

Detection of Short Circuit Faults in Power Transformer by the Measurement of Its Windings Voltages and Currents Using a Neuro-Fuzzy System**Homayoun Meshgin-Kelk, *Associated Professor*, Mahyar Mohammadpour-Hasan-Kiadeh, *Ms.C.***Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
meshgin@tafreshu.ac.ir, mohammadpour.mahyar@gmail.com**Abstract**

Insulation failure between winding turns is one of the main causes of incipient winding fault in a transformer. During the operation of a transformer, strong electric fields are applied to the dielectric material of its windings. Dielectric deterioration and aging are the most important causes of short circuit faults in transformer windings. Due to the probable occurrence of this type of defect and its extension, its early detection is a very important task in power systems. In this paper, it is shown that by measuring the phase difference between voltage and current of transformer windings under load conditions, the existence of internal winding fault can be detected. For online fault detection, an intelligent system (neural-fuzzy system) has also been proposed. Both simulation results and laboratory tests confirm the ability of the proposed method for the detection of internal winding faults especially at light loads. With this method, there is no need to de-energize the power transformer.

Keywords: neuro-fuzzy system, power transformer, winding fault**Received:** 13 June 2021**Revised:** 31 July 2021**Accepted:** 4 August 2021**Corresponding Author:** Homayoun Meshgin Kelk

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.50.5.6>

مقاله پژوهشی

تشخیص خطای اتصال کوتاه در سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت مبتنی بر سنجش ولتاژ و جریان سیم‌پیچ با استفاده از سیستم عصبی-فازی

همایون مشگین کلک، دانشیار، مهیار محمدپور حسن‌کیاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

meshgin@tafreshu.ac.ir, mohammadpour.mahyar@gmail.com

چکیده: خرابی عایق بین حلقه‌های سیم‌پیچ یکی از دلایل اصلی خطای اولیه سیم‌پیچ در ترانسفورماتور است. در حین کار ترانسفورماتور، میدان‌های الکتریکی قوی به مواد دی‌الکتریک سیم‌پیچ‌های آن اعمال می‌شود. خرابی و پیری دی‌الکتریک از مهمترین عوامل خطای اتصال کوتاه در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور هستند. به سبب فراوانی این خطا و احتمال گسترش آن، تشخیص و شناسایی آن در مراحل اولیه اهمیت دارد. در این مقاله نشان داده شده است که با سنجش و بررسی اختلاف فاز میان ولتاژ و جریان در فازهای ترانسفورماتور در حالت بارداری می‌توان به وجود خطا پی برد. در این راستا اثر اتصال کوتاه حلقه در یک سیم‌پیچ بر سیم‌پیچ‌های دیگر نیز بررسی شده است. به منظور تشخیص خطای برخط، استفاده از یک سیستم هوشمند (سیستم عصبی-فازی) نیز پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای یک ترانسفورماتور نمونه، بیان‌گر صحت و قابلیت روش ارائه شده در تشخیص برخط خطای سیم‌پیچ در ترانسفورماتور است.

کلمات کلیدی: اتصال کوتاه حلقه، ترانسفورماتور قدرت، سیستم عصبی-فازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۵/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر همایون مشگین کلک

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تفرش - دانشگاه تفرش - دانشکده مهندسی برق - گروه قدرت

۱- مقدمه

روش‌های برخط مانیتورینگ ترانسفورماتور قدرت علاوه بر کارآمدی سبب کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر در بهره‌برداری از این دستگاه می‌شود. حدود ۳۸ درصد خرابی‌های ترانسفورماتور مربوط به خطای اتصال کوتاه حلقه در سیم‌پیچ‌های آن است. اگر این خطا به موقع و در مراحل اولیه شناسایی نشود، منجر به گسترش خطا می‌شود که می‌تواند آسیب‌های جدی به ترانسفورماتور وارد کند. به همین دلیل تاکنون تلاش‌های بسیاری در زمینه شناسایی زود هنگام این نوع خطا صورت گرفته است [۱]. تغییر شکل سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور در اثر نیروهای بزرگ الکترومغناطیسی ناشی از جریان اتصال کوتاه حلقه‌ها است که می‌تواند آسیب سختی به سیم‌پیچ‌ها وارد کند. تغییر شکل سیم‌پیچ، توانایی ایستادگی در برابر اتصال کوتاه را کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به شکست سریع ترانسفورماتور می‌شود [۲].

تاکنون برای آشکارسازی خطای اتصال کوتاه حلقه در ترانسفورماتورهای قدرت روش‌های گوناگونی به کار گرفته شده‌اند. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به آنالیز گازهای حل شده در روغن^۱ (DGA) اشاره نمود که در آن از روغن دستگاه نمونه‌گیری می‌شود و نمونه‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند [۳-۵]. اندازه‌گیری تخلیه جزئی هم از روش‌های دقیقی است که در آشکارسازی برخی خطاها به کار می‌رود که نیازمند نصب سنسورهای ویژه‌ای بر روی دستگاه است [۶،۷]. آنالیز پاسخ فرکانسی^۲ (FRA) برای عیب‌یابی و نظارت وضعیت ترانسفورماتور از روش‌های پیشرفته‌ای است که بسیار مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته است. در این روش باید ترانسفورماتور بی برق و دستگاه آنالیز فرکانسی به سیم‌پیچ ترانسفورماتور متصل شود [۸]. آنالیز لرزش هم برای آشکارسازی خطاهای الکتریکی و مکانیکی پیشنهاد شده که نیازمند سنسورهای خاصی است و خروجی سنسورها با روش‌های مناسبی تحلیل می‌شوند. آنالیز پاسخ فرکانسی سیگنال‌های لرزش هم پیشنهاد شده است [۹،۱۰]. برای استخراج داده‌ها در تمامی این روش‌ها نصب سنسورها و یا استفاده از تجهیزات جانبی ویژه و دقیق ضروریست که عموماً یا بر هزینه هستند و یا برای پردازش داده‌ها به زمان طولانی نیاز دارند. برخی هم قابلیت تشخیص خطای برخط را ندارند. همسو با روش‌های گوناگون آشکارسازی خطاها در ترانسفورماتور و با پیشرفت فناوری سیستم‌های دیجیتال در سخت‌افزار و نرم‌افزار، به کارگیری روش‌های هوشمند آشکارسازی خطا برای تفسیر نتایج نیز بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی برق می‌توان از روش‌های هوشمند تشخیص خطا استفاده کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای تشخیص عیب ترانسفورماتور با استفاده از نتایج FRA به دلیل کارایی و دقت بالای آنها محبوبیت یافته‌اند [۸،۱۱،۱۲]. برای تحلیل نتایج آزمون‌های DGA از منطق فازی نیز بهره گرفته شده است تا اگر بیش از یک خطا در ترانسفورماتور رخ داده باشد تشخیص مطمئن‌تری صورت گیرد [۱۳]. یک ویژگی بارز در استفاده از هوش مصنوعی این است که می‌توان نتایج آزمایش‌های مختلف و ارتباط آنها با مکان و میزان خطا را طبقه‌بندی کرد. روش آنالیز گازهای حل شده در روغن را می‌توان برای تشخیص برخط خطا در مراحل اولیه استفاده کرد. این کار به کمک وسیله‌ای به نام کروماتوگراف گاز که به ترانسفورماتور متصل می‌شود صورت می‌پذیرد که وسیله گران‌قیمتی است و برای همه انواع ترانسفورماتورها قابل استفاده نیست. این روش برای ترانسفورماتورهای خشک و ترانسفورماتورهایی که با هوا خنک می‌شوند کاربردی ندارد [۳].

در روش FRA پاسخ‌های فرکانسی خاص از جمله تغییرات ظرفیت خازن‌های بین لایه‌های سیم‌پیچ‌ها یا توابع تبدیلی همچون ادمیتانس نقطه تحریک یا ادمیتانس انتقالی اندازه‌گیری می‌شود. به این منظور یک ولتاژ کم دامنه فرکانس متغیر به یکی از سیم‌پیچی‌ها اعمال و اندازه‌گیری‌های لازم انجام می‌شود. فرکانس ولتاژ اعمال شده در محدوده وسیعی تغییر داده می‌شود و منحنی تغییرات ادمیتانس یا امپدانس نقطه تحریک در بازه فرکانسی به دست می‌آید. تحلیل پاسخ فرکانسی امروزه به عنوان روشی توانا برای شناسایی خطا در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت مورد توجه قرار گرفته است. این روش شناسایی مبتنی بر مقایسه منحنی‌های پاسخ فرکانسی استخراجی در زمان تست با منحنی‌های مرجع است. هر چند انجام آزمایش‌ها در این روش پیچیده نیست لیکن برای تفسیر نتایج نیازمند کارشناس خبره برای تعیین مکان و نوع عیب است [۱۴،۱۵]. به طور کلی از FRA بیشتر برای تغییرات فیزیکی و شکلی سیم‌پیچ‌ها بر اثر اتصال کوتاه استفاده شده است. همچنین اطمینان از نتایج شناسایی خطا با روش FRA به دقت استخراج منحنی‌های به دست آمده از آزمایش بستگی دارند. در دهه اخیر میلادی برای تحلیل نتایج حاصل از FRA از روش‌های هوش مصنوعی استفاده موثری شده است [۸].

به‌کارگیری ولتاژها و جریان‌های عملیاتی ترانسفورماتور در زمان برق‌دار بودن ترانسفورماتور نیز محور برخی پژوهش‌ها بوده است که به عبارتی ویژگی برخط بودن را دارند [۱۶-۱۸]. روش حفاظت دیفرانسیل در این دسته قرار دارد و از روش‌های کلاسیک در عیب‌یابی ترانسفورماتور قدرت است. با این حال توانایی آشکارسازی خطای اتصال کوتاه حلقه‌ها در مراحل اولیه ایجاد عیب را ندارد [۱۶]. وابستگی اختلاف لحظه‌ای ولتاژهای ورودی و خروجی ΔV با جریان ورودی یک سیم‌پیچ موضوع پژوهشی بوده که مبنای شناسایی خطای اتصال کوتاه داخلی ترانسفورماتور قرار گرفته است [۱۷]. همچنین در پژوهشی که در سال ۲۰۱۵ انجام شده نشان داده شده که با وقوع اتصال کوتاه حلقه در سیم‌پیچ ترانسفورماتور، زاویه بین ولتاژ و جریان بی‌باری در فازی که دچار خطا شده است تغییر می‌کند و در حالت بی‌باری نتایج قابل قبولی داشته است [۱۸]. نکته مشترک و حائز اهمیت در روش‌های برخط شناسایی عیب داخلی ترانسفورماتور، در به‌کارگیری ولتاژها و جریان‌های عملیاتی ترانسفورماتور برق‌دار است که نیاز به تجهیزات اضافی پر هزینه هم ندارند.

در مقاله حاضر، مطالعه اتصال کوتاه حلقه در سیم‌پیچ ترانسفورماتور با مدل‌سازی مداری آن ارائه و نشان داده شده است که اتصال کوتاه حلقه نه تنها بر زاویه فاز جریان در سیم‌پیچ معیوب بلکه بر زاویه فاز جریان‌های دو فاز دیگر نیز اثر می‌گذارد که از اهمیت خاصی برخوردار است. داده‌های استفاده شده برای شبیه‌سازی مربوط به یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی است. همچنین این مطالعه با سنجش برخط ولتاژها و جریان‌های ورودی و اختلاف فاز آنها در حالت بارداری ترانسفورماتور انجام و برای بررسی وضعیت سلامت و خطای سیم‌پیچ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. هر چند امکان تحلیل نتایج و آشکارسازی خطا با بررسی کارشناسانه هم امکان‌پذیر است با این حال برای دقت بیشتر، دست‌بندی و تحلیل بر خط نتایج می‌توان از روش‌های هوشمند برای ارزیابی و طبقه‌بندی نتایج بهره گرفت. در اینجا یک سیستم استنتاج تطبیق‌پذیر عصبی فازی هم که روشی کارآمد برای تشخیص خطا در ترانسفورماتورهای قدرت است پیشنهاد شده است [۱۹]. ساختار مقاله به این شرح است: در قسمت دوم مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترانسفورماتور در حالت خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ ارائه شده است. در قسمت سوم نحوه استخراج نتایج آزمایشگاهی بیان شده است. تحلیل نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی و تشخیص خطای اتصال کوتاه در سیم‌پیچ ترانسفورماتور و به‌کارگیری یک روش هوشمند برای تشخیص خطا در قسمت چهارم ارائه شده است. در انتها نتیجه‌گیری مقاله در قسمت پنجم بیان شده است.

۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترانسفورماتور در حالت خطای اتصال کوتاه سیم‌پیچ

از داده‌های یک ترانسفورماتور سه فاز ۴۰۰ به ۳۸۰ ولت ۱۷ کیلو-ولت-آمپر که در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفته برای مطالعه و شبیه‌سازی استفاده شده است. سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به ترتیب ۴۰ و ۳۸ دوری هستند. در شکل (۱) تصویر این ترانسفورماتور آزمایشگاهی نشان داده شده است. با فرض خطی بودن منحنی مغناطیسی هسته، می‌توان از مدل سلف‌های تزویج شده و فازورها برای مدل‌سازی ترانسفورماتور در حالت پایدار استفاده نمود. در حالت کار عادی و سالم ترانسفورماتور، ۶ سیم‌پیچ برای سه فاز اولیه و سه فاز ثانویه وجود دارد و در حالت خطا، سیم‌پیچ هفتم فرضی به آن اضافه می‌شود. بنابراین معادلات حاکم بر عملکرد ترانسفورماتور به‌صورت زیر هستند:



شکل (۱): ترانسفورماتور مورد مطالعه آزمایشگاهی [۲۰]

Figure (1): Laboratory test transformer [20]

$$[V_T] = [R_T][I_T] + j\omega[L_T][I_T] \quad (1)$$

که در آن بردارهای I_T و V_T به ترتیب بردارهای جریان و ولتاژ سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور هستند. سه عنصر اول بردار ولتاژ V_T سه فازور ولتاژ منبع هستند. سه عنصر بعدی در بردار ولتاژ مربوط به ولتاژهای سه فاز ثانویه یعنی ولتاژ سه امپدانس بار هستند. در حالت خطا، عنصر هفتمی به بردار ولتاژ V_T اضافه می‌شود که مربوط به سیم‌پیچ خطا است. در حالت سالم بردار جریان I_T نیز شش عنصر و در حالت خطا هفت عنصر دارد. ماتریس R_T ، ماتریس مقاومت فازهای شش سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. این ماتریس برای حالت سالم ۶ در ۶ و به صورت زیر است:

$$[R_T] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که r_1 مقاومت هر فاز در سیم‌پیچ فشار قوی و r_2 مقاومت هر فاز در سیم‌پیچ فشار ضعیف است. ماتریس اندوکتانس L_T در معادله (۱) در حالت سالم به شکل زیر است:

$$[L_T] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن نحوه نام‌گذاری اندوکتانس‌ها به این صورت است: زیر نویس بزرگ و کوچک انگلیسی به ترتیب مربوط به فازهای فشارقوی و فازهای فشارضعیف هستند و برای مثال L_{AA} اندوکتانس خودی فاز A در فشار قوی و L_{bb} اندوکتانس خودی فاز b در فشار ضعیف است. اندوکتانس متقابل بین فاز A فشار قوی و فاز b در فشار ضعیف L_{Ab} و ... است. معادلات ولتاژ-جریان بار نیز به صورت معادله ماتریسی زیر هستند:

$$[V_L] = [R_L][I_L] + j\omega[L_L][I_L] \quad (4)$$

که در آن L_L ماتریس قطری ۳ در ۳ اندوکتانس بار با عناصر قطری L و R_L ماتریس قطری ۳ در ۳ مقاومت بار با عناصر قطری R است. مقاومت و اندوکتانس بار در هر فاز به ترتیب R و L نام‌گذاری شده‌اند. عناصر بردار ولتاژ بار V_L سه عنصر دوم بردار ولتاژ V_T در معادله (۱) و عناصر بردار جریان بار I_L ، سه عنصر دوم بردار جریان ترانسفورماتور I_T در معادله (۱) هستند. در حالتی که در سیم‌پیچ فاز A فشار قوی خطای اتصال کوتاه حلقه رخ دهد یک یا چند حلقه‌ای که دچار اتصال کوتاه شده سیم‌پیچ هفتم فرضی را تعریف می‌کنند. در این صورت یک سطر و یک ستون به ماتریس‌های R_T و L_T اضافه می‌شود. ماتریس R_T برای حالت خطا در حالت بی باری یک ماتریس قطری ۷ در ۷ و به شکل زیر است:

$$[R_T] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

که R_f مقاومتی است که مدار حلقه خطا از طریق آن بسته می‌شود. ماتریس اندوکتانس در حالت خطا به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$[L_T] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} & L_{Cf} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن L_{ff} اندوکتانس خودی بخش سیم‌پیچ خط f و L_{Af} اندوکتانس متقابل بین فاز A فشار قوی و سیم‌پیچ خط f است. برای حلقه‌های اتصال کوتاه شده، معادله ولتاژی به شکل معادله (۷) نوشته می‌شود. در آن بخش از سیم‌پیچ که دچار اتصال کوتاه شده است ولتاژ e_f القاء می‌شود و مدار آن توسط مقاومت R_f بسته می‌شود. این بخش از سیم‌پیچ را می‌توان همانند ثانویه یک اتوترانسفورماتور برای سیم‌پیچ اصلی فاز A فشار قوی در نظر گرفت که از طریق مقاومت R_f بارگذاری شده باشد. بنابراین معادله زیر برای آن برقرار است:

$$0 = R_f I_f - e_f \quad (7)$$

که در آن I_f جریان حلقه خطا است. بر اساس مدل‌سازی فوق و ترکیب معادلات و در حالت کلی، ماتریس مقاومت ترانسفورماتور سه فاز در حالت بارداری و با وجود خطا به صورت زیر در می‌آید:

$$[R_{TL}] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 + R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 + R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 + R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

همچنین ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور سه فاز در حالت بارداری و با وجود خطا به صورت زیر خواهد بود:

$$[L_{TL}] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} & L_{Cf} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} + L & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} + L & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} + L & L_{cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \quad (9)$$

در نتیجه معادلات ولتاژ-جریان ترانسفورماتور در حالت کلی به صورت زیر در می‌آیند:

$$[V_T] = [R_{TL}][I_T] + j\omega[L_{TL}][I_T] \quad (10)$$

ماتریس‌های R_{TL} و L_{TL} به ترتیب ماتریس‌های مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور باردار و با حضور خطای اتصال کوتاه در سیم‌پیچ هستند. بر اساس فرمولاسیون به دست آمده می‌توان شبیه‌سازی ترانسفورماتور سه فاز برای حالت‌های مختلف را انجام داد.

مقادیر لازم برای شبیه‌سازی از طریق آزمایش یا محاسبه به دست آمده‌اند. در آزمایشگاه، مقاومت هر سیم‌پیچ اولیه $7/2$ میلی اهم و مقاومت هر سیم‌پیچ ثانویه $6/5$ میلی اهم اندازه‌گیری شده‌اند. اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌ها با استفاده از روش مدار معادل مغناطیسی محاسبه شده‌اند [۲۱]. برای حالت سالم، اندازه اندوکتانس‌ها برای شبیه‌سازی به صورت رابطه (۱۱) محاسبه شده‌اند. همه مقادیر بر حسب هانری هستند. در حالتی که در یکی از سیم‌پیچ‌های فشار قوی، حلقه اتصال کوتاه ایجاد شود محاسبات با اتصال مقاومت خارجی با مقادیر مختلف $0/15$ ، $0/25$ و $0/35$ اهم به حلقه‌های اتصال کوتاه انجام می‌شوند. برای تست سیستم فازی اول که برای تشخیص فاز خطا طراحی شده است باید داده‌های کافی در دسترس باشد.

$$[L_T] = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.38 & 0.22 & 0.61 & 0.36 & 0.22 \\ 0.38 & 0.93 & 0.38 & 0.36 & 0.88 & 0.36 \\ 0.23 & 0.38 & 0.64 & 0.22 & 0.36 & 0.61 \\ 0.61 & 0.36 & 0.22 & 0.65 & 0.34 & 0.21 \\ 0.36 & 0.88 & 0.36 & 0.34 & 0.91 & 0.34 \\ 0.22 & 0.36 & 0.61 & 0.21 & 0.34 & 0.65 \end{bmatrix} \quad (11)$$

به همین منظور شبیه‌سازی در بارهای گوناگون و مقاومتهای خطای ذکر شده انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی در چند بار مختلف و برای حالتی که خطا در سیم پیچ فاز A رخ داده و مقاومت خطا ۰/۱۵ اهم است در جدول (۱) داده شده است [۲۲]. چون در آزمایشگاه لامپ‌های بخار سدیم چهارصد وات با ضریب توان ۰/۵۶ و لامپ‌های مدادی پانصد وات که کمی خاصیت خازنی دارند برای باردهی ترانسفورماتور به کار گرفته شده‌اند در انجام شبیه‌سازی‌ها از مقادیر عددی مشابه استفاده شده است. در ستون اول سمت چپ جدول (۱) توان بار سه فاز و ضریب توان آن مشخص شده است. در ستون‌های بعدی، کمیت سمت چپ مربوط به حالت پیش از خطا و کمیت سمت راست، مربوط به پس از خطا است. برای نمونه برای بار سه فاز ۱۵۰۰ وات با ضریب توان ۱، جریان فاز A پیش از رخداد خطا ۳/۲۴ آمپر با زاویه فاز ۳۲/۰۷ درجه نسبت به ولتاژ فاز A است. جریان این فاز پس از اتصال مقاومت ۰/۱۵ اهم به مقدار ۴/۱۳ آمپر افزایش یافته است و زاویه فاز جریان نسبت به ولتاژ فاز A به ۲۳/۲ درجه کاهش یافته است. تغییرات جریان و زاویه فاز برای دو فاز دیگر با رخداد خطا در تمامی حالت‌های جدول (۱) مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج جدول (۱) در تمامی حالت‌ها با رخداد خطا در فاز A اندازه جریان در این فاز افزایش و زاویه بین ولتاژ و جریان این فاز کاهش می‌یابد. با بیشتر شدن توان بار، در ضریب توان بار یکسان، اختلاف زاویه ولتاژ و جریان فاز A با رخداد خطا کمتر می‌شود (مقایسه سطرهای سوم و هفتم و مقایسه سطرهای اول، چهارم و هشتم). روند تغییرات زاویه بین ولتاژ و جریان در فاز B عکس تغییرات فاز A است. روند تغییرات زاویه در فاز C مشابه با فاز A است. در هر سه فاز با رخداد اتصال کوتاه حلقه در فاز A، اندازه جریان‌ها بیشتر می‌شود.

۳- استخراج نتایج آزمایشگاهی ترانسفورماتور

پیش از این اشاره شد که یک ترانسفورماتور سه فاز ۴۰۰ به ۳۸۰ ولت ۱۷ کیلو-ولت-آمپر آزمایشگاهی طراحی و تحت آزمایش قرار گرفته است. به منظور انجام عملیات آزمایشگاهی، طراحی این ترانسفورماتور به نحوی است که دست‌رسی به قسمت‌های داخلی سیم‌پیچ آسان‌تر باشد. ابعاد هسته از حد معمول بزرگ‌تر و لذا تعداد دور سیم‌پیچ‌های فشار قوی و فشار ضعیف آن نیز کمتر شده است. چگالی شار نامی هسته ۱/۲ تسلا است. برای ایجاد خطای اتصال کوتاه حلقه، از مکان‌های مشخصی از سیم‌پیچ فشار قوی از شعاع گرفته شده است. برای کنترل جریان در حلقه اتصال کوتاه از مقاومتهای خارجی با توانایی تحمل جریان خطای ۳۰۰ آمپر استفاده شده است. با کلیدزنی، خطا بر روی سیم پیچ ایجاد می‌شود.

Table (1): Simulation results: current of each phase and the angle between voltage and current of each phase for a 0.15 Ω fault resistance.

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی برای جریان هر فاز و زاویه بین ولتاژ و جریان هر فاز برای مقاومت خطای ۰/۱۵ اهم

$P_{3ph}(W) - PF$	$I_A (A)$		θ_A		$I_B (A)$		θ_B		$I_C (A)$		θ_C	
۱۲۰۰ - ۱	۳/۲۴	۴/۱۳	۳۲/۰۷	۲۳/۲	۳/۳۷	۳/۵۴	۲۰/۵۸	۲۶/۱۶	۴/۱۸	۴/۳۸	۲۶/۲۷	۲۲
۱۲۰۰ - ۰/۵۶	۵/۰۷	۵/۶۱	۶۰/۴۳	۵۰/۵	۴/۶۳	۴/۹۴	۳۷/۲۶	۴۰/۱۶	۵/۷۵	۵/۸	۵۴/۵۳	۵۰/۸۲
۲۷۰۰ - ۰/۹۱	۵/۸۷	۶/۶۷	۴۱/۹۲	۳۵	۵/۷۳	۵/۹۸	۴۳/۱۲	۴۴/۵	۶/۸۶	۷/۰۱	۳۸/۵۷	۳۵/۵۷
۳۰۰۰ - ۱	۴/۷۷	۵/۸۱	۱۵/۴۷	۱۱/۲	۵/۱۱	۵/۲۲	۱۰/۰۳	۱۴/۱۸	۵/۹۶	۶/۲۳	۱۴/۱۳	۱۱/۴۷
۴۲۰۰ - ۰/۹۶	۷/۱۱	۸/۰۸	۲۸/۹۱	۲۴/۳	۷/۱۷	۷/۳۷	۲۶/۲۴	۲۸/۹۸	۸/۳۴	۸/۵۶	۲۷/۷۱	۲۵/۴
۲۴۰۰ - ۰/۵۶	۷/۷۶	۸/۳۷	۵۷/۶۹	۵۱/۱	۷/۳	۷/۶۳	۵۵/۸۶	۵۷/۷۵	۸/۶۶	۸/۷۱	۵۵/۰۳	۵۲/۴۹
۵۴۰۰ - ۰/۹۱	۹/۶۳	۱۰/۵	۳۵/۴۴	۳۱/۴	۹/۵۳	۹/۷۷	۳۴/۷۷	۳۶/۷۵	۱۰/۹۷	۱۱/۲	۳۴/۹۶	۳۳/۰۵
۴۵۰۰ - ۱	۶/۵۱	۷/۶۲	۷۱/۰۷	۴/۸۴	۶/۹۳	۷/۰۲	۴/۹۸	۸/۲۲	۷/۸۸	۸/۱۹	۷/۷۹	۵/۹۱
۶۹۰۰ - ۰/۹۴	۱۰/۹۵	۱۲	۲۷/۷۹	۲۴/۷	۱۱	۱۱/۲	۲۷/۹۵	۲۹/۸۵	۱۲/۴۸	۱۲/۷۱	۲۸/۱۹	۲۶/۵۶

با یک کلید تک‌فاز، مقاومت خارجی به حلقه‌های محل خطا متصل می‌شود. با باز بودن این کلید، ترانسفورماتور در حالت عادی و سالم خود کار می‌کند. همچنین برای بارگذاری دستگاه در سمت ثانویه، بارهای مختلف با کلید سه‌فازی به ترانسفورماتور متصل می‌شوند. برای حفاظت از ترانسفورماتور، اتصال کوتاه کامل انجام نمی‌شود. در آزمایشگاه آزمایش‌های فراوانی انجام شده است. در جدول (۲) برخی نتایج آزمایشگاهی برای مقاومت خطای ۰/۱۵ اهم در فاز A ارائه شده است [۲۰]. بارگیری در هر سطر جدول (۲) با بارگیری در هر سطر جدول (۱) یکسان است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که روند تغییرات در آزمایشگاه با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد و نتایج شبیه‌سازی را تایید می‌کند. تفاوت اعداد در این دو جدول ناشی از خطی بودن محاسبات عددی، تفاوت ولتاژ تغذیه آزمایشگاه در زمان تست با ولتاژ شبیه‌سازی و همچنین رفتار غیر ایده‌آل بارهای آزمایشگاهی است. در هر ستون، کمیت سمت چپ مربوط به حالت پیش از خطا و کمیت سمت راست، مربوط به پس از خطا است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت خطا (خرابی کمتر عایق سیم‌پیچ و مراحل اولیه خطا)، دامنه جریان در هر سه فاز و تغییرات اختلاف فاز میان ولتاژ و جریان اولیه ترانسفورماتور نسبت به حالت سالم کمتر می‌شود. بنابراین تشخیص خطا در مراحل اولیه که جریان خطا کمتر است، سخت‌تر و با پیشرفت خطا و افزایش جریان خطا، تشخیص ساده‌تر است. همچنین تشخیص خطا با افزایش بار سخت‌تر خواهد بود و به این معنی است که در حالت بی‌باری و کم‌باری، تشخیص خطای اتصال کوتاه حلقه ساده‌تر است.

۴- تشخیص خطای اتصال کوتاه

نتایج مطالعات و آزمایش‌ها بر روی این ترانسفورماتور نمونه آزمایشگاهی نشان‌گر روند تغییراتی مشخص در اندازه و فاز جریان‌های پایانه‌های آن با رخداد اتصال کوتاه حلقه در سیم‌پیچ اولیه آن است. برای این ترانسفورماتور نمونه، با رخداد اتصال کوتاه حلقه در یک فاز، افزایش جریان سیم‌پیچ‌ها و افزایش یا کاهش زاویه فاز این جریان‌ها مشاهده شده است. روند و اندازه تغییرات متغیرها، وابستگی آنها به میزان بارگیری از دستگاه و همچنین شدت اتصال کوتاه به گونه‌ای است که برای تشخیص وضعیت سلامت یا عیب اتصال کوتاه، نظارت مستمر و دقیق بر مقادیر قابل اندازه‌گیری ضروری است. از این رو به‌کارگیری یک سیستم هوشمند نظارت در تشخیص عیب دستگاه روشی مطمئن و پرسود است. از روش‌هایی که برای این هدف قابل استفاده است می‌توان به روش‌های مبتنی بر منطق فازی و یا شبکه‌های عصبی فازی اشاره نمود. از منطق فازی برای مسائل مربوط به سیستم‌های قدرت از سال ۱۹۷۹ میلادی استفاده شده است. مجموعه فازی در واقع بر اساس تجربه و دانش شخص خبره طراحی می‌شود. این موضوع در هنگام برخورد با مسائلی که در آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۲۳]. برای تشخیص عیب اتصال کوتاه دو مرحله در نظر گرفته می‌شود: تشخیص فازی که در آن خطا رخ داده است و سپس تشخیص شدت خطا. برای تشخیص فاز خطا، یک سیستم فازی طراحی می‌شود که ورودی‌های آن اختلاف تغییرات دامنه جریان‌های اولیه ترانسفورماتور بعد از رخداد خطا هستند.

Table (2): Some experimental results for a 0.15 Ω fault resistance in phase A (angle in degrees).

جدول (۲): برخی نتایج آزمایشگاهی برای مقاومت خطای ۰/۱۵ اهم برای فاز A (زاویه بر حسب درجه است)

$P_{3ph}(W) - PF$	$I_A (A)$		θ_A	
۱۵۰۰ - ۱	۲/۹۲	۳/۲	۳۰/۳۵	۱۶/۹
۱۲۰۰ - ۰/۵۶	۴/۶۴	۴/۷۸	۷۴/۱	۶۳
۲۷۰۰ - ۰/۹۱	۵/۷۶	۶/۰۸	۵۵/۳۸	۴۶/۲۴
۳۰۰۰ - ۱	۴/۶	۵/۴۴	۱۶/۸۲	۱۲/۶۹
۴۲۰۰ - ۰/۹۶	۷	۷/۵۶	۴۱/۸۵	۳۶/۷۵
۲۴۰۰ - ۰/۵۶	۸/۲۴	۴/۴۸	۶۵/۷۳	۵۹/۵۳
۵۴۰۰ - ۰/۹۱	۱۰/۱۴	۱۰/۶۸	۴۵/۸	۴۱/۷۷
۴۵۰۰ - ۱	۶/۴۲	۷/۳	۱۱/۲۶	۸/۷۹
۶۹۰۰ - ۰/۹۴	۱۱/۲۷	۱۱/۹	۳۸/۴۱	۳۵/۲

برای هر ورودی دو تابع عضویت دوزنقه‌ای که بیان‌گر مقادیر مثبت و مقادیر منفی هستند تعریف می‌شود. برای تشخیص شدت خطا سیستم فازی دوم طراحی می‌شود که ورودی‌های آن عبارتند از توان بار، ضریب توان بار و تغییر اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان اولیه با رخداد خطا. توابع عضویت این ورودی‌ها گوسی انتخاب می‌شوند [۲۴]. در موتور استنتاج منطقی فازی، قوانینی که ورودی‌ها و خروجی‌ها را به هم مرتبط می‌سازند و بیان‌گر عملکرد ترانسفورماتور هستند قرار می‌گیرند. برای سیستم فازی اول که فاز خطا را تشخیص می‌دهد ۶ قانون در نظر گرفته شده است. در طراحی سیستم دوم که شدت خطا را ارزیابی می‌کند از موتور استنتاج عصبی-فازی تطبیق‌پذیر^۳ (ANFIS) استفاده می‌شود که در آن تعداد قوانین بین ورودی‌ها و خروجی‌ها برای داشتن نتایج مطلوب انتخاب می‌شوند [۲۳]. از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ترانسفورماتور، داده‌های مورد نیاز برای طراحی دو سیستم فازی به‌منظور تشخیص فاز خطا و تشخیص شدت خطا به‌دست می‌آیند. با داشتن اندازه جریان و همچنین اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان در سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور در حالت خطا و محاسبه تغییرات آنها نسبت به مقادیر مشابه در حالت کار سالم و برای یک بار مشخص، می‌توان ورودی‌های مورد نیاز سیستم فازی را مشخص کرد. می‌توان ۶ ورودی برای سیستم فازی اول در نظر گرفت. در تشخیص فاز خطا، کاهش یا افزایش اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان اولیه مهم است. بنابراین سه ورودی اول، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان اولیه هر فاز هستند که دو تابع عضویت دوزنقه‌ای به هر کدام اختصاص داده می‌شود که با مقادیر مثبت و منفی مشخص می‌شوند. مثبت بیان‌گر افزایش اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان و منفی بیان‌گر کاهش این اختلاف فاز است. مقادیر ΔI_A ، ΔI_B و ΔI_C تغییر در اندازه جریان‌های سه فاز ناشی از رخداد خطا در سیم‌پیچ هستند. تفاضل تغییرات دامنه جریان فازهای ورودی یعنی سه مقدار $\Delta I_A - \Delta I_C$ ، $\Delta I_B - \Delta I_A$ و $\Delta I_C - \Delta I_B$ محاسبه و به‌عنوان ورودی‌های چهارم تا ششم در نظر گرفته می‌شوند. با داشتن تفاضل تغییرات دامنه‌ها به‌عنوان ورودی و مقایسه آن‌ها می‌توان مشخص کرد کدام فاز بیشترین افزایش دامنه را دارد. مقدار مثبت $\Delta I_A - \Delta I_C$ یعنی تغییر دامنه جریان در اثر خطا در فاز A بیشتر از فاز C و مقدار منفی $\Delta I_A - \Delta I_C$ یعنی تغییر دامنه جریان در اثر خطا در فاز C بیشتر از فاز A است. دو ورودی دیگر هم به همین صورت تفسیر می‌شوند. برای این ورودی‌ها هم توابع عضویت دوزنقه‌ای در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در تمام حالت‌ها و تعیین متغیرهای فوق به‌عنوان ورودی‌های سیستم فازی، قوانین موتور استنتاج سیستم فازی برای تشخیص فاز خطا معین می‌شوند. $\Delta \theta_A$ ، $\Delta \theta_B$ و $\Delta \theta_C$ تغییرات زاویه بین ولتاژ و جریان فازها با رخداد خطا هستند. نمونه‌ای از متغیرهای ورودی این سیستم فازی در جدول (۳) و الگوی استفاده شده در موتور استنتاج آن در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. داده‌های جدول (۳) با استفاده از مقادیر جدول (۱) محاسبه شده‌اند. نوع سیستم فازی سوگنو^۴ است. برای خروجی هم سه مقدار ثابت ۰، ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته می‌شود که هر کدام بیانگر فازی است که خطا در آن رخ می‌دهد. سه عدد ۰، ۰/۵ و ۱ به‌ترتیب بیانگر خطا در سه فاز A، B و C هستند. با تعریف ورودی‌ها و خروجی‌ها و قوانین استنتاج، سیستم فازی برای تشخیص فاز خطا به صورت سیستمی با ۶ ورودی و یک خروجی و ۶ قانون که این ورودی‌ها و خروجی‌ها را به هم مرتبط می‌سازند، طراحی شده است.

Table (3): Sample of input variables calculated from the simulation results of Table (1) for a 0.15 Ω fault resistance in phase A

جدول (۳): نمونه متغیرهای ورودی محاسبه شده از روی نتایج شبیه‌سازی جدول (۱) برای خطا در فاز A برای مقاومت خطای ۰/۱۵ اهم

$\Delta \theta_A$	$\Delta \theta_B$	$\Delta \theta_C$	$\Delta I_A - \Delta I_C$	$\Delta I_B - \Delta I_A$	$\Delta I_C - \Delta I_B$
-۸/۸۷	۵/۵۸	-۴/۲۷	۰/۶۹	-۰/۷۲	۰/۰۳
-۹/۹۳	۲/۹	-۳/۷۱	۰/۴۹	-۰/۲۳	-۰/۲۶
-۶/۹۲	۱/۰۳	-۳	۰/۶۵	-۰/۵۵	-۰/۱
-۴/۲۷	۴/۱۵	-۲/۶۶	۰/۷۷	-۰/۹۳	۰/۱۶
-۴/۶۱	۲/۷۴	-۲/۳۱	۰/۷۵	-۰/۷۷	۰/۰۲
-۶/۵۹	۱/۸۹	-۲/۵۴	۰/۵۶	-۰/۲۸	-۰/۲۸
-۴/۰۴	۱/۹۸	-۱/۹۱	۰/۶۴	-۰/۶۳	-۰/۰۱
-۲/۲۳	۳/۲۴	-۱/۸۸	۰/۸	-۱/۰۲	۰/۲۲
-۳/۰۹	۱/۹	-۱/۶۳	۰/۸۲	-۰/۸۵	۰/۰۳

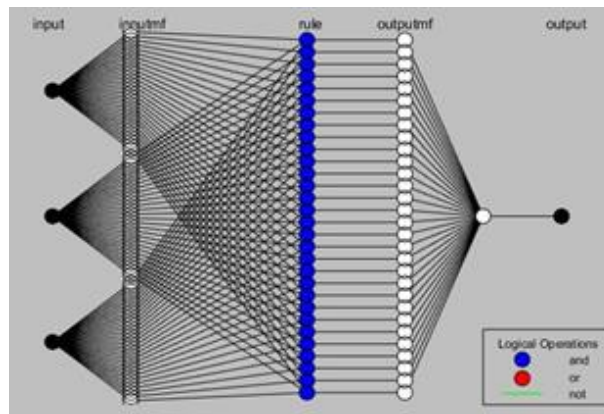
Table (4): The pattern used in the fuzzy system inference rule to detect faulty phase
جدول (۴): الگوی استفاده شده در موتور استنتاج سیستم فازی برای تشخیص فاز خطا

$\Delta\theta_A$	$\Delta\theta_B$	$\Delta\theta_C$	نحوه تغییر جریان‌ها	محل خطا
-	+	-	$\Delta I_A - \Delta I_C > 0$	در فاز A خطا رخ داده است
-	+	-	$\Delta I_A - \Delta I_C < 0$	در فاز C خطا رخ داده است
-	-	+	$\Delta I_B - \Delta I_A > 0$	در فاز B خطا رخ داده است
-	-	+	$\Delta I_B - \Delta I_A < 0$	در فاز A خطا رخ داده است
+	-	-	$\Delta I_C - \Delta I_B > 0$	در فاز C خطا رخ داده است
+	-	-	$\Delta I_C - \Delta I_B < 0$	در فاز B خطا رخ داده است

برای سیستم فازی دوم که به منظور تشخیص شدت خطا است، در ANFIS از روش خوشه‌بندی فازی^۵ استفاده شده است. برای این سیستم سه ورودی تعریف می‌شود: اندازه توان بار، ضریب توان بار و کاهش اختلاف فاز ولتاژ و جریان در پایانه‌های اولیه ترانسفورماتور. با مشخص نمودن فاز خطا توسط سیستم فازی اول، اطلاعات فقط فاز خطا به همراه اطلاعات بار به عنوان ورودی سیستم فازی دوم در نظر گرفته می‌شود تا شدت خطا مشخص شود. مقاومت‌های خطای ۰/۱۵، ۰/۲۵، ... اهمی تعیین‌کننده شدت خطا هستند. در مقاومت خطای کمتر، شدت خطا بیشتر و در مقاومت خطای بیشتر، شدت خطا کمتر است. مقدار مقاومت اتصال کوتاه R_f در هر حالت بیانگر شدت خطاست و برای این منظور در سیستم فازی دوم، مقدار R_f در هر حالت به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی در ANFIS و داده‌های موجود، سیستم فازی دوم طراحی می‌شود که این طراحی شامل انتخاب توابع عضویت ورودی‌ها و تعداد قوانین که برابر با این توابع عضویت هستند، می‌شود. با انتخاب تعداد خوشه‌ها که معرف توابع عضویت و تعداد قوانین هستند دقت نتایج به دست آمده تغییر می‌کند. این توابع عضویت بر اساس پراکندگی و تراکم داده‌ها برای هر ورودی توسط ANFIS تعیین می‌شوند و بازه تعریف آنها منظم نیست. در این تحقیق توابع عضویت گوسی انتخاب شده‌اند. البته کاربر می‌تواند پارامترهای توابع عضویت را تغییر دهد. در نتایج نشان داده شده در این مقاله از پارامترهای انتخابی نرم‌افزار برای توابع عضویت استفاده شده است. شکل (۲) ساختار سیستم فازی طراحی شده توسط ANFIS را نشان می‌دهد. این ساختار مانند یک شبکه عصبی مصنوعی با دو لایه ورودی و خروجی و یک لایه پنهان (لایه مربوط به قوانین) است. بهره‌گیری از ANFIS و طراحی سیستم فازی توسط روش هوشمند خوشه‌بندی فازی این مزیت را دارا است که با استفاده از داده‌هایی محدود، الگوریتمی برای سیستم فازی مشخص می‌کند که معرف کارکرد سیستم است و این ساختار را که همانند یک شبکه عصبی مصنوعی است توسط داده‌ها آموزش می‌دهد تا خطای آن به کمترین میزان ممکن برسد.

در جدول (۵) بخشی از داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش سیستم عصبی-فازی طراحی شده نشان داده شده‌اند. مقادیر ستون‌های اول تا سوم سه داده ورودی از هر آزمایش و مقادیر ستون چهارم اندازه مقاومت‌های اتصال کوتاه (خروجی) هستند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی ردیف‌های ۱ تا ۹ با ردیف‌های ۱۰ تا ۱۸ جدول (۵)، اثر شدت خطا (اندازه مقاومت خارجی اتصال کوتاه) و میزان بارگیری از ترانسفورماتور بر روی تغییرات زاویه بین ولتاژ و جریان را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود با کاهش اندازه مقاومت خارجی (افزایش شدت خطا) تغییرات زاویه بین ولتاژ و جریان در سیم‌پیچی که در آن خطا وجود دارد بیشتر می‌شود. برای آموزش این سیستم فازی که ساختار آن همانند یک شبکه عصبی مصنوعی است از روش هایپرید استفاده شده است. در شکل (۳) نتایج آموزش این سیستم نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده، تایید کننده ایده پیشنهادی هستند. در شکل (۳) ستاره‌ها نقاطی هستند که برای آموزش به کار گرفته شده‌اند و منحنی پیوسته، خروجی شبکه عصبی-فازی است. چنانچه داده آزمایشگاهی برای فازی که در آن خطا وجود دارد به سیستم فازی طراحی شده داده شود می‌تواند مقدار مقاومت خطا در محل اتصال را به عنوان خروجی تولید کند که نشانگر شدت خطا است. برای نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، سیستم فازی برای تشخیص فاز خطا مورد بررسی قرار گرفت. برای هر دو مطالعه، شبیه‌سازی در بارهایی غیر از بارهای جدول (۱) در حالتی که در یکی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور اتصال کوتاه مقاومتی وجود دارد انجام و برای تست سیستم فازی تشخیص فاز خطا استفاده شده است. مشاهده شده است که سیستم طراحی شده به خوبی توانایی تشخیص فازی که در آن خطا وجود دارد را دارد.



شکل (۲): ساختار سیستم عصبی- فازی طراحی شده

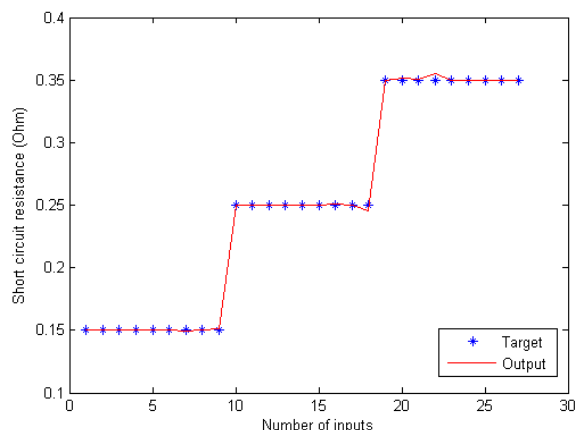
Figure (2): Designed neuro-fuzzy system structure

Table (5): Part of the data used to train the neuro-fuzzy system (data related to phase A)

جدول (۵): بخشی از داده‌های استفاده شده برای آموزش سیستم عصبی-فازی (داده‌های مربوط به فاز A)

$P_{3ph}(W)$	Pf	$\Delta\theta_A$	مقاومت خارجی اتصال کوتاه
۱۵۰۰	۰/۹۸	-۱۳/۳۵	۰/۱۵
۱۲۰۰	۰/۵۶	-۱۱/۱	۰/۱۵
۲۷۰۰	۰/۹۱	-۹/۱۴	۰/۱۵
۳۰۰۰	۱	-۴/۱۳	۰/۱۵
۴۲۰۰	۰/۹۶	-۵/۱	۰/۱۵
۲۴۰۰	۰/۵۶	-۶/۲	۰/۱۵
۵۴۰۰	۰/۹۱	-۴/۰۳	۰/۱۵
۴۵۰۰	۰/۹۸	-۲/۴۷	۰/۱۵
۶۹۰۰	۰/۹۴	-۳/۲۱	۰/۱۵
۱۵۰۰	۰/۹۸	-۶/۰۸	۰/۲۵
۱۲۰۰	۰/۵۶	-۷/۲۶	۰/۲۵
۲۷۰۰	۰/۹۱	-۴/۲۳	۰/۲۵
۳۰۰۰	۱	-۴/۰۷	۰/۲۵
۴۲۰۰	۰/۹۶	-۴/۲۳	۰/۲۵
۲۴۰۰	۰/۵۶	-۵/۶۲	۰/۲۵
۵۴۰۰	۰/۹۱	-۲/۸۴	۰/۲۵
۴۵۰۰	۰/۹۸	-۰/۹۱	۰/۲۵
۶۹۰۰	۰/۹۴	-۱/۸۳	۰/۲۵

سیستم عصبی-فازی دوم هم که برای تشخیص شدت خطا آموزش داده شده است نیز به خوبی کارایی خود را برای نتایج شبیه‌سازی نشان داده است. برای نتایج آزمایشگاهی به دلیل کمتر بودن داده‌های آموزشی، سیستم برای داده‌های تستی که در بازه داده‌های آموزش قرار دارند توانایی خوبی در تشخیص فاز خطا و شدت خطا را داشته است. با این حال برای نقاط تست خارج از بازه داده‌های آموزش شبکه عصبی-فازی، دچار خطا می‌شود. برای ترانسفورماتور آزمایشگاهی مورد مطالعه، روش تشخیص خطای پیشنهادی و سیستم‌های فازی و عصبی-فازی طراحی شده تا بارگیری کمتر از ۴۰ درصد توان نامی، تشخیص خطا را به خوبی انجام می‌دهد. به عبارتی این روش توانایی تشخیص خطا در بارهای سبک با ضریب توان‌های کمتر را دارد. دلیل این عدم توانایی به ماهیت این نوع خطا بستگی دارد. در خطای اتصال کوتاه حلقه و در فرکانس قدرت، مدار معادل حلقه اتصال کوتاه خاصیت مقاومتی دارد و لذا جریان حلقه اتصال کوتاه با ولتاژ القایی در آن تقریباً هم فاز است.



شکل (۳): نتیجه به دست آمده از آموزش سیستم عصبی-فازی

Figure (3): The result obtained from the training of the neuro-fuzzy system

بنابراین تاثیر جریان حلقه اتصال کوتاه چه به لحاظ اندازه و چه به لحاظ زاویه فاز، با بزرگ شدن جریان بار و بزرگ شدن ضریب توان بار، کمتر می‌شود. به عبارتی دیگر، جریان خطا اثر کمتری بر روی اختلاف فاز ولتاژ و جریان در هر فاز می‌گذارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که در یک ترانسفورماتور باردار با رخداد خطای اتصال کوتاه حلقه، اندازه جریان فازهای مختلف و زاویه بین ولتاژ و جریان هر سیم‌پیچ در طرف تغذیه تغییر می‌کند. همچنین نشان داده شد که اندازه تغییرات دامنه جریان‌ها و زاویه در فازهای مختلف یکسان نیست. میزان تغییرات این زوایای فاز به اندازه بار و ضریب توان بار هم بستگی دارد. در مطالعات پیشین این تغییرات زاویه فاز در حالت بی باری بررسی شده بود. نتایج مقاله حاضر نشان می‌دهند که با نظارت ولتاژها و جریان‌های هر فاز می‌توان آشکارسازی خطای اتصال کوتاه در هر سیم‌پیچ را به صورت برخط انجام داد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی و نحوه تغییرات اندازه و فاز جریان فازها، برای تشخیص خطا استفاده از یک سیستم نظارت هوشمند تشخیص خطا برای ترانسفورماتور مناسب به نظر می‌رسد. در این پژوهش نشان داده شد که می‌توان از یک سیستم هوشمند تطبیق‌پذیر برای این منظور استفاده نمود و کارایی ایده پیشنهادی مورد تایید قرار گرفت. ویژگی بارز مونیتورینگ اندازه و زاویه فاز جریان‌ها در این روش تشخیص خطا آنست که بدون نیاز به بی برقی ترانسفورماتور، می‌توان از وضعیت سلامت آن یا وجود خطای اتصال کوتاه حلقه در حالت بارداری آگاه شد. در این روش حتی می‌توان با طراحی یک سیستم هوشمند و بدون نیاز به کارشناس خبره، بر وضعیت سلامت ترانسفورماتور به صورت برخط نظارت نمود. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان دادند که کارآمدی روش پیشنهادی در بارهای سبک بهتر است و برای بارهای بزرگ‌تر نیازمند مطالعات و تحقیقات بیشتری است. همچنین کارایی روش پیشنهادی در تشخیص خطا و شدت آن به ظرفیت ترانسفورماتور و میزان بارگیری از آن بستگی دارد. این روش برای کاربرد در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی که توان ترانسفورماتورهای آن کمتر است کارایی بهتری دارد.

References

مراجع

- [1] CIGRE Working Group A2.37, "Transformer reliability survey", CIGRE Brochure 642; CIGRE: Paris, France, Dec. 2015.
- [2] J. Chong, A. Abu-Siada, "A novel algorithm to detect internal transformer faults", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-5, Detroit, MI, USA, July 2011 (doi: 10.1109/PES.2011.6039472).
- [3] D. Kweon, Y. Kim, "Interpretation of turn-to-turn insulation fault by dissolved gas analysis", IEEE Trans. on Dielectrics and Insulation Materials, vol. 25, no. 4, pp. 1560-1566, Aug. 2018 (doi: 10.1109/TDEI.2018.007-477).
- [4] H.D. Faria, J.G. Costa, "A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 46, pp. 201-209, June 2015 (doi: 10.1016/j.rser.2015.02.052).

- [5] S. M. Ghoneim, I.B.M. Taha, "A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 81, pp. 265-274, Oct. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.02.018).
- [6] H. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, K. Miralikhani, "Advancing new techniques for UHF PD detection and localization in power transformers in the factory tests", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 448-455, Feb. 2015 (doi: 10.1109/TDEI.2014.004249).
- [7] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Muller, M.H. Samimi, M. Siegel, "Diagnostic measurements for power transformers", *Energies*, vol. 9, no. 5, Article Number: 347, May 2016 (doi: 10.3390/en9050347).
- [8] M. Tahir, S. Tenbohlen, "Transformer winding condition assessment using feedforward artificial neural network and frequency response measurements", *Energies*, vol. 14, no. 11, Article Number: 3227, pp. 1-25, May 2021 (doi: 10.3390/en14113227).
- [9] S. Miyazaki, M. Tahir, S. Tenbohlen, "Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency analysis", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13 no. 15, pp. 3493-3500, Aug. 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6032).
- [10] S. Hajiaghahi, K. Abbaszadeh, A. Salemnia, "A new approach for transformer interturn faults detection using vibration frequency analysis", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 14-28, March 2019 (doi: 10.22068/IJEEE.15.114).
- [11] M. Tahir, S. Tenbohlen, S. Miyazaki, "Analysis of statistical methods for assessment of power transformer frequency response measurements", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp.618-626, April 2020 (doi: 10.1109/TPWRD.2020.2987205).
- [12] H. Zhou, K. Hong, H. Huang, J. Zhou, "Transformer winding fault detection by vibration analysis methods", *Applied Acoustics*, vol. 114, pp. 136-146, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.apacoust.2016.07.024).
- [13] C.Q. Su, "A new fuzzy logic method for transformer incipient fault diagnosis", *Proceeding of the IEEE/ICFS*, pp. 324-327, Vancouver, BC, Canada, July 2016 (doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737704).
- [14] IEC60076-18, "Measurement of frequency response", ED.1', IEC Std. March 2012, International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012.
- [15] IEEE Std C57.149-2012., "IEEE guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers", IEEE Standard Association, New York, NY, USA, 2013.
- [16] L. Sevev, U. Khan, Z. Zhang, "Enhancing power transformer differential protection to improve security and dependability", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2642-2649, Feb. 2017 (doi: 10.1109/TIA.2017.2670525).
- [17] A.S. Masoum, N. Hashemnia, A. Abu-Saida, M.A.S. Masoum, S.N. Islam, "Online transformer internal fault detection based on instantaneous voltage and current measurements considering impact of harmonics", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 587-598, Sept. 2014 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2358072).
- [18] N. Asadi, H. Meshgin-Kelk, "Modeling, analysis, and detection of internal winding faults in power transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2419-2426, May 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2015.2431972).
- [19] R.A. Hooshmand, M. Parastegari, Z. Forghani, "Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 32-42, Aug. 2012 (doi: 10.1109/MEI.2012.6268440).
- [20] M. Maleki, "Design and implementation of a monitoring system for the detection of internal winding faults in power transformers", Msc. Thesis, Tafresh University, 2017 (in Persian).
- [21] X. Yan, W. Zengping, L. Qing, "A novel inductance calculation method in power transformer model based on magnetic circuit", *Proceeding of the IEEE/TENCON*, pp. 1-4, Melbourne, VIC, Australia, Nov. 2005 (doi: 10.1109/TENCON.2005.301303).
- [22] M. Maohammadpour, "Detection of short circuit fault in power transformer by neuro-fuzzy system", Msc. Thesis, Tafresh University, 2018 (in Persian).
- [23] T.J. Ross, "Fuzzy logic with engineering applications", 3rd Edition, University of New Mexico, USA, 2010.
- [24] K. Ramesh, M.Sushama, "Inter-turn fault detection in power transformer using fuzzy logic", *Proceeding of the IEEE/ICSEMR*, pp. 1-5, Chennai, India, Nov. 2014 (doi: 10.1109/ICSEMR.2014.7043581).

1. Dissolved gas analysis
2. Frequency response analysis
3. Adaptive neuro-fuzzy inference system
4. Sugeno
5. Fuzzy C-means