تشخیص خطاها و میزان خاصیت عایقی سلولز در ترانسفورماتورها با استفاده از منطق فازی

محمد فرخی[۱] احمد غلامی[۱] محمد میرزایی[۱،۲]

(۱) دانشگاه علم و صنعت ایران ـ دانشکده برق

(۲) دانشگاه مازندران ـ دانشکده فنی و مهندسی

تهران- نارمک – دانشگاه علم و صنعت ایران – دانشکده مهندسی برق- فاکس:۷٤٥٤٠٥٥

چکیده :

ترانسفورماتورهای قدرت یکی از عناصر اصلی و مهم در شبکه های قدرت محسوب شده که عملکرد صحیح و امنیت کاری آن برای هر سیستم قدرتی ضروری است. خطاهای داخلی و شکست عایقی در ترانسفورماتورها می تواند خسارات زیادی را ایجاد کند که نه تنها ممکن است مصرف کنندگان یا صنایعی از مدار خارج شود بلکه ضررهای اقتصادی شدیدی به شرکت های برق وارد می آورد. یکی از مهمترین ابزار در تشخیص و آشکارسازی خطاهای بسیاری از ترانسفورماتورها، آنالیز گازهای آزاد و محلول در روغن یا آزمایش گاز کروماتوگرافی است.معمولا تفسیر نتایج حاصل از این روش ، دشوار بوده و می بایست به کمک تجربه کارکنان امور تعمیر و نگهداری صورت پذیرد.

در این مقاله ، انواع مختلف خطاهای ایجاد شده در ترانسفورماتور و میزان گازهای حاصله و همچنین روش های مختلف آنالیز گازهای محلول در روغن طبق جدیدترین استاندارد موجود ارائه و با استفاده از این استاندارد جدید ، عیوب ۱۵ گانه مختلف ترانسفورماتورها و همچنین عیب سلولزی ترانسفورماتور تشخیص داده می شود.

کلمات کلیدی : روغن ، گاز کروماتوگرافی ، ترانسفورماتور،تشخیص خطا ، منطق فازی

۱)مقدمه

یکی از تجهیزات مهم در سیستم های قدرت ، ترانسفورماتورها است به طوری که کارکرد صحیح و بی وقفه آن از شرایط لازم برای شبکه قدرت است. با توجه به تعداد زیاد ترانسفورماتورهای با ساختار متفاوت در شبکه ، این ترانسفورماتورها در معرض انواع مختلف پدیده های سو قرار گرفته و باعث خطاها و شکست های مختلف عایقی در آن می شود. در طی کارکرد عادی ، یک ترانسفورماتور در سیستم های توزیع و انتقال ، با توجه به میزان دیماند ، می تواند در زیر بار نامی و یا فوق بار نامی کار کند ، به طوری که هیچگاه (فقط در هنگام تعمیرات یا خروج آن به علت خطاهای داخلی یا خارجی) نباید از مدار خارج شود. لذا برای داشتن قابلیت اطمینان بالا و عملکرد صحیح و مناسب آن و همچنین هزینه های زیاد جهت تعمیرات آن ،لازم است با تمهیدات خاص ، روند عملکرد ترانسفورماتورها را بررسی کرد.

به طورکلی ، هر ترانسفورماتور برای ایجاد خاصیت دی الکتریک مناسب و همچنین انتقال گرمای داخلی به بیرون ، توسط عایق روغن ،پر می گردد .در طی کارکرد عادی،معمولا خاصیت عایق روغن کاهش پیدا کرده و گازهای ویژه ای در آن ایجاد می گردد. تاکنون به روش های مختلفی، از جمله شبکه های عصبی و فازی ، برای تشخیص خطاهای ترانسفورماتور استفاده شده است . در [۱] روش های کلی تشخیص عیب ترانسفورماتورها به روشهای عصبی و فازی انجام شده است. در[۳] و [٤] ، تشخیص عیب ترانسفورماتور ، به کمک روش فازی انجام و با نتایج عملی ،که از آنها نیز برای تست سیستم فازی در این مقاله استفاده می گردد، ارائه گردیده است. همچنین در [۷] ، روش تشخیص خطا با استفاده از روش سه نسبت راجرز ، ۸ عیب ترانسفورماتور به کمک منطق فازی ، تعیین شده است.

در این مقاله ، با استفاده از جدیدترین استاندارد ، ۱۵ عیب گوناگون ترانسفورماتور ، با استفاده از چهار نسبت گازی راجرز و همچنین عیب سلولزی ترانسفورماتور بررسی می گردد.

۲)بررسی خطاهای مختلف در ترانسفورماتور

به طور کلی ترانسفورماتورها در طی کارکرد ، دچار تنش های حرارتی و الکتریکی شده که می تواندباعث شکست مواد عایقی شود و گازهای محلول در روغن تولید کند. در صورتی که میزان این گازها ، بیش از حد مجاز باشد ، می تواند باعث انفجار ترانسفورماتور گردد.

به هر صورت، وقتی خطایی در ترانسفورماتور رخ می دهد ، خاصیت عایقی روغن، تنزل کرده و دما به صورت غیر عادی افزایش می یابد، به طوری که گازهای مختلفی با آهنگ سریع تولید می شود. این گازها با توجه به تفاوت در شدت انرژی اتلافی ناشی از خطا های مختلف، می تواند تولید شود. میزان و نوع گازهای حاصله، این امکان را می دهد که بتوان نوع خطا را در ترانسفورماتور تعیین کرد . این کار معمولا توسط آنالیز نوع و مقدار گازهای تولیدی به هنگام ایجاد حالت غیرعادی و یا در حین تعمیرات معمولی ترانسفورماتور می تواند آشکار شود.

همچنین ترکیب کاغذ/ روغن در ترانسفورماتورها، تحت تاثیر تنش های حرارتی یا الکتریکی ، می تواند گازهایی را با مکانیزم های خاص تولید کند. تحت این شرایط، مولکول های هیدروکربنی روغن معدنی، تجزیه شده و به شکل هیدروژن و دیگر انواع هیدروکربنها نظیر متان CH_4 ، اتان C_2H_6 ، اتیلن C_2H_4 ، استیلن C_2H_2 در می آید. نکته قابل توجه این که مقادیر هر یک از آنها به دمای نزدیک به نقطه تنش بستگی دارد. ضمنا تنزل خاصیت عایق جامد ترانسفورماتور می تواند گازهای مونو اکسید کربن و دی اکسید کربن محلول در روغن را ایجاد کند که این گازها با افزایش دمای روغن بیش از۱۵۰-۱٤۰ درجه سانتی گراد ایجاد می شوند. تحقیقات نشان داده است که این گازها ، پس از تولید، می توانند در عایق کاغذی ، نفوذ کرده و باعث تغییر میزان این گازها برای اندازه گیری شود.

با توجه به موارد فوق، خطاهایی که در ترانسفورماتورها رخ می دهد را می توان به سه دسته خطاهای حرارتی ، خطاهای الکتریکی بهمراه دشارژ با انرژی کم و زیاد طبقه بندی کرد. در خطاهای حرارتی ، در دماهای ۱۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد ، روغن معدنی تجزیه شده و متناسب با دما ، گازهایی با وزن مولکولی کم (نظیر هیدروژن و متان) و با وزن مولکولی زیاد (نظیر اتیلن و اتان) تولید می کند. با تجزیه حرارتی روغن و تجزیه حرارتی سلولز و عایق های جامد ، مونواکسید کربن ، دی اکسید کربن و قطرات آب در دماهایی کمتر از دمای تجزیه روغن و متناسب با دما تولید می شود. در خطای نوع دوم،که شامل دشارژ و جرقه های الکتریکی با شدت بسیار کم است ، هیدروژن به همراه مقادیر کمی استیلن و متان تولید شده که شدت این دشارژها می تواند میزان استیلن و اتیلن را افزایش دهد. در خطای نوع سوم ، جرقه یا دشارژها مستمر در دماهای۷۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی گراد ایجاد شده و گاز استیلن تولید می شود. در جدول (۱) انواع خطاهای ممکن در ترانسفورماتورها به همراه گازهای آشکار شده ، ارائه شده است[٦]. هنمچنین در جدول (۲)، خطاهای مهم موجود در ترانسفورماتور دسته بندی و عوامل آنها مشخص گردیده است.

۳) روش های مختلف آنالیز گازهای محلول در روغن

آنالیز گازهای محلول در روغن یا DGA (Dissolved Gas Analysis) ، با نمونه گیری از روغن در نقاط مختلف ترانسفورماتور انجام می شود.آنالیزکروماتوگرافی بر روی نمونه روغن و برای اندازه گیری گازهای محلول انجام می شود. سپس گازهای استخراجی همچون هیدروژن، متان، اتان، اتیلن، استیلن، مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن، نیتروژن و اکسیژن، تفکیک، شناسایی و به کمک روش DGA برای تشخیص خطا بکار گرفته می شود. لذا این روش ها می تواند امکان پیش بینی شناخت طبیعی خطا را بر اساس این گازها نشان دهد. روش های مختلفی برای شناسایی خطا های روغن، با استفاده از روش DGA وجود دارد که ذیلا تشریح می گردد.

جدول(۱): انواع خطاهای ممکن در ترانسفورماتورهای قدرت با توجه به گازهای حاصله

نتیجه	گازهای آشکار شده
شرایط نرمال برای ترانسفورماتور آب بندی شده	بیشتر از ٪۵نیتروژن یا مقدار کمتر اکسیژن
بررسی محکم بودن آب بندی ترانسفورماتور	نیتروژن بیشتر از٪۵اکسیژن
افزایش بار ترانسفورماتور یا گرم شدن آن ،شکست سلولزی .بررسی شرایط سرویس	نیتروژن،در اکسید کربن یا مونواکسید کربن یا همه
دشارژ کرونا،الکترولیز آب یا زنگ	نیتروژن و هیدروژن
دشارژ کرونا به همراه سلولز یا افزایش بار ترانسفورماتور	نیتروژن، هیدروژن ،دی اکسیدکربن و مونواکسیدکربن
جرقه یا دیگر خطاهای کوچک به علت شکست روغن	نیتروژن، هیدروژن ،متان بهمراه مقادیر کمی اتان و اتیلن
جرقه یا دیگر خطاهای کوچک در حضور سلولز	نیتروژن ، هیدروژن، متان بهمراه دی اکسید کربن ، مونواکسید کربن و مقادیر کمی از دیگر هیدروکربن ها .معمولا استیلن وجود ندارد.
جرقه با انرژی زیاد توسط تنزل شدید روغن	نیتروژن به همراه هیدروژن زیاد و دیگر هیدروکربن ها شامل استیلن
جرقه با دمای بالای روغن اما در یک منطقه مشخص،اتصالات ناقص یا اتصال کوتاه های حلقه به حلقه	نیتروژن به همراه هیدروژن زیاد ،متان ، استیلن زیاد و مقداری استیلن
همانند قسمت قبل به جز جرقه در ترکیب با سلولز	همانند قسمت قبل به جز دی اکسید کربن و وجود مونواکسیدکربن

جدول(۲): برخی از خطاهای نوعی در ترانسفورماتورها

خطا	نمونه ای از مشکلات بوجود آمده
تخلیه جزئی	◀وجود دشارژها در حفره های پر از گاز که نتیجه ای از نفوذ و اشباع رطوبت در کاغذ، اشباع زیاد روغن یا حفره و ایجاد X.Wax(۱) است.
دشارژ با انرژی کم	◀ جرقه میان اتصالات بد و یا به علت شناوری پتانسیل ناشی از رینگ های محافظتی، سیم پیچ ها، هادیها ، لحیم شکسته شده یا حلقه های مدور بر روی هسته ◀دشارژهایی میان بست ها، بوشینگ ها و تانک ، اتصال سیم های فشار قوی و زمین به بدنه تانک ◀ترک در بلوک های چوبی، چسب میله عایقی ، اسپیسرهای سیم پیچ،شکست روغن
دشارژ با انرژی زیاد	◀قوس الکتریکی ، ترک یا جرقه با انرژی محلی زیاد یا با جاری شدن توان به طور کامل ◀اتصال کوتاه میان طرف ولتاژ ضعیف و زمین،اتصالات،سیم پیچ ها ، بوشینگ ها و تانک ، شین مسی و تانک، سیم پیچ ها و هسته در مجرای روغن ◀حلقه های مدور میان دو هادی مجاور در اطراف شار مغناطیسی اصلی،پیچ های عایقی هسته،رینگ های فلزی نگهدارنده هسته
خطای حرارتی $t<۳۰۰\ ^{\circ}c$	◀افزایش بار ترانسفورماتور در حالت اضطراری ، عبور کم روغن در سیم پیچ ها، گذر فلو در میله های دمپینگ یوغ ها
خطای حرارتی $۳۰۰\ ^{\circ}c < t<۷۰۰\ ^{\circ}c$	◀کنتاکت های معیوب میان اتصالات پیچ شده (به ویژه میان باسبار آلومینیومی) ،کنتاکت های نرم، کنتاکتهایی با سوئیچ سلکتوری (به شکل کربن تجزیه شیمیایی شده توسط حرارت) ، اتصالات از کابل و میله بوشینگ ها ◀جریان های گردشی میان بست های یوغ و پیچ ها ، بست ها و ورقه ها ، در سیم زمین، معیوب بودن لحیم ها یابست هاا در حفاظ های مغناطیسی ◀عایق ساییده شده میان هادی های موازی در سیم پیچ ها
خطای حرارتی $t>۷۰۰\ ^{\circ}c$	◀جریان های گردشی بزرگ در تانک و هسته ◀جریان های کم ایجاد شده در دیواره های تانک توسط میدان مغناطیسی جبران نشده

(۱) ماده جامدی است که به علت دشارژ روغن معدنی بوجود آمده و مشتمل بر عناصر پولیمریزه شده از مولکول های مایع اصلی است.

۳-۱) روش نسبت دورننبرگ

یکی از روش های مهم در تشخیص خطا در ترانسفورماتورها، روش نسبت گازهای محلول است.در سال ۱۹۷۰، دورننبرگ تفاوت میان خطا های الکتریکی و حرارتی را با استفاده از چهار نسبت $\frac{CH_4}{H_2}$ ، $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ ، $\frac{C_2H_2}{CH_4}$ و $\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$ نشان داد[۲]. در بکارگیری این روش، لازم است که مقادیر H_2 ، CH_4 ، CO ، C_2H_2 ، C_2H_4 و C_2H_6 از حداقل مقداری به ترتیب ۱۰۰، ۱۲۰ ، ۳۵۰ ، ۳۵ ، ۵۰ و ٦۵ میکرولیتر درلیتر (ppm) بیشتر باشد.

۳-۲)روش گازهای کلیدی

در روش گازهای کلیدی، گاز کلیدی برای هر نوع خطایی شناسایی شده و با توجه به درصد گاز ، از آن برای تشخیص خطا استفاده می شود. این روش، نتایج حاصل از DGA را بر پایه مجموعه ای از حقایق تفسیر می کند. به عنوان مثال، در تخلیه جزئی با انرژی کم یا کرونا، اصولا H_2 با نسبت ناچیزی ازگازهای هیدروکربنی تولید می شود. بنابراین گاز کلیدی برای تخلیه جزئی یا کرونا، H_2 است که اگر درصد آن در یک نمونه روغن، بزرگ باشد آن خطا، تخلیه جزئی یا کرونا است. همچنین در این مقاله از این روش و به کمک منطق فازی برای تشخیص عیب سلولز ترانسفورماتور استفاده می شود.

۳-۳) روش نسبت راجرز

این روش در سال ۱۹۷۲ توسط راجرز پیشنهاد و در سال ۱۹۷۸ توسط وی ، به کمک چهار نسبت گازی اصلاح شد که به کمک آن می توان خطا های موجود در ترانسفورماتور را شناسایی کرد. جدیدترین نسخه این روش،که در استاندارد IEC60599-1999 آمده ، توسط چهار نسبت گازی ، ۱۵ عیب مختلف ترانسفورماتور تشخیص داده می شود. در این مقاله با استفاده از این روش و به کمک منطق فازی ، عیوب مختلف تشخیص داده می شود.

۳-٤) روش الگویی

در این روش با تشخیص مقدار گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور و مقایسه با الگوی نمونه ، می توان تا حدودی به عیب ترانسفورماتور پی برد[۸].

۳-۵)روش تشخیص نشت

ترانسفورماتورهایی که برای حفاظت روغن به کمک گاز نیتروژن پر می شود، نشت آنها می بایست برطرف گردد. چرا که اکسیژن، یکی از محرکهای کلیدی برای روغن و اکسیداسیون سلولز محسوب می شود. اگر درصد اکسیژن در آن بزرگتر از٪۵ کل گاز باشد ، نشت گاز محسوب می شود.

از آن جایی که مقادیر اکسیژن و نیتروژن در حالت معمولی ، بزرگتر از مجموع دیگر گازها است،بعضی اوقات نسبت $\frac{N_2}{O_2}$ می تواند برای شناسایی نشت استفاده شود. اگر نسبت $\frac{N_2}{O_2}$ کمتر از ٪۵ باشد ،ممکن است نشتی اتفاق افتاده باشد.

۳-٦)تشخیص نابودی کاغذ

مهمترین مسئله در تعیین شرایط کارکرد ترانسفورماتور، تشخیص عیب کاغذ آن است که معمولا با استفاده از نسبت گازهای CO و CO_2 انجام می شود. اغلب موارد ، نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ در محدوده ۳ تا ۱۰درحد قابل قبول است. بر طبق استاندارد

IEC599 MacD80 محدوده نرمال بصورت $3 < \frac{CO_2}{CO} < 11$ پیشنهاد گردیده است. با افزایش درجه حرارت زیاد در سلولز، این نسبت به یک نیز می رسد.زیرا جرقه بسیار سریع ، گاز CO تولید می کند.

علاوه بر موارد فوق، در سال ۱۹۹۰ ، روش تحقیقاتی جدیدی بر اساس فوران (Furan) ، برای تشخیص نابودی سلولز بکار گرفته شد.فوران شامل عناصر فورانیک (Furanic) همچون ۵ـ هیدروکسی متیل ـ۲ـ فورفورال(HMF) ، الکل فورفورال یا فورفورول (FOL) ، ۲ـ فورفورال یا ۲ـ فورفورالدهید یا ۲ـ فورالدهید (FAL) ، ۵ـ متیل ۲ـ فورفورال (MF) و ۲ـ استیل فوران (AF) است. این عناصر می تواند به یکباره در ترانسفورماتور تولید و برای مدتی طولانی در آن باقی بماند و می تواند برای تشخیص خطا های ابتدایی مورد استفاده قرار گیرد. نکته این که ۲ـ فورفورال ، تولید اولیه فورانیک است که از انهدام سلولز ناشی می شود و می تواند برای آشکارسازی و تشخیص نابودی کاغذ ترانسفورماتور بکار گرفته شود.

٤) بکارگیری و طراحی سیستم فازی برای تشخیص خطا در ترانسفورماتورها

با توجه به مراحل مختلف آشکارسازی، مشکل است که بتوان خطاهای داخلی ترانسفورماتور و همچنین ارتباطشان را با دلایل آنها ، به طور واقعی تعیین کرد. از آن جایی که می توان از منطق فازی برای هدفهای نامعین استفاده کرد، لذا استفاده از این روش ، جهت تشخیص خطا از دقت بالایی برخوردار بوده و می تواند با استفاده از تجربه شخص خبره در حالات مختلف صورت پذیرد. لذا با استفاده از تجربه می توان توابع عضویت و قواعد تشخیص آن را ایجاد کرد. اخیرا با گسترش علوم کامپیوتر و سیستم های هوشمند ، تشخیص خطاها با استفاده از سیستم های فازی و همچنین شبکه های عصبی مصنوعی امکان پذیر شده است.با توجه به موارد فوق و مشکل بودن آشکارسازی انواع خطاها ، می توان از نظریه منطق فازی برای تشخیص عیب ترانسفورماتور استفاده کرد. در یک مجموعه فازی برای هر متغیری تابع عضویتی تعریف می شود که هر عضوی با درجه ای و با مقادیر پیوسته از ۰ تا ۱ ارزش گذاری می شود. درجه تابع عضویت می تواند اطلاعات نامشخص یا کیفی را به اطلاعات کمی تبدیل کند. یکی از مزایای این سیستم ، قابلیت بکارگیری نشانه های زبانی برای متغیر ها است ، به طوری که با بکارگیری آنها ،تفسیر معنی داری از مشکلات نشان داده می شود. بهر حال قواعد مورد استفاده می تواند به کمک جداول و روش های مختلف استخراج شود. در ذیل از روش نسبت راجرز، برای تعیین نوع خطا در ترانسفورماتور و با توجه به نسبت های گازی استفاده می شود.

٤-١) تشخیص خطا مطابق تکنیک نسبت گازهای راجرز

در این قسمت برای تشخیص خطا ، از روش نسبت راجرز استفاده می شود.در جدول(۳) این نسبت ها بهمراه عیبشان مشخص شده است. حال برای طراحی و پیاده سازی سیستم تشخیص خطای ترانسفورماتورها ،متغیرهای چهارگانه، مطابق ذیل تعریف می گردد:

$$EM = \frac{C_2H_6}{CH_4} \qquad EE = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \qquad MH = \frac{CH_4}{H_2} \qquad AE = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

با توجه به نقاط و محدوده های مختلف برای نسبت گازها که در جدول(۳) نشان داده شده، مشخص است که برای هر خطایی یک کد لیست وجود دارد و از روی آنها می توان ۱۵ نوع عیب ترانسفورماتور را تشخیص داد. از این جدول مشخص است که نسبت های گازی دارای مرزهایی در نقاط ۰/۱ ، ۱ و ۳ است به طوری که در نسبت های گازی مرزی و در حد مقادیر آستانه فوق، ممکن است تفسیر خطا به درستی صورت نگیرد و یا به عبارتی تشخیص خطا با دقت کمتری انجام شود. حال پر واضح است که روش فازی می تواند به عنوان ابزاری مفید ،ارزش خود را نمایان سازد و محدودیت های فوق را برطرف کند.

جدول(۳): تشخیص خطا به روش نسبت راجرز

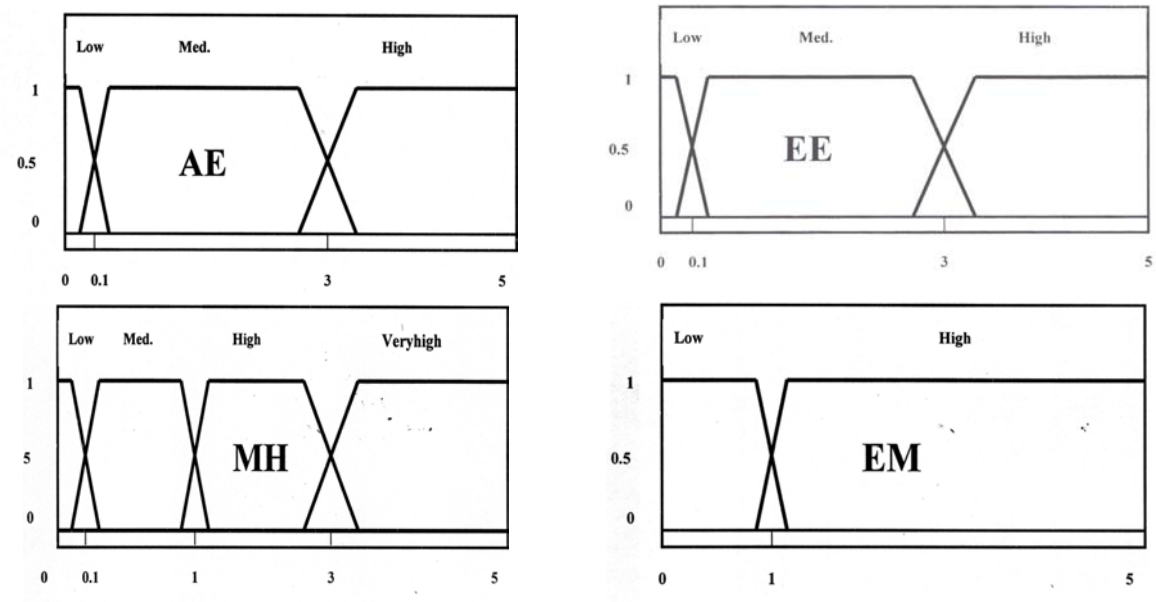
نسبت گازها / محدوده	$AE=\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$MH=\frac{CH_4}{H_2}$	$EE=\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$EM=\frac{C_2H_6}{CH_4}$
کمتر از ۰/۱	۰	۵	۰	۰
۰/۱ تا ۱	۱	۰	۰	۰
۱ تا ۳	۱	۱	۱	۱
بیش از ۳	۲	۲	۲	۱

شماره خطا	نسبت گازها / خطا	AE	MH	EE	EM
۱	بدون خطا	۰	۰	۰	۰
۲	تخلیه های جزئی با شدت انرژی کم یا هیدرولیز	۰	۵	۰	۰
۳	تخلیه های جزئی با شدت انرژی زیاد ، احتمالا همراه با ترک	۱	۵	۰	۰
۴	تخلیه های جزئی و افزایش همزمان دمای هادی	۰	۵	۱	۰
۵	تخلیه های جزئی باافزایش شدت انرژی	۰	۵	۰	۱
۶	دشارژ کم انرژی ،قوس الکتریکی با جاری شدن توان(follow through)	۱-۲	۰	۰	۰
۷	دشارژ کم انرژی،جرقه مداوم با شناوری ولتاژ	۱-۲	۰	۱	۰
۸	دشارژ پر انرژی،جرقه با Power follow Through	۱-۲	۰	۲	۰
۹	افزایش دمای هادی عایق شده	۰	۰	۱	۰
۱۰	حرارت زیاد نقطه داغ و افزایش دمای هادی	۰	۰	۱	۱
۱۱	حرارت زیاد نقطه داغ توام با دشارژ کم انرژی	۱	۰	۰	۱
۱۱	حرارت زیاد نقطه داغ توام با دشارژ کم انرژی	۱	۱	۰	۰
۱۲	خطای حرارتی با محدوده دمای کم (کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی گراد)	۰	۱	۰	۰
۱۳	خطای حرارتی با محدوده دمایی ۲۰۰-۱۰۰ درجه سانتی گراد	۰	۰-۲	۰	۱
۱۴	خطای حرارتی با دمایی بین ۳۰۰- ۱۵۰ درجه سانتی گراد و افزایش دمای مس به علت جریان های گردابی	۰	۱	۱	۰
۱۵	خطای حرارتی با دمای زیاد بین ۷۰۰-۳۰۰ درجه سانتی گراد، کنتاکت ها /متعلقات بد ،جریان های گردشی در تانک و هسته	۰	۱-۲	۲	۰

در ذیل مراحل مختلف طراحی سیستم فازی تشریح می گردد:

- **طراحی سیستم فازی**

برای تشخیص خطا می توان نواحی مختلفی را تعیین و متغیرهای واقعی را بصورت متغیرها یاکمیت های زبانی کوچک'low' ، متوسط 'medium' ،بزرگ 'high' و بسیار بزرگ 'very high' تعریف کرد. در شکل(۱) این توابع عضویت برای چهار متغیر ورودی سیستم فازی نشان داده شده است.



شکل(۱):توابع عضویت چهار متغیر ورودی سیستم فازی برای تعیین خطای ترانسفورماتور

همچنین در این قسمت تجربه شخص خبره مطابق استاندارد استخراج شده، در نظر گرفته می شود. حال با توجه به اطلاعات شخص خبره ، این اطلاعات به صورت عبارتهای فازی و در قالب اگر...آنگاه بیان می گردد. از آن جایی که در عمل، عواملی همچون زمان بارگیری ، نوع ساختار ترانسفورماتور، حجم روغن و همچنین شرایط محیطی بر مقادیر حاصل از DGA موثراست، لذا می توانند بر تشخیص عیب تاثیرگذار باشند.بنابراین تعداد معینی از نتایج DGA خارج از کد لیست تشخیص قرار می گیرد. با توجه به جدول(۳) و همچنین با توجه به چهار متغیر ورودی و از طرفی با توجه به محدوده مشخص شده آنها در توابع عضویت ورودی، ۷۲ قاعده تصمیم گیری می توان تصور کرد.لیکن با توجه به واقعیت های عملی و استاندارد، ۲۲ حالت ممکن برای تصمیم گیری وجود دارد.در طراحی سیستم فازی بکار رفته در این مقاله از موتور استنتاج ممدانی – حداقل ، فازی گر تکین و فازی زدای میانگین مرکز استفاده شده است.جدول(٤) دسته بندی کدهای تشخیص نسبت راجرز را برای متغیرهای فازی تعریف شده، نشان می دهد.

جدول(٤):دسته بندی کدهای نسبت راجرز با توجه به متغیرهای فازی (پایگاه قواعد فازی)

		AE=low			AE=medium			AE=high		
		EE=low	EE=medium	EE=high	EE=low	EE=medium	EE=high	EE=low	EE=medium	EE=high
MH=low	EM=low	۲	٤	٥	۳	N	N	N	N	N
	EM=high	N	N	N	N	N	N	N	N	N
MH=medium	EM=low	۱	۹	N	٦	N	N	N	N	N
	EM=high	۱۳	۱۰	N	۱۱	۷	۸	٦	۷	۸
MH=high	EM=low	۱۲	۱٤	۱٥	۱۱	N	N	N	N	N
	EM=high	۱۳	N	N	N	N	N	N	N	N
MH=very high	EM=low	N	N	۱٥	N	N	N	N	N	N
	EM=high	۱۳	N	N	N	N	N	N	N	N

- مواردی که با **N** مشخص شده است، مواردی است که در روش نسبت راجرز تعریف نشده است.

تعدادی از قواعد فازی جدول (٤) ،در ذیل توضیح داده می شود:

➤IF AE=medium and EE=low and MH=medium and EM=high
Then condition 11(حرارت زیاد نقطه داغ توام با دشارژ کم انرژی)
➤IF AE=high and EE=medium and MH=medium and EM=high
Then condition 7(دشارژ کم انرژی: جرقه مستمر با پتانسیل شناور)
➤IF AE=low and EE=low and MH=low and EM=low
Then condition 2(تخلیه های جزئی با شدت انرژی کم یا هدرولیز شدن)

- **بررسی نتایج حاصله و مقایسه آن با موارد عملی**

در این قسمت ،جهت بررسی صحت و دقت نتایج بدست آمده در این مقاله، نتایج تست های کروماتوگرافی روغن ترانسفورماتور برخی از مقالات ، با نتایج این مقاله مقایسه و بررسی می گردد.

جدول(٥) : مقایسه نتایج بدست آمده

نتیجه عیب			نسبت گازها				مقدار گازها بر حسب ppm					ردیف	مرجع
نتیجه این مقاله	فازی در [٧] با تطبیق بر این استاندارد	واقعی	EM	EE	MH	AE	C_2H_4	C_2H_2	C_2H_6	H_2	CH_4		
٨	٧	٨	٠/٣٨٥	٨/٦	٠/٥٤٢	٧/٤١٩	٤٣	٣١٩	٥	٢٤	١٣	١	[٣]
١٤	١٥	١٥	٠/٥٦٢	٢/٦٢٨	٢/١٩٥	٠/٠٠١	٨٦٢	١	٣٢٨	٢٦٦	٥٨٤	٢	
١٤	١٤	١٤	٠/١٥٦	٠/٦٨٣	١/٤٤٨	٠	٢٨	٠	٤١	١٨١	٢٦٢	٣	[٤]
١٥	١٥	١٥	٠/٥١٥	٤/٧٢٤	١/٩٣٢	٠/٠٤٦	٨١٢/٥	٣٧/٧	١٧٢	١٧٢/٩	٣٣٤	٤	

لذا با توجه به موارد فوق مشخص می گردد که با روش فازی می توان عیوب داخلی ترانسفورماتور را تشخیص داد. نکته اینکه اطلاعات عملی زیادی وجود ندارد که بتوان به کمک آن سیستم را با آن قیاس کرد .لیکن با توجه به اطلاعات عملی ، قیاس در جدول (٥) انجام شده است.

همچنین می توان برای هر حالت ممکن، یک درجه امکان تخصیص داد. بدین منظور از تکنیک ترکیب ماکزیمم/مینیمم برای تعیین میزان امکان وقوع هر حالت استفاده می گردد. مطابق جدول(٦)،در تمام حالات قید شده در جدول(٥)، امکان وقوع در هر حالت ،با توجه به تکنیک تر کیب فوق ، کاملا امکان دارد.

جدول(٦): جدول امکان وقوع خطا

کاملا ممکن	١
امکان زیاد	٠/٧٥–٠/٩٩
ممکن	٠/٥٠–٠/٧٤
امکان کم	٠/٢٥–٠/٤٩
امکان ضعیف	٠/٠١–٠/٢٤
غیرممکن	٠

حال به عنوان مثال، برای ورودی های مرزی سیستم فازی که $AE = 1.02\ , EE = 2.97, MH = 0.97, EM = 1.2$ و $AE = 3.02, EE = 2.97, MH = .97, EM = 1.2$ باشند،خروجی سیستم فازی طراحی شده،عیب۸(دشارژ با انرژی زیاد :...) را می تواند تشخیص دهد. لذا با در نظر گرفتن توابع عضویت ورودی ، درجه هر یک از آنها در دو حالت فوق به ترتیب از راست به چپ به صورت زیر است:

$DAE = 0.7, DEE = 0.2, DMH = 0.8, DEM = 1$ و $DAE = 0.7, DEE = 0.2, DMH = 0.8, DEM = 1$

در نتیجه برای دو حالت فوق داریم:

$$1)\ \min(0.7,0.2,0.8,1) = 0.2$$
$$2)\ \min(0.7,0.2,0.8,1) = 0.2$$

که در نهایت خواهیم داشت:

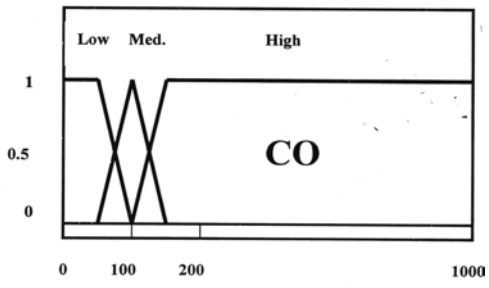
$$\max(0.2,0.2) = 0.2$$

بنابراین با توجه به جدول (٦) ، امکان اینکه عیب بوجود آمده از نوع ۸ باشد ، ضعیف است.

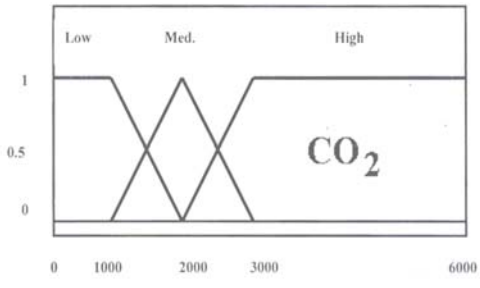
٤-۲) تشخیص میزان خاصیت عایق سلولز در ترانسفورماتور

از آنجایی که از روش فوق می توان به خطاهای ابتدایی ، در صورت آشکارسازی صحیح نسبت های گازی ، پی برد ، لذا از روش گاز کلیدی می توان به عنوان روش مکمل برای تشخیص عیوب مختلف استفاده کرد. در این روش ،گازهای ویژه ای برای خطاهای مختلف در نظر گرفته می شود. به عنوان مثال در هنگام تخریب عایق سلولز ترانسفورماتور ، بیشترین گاز تولیدی مونواکسیدکربن و دی اکسیدکربن است که از این مقدار نیز بیشترین آن مربوط به مونواکسیدکربن (با ٪۹۲کل حجم گاز) است. همچنین در صورت خطا با افزایش دمای روغن در ترانسفورماتور بیشترین گازهای تولیدی ، اتیلن (با٪٦۳ کل حجم گاز) و اتان(با ٪۲۰کل حجم گاز) است.

حال در این قسمت ، با توجه به روش گازهای کلیدی، از روش فازی برای تعیین میزان خاصیت عایق سلولز ترانسفورماتور استفاده می شود. بدین ترتیب با توجه به مقادیر مرزی و آستانه ای میزان گاز ، مقادیر ورودی (مقادیر گازها)فازی دسته بندی می شوند. سپس متغیرهای زبانی در توابع عضویت ورودی به صورت متغیرهای کم'low' ، متوسط'medium' و زیاد 'high' تعریف می گردند.خروجی این سیستم فازی ، تعیین سه شرط ، حالت بحرانی ، خطر و عادی است.در حالت بحرانی ، ترانسفورماتور دارای خطای ویژه ای است که می بایست سریعا مشکل آن بر طرف گردد. در حالت خطر ،ترانسفورماتور ممکن است دارای خطای ویژه ای باشد ، ولی لازم است متناوبا کنترل شود و در حالت سوم نیز ، ترانسفورماتور سالم و بدون هیچگونه عیبی است. توابع عضویت برای دو گاز کلیدی در تشخیص خاصیت عایق سلولز در شکل(۲) مشخص شده است.



(۱الف)



(ب)

شکل(۲): تابع عضویت ورودی برای، الف) مونواکسیدکربن ب)دی اکسید کربن

در طراحی قواعد استنتاج فازی در حالتی که هردو گاز دارای مقادیر زیاد و یا یکی زیاد و دیگری کم باشد ، حالت بحرانی در نظر گرفته می شود. ضمنا در صورتی که هر دو گاز دارای مقادیر متوسط یا کم و یا یکی کم و دیگری متوسط باشد ، حالت عادی محسوب شده و بقیه حالات ، حالت خطر به شمار می رود . لذا در مجموع ۹ قاعده فازی استخراج می گردد که در جدول(۷) این قواعد دسته بندی شده است. نکته این که نوع سیستم فازی بکار رفته ، همانند حالت قبل است.

جدول(۷):دسته بندی قواعد فازی برای تعیین شکست عایق سلولز در ترانسفورماتور

		مونواکسیدکربن		
		High	**Medium**	**Low**
دی اکسیدکربن	**High**	بحرانی	بحرانی	خطرناک
	Medium	بحرانی	عادی	عادی
	Low	خطرناک	عادی	عادی

حال اگر میزان گازهای مونواکسیدکربن و دی اکسیدکربن به ترتیب ۷۰ و ۱۲۰۰ میکرولیتر بر لیتر باشد ، طبق تابع عضویت در نظر گرفته شده ، درجه عضویت مونواکسیدکربن در سه حالت زیاد، متوسط و کم به ترتیب صفر ، ۰/٤ و ۰/٦ بدست می آید. همچنین درجه عضویت دی اکسید کربن در سه حالت فوق ، به ترتیب صفر،۰/۲ و ۰/۸ است. حال با توجه به قواعد فازی و با توجه به ترکیب مینیموم/ ماکزیمم در سه حالت فوق داریم :

➤در حالت بحرانی

Max [min (0,0), min (0,0.2), min (0.4,0)]=0

➤حالت عادی

Max [min (0.4,0.2), min (0.4,0.8), min (0.6,0.2), min (0.6,0.8)]=0.6

➤حالت خطر

Max [min (0,0.8), min (0.6,0)]=0

لذا با توجه به موارد فوق ، در شرایط عادی این امکان وجود دارد که خطای شکست در عایق سلولزی ترانسفورماتور رخ دهد.

۵) نتیجه

در این مقاله ،مکانیزم تولید گاز و مقادیر هر یک از آنها با توجه به انواع خطاها تشریح گردید. همچنین روش های مختلف آنالیز گازهای محلول در روغن بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت.در ضمن از آنجایی که از روش فازی می توان برای هدفهای مشکوک استفاده کرد. در این مقاله با استفاده از تجربه شخص خبره در حالات مختلف خطا در ترانسفورماتورها و با توجه به جدیدترین استاندارد ،سیستم فازی بر اساس روش نسبت گاز راجرز و همچنین روش گاز کلیدی برای تشخیص عیوب مختلف و تشخیص میزان شکست عایق سلولزی ترانسفورماتور استفاده گردید. ضمنا در این مقاله سیستم فازی طراحی شده با موارد عملی و دیگر مقالات مقایسه شد و در نهایت ،در هر حالت ، امکان وجود حالات گوناگون عیب بررسی گردید.

٦)مرجع

[1] Ning GAO, Zhang YAN. ,"NEW APPROACH ON COMPREHENSIVE DIAGNOSIS OF INSULATION FAULTS IN POWER TRANSFORMER "High voltage institute, Helsinki University of Technology & High voltage division, School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University.

[2] IEC Publication 60599.INTERPRETATION OF THE ANALYSIS OF GASES IN TRANSFORMERS AND OTHER OIL-FILLED ELECTRICAL EQUIPMENT IN SERVICE, 1999.

[3] S.M.Islam, T.Wu and C.L.Huang, "A NOVEL FUZZY LOGIC APPROACH TO TRANSFORMER FAULT DIAGNOSIS ", IEEE Trans. On Dielectric and Electrical Insulation, Vol.7, No.2, April 2000

[4] G.Zhang, K.Yasuoka and S.Ishii," APPLICATION OF FUZZY EQUIVALENT MATRIX FOR FAULT DIAGNOSIS OF OIL - IMMERSED ", proc. Of 13th international conference on dielectric liquids ICDL'99, Nara, Japan, July 20-25, 1999

[5] ANSI/IEEE Std C57.104-1991. IEEE GUIDE FOR THE INTERPRETATION OF GASES GENERATED IN OIL- IMMERSED TRANSFORMERS, IEEE Power Engineering Society, 1992.

[6] British Standards Institution, THE INTERPRETATION OF THE ANALYSIS OF GASES IN TRANSFORMERS AND OTHER OIL-FILLED ELECTRICAL EQUIPMENT IN SERVICE, London. BS 5800,1979. (IEC599: 1978) 1999.

[٧] منصور رفیعی ،' تشخیص عیوب ترانسفورماتورهای قدرت از طریق تحلیل نتایج حاصل از آنالیز گازهای محلول در روغن با استفاده از منطق فازی' ، دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد چهارم، صفحه٢٨٢-٢٧٦ ،١٣٨١

[٨]وحید ماسوری ،'جزوه آموزشی ترانسفورماتورهای قدرت' ، ١٣٧٩