

روش جدید برای تخمین عمر باقی مانده ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن

امید قادری
محمدرضا فیضی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

چکیده

بر اساس استانداردهای موجود عمر مفید ترانسفورماتورهای قدرت ۳۰ سال است. اطمینان از همخوانی وضعیت سیستم عایقی با عمر نصب شده ترانسفورماتور، می تواند از بروز نقص و از کارافتادگی نابهنگام آن جلوگیری کند. در این مقاله یک روش برای تخمین عمر باقی مانده ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس آنالیز گازهای حل شده در روغن معرفی شده است. در این روش، وضعیت سیستم عایقی بر اساس مقادیر گازهای CO و CO_2 به سه دسته کلی تقسیم بندی می شود. سپس، بر اساس دسته بندی انجام شده و در نظر گرفتن مقادیر گازهای H_2 ، CH_4 ، C_2H_6 و N_2 ، وضعیت دقیق تر سیستم عایقی به وسیله چهار تخمین گر فازی تخمین زده می شود. در نهایت خروجی این تخمین گرها با استفاده از الگوریتم سنجش فازی^۱ ترکیب شده و وضعیت سیستم عایقی مشخص می شود. به دلیل عدم قطعیت در نتایج حاصل شده بر اساس مقادیر گازها و نسبی بودن موضوع تخمین وضعیت سیستم عایقی، از منطق فازی در تخمین و ترکیب نتایج حاصله بر اساس مقادیر گازها، استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال نمونه های گرفته شده از ترانسفورماتورهای مختلف به روش مورد نظر نشان می دهد که وضعیت تشخیص داده شده برای ترانسفورماتورهای مورد بررسی در توافق بسیار خوبی با وضعیت واقعی آنها است. این روش می تواند به عنوان یک ابزار تشخیصی در ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: عمر باقی مانده، ترانسفورماتور قدرت، آنالیز گاز.

A new Method to Estimate the Remaining Life of Power Transformers Using the Analysis of Dissolved Gases in Oil

O. Ghaderi Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz
M. R. Feyzi Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz

Abstract

Any power transformer is expected to serve at least for 30 years according to the current standards. Therefore, the insulation life time should be in a good match with it to prevent unwanted failure or damage of transformers as a result of insulation failure. Based on the analysis of dissolved gases in oil, a new method is proposed for the estimation of remaining life of power transformer. In this method, status of the insulation is classified in three general groups based on the CO and CO_2 contents of the oil. Then, having the H_2 , CH_4 , C_2H_6 and N_2 contents of the oil, the condition of the insulation is determined more accurately by using the aforementioned classification and four fuzzy estimators. The fuzzy logic is employed to improve the accuracy of the estimated status for the insulation, obtained from the method based on the amount of dissolved gases in the oils. The proposed method is applied on different sets of samples obtained from several transformers with certain insulation conditions. The estimated status for the insulation of each transformer showed a good agreement with corresponding set of data for the same transformer.

Keywords: Analysis of dissolved gases, Power transformers, Remaining life.

۱- مقدمه

افزایش عمر اقتصادی ترانسفورماتورهای قدرت یکی از موضوعات مهم در زمینه مدیریت انرژی است. برای عملی شدن این امر، تخمین دقیق عمر باقی‌مانده این تجهیزات از اهمیت ویژه برخوردار است. با این کار می‌توان هزینه‌های مربوط به جایگزینی، تعمیرات و نگهداری را به‌حداقل رسانده و قابلیت اطمینان سیستم را تا حد زیادی بالا برد [۵ و ۶]. از طرف دیگر، عمر مفید مورد انتظار و عمل‌کرد قابل اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت به‌میزان فرسودگی سیستم عایقی آن‌ها بستگی دارد [۱ و ۲]. تنش‌های گرمایی، الکتریکی و تجزیه الکتروشیمیایی روغن از عوامل مهم در فرسودگی سیستم عایقی به حساب می‌آیند [۳ و ۴].

در اثر فرسودگی سیستم عایقی (جامد) و تجزیه شیمیایی روغن مقداری از گازهای هیدروکربنی به‌صورت حل شده در روغن ترانسفورماتور ظاهر می‌شود [۹-۷]. گازهای CH_4 ، H_2 ، C_2H_2 ، C_2H_4 ، C_2H_6 ، CO و CO_2 از مهمترین گازهای تولید شده در روغن هستند. مقدار و سرعت تولید هر یک از گازهای نام برده در اثر وجود خطا افزایش می‌یابد [۱۰ و ۱۱]. در استانداردها و نوشته‌های مختلف روش‌های متعدد در زمینه خطایابی بر اساس مقادیر گازهای داخل روغن، آورده شده است [۱۴-۱۲]. از این روش‌ها می‌توان به IEC، راجرز، دورنبرگ و مثلث اشاره کرد. امروزه، علاوه بر این روش‌ها، از سیستم‌های هوشمند مانند خبره، فازی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل نتایج و خطایابی در ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود [۱۷-۱۵]. بیشتر روش‌های موجود بر اساس مقادیر گازها به‌موضوع خطایابی و کار بر روی ترانسفورماتورهای معیوب پرداخته و در زمینه تخمین عمر بر اساس مقادیر گازها روش منسجمی وجود ندارد. همچنین، در بیشتر موارد فقط به‌انجام اندازه‌گیری گازها در ترانسفورماتورهای مختلف بسنده شده است.

در بخش ۳ این مقاله نتایج اندازه‌گیری شده مقادیر گازها در بیش از صد و چهل ترانسفورماتور مختلف در طول دوره سرویس ترانسفورماتور، که از مراجع ۷ و ۸ اقتباس شده است، آورده شده است. با وجود این، تخمین وضعیت سیستم عایقی یک ترانسفورماتور در حالت کلی بر اساس این اطلاعات آماری با مشکلات زیر همراه است:

الف- مقادیر اندازه‌گیری شده گازها در هر دوره سرویس ترانسفورماتور، برابر با متوسط اندازه گازهای تولید شده در ترانسفورماتورهای آزمایش شده است.

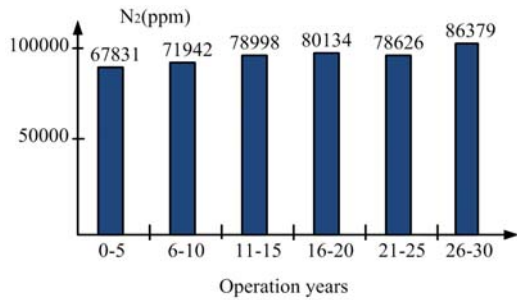
ب- در اندازه‌گیری مقادیر گازها برای یک ترانسفورماتور خاص، مقادیر گازها ممکن است با مقادیر آورده شده در مراجع ۷ و ۸ همخوانی نداشته باشد که این خود باعث عدم قطعیت و تطابق در نتایج حاصل خواهد شد.

ج- در این اندازه‌گیری‌ها معیاری برای جداسازی ترانسفورماتور معیوب از ترانسفورماتور سالم وجود ندارد.

در این مقاله یک روش جدید برای تجزیه و تحلیل مقادیر گازهای تولیدی در ترانسفورماتور به‌منظور تخمین عمر و مقایسه آن با شرایط نصب ترانسفورماتور آورده شده است. در این روش، وضعیت ترانسفورماتور با توجه به‌وجود یا عدم وجود عیب در آن بررسی شده است. در صورت سالم بودن آن بر اساس مقادیر گازهای CO و CO_2 وضعیت کلی سیستم عایقی در سه دسته شامل "عایق با کیفیت خوب"، "عایق با کیفیت متوسط" و "عایق با کیفیت کم" تقسیم می‌شود. در مرحله بعد، وضعیت دقیق‌تر سیستم عایقی با استفاده از دسته‌بندی انجام شده و مقادیر گازهای H_2 ، CH_4 ، C_2H_6 و N_2 به‌وسیله چهار تخمین‌گر فازی تشخیص داده می‌شود. در هر مرحله، از منطق فازی برای تحلیل نتایج و تخمین وضعیت استفاده می‌شود. این سیستم به‌راحتی در قالب یک سیستم فازی- خبره قابل پیاده‌سازی است. استفاده از این روش در کنار سایر روش‌های موجود در زمینه خطایابی، امکان ایجاد یک سیستم تشخیصی کامل را در ترانسفورماتور فراهم می‌کند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در مورد نمونه‌های عملی نشان‌دهنده این مطلب است که سیستم مورد نظر در تشخیص میزان فرسودگی و تخمین میزان عمر باقی‌مانده ترانسفورماتورهای قدرت بسیار موثر است.

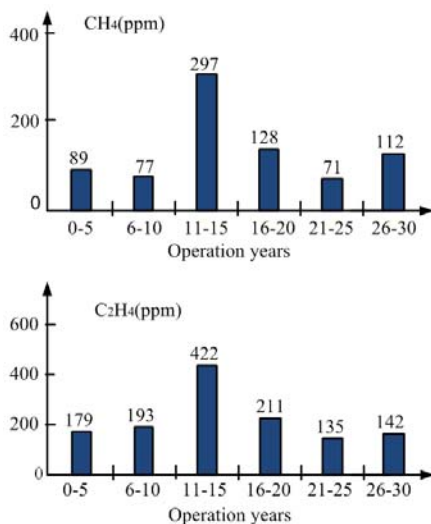
۲- تخمین عمر باقی‌مانده ترانسفورماتورهای قدرت

اکثر عایق‌های موجود در ترانسفورماتورهای قدرت از سلولز ساخته شده‌اند. در اثر گذر زمان، حضور گرما، اکسیژن و رطوبت، ساختار مولکولی سلولز و مواد عایق موجود در سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت، در معرض تجزیه و تغییر شیمیایی قرار می‌گیرند. در اثر تغییر ساختار و تجزیه شیمیایی سلولز، مشخصه‌های الکتریکی و مکانیکی آن کاهش می‌یابد، که به‌اصطلاح فرسودگی یا پیری عایق نامیده می‌شود. با افزایش رطوبت، اکسیژن و دمای کاری ترانسفورماتور سرعت فرسودگی سیستم عایقی افزایش می‌یابد. نتیجه فرسودگی سیستم عایقی در ترانسفورماتورهای قدرت شامل مولکول‌های آزاد گلوکز، رطوبت، گازهای منواکسید و دی‌اکسیدکربن، اسیدهای آلی از خانواده furan و گازهای هیدروکربنی محلول در روغن است.



شکل ۱- تغییرات مقدار نیتروژن در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور

بیشترین مقدار از هیدروکربن‌های سبک، از جمله CH_4 و C_2H_4 ، در محدوده ۱۱-۱۵ سالگی از عمر ترانسفورماتور، تولید می‌شود. شکل (۲) مقادیر تولید این گاز را در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور نشان می‌دهد [۷]. این محدوده زمانی به عنوان شروعی برای تجزیه سیستم عایقی ترانسفورماتور در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- مقادیر تولید شده هیدروکربن‌های سبک در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور

هیدروکربن‌های سنگین‌تر مانند C_3H_8 و C_2H_6 ، در محدوده ۱۰-۲۰ سالگی از عمر ترانسفورماتور بیشترین مقدار خود را دارند (شکل ۳). با فرسودگی بیشتر سیستم عایقی، گازهای بیشتری در داخل روغن تولید شده و در اثر ترکیب این گازها طبق معادله زیر، گازهای سنگین‌تر تولید خواهد شد [۷].



اساس کار همه روش‌های موجود در زمینه تخمین وضعیت در ترانسفورماتورهای قدرت، آنالیز مواد ناشی از فرسودگی سیستم عایقی است. از این روش‌ها می‌توان به آنالیز مقدار رطوبت، آنالیز مقدار furan، آنالیز مقادیر گازهای محلول در روغن و اندازه‌گیری پاسخ دی‌الکتریک اشاره کرد. در اغلب موارد امکان اعمال همه روش‌های موجود در زمینه تخمین وضعیت به یک ترانسفورماتور در حال بهره‌برداری به صورت برخط^۲ امکان‌پذیر نیست. آنالیز گازهای محلول در روغن از جمله روش‌هایی است که به صورت برخط بر روی ترانسفورماتورهای قدرت قابل اعمال است و می‌تواند به‌عنوان یک وسیله تشخیص مورد استفاده قرار گیرد.

۳- تخمین عمر بر اساس مقادیر گازها

در طول فرآیند فرسودگی سیستم عایقی در ترانسفورماتورهای قدرت، مقادیری از گازهای مختلف هیدروکربنی در روغن تولید می‌شود. افزایش مقادیر این گازها علامت تهدید کننده‌ای برای عمل‌کرد عادی و مطلوب ترانسفورماتور است. این گازها در اثر شکست حلقه‌های هیدروکربنی بزرگ‌تر در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شوند. تعیین مقادیر این گازها به وسیله کروماتوگرافی گازهای محلول در روغن انجام‌پذیر است. گازهای تولیدی در ترانسفورماتورهای قدرت به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند.

گروه ۱: گازهای هیدروکربنی

گروه ۲: اکسیدهای کربن

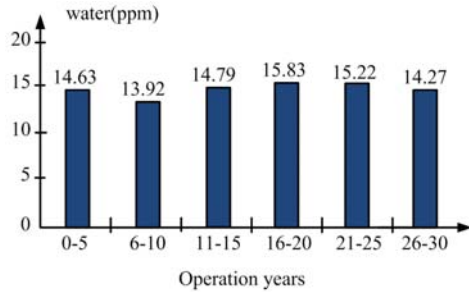
گروه ۳: گازهایی که به صورت طبیعی تولید می‌شوند

این گازها به دو روش نمونه‌برداری مستقیم و استخراج از بلانکت گازها از ترانسفورماتور قابل استخراج هستند.

در اثر تجزیه گرمایی سلولز مقادیر زیادی از گازهای CO و CO_2 به همراه مقادیری از گازهای H_2 و CH_4 تولید می‌شوند. سرعت تولید هریک از این گازها به دمای کاری ترانسفورماتور بستگی دارد. مقادیر و چگونگی تولید هر یک از گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور در طول عمل‌کرد آن در ادامه آورده شده است [۷ و ۸].

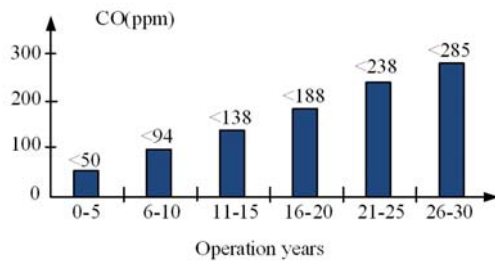
گاز نیتروژن گازی است که فقط در اثر گذر زمان تولید می‌شود. بنابراین، با افزایش زمان استفاده از ترانسفورماتور مقدار تولید آن بالا می‌رود. این گاز در اثر حضور هوا در داخل محفظه روغن ایجاد می‌شود. تغییرات مقادیر این گاز با گذر زمان به صورت شکل (۱) خواهد بود [۷].

مقدار آب داخل روغن در فاصله ۱۶-۲۰ سال از عمر ترانسفورماتور به بیشترین مقدار خود می‌رسد. شکل (۵) مقادیر آب محلول در روغن ترانسفورماتور را در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور نشان می‌دهد [۷].

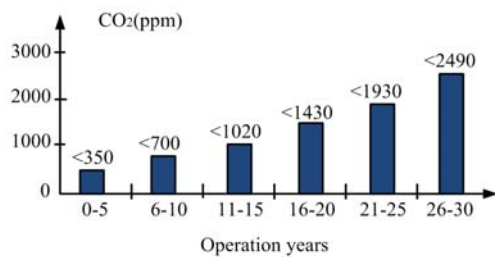


شکل ۵ - مقدار آب تولید شده در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور

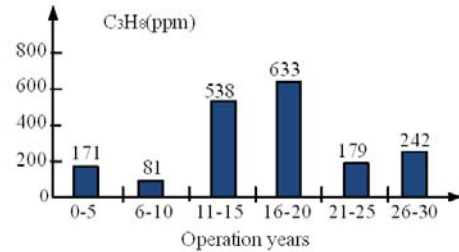
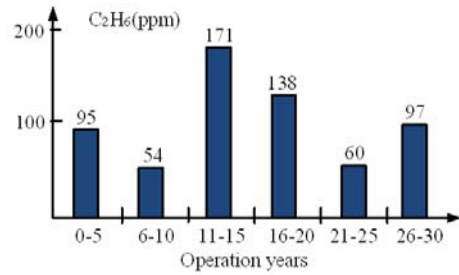
گازهای CO و CO_2 در اثر فرسودگی عایق‌های جامد ترانسفورماتور (سلولز) تولید می‌شوند. مقادیر این گازها می‌تواند به عنوان معیاری مهم برای پی بردن به میزان فرسودگی سیستم عایقی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد. در اثر گذر زمان و سپری شدن عمر ترانسفورماتور فرسودگی سیستم عایقی آن بیشتر شده و مقادیر تولیدی این گازها نیز بیشتر خواهد شد. مقادیر تولیدی این گازها در طول کارکرد عمر ترانسفورماتور به صورت شکل‌های (۶) و (۷) است [۸].



شکل ۶- مقادیر تولیدی گاز منواکسیدکربن در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور

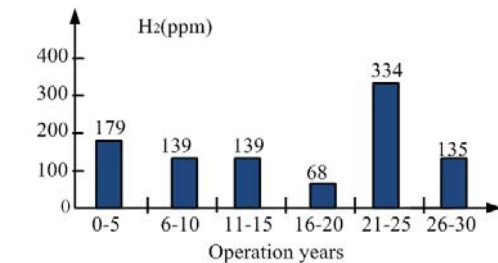
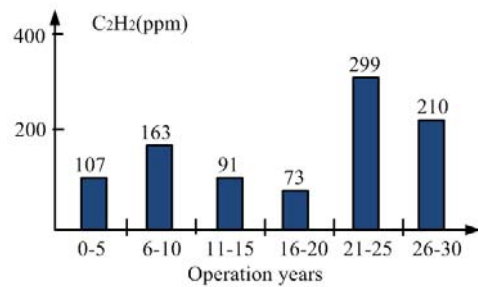


شکل ۷- مقادیر تولیدی گاز دی‌اکسیدکربن در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور



شکل ۳- مقادیر تولیدی هیدروکربن‌های سنگین در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور

در ترانسفورماتوری که بیشتر از ۲۰ سال عمر دارد، گازهای H_2 و C_2H_2 دارای بیشترین مقدار خود هستند (شکل ۴). دلیل این امر آن است که در اثر تجزیه هیدروکربن‌های سنگین در سال‌های آخر عمر ترانسفورماتور مقدار زیادی هیدروژن و هیدروکربن‌های سبک دیگر طبق معادله زیر تولید خواهد شد [۷].



شکل ۴- مقادیر تولیدی گازهای هیدروژن و اتیلن در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور



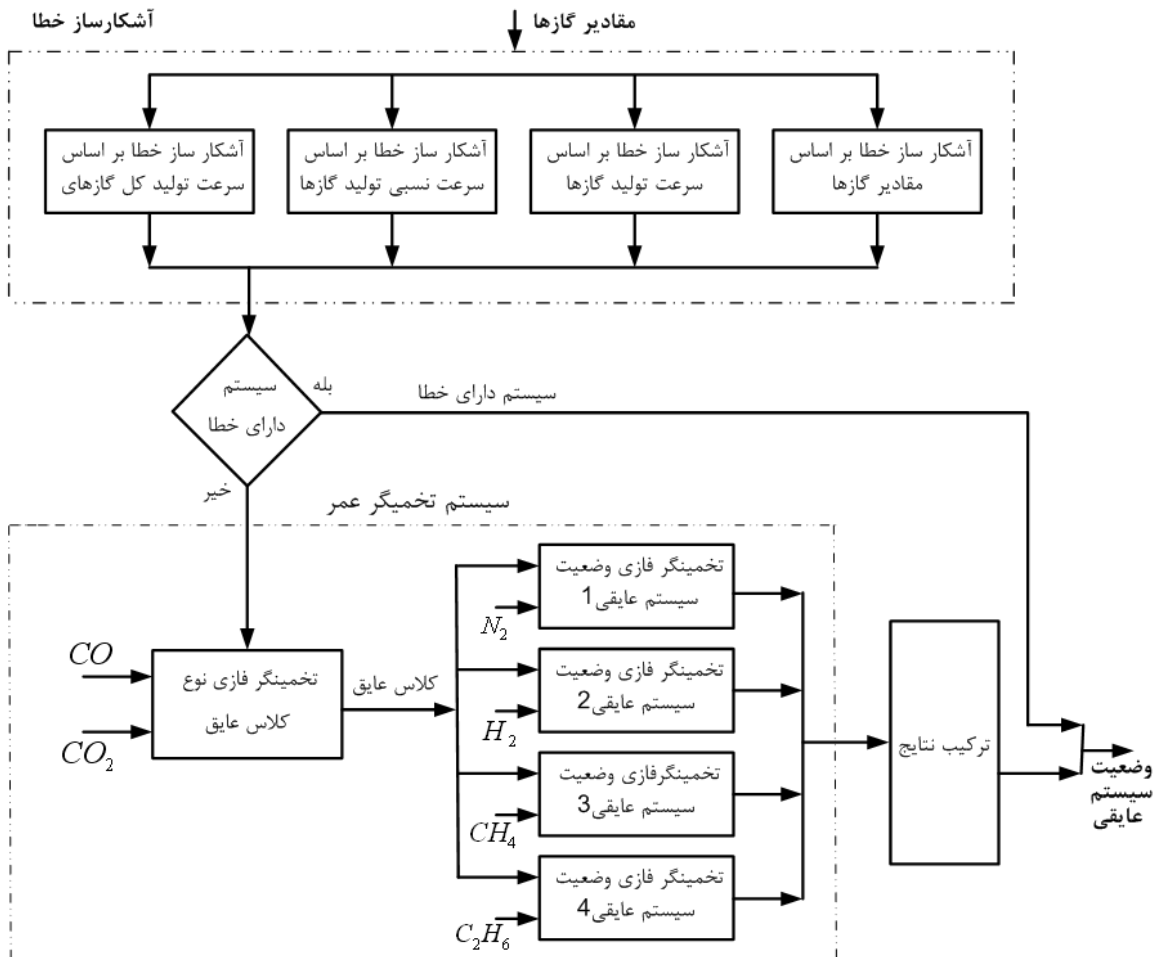
۴- سیستم مورد نظر برای تعیین وضعیت سیستم عایقی در ترانسفورماتورهای قدرت

نمای کلی سیستم مورد نظر در شکل (۸) نشان داده شده است. در این سیستم، ابتدا وجود هرگونه عیب و خطا با توجه به مقادیر گازهای داخل روغن توسط آشکارساز خطا مشخص می‌شود. در صورتی که ترانسفورماتور سالم باشد، میزان فرسودگی و عمر باقی‌مانده آن توسط سیستم تخمین‌گر عمر تعیین می‌شود. بر اساس گازهای CO و CO_2 ، به دلیل اهمیت بالای آن‌ها در فرآیند فرسودگی، وضعیت سیستم عایقی از نظر میزان فرسودگی در سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود. سپس بر اساس مقادیر گازهای N_2, H_2, CH_4, C_2H_6 وضعیت دقیق‌تر سیستم عایقی به وسیله تخمین‌گرهای مربوطه تخمین زده می‌شود. خروجی تخمین‌گرهای فوق توسط روش سنجش فازی ترکیب خواهد شد. در صورت معیوب بودن ترانسفورماتور،

عیب آن باید توسط سایر روش‌های موجود در زمینه خطایابی تشخیص داده شود.

۴-۱- آشکارساز خطا

وظیفه اصلی این آشکارساز تشخیص وضعیت غیرعادی و وجود عیب در ترانسفورماتور است. ورودی این سیستم شامل مقادیر گازهای داخل ترانسفورماتور و سرعت تولید گازها براساس نمونه‌گیری انجام شده است. این آشکارساز مطابق شکل (۸) شامل چهار آشکارساز کوچکتر است. در صورتی که هر یک از آشکارسازهای نشان داده شده وجود عیب را تشخیص دهند، ترانسفورماتور دارای وضعیت غیر عادی است و باید نوع خطای آن توسط سایر روش‌های موجود تعیین گردد.



شکل ۸- نمای کلی سیستم مورد نظر

اساس کلاس عایق و مقادیر گازهای H_2 ، CH_4 ، C_2H_6 و N_2 وضعیت دقیق تر آن توسط تخمین‌گرهای ۴-۱ تعیین می‌شود.

خروجی هر یک از این تخمین‌گرها نشانگر وضعیت احتمالی سیستم عایقی ترانسفورماتور است. وضعیت‌های مختلف تعریف شده برای سیستم عایقی ترانسفورماتور بر مبنای سن عایق به پنج دسته شامل عالی (سن کمتر از ۵ سال)، خوب (سن ۶-۱۰ سال)، متوسط (سن ۱۱-۲۰ سال)، بد (سن ۲۱-۲۵ سال) و خیلی بد (سن ۲۶-۳۰ سال) تقسیم می‌شود. در خروجی این سیستم، احتمال وجود هر یک از وضعیت‌های تعریف شده، که توسط تخمین‌گرهای ۱ الی ۴ محاسبه شده‌اند، به وسیله روش سنجش فازی ترکیب می‌شوند.

۴-۲-۱- تخمین‌گر فازی نوع کلاس عایق

وظیفه اصلی این تخمین‌گر تقسیم‌بندی وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتور در سه دسته کلی زیر است. دسته اول- عایق‌ها با کیفیت خوب: عایق‌های این دسته دارای درجه پلیمریزاسیونی بیش از ۵۰۰ هستند و بیشتر در ترانسفورماتورهای زیر ۱۵ سال یافت می‌شوند. در این عایق‌ها مقادیر گازهای CO و CO_2 به ترتیب زیر ۱۳۰ و ۱۰۰۰ است. دسته دوم- عایق‌های با کیفیت متوسط: این دسته از عایق‌ها دارای درجه پلیمریزاسیونی بین ۵۰۰-۳۰۰ هستند و بیشتر در ترانسفورماتورهای بالای ۱۵ سال یافت می‌شوند. مقادیر گازهای CO و CO_2 برای این دسته از عایق‌ها به ترتیب ۲۵۰-۱۳۰ و ۲۱۰۰-۱۰۰۰ است. این عایق‌ها تقریباً فرسوده شده‌اند ولی هنوز در وضعیت نسبتاً خوبی از نظر کیفیت عایقی هستند.

دسته سوم- عایق‌ها با کیفیت کم: درجه پلیمریزاسیون این دسته از عایق‌ها زیر ۳۰۰ است و بیشتر در ترانسفورماتورهای بالای ۲۰ سال یافت می‌شوند و تقریباً به اواخر عمر طراحی شده خود رسیده‌اند. استقامت الکتریکی و مکانیکی این‌گونه عایق‌ها به شدت کاهش یافته و امکان بروز عیب در آن‌ها بسیار زیاد است. مقادیر گازهای CO و CO_2 برای این دسته از عایق‌ها به ترتیب بالای ۲۵۰ و ۲۱۰۰ است.

برای اعمال کلاس‌بندی فوق با توجه به مقادیر این گازها، از منطق فازی استفاده می‌شود، زیرا با این کار درصد اشتباه در

• آشکارساز خطا بر اساس مقادیر گازها

این آشکارساز گازهای حل شده در روغن را که شامل N_2 ، H_2 ، CH_4 ، CH_2 ، C_2H_4 ، C_2H_6 ، CO و CO_2 است با مقادیر جدول (۱) مقایسه می‌کند. در صورتی که مقادیر هر یک از گازها از مقادیر داده شده در جدول (۱) بیشتر باشد خروجی این آشکارساز وضعیت غیرعادی را در ترانسفورماتور نشان می‌دهد. مقادیر آستانه استفاده شده در آشکارسازهای آورده شده بخش زیر بر اساس استاندارد IEEE Std C57.104TM آورده شده است [۱۰].

جدول ۱- مقادیر آستانه استفاده شده در آشکارساز خطا بر اساس

مقادیر گازها

TDGA	CO_2	CO	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CH_4	H_2
۷۲۰	۴۰۰	۴۰۰	۶۵	۵۰	۳۵	۱۲۰	۴۰۰

• آشکارساز خطا بر اساس سرعت تولید گازها

در این آشکارساز سرعت تولید گازها برحسب ppm.day^{-1} محاسبه شده و با مقدار آستانه 10 ppm.day^{-1} مقایسه می‌شود.

• آشکارساز خطا بر اساس سرعت نسبی تولید گازها

در این آشکارساز سرعت نسبی گازها برحسب درصد محاسبه شده و با مقدار آستانه ۱۰ درصد در ماه مقایسه می‌شود.

• آشکارساز خطا بر اساس کل گازهای حل شده در روغن

در این آشکارساز مقدار کل گازهای حل شده در روغن (TDGA) محاسبه شده و با مقدار آستانه 720 ppm مقایسه می‌شود. در صورتی که مقدار کل گازها بیش از مقدار فوق باشد نشانه وجود خطا است. علاوه بر این سرعت تولید کل گازهای حل شده در روغن برحسب $\text{ft}^3.\text{day}^{-1}$ محاسبه شده و با مقدار آستانه $0.1 \text{ ft}^3.\text{day}^{-1}$ مقایسه می‌شود.

۴-۲- سیستم تخمین‌گر عمر

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، این سیستم شامل تخمین‌گر نوع کلاس عایق بر اساس مقادیر گازهای CO و CO_2 ، تخمین‌گر فازی ۱ بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز نیتروژن، تخمین‌گر فازی ۲ بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز هیدروژن، تخمین‌گر فازی ۳ بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز متان، تخمین‌گر فازی ۴ بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز اتان است. در این سیستم، ابتدا بر اساس مقادیر گازهای CO و CO_2 نوع کلاس عایقی ترانسفورماتور تعیین می‌شود. سپس، بر

۴-۲-۲- تخمین وضعیت سیستم عایقی بر اساس مقدار گاز نیتروژن و کلاس عایق (تخمینگر ۱)

گاز نیتروژن فقط در اثر گذر زمان در ترانسفورماتور تولید می‌شود و معیار خوبی برای تشخیص وضعیت عایقی ترانسفورماتور است. مقادیر این گاز در ترانسفورماتورهای معمولی بالای ۶۰۰۰ است. برای فازی کردن مقادیر این گاز از توابع عضویت مثلثی، به صورت شکل (۱۳)، استفاده شده است. قواعد اعمالی برای تعیین وضعیت ترانسفورماتور در جدول (۳) آورده شده است. مقادیر فازی شده برای محاسبه خروجی این تخمین‌گر در شکل (۱۴) نشان داده شده است که شامل عبارت‌های کلامی very good، good، medium، bad و very bad است. شکل (۱۵) چگونگی تعیین وضعیت بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز نیتروژن را نشان می‌دهد.

جدول ۲- قواعد اعمال شده برای تعیین کلاس

CO ₂ \ CO	Low	Medium	High
Low	ONE	ONE	TWO
Medium	ONE	TWO	TWO
High	TWO	TWO	THREE

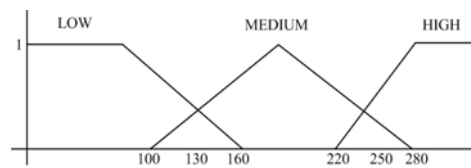
جدول ۳- قواعد اعمال شده برای تعیین وضعیت عایق در تخمین گر ۱

کلاس \ نیتروژن	ONE	TWO	THREE
very low	very good	good	good
low	good	good	good
medium	medium	bad	bad
high	medium	bad	bad
very high	bad	very bad	very bad

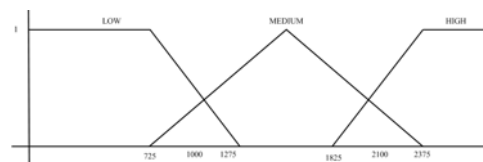
۴-۲-۳- تخمین وضعیت سیستم عایقی بر اساس مقدار گاز هیدروژن و کلاس عایق (تخمینگر ۲)

معمولاً در یک ترانسفورماتور سالم مقادیر گاز هیدروژن کمتر از ۴۰۰ ppm است. بیشترین مقدار این گاز در اثر تجزیه هیدروکربن‌های بزرگتر نسبتاً زیادی گازهای اتیلن و هیدروژن در دهه آخر عمر ترانسفورماتور تولید می‌شود. در اینجا نیز از توابع عضویت مثلثی برای فازی کردن مقادیر گاز هیدروژن استفاده می‌شود. عبارت‌های کلامی برای مقادیر گاز هیدروژن very high، high، medium، low هستند (شکل ۱۶).

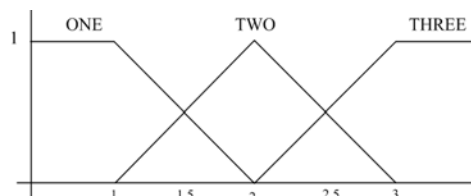
انتخاب نادرست کلاس عایقی به حداقل می‌رسد. شکل‌های (۹) و (۱۰) تبدیل مقادیر گازهای CO و CO₂ به عبارت‌های کلامی low، medium و high را نشان می‌دهند. قواعد لازم برای تعیین نوع کلاس عایقی در جدول (۲) آورده شده است. عبارت‌های کلامی برای تعیین نوع کلاس سیستم عایقی در خروجی این تخمین‌گر شامل ONE، TWO و THREE هستند (شکل ۱۱). در شکل (۱۲)، چگونگی تعیین کلاس عایق بر اساس مقادیر گازهای CO و CO₂ نشان داده شده است.



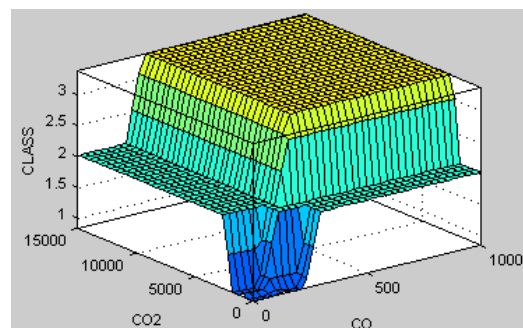
شکل ۹- فازی کردن مقادیر گاز CO



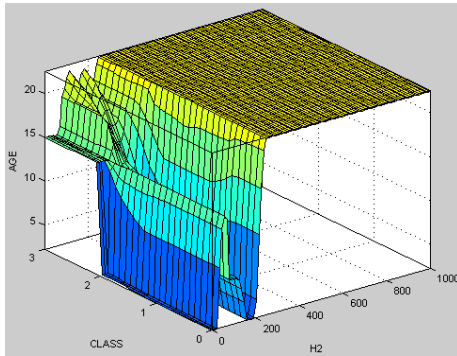
شکل ۱۰- فازی کردن مقادیر گاز CO₂



شکل ۱۱- مقادیر کلامی (خروجی) در سیستم تعیین کننده کلاس عایق



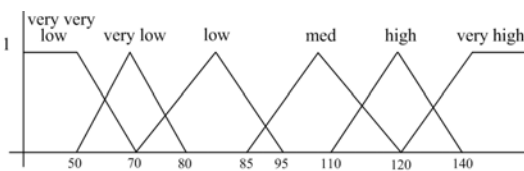
شکل ۱۲- تعیین نوع کلاس بر اساس مقادیر گازهای CO و CO₂



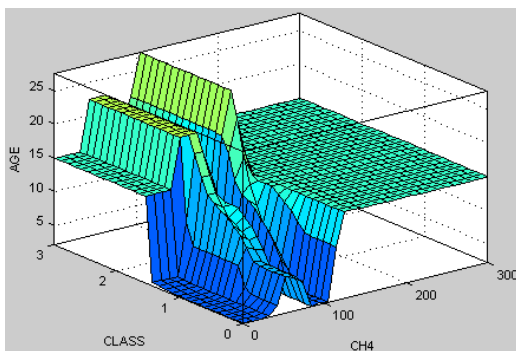
شکل ۱۷- تعیین عمر سیستم عایقی بر اساس مقادیر گاز هیدروژن و کلاس عایق

۴-۲-۴- تخمین وضعیت سیستم عایقی بر اساس مقدار گاز متان و کلاس عایق (تخمین گر ۳)

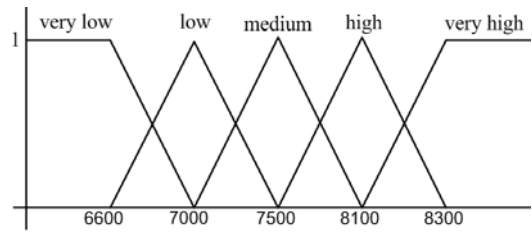
مقدار گاز متان در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور کمتر از ۳۰۰ppm است، در صورت وجود خطا مقدار تولیدی آن بیشتر خواهد شد. بیشترین مقدار از این گاز در فاصله ۱۵-۱۱ سالگی عمر ترانسفورماتور تولید می‌شود. برای فازی کردن مقادیر گاز متان از توابع عضویت مثلثی استفاده می‌شود (شکل ۱۸). قواعد لازم برای تخمین وضعیت ترانسفورماتور در جدول (۵) آورده شده است. برای محاسبه خروجی در این تخمین گر نیز از مقادیر فازی شده در شکل (۱۴) استفاده شده است. شکل (۱۹) چگونگی تعیین وضعیت سیستم عایقی را بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز متان، نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- مقادیر فازی شده گاز متان

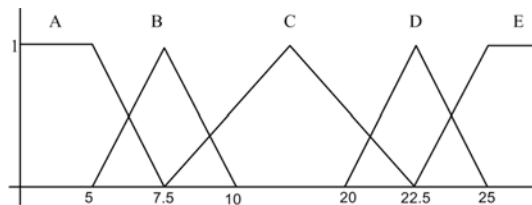


شکل ۱۹- تعیین عمر سیستم عایقی بر اساس مقادیر گاز متان و کلاس عایق

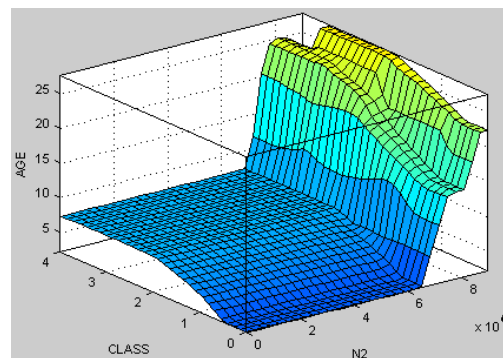


شکل ۱۳- مقادیر فازی شده گاز نیتروژن

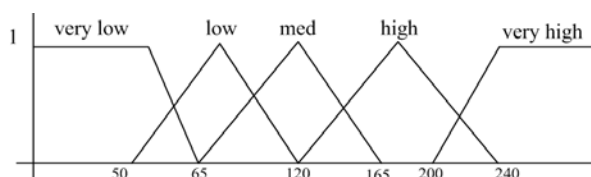
جدول (۴) قواعد لازم برای تعیین وضعیت ترانسفورماتور را در تخمین گر ۲ نشان می‌دهد. مقادیر فازی برای محاسبه خروجی تخمین گر ۲ همان مقادیر مربوط به تخمین گر ۱ است (شکل ۱۴). شکل (۱۷) چگونگی تعیین وضعیت سیستم عایقی بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز هیدروژن را نشان می‌دهد.



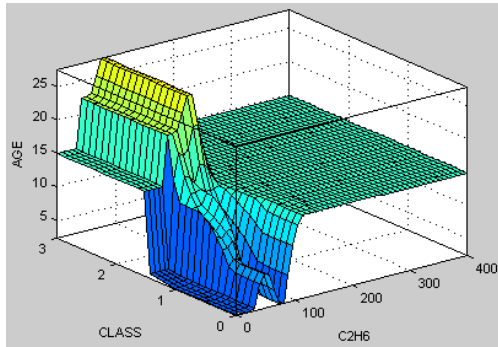
شکل ۱۴- مقادیر فازی خروجی تخمین گرهای ۱ الی ۴



شکل ۱۵- تعیین عمر سیستم عایقی بر اساس مقادیر گاز نیتروژن و کلاس عایق



شکل ۱۶- مقادیر فازی شده گاز هیدروژن



شکل ۲۱- تعیین عمر سیستم عایقی بر اساس مقادیر گاز هیدروژن و کلاس عایق

جدول ۶- قواعد اعمال شده برای تعیین وضعیت عایق در تخمین گر ۴

کلاس اتان	ONE	TWO	THREE
very low	very good	very good	medium
Low	good	bad	bad
medium	very good	very bad	very bad
high	medium	medium	medium
very high	medium	medium	Medium

۴-۳- ترکیب نتایج

در این قسمت وضعیت کلی ترانسفورماتور با توجه به میزان احتمال هر یک از وضعیت‌های ممکن (محاسبه شده توسط تخمین‌گرهای ۱ الی ۴) محاسبه می‌شود. این بخش به معرفی چگونگی ترکیب نتایج محاسبه شده توسط تخمین‌گرهای ۱ الی ۴ با استفاده از الگوریتم سنجش فازی می‌پردازد. برای نشان دادن میزان احتمال هر یک از وضعیت‌های مختلف ترانسفورماتور، عالی، خوب، متوسط، بد و خیلی بد، که توسط هر یک از تخمین‌گرهای ۱ الی ۴ محاسبه شده است، ماتریس E به عنوان خروجی سیستم تخمین‌گر عمر تعریف می‌شود که خود شامل چهار بردار ستونی E_1, E_2, E_3, E_4 است.

$$E = [E_1, E_2, E_3, E_4] \quad (3)$$

در این ماتریس E_1 خروجی تخمین‌گر ۱، E_2 خروجی تخمین‌گر ۲، E_3 خروجی تخمین‌گر ۳ و E_4 خروجی تخمین‌گر ۴ است. هر یک از این بردارها میزان احتمال وضعیت‌های مختلف آورده شده در قسمت قبل را نشان می‌دهند یعنی:

جدول ۴- قواعد اعمال شده برای تعیین وضعیت عایق در تخمین گر ۲

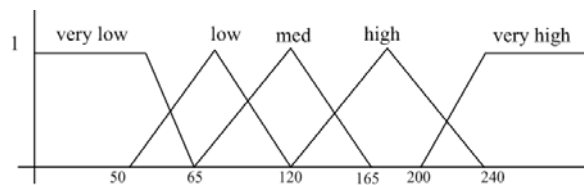
کلاس هیدروژن	ONE	TWO	THREE
very low	very good	good	medium
Low	medium	medium	medium
med	good	bad	very bad
high	very good	good	very bad
very high	bad	bad	bad

جدول ۵- قواعد اعمال شده برای تعیین وضعیت عایق در تخمین گر ۳

عایق متان	ONE	TWO	THREE
very very low	very good	very good	med
very low	good	bad	bad
Low	very good	good	bad
medium	very good	very bad	very bad
high	medium	medium	medium
very high	medium	medium	medium

۴-۲-۵- تخمین وضعیت سیستم عایقی بر اساس مقدار گاز اتان و کلاس عایق (تخمین گر ۴)

مقدار تولیدی گاز اتان در طول دوره کارکرد ترانسفورماتور کمتر از ۱۸۰ ppm است. بیشترین مقدار تولیدی این گاز در فاصله ۲۰-۱۱ سالگی عمر ترانسفورماتور است. در این جا نیز برای فازی کردن مقادیر گاز اتان از توابع عضویت مثلثی استفاده می‌شود (شکل ۲۰). قواعد لازم برای تخمین وضعیت ترانسفورماتور در جدول (۶) آورده شده است. محاسبه خروجی در این تخمین‌گر مانند تخمین‌گرهای قبلی است. شکل (۲۱) چگونگی تعیین وضعیت سیستم عایقی را بر اساس کلاس عایق و مقدار گاز اتان، نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- مقادیر فازی شده گاز اتان

$$m_{12}^k = \frac{m_1^i \cdot m_2^j}{1 - k_{12}}, \quad i = j = k, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

که در آن:

$$k_{12} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 m_1^i \cdot m_2^j, \quad (i \neq j) \quad (8)$$

پس از ترکیب بردارهای E_1 و E_2 ، ماتریس E_n به یک ماتریس سه ستونی تبدیل می‌شود که ستون اول آن مربوط به بردار E_{12} و ستون دوم و سوم آن مقادیر نرمالیزه شده بردار E_3 و E_4 است. بردار جدید E_{12} و E_3 نیز به همان روش قبلی ترکیب شده و بردار E_{123} حاصل می‌شود. در واقع بردار E_{123} ترکیب بردارهای E_1 ، E_2 و E_3 است. در پایان بردار E_{123} با بردار E_4 ترکیب شدن و بردار E_{1234} به عنوان بردار خروجی، که در بردارنده مقادیر نرمالیزه شده احتمال وضعیت‌های ممکن در ترانسفورماتور است، معرفی می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی میزان دقت سیستم مورد نظر مقادیر گازه‌های نمونه‌برداری شده از ۱۰ ترانسفورماتور سالم (دارای عمل‌کرد عادی) انتخاب و به سیستم مورد نظر داده شد. در مورد هر یک از ترانسفورماتورها اطلاعات مربوط به دوره کارکرد همراه با مقادیر نامی آن‌ها موجود است. جدول (۷) نتایج حاصل از عمل تخمین توسط سیستم مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$E_1 = [e_1^1, e_1^2, e_1^3, e_1^4, e_1^5]^T, \quad E_2 = [e_2^1, e_2^2, e_2^3, e_2^4, e_2^5]^T \\ E_3 = [e_3^1, e_3^2, e_3^3, e_3^4, e_3^5]^T, \quad E_4 = [e_4^1, e_4^2, e_4^3, e_4^4, e_4^5]^T \quad (4)$$

که e_i^j بیانگر احتمال وضعیت ژام (عالی، خوب، متوسط، بد و ضعیف) توسط تخمین‌گر ژام است ($i=1, 2, 3, 4$ و $j=1, \dots, 5$). تابع m از مجموعه جهانی $A \in P(X)$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$m: P(X) \rightarrow [0, 1]$$

$$m(\emptyset) = 0$$

$$\sum m(A) = 1, \quad A \in P(X) \quad (5)$$

تابع m نشان‌دهنده نگاشتی از مجموعه جهانی A به بازه بسته صفر و یک است. با استفاده از تعریف فوق ماتریس E_n را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$E_n = \begin{bmatrix} m_1^1 & m_2^1 & m_3^1 & m_4^1 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & m_4^2 \\ m_1^3 & m_2^3 & m_3^3 & m_4^3 \\ m_1^4 & m_2^4 & m_3^4 & m_4^4 \\ m_1^5 & m_2^5 & m_3^5 & m_4^5 \end{bmatrix}; \quad m_h^j = \frac{e_h^j}{\sum_{j=1}^5 e_h^j} \quad (6)$$

که در آن $h=1, 2, 3, 4$ ، $j=1, 2, 3, 4, 5$ و m_h^j مقادیر نرمالیزه شده درایه‌های مختلف بردارهای E_1 تا E_4 هستند. بردارهای E_1 و E_2 به صورت زیر ترکیب می‌شوند و مقادیر نرمالیزه شده بردار ترکیبی برابر است با:

جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی مربوط به ۱۰ ترانسفورماتور مورد بررسی که وضعیت آن‌ها توسط سیستم مورد نظر تشخیص داده شده است.

ردیف	مشخصات ترانسفورماتور								تشخیص به وسیله سیستم مورد نظر									
	مقادیر گازها								تاریخ نصب	تاریخ نمونه‌برداری	قدرت (MVA)	کلاس	تشخیص به وسیله هر یک از تخمین‌گرها				تشخیص	عمر باقی‌مانده (سال)
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	N_2	CO	CO_2					۱	۲	۳	۴		
۱	۱	۴/۱	۰	۱/۷	۱	-	۵۹/۳	۵۸۴/۵	۱۹۹۸	۲۰۰۳	۲۰	۱	-	A	A	A	A	>۲۵
۲	۹۷	۱۹	۱	۵۲	۲	-	۴۶۲	۳۳۲۲	۱۹۷۷	۱۹۹۷	۱۰۰۰	۳	-	D	C	C	C	>۱۰
۳	۶۵	۳۸	۲	۴۳	۴۰	-	۱۵۰	۸۴۶	۱۹۹۷	۲۰۰۴	۱۰۰	۲	-	C	A	C	C	>۱۵
۴	۱	۰	۰	۰	۰	۱۸۱۸۷	۴	۱۱۸	۱۳۸۶ (مش)	۱۳۸۶ (مش)	۱۸۰	۱	A	A	A	A	A	>۲۵
۵	۳۴۰	۶۸	۱۲	۱۸	۶۳	-	۳۱۰	۲۸۸۰	۱۹۸۱	۲۰۰۳	۲۰	۳	-	D	D	D	D	۵-۱۰
۶	۱۲۷	۱۹	۲	۶۲	۱۶۹	-	۱۵۹	۱۴۰۱	۱۹۸۶	۲۰۰۴	۲۰۰	۲	-	C	C	C	C	>۱۵
۷	۰	۰	۰	۱	۱	۱۸۰۷۲	۲	۶۳	۱۳۸۶ (مش)	۱۳۸۶ (مش)	۱۸۰	۱	A	A	A	A	A	>۲۵
۸	۷	۰	۰	۰	۰	۱۷۱۶۹	۴	۱۶۹	۱۳۸۶ (مش)	۱۳۸۶ (مش)	۱۰۰	۱	A	A	A	A	A	>۲۵
۹	۱۶۰	۵۳	۰	۶	۲۸۰	-	۱۹۰	۲۲۰۰	۱۹۸۲	۲۰۰۱	۲۰۰	۲	-	C	D	C	C	<۱۵
۱۰	۰	۸	۱	۹	۵۰	-	۵	۶۲۹	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۱۸۰	۱	-	A	A	A	A	>۲۵

- IEE Proc. Sci. Meas. Technol, vol. 151, no. 3, pp. 175-184, May 2004.
- [3] J. S. Navamany and P. S. Ghosh "Age Estimation Of Cellulose Paper Insulation in Power Transformers Using ANN," IEEE Conference, pp. 227-232, 2003.
- [4] I. N. da Silvat, A. N. de Souza', J. C. H. C. Hossri and M. G. Zago, "Identification of the Level of Contamination and Degradation of Oil by Artificial Neural Networks," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, Apr. 2-5, 2000.
- [5] T. V. Oommen and T. A. Prevost "Cellulose Insulation in oil-filled power transformer :part 2-maintaining insulation integrity and life," IEEE Insulation magazine, vol. 22. no. 2, pp. 5-14, 2006.
- [6] P. Verma, M. Roy, R. K. Tiwari and S. Chandra "Generation of Furanic Compounds in Transformer Oil under Accelerated Thermal and Electrical Stress," Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Indianapolis, Indiana, pp. 112-116, Oct. 2005.
- [7] C. T. Dervos, C. D. Paraskevas and P. D. Skafidas, "Dielectric Spectroscopy and Gas Chromatography Methods Applied on High-Voltage Transformer Oils," IEEE Trans in Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 3, pp. 586-592, Jun. 2006.
- [8] M. K. Pradhan, and T. S. Ramu, "On the Estimation of Elapsed Life of Oil-Immersed Power Transformers," IEEE Trans on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 1962-1969, Jul. 2005.
- [9] P. M. Mitchinson, I. L. Lewin, A. S. Vaughan, G. C. Chen and P. Jarman, "An experiment to evaluate the benefits of processing aged transformer oil," International symposium on electrical insulation, Canada, Jun. 2006.
- [10] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104, 2008
- [11] L. Zhou, G. Wu, S. Chong and H. J. Wang, "Study on Loss-of-Life and Insulation Aging of Traction Transformer Based on DGA," IEEE 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan, pp. 483-485 Jun. 5-9, 2005.
- [12] V. Miranda and A. R. G. Castro, "Improving the IEC Table for Transformer Failure Diagnosis With Knowledge Extraction From Neural Networks," IEEE Trans in power Delivery, vol. 20, no. 4, pp. 2509-2516, Oct. 2005.

در سمت چپ جدول فوق مشخصات و اطلاعات مربوط به ترانسفورماتورهای مورد بررسی و در سمت راست نتایج تشخیص توسط سیستم مورد نظر آورده شده است. چنان که نشان داده شده است وضعیت تشخیص داده شده با وضعیت واقعی ترانسفورماتورهای مورد بررسی بسیار نزدیک بوده و در نتیجه، سیستم مورد نظر می‌تواند در تشخیص وضعیت عایقی ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گیرد.

در واقع نتایج به دست آمده از عمل تشخیص توسط سیستم مورد نظر، در توافق کامل با وضعیت واقعی ترانسفورماتورهای مورد بررسی است. برای هر یک از ترانسفورماتورهای بررسی شده عمر طراحی شده ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای تخمین وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس تحلیل مقادیر گازهای محلول در روغن معرفی شد. در این روش بر اساس مقادیر گازهای N_2 ، H_2 ، CH_4 ، C_2H_6 ، CO و CO_2 وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت تشخیص داده می‌شود. در این روش تاثیر گازهای CO و CO_2 در زمینه تشخیص وضعیت از سایر گازها بیشتر در نظر گرفته شده است.

بزرگترین مزیت این روش قابلیت اعمال آن به صورت برخط برای تشخیص وضعیت در ترانسفورماتورهای قدرت، در کنار سایر روش‌های مبتنی بر مقادیر گازها برای تشخیص خطا است. این روش به صورت یک برنامه کامپیوتری در قالب یک سیستم خبره قابل پیاده‌سازی است. علاوه بر موارد فوق، با استفاده از این روش می‌توان وضعیت سیستم عایقی را، بدون نیاز به انجام سایر آزمایش‌های موجود در زمینه خطایابی، تعیین کرد. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی داده‌های به دست آمده از ترانسفورماتورهای مورد بررسی نشان دهنده موفقیت سیستم مورد نظر در تخمین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت است.

مراجع

- [1] J. Lapworth, "A Novel Approach (Scoring System) For Integrating Dissolved Gas Analysis Results Into A Life Management System," the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, pp. 137-144. Apr. 7- 10, 2002.
- [2] Z. Qian and Z. Yan, "Fuzzy synthetic method for life assessment of power Transformer,"

- Diagnosis,” IEEE Trans in Power System, vol. 20, no. 2, pp. 717-724, May 2005.
- [16] K. O. Wong, “Expert System for Transformer Fault Diagnosis,” B. E Honours Thesis, Nov. 2000, School of Computer Science and Electrical Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [17] K. Spurgeon, W. H. Tang, Q. H. Wu, Z. J. Richardson and G. Moss, “Dissolved gas analysis using evidential reasoning,” IEE Proc. Sci. Meas. Technol., vol. 152, no. 3, pp. 110-117, May 2005.
- [13] D. R. Morais and J. G. Rolim, “A Hybrid Tool for Detection of Incipient Faults in Transformers Based on the Dissolved Gas Analysis of Insulating Oil,” IEEE Trans on Power Delivery, vol. 21, no.2, pp. 673-680, Apr. 2006.
- [14] K. F. Thang, R. K. Aggarwal and A. J. McGrail, “Analysis of power transformer dissolved gas data using the self-organizing map,” IEEE Trans on Power Delivery, vol.18, no.4, pp. 1241-1248, Oct. 2003.
- [15] A. R. G. Castro and V. Miranda, “Knowledge Discovery in Neural Networks With Application to Transformer Failure

پی‌نوشت‌ها

-
- 1- Fuzzy measure
2- Online