

تشخیص برخط عیب‌های مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از تخمین تابع تبدیل کانال انتشار موج UWB

مریم‌السادات اخوان حجازی^۱، استادیار، جواد ابراهیمی^۲، دانشجوی دکتری، مریم صباغ‌پور آرانی^۱، کارشناس ارشد، گئورگ قره‌پتیان^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران - m.sabbaghpur@gmail.com, mhejazi@kashanu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران - j_brahim@aut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران - grptian@aut.ac.ir

چکیده: استفاده از رادار فرایه‌ن‌باند جهت تشخیص برخط عیب مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور، به‌تازگی پیشنهاد شده است. در این مقاله به‌منظور شناسایی و تخمین تغییر شکل شعاعی و جابه‌جایی محوری در سیم‌پیچ ترانسفورماتور از تکنیک تحلیل مدال استفاده شده است. در روش مورد استفاده، با توجه به تأثیر تغییرات مکانیکی بر پارامترهای کانال انتشار موج فرایه‌ن‌باند در داخل ترانسفورماتور و نمایش آن به‌صورت تابع تبدیل، به استخراج ویژگی برای تشخیص عیب پرداخته شده است. با انتخاب بهترین روش تخمین تابع تبدیل، از آن برای تعیین مقدار صفرها و قطب‌های سیستم در حالت‌های مختلف سالم و معیوب محوری و شعاعی استفاده شده است. با مقایسه مقادیر صفر و قطب‌های تابع تبدیل در حالت سالم و معیوب می‌توان به تشخیص قطعی برای وجود عیب پرداخت و میزان عیب را به‌صورت تقریبی تعیین نمود. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی مدل آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند وجود عیب محوری و شعاعی را تشخیص دهد اما در تعیین میزان این عیب‌ها همراه با خطا عمل می‌کند. لذا با توجه به قابلیت‌های روش پیشنهادی، می‌توان از آن به‌صورت ترکیبی با روش تصویربرداری راداری استفاده نمود. **واژه‌های کلیدی:** صفر و قطب، سیم‌پیچ ترانسفورماتور، تابع تبدیل، روش RLS، مدل BJ

Online Detection of Transformer Winding Mechanical Faults Using Estimation of the Transfer Function of the UWB Wave Propagation Channel

M. A. Hejazi¹, Assistant Professor, J. Ebrahimi², PHD student, M. Sabbaghpur Arani¹, MSc student, G. Gharehpatian³, Professor

1- Electrical and computer Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: mhejazi@kashanu.ac.ir, m.sabbaghpur@gmail.com,

2- Electrical and computer Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: j_brahim@aut.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, grptian@aut.ac.ir

Abstract: Transformer winding mechanical fault detection by Ultra Wide Band (UWB) Sensors has been recently proposed. In this paper, modal analysis technique has been used to detect and estimate radial deformation and axial displacement in transformer winding. In this technique, using the UWB wave propagation channel modeling by transfer function and knowing that mechanical changes affect the channel parameters, the features have been extracted for the fault diagnosis. By choosing the best method of estimating the transfer function, the zeroes and poles in different sound and defective mode has been determined. For diagnosing and determining the approximate amount of the faults, the amounts of Zeroes and Poles of the Transfer Function have been compared in different modes. The measurement results have been shown that the proposed method can be successful in the detection of the fault but it cannot determine the amount of the faults accurately. According to the capabilities of the proposed method, it can be used in combination with the previously introduced Radar Imaging Method.

Keywords: Zeroes and poles, transformer winding, transfer function, RLS method, BJ model.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

نام نویسنده مسئول: مریم‌السادات اخوان حجازی

نشانی نویسنده مسئول: ایران- اصفهان- کاشان- بلوار قطب راوندی- دانشگاه کاشان- دانشکده برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در شرایطی که شکی به وجود عیب در سیم‌پیچ ترانسفورماتور نباشد، جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها بهتر است، حرکت آنتن انجام نشود. بنابراین در این مقاله پیشنهاد شده است که ابتدا با آنتن‌های ثابت و با استفاده از روش تحلیل مکان صفر و قطب‌های تابع تبدیل اندازه‌گیری انجام شود. در صورتی که احتمال وجود عیب از آستانه‌ای بالاتر بود، سیستم کنترل به آنتن‌ها فرمان شروع حرکت جهت تصویربرداری راداری را ارسال نماید.

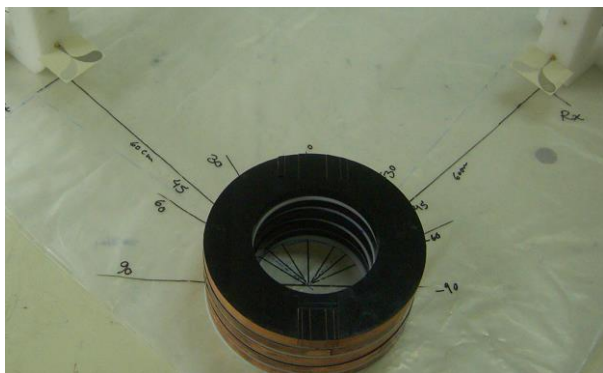
در بخش دوم این مقاله اجزای مجموعه آزمایشگاهی معرفی شده و در بخش سوم، مراحل استفاده از روش پیشنهادی برای تشخیص عیوب بیان می‌شود. روش‌های مختلف مدل‌سازی کانال انتشار موج UWB با در نظر گرفتن دینامیک خطا، در بخش چهارم ارائه می‌شود. در بخش پنجم با توجه به مسئله موردنظر و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و سیگنال‌های به دست آمده از توابع تبدیل تخمین زده شده، یکی از روش‌ها انتخاب می‌گردد. سپس برای مدل‌های مختلف چیدمان آزمایش، نتایج تخمین تابع تبدیل بررسی می‌شود. در نهایت در بخش نهمی با توجه به مدل انتخابی از این روش‌ها برای ارزیابی عیوب تغییر شکل شعاعی و جابه‌جایی محوری استفاده شده است.

۲- مجموعه آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی آماده شده برای اندازه‌گیری‌ها، شامل اجزای زیر است:

- مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور
 - آنتن‌های فرستنده و گیرنده [۱۴]
- موقعیت مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور و آنتن‌های فرستنده و گیرنده در شکل ۱ و مشخصات مربوط به آن در جدول ۱ بیان شده است.

ورودی سیستم در آزمایش‌های انجام شده پالس UWB ارسالی از نوع گوسی است که توسط دستگاه فرستنده Pulse ON 220 ارسال می‌شود. روش انجام آزمایش و پیش‌پردازش داده‌ها در [۱۱، ۱۲] بیان شده است.



شکل ۱: مجموعه آزمایشگاهی

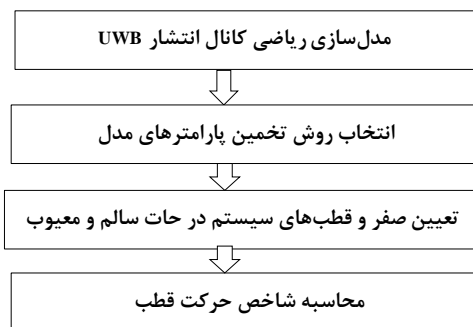
ترانسفورماتورها از مهم‌ترین عناصر شبکه قدرت هستند که سطوح مختلف ولتاژ را به یکدیگر اتصال می‌دهند [۱]. برای افزایش قابلیت اطمینان تغذیه انرژی برق، شناسایی سریع عیب‌های رخ داده در ترانسفورماتور الزامی می‌باشد. عیوب مکانیکی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌توانند در هنگام حمل‌ونقل و یا در اثر نیروهای الکترودینامیکی ناشی از اتصال کوتاه به وجود آیند. به‌طور کلی می‌توان این عیوب را به دو دسته جابه‌جایی محوری و تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور تقسیم کرد [۲]. این عیوب به‌مرور زمان موجب خرابی عایق سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و در نتیجه بروز اتصال کوتاه در داخل ترانسفورماتور می‌شود. بنابراین تشخیص به موقع آن‌ها اهمیت زیادی دارد. استفاده از رادار فرایه‌ن‌باند^۱ (UWB) امکان تشخیص عیوب مکانیکی ترانسفورماتور را به صورت برخط و توسط یک دستگاه فرستنده و گیرنده امواج فراهم می‌سازد. پهنای پالس بسیار باریک استفاده شده در تکنولوژی UWB، پهنای باند بسیار وسیعی را ایجاد می‌کند و باعث می‌شود تا بازتابش‌های محیط در گیرنده از یکدیگر مجزا باشند. بنابراین می‌توان تغییرات اجزاء محیط را به صورت مجزا بررسی کرد. از این ویژگی برای پیشنهاد روش جدید برای پایش تغییرات فیزیکی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور استفاده شده است [۳]. در این روش یک پالس UWB به طرف سیم‌پیچ ترانسفورماتور ارسال می‌شود. سیگنال داخل محیط منتشر شده و به هدف (سیم‌پیچ) برخورد می‌نماید. سیگنال بازتاب شده از محیط و سیم‌پیچ ترانسفورماتور توسط دستگاه گیرنده دریافت و ذخیره می‌شود. با تجزیه و تحلیل امواج دریافتی، تغییر شکل هندسی سیم‌پیچ ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود [۴-۷].

روش‌های مختلفی برای تحلیل سیگنال دریافتی از رادار UWB برای تشخیص نوع و میزان تغییر شکل شعاعی و جابه‌جایی محوری وجود دارد. از جمله می‌توان به تشخیص وجود و تخمین میزان عیب با تعریف شاخص [۸]، تعیین نوع و میزان عیب با استفاده از استخراج ویژگی با ویولت و روش‌های شناسایی الگو [۹]، تعیین محل عیب با استفاده از تحلیل اختلاف زمانی رسیدن سیگنال در دو گیرنده و روش هایپربولیک [۱۰]، تشخیص نوع، محل و میزان عیب با استفاده از تصویربرداری با رادار UWB [۱۱] اشاره کرد. در روش تصویربرداری که به صورت برخط انجام می‌شود، نیاز است که آنتن در سرتاسر سیم‌پیچ حرکت داده شود [۱۱، ۱۲]. در [۱۳]، گزارشی از پیاده‌سازی روش تصویربرداری راداری روی یک ترانسفورماتور تعمیری ۳۰ MW ارائه شده است. از طرفی کانال به محیط انتشاری عبور سیگنال از فرستنده به گیرنده می‌گویند که با استفاده از سیگنال ورودی و خروجی، می‌توان تابع تبدیل محیط بین فرستنده و گیرنده را متناظر با عیوب مختلف سیم‌پیچ ترانسفورماتور مدل‌سازی ریاضی نمود.

۳- مراحل استفاده از روش تحلیل صفر و قطب برای

تشخیص عیوب سیم‌پیچی

در روش پیشنهادی ابتدا یک مدل ریاضی بین ورودی و خروجی کانال انتشار UWB در نظر گرفته می‌شود، سپس با انجام اندازه‌گیری‌های حوزه زمان پارامترهای آن تعیین می‌شوند. روش‌های متنوعی برای تخمین یک تابع تبدیل وجود دارد که با توجه به مسئله موردنظر یکی از روش‌ها انتخاب می‌گردد. سپس برای مدل‌های مختلف چیدمان آزمایش، نتایج تخمین تابع تبدیل ارزیابی می‌شود. سپس سیگنال‌های به‌دست‌آمده از تابع تبدیل تخمین‌زده با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه شده و میزان خطا بررسی می‌شود. پس از انتخاب بهترین روش تخمین تابع تبدیل با کم‌ترین خطا، از آن برای تعیین صفرها و قطب‌های سیستم در حالت‌های مختلف سالم و معیوب محوری و شعاعی استفاده می‌شود. درنهایت برای تشخیص وجود عیب استفاده از شاخص حرکت قطب (D) پیشنهاد می‌گردد. شکل ۳ روند کلی استفاده از تخمین تابع تبدیل کانال انتشار موج UWB و تحلیل صفر و قطب برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم‌پیچی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: روند کلی استفاده از تحلیل صفر و قطب برای تشخیص عیوب

علت استفاده از این روش نداشت هر حالت عیب با تعداد زیادی ویژگی (منحنی‌های به‌دست‌آمده در حوزه زمان) به تعداد محدودی ویژگی (صفرها و قطب‌های تابع تبدیل) برای تسهیل امر ذخیره‌سازی اطلاعات و مقایسه حالت‌های مختلف می‌باشد.

۴- مدل‌سازی کانال انتشار موج UWB در ترانسفورماتور

هدف از مدل‌سازی کانال انتشار موج UWB در ترانسفورماتور پایش وضعیت سیم‌پیچ از طریق مقایسه پارامترهای مدل (توابع تبدیل) در حالت سالم و حالت عیب است. برای تابع تبدیل یک کانال انتشار موج مدل‌های مختلفی ارائه شده است [۱۵]. در تمامی این روش‌ها باید درجه مدل یعنی تعداد صفرها و قطب‌های تابع تبدیل مشخص شود. تعداد قطب‌های مزدوج تابع تبدیل برابر تعداد نقاط پیک در چگالی طیف توان^۲ (PSD) سیگنال خروجی سیستم می‌باشد. البته شرط استفاده از چگالی طیف توان این است که سیگنال‌های دریافتی از لحاظ آماری ایستا باشند [۱۶].

جدول ۱: مشخصات مجموعه آزمایشگاهی

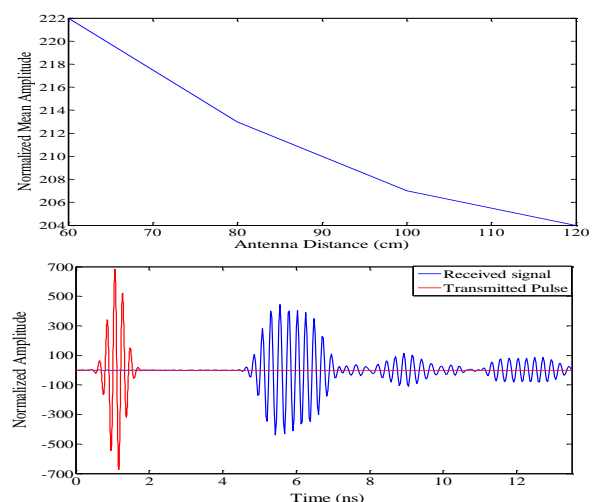
۴۷ cm	فاصله بین آنتن فرستنده و گیرنده
۲۴/۵ cm	ارتفاع آنتن‌ها از سطح میز آزمایش
۱۲/۵ cm	ارتفاع مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور از سطح میز آزمایش
۴۰ cm	فاصله مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور از خط واصل بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده

اگر سیگنال ارسالی $x(t)$ در نظر گرفته شود، سیگنال دریافتی را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$y(t) = x(t) * h_1(t) * h_2(t) * h_a(t) \quad (1)$$

$h_1(t)$ پاسخ ضربه سیستم الکترونیکی تولید پالس UWB و آنتن فرستنده و $h_2(t)$ مربوط به آنتن گیرنده و مدار الکترونیکی دریافت سیگنال و $h_a(t)$ پاسخ ضربه محیط بین فرستنده و گیرنده است. در آزمایش‌های مختلف که فرستنده و گیرنده در فواصل مختلف قرار می‌گیرند، h_1 و h_2 ثابت هستند و فقط h_a تغییر می‌کند که تمام گذر است. تأثیر محیط بین فرستنده و گیرنده، تضعیف دامنه سیگنال است که می‌توان این تضعیف را برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده به‌دست آورد. شکل ۲-الف اندازه میانگین دامنه اولین چندمسیری سیگنال دریافتی را برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده و ش ۲-ب پالس ارسالی توسط فرستنده (ورودی) و پالس دریافتی توسط گیرنده (خروجی) را برای یک چیدمان مشخص نسبت به یک مرجع زمانی نشان می‌دهد.

با داشتن فاصله آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌توان زمان ارسال پالس توسط فرستنده را نسبت به اولین چندمسیری دریافتی در گیرنده به‌دست آورد. اولین چندمسیری دریافتی در گیرنده مربوط به مسیر مستقیم بین آنتن فرستنده و گیرنده است که سیگنال ارسالی نسبت به اولین چندمسیری به‌اندازه زمانی که سیگنال از فرستنده تا گیرنده طی می‌کند جلوتر است. اگر فاصله بین فرستنده و گیرنده برابر d باشد، این زمان برابر d/c خواهد بود که c سرعت حرکت موج UWB در محیط هوا است.



شکل ۲: الف) تضعیف دامنه سیگنال دریافتی برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده، ب) پالس ارسالی از فرستنده و سیگنال دریافتی در گیرنده

سیستم متمایز است [۱۷]. در نهایت این مدل برای آزمایش‌ها انتخاب شد.

۵- انتخاب روش برای تخمین تابع تبدیل

روش‌های تخمین تابع تبدیل شامل روش‌های خارج از خط^۸ یا یکباره^۹ و روش‌های روی خط هستند. در روش‌های یکباره تخمین به صورت خارج از خط انجام می‌گیرد به صورتی که با نمونه‌برداری از ورودی و خروجی در آزمایش، محاسبات لازم انجام شده و پارامترهای سیستم تخمین زده می‌شوند. در روش‌های روی خط پارامترهای سیستم با نمونه‌برداری‌های گذشته ورودی و خروجی تخمین زده شده‌اند و با دریافت نمونه جدید از ورودی و خروجی پارامترهای قبلی اصلاح می‌شوند.

یکی از کاربردی‌ترین و جامع‌ترین روش‌های تخمین یکباره که به دلیل مشکلات و محدودیت‌های زیادی که دارند، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش حداقل مربعات می‌باشد که مبتنی بر پاسخ پله، پاسخ ضربه و پاسخ فرکانسی سیستم‌ها هستند. در روش‌های تخمین پارامتر بین سیستم و تخمین‌زننده پارامتر به صورت لحظه‌ای ارتباط برقرار است، به طوری که تا لحظه t از نمونه‌های ورودی و خروجی استفاده شده و تخمین پارامتر صورت گرفته است. حال بر اساس اطلاعات ورودی و خروجی در لحظه $t+1$ تخمین قبلی اصلاح می‌شود. به عبارت دیگر با هر نمونه جدید از اطلاعات ورودی و خروجی پارامترها به روز می‌شوند.

یکی دیگر از روش‌های تخمین پارامتر، روش‌های تطبیقی است که شامل الگوریتم‌هایی از جمله: الگوریتم تصویر (PA)^{۱۰}، الگوریتم تصویر متعامد (OPA)^{۱۱}، روش حداقل مربعات بازگشتی (RLS)^{۱۲}، روش حداقل مربعات بازگشتی با وزن‌دهی داده‌های انتخابی (RLSDW)^{۱۳}، روش حداقل مربعات بازگشتی با وزن‌دهی نمایی داده‌ها (RLSEXP)^{۱۴} و روش حداقل مربعات بازگشتی با ریست کردن کوواریانس (RLSCR)^{۱۵} [۱۸].

برای انتخاب نوع روش تخمین در این تحقیق ۱۰۰ آزمایش مختلف در حالت سالم مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها، مجموعه آزمایشگاهی ثابت است. چگالی طیف توان سیگنال دریافتی در حالت سالم مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور به صورت شکل ۵ می‌باشد. چگالی طیف توان با روش برگ^{۱۶} تخمین زده شده است [۱۹].

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که دو نقطه ماکزیمم در اطراف فرکانس ۴ گیگاهرتز وجود دارد. پس می‌توان حدس زد که دو زوج قطب در تابع تبدیل وجود دارد. بنابراین درجه مخرج تابع تبدیل بین فرستنده و گیرنده، برابر ۴ در نظر گرفته می‌شود.

برای پیدا کردن بهترین روش تخمین تابع تبدیل، با توجه به مطالب بیان شده با در نظر گرفتن تابع تبدیل با ۴ قطب و صفرهای مختلف سیگنال اندازه‌گیری شده و سیگنال تخمین‌زده شده مقایسه می‌شود.

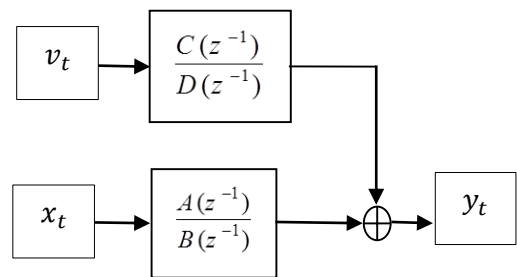
در حوزه زمان گسسته^۲ می‌توان یک فرآیند تصادفی نمونه‌برداری شده را به صورت خروجی یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان با تبدیل Z مدل‌سازی کرد که با در نظر گرفتن دینامیک خطا به صورت شکل ۴ در نظر گرفت. خطای سیستم را می‌توان خروجی یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان با ورودی نویز سفید به صورت رابطه (۲) در نظر گرفت که باید پارامترهای مربوط به چهار چندجمله‌ای $A(z^{-1})$ ، $B(z^{-1})$ ، $C(z^{-1})$ و $D(z^{-1})$ تخمین زده شوند.

$$y_t = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})}x_t + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v_t \quad (2)$$

اگر رابطه (۲) به صورت زیر در نظر گرفته شود مدل ARMAX^۳ به دست می‌آید.

$$B(z^{-1})y_t = A(z^{-1})x_t + C(z^{-1})v_t \quad (3)$$

این مدل بیان می‌کند که مدل سیستم و نویز دارای صفر و قطب می‌باشند و قطب‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی نویز با قطب‌های سیستم یکسان است.



شکل ۴: مدل سیستم به همراه مدل خطا

اگر رابطه (۲) به صورت زیر در نظر گرفته شود مدل ARX^۵ به دست می‌آید.

$$B(z^{-1})y_t = A(z^{-1})x_t + v_t \quad (4)$$

این مدل بیان می‌کند که مدل سیستم دارای صفر و قطب می‌باشد ولی مدل نویز تمام قطب است. همچنین قطب‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی نویز با قطب‌های سیستم یکسان است. اگر رابطه (۲) به صورت زیر در نظر گرفته شود مدل OE^۶ به دست می‌آید.

$$y_t = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})}x_t + v_t \quad (5)$$

در این مدل نویز سیستم یک نویز سفید است و تابع تبدیل آن برابر ۱ است. اگر رابطه (۲) به صورت زیر در نظر گرفته شود مدل BJ^۷ به دست می‌آید.

$$y_t = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})}x_t + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v_t \quad (6)$$

این مدل کلی‌تر مدل‌های فوق است و بیان می‌کند که مدل سیستم و نویز شامل صفر و قطب است و قطب‌های نویز از قطب‌های

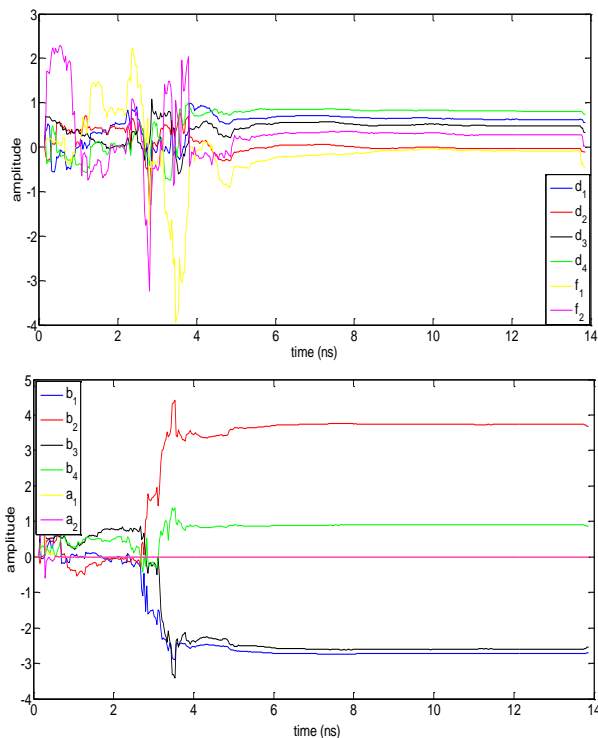
۶- نتایج به‌دست آمده از روش تخمین RLS برای مدل BJ

در این مدل برای سیستم ۴ قطب و ۲ صفر و برای خطا نیز ۴ قطب و ۲ صفر در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی تابع تبدیل آن به صورت معادله ۷ است که پارامترهای آن با روش تخمین زده شده‌اند:

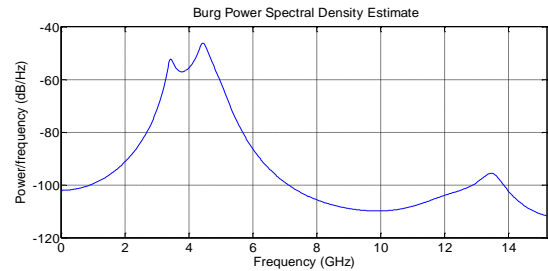
$$y_t = \frac{(a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2})}{(1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4})} x_t + \frac{(1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2})}{(1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4})} v_t \quad (7)$$

منحنی‌های مربوط به همگرایی پارامترهای مدل سیستم در شکل ۷-الف آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که پارامترهای مربوط به صفرهای سیستم یعنی a_0 و a_1 و a_2 به سمت صفر همگرا شده‌اند. بنابراین مدل سیستم صفری ندارد. شکل ۷-ب همگرایی پارامترهای مربوط به مدل خطا را نشان می‌دهد. از این شکل نیز مشخص است که پارامترهای مربوط به صفرهای مدل خطا یعنی c_1 و c_2 به سمت صفر همگرا شده‌اند و این نشان‌دهنده این است که مدل در نظر گرفته شده برای خطا باید تمام‌قطب باشد.

برای ارزیابی تابع تبدیل به‌دست آمده، سیگنال مربوط به حالت سالم مدل سیم‌پیچ اندازه‌گیری شده با سیگنال مربوط به حالت سالم می‌شوند. بدین منظور زمان نمونه‌برداری برابر 10 Bin یا $31/789 \text{ ps}$ تنظیم شده است و فاصله زمانی بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده برابر 50 میلی ثانیه است.



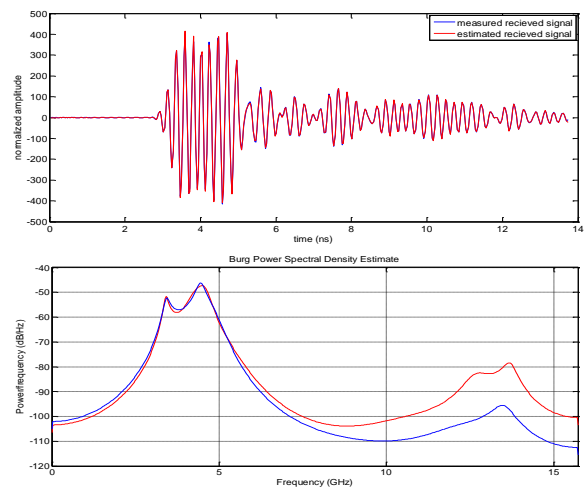
شکل ۷: منحنی همگرایی پارامترها در مدل BJ توسط الگوریتم RLS. الف) مدل سیستم، ب) مدل خطا



شکل ۵: مشخصه چگالی طیف توان سیگنال‌های دریافتی

اگر PSD سیگنال تخمین زده شده به درستی نقاط ماکزیمم PSD سیگنال اندازه‌گیری شده را دنبال کند این روش برای تخمین پارامترهای تابع تبدیل مناسب است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که در روش RLS پارامترهای تابع تبدیل به خوبی همگرا می‌شوند و PSD سیگنال خروجی تخمین زده شده در نقاط ماکزیمم اطراف فرکانس ۴ گیگاهرتز منطبق بر PSD سیگنال خروجی اندازه‌گیری شده است. شکل ۶-الف نشان می‌دهد که خروجی تخمین زده شده خروجی واقعی سیستم را دنبال می‌کند و میزان خطای بین این دو بسیار کم است. همچنین شکل ۶-ب PSD سیگنال تخمین زده شده به درستی نقاط ماکزیمم PSD سیگنال اندازه‌گیری شده را دنبال می‌کند.

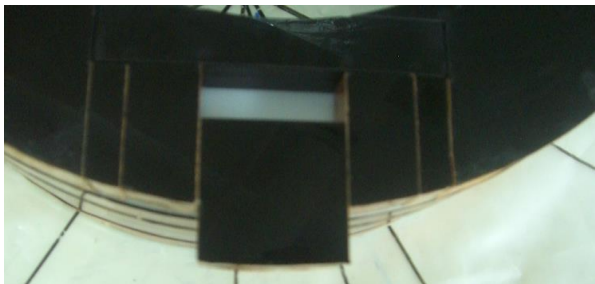
شکل آبی رنگ مربوط به سیگنال اندازه‌گیری شده و شکل قرمز رنگ مربوط به سیگنال تخمین زده شده است. نتایج نشان داد برای تعیین پارامترهای مجهول با روش RLS که با در نظر گرفتن تعداد ۰ و ۲ و ۴ صفر، ضرایب مربوط به صفرهای سیستم به سمت صفر همگرا شده است. این نشان‌دهنده آن است که در روش‌های تخمین تطبیقی، تابع تبدیل سیستم صفری ندارد و مدل آن تمام قطب است. با توجه به اندازه‌گیری‌ها با افزایش تعداد قطب‌های سیستم، چگالی طیف توان سیگنال دریافتی اندازه‌گیری شده تغییری نکرده است. بنابراین تعداد قطب‌های تابع تبدیل ۴ انتخاب شد.



شکل ۶: سیگنال دریافتی اندازه‌گیری و تخمین زده شده توسط الگوریتم RLS. الف) حوزه زمان، ب) چگالی طیف توان



(الف)



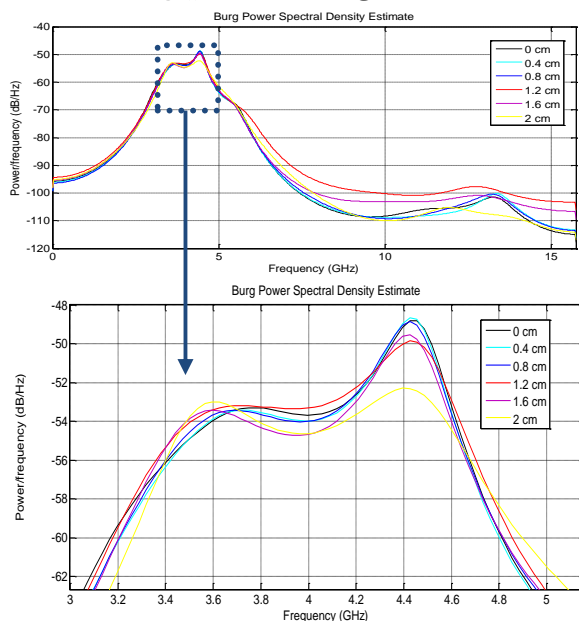
(ب)



(ج)

شکل ۹: الف) مدل سیم‌پیچ با قطر ۶۰ سانتی‌متر، ب) نمای بالایی از قطاع‌های مدل سیم‌پیچ، ج) بالابر ساخته شده برای

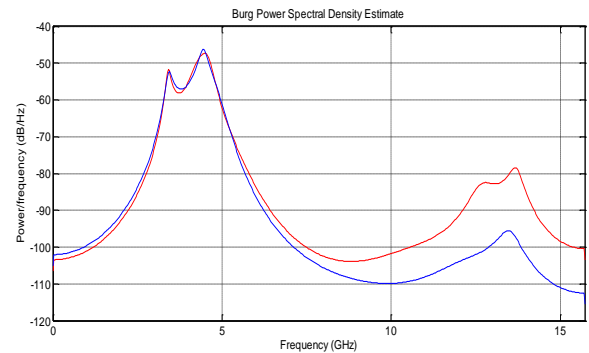
جابه‌جایی محوری مدل سیم‌پیچ



شکل ۱۰: چگالی طیف توان سیگنال‌های دریافتی اندازه‌گیری شده برای عیوب مختلف تغییر شکل شعاعی بر روی مدل سیم‌پیچ به قطر ۶۰ سانتی‌متر

در نهایت با داشتن سیگنال ورودی و سیگنال دریافتی توسط گیرنده در آزمایش، تابع تبدیل بین ورودی و خروجی برای این چیدمان آزمایش به دست می‌آید.

شکل ۸ سیگنال به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها و سیگنال استخراج شده از تابع تبدیل مفروض را نشان می‌دهد که اختلاف کمی بین دو سیگنال وجود دارد.



شکل ۸: سیگنال‌های دریافت شده توسط گیرنده و

تخمین زده شده در حالت سالم مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور

۷- استفاده از پارامترهای تابع تبدیل برای تشخیص

وجود عیب‌های سیم‌پیچ ترانسفورماتور

برای این بخش، سه مسأله زیر تعریف می‌شود و اندازه جابه‌جایی محوری در هر آزمایش ۰/۲ mm در نظر گرفته شده است:

۱. تشخیص وجود عیب محوری یا عیب شعاعی
۲. تشخیص میزان عیب محوری
۳. تشخیص میزان عیب شعاعی

۷-۱- تغییر شکل شعاعی

برای انجام این آزمایش ۵ دیسک با قطرهای ۶۰ سانتی‌متر روی یکدیگر قرار داده شده است که یکی از این دیسک‌ها در راستای مرکز دیسک برش داده شده است. برای ایجاد تغییر شکل شعاعی قطاع‌های برش داده شده در راستای شعاع به سمت بیرون کشیده شده‌اند که یک نمونه از آن در شکل ۹ الف و ب نشان داده شده است.

چگالی طیف توان سیگنال دریافتی در حالت سالم و حالت‌های عیوب تغییر شکل شعاعی مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور به صورت شکل ۱۰ می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در تمامی حالات عیب چگالی طیف توان دارای دو نقطه پیک است. بنابراین همه حالات با دو زوج قطب، قابل تخمین است. شکل ۱۱ مکان قطب‌های تابع تبدیل برای حالت سالم و حالت‌های مختلف تغییر شکل شعاعی ایجاد شده بر روی مدل سیم‌پیچ به قطر ۶۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. تابع تبدیل به روش RLSEXP تخمین زده شده است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییر شکل شعاعی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور، تنها موجب حرکت قطب‌ها شده است.

۸- تشخیص میزان عیب سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از صفر و قطب به‌عنوان ویژگی

۸-۱- تغییر شکل شعاعی

با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده از تابع تبدیل کانال انتشار با استفاده از شبکه عصبی [۲۰]، میزان عیب شعاعی و محوری شناسایی می‌شود. آزمایش‌ها برای ۴۱ حالت مختلف عیب شعاعی است. قطاع ۲×۲ از صفر تا ۴۰ mm حرکت داده شده است و هر حالت شامل سیگنالی است که ۶۴۰ نمونه دارد. ۸۰ درصد کل داده‌ها را برای آموزش و ۲۰ درصد را برای آزمایش انتخاب شده است. شبکه عصبی مورد استفاده شامل ۸ لایه و ۱۰ نرون می‌باشد.

جدول ۲: نتایج تخمین وجود و میزان تغییر شکل شعاعی

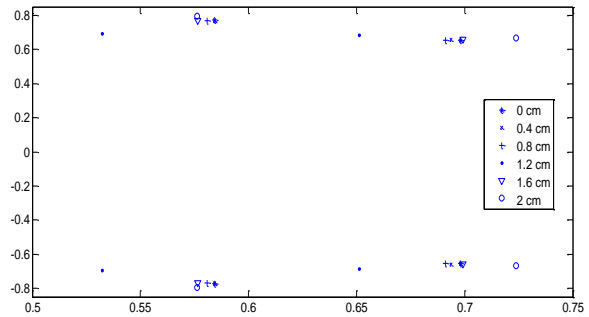
اندازه تغییر شکل شعاعی (mm)	مقدار تخمین زده شده با شبکه عصبی (mm)	T	% خطا
۴	۱۶/۶۸۴۵	۱	۳۱۷/۱۱۳
۸	۸/۰۱۷۴	۱	۰/۲۱۷۵
۱۲	۱۲/۰۴۰۷	۱	۰/۳۳۹۱۷
۱۶	۱۴/۵۵۵۲	۱	۹/۰۳
۲۰	۱۱/۹۴۸۸	۱	۴۰/۲۵۶
۲۴	۱۹/۲۳۸۰	۱	۱۹/۸۴۱۶۷
۲۸	۴۳/۰۴۸۰	۱	۵۴/۷۴۲۹
۳۲	۲۴/۱۴۷۲	۱	۲۴/۵۴
۳۶	۲۸/۹۴۵۷	۱	۱۹/۵۹۵۲۸
۴۰	۴۰/۰۱۲۲	۱	۰/۰۳۰۵
درصد خطا :			۴۸/۴۷۰۵۵

با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که این روش برای تشخیص تغییر شکل شعاعی کاملاً موفق و برای تشخیص میزان تغییر شکل شعاعی همراه با خطای ۴۸٪ عمل می‌کند.

۸-۲- جابه‌جایی محوری

کل آزمایش‌ها برای جابه‌جایی محوری ۱۵۱ حالت مختلف بوده و هر حالت شامل سیگنالی است که ۲۰۱ نمونه دارد. با ورودی مشخص قطب‌های سیستم تخمین زده می‌شوند. ۸۰ درصد کل داده‌ها را برای آموزش و ۲۰ درصد را برای برآورد انتخاب شده است. شبکه عصبی مورد استفاده شامل ۸ لایه و ۱۰ نرون می‌باشد. جدول ۳ نتایج تخمین میزان جابه‌جایی محوری را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که این روش برای تشخیص تغییر جابه‌جایی محوری کاملاً موفق و برای تشخیص میزان تغییر شکل شعاعی همراه با خطای ۲۷٪ عمل می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و اینکه این روش در تشخیص وجود عیب محوری و شعاعی ۱۰۰٪ موفق بوده است، می‌توان از ترکیب این روش با روش تصویربرداری راداری استفاده نمود.



شکل ۱۱: مکان قطب‌های تابع تبدیل برای حالت سالم و حالت‌های مختلف تغییر شکل شعاعی ایجادشده بر روی مدل سیم‌پیچ به قطر ۶۰ سانتی‌متر

لذا برای تشخیص وجود عیب استفاده از شاخص حرکت قطب (D) به‌شکل رابطه (۸) پیشنهاد می‌شود.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{|P_{Si} - P_{di}|}{|P_{Si}|} \quad (8)$$

$$T = u(D - 0.001) = \begin{cases} 1 & D \geq 0.001 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

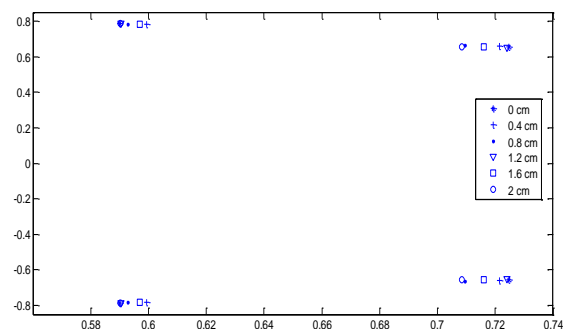
که در آن n : تعداد قطب‌های سیستم
 P_S : مختصات قطب در حالت سالم
 P_d : مختصات قطب در حالت معیوب

به‌طوری‌که اگر مقدار D (حرکت قطب‌ها) از ۰/۰۰۱ بزرگ‌تر باشد به‌معنی تشخیص خطا، و در غیراین‌صورت به‌معنای عدم تشخیص خطا خواهد بود.

۷-۲- عیب جابه‌جایی محوری

برای انجام این آزمایش ۵ دیسک با قطرهای ۶۰ سانتی‌متر روی یکدیگر قرار داده شده است. برای ایجاد جابه‌جایی محوری از یک دستگاه بالابر مطابق شکل ۹-ج استفاده شده است.

شکل ۱۲ مکان قطب‌های تابع تبدیل را برای جابه‌جایی‌های محوری مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است مکان قطب‌های تابع تبدیل برای جابه‌جایی‌های محوری مختلف دارای تغییر می‌باشد.



شکل ۱۲: مکان قطب‌های تابع تبدیل برای حالت سالم و حالت‌های مختلف جابه‌جایی محوری ایجادشده بر روی مدل سیم‌پیچ به قطر ۶۰ سانتی‌متر

عیب همراه با خطا عمل می‌کند. لذا این روش می‌تواند به صورت ترکیبی با روش تصویربرداری راداری استفاده شود. با به‌کارگیری این روش نیاز نیست که برای تشخیص عیب به صورت برخط انرژی زیادی جهت حرکت دادن مداوم آنتن‌ها مصرف شود و تنها در صورت بروز عیب مکانیکی آنتن حرکت نموده و محل دقیق عیب را تعیین می‌نماید.

منابع

- [1] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز، قدرت‌اله سیف‌السادات، "تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای تحلیل حالت های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۱، شماره ۲، صفحه ۷۵-۸۶، زمستان ۱۳۹۰.
- [2] K. K. Karsai and D. Kerenyi, D. and Kiss. L., *Large Power Transformers*, Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [3] Q. Huang, L. Qu, B. Wu and G. Fang, "UWB through-wall imaging based on compressive sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 1408-1415, 2010.
- [4] G. Mokhtari, G. Gharehpetian, R. Faraji-Dana and M. Hejazi, "On-line monitoring of transformer winding axial displacement using UWB sensors and neural network," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 5, 2010.
- [5] M. Hejazi, J. Ebrahimi, G. Gharehpetian, R. Faraji-Dana and M. Dabir, "Feasibility studies on on-line monitoring of transformer winding mechanical damage using UWB sensors," in *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010*, 2010.
- [6] G. Mokhtari, G. Gharehpetian, M. Hejazi and J. Ebrahimi, "Simulation of on-line monitoring of transformer winding axial displacement," in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1-4.
- [7] 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," in *Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 352-356.
- [8] M. S. A. Hejazi, J. Ebrahimi, G. B. Gharehpetian, M. Mohammadi, R. Faraji-Dana and G. Moradi, "Application of ultra-wideband sensors for on-line monitoring of transformer winding radial deformations—A feasibility study," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 1649-1659, 2012.
- [9] A. Alehosseini, M. A. Hejazi, G. Mokhtari, G. B. Gharehpetian and M. Mohammadi, "Detection and Classification of Transformer Winding Mechanical Faults Using UWB Sensors and Bayesian Classifier," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 16, pp. 207-215, 2015.
- [10] H. Rahbarimagham, H. K. Porzani, M. S. A. Hejazi, M. S. Naderi and G. B. Gharehpetian, "Determination of Transformer Winding Radial Deformation Using UWB System and Hyperboloid Method," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 4194-4202, 2015.
- [11] M. S. Golsorkhi, M. S. A. Hejazi, G. Gharehpetian and M. Dehmollaian, "A feasibility study on the application of radar imaging for the detection of transformer winding radial deformation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 2113-2121, 2012.
- [12] R. Mosayebi, H. Sheikhzadeh, M. S. Golsorkhi, M. S. A. Hejazi and G. B. Gharehpetian, "Detection of Winding Radial Deformation in Power Transformers by Confocal Microwave Imaging," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, pp. 605-611, 2014.

[۱۳] حسین کرمی، محسن قراط، گئورگ قره پتیان، مریم اخوان حجازی، یاسر نوروزی، علی اکبر رجلی، "پیاده سازی روش تصویربرداری راداری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی به منظور تشخیص تغییر شکل شعاعی در یک ترانسفورماتور تعمیری ۳۰ MVA"، ایران، تهران،

جدول ۳: نتایج تخمین وجود و میزان جابه‌جایی محوری

اندازه جابه‌جایی محوری (mm)	مقدار تخمین زده شده با شبکه عصبی (mm)	T	% خطا
۰/۸	۳/۶۳۶۵	۱	۳۵۴/۵۶۵
۱/۸	۱/۹۷۵۷	۱	۹/۷۶۱۴
۲/۸	۱/۴۳۸۲	۱	۴۸/۶۳۲۶
۳/۸	۴/۲۵۲۹	۱	۱۱/۹۱۹۶
۴/۸	۴/۶۹۲۱	۱	۲/۲۴۷۳
۵/۸	۲/۸۰۴۵	۱	۵۱/۶۴۵۴
۶/۸	۶/۸۶۴۵	۱	-/۹۴۹۴
۷/۸	۴/۹۰۱۲	۱	۳۷/۱۶۳۰
۸/۸	۱۰/۹۷۴۱	۱	۲۴/۷۰۵۸
۹/۸	۱۱/۵۵۸۳	۱	۱۷/۹۴۲۸
۱۰/۸	۹/۳۹۹۰	۱	۱۲/۹۷۲۰
۱۱/۸	۹/۵۶۲۲	۱	۱۸/۹۶۳۶
۱۲/۸	۱۰/۷۷۴۱	۱	۱۵/۸۲۶۹
۱۳/۸	۱۵/۸۰۶۴	۱	۱۴/۵۳۹۴
۱۴/۸	۸/۴۲۹۱	۱	۴۳/۰۴۶۲
۱۵/۸	۱۵/۴۹۲۵	۱	۱/۹۴۵۹
۱۶/۸	۱۴/۱۰۵۰	۱	۱۶/۰۴۱۳
۱۷/۸	۱۸/۵۱۹۱	۱	۴/۰۴۰۱
۱۸/۸	۸/۲۷۶۹	۱	۵۵/۹۷۳۷
۱۹/۸	۱۸/۸۶۹۴	۱	۴/۶۹۹۶
۲۰/۸	۱۸/۳۶۴۲	۱	۱۱/۷۱۰۲
۲۱/۸	۲۱/۳۷۰۸	۱	۱/۹۶۸۶
۲۲/۸	۲۲/۰۰۴۷	۱	۳/۴۸۸۰
۲۳/۸	۲۸/۵۱۹۵	۱	۱۹/۸۳۰۲
۲۴/۸	۲۶/۵۹۶۰	۱	۷/۲۴۱۹
۲۵/۸	۲۷/۹۶۸۸	۱	۸/۴۰۶۳
۲۶/۸	۲۵/۲۳۳۵	۱	۵/۸۸۲۲
۲۷/۸	۲۶/۲۳۸۲	۱	۵/۶۱۷۶
۲۸/۸	۲۸/۷۶۸۹	۱	-/۱۰۷۷
۲۹/۸	۲۷/۰۲۱۴	۱	۹/۳۲۴۱
درصد خطا:			٪۲۷/۳۷۱۹

با استفاده از این روش می‌توان آنتن‌ها را در یک نقطه ثابت نمود و به‌طور پیوسته ارسال و دریافت سیگنال را انجام داد. به‌محض این‌که این سامانه وجود عیب را تشخیص داد، سیستم کنترل حرکت آنتن‌ها را صادر می‌نماید و محل دقیق عیب را مشخص می‌کند.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نمایش کانال انتشار موج فرایه‌ن‌باند داخل ترانسفورماتور به صورت تابع تبدیل و دانستن اینکه تغییرات مکانیکی باید بر پارامترهای کانال تأثیر بگذارند، به استخراج ویژگی برای تشخیص عیب پرداختیم. این روش باعث می‌شود، هر حالت به تعداد محدودی قطب و صفر نگاشته شود اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند وجود عیب محوری و شعاعی را تشخیص دهد اما در تشخیص میزان

- [17] J. N. Juang, *Applied system identification*, Prentice-Hall, 1994.
- [18] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive control*: Courier Corporation, 2013.
- [19] C. H. Kim and R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems Part 2 Examples of application to actual power system transients," *Power Engineering Journal*, vol. 15, pp. 193-202, 2001.
- [۲۰] فرید کربلایی، حمیدرضا شعبانی، رضا ابراهیم‌پور، "ارزیابی برون‌خط پایداری گذرا به‌وسیله تعیین دقیق CCT با استفاده از شبکه عصبی با ورودی‌های مبتنی بر توابع انرژی"، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۷۷-۲۸۵، بهار ۱۳۹۵.
- دانشگاه علم و صنعت ایران، ششمین کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی (گازی، سیکل ترکیبی، حرارتی)، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۹۴.
- [14] K. Y. Yazdandoost and R. Kohno, "Slot antenna for ultra wideband system," in *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005.*, 2005, pp. 212-216.
- [15] B. Decker and U. Jahn, "Performance of 170 grid connected PV plants in northern Germany—analysis of yields and optimization potentials," *Solar Energy*, vol. 59, pp. 127-133, 1997.
- [۱۶] فرخ فرجی، "شناسایی برون خط کلمات دست نوشته فارسی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه الکترونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان ۱۳۸۶.

زیرنویس‌ها

- ¹ Ultra Wide Band
- ² Power Spectral Density
- ³ Discrete Domains
- ⁴ Autoregressive moving average exogenous
- ⁵ Autoregressive exogenous
- ⁶ Output error
- ⁷ Box-Jenkins
- ⁸ Off line
- ⁹ En-block
- ¹⁰ Projection Algorithm
- ¹¹ Orthogonalized Projection Algorithm
- ¹² Recursive Least Square
- ¹³ Recursive Least Square with Exponential Data Weighting
- ¹⁴ Recursive Least Square with Selective Data Weighting
- ¹⁵ Recursive Least Square with Covariance Resetting
- ¹⁶ Burg