخ فرکانسی و تصویر برداری راداری با امواج الکترومغناطیسی به همراه تست بر روی ترانس تعمیری 30MVA

حمیدرضا طبرسا ، مریم السادات اخوان حجازی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر ، دانشگاه کاشان

کاشان ، ایران

حسین کرمی ، گئورگ قره پتیان

دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران ، ایران

### ۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از مهمترین و گرانقیمت ترین تجهیزات و جزء لاینفک شبکه های انتقال انرژی می باشند که خروج آنها از مدار به قابلیت اطمینان شبکه آسیب جدی وارد کرده و باعث ایجاد هزینه های زیادی می شود. این تجهیزات ممکن است دچار عیب های مختلفی شوند. عیوب مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور شامل تغییر شکل شعاعی و تغییر شکل محوری سیم پیچ میگردند. 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.

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 آنها نیاز به خارج از مدار کردن ترانسفورماتور داشته و برخی دیگر به صورت برخط اجرا می گردند. روش پاسخ فرکانسی به عنوان یک روش مهم و شناخته شده در زمینه تشخیص عیوب مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد. تحقیقات عملی نشان می دهند که عیوب مکانیکی تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ها روی توابع تبدیل اثر می گذارند [۱]. روش تابع تبدیل یک روش مقایسه ای است. یعنی اندازه گیری های جدید را باید با اندازه گیری های مرجعی در کنار هم قرار داده و اگر انحرافات قابل ملاحظه ای در نتایج اندازه گیری ها مشاهده شود باید جهت تشخیص وقوع عیب این انحرافات را مورد بررسی و تحلیل قرار داد [۱-۳].

چکیده — پایش ترانسفورماتور یکی از مهمترین مباحث روز محققان به منظور اطلاع از وضعیت داخل ترانسفورماتور است. با دانستن اطلاعات کامل تر از وضعیت ترانسفورماتور، در کنار تعمیرات دوره ای، تعمیرات بر اساس شرایط عملکرد نیز می تواند انجام شود. جابجایی مکانیکی سیم پیچ ترانسفورماتور یکی از عوامل اصلی خرابی و از بین رفتن آن می باشد. این جابجایی ممکن است در راستای شعاع (تغییر شکل شعاعی) یا در راستای عمودی (جابجایی محوری) سیم پیچ باشد. تاکنون روش های متفاوتی برای تشخیص عیب تغییر شکل شعاعی پیشنهاد شده است که برخی آنها به صورت برخط (تصویر برداری راداری) قادر به تشخیص تغییر شکل شعاعی می باشند و برخی (پاسخ فرکانسی) نیز باید ترانس از مدار خارج شود و جهت تشخیص عیب مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله روش پاسخ فرکانسی در کنار روش برخط مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج نشان می دهد روش های برخط دارای مزایای بیشتری از جمله عدم نیاز به از مدار خارج کردن ترانس، دقت و قطعیت بالاتر نسبت به روش های موجود دارد. تست روش ها بر روی یک ترانس تعمیری 30MVA، صحت نتایج را تایید می کند.

**واژه های کلیدی — ترانسفورماتور؛ عیب یابی؛ تصویربرداری راداری؛**

**تابع تبدیل؛ پاسخ فرکانسی**

ترانسفورماتور مقایسه گردد. بدین منظور از سه روش مقایسه استفاده می‌شود [۷]:

- مقایسه مبتنی بر زمان: بطوریکه اندازه‌گیری‌ها بر روی یک ترانسفورماتور و در زمان‌های مختلف انجام می‌پذیرد. این روش نیازمند وجود اطلاعات قبلی درباره ترانسفورماتور می‌باشد که البته برای بسیاری از ترانسفورماتورهای موجود در شبکه برق سراسری وجود ندارد.
- مقایسه مبتنی بر ساختار متقارن: اندازه‌گیری‌ها بر روی هر یک از سه فاز یک ترانسفورماتور انجام می‌شود و نتایج مقایسه می‌گردد. چنانچه نتایج بدست آمده برای سه فاز کاملاً بر هم منطبق باشند، حاکی از سلامت فیزیکی ترانسفورماتور می‌باشد.
- مقایسه مبتنی بر طراحی یکسان: اندازه‌گیری‌ها بر روی ترانسفورماتورهای دارای طراحی یکسان، ساخته شده توسط یک شرکت سازنده، انجام می‌پذیرد. به چنین ترانسفورماتورهایی اصطلاح ترانسفورماتورهای خواهر اطلاق می‌گردد.

## ۲.۲. روش‌های موجود جهت مقایسه تابع تبدیل

### ترانسفورماتورها

در این بخش به معرفی روش‌های گوناگون پرداخته می‌شود. جهت مقایسه توابع تبدیل بدست آمده از نتایج اندازه‌گیری در مراجع معرفی شده‌اند [۸]. مهمترین این روش‌ها عبارتند از:

- حداکثر اختلاف ادمیتانس‌ها (MD): تفاضل نقطه به نقطه دو تابع تبدیل اندازه‌گیری شده در حالت سالم و معیوب محاسبه شده و سپس حداکثر مقدار آن مدنظر قرار می‌گیرد:

$$MD = \max[TF_1(f) - TF_2(f)] \quad (1)$$

- اختلاف مساحت زیر منحنی ادمیتانس (AUC): سطح زیر منحنی تابع تبدیل ادمیتانس به طور جداگانه در دو حالت سالم و معیوب با انتگرال‌گیری تعیین می‌شود:

$$AUC = \int [TF(f)]. df \quad (2)$$

- قدرمطلق اختلاف مساحت ادمیتانس (DAAUC): قدر مطلق تفاضل تابع تبدیل ادمیتانس در دو حالت سالم و معیوب محاسبه شده، سپس با انتگرال‌گیری سطح زیر منحنی آن بدست می‌آید:

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 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 [۶-۴].

در بخش دوم این مقاله روش آنالیز پاسخ فرکانسی و روش‌های موجود جهت مقایسه توابع تبدیل ارائه شده است و در بخش سوم نحوه پردازش سیگنال در روش تصویر برداری راداری و استفاده از الگوریتم مهاجرت کیرشهف جهت بدست آوردن تصویر دوبعدی از سیگنال‌های دریافتی توسط آنتن‌ها توضیح داده شده است. در بخش چهارم نتایج تست بر روی یک ترانس تعمیری آورده شده است و در بخش پنجم به بیان نتایج پرداخته شده است.

## ۲. آنالیز پاسخ فرکانسی

### ۲.۱. نحوه تشخیص عیب مکانیکی در آنالیز پاسخ

#### فرکانسی

روش آنالیز پاسخ فرکانسی یک روش مناسب برای بررسی و تشخیص عیوب و صدمات فیزیکی ترانسفورماتور می‌باشد. این روش بر این اساس استوار است که تابع تبدیل مربوط به سیم پیچ‌های یک ترانسفورماتور جزو ویژگی‌های منحصر به فرد هر ترانسفورماتور یا سیم پیچ‌های آن می‌باشد.

دو روش برای به دست آوردن تابع تبدیل (یا تابع انتقال) ترانسفورماتور وجود دارد. در روش اول، یک ولتاژ سینوسی (با فرکانس‌های مختلف از چند هرتز تا چند مگا هرتز) به یکی از سیم پیچ‌های ترانسفورماتور اعمال شده و نسبت بین این ولتاژ اعمالی و ولتاژ (یا جریان) اندازه‌گیری شده در همان سیم پیچ یا سیم پیچ دیگر در یک محدوده فرکانسی وسیع تعیین می‌شود. در روش دوم، بجای اعمال ولتاژ سینوسی، یک ولتاژ ضربه به یکی از سیم پیچ‌های ترانسفورماتور اعمال می‌شود. این ولتاژ ضربه اعمالی و ولتاژ (یا جریان) اندازه‌گیری شده در همان سیم پیچ یا سیم پیچ دیگر به حوزه فرکانس منتقل شده و از تقسیم آنها بر یکدیگر، تابع تبدیل ترانسفورماتور تعیین می‌شود.

ارزیابی وضعیت سیم پیچ‌های ترانسفورماتور با استفاده از روش <sup>۱</sup>FRA، از طریق مقایسه انجام می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، پس از اندازه‌گیری و بدست آوردن تابع تبدیل، باید تابع تبدیل بدست آمده با تابع تبدیل متناظری از

<sup>1</sup> Frequency Response Analysis

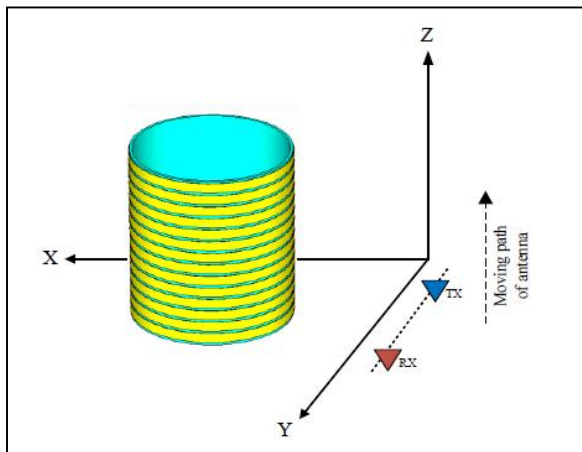
بکارگیری یک روش مطمئن و ساده دارای اهمیت می‌باشد. در مقاله [۸] روش - های مختلف تشخیص عیب سیم‌پیچی‌ها با استفاده از مقایسه توابع تبدیل، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و نهایتاً ملاحظه شده است که روش CC می‌تواند به عنوان یکی از مطمئن‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها در عیب‌یابی سیم‌پیچ‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

### ۳. روش تصویر برداری راداری

#### ۳.۱. نحوه تشخیص تغییر شکل شعاعی در تصویر

##### بردارای راداری

در روش تصویر برداری راداری به کمک امواج الکترومغناطیس، برای بدست آوردن تصویر، یک پالس UWB توسط آنتن فرستنده به سمت هدف ارسال شده و توسط یک آنتن گیرنده، امواج بازتاب شده از هدف دریافت می‌گردد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، برای بدست آوردن یک تصویر دوبعدی، موقعیت آنتن‌ها را بر روی محور Z تغییر داده و در نقاط مختلف محور Z، ارسال پالس و دریافت بازتاب آن تکرار می‌گردد [۱۰-۹].



شکل ۱: نمای سه بعدی شبیه‌سازی

هنگامی که پالس UWB ارسال می‌گردد، امواج ارسالی به هدف برخورد نموده و در تمام جهات به طور یکنواخت منعکس می‌گردد. با توجه به زاویه دید وسیع آنتن، با نمونه برداری سیگنال منعکس شده از هدف در تمام موقعیت‌هایی که شی توسط آنتن دیده می‌شود، اسکن انجام می‌شود.

شکل ۲ سیگنال حاصل از یک اسکن را نشان می‌دهد. این سیگنال از ۳ قسمت اصلی تشکیل شده است، قسمت اول که سیگنال کوتاه‌ترین مسیر از فرستنده به گیرنده را طی کرده و دارای کمترین تاخیر است (crosstalk)، قسمت دوم سیگنال‌های بازتاب شده از هدف می‌باشد که تاخیر آن متناظر با

$$DAAUC = \int | \{ [TF_1(f)] - [TF_2(f)] \} | \quad (3)$$

- ضریب همبستگی (CC): ضریب همبستگی بین دو تابع تبدیل در دو حالت سالم و معیوب می‌باشد که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$CC = \frac{\sum_{i=0}^N [TF_1^*(f_i) \cdot TF_2^*(f_i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [TF_1^*(f_i)]^2 \cdot [TF_2^*(f_i)]^2}} \quad (4)$$

که در رابطه فوق منظور از  $TF_1^*(f_i)$  و  $TF_2^*(f_i)$  عبارتست از:

$$TF_1^*(f_i) = |TF_1(f_i)| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF_1(f_i)|$$

$$TF_2^*(f_i) = |TF_2(f_i)| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF_2(f_i)|$$

- DABS: DABS معرف مجموع قدر مطلق اختلاف بین دو تابع تبدیل است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$DABS = \frac{\sum_{i=1}^N |TF_1(f_i) - TF_2(f_i)|}{N} \quad (5)$$

- ASLE: این عبارت نشان‌دهنده قدر مطلق خطای لگاریتمی تابع تبدیل در دو حالت سالم و معیوب می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} TF_1(f_i) - 20 \log_{10} TF_2(f_i)|}{N} \quad (6)$$

- SD: نمایانگر انحراف استاندارد بوده که به صورت متوسط تغییرات تابع تبدیل در دو حالت سالم و معیوب تعریف شده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$SD = E[\Delta F(f) - E(\Delta F(f))] \quad (7)$$

$$E(\Delta F(f)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta F(f_i)$$

در رابطه فوق منظور از  $\Delta F(f)$  تغییرات تابع تبدیل بوده، که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta F(f_i) = \frac{|TF_1(f_i)| - |TF_2(f_i)|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF_1(f_i)|} \quad (8)$$

- مقدار مورد انتظار (EV): مقدار مورد انتظار خطای تابع تبدیل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E[\Delta F(f)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta F(f_i) \quad (9)$$

در روابط ذکر شده در بالا،  $TF_1(f)$  و  $TF_2(f)$  به ترتیب تابع تبدیل مربوط به حالت سالم و معیوب سیم‌پیچی ترانسفورماتور می‌باشد.

در بالا روش‌های مختلفی جهت مقایسه توابع تبدیل بدست آمده در دو حالت سالم و معیوب ارائه شده ولی به دلیل پراکندگی و تعدد این روش‌ها،

دریافت شده و به صورت سیگنال زمانی ذخیره می‌گردند. مجموعه داده‌های دریافتی به صورت یک تابع دومتغیره گسسته  $f(x_k, t)$  ذخیره می‌گردد.

۲- دو مرحله پردازش شامل یکسان سازی مبدأ زمانی و انتخاب پنجره زمانی مناسب بر روی سیگنال‌های دریافتی انجام می‌گردد.

۳- محور  $X$  به  $M$  قسمت و محور  $Z$  به  $N$  قسمت تقسیم می‌گردد. بنابراین تعداد  $M \times N$  پیکسل خواهیم داشت. مختصات هر پیکسل را با  $(x_i, z_j)$  نشان می‌دهیم که  $i$  شماره قسمت های روی محور  $X$  و  $j$  شماره قسمت های روی محور  $Z$  می‌باشد. مختصات هر

المان  $P_{j,k} = (x_j, z_k)$  می‌باشد.

۴- پارامترها را مقدار دهی اولیه نمایید.

$$i=1, j=1, k=1, \Psi = [0]_{M \times N}, K \quad (10)$$

که در آن  $K$  تعداد نقاط اندازه‌گیری در راستای محور  $X$  می‌باشد.

۵- تفریق زمانی  $f(x_k, t)$  را محاسبه نموده و آن را  $h$  بنامید.

$$\forall t: \quad h(x_k, t) = f(x_k, t+1) - f(x_k, t) \quad (11)$$

۶- فاصله المان  $P_{i,j}$  را از نقطه مشاهده  $k$  ام  $(x_k)$  محاسبه نمایید.

$$R = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + z_j^2} \quad (12)$$

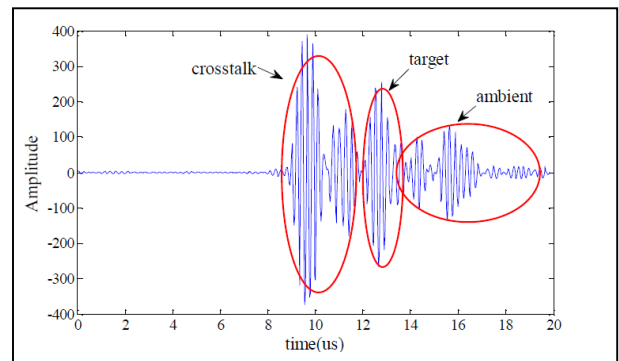
۷-  $\cos \theta$  با استفاده از نسبت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\cos \theta = \frac{z_j}{R} \quad (13)$$

۸- با استفاده از رابطه بازگشتی زیر  $\Psi(x_i, z_j)$  محاسبه می‌گردد.

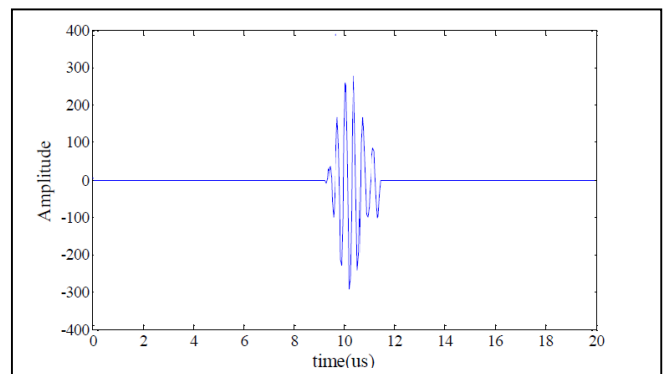
$$\Psi(x_i, z_j) = \Psi(x_i, z_j) + \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\cos \theta}{R \cdot c} \cdot h(x_k, t) \right) \Bigg|_{t=2R/c} \quad (14)$$

فاصله هدف از آنتن است، قسمت سوم سیگنال که بیشترین تاخیر را دارد، بازتاب ناشی از برخورد امواج به محیط اطراف است.



شکل ۲: نمونه سیگنال دریافتی در گیرنده

جهت بدست آوردن تصویر و پردازش داده‌ها ابتدا مبدأ زمانی هر یک از سیگنال دریافتی در موقعیت‌های مختلف آنتن را به مبدأ زمانی شیفته داده، به عبارتی اسکن‌ها با یکدیگر همزمان می‌گردند. برای تشخیص مبدأ زمان از اولین پیک سیگنال دریافتی کمک گرفته می‌شود. تاخیر اولین پیک سیگنال دریافتی (crosstalk) نسبت به اولین پیک ارسالی (مبدأ زمان) برابر فاصله بین دو آنتن تقسیم بر سرعت موج می‌باشد. با دانستن این تاخیر و زمان اولین پیک سیگنال دریافتی مبدأ زمان محاسبه می‌گردد. در مرحله دوم با انتخاب پنجره زمانی مناسب که در برگرنده هدف می‌باشد، بخش‌های ناخواسته سیگنال دریافتی حذف می‌گردد. سیگنال دریافتی پس از این دو مرحله پردازش برای هر یک از موقعیت‌های آنتن روی محور  $Z$ ، در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیگنال در مرحله بعد برای بدست آوردن تصویر با استفاده از الگوریتم مهاجرت کیرشهف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

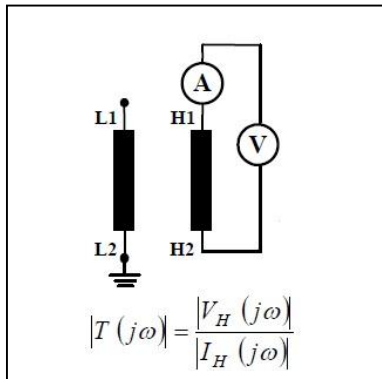


شکل ۳: سیگنال بدست آمده بعد از دومرحله پردازش

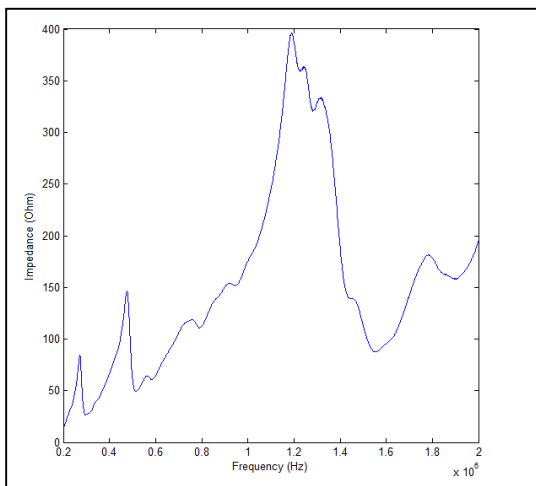
### ۳.۲. الگوریتم مهاجرت کیرشهف

۱- آنتن‌های فرستنده و گیرنده به صورت همزمان بر روی محور  $X$  جایجا شده و امواج بازتابی در نقاط مختلف محور  $X$  ( $x=x_k$ )

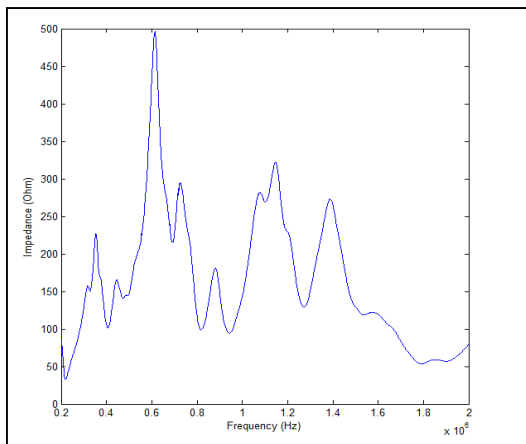
مقدار اندازه امپدانس سیم‌پیچ‌های فشار قوی در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. باتوجه به اینکه ترانس تعمیری می‌باشد و اطلاعات اولیه آن در دسترس نمی‌باشد از مقایسه بر مبنای ساختار متقارن استفاده شده است در نتیجه با اندازه‌گیری امپدانس هر سه فاز، به مقایسه آنها می‌پردازیم.



شکل ۴: مدار اندازه‌گیری تابع تبدیل



شکل ۵: تابع تبدیل (امپدانس) سیم پیچ فشار قوی فاز A (فاز معیوب)



شکل ۶: تابع تبدیل (امپدانس) سیم پیچ فشار قوی فاز B (فاز سالم)

۹-  $k=k+1$  قرار دهید. در صورتی که  $k \leq K$  بود، به مرحله ۵ بروید. در غیر اینصورت به مرحله بعد بروید.

۱۰-  $i=i+1$  قرار دهید. در صورتی که  $i \leq M$  بود به مرحله ۵ بروید در غیر اینصورت به مرحله بعد بروید.

۱۱-  $j=j+1$  قرار دهید. در صورتی که  $j \leq N$  بود به مرحله ۵ بروید. در غیر اینصورت به مرحله بعد بروید.

۱۲- مقدار تابع دو متغیره  $\Psi(x_i, z_j)$  در هر یک از نقاط صفحه X-Z بیانگر میزان بازتاب موج در آن نقطه است. این تابع را به صورت یک تصویر دوبعدی که رنگ آن در هر نقطه نماینگر قدرمطلق مقدار تابع در آن نقطه می‌باشد، رسم نمایید. در تصویر به دست آمده هدف به صورت دوبعدی مشخص می‌گردد.

۱۳- پایان

## ۴. تست بر روی یک ترانسفورماتور 30MVA

### ۴.۱. تست پاسخ فرکانسی

در بخش قبل روش‌های موجود جهت آنالیز پاسخ فرکانسی ارایه گردید و همانطور که در [۸] نشان داده شده است روش CC یکی از روش‌های مطمئن، ساده و با دقت بالا می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات دستگاه اندازه‌گیری ارایه شده است.

جدول ۱: مشخصات دستگاه اندازه‌گیری در آزمایش پاسخ فرکانسی

فرکانس ابتدایی	۲۰۰ KHz
فرکانس پایانی	۲ MHz
نوع مد	خطی
کابل اندازه‌گیری	کواکسیال با طول یکسان
ولتاژ ورودی	۱۷
دستگاه آنالیزر	Impedance Analyser WAYNE KERR 6500B

شماتیک مدار محاسبه تابع تبدیل در شکل ۴ نشان داده شده است. امپدانس دو سر هر فاز را از فرکانس ۲۰۰ KHz تا ۲ MHz در ۱۶۰۰ گام به صورت خطی توسط دستگاه اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷

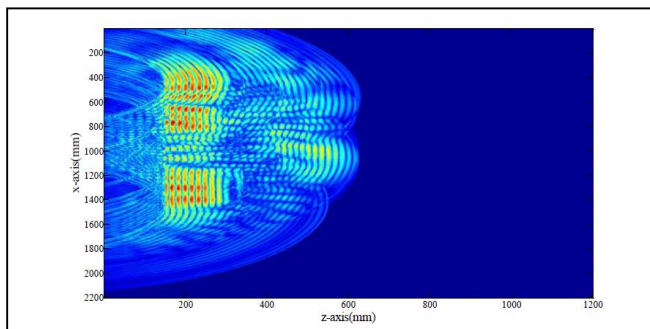
## ۴.۲. تصویربرداری راداری

در بخش سوم الگوریتم کیرشلف به منظور بدست آوردن یک تصویر دوبعدی از ترانسفورماتور ارائه گردید. در این بخش، نشان داده خواهد شد که با پیاده‌سازی این الگوریتم بر روی یک ترانسفورماتور واقعی 30MVA، که یک سیم‌پیچ تعمیری از طرف برق منطقه‌ای تهران بود، می‌توان عیب شعاعی سیم‌پیچ را تشخیص داد. مشخصات سیم‌پیچ و ست آپ آزمایش در جدول ۳ آمده است.

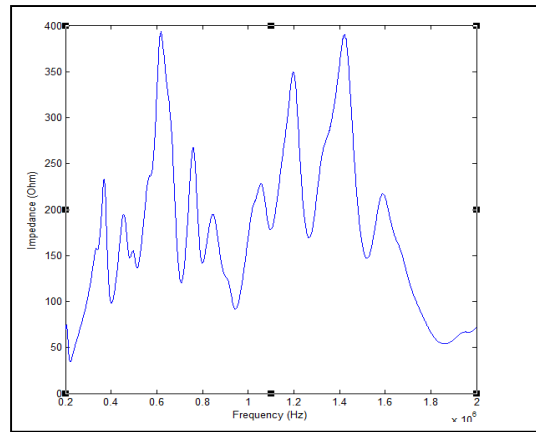
جدول ۳: مشخصات ترانسفورماتور و سیستم آزمایش

۱۰۰ سانتی‌متر	قطر استوانه ترانسفورماتور
۸۰ سانتی‌متر	فاصله آنتن‌ها از یکدیگر
۷۲ سانتی‌متر	ارتفاع آنتن‌ها از زمین در ابتدا
۱۸۲ سانتی‌متر	ارتفاع آنتن‌ها از زمین در انتها
۲ سانتی‌متر	فاصله هر دو اسکن متوالی
۵۵	تعداد گام‌های اندازه‌گیری
۳ فاز	تعداد فازهای ترانسفورماتور
۵۰ سانتی‌متر	فاصله آنتن‌ها از ترانسفورماتور
۱۰۰	تعداد هر اسکن در هر گام
50ms	فاصله زمانی بین پالس‌ها ارسالی
ویوالدی	نوع آنتن‌ها
30MVA	نوع ترانسفورماتور مرجوعی

همانطور که از شکل مشخص است پس از نصب آنتن‌ها بر روی یک پایه از جنس فوم (قابلیت انعکاس ضعیفی دارد)، 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 داده‌های نامناسب خارج شده و برای هر گام میانگین‌گیری انجام شده است. سیم‌پیچ مورد مطالعه دارای دو حالت سالم و معیوب می‌باشد. در حالت سالم تصویر ترانسفورماتور بدست آمده و در حالت معیوب نیز یک تغییر شکل (فرورفتگی) در بالای سیم‌پیچ ایجاد شده است.



شکل ۹: تصویر فاز سالم



شکل ۷: تابع تبدیل (امپدانس) سیم‌پیچ فشار قوی فاز C (فاز سالم)

در جدول ۲ ضریب همبستگی سیم‌پیچ فشار قوی فازهای مختلف محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به ضریب همبستگی بالا سیم‌پیچ فازهای B و C می‌توان نتیجه گرفت که سیم‌پیچ فازهای B و C بیشترین شباهت هندسی را به یکدیگر دارند و با توجه به اینکه سیم‌پیچ فاز A و فاز B و همچنین سیم‌پیچ فاز A و فاز C، ضریب همبستگی بسیار کمی دارند، تغییر شکل هندسی یا به عبارتی جابجایی محوری یا شعاعی در سیم‌پیچ فاز A اتفاق افتاده است. در شکل ۸ تصویر ترانس و ست آپ آزمایش در این تست نشان داده شده است.

جدول ۲: ضریب همبستگی سیم‌پیچ فشارقوی فازهای مختلف

ضریب همبستگی (CC)	فاز
۰/۲۴۸۸	A-B
۰/۳۲۵۷	A-C
۰/۹۰۰۱	B-C



شکل ۸: تست ترانس با استفاده از دستگاه امپدانس آنالایزر

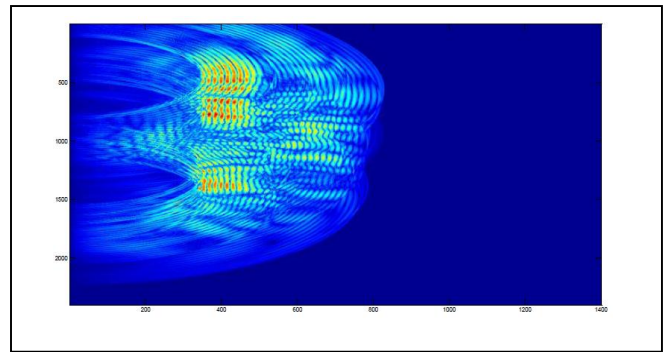
دیگر جهت تشخیص عیب مکانیکی در سیم‌پیچ فازها نمی‌باشد و براساس تصویر بدست آمده می‌توان با قطعیت عیوب مکانیکی را تشخیص داد.

### قدردانی

نویسندگان مقاله از گروه ماشین انتقال قدرت بابت زحمتی که در فراهم آوردن محیط و شرایط آزمایش نموده‌اند، کمال تشکر سپاسگذاری را دارند.

### منابع

- [1] E.Rahimpour, et al "Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, No.2, APRIL 2003, pp 493-309.
  - [2] K.Feser, et al " The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit or 30 Years of Service ", Cigre 2000
  - [3] J.Christian and K.Feser," Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.1, JANUARY 2004, pp 214-220.
  - [4] 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.
  - [5] 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.
  - [6] M. S. Golsorkhi, G. B. Gharepetian, M. Dehmollaian, M. A. Hejazi, "A Feasibility Study on Application of Radar Imaging for Detection of Transformer Winding Radial Deformation", IEEE Transactions
- [۷] حرمت الله فیروزی، محمد خازری، علی فرشیدینا، افشین ذوالفقاری، " روش نوین آنالیز پاسخ فرکانسی و کاربرد آن در تعیین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت در ایران"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق ایران، تهران، آبان ۱۳۸۸
- [۸] [مهدی بیگدلی، مهدی وکیلان، ابراهیم رحیم پور، " بررسی روش‌های مقایسه تابع تبدیل به منظور تشخیص عیب سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور" بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق-۱۳۸۸ تهران، تهران
- [9] 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.
  - [10] [M. S. Golsorkhi, G. B. Gharepetian, M. Dehmollaian, M. A. Hejazi, "A Feasibility Study on Application of Radar Imaging for Detection of Transformer Winding Radial Deformation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, Oct. 2012, pp. 2113-2121.



شکل ۱۰: تصویر فاز معیوب

همانطور که در شکل مشخص است حالت سالم نقاط گرم یا قرمز کمتری دارد و نشان‌دهنده فرورفتگی در بخشی از ترانسفورماتور می‌باشد. اگر شاخص مقایسه را عدد رنگی ۰٫۴ در نظر بگیریم، تعداد نقاط بالای ۰٫۴ در حالت معیوب برابر ۱۶۵۳۱۲ و این تعداد برای حالت سالم برابر ۱۵۶۵۹۳ می‌باشد. مقایسه این دو عدد نیز بیانگر فرورفتگی بخشی از ترانسفورماتور است. تصویر ترانسفورماتور واقعی و ست آپ آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: اسکن ترانسفورماتور با دو آنتن فرستنده و گیرنده

### ۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت تشخیص عیب ترانسفورماتورهای قدرت، روش‌های مختلفی در این راستا پیشنهاد شده است. در این مقاله روش مقایسه توابع تبدیل به عنوان روش *offline* و روش تصویربرداری راداری به عنوان روش *online* مورد بررسی قرار گرفت. در روش استفاده از توابع تبدیل باید ترانس از مدار خارج شده و فازهای مختلف آن مورد بررسی قرار بگیرد و با مقایسه توابع تبدیل می‌توان احتمال وقوع خطاهای فیزیکی در سیم‌پیچ‌های ترانس را پیش بینی کرد در نتیجه این روش براساس پیش‌بینی بوده و به تجربه اپراتور در تشخیص عیوب مکانیکی، بستگی دارد... در روش تصویربرداری راداری می‌توان ترانس را در حالت *online* مورد بررسی قرار داد و نیاز به از مدار خارج کردن ترانس نمی‌باشد. همچنین در روش تصویربرداری راداری هر فاز به طور مستقل اسکن شده و نیاز به اطلاعات قبلی یا اطلاعات فازهای