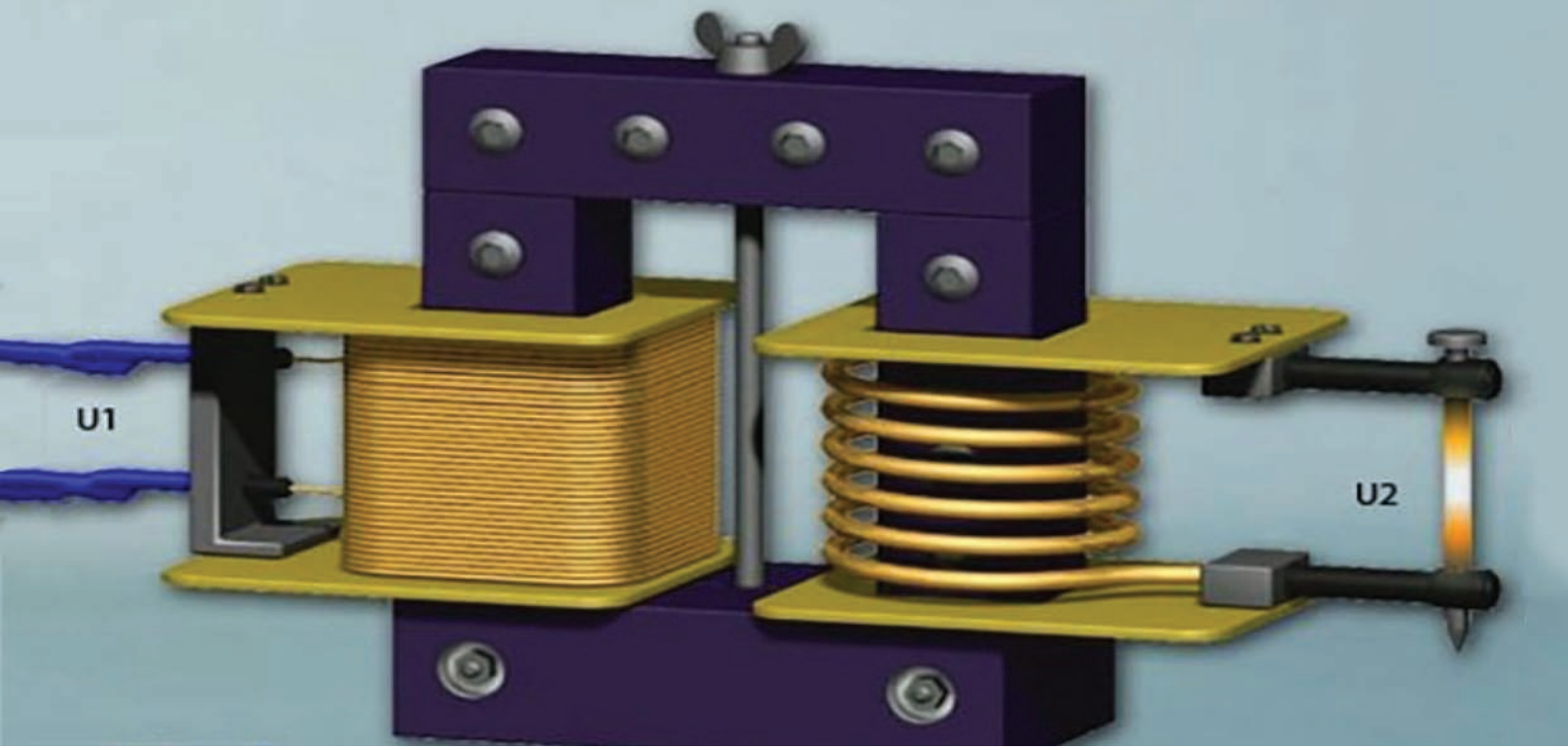


مقاله علمی-ترویجی

تدوین نرم‌افزار پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)

مهدی بیگدلی/استادیار/گروه مهندسی برق/ واحد زنجان/ دانشگاه آزاد اسلامی/زنجان- ایران/ شرکت برق منطقه‌ای زنجان/ m.bigdeli@srbiau.ac.ir
داود عزیزیان/استادیار/ گروه مهندسی برق/ واحد ابهر/ دانشگاه آزاد اسلامی/ابهر- ایران/ شرکت برق منطقه‌ای زنجان/ d.azizian@abhariau.ac.ir

چکیده

در حال حاضر مشکل عمده تشخیص عیب ترانسفورماتور با استفاده از FRA، پیچیدگی زیاد روش‌های تحلیل موجود به لحاظ الگوریتمی و محاسباتی و عدم امکان استفاده آسان توسط کاربر است. برخلاف روش DGA که نرم‌افزارهای مناسبی برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های آن توسعه یافته‌اند، روش FRA، با توجه به نوپا بودن، فاقد چنین نرم‌افزارهای جامعی است. بنابراین ضروری است نرم‌افزاری دقیق، کاربرپسند و قابل‌اطمینان برای این منظور تدوین شود. در این تحقیق نرم‌افزاری گرافیکی در محیط MATLAB تدوین شده است تا مهندس بهره‌بردار ترانسفورماتور، بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده، وضعیت ترانسفورماتور را تحلیل و بررسی نماید. برای این منظور، ابتدا آزمایش‌های لازم بر روی ترانسفورماتورهای مختلف (در حالت سالم و حالت‌های مختلف عیب) انجام و سپس به کمک روش‌های شناخته‌شده، نوع و شدت عیب مشخص می‌شود. علاوه بر روش‌های پیشین، روش جدیدی بر پایه ترکیب شبکه‌های عصبی احتمالی و شاخص‌های عددی برای تشخیص نوع عیب ارایه شده است. همچنین معیار جدیدی برای تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور بر پایه شاخص CC (در حالتی که نتایج اندازه‌گیری حالت سالم ترانسفورماتور در دسترس نیست) پیشنهاد می‌شود. در انتها عملکرد روش‌های پیشین و روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور، تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)، نرم‌افزار گرافیکی، پایش وضعیت، عیوب سیم‌پیچ

Development of Transformer Condition Monitoring Software by Frequency Response Analysis

Mehdi Bigdeli/ Assistant Professor / Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran/ Zanjan Regional Electric Company, Zanjan, Iran/ m.bigdeli@srbiau.ac.ir
Davood Azizian/ Assistant Professor/Department of Electrical Engineering, Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran/ Zanjan Regional Electric Company, Zanjan, Iran/ d.azizian@abhariau.ac.ir

Abstract

At present, the major problem with transformer fault detection using the FRA is that all analysis methods are highly complex in terms of algorithms and computations that are not easily used by the exploiter. Un-

like the DGA method, which has developed good soft-wares to interpret the results of its measurements, the FRA method lacks this possibility due to its fledgling. Therefore, it is necessary to develop accurate, user-friendly and reliable software for this purpose. In this paper, graphical software is developed in MATLAB environment to enable transformer operation engineer to monitor the transformer condition without performing complex calculations. For this purpose, first the necessary experiments are performed on different transformers (in healthy and different fault conditions) and then by past well-known methods, the type and severity of fault are determined. In addition to the previous methods, a new method based on the combination of probabilistic neural network and numerical indices for the detection of fault type is proposed. Also, a new criterion for detecting fault occurrence based on CC index (for case where transformer healthy condition measurement results are not available) is proposed. Finally, the performance of previous methods and proposed methods is evaluated and evaluated.

Keywords: Transformer, Frequency Response Analysis (FRA), Graphical Software, Condition Monitoring, Winding Faults

۱- مقدمه

پایداری و قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت تا حد زیادی به وضعیت ترانسفورماتورهای آن وابسته است. ترانسفورماتورهای قدرت جزء تجهیزات مهم و گران‌قیمت یک شبکه تولید و انتقال برق هستند که خرابی آن‌ها باعث تحمیل هزینه‌های زیاد، کاهش قابلیت اطمینان شبکه قدرت و نهایتاً خروج بخشی از شبکه از مدار خواهد شد. بنابراین مراقبت و محافظت از ترانسفورماتورها در حین بهره‌برداری، لازم و ضروری است. این موضوع با گذشت زمان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است به‌طوری‌که امروزه پایش وضعیت ترانسفورماتورهای متوسط و کوچک نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به اهمیت سیستم‌های تشخیص عیب و رقابتی شدن صنعت برق، روش‌های گوناگونی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام از این روش‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود بوده و قادر به شناسایی نوع به خصوصی از عیب می‌باشند. یکی از مهم‌ترین عیوبی که در ترانسفورماتورها به‌وفور اتفاق می‌افتد و بخش قابل‌توجهی از خرابی‌های ترانسفورماتورهای قدرت را در بر می‌گیرد، عیوب ایجاد شده در سیم‌پیچ آن‌ها است. مهم‌ترین عیوبی که در سیم‌پیچ ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد، عبارت‌اند از:

- جابجایی محوری سیم‌پیچ (AD)
- تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ (RD)
- تغییر فاصله بین بشقاب‌های سیم‌پیچ (DSV)
- اتصال کوتاه بین بشقاب‌های سیم‌پیچ (SC)

روش FRA مهم‌ترین روشی است که امروزه برای تشخیص این عیوب به کار گرفته می‌شود [۳-۱].

اساس کار در روش FRA به این صورت است که تابع تبدیل ترانسفورماتور در یک رنج وسیع فرکانسی اندازه‌گیری شده و این اندازه‌گیری‌ها با تابع تبدیل مرجع مقایسه می‌گردند. اختلاف‌های موجود بین دو منحنی، صدمات وارده به ترانسفورماتور را آشکار می‌سازد. سه روش شناخته‌شده، برای مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری توابع تبدیل وجود دارد که عبارت‌اند از: مقایسه مبتنی بر زمان، ساختار و نوع. که از بین این روش‌ها، روش مقایسه مبتنی بر زمان از بیشترین دقت برخوردار است. در هر حال، در هر سه روش نیاز است که دو منحنی اندازه‌گیری شده با یکدیگر مقایسه شوند. روش‌های مقایسه توابع تبدیل را می‌توان در ۴ دسته عمده؛ روش‌های بر پایه‌ی شاخص‌های آماری و عددی [۷-۴]، روش‌های بر پایه‌ی تحلیل مدار معادل [۹-۸]، روش‌های بر پایه‌ی الگوریتم‌های تخمین [۱۱-۱۰] و روش‌های بر پایه‌ی الگوریتم‌های هوش مصنوعی [۱۴-۱۲] تقسیم‌بندی کرد. با توجه به تمرکز استاندارد IEEE [۱۵] بر روی استفاده از شاخص‌های آماری و عددی و نیز سادگی محاسبات و قابل‌فهم‌تر بودن آن‌ها برای کاربران، در این مقاله نیز این شاخص‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مطالعات زیادی در زمینه FRA و قابلیت‌های آن انجام شده است ولی با توجه به اینکه عمده این تحقیقات مربوط به ۱۰ سال اخیر بوده و این موضوع هنوز هم جز موضوعات روز دنیا در زمینه پایش وضعیت ترانسفورماتور است، انجمن‌های IEEE و IEC استانداردهای معتبری در زمینه FRA تدوین نموده‌اند [۱۶-۱۵]. گروه کاری GIGRE نیز گزارش مناسبی برای ارزیابی وضعیت مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از FRA ارایه نموده است [۱۷]. ولی این استانداردها و گزارش‌های علمی بیشتر در مورد الزامات اندازه‌گیری و مدارهای تست بحث نموده‌اند و هنوز استاندارد دقیقی برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA تدوین نشده است. از این‌رو در سالهای اخیر مطالعات زیادی در خصوص تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA برای دست‌یابی به اطلاعاتی در مورد عیب ترانسفورماتور انجام شده است. در ادامه به پاره‌ای از نتایج این تحقیقات اشاره می‌شود. در مرجع [۱۸]، از سه شاخص CC، SD و ASLE برای این منظور استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که تغییرات CC نسبت به بقیه شاخص‌ها خطی‌تر است. از طرف دیگر وقتی عیوب با شدت‌های بیشتر (بیشتر از ۵ درصد) اتفاق می‌افتند، شاخص ASLE قابلیت آشکارسازی بهتری دارد. در [۱۹] به ازای درجات مختلفی از DSV، اندازه‌گیری‌های لازم انجام و شاخص‌های 1-MM و σ محاسبه شده‌اند. نتایج محاسبات نشان‌دهنده این بوده است که شاخص 1-MM عملکرد بهتری از σ دارد. در مرجع [۵]، ۱۱ ترانسفورماتور مختلف تحت شرایط پایانه‌ای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و تقریباً تمامی شاخص‌هایی که در تحقیق حاضر معرفی شده، برای آن‌ها محاسبه شده و این نتیجه حاصل شده است که تغییرات σ_s نسبت به ρ -1 خطی‌تر است. نتایج مقاله [۵] نشان می‌دهند که شاخص‌های RMSE، ASLE، SDA، IA، SD، ED، SSRE، SSE، CC، ρ، σ_e، σ و SSMMRE در تمامی حالت‌ها به‌درستی عیب را تشخیص می‌دهند ولی بقیه شاخص‌ها حداقل در ۱ مورد تشخیص نادرست داشته‌اند. مثلاً شاخص CD فقط در ۱ مورد و شاخص MAX در ۴ مورد نتوانسته است شدت عیب را به‌درستی تشخیص دهد. ولی شاخص‌های ID و E در خیلی از موارد، تشخیص

نادرست داشته‌اند؛ بنابراین استفاده از آن‌ها توصیه نمی‌شود. مرجع [۷] یک مقاله مروری است که به‌طور تقریب تمام روش‌هایی که برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA تا قبل از ۲۰۱۷ چاپ شده را آورده است. جمع‌بندی کلی مرجع [۷] را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- شاخص‌های ID، SDA، E[Δ]، ρ، CC، SSE، SSRE و SSMMRE در برخی موارد عملکرد ناموفقی در تشخیص عیب داشته‌اند.
- سایر شاخص‌ها عملکرد موفقی داشته‌اند ولی دلایل مستند و متقنی برای استفاده از یک (یا چند) شاخص به‌خصوص در مراجع ارایه نشده است.

مرجع [۲۰] نیز مقاله مروری دیگری در زمینه FRA است که تقریباً در مورد تمام جنبه‌های FRA، شامل انواع روش‌های جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تابع تبدیل مرجع (مقایسه متکی بر زمان، مقایسه مبتنی بر ساختار و مقایسه مبتنی بر نوع)، انواع اتصالات در انجام تست FRA و انواع روش‌های تشخیص عیب بحث نموده است. در مورد شاخص‌های عددی نیز اشاره شده است که ASLE و DABS بیشتر از سایر شاخص‌ها در مراجع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مرجع [۲۱] عملکرد شاخص‌های مختلف تحت درجات مختلفی از شدت اتصال کوتاه سیم‌پیچ مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته که عملکرد شاخص ASLE بهتر از شاخص‌های SD، DABS و CSD است.

دو شرکت معظم MEGGER و OMICRON جز سازندگان معتبر تجهیزات اندازه‌گیری FRA هستند که هر کدام از این سازندگان، نرم‌افزارهای مرتبط با FRA ارایه نموده‌اند [۲۳-۲۲]. هرچند نرم‌افزارهای این شرکت‌ها بخشی به نام تحلیل نتایج دارند ولی قابلیت اصلی این نرم‌افزارها امکان اتصال به تجهیز اندازه‌گیری است که می‌توانند داده‌های اندازه‌گیری را ذخیره نموده و نمایش دهند. تحلیل نتایج در نرم‌افزارهای این شرکت‌ها بر اساس شاخص CC صورت می‌گیرد ولی محدوده‌های تعریف شده برای این شاخص در دسترس نیست.

همان‌طور که ملاحظه گردید، تعداد شاخص‌ها بسیار زیاد است و بنابراین ممکن است که کاربر هنگام استفاده از آن‌ها سردرگم شود. متأسفانه استاندارد دقیقی وجود ندارد که کدام شاخص از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار است و هر مرجع بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌های خود، تأکید بر استفاده از شاخص بخصوصی داشته است. برای رفع این نقیصه، در مقاله حاضر به ترتیب کارهای زیر انجام شده‌اند:

۱- گردآوری داده‌های FRA با انجام آزمایش بر روی ترانسفورماتورهای مختلف در حالت سالم و حالت‌های مختلف عیب (AD، RD، DSV، SC)

۲- معرفی شاخص‌های آماری و عددی در تحلیل نتایج FRA و محاسبه این شاخص‌ها برای نتایج اندازه‌گیری‌ها

۳- معرفی روش‌های پیشنهاد شده در مراجع معتبر جهت تشخیص نوع و شدت عیب و نیز پیشنهاد یک روش جدید بر پایه ترکیب شبکه عصبی احتمالی و شاخص ED

۴- ارایه روش جدید بر پایه محدوده تغییرات شاخص CC جهت تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور در حالتی که امکان دسترسی به داده‌های تابع تبدیل مرجع وجود ندارد.

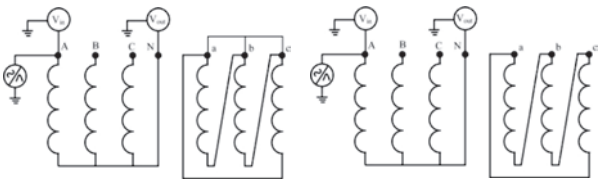
۵- برنامه‌نویسی روش‌ها و الگوریتم‌ها در محیط MATLAB و ارزیابی، بررسی کارایی و اعتبارسنجی آن‌ها

۲- ایجاد بانک اطلاعات از نتایج اندازه‌گیری‌ها

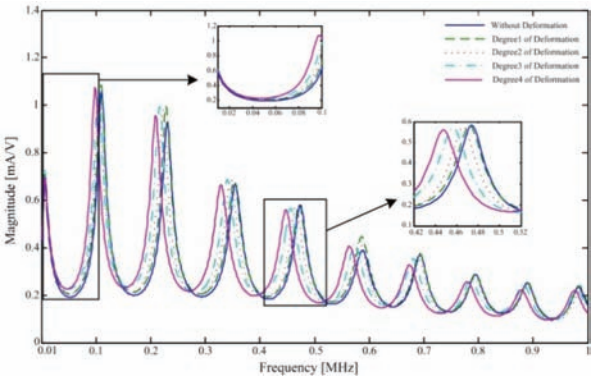
به‌منظور ارزیابی روش‌های تشخیص عیب، لازم است یک بانک اطلاعات از وضعیت حالت سالم و معیوب ترانسفورماتورها (در شدت‌های مختلفی از عیب) ایجاد شود. برای این منظور دو گروه از ترانسفورماتورها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. گروه اول از ترانسفورماتورها، از نوع ترانسفورماتورهای مدل هستند که عیوب موردنظر به صورت عمدی بر روی آن‌ها ایجاد شده است. در جدول ۱ اطلاعات کامل این ترانسفورماتورها آورده شده است. این گروه از ترانسفورماتورها با ساختارهای تقریباً مشابه مورد آزمایش قرار گرفته و بر روی هر یک از آن‌ها یکی از عیوب مورد مطالعه (AD، RD، DSV، SC) اعمال شده است. بعد از انجام اندازه‌گیری‌ها، داده‌های موردنظر به صورت فایل Text و Excel ذخیره شده و بانک اطلاعاتی موردنظر ایجاد شده است. گروه دوم، ترانسفورماتورهایی هستند که در حین کار دچار عیب شده‌اند. اطلاعات این ترانسفورماتورها در جدول (۲) نشان داده شده است.

در اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این تحقیق، از مدار شکل (۱) استفاده شده است [۱۶]. همچنین ذکر این نکته ضروری است که در مدارهای فوق به جای ولتاژ خروجی (Vr) می‌توان جریان خروجی را اندازه‌گیری نمود که در این صورت تابع تبدیل از جنس ادمیتانس خواهد بود.

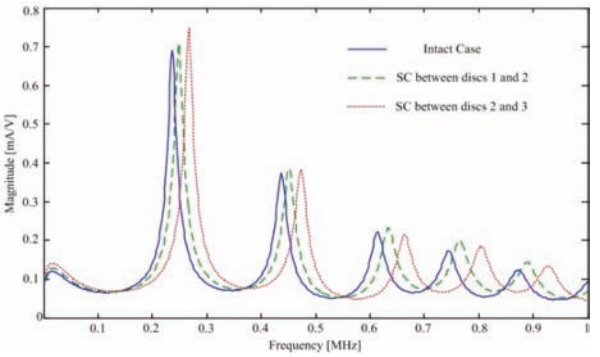
شکل (۲) نتایج اندازه‌گیری بر روی تعدادی از این ترانسفورماتورها را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان‌دهنده‌ی این است که با افزایش میزان تغییرات در ساختار سیم‌پیچ به واسطه یک عیب، تغییرات ایجادشده در شکل تابع تبدیل نسبت به مقدار مرجع نیز افزایش خواهد یافت. ولی روند این تغییرات منظم نیست یعنی از روی شکل ظاهری توابع تبدیل اندازه‌گیری شده نمی‌توان تابع تبدیل حالت معیوب را با تابع تبدیل حالت سالم مقایسه کرد و در مورد نوع یا میزان عیب نتیجه‌گیری نمود. بنابراین باید روشی ارایه شود که ضمن مقایسه این توابع تبدیل، بتوان به اطلاعات دقیقی در مورد عیب نیز دست یافت.



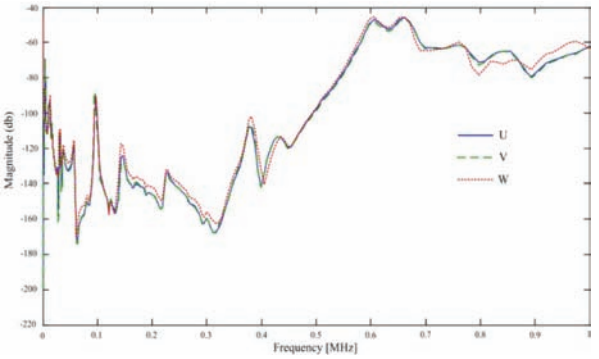
شکل ۱: مدارهای اندازه‌گیری توابع تبدیل [۱۶]



الف- TRN 2 [۱۳-۱۴]



ب- TRN 4 [۱۴-۱۳]



ت- TRN 8

شکل ۲: برخی از توابع تبدیل اندازه‌گیری شده از ترانسفورماتورها

جدول ۱:اطلاعات ترانسفورماتورهای مدل [۱۴-۱۳]

نام ترانسفورماتور	سطح ولتاژ و توان	ساختار سیم‌پیچ	توصیف عیب
TRN 1	۱۰kV/۴۰۰V و ۶/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی ۶۰ حلقه‌ای	جابجایی سیم‌پیچ لایه‌ای نسبت به بشقابی در ۸ مرحله و ایجاد یک سانتی‌متر جابجایی در هر مرحله
TRN 2	۱۰kV/۴۰۰V و ۶/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی ۶۰ حلقه‌ای	تغییر شکل بشقاب‌های ششم تا ۵۴-اُم به میزان هفت درصد شعاع سیم‌پیچ در ۴ مرحله (از ۱، ۲، ۳ و ۴ طرف سیم‌پیچ)
TRN 3	۱۰kV/۴۰۰V و ۱/۲ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۳۱ جفت بشقاب ۱۱ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۱ لایه‌ی۲۳ حلقه‌ای	تغییر فاصله‌ی بین بشقاب‌های سیم‌پیچ سالم از ۵ mm به ۷/۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و انجام تغییرات در ۳ محل شامل بشقاب‌های ۲، ۴ و ۱۶
TRN 4	kV۱۰ و MVA ۱/۲	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۹ حلقه‌ای	اتصال کوتاه بین بشقاب‌های متوالی از سیم‌پیچ

جدول ۲: اطلاعات ترانسفورماتورهای واقعی

نام ترانسفورماتور	سطح ولتاژ و توان	ساختار سیم‌پیچ	توصیف عیب
TRN 5	۲۰kV/۴۰۰V و ۱ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۰ بشقاب ۱۷ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۹ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب با نوع عیب AD و شدت بالا
TRN 6	۲۰kV/۴۰۰V و ۰/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۵ بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۱۰ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب با نوع عیب DSV و شدت بالا
TRN 7	۶۳۰۰/۴۲۰V و ۲/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۲۴ بشقاب ۱۲ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی۳۶ حلقه‌ای	ترانسفورماتور سالم که اندازه‌گیری روی هر سه فاز آن به طور مجزا انجام شده است
TRN 8	۲۰kV/۴۰۰V و ۱ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۰ بشقاب ۱۷ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۹ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب که اندازه‌گیری روی هر سه فاز آن به طور مجزا انجام شده است

۳- بررسی عملکرد شاخص‌ها

بعد از انجام اندازه‌گیری‌ها و به دست آوردن تابع تبدیل مرجع، باید تابع تبدیل به دست آمده از اندازه‌گیری جدید با تابع تبدیل مرجع مقایسه شـود. برای این منظور از شاخص‌های عددی استفاده شده است، این شـاخص‌ها در ادامه ارایه شده‌اند. در این شاخص‌ها داده‌های به دست آمده از دامنه پاسخ فرکانسی جدید با داده‌های حاصل از دامنه پاسخ فرکانسی مرجع مقایسه می‌شـود. درصورتی‌کـه ترانسفورماتور سالم باشـد (حالت ایده‌ال) در تمامی شاخص‌های معرفی‌شده، X=Y بوده و بنابراین هرکدام از شاخص‌ها دارای مقدار عددی مشخصی خواهند بـود که این مقـدار مشخص ۰ یا ۱ خواهد بود. بـه عبارت دیگر، اگر این شاخص‌ها هر مقداری غیر از این مقادیر مشخص را داشته باشند، یعنی عیبی در داخل ترانسفورماتور رخ داده است.

$$ED = \|Y - X\| = \sqrt{(Y-X)^T (Y-X)} \quad (۱)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y(i)-X(i))^2}{N-1}} \quad (۲)$$

$$ID = \int (Y(f) - X(f))\, df \quad (۳)$$

$$IA = \int |Y(f) - X(f)|\, df \quad (۴)$$

$$SDA = \frac{\int |Y(f) - X(f)|\, df}{\int |X(f)|\, df} \quad (۵)$$

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |20\log_{10} Y(i) - 20\log_{10} X(i)|}{N} \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{|Y(i)| - |X(i)|}{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N}|X(i)|}\right)^2} \quad (۷)$$

$$E[\Delta] = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta(i); \quad \Delta(i) = \frac{|Y(i)| - |X(i)|}{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N}|X(i)|} \quad (۸)$$

$$\sigma_e = \sqrt{var(\Delta)} = E[\Delta - E(\Delta)] \quad (۹)$$

$$\sigma = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\left(\frac{X(i) - (X(i)+Y(i))/2}{(X(i)+Y(i))/2}\right)^2 + \left(\frac{Y(i) - (X(i)+Y(i))/2}{(X(i)+Y(i))/2}\right)^2} \quad (۱۰)$$

$$\sigma_s = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{Y(i) - X(i)}{X(i)}\right| \quad (۱۱)$$

$$MAX = max(Y(i) - X(i)) \quad (۱۲)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X(i)-\bar{X})(Y(i)-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X(i)-\bar{X})^2 \sum_{i=1}^{N}(Y(i)-\bar{Y})^2}} \quad (۱۳)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}X(i), \quad \bar{Y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}Y(i)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{N}X(i)Y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X(i))^2 \sum_{i=1}^{N}(Y(i))^2}} \quad (۱۴)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Y(i) - X(i))^2}{N} \quad (۱۵)$$

$$SSRE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{Y(i)}{X(i)} - 1\right)^2}{N} \quad (۱۶)$$

$$SSMMRE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{max(Y(i),X(i))}{min(Y(i),X(i))} - 1\right)^2}{N} \quad (۱۷)$$

$$DABS = \frac{\sum_{i=1}^{N}|Y(i) - X(i)|}{N} \quad (۱۸)$$

$$MM = \frac{\sum_{i=1}^{N} min(X(i),Y(i))}{\sum_{i=1}^{N} max(X(i),Y(i))}$$

$$CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}[(X(i)-\bar{X}) - (Y(i)-\bar{Y})]^2}{N-1}} \quad (۱۹)$$

$$CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[(X(i)-\bar{X}) - (Y(i)-\bar{Y})\right]^2}{N-1}} \quad (۲۰)$$

$$R_{XY} = \begin{cases} 10 & if\ (1-\rho) \le 10^{-10} \\ -\log_{10}(1-\rho) & otherwise \end{cases} \quad (۲۱)$$

در روابط فوق داریم:

X: بردار اندازه تابع تبدیل مرجع

Y: بردار اندازه تابع تبدیل جدید

X(i): عنصر iام از بردار X

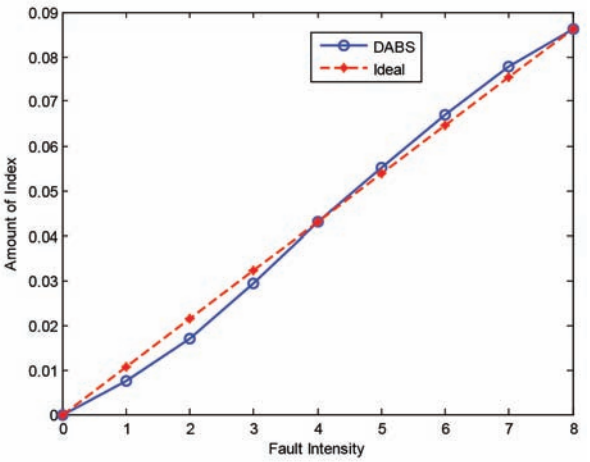
Y(i): عنصر iام از بردار Y

f: بردار نمونه فرکانسی اندازه‌گیری شده

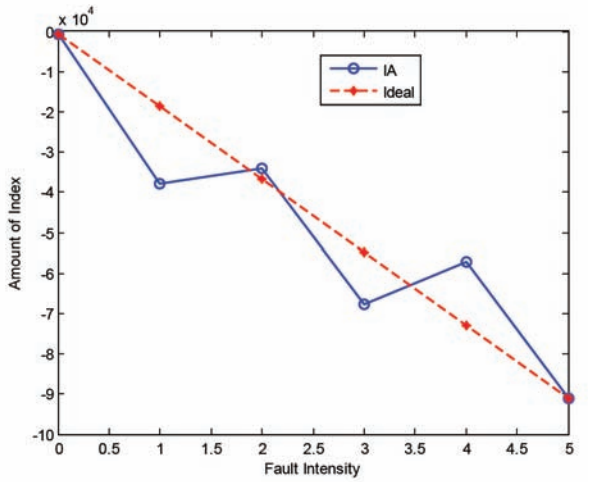
N: تعداد نمونه‌ها در یک بردار

از بین این ۲۱ شـاخص، RXY شـاخص مستقلی نیست و مبتنی بر شاخص است. بنابراین در این بخش، عملکرد ۲۰ شاخص دیگر مورد بررسـی قرار می‌گیرد. از بین ۴ عیب، در عیب SC هرچند حالت‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته ولی در این حالت‌ها فقط محل عیب

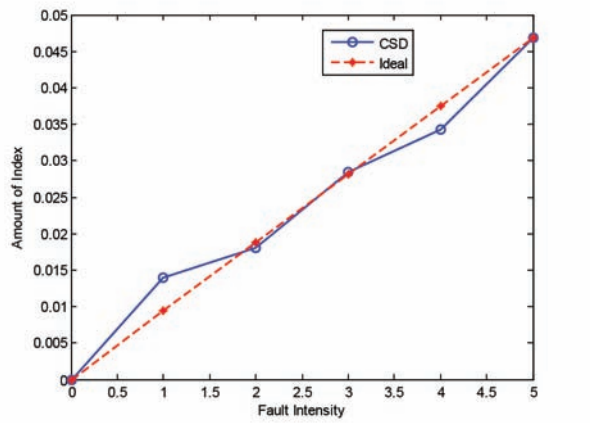
تغییر یافته و شـدت عیـب در همه حالت‌ها یکسان اسـت. بنابراین عملکرد شـاخص‌ها در مورد ۳ عیـب AD، RD و DSV مورد بررسی قرار می‌گیرد.



الف- TRN1



ب- TRN3-S2



ج-TRN3-S2

شکل ۳: چند مورد از تغییرات شاخص‌های عددی به ازای شدت‌های مختلفی از عیب

در بررسی قابلیت اطمینان یک شـاخص باید دو نکته مورد توجه قرار گیرد: اول اینکه شـاخص موردنظر باید به ازای هر درجه بخصوصی از شدت عیب، مقدار منحصربه‌فردی تولید کند. به طوری که با افزایش شـدت عیب، این مقدار منحصر به فرد کاهشی یا افزایشی باشد. دوم اینکه میزان تغییرات شاخص به‌صورت خطی تغییر کند. بدیهی است که شـرط اول از اهمیت بیشتری برخوردار است. در شـکل (۳) چند مـورد از بررسی دو معیار خطی بودن و منحصـر به فرد بودن، نشان داده شده است. با توجه به اینکه حجم داده‌ها بسیار زیاد است، امکان ترسیم مقدار شـاخص‌ها به ازای شـدت‌های مختلفی از همه عیب‌ها وجـود ندارد. اما ایـن کار برای همه حالت‌های عیـب و به ازای همه شـاخص‌ها انجام شـده و نتایج آن در جدول (۳) آورده شـده است. همان‌طـور که ملاحظه می‌شـود ۳ شـاخص ID، E و قابل‌اطمینان نیستند. ولی شـاخص‌های CC و CSD، در تمام حالت‌ها، تشخیص درست دارند. بقیه شاخص‌ها نیز فقط در یک مورد تشخیص نادرست داشته‌اند.

جدول ۳: توانایی شاخص‌ها در تشخیص عیب با محاسبه آن‌ها بر روی ترانسفورماتورهای مدل

TRN3 S16	TRN3 S4	TRN3 S2	TRN2	TRN1	نام شاخص	ردیف
T	T	F	T	T	ED	۱
T	T	F	T	T	SD	۲
F	F	F	T	T	ID	۳
T	T	F	T	T	IA	۴
T	T	F	T	T	SDA	۵
T	T	F	T	T	ASLE	۶
T	T	F	T	T	RMSE	۷
F	F	F	T	T	E	۸
F	F	F	T	T	σ_e	۹
T	T	F	T	T	σ	۱۰
T	T	F	T	T	σ_s	۱۱
T	T	F	T	T	MAX	۱۲
T	T	T	T	T	ρ	۱۳
T	T	T	T	T	CC	۱۴
T	T	F	T	T	SSE	۱۵
T	T	F	T	T	SSRE	۱۶
T	T	F	T	T	SSMMRE	۱۷
T	T	F	T	T	DABS	۱۸
T	T	F	T	T	MM	۱۹
T	T	T	T	T	CSD	۲۰

(منظـور از T (مخفـف True) یعنی تشخیص صحیـح و منظور از F (مخفف False) یعنی تشخیص نادرست)

۴- روش‌های تشخیص عیب

در ایـن مقاله مراحل پایش وضعیـت ترانسفورماتور در سه مرحله به شرح زیر ارایه می‌شود:

۴-۱- تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور بدون نیاز به اندازه‌گیری مرجع

در بیشتر کارهای تحقیقاتی که در زمینه تشخیص عیب به کمک FRA انجام شده است فرض بر این بوده که نتایج اندازه‌گیری تابع تبدیل حالت سالم ترانسفورماتور در دسترس است. درحالی‌که در بعضی از مواقع بخصوص برای ترانسفورماتورهای قدیمی این اندازه‌گیری موجود نیست. در این حالت از روش مبتنی بر ساختار متقارن استفاده می‌شود. به این صورت که تابع تبدیل ترانسفورماتور از هر سه فاز اندازه‌گیری شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. معیاری که در این مقاله بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها پیشنهاد می‌شود این است که شاخص CC در محدوده فرکانسی 20-1000 KHz بین فازهای U-V، V-W و W-U محاسبه شود. سپس بر اساس محاسبات انجام شده اگر شاخص محاسبه‌شده بین فازها در محدوده $CC_{UV},\ CC_{VW}\ and\ CC_{WU} < 0.9899$ باشد در این صورت عیبی در داخل ترانسفورماتور رخ داده است. لازم به ذکر است تعیین این محدوده‌ها بر اساس انجام آزمایش بر روی تعداد زیادی از ترانسفورماتورها بوده است.

۴-۲- تشخیص نوع عیب

بعد از اینکه عیبی در ترانسفورماتور تشخیص داده شد، باید نوع آن تعیین شود. بنابراین در این بخش ابتدا ۲ روش شناخته شده در این زمینه بیان شده و سپس روش پیشنهادی مطرح می‌شود.

۴-۲-۱- روش‌های پیشین

در مرجع [۲۴] روش جدیدی برای محاسبه شاخص‌ها جهت تشخیص نوع عیب پیشنهاد شده است. این روش، شاخص W نامیده شده است. در این روش یک پنجره با طول مشخص (WL) تعریف می‌شود. این پنجره از یک نقطه فرکانسی شروع و به یک نقطه فرکانسی دیگر ختم می‌شود و کل محدوده فرکانسی اندازه‌گیری شده را با پله‌های مطلوب اسکن می‌کند. در هر مرحله، شاخص‌ها در محدوده فرکانسی طول پنجره محاسبه و به فرکانس مرکزی پنجره اختصاص داده می‌شوند. شاخص‌های محاسبه‌شده در هر مرحله می‌توانند به عنوان یک مشخصه به منظور طبقه‌بندی عیوب استفاده شوند. تمامی شاخص‌هایی که در بخش قبلی معرفی شدند می‌توانند به کمک روش پنجره‌سازی مورد محاسبه باشند. با این‌حال در [۲۴]، این روش فقط بر CC اعمال شده است. بعد از محاسبه هر یک از شاخص‌ها در پنجره‌های مشخص، منحنی مقدار شاخص‌ها برحسب فرکانس ترسیم می‌شود. این منحنی نشان می‌دهد که هر عیب، محدوده فرکانسی بخصوصی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان به لحاظ بصری بین عیوب مختلف تمایز قایل شد.

روش دیگری در مرجع [۲۵] مبتنی بر تابع همبستگی متقابل (CCF) برای تشخیص نوع عیب پیشنهاد شده است. تابع همبستگی متقابل در واقع معیاری برای تعیین نرخ تشابه بین دو تابع یا مجموعه‌ای از داده‌ها است. بعد از محاسبه مقادیر تابع همبستگی متقابل نمونه، تأخیر زمانی بین دو فرآیند می‌تواند به عنوان با حداکثر قدر مطلق همبستگی متقابل تعیین شود. برای تفکیک عیوب، ابتدا تابع همبستگی متقابل برای توابع تبدیل اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. سپس بر اساس مقدار و میزان تاخیر زمانی شاخص محاسبه شده برای هر عیب نسبت به حالت سالم، عیوب مختلف از یکدیگر تفکیک می‌شوند. در این روش دیگر نیازی به تقسیم‌بندی محدوده‌های فرکانسی نیست و در عمل کل محدوده فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۲- روش پیشنهادی

نتایج کارهای تحقیقاتی [۳-۱] نشان می‌دهند که عیوب مکانیکی باعث تغییر پارامترهای مدل مشروح ترانسفورماتور (خازن‌ها، اندوکتانس‌ها و ...) شده و در نهایت باعث تغییر تابع تبدیل آن می‌شوند. این تحقیقات نشان می‌دهند که به‌عنوان مثال عیب AD باعث تغییر اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها می‌شود. درحالی‌که عیب RD بیشتر ظرفیت‌های خازنی را تغییر داده و تغییرات اندوکتانس ناچیز است. در حالت کلی می‌توان گفت انواع مختلفی از عیوب اثرات متفاوتی روی پارامترهای ترانسفورماتور داشته و باعث ایجاد تغییر در محدوده‌های فرکانسی مختلفی در پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده، می‌شوند. به بیان ساده، هرچند ممکن است عیب خاصی باعث تغییر در کل محدوده فرکانسی اندازه‌گیری شده شود ولی بیشتر هر یک از ۴ عیب مطالعه شده، ناحیه فرکانسی بخصوصی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر همین اصل می‌توان از تقسیم پاسخ فرکانسی به بازه‌های مختلف جهت تمایز و طبقه‌بندی عیوب استفاده نمود. بنابراین در این مقاله پیشنهاد می‌شود که پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور به ۱۰ بازه فرکانسی مساوی تقسیم شده و شاخص موردنظر برای هر بازه محاسبه شود. بعد از محاسبه شاخص موردنظر در هر بازه، داده‌ها به یک سیستم هوشمند تشخیص الگو اعمال می‌شوند. یکی از بهترین سیستم‌های تشخیص الگو، شبکه عصبی احتمالی (PNN) است که توانایی آن قبلاً در این زمینه به اثبات رسیده است [۱۴].

برای آموزش شبکه عصبی ابتدا باید ساختار آن (تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها) تعیین شود. در بخش ۳ مشخص شد که سه شاخص CC، و CSD از قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به بقیه شاخص‌ها برخوردار هستند لذا از این شاخص‌ها به عنوان ورودی به PNN استفاده می‌شود. با توجه به اینکه چهار عیب داریم ماتریس ورودی را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$I = \begin{bmatrix} Index_{1,AD_i} & Index_{1,RD_j} & Index_{1,DSV_k} & Index_{1,SC_l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Index_{10,AD_i} & Index_{10,AD_j} & Index_{10,DSV_k} & Index_{10,SC_l} \end{bmatrix}$$

خروجی شبکه یک بردار تک‌بعدی است که نوع خطا را مشخص می‌کند و می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$O = [AD_1 \dots AD_i RD_1 \dots RD_j DSV_1 \dots DSV_k SC_1 \dots SC_l]$$

به کمک داده‌های حاصل از ترانسفورماتورهای مدل می‌توان شبکه را آموزش داد و سپس با استفاده از داده‌های حاصل از ترانسفورماتورهای واقعی، شبکه آموزش‌دیده را مورد آزمایش قرار داد.

۴-۳- تشخیص میزان و شدت عیب

مرحله بعدی در فرآیند تشخیص عیب سیم‌پیچ بعد از مشخص شدن نوع آن، شناسایی میزان و شدت عیب است. این نکته از آن جهت اهمیت دارد که وقتی جابجایی و تغییر شکل کوچکی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد با شناسایی شدت آن در مراحل اولیه می‌توان از صدمات جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد.

در مراجع مختلف عمدتاً شدت عیب به سه دسته؛ کم (Low)، متوسط (Moderate) و شدید (Severe) تقسیم‌بندی شده است. متأسفانه استاندارد متقنی برای این منظور تدوین نشده است و تنها استاندارد موجود در این زمینه استاندار کشور چین است. بنابراین در ادامه به منظور تشخیص شدت عیب، استاندارد کشور چین و همچنین روش پیشنهادی توسط محققین، ارایه می‌شود.

۴-۳-۱- استاندارد کشور چین

طبق استاندارد چینی [۲۶] ابتدا شاخص RXY در سه محدوده فرکانسی LF: 1-100 kHz، MF: 100-600 kHz و HF: 600-1000 kHz محاسبه می‌شود. سپس بر اساس جدول (۴) شدت عیب مشخص می‌شود.

جدول ۴: تشخیص شدت عیب به کمک استاندارد کشور چین [۲۶]

شدت عیب	محدوده تغییرات R_{XY}
کم (Low)	$1 \le R_{LF} < 2$ یا $1 \le R_{MF} < 2.0$
متوسط (Moderate)	$0.6 \le R_{LF} < 1$ یا $R_{MF} < 0.6$
شدید (Severe)	$R_{LF} < 0.6$

۴-۳-۲- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، ابتدا به کمک اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی ترانسفورماتورهای مدل، محدوده تغییرات شاخص‌های مختلف به ازای شدت‌های متفاوتی از عیب محاسبه می‌شود. سپس بر اساس محدوده تغییرات شاخص‌ها، شدت عیب در سه دسته کم، متوسط و شدید تقسیم‌بندی می‌شود. در جدول (۵) محدوده تغییرات برخی از شاخص‌ها آورده شده است. تمامی این محدوده‌ها به کمک دستورات شرطی در نرم‌افزار اعمال می‌شوند تا تصمیم‌گیری بر اساس آن‌ها صورت گیرد.

جدول ۵: تشخیص شدت عیب بر اساس میزان تغییرات شاخص‌های مختلف [۲۷]

ردیف	کم	متوسط	شدید
۱	$ED \le 0.4$	$0.4 < ED \le 0.8$	$ED > 0.8$
۲	$ASLE \le 0.4$	$0.4 < ASLE \le 0.8$	$ASLE > 0.8$
۳	$RMSE \le 60 \times 10^{-5}$	$60 \times 10^{-5} < RMSE \le 100 \times 10^{-5}$	$RMSE > 100 \times 10^{-5}$
۴	$MAX \le 0.3$	$0.3 < MAX \le 0.5$	$MAX > 0.5$
۵	$0.9800 \le \rho < 0.9995$	$0.9500 < \rho \le 0.9800$	$\rho < 0.9500$
۶	$0.9900 \le CC < 0.9995$	$0.9900 < CC \le 0.9700$	$CC > 0.9700$
۷	$SSE \le 10 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4} < SSE \le 30 \times 10^{-4}$	$SSE > 30 \times 10^{-4}$
۸	$SSRE \le 100 \times 10^{-4}$	$100 \times 10^{-4} < SSRE \le 500 \times 10^{-4}$	$SSRE > 500 \times 10^{-4}$
۹	$DABS \le 0.01$	$0.01 < DABS \le 0.015$	$DABS > 0.015$
۱۰	$MM \ge 0.96$	$0.92 < MM \le 0.98$	$MM < 0.92$
۱۱	$CSD \le 0.03$	$0.03 < CSD \le 0.05$	$CSD > 0.05$

۵- معرفی نرم‌افزار و مراحل انجام کار

در این بخش، برنامه محاسبه تمامی شاخص‌ها در محیط MATLAB نوشته شده و به‌صورت واسط کاربری گرافیکی آماده شده است. نرم‌افزار به‌گونه‌ای تدوین شده است که کافی است کاربر، داده‌ها را وارد نماید و با طی مراحل مختلف، به وضعیت ترانسفورماتور پی ببرد. روند تشخیص وضعیت ترانسفورماتور به‌گونه‌ای است که ابتدا نوع عیب و سپس شدت آن تعیین می‌شود. در شکل (۴) نمایی از نرم‌افزار پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک FRA نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود می‌توان شاخص‌های موردنظر را در بازه‌های فرکانسی مختلف محاسبه نمود و منحنی تغییرات آن را مشاهده کرد. الگوریتم تشخیص عیب با استفاده از نرم‌افزار پیشنهادی به شرح زیر قابل‌بیان است:

۱- ایجاد بانک اطلاعاتی از نتایج اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط سالم و معیوب ترانسفورماتورها
۲- معرفی ۲۲ شاخص عددی به کار گرفته شده در مراجع معتبر
۳- اعمال شاخص‌های عددی بر نتایج اندازه‌گیری‌ها و استخراج شاخص‌های قابل‌اطمینان
۴- استخراج مشخصه تشخیص احتمال وقوع، نوع و شدت عیب ترانسفورماتورهای مدل با استفاده از روش‌های پیشین و روش‌های پیشنهادی در این مقاله
۵- بررسی قابلیت اطمینان مشخصه‌های استخراج‌شده با اعمال آن‌ها بر روی ترانسفورماتورهایی که در عمل معیوب شده‌اند.

بعد از آماده‌سازی نرم‌افزار، با اعمال داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده از ترانسفورماتورهای مختلف می‌توان عملکرد نرم‌افزار را مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور از منوی Open Data گزینه Load را انتخاب می‌کنیم. حال می‌توان با انتخاب هر شاخص، میزان تغییرات آن را به ازای شدت‌های مختلف از عیب مشاهده کرد. برای مثال منحنی تغییرات شاخص ED به ازای شدت‌های مختلفی از عیب RD در شکل (۵) آورده شده است. کاربر می‌تواند تغییرات شاخص‌های مختلف در بازه‌های فرکانسی دلخواه و به ازای شدت‌ها و انواع مختلفی از عیب را مشاهده نماید و بر اساس آن تصمیم بگیرد. علاوه بر این، خود نرم‌افزار نیز این امکان را دارد که نوع عیب و شدت آن را مشخص نماید.

۵-۱- تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور به کمک نرم‌افزار

از منوی Fault Detection گزینه Fault Occurrence Detection انتخاب می‌شود. در سمت راست و در کنار شاخص‌ها، جعبه‌ای ظاهر می‌شود که سالم یا معیوب ترانسفورماتور را مشخص می‌کند.

۵-۲- تشخیص نوع عیب به کمک نرم‌افزار

از منوی Fault Detection گزینه Fault Type Detection انتخاب می‌شود. کاربر برای محاسبه میزان تغییرات شاخص‌ها در بازه‌های فرکانسی مختلف می‌تواند از منویی که طبق شکل (۶) در اختیار دارد استفاده کرده و محدوده تغییرات را در بازه فرکانسی تعیین شده، مشاهده نماید.برای تشخیص نوع عیب، سه روش وجود دارد. روش اول روش پیشنهادی بر پایه PNN است. برای به‌کارگیری روش دوم کافی است کاربر گزینه Windowed Frequency Calculation را انتخاب کرده و سپس تعداد بازه‌های فرکانسی (No of Frequency Bands) و نیز تعداد پنجره‌ها (No of Data in Each Window) در بازه را مشخص نماید تا خروجی آن به‌صورت گرافیکی نمایش داده شود. این امکان نیز پیش‌بینی شده است که کاربر بتواند این محدوده‌ها را تغییر دهد.

در روش سوم کاربر با انتخاب Sample Cross-Correlation Function (طبق شکل ۷) می‌تواند به‌صورت بصری منحنی تغییرات ρ برحسب تاخیر زمانی را مشاهده نماید. محدوده پیش‌فرض نمایش تاخیر زمانی، ۴۰ است ولی کاربر می‌تواند آن را تغییر داده و منحنی تغییرات را بازه‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۴۰ مشاهده نماید.

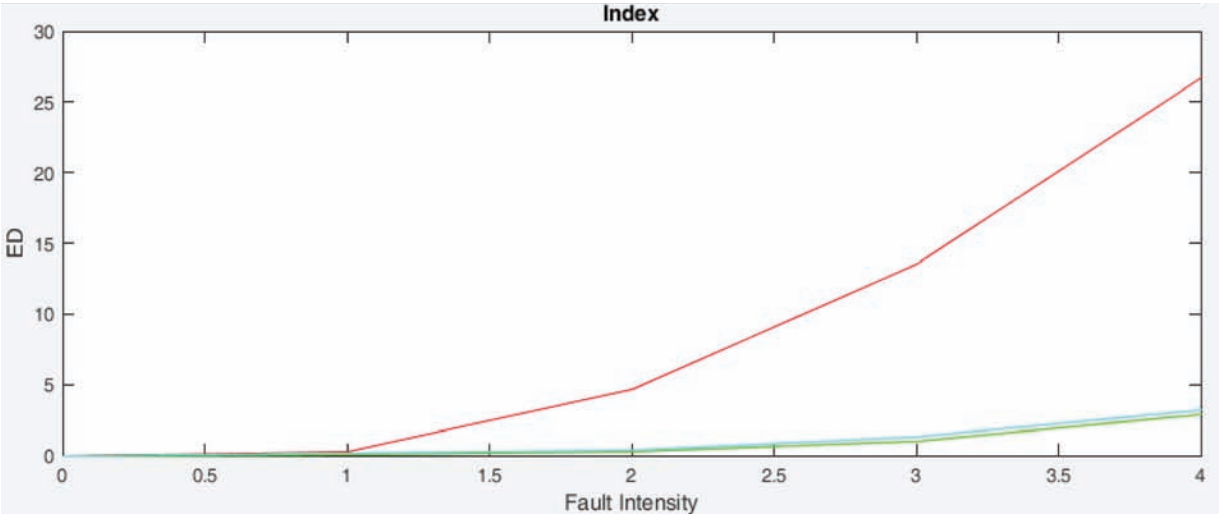
۵-۳- تشخیص میزان و شدت عیب

برای تشخیص شدت عیب،کاربر باید از منوی Fault Detection گزینه Fault Intensity Detection را انتخاب نماید. روش اول با نام Method1(Chinese) و روش دوم با نام Index Variation مشخص شده است.

۶- خروجی نرم‌افزار (تحلیل نتایج)

خروجی نرم‌افزار دارای سه مرحله؛ تشخیص معیوب بودن، تشخیص

شکل ۴: نمایی از نرم‌افزار طراحی‌شده برای پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک FRA



شکل ۵: یک نمونه از خروجی نرم‌افزار (تغییرات شاخص ED به ازای شدت‌های مختلفی از RD)

3	MMR (new) = Max/GMax*100								
< 100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
600	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1000	100	25	22	24	29	31	33	36	38

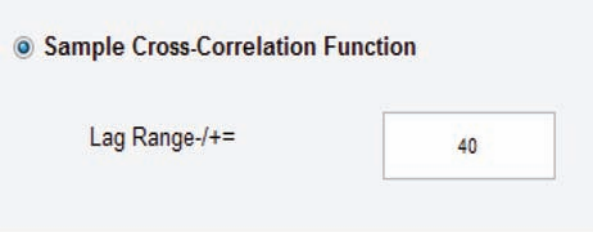
شکل ۶: محاسبه شاخص موردنظر در بازه دلخواه

نوع عیب و تشخیص شدت عیب است.

برای تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتـور، از بین اندازه‌گیری‌هایی که در جدول ۲ انجام شده است، اندازه‌گیری TRN7 و TRN8 بر روی فازهای مختلف از یک ترانسفورماتور انجام شده است. TRN7 مربوط بـه یک ترانسفورماتـور سالم و TRN8 مربوط به یـک ترانسفورماتور معیـوب است. وقتـی اندازه‌گیری مربوط به ایـن ترانسفورماتورها به نرم‌افزار اعمال می‌شـود، نرم‌افـزار TRN7 را سالم و TRN8 را معیوب تشخیص می‌دهد که صحیح است.

بـرای تشخیص نوع عیب بایـد به این نکته مهم بایـد توجه کرد که داده‌های به دست آمده از ترانسفورماتورهای مدل صرفاً برای استخراج مشخصه استفاده می‌شـود. جدول ۶ الگویی که از اعمال این روش‌ها بـر ترانسفورماتورهای مدل حاصل‌شـده را نشـان می‌دهد. جدول ۷ نیز نتایـج حاصل از تشخیص نوع عیب را نشـان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شـود روش‌هـای WCM و CCF در TRN5 تشخیص درسـت ندارند ولی روش پیشنهادی در هر دو مورد TRN5 و TRN6 نوع عیب را درست تشخیص داده است.

در جدول (۸) نتایج مربوط به تشخیص شدت عیب آورده شده است. همان‌طـور که ملاحظه می‌شـود استاندارد چینـی [۲۶] در خیلی از موارد شـدت عیب را Low تشخیص می‌دهد که صحیح نیست. روش پیشنهادی در TRN 2 فقط Degree 2 را به جای Severe، Moderate تشخیص داده است و در بقیه حالت‌ها تشخیص درستی داشته است.



شکل ۷: تشخیص نوع عیب به کمک روش تابع همبستگی متقابل

جدول ۶: استخراج مشخصه مربوط به تشخیص نوع عیب به کمک روش‌های MCW و FCC

نوع عیب	محدوده فرکانسی که در روش WCM تحت تأثیر قرار می‌گیرد	تغییرات ایجادشده در منحنی در روش CCF
AD	۲۰۰ تا ۸۰۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت چپ
DSV	محدوده بالای ۶۵۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و بدون شیفت منحنی
RD	محدوده ۵۰ تا ۷۰۰ کیلوهرتز	بدون تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت چپ
SC	محدوده ۱۰۰ تا ۹۰۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت راست

دیده می‌شود که در مجموع روش‌های پیشنهادی با دقت بسیار خوبی (حتی در مورد ترانسفورماتورهای واقعی) توانسته‌اند نوع و شدت عیب را به‌درسـتی تشخیص دهند. بنابرایـن می‌توانند به عنوان یک روش مطمئـن در صنعت مورد استفاده قرار گیـرد. همچنین برنامه مربوط بـه محاسبه سایر روش‌های موجود در مراجـع معتبر نیز در نرم‌افزار نوشته شده است که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده کرده و با یکدیگر مقایسه نماید.

جدول ۷: تشخیص نوع عیب به کمک مشخصه‌های استخراج‌شده

ترانسفورماتور	نوع واقعی عیب	روش تشخیص عیب				
		WCM	CCF	PNN		
				CC	NCC	CSD
TRN5	AD	RD	SC	AD	AD	AD
TRN6	DSV	DSV	DSV	DSV	DSV	DSV

جدول ۸: تشخیص شدت عیب به کمک مشخصه‌های استخراج‌شده

ترانسفورماتور	شدت واقعی	استاندارد چین [۲۶]	روش پیشنهادی
TRN 1	1 cm: Low 2 cm: Moderate 3 to 8 cm: Severe	1 to 3 cm: Healthy 3 to 8 cm: Low	1 cm: Low 2 cm: Moderate 3 to 8 cm: Severe
TRN 2	Degree 1: Low Degree 2: Moderate Degrees 3 to 4: Severe	Degree 1: Healthy Degrees 2 to 4: Low	Degree 1: Low Degrees 2 to 4: Severe
TRN 3	Condition 1 to 3: Low Condition 4 to 5: Moderate	All Condition: Healthy	Condition 1 to 3: Low Condition 4 to 5: Moderate
TRN 4	All Condition: Severe	All Condition: Severe	All Condition: Severe
TRN 5	Severe	Low	Severe
TRN 6	Severe	-	Severe

۷- نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه ابتدا با استفاده از انجـام اندازه‌گیری‌های لازم بر روی ترانسفورماتورهـای مختلف، توابع تبدیل موردنیـاز در حالت سالم و همچنیـن حالت‌های مختلف عیب (AD، RD، DSV و SC) استخراج شـدند. سپس روش‌های مختلفی که در مراجع گوناگون برای مقایسه توابـع تبدیل اندازه‌گیری شـده در حالت‌های مختلـف رخداد عیب در ترانسفورماتـور نسبـت به حالت سالم پیشنهاد شـده است، مورد بررسی قرار گرفت و نحوه محاسبه این شـاخص‌ها بیان شد. علاوه بر این، بر اساس کارهای تحقیقاتی انجام‌شـده توسط محققین مختلف و همچنیـن تجربیات و تحقیقات مؤلفین، روش‌هـای مختلفی برای تشخیص عیب (شـامل تشخیـص وقوع عیب، تشخیـص نوع عیب، تشخیص میزان عیب) ارایه شـد. بعد از ارایـه روش‌ها، برنامه‌نویسی در محیـط نرم‌افـزار MATLAB و به صـورت گرافیکی انجام شـد. برنامه نوشـته شـده به‌گونه‌ای است که کاربر به‌راحتـی بتواند از آن استفـاده کرده و در صـورت لزوم تغییرات لازم را اعمـال نماید. بعد

از اعمـــال داده‌های مختلف و تحلیل نتایج این نتیجه حاصل شـــد که مطمئن‌تریـــن روش برای تشخیص نوع عیب، روش پیشنهادی بر پایه ترکیب شاخص‌های CC، ρ و CSD و PNN است. در تشخیص شدت عیب، روش پیشنهادی دقت خوبی در تشخیص شدت عیب دارد ولی روش اول در برخی موارد به‌درستی شدت عیب را تعیین نمی‌کند. در حالتی که مقایســه بین سه فاز از یک ترانسفورماتور (در صورت عدم دستیابـــی به تابع تبدیل مرجع) انجام می‌شـــود فقط می‌توان سالم یا معیوب بودن ترانسفورماتور را تعیین کرد که روش پیشنهادی، در این زمینه موفق عمل می‌کند.

سپاسگزاری

ایـــن تحقیـــق تحـــت عنوان یـــک پـــروژه تحقیقاتی در شـــرکت برق منطقه‌ای زنجان به انجام رسیده است. بنابراین نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی شـــرکت برق منطقه‌ای زنجان در طول انجام تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

واژه‌های اختصاری

علامت اختصاری	توضیح
FRA	Frequency Response Analysis
DGA	Dissolved Gas Analysis
AD	Axial Displacement
RD	Radial Deformation
DSV	Disc Space Variation
SC	Short Circuit
DCS	Deformation of the Core Sheets
ED	Euclidean Distance
CD	Complex Distance
SD	Standard Deviation
ID	Integral of Difference
IA	Integral of Absolute difference
SDA	Standardized Difference Area
ASLE	Absolute Sum of Logarithmic Error
RMSE	Root Mean Square Error
MAX	Maximum of difference
CC	Correlation Coefficient
NCC or ρ	Normalized Correlation Coefficient
SSE	Sum Squared Error
SSRE	Sum Squared Ratio Error
SSMMRE	Sum Squared Max-Min Ratio Error
DABS	Absolute Difference
MM	Minimum-Maximum ratio
CSD	Comparative Standard Deviation
σ	Spectrum Deviation
σ_s	Stochastic Spectrum Deviation
CCF	Cross-Correlation Function
PNN	Probabilistic Neural Network

مراجع

[1] Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K., and Mohseni, H.: “Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer winding”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 493–505, 2003.
[2] Christian J., and Feser K., “Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp 214-220, 2004.
[3] Leibfried T., and Feser K., “Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1333-1341, 1999.
[4] A. A. Devadiga, N. Harid, H. Griffiths, N. Al Sayari, B. Barkat, Sh. Jayaram, H. Ikeda, T. Koshizuka, Y. Taniguchi, “Winding Turn-to-Turn Short-Circuit Diagnosis using FRA Method: Sensitivity of Measurement Configuration”, IET Science, Measurement & Technology, Vol. 13, No. 1, pp. 17-24, 2019.
[5] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., Shayegani Akmal, A. A., Mohseni, H., “Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 1, pp. 218-227, 2017.
[6] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., Shayegani Akmal, A. A., Mohseni, H., “Improving the numerical indices proposed for the FRA interpretation by including the phase response”, International journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 83, pp. 585–593, 2016.
[7] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., “FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 89, pp. 115–125, 2017.
[8] S. Miyazaki, M. Tahir, S. Tenbohlen, “Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency response analysis”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13 , No. 15, pp. 3493-3500, 2019.
[9] A. Abu-Siada, M. I. Mosaad, D. Won Kim and M. F. El-Naggar, “Estimating Power Transformer High frequency Model Parameters using Frequency Response Analysis”, IEEE Transactions on Power Delivery, Early Access, 2020.
[10] L. Satish ; B. Biswas, “Experimental Results on Estimation of Effective Inductance Associated With Winding Resonances of 1-φ and 3-φ Transformers using Measured FRA”,IEEE Transactions on Power Delivery, Early Access, 2020.
[11] B. Biswas, L. Satish, “Analytical Expressions to Link SCNF and OCNF of Transformer Windings to Their Inductances and Capacitances for 1-Φ, 3-Φ Y and Δ Configurations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 4, pp. 1725- 1735, 2019.

ادامه از صفحه ۴۳

Aug. 2015.
[12] J. Liu, B. Cai, G. Xu, and G. Sun. “Energy Consumption Modeling and Optimization of Traction Control for High-speed Railway Trains.” Int. J. Control and Automation 8, no. 10, pp. 109-124, 2015.
[13] S. Su, T. Tang, X. Li, and Z. Y. Gao, “Optimization on multi-train operation in subway system,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 2, pp. 673–684, Apr. 2014.
[14] J. C. Goodwin, D. I. Fletcher, and R. F. Harrison, “Multi-train trajectory optimisation to maximise rail network energy efficiency under travel-time constraints,” Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. f Rail Rapid Transit, Jul. 2015.
[15] S. Su, T. Tang, and C. Roberts, “A cooperative train control model for energy saving,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 2, pp. 622–631, Apr. 2015.
[16] X. Li, H. K. Lo, “An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations,” Transportation Research Part B, vol. 64, pp. 73–89, 2014.
[17] F. Devaux and X. Tackoen, “Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks,” Ticket to Kyoto final report, sep. 2014.
[18] R. Barrero, X. Tackoen and J. van Mierlo, “Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 224, pp. 207-225, 2010.
[19]D. Iannuzzi and P. Tricoli, “Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors,” IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 27, no. 4, pp. 2129-2140, 2012.
[20]F. Ciccarell, D. Iannuzzi and P. Tricoli, “Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand,” Transp. Research Part C, vol. 24, pp. 36-49, 2012.
[21]Z. Gao, Y. Fang and D. Sun, “Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network,” J. Modern Power Systems, Clean Energy, pp. 181-190, 2014.
[22]R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini and R. Nejati fard, “Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line,” Energy Conversion and Management, vol. 56, pp. 206-214, 2012.
[23]S. de la Torre, A.J. Sánchez-Racero, J.A. Aguado, M. Reyes, and O. Martínez, “Optimal sizing of energy storage for regenerative braking in electric railway systems.” IEEE Trans. Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1492-1500, 2015.
[24]H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin, and B. Wang, “Optimal energy management, location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm”, Energies, vol. 8, no. 10, pp. 11618-11640, 2015.
[25]F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, and D. Iannuzzi. “Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage.” IEEE Trans. Power Electronics vol. 29, no. 1, pp. 275-286, 2014.
[26]B. Wang, Z. Yang, F. Lin, and W. Zhao. “An improved genetic algorithm for optimal stationary energy storage system locating and sizing.” Energies vol. 7, no. 10, pp. 6434-6458, 2014.
[27]D. Iannuzzi, D. Lauria, and P. Tricoli. “Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems.” Optimization and Engineering, vol. 13, no. 4, pp. 689-704, 2012.
[28]Vukan R. Vuchic, Urban transit systems and technology. John Wiley & Sons, 2007.
[29]S. Ahmadi, A. Dastfan, “Energy saving in urban railway using speed profile optimization,” 24th Iranian Conf. Elec. Eng. (ICEE), IEEE, pp. 1076-1081, May 2016

***

[12] J. Liu, Zh. Zhao, Ch. Tang, Ch. Yao, Ch. Li, and S. Islam, “Classifying Transformer Winding Deformation Fault Types and Degrees using FRA based on Support Vector Machine”, IEEE Access, Vol. 7, pp. 112494-112504, 2019.
[13] Bigdeli, M., Vakilian, M., Rahimpour, E., “Transformer Winding Faults Classification Based on Transfer Function Analysis by Support Vector Machine”, IET Electric Power Applications, Vol. 6, No. 5, 2012.
[14] Bigdeli, M., Vakilian, M., Rahimpour, E., “A Probabilistic Neural Network Classifier Based Method for Transformer Winding Fault Identification through its Transfer Function Measurement”, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 23, No. 3, 2013.
[15] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.149, 2012.
[16] IEC Standard on Power Transformers, Part 18: Measurement of Frequency Response, IEC 60076-18, 2012.
[17] CIGRE Technical Brochure no. 342, Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA), 2008.
[18] Sardar, S., Kumar, A., Chatterjee, B., Dalai, S., “Application of Statistical Interpretation Technique for Frequency Response Analysis and Detection of Axial Displacement in Transformer Winding”, IEEE Calcutta Conference (CALCON), 2017.
[19] Zhang, Z. W., Yan, J. D., Tang, W. H., Guo, L. J., Tao, S. M., “Experimental Investigation of Localized Axial Winding Displacement in a High Frequency Range for Power Transformers”, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, China, 2016.
[20]Khalili Senobari, R., Sadeh, J., Borsi, H., “Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review”, Electric Power Systems Research, Vol. 155, pp. 172-183, 2018.
[21] Wesley, N. Kh., Bhandari, S., Subramaniam, A., Bagheri, M., Panda, S. K., “Evaluation of Statistical Interpretation Methods for Frequency Response Analysis based Winding Fault Detection of Transformers”, IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2016.
[22] Web Address: https://megger.com/electrical-tester/September-2018/best-practice-for-sweep-frequency-response-analysi
[23] Web Address: https://www.techrentals.com.my/pdf/ products/Omicron_FRAnalyzer.pdf
[24] Tarimoradi, H., Gharehpetian, G. B., “A Novel Calculation Method of Indices to Improve Classification of Transformer Winding Fault Type, Location and Extent”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 4, pp. 1531-1540, 2017.
[25] Abbasi, A. R., Mahmoudi, M. R., Avazzadeh, Z., “Diagnosis and Clustering of Power Transformer Winding Fault Types by Cross-Correlation and Clustering Analysis of FRA Results”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 19, pp. 4301-4309, 2018.
[26]The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China: Frequency response analysis on winding deformation of power transformers, Std. DL/T911-2004, ICS27.100, F24, Document No. 15182, 2005.
[27] Bigdeli, M., Azizian, D., Gharehpetian, G. B., “Detection of Probability of Occurrence, Type and Severity of Faults in Transformer Using Frequency Response Analysis Based Numerical Indices”, Measurement, Vol. 168, pp. 108322, 2021.

***