



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 3, 2024
pp. 53-78
Research Paper

Diagnosing the type and location of the transformer fault by analyzing the dissolved gas using fuzzy logic

Mohammad Biranvand¹, Asghar Akbari Foroud^{*2}

¹ Master's degree student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

² Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract:

There are many methods to diagnose transformer faults, including dissolved gas analysis (DGA), done in two conventional and smart ways. This paper presents a new method based on fuzzy logic and 5 DGA methods (key gas method, Durenberg's ratio method, Roger's ratio method, IEC method, and Duval triangle method) to evaluate the condition of power transformers. At first, it is determined whether the transformer is healthy or defective. This step is performed based on key gas methods and Durenberg's ratio method with a fuzzy logic approach. Then, if it is detected that the transformer is defective, the type of error is detected using Rogers and IEC methods. If the error detection by these two methods reaches the same result, the error type detection is terminated and if the result is not the same, the Duval triangle method with fuzzy logic approach is used to detect the error type. The presented algorithm has been tested on 30 transformer devices and the results confirm its high accuracy (96.7%) in fault detection. In this article, in addition to detecting the type of fault, the location of the fault has been investigated and diagnosed using the CO₂/CO ratio and the key gas method with a fuzzy logic approach.

Keywords: Power Transformers, Transformer Fault Detection, Dissolved Gas Analysis Method, Fuzzy Logic.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2024.140046.1670>

تشخیص نوع و محل خطای ترانسفورماتور توسط تجزیه و تحلیل گاز محلول با استفاده از

منطق فازی

محمد بیرانوند^۱، اصغر اکبری فرود^{۲*}

۱- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

m_beiranvand@semnan.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

aakbari@semnan.ac.ir

چکیده: روش‌هایی متعدد برای تشخیص خطای ترانسفورماتورها وجود دارند، از جمله تجزیه و تحلیل گازهای محلول (Dissolved Gas Analysis-DGA) که به دو روش مرسوم و هوشمند انجام می‌شود. در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر منطق فازی و با استفاده از ۵ روش DGA (روش گاز کلیدی، روش نسبت دورنبرگ، روش نسبت راجرز، روش IEC و روش مثلث دووال) برای ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در ابتدا، سالم یا معیوب بودن ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود. این مرحله بر اساس روش‌های گاز کلیدی و روش نسبت دورنبرگ با رویکرد منطق فازی انجام می‌شود. سپس، در صورت تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور، با استفاده از روش‌های راجرز و IEC، نوع خطا تشخیص داده می‌شود و اگر تشخیص خطا توسط این دو روش به نتیجه‌ای یکسان رسید، تشخیص نوع خطا خاتمه می‌یابد و اگر نتیجه یکسان نبود، برای تشخیص نوع خطا از روش مثلث دووال با رویکرد منطق فازی استفاده می‌شود. الگوریتم ارائه‌شده بر روی ۳۰ دستگاه ترانسفورماتور آزمون شده است و نتایج مؤید دقت زیاد آن (۹۶٪) در تشخیص خطا است. در این مقاله، علاوه بر تشخیص نوع خطا، به محل خطا با استفاده از نسبت CO_2/CO و روش گاز کلیدی با رویکرد منطق فازی بررسی و تشخیص داده شده است.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتورهای قدرت، تشخیص خطا در ترانسفورماتور، روش تجزیه و تحلیل گازهای محلول، منطق فازی.

۱- مقدمه

در ترانسفورماتورها ممکن است خسارت‌های مالی جالب توجهی را ایجاد کند [۱-۴].

در ترانسفورماتورها از عایق‌های مایع و جامد استفاده می‌شود. زمانی که خطایی رخ می‌دهد، این عایق‌ها تحت شوک‌های الکتریکی و حرارتی قرار می‌گیرند. این شوک‌ها باعث تجزیه شیمیایی عایق‌های ترانسفورماتورها می‌شوند. از اثرات تجزیه شیمیایی ایجاد گازهایی است که می‌توانند در روغن ترانسفورماتور محلول شوند. نوع و میزان گازهای محلول در روغن ترانسفورماتورها ارتباطی نزدیک با نوع خطا دارند [۵].

از سال ۱۹۷۳ میلادی، برای تشخیص خطا در

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات مهم در شبکه‌های انتقال و توزیع برق هستند و قابلیت اطمینان سیستم قدرت به حفظ سلامت ترانسفورماتورها وابسته است. بروز مشکل

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

نام نویسنده مسئول: اصغر اکبری فرود

نشانی نویسنده مسئول: ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، انشکده مهندسی برق و کامپیوتر

کلیدی، روش نسبت دورنبرگ، روش نسبت راجرز، روش نسبت IEC و روش مثلث دووال) روی چهار دستگاه ترانسفورماتور اعمال شده‌اند و نتایج تحلیل و مقایسه شده‌اند. در [۲۰]، مقایسه‌ای بین روش‌های نسبت راجرز و نسبت IEC در دو حالت متعارف و با رویکرد منطق فازی انجام شده است که بهبود تشخیص خطا با رویکرد منطق فازی در هر دو روش را نسبت به حالت متعارف نشان می‌دهد. در [۲۱]، تشخیص خطا برای روش‌های راجرز در دو حالت با استفاده از (سه نسبت و چهار نسبت گاز) بررسی شده است و نشان می‌دهد دقت تشخیص روش راجرز با چهار نسبت بیشتر از دیگری است. در بخش دیگر این مقاله، روش‌های نسبت راجرز و نسبت IEC با رویکرد منطق فازی با هم مقایسه شده‌اند که نشان می‌دهد روش IEC با رویکرد منطق فازی عملکردی بهتر دارد. در [۲۲]، خطای ترانسفورماتور با استفاده از روش نسبت IEC بررسی شده است و همچنین، یک مدل ریاضی برای بررسی روابط بین درصد نسبت‌های گازهای محلول برای نسبت IEC بر اساس یک مدل توسعه‌یافته با استفاده از منطق فازی ارائه شده است. در [۲۳]، از روش‌های نسبت راجرز و نسبت IEC با رویکرد منطق فازی برای تشخیص خطای ترانسفورماتورها استفاده شده است. در [۲۴]، روش متعارف IEC با روش IEC با رویکرد منطق فازی مقایسه شده است. بر اساس نتایج این مقاله، روش IEC با رویکرد منطق فازی دقت تشخیص خطای زیادی نسبت به حالت متعارف آن دارد. در [۲۵]، روش مثلث دووال با رویکرد منطق فازی برای تشخیص خطای ترانسفورماتور ارائه شده است. در [۲۶]، یک سیستم منطق فازی برای بهبود تفسیر DGA بر اساس روش مثلث دووال به نام «کاربرد ترکیبات نسبت گاز» ارائه شده است. با مقایسه این روش با روش‌های نسبت راجرز و نسبت IEC با رویکرد منطق فازی، نشان داده شده است روش ارائه‌شده در این مرجع دقتی بیشتر در تشخیص خطای ترانسفورماتور دارد. در [۲۷]، هدف شرح روش نسبت IEC با رویکرد منطق فازی و نشان دادن تحلیل دقیق‌تر و بهتر آن نسبت به روش متعارف IEC در تشخیص خطای ترانسفورماتور است. در [۲۸]، از نرم‌افزار منطق فازی در محیط Lab VIEW به عنوان یک

ترانسفورماتورها از کارماتوگرافی گازی استفاده شده است [۶]. نوع خطا در ترانسفورماتور ممکن است بر اساس مقدار و نوع گازهای تولیدشده در آن تعیین شود. تجزیه و تحلیل گازهای محلول در روغن به دو روش کلی متعارف و هوشمند انجام می‌شود [۷].

روش‌های متعارف که برای تفسیر تجزیه و تحلیل گاز محلول (Dissolved Gas Analysis-DGA) استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: نسبت دورنبرگ [۸]، نسبت راجرز [۹]، نسبت IEC [۱۰]، گاز کلیدی [۱۱] و مثلث دووال [۱۲]. در روش‌های متعارف، از غلظت گازهای محلول و همچنین نسبت بین آن‌ها برای تشخیص خطا در ترانسفورماتورها استفاده می‌شود.

در سال‌های گذشته، روش‌های هوشمند نیز برای تشخیص خطا در ترانسفورماتورها ایجاد شده‌اند که این پیشرفت به لطف افزایش، سرعت پردازش و ظرفیت حافظه کامپیوترها محقق شده است [۱۳]. انواع روش‌های هوشمند عبارت‌اند از: سیستم منطق فازی (FL)، الگوریتم ژنتیک (GA)، سیستم‌های متخصص (ES) و شبکه‌های عصبی (ANN) [۱۴].

یکی از ویژگی‌های روش‌های متعارف تشخیص خطای ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از تجزیه و تحلیل گازهای محلول نیاز به یک فرد متخصص برای انجام محاسبات پیچیده و زمان‌بر است. از یک سو، تأمین چنین فرد ماهری دشوار و هزینه‌بر است و از سوی دیگر، حجم زیاد محاسبات امکان اشتباه در فرآیند تشخیص را افزایش می‌دهد؛ اما در تکنیک‌های هوشمند، به دلیل تشخیص دقیق و سریع‌تر نسبت به روش‌های متعارف، احتمال اشتباه کاهش می‌یابد [۱۷-۱۵].

در [۱۸]، روش‌های نسبت IEC، گاز کلیدی و مثلث دووال با رویکرد منطق فازی برای تشخیص خطاهای ترانسفورماتور از جمله گرمای بیش از حد روغن، تخلیه جزئی و قوس الکتریکی که در محدوده‌های مختلف طبقه‌بندی شده است، به کار رفته‌اند. همچنین، از روش گاز کلیدی با رویکرد منطق فازی جدیدی که ارائه شده است، برای تعیین شاخص خرابی و شدت خطاها استفاده شده است. در [۱۹]، پنج روش متعارف DGA (روش گاز

در این مقاله، علاوه بر تشخیص نوع خطا، محل خطا با استفاده از نسبت CO_2/CO و روش گاز کلیدی با رویکرد منطق فازی بررسی و تشخیص داده می‌شود که در مقاله‌های ارائه‌شده قبلی دیده نشده است، روش پیشنهادی تشخیص نوع خطا باعث بهبود دقت تشخیص خطا در ترانسفورماتورها شده است؛ به طوری که نسبت به نتایج جدیدترین مقاله‌ای که از روش منطق فازی برای تشخیص خطا استفاده کرده است، تقریباً حدود ۲ درصد دقت تشخیص خطای بیشتری را دارا است.

نوآوری مقاله به طور خلاصه به شرح زیر است:

۱- ارائه روشی ترکیبی با استفاده از روش‌های متعارف با رویکرد منطق فازی برای تشخیص نوع خطای داخل ترانسفورماتور که دقت تشخیص خطای ترانسفورماتور را حدود ۲ درصد نسبت به روش‌های قبلی بهبود بخشیده است.

۲- ارائه روشی برگرفته از گاز کلیدی با رویکرد منطق فازی و با استفاده از مقادیر گازهای CO و CO_2 موجود در روغن ترانسفورماتور برای تشخیص محل خطا که در مقاله‌های دیگر استفاده نشده است.

در بخش‌های بعدی، به ترتیب، مباحث زیر بررسی شده‌اند: تجزیه و تحلیل گازهای درون روغن (DGA)، معرفی سیستم منطق فازی، بیان نتایج حاصل از روش‌های منطق فازی بر اساس پنج روش یادشده، جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری.

۲- تجزیه و تحلیل گازهای درون روغن (DGA)

وضعیت سلامت کاری ترانسفورماتور را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف بررسی کرد. یکی از این روش‌ها تجزیه و تحلیل گازهای محلول در روغن (DGA) است [۱۵، ۳۳]. تجزیه و تحلیل گازهای محلول (DGA)، در واقع، شناسایی، اندازه‌گیری و تفسیر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور است. روش DGA بر اساس اندازه‌گیری غلظت هفت گاز اصلی (هیدروژن، متان، استیلن، اتیلن، اتان، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن) خطا را

ابزار پشتیبانی برای بررسی عملکرد ترانسفورماتورها برگرفته از روش‌های دورنبرگ و گاز کلیدی استفاده شده است. در [۲۹]، یک نرم‌افزار تشخیصی بر اساس منطق فازی ارائه شده است که در Lab VIEW اجرا شده است، این نرم‌افزار بر اساس DGA و بررسی همبستگی با تجزیه و تحلیل غلظت مشتقات فوران سعی دارد پیش‌بینی دقیق‌تری را از خطاهای ترانسفورماتور ارائه دهد. در [۳۰]، ماژول‌هایی برای هفت سیستم فازی به صورت جداگانه ایجاد و آزمایش شده‌اند و سپس، از ترکیب آن‌ها برای نظارت بر سلامت ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شده است. روش توسعه‌یافته در این مرجع روند تغییرات در غلظت گازهای محلول در طول عمر عملیاتی ترانسفورماتور را نیز مدنظر قرار می‌دهد. در [۳۱]، از روش‌های دورنبرگ، راجرز و IEC با رویکرد ANFIS (سیستم فازی - عصبی) برای تشخیص هم‌زمان نوع و محل خطا استفاده شده است. همچنین، در این مقاله، مقایسه‌ای بین روش‌های ANN و ANFIS با رویکرد روش‌های نسبت راجرز، دورنبرگ و IEC انجام شده است. در [۳۲]، مقایسه‌ای بین روش‌های نسبت راجرز و نسبت IEC با رویکرد منطق فازی انجام شده است که نشان داده است روش IEC در تشخیص خطا نسبت به روش راجرز دارای دقتی بیشتر است.

در این مقاله، روشی جدید برای تشخیص نوع و محل خطا در ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است که از پنج روش مرسوم (گاز کلیدی، نسبت دورنبرگ، نسبت راجرز، نسبت IEC و مثلث‌های دووال) با رویکرد منطق فازی بهره می‌گیرد. روش ارائه‌شده، در واقع، الگوریتمی ترکیبی از روش‌های متعارف با رویکرد منطق فازی است که می‌تواند خطاهای ترانسفورماتور با بیشترین دقت ممکن تا به حال، یعنی ۹۷ درصد، را تشخیص دهد.

در روش پیشنهادی، برای همه روش‌های مرسوم با رویکرد منطق فازی کدهایی تعریف شده‌اند. سپس، با استفاده از این کدها، تابع عضویت‌های دوزنقه‌ای مربوط به هر روش تشکیل شده است.

ارزیابی مبتنی بر منطق فازی فرآیندی سه‌مرحله‌ای شامل فازی‌سازی، استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی است. همچنین،

هنجار، برای مقدار مطلق هر کدام از گازهای یادشده، یک عدد به عنوان حد (مطابق جدول ۳) تعیین شده است [۱۳]. اگر برای هر گاز، حد آن از مقدار تعیین شده در جدول (۳) تجاوز نکند، از نظر روش دورنبرگ، ترانسفورماتور سالم است و اگر دست کم یکی از حدود بیان شده در این جدول نقض شود، روش دورنبرگ خطا اعلام می کند و نوع خطا طبق جدول (۴) تشخیص داده می شود [۱۹].

۳-۲- روش نسبت راجرز

روش نسبت راجرز برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ میلادی پیشنهاد شد. در سال ۱۹۷۵ میلادی، ایرادهای آن تا حدودی برطرف شدند و در سال ۱۹۷۷ میلادی، روش نهایی راجرز ارائه شد. روش راجرز رایج ترین روش در میان روش های نسبت گازها است و خطاهایی بیشتر را در مقایسه با روش دورنبرگ تشخیص می دهد [۱۷]. این روش فرآیندی مشابه روش دورنبرگ را دنبال می کند؛ با این تفاوت که در روش راجرز، چهار نسبت گازی R_3 , R_2 , R_1 و R_5 استفاده شده اند [۱۹، ۲۰].

خطاهایی که روش راجرز با توجه به کدهای جدول (۵) می تواند تشخیص دهد به شرح زیر هستند:

سالم (N)، تخلیه جزئی با انرژی کم (PD)، تخلیه جزئی با انرژی زیاد (PD)، دشارژ با انرژی کم (D1)، دشارژ با انرژی زیاد (D2)، خطای حرارتی کمتر از 300°C (T1)، خطای حرارتی بین 300°C - 700°C (T2) و خطای حرارتی بیش از 700°C (T3). نحوه تشخیص و جزئیات این روش در جدول (۶) ارائه شده اند.

۴-۲- روش نسبت IEC

روش IEC یکی از محبوب ترین روش ها برای شناسایی خطای ترانسفورماتور است که بر اساس نسبتی از پنج گاز کلیدی: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 کار می کند. این روش توسعه یافته روش نسبت راجرز است؛ با این تفاوت که از نسبت R_5 استفاده نکرده است [۲۳]. در این روش، برای تشخیص خطا از سه نسبت گاز R_1 , R_2 و R_3 استفاده شده است و بر اساس کدهای حدود خطا موجود در جدول

تشخیص می دهد [۱۶، ۱۷]. این روش با استفاده از داده های گازهای محلول در روغن می تواند وضعیت فنی ترانسفورماتور و نوع خطای آن را تشخیص دهد. طبق استاندارد، روش هایی مختلف برای DGA تعریف شده اند که عبارتند از:

- روش های متعارف شامل گاز کلیدی، نسبت دورنبرگ، نسبت راجرز، IEC و مثلث های دووال.
- روش های هوشمند شامل سیستم منطق فازی (FL)، الگوریتم های تکاملی (EA)، سیستم های متخصص (EPS) و شبکه های عصبی (ANN).

۱-۲- روش گاز کلیدی

روش گاز کلیدی برای شناسایی خطاهای داخلی ترانسفورماتور قدرت استفاده می شود. گازهای کلیدی شامل CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 و H_2 هستند. در جدول (۱)، با استفاده از حد غلظت گاز کلیدی محلول، می توان شدت خطاها را به عنوان وضعیت خوب (N)، متوسط (S_2)، ضعیف (S_3) و بد (S_4) تعیین کرد [۱۸]. در این روش، وضعیت کلی ترانسفورماتور به صورت کیفی شناسایی و تعیین می شود. منظور از سطوح کیفی، خوب، متوسط، ضعیف و بد است (جدول ۱).

۲-۲- روش نسبت دورنبرگ

روش دورنبرگ روشی مبتنی بر نسبت گازهای محلول در روغن است. در روش های نسبت، از نسبت غلظت گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور استفاده می شود و بر اساس ۵ نسبت که در جدول (۲) آمده اند، خطا را تشخیص می دهند. اولین تلاش در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی در هیئت مرکزی تولید برق^۱ (CEGB) انجام شد؛ به این صورت که دورنبرگ در سال ۱۹۷۰ میلادی، با استفاده چهار نسبت R_1 , R_2 , R_3 و R_4 و مقدار مطلق شش گاز هیدروژن (H_2)، متان (CH_4)، کربن مونو اکسید (CO)، استیلن (C_2H_2)، اتیلن (C_2H_4) و اتان (C_2H_6)، توانست بین خطاهای حرارتی و الکتریکی تمایز ایجاد کند. در این روش، ابتدا آزمایش هنجار L_1 انجام می شود. در آزمایش

زیاد و کم (D1, D2) و خطای حرارتی در محدوده دمایی مختلف (T1, T2, T3) و ترکیبی از خطای حرارتی و الکتریکی (DT). دلیل استفاده از روش مثلث دووال این است که در میان روش‌های معرفی شده، تنها روشی است که می‌تواند خطای ترکیبی حرارتی و الکتریکی را تشخیص دهد.

سه ضلع مثلث بر اساس درصد نسبی هر کدام از سه گاز CH_4 ، C_2H_4 ، C_2H_2 بر اساس روابط ۱ تا ۳ مندرج شده‌اند [۲۵، ۲۳]:

$$CH_4\% = \frac{CH_4}{CH_4+C_2H_4+C_2H_2} 100 \quad (۱)$$

$$C_2H_4\% = \frac{C_2H_4}{CH_4+C_2H_4+C_2H_2} 100 \quad (۲)$$

$$C_2H_2\% = \frac{C_2H_2}{CH_4+C_2H_4+C_2H_2} 100 \quad (۳)$$

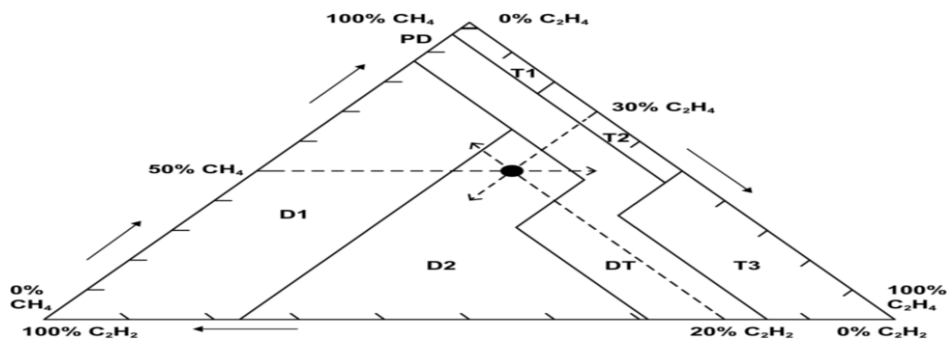
در این روش، تشخیص نوع خطا بر اساس جدول (۹) انجام می‌شود که برگرفته از شکل (۱) است.

(۷)، خطاها بر اساس جدول (۸) تشخیص داده می‌شوند [۲۴، ۱۸].

۵-۲- روش مثلث دووال

در روش دووال، تشخیص خطا بر اساس تجسم محل گازهای محلول در نقشه مثلثی انجام می‌شود (شکل ۱). روش تشخیص خطا در این روش به قرار زیر است [۱۸]: ابتدا، با استفاده از درصد CH_4 ، یک خط موازی با محور C_2H_2 درصد رسم می‌شود. سپس، اندازه درصد C_2H_2 بر روی محور مربوط تعیین و درج می‌شود و یک خط موازی با محور C_2H_4 درصد رسم می‌شود. سپس، اندازه درصد C_2H_4 بر روی محور آن تعیین و درج می‌شود و موازی با محور CH_4 درصد رسم می‌شود. محل تلاقی این سه خط نوع خطا را مشخص می‌کند.

خطاهایی که با این روش می‌توان تشخیص داد عبارت‌اند از: تخلیه جزئی (PD)، قوس الکتریکی با انرژی



شکل (۱): مثلث دووال و نواحی خطا در آن [۱۱]

جدول (۱): حدود گازهای کلیدی و شدت خطای متناظر با آن‌ها برحسب ذره در میلیون (ppm) [۱۸]

کد	وضعیت	CO	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄	H ₂	جمع
۰ (Low)	خوب (N)	۳۵۰	۶۵	۵۰	۳۵	۱۲۰	۱۰۰	۷۲۰
۱ (Med)	متوسط (S2)	۳۵۱-۵۷۰	۶۶-۱۰۰	۵۱-۱۰۰	۳۶-۵۰	۱۲۱-۴۰۰	۱۰۱-۷۰۰	۷۲۱-۱۹۲۰
۲ (Hi)	ضعیف (S3)	۵۷۱-۱۴۰۰	۱۰۱-۱۵۰	۱۰۱-۲۰۰	۵۱-۸۰	۴۰۱-۱۰۰۰	۷۰۱-۱۸۰۰	۴۶۳۰-۱۹۲۱
۳ (V-Hi)	بد (S4)	۱۴۰۰<	۱۵۰<	۲۰۰<	۸۰<	۱۰۰۰<	۱۸۰۰<	۴۶۳۰<

تشخیص نوع و محل خطای ترانسفورماتور توسط تجزیه و تحلیل گاز محلول با استفاده از منطق فازی

جدول (۲): نسبت گازها و نمادهای تعریف شده برای آنها [۱۳]

نماد	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
نسبت‌ها	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	C ₂ H ₆ / C ₂ H ₂	C ₂ H ₆ / CH ₄

جدول (۳): حد L₁ در روش دورنبرگ [۱۳]

گازها	H ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
حدود L1 (ppm)	۱۰۰	۱۲۰	۳۵۰	۱	۵۰	۶۵

جدول (۴): تشخیص خطا در روش دورنبرگ [۱۳]

خطاها	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	نماد
خطای حرارتی	< ۰/۳	> ۱	< ۰/۷۵	> ۰/۴	T
کرونا (PD با شدت کم)	< ۰/۳	< ۰/۱	ND ^۲	> ۰/۴	PD
آرک (PD با شدت زیاد)	> ۰/۳	۰/۱ < R ₂ < ۱	> ۰/۷۵	< ۰/۴	D

جدول (۵): کدها و حدود نسبت گاز در روش راجرز [۲۰]

نسبت گازها	حدود	کد
R ₁	< ۰/۱	۰ (Low)
	۰/۱ < R ₁ < ۳	۱ (Med)
	> ۳	۲ (Hi)
R ₂	< ۰/۱	۵ (Low)
	۰/۱ ≤ R ₂ < ۱	۰ (Med)
	۱ ≤ R ₂ ≤ ۳	۱ (Hi)
	> ۳	۲ (V-Hi)
R ₃	< ۱	۰ (Low)
	۱ ≤ R ₃ ≤ ۳	۱ (Med)
	> ۳	۲ (Hi)
R ₅	< ۱	۰ (Low)
	≥ ۱	۱ (Hi)

جدول (۶): تشخیص خطا در روش راجرز [۲۱، ۲۰]

نماد	نوع خطا	کد R ₅	کد R ₃	کد R ₂	کد R ₁
T1	خطای حرارتی < ۱۵۰°C	۰	۰	۱-۲	۰
T1	خطای حرارتی بین ۱۵۰-۲۰۰°C	۱	۰	۱-۲	۰
T1	خطای حرارتی بین ۲۰۰-۳۰۰°C	۱	۰	۰	۰
T2	خطای حرارتی بین ۳۰۰-۷۰۰°C	۰	۱	۰	۰
		۰	۱	۱	۰
T3	گرمای زیاد < ۷۰۰°C	۰	۲	۱	۰
D1	تخلیه کم انرژی در اثر flash over	۰	۰	۰	۱
D2	تخلیه کم انرژی، قوس الکتریکی با جاری شدن توان	۰	۱-۲	۰	۱-۲
D2	تخلیه کم انرژی، جرقه مداوم با شناوری ولتاژ	۰	۲	۰	۲
PD	تخلیه‌های جزئی با شدت انرژی کم	۰	۰	۵	۰
PD	تخلیه‌های جزئی با شدت انرژی زیاد	۰	۰	۵	۱-۲
N	بدون خطا (سالم)	۰	۰	۰	۰

جدول (۷): کدها و محدوده خطا در روش IEC [۱۸، ۲۲]

نسبت گازها	حدود	کد
R ₁	< ۰/۱	۰ (Low)
	۰/۱ ≤ R ₁ < ۳	۱ (Med)
	≥ ۳	۲ (Hi)
R ₂	< ۰/۱	۱ (Low)
	۰/۱ ≤ R ₂ < ۱	۰ (Med)
	≥ ۱	۲ (Hi)
R ₃	< ۱	۰ (Low)
	۱ ≤ R ₃ < ۳	۱ (Med)
	≥ ۳	۲ (Hi)

جدول (۸): تشخیص خطا در روش IEC [۲۰، ۲۲]

نماد	نوع خطا	کد R3	کد R2	کد R1
T1	خطای حرارتی > ۱۵۰ °C	۱	۰	۰
T1	خطای حرارتی < ۳۰۰ °C	۰	۲	۰
T2	خطای حرارتی < ۷۰۰ °C	۱	۲	۰
T3	خطای حرارتی < ۷۰۰ °C	۲	۲	۰
D1	آرک با انرژی کم	۱-۲	۰	۱-۲
D2	آرک با انرژی زیاد	۲	۰	۱
PD	کرونا با انرژی زیاد	۰	۱	۰
PD	کرونا با انرژی کم	۰	۱	۱
N	سالم	۰	۰	۰

جدول (۹): مرزهای ناحیه خطا برای شکل (۱)

خطا	CH4 % (Z)	C2H4 % (S)	C2H2 % (P)
PD	Z ≥ ۹۸	-	-
T1	Z < ۹۸	S < ۲۰	< ۴
T2	-	۲۰ ≤ S < ۵۰	< ۴
T3	-	S ≥ ۵۰	< ۱۵
DT	-	S < ۵۰	۴ ≤ P < ۱۳
	-	۴۰ ≤ S < ۵۰	۱۳ ≤ P < ۲۹
	-	S ≥ ۵۰	۱۵ ≤ P < ۲۹
D1	-	S < ۲۳	P ≥ ۱۳
D2	-	S ≥ ۲۳	P ≥ ۲۹
	-	۲۳ ≤ S < ۴۰	۱۳ ≤ P < ۲۹

جدول (۱۰): کدهای ورودی توابع عضویت روش مثلث دووال منطبق بر منطق فازی حاکم بر آن

%CH ₄	%C ₂ H ₂	%C ₂ H ₄
Z ₁ < ۵۰	P ₁ < ۲	S ₁ < ۲
۵۰ ≤ Z ₂ < ۶۳	۲ ≤ P ₂ < ۴	۲ ≤ S ₂ < ۲۰
۶۳ ≤ Z ₃ < ۸۰	۴ ≤ P ₃ < ۱۲	۲۰ ≤ S ₃ < ۲۳
۸۰ ≤ Z ₄ < ۸۸	۱۲ ≤ P ₄ < ۱۴	۲۳ ≤ S ₄ < ۳۷
۸۸ ≤ Z ₅ < ۹۸	۱۴ ≤ P ₅ < ۲۸	۳۷ ≤ S ₅ < ۵۰
Z ₆ ≥ ۹۸	۲۸ ≤ P ₆ < ۷۷	S ₆ ≥ ۵۰
-	P ₇ ≥ ۷۷	-

۳- سیستم منطق فازی

۳-۱- منطق فازی برای ارزیابی شرایط عایق

روغن

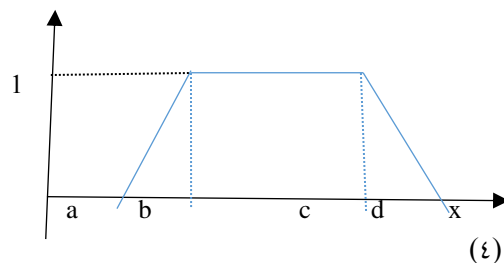
منطق فازی یک ابزار محاسباتی رایانه‌ای است که به طور کلی برای شبیه‌سازی دانش، تجربه و قضاوت خودکار استفاده می‌شود. بر همین اساس، می‌توان از منطق فازی به عنوان ابزاری دقیق و هوشمند برای شناسایی خودکار خطاهای داخلی ترانسفورماتورها استفاده کرد [۱۸]. منطق فازی نقشه‌برداری از یک فضای ورودی به یک فضای خروجی است و سازوکار برای انجام این کار فهرستی از دستورات «اگر - آنگاه» است که قواعد نامیده می‌شوند [۲۶]. ارزیابی مبتنی بر منطق فازی فرآیندی سه‌مرحله‌ای است که شامل فازی‌سازی، استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی می‌شود.

در این مقاله، از منطق فازی که بر اساس ترکیبی از پنج روش DGA (روش گاز کلیدی، روش نسبت دورنبرگ، روش نسبت راجرز، روش نسبت IEC و روش مثلث

دووال) توسعه داده شده است، برای شناسایی خطاهای داخلی ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود. بر اساس روش گاز کلیدی، با استفاده از نسبت بین CO و CO₂ با رویکرد منطق فازی، روشی برای تشخیص محل خطا در ترانسفورماتورها در بخش‌های بعدی ارائه شده است که در سایر مقاله‌ها، بحثی در رابطه با این روش مطرح نشده است. توابع عضویت دوزنقه‌ای در این مقاله برای پنج روش DGA با رویکرد منطق فازی، همان‌طور که در معادله (۴) آمده است، استفاده شده‌اند. یک سیستم مبتنی بر قاعده فازی IF-THEN برای هر ترانسفورماتور و هر روش تعریف شده است. سیستم استنتاج فازی ممدانی با از بین بردن ابهام برای فرق نداشتن نتایج استفاده شده است. در نهایت، روش غیرفازی‌سازی بر اساس محاسبه مرکز جرم طبق معادله (۵) استفاده شده است

در معادله (۵)، Z منحنی خروجی اعمال شده برای هر تابع عضویت دوزنقه‌ای است، $\mu(z)$ تابع عضویت فازی‌سازی است و Z^* خروجی غیرفازی است.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a < x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{d-x} & , c < x \leq d \\ 0 & , x > d \end{cases} \quad y$$



(۴)

$$Z^* = \frac{\int_Z \mu(z) Z dz}{\int_Z \mu(z) dz}$$

(۵)

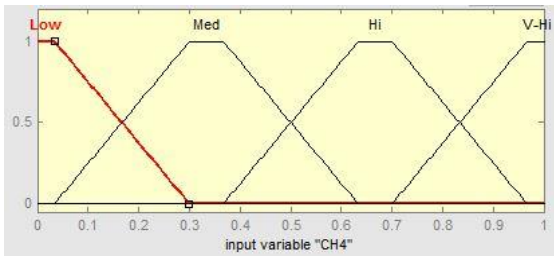
متناظر با آن در جدول (۱)، توابع عضویت منطق فازی در روش گاز کلیدی در شکل (۲) تعریف شده‌اند و بر اساس این توابع عضویت، خطا در این روش تشخیص داده می‌شود.

۴- نتایج و بحث‌ها

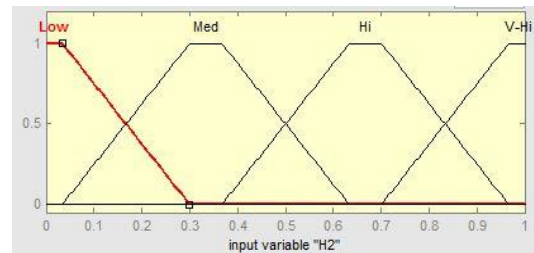
۴-۱- توابع عضویت منطق فازی در روش گاز

کلیدی

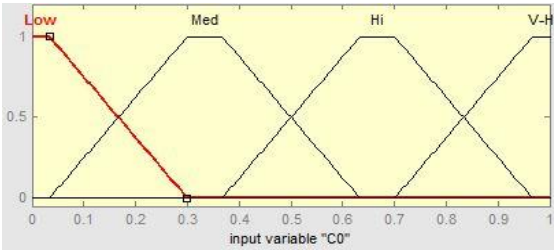
با استفاده از حدود گازهای کلیدی و شدت خطای



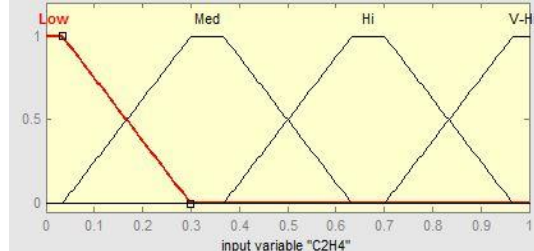
(ب)



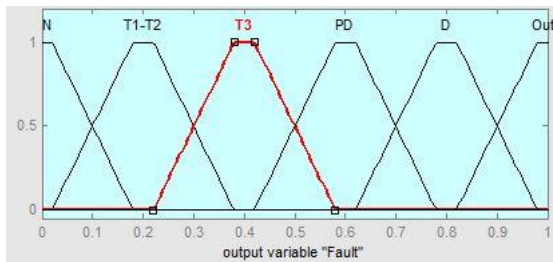
(الف)



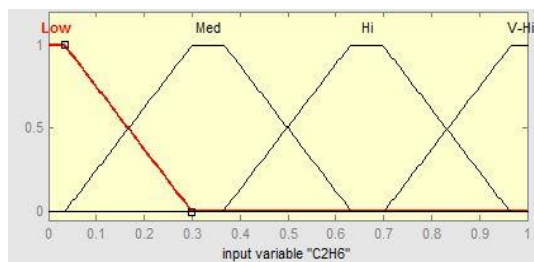
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل (۲): توابع عضویت روش گازهای کلیدی. توابع عضویت ورودی: الف) تابع عضویت گاز H_2 ، ب) تابع عضویت گاز CH_4 ، پ) تابع عضویت گاز C_2H_2 ، ت) تابع عضویت گاز CO ، ث) تابع عضویت گاز C_2H_6 و ج) تابع عضویت خروجی: خطا (Fault)

۲-۴- توابع عضویت منطق فازی در روش

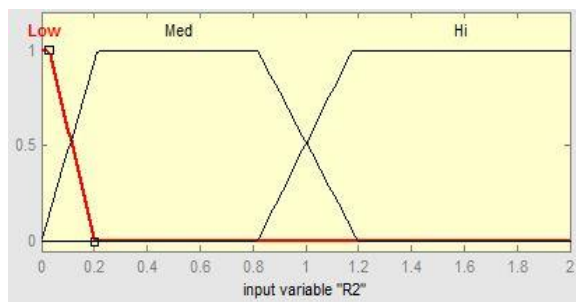
نسبت دورنبرگ

با استفاده از کدهای موجود در جدول (۴)، توابع عضویت منطق فازی در روش دورنبرگ تعریف شده‌اند که در شکل (۳) آورده شده‌اند. روش دورنبرگ بر اساس این توابع عضویت در منطق فازی، می‌تواند خطاهای حرارتی و الکتریکی را تشخیص دهد

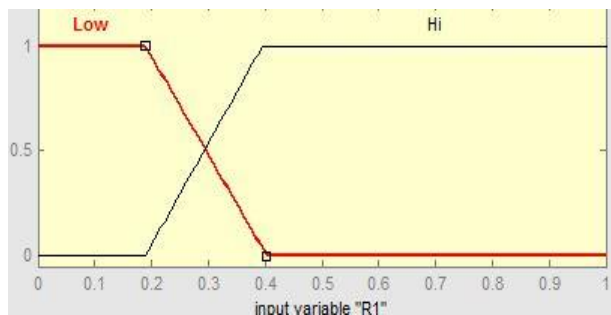
۳-۴- توابع عضویت منطق فازی در روش

نسبت IEC

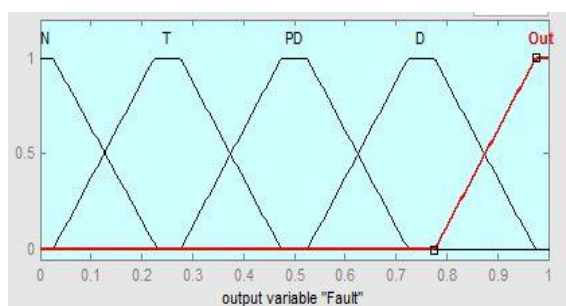
با استفاده از کدها و محدوده خطا در روش IEC در جدول (۷)، توابع عضویت منطق فازی این روش در شکل (۴) ارائه شده‌اند.



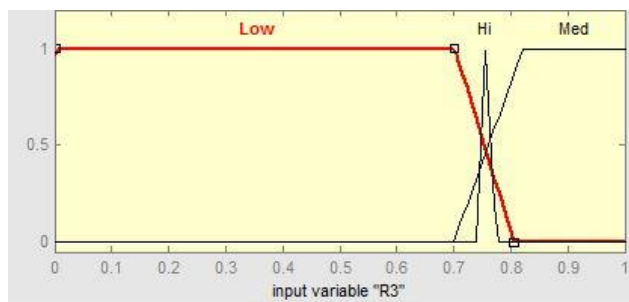
(ب)



(الف)

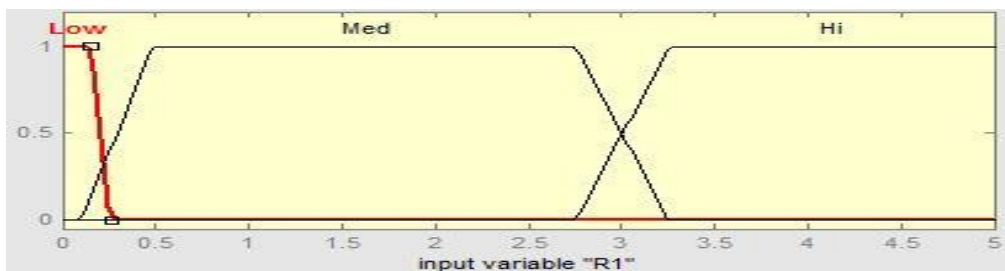


(ت)

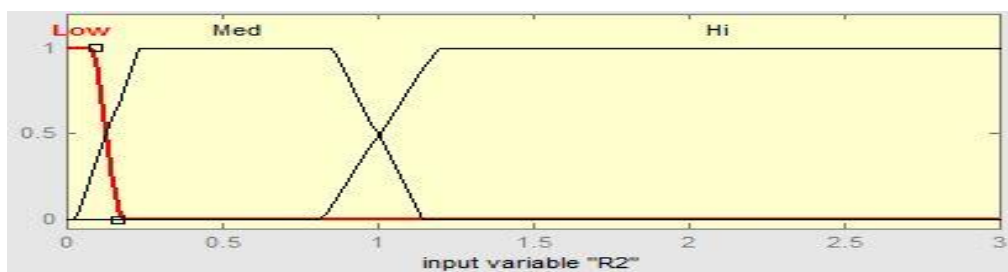


(پ)

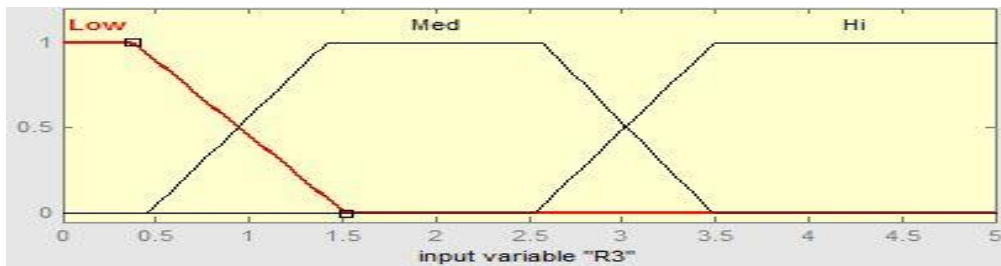
شکل (۳): توابع عضویت روش نسبت دورنبرگ. توابع ورودی: الف) تابع عضویت نسبت R_1 , ب) تابع عضویت نسبت R_2 , پ) تابع عضویت نسبت R_3 , ت) تابع عضویت خروجی: خطا (Fault)



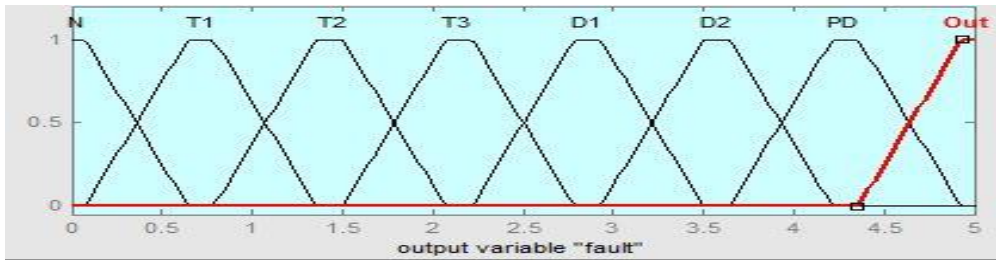
(الف)



(ب)



(ب)



(ث)

شکل (۴): (الف) و (ب) و (پ) توابع عضویت ورودی روش نسبت IEC. (ت) تابع عضویت خروجی (Fault)

۴-۴- توابع عضویت منطق فازی در روش

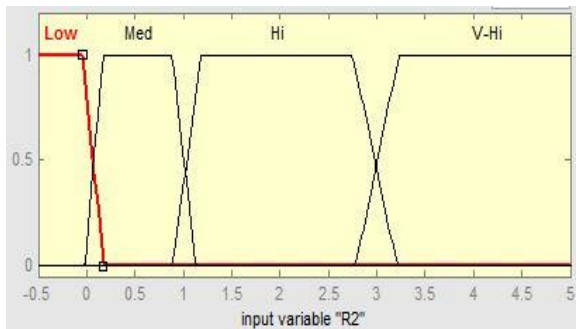
نسبت راجرز

با استفاده از کدها و محدوده خطا در روش IEC در جدول (۵)، توابع عضویت منطق فازی این روش در شکل (۵) ارائه شده‌اند و بر اساس این توابع عضویت، خطا در این روش تشخیص داده می‌شود.

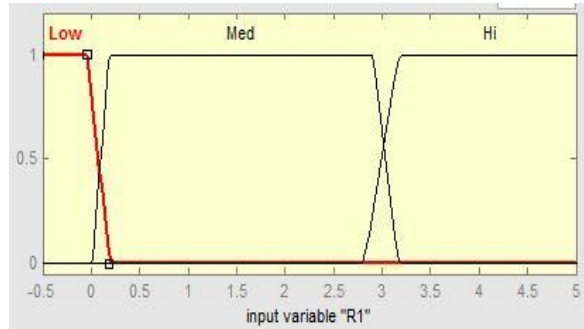
۴-۵- توابع عضویت منطق فازی در روش مثلث

دووال

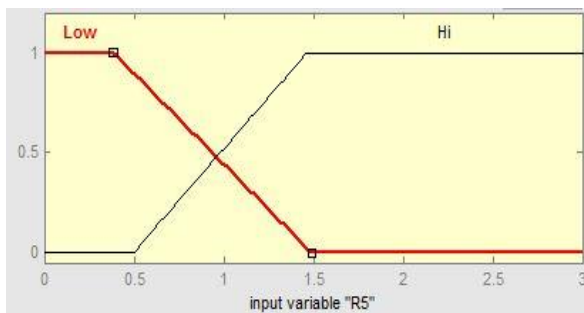
با استفاده از کدهای ورودی جدول (۱۰)، توابع عضویت روش مثلث دووال منطبق بر منطق فازی تعریف شده‌اند که در شکل (۶) آورده شده‌اند و بر اساس این توابع عضویت، خطا در این روش تشخیص داده می‌شود.



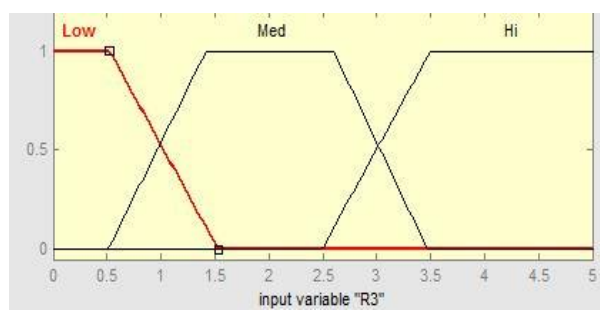
(ب)



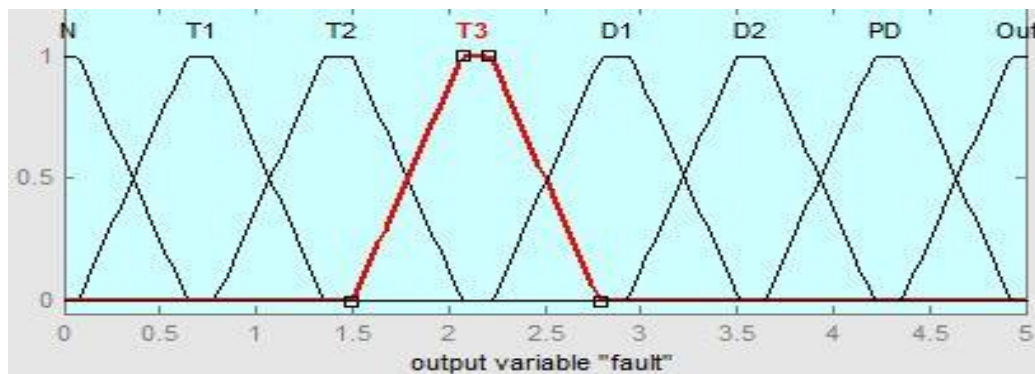
(الف)



(ت)

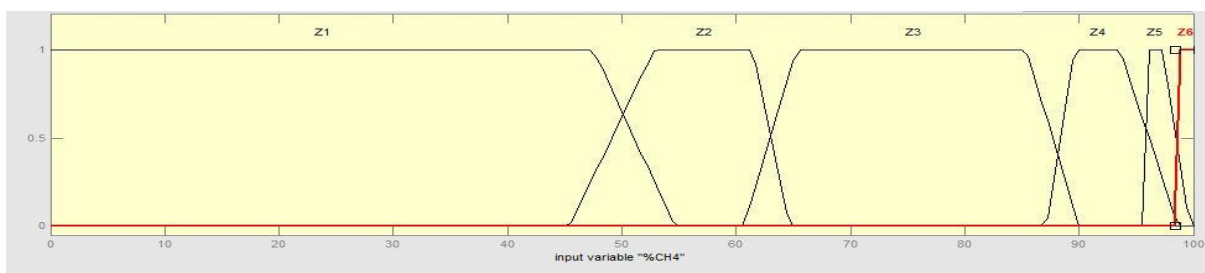


(پ)

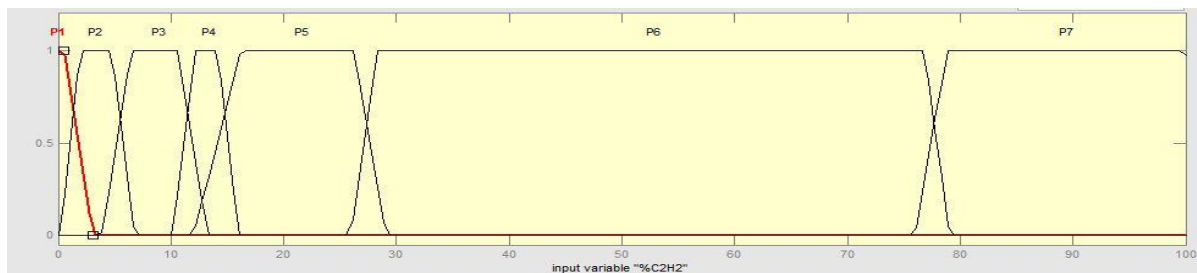


(ث)

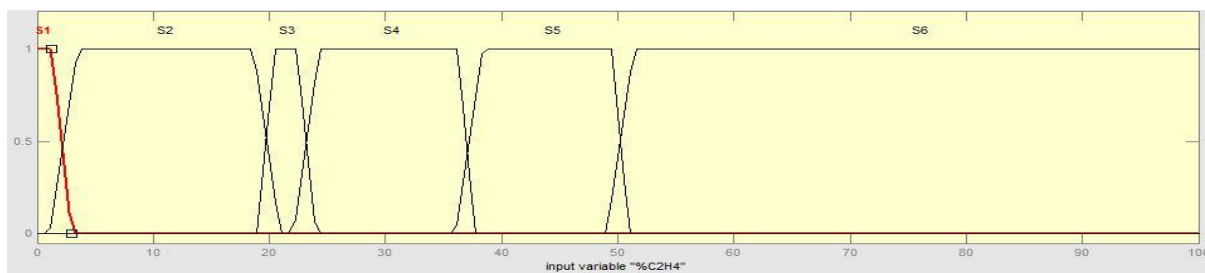
شکل (۵): توابع عضویت روش نسبت راجرز. توابع عضویت ورودی: (الف)، (ب)، (پ) و (ت)، (ث) تابع عضویت خروجی: خطا (Fault)



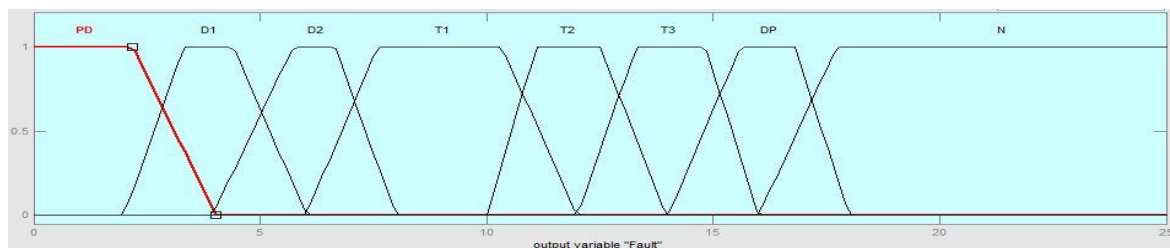
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

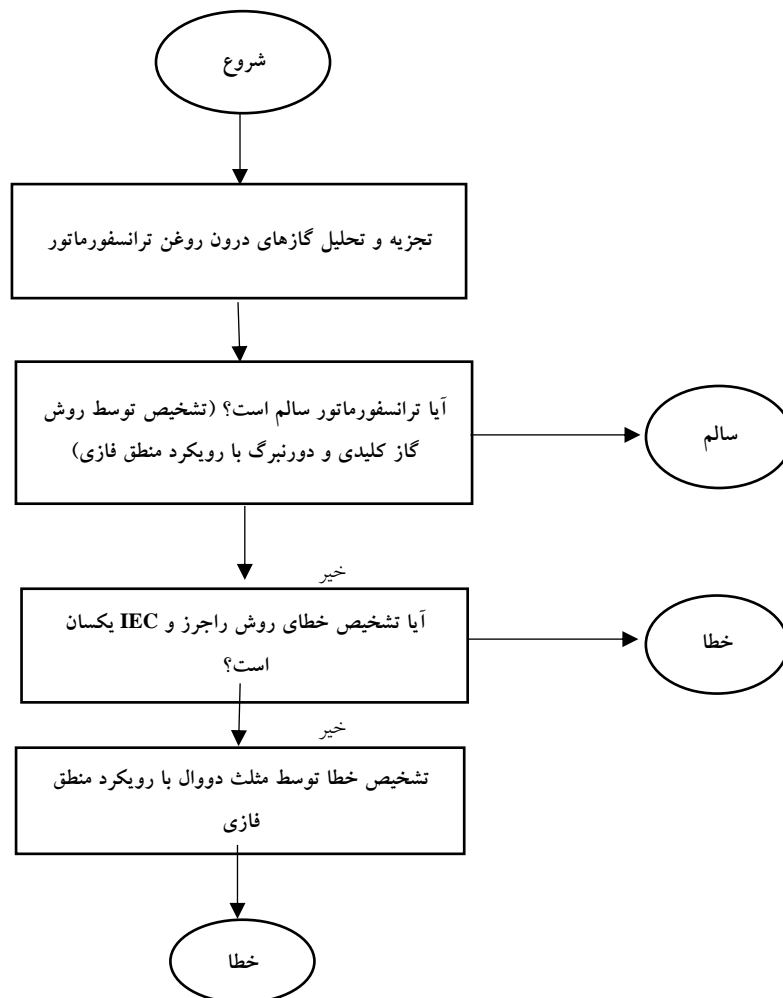
شکل (۶): توابع عضویت روش مثلث دووال. توابع عضویت ورودی: شکل‌های (الف) و (ب) و (پ) و (ت)، (ث) تابع عضویت خروجی: خطا (Fault)

۶-۴- نتایج و ارائه روش پیشنهادی برای تشخیص نوع خطا با رویکرد منطق فازی

در جدول (۱۱)، اطلاعات ۳۰ دستگاه ترانسفورماتوری ارائه شده است که برای تشخیص خطا در این مقاله بررسی شده‌اند. در ابتدا، با هر کدام از روش‌های ۵ گانه و بر اساس منطق فازی تشریح شده در بخش قبل، وضعیت خطا در این ۳۰ دستگاه ترانسفورماتور بررسی و نتایج در جدول‌های (۱۲) تا (۱۶) ارائه شده است.

در این مقاله، الگوریتمی جدید برای تشخیص خطا در ترانسفورماتور ارائه شده است. در این الگوریتم، از روش‌های گاز کلیدی و نسبت دورنبرگ با رویکرد منطق فازی گفته شده برای بررسی سالم یا معیوب بودن ترانسفورماتورها استفاده شده است. در صورت سالم

تشخیص داده شدن ترانسفورماتور توسط این دو روش با هم، ترانسفورماتور سالم تشخیص داده می‌شود و از سایر روش‌ها برای این ترانسفورماتورها استفاده نمی‌شود. اگر ترانسفورماتور معیوب تشخیص داده شود، روش‌های نسبت راجرز و روش IEC با رویکرد منطق فازی هم‌زمان بررسی می‌شوند. در بررسی هم‌زمان این دو روش، اگر خطایی یکسان تشخیص داده شد، خطای تشخیص داده شده خطای ترانسفورماتور است. اگر دو روش خطایی یکسان را تشخیص ندادند، در این صورت، به سراغ تشخیص خطای ترانسفورماتور در روش مثلث دووال با رویکرد منطق فازی می‌رویم. هر خطایی که تشخیص داده شد، خطای مدنظر ترانسفورماتور است. نمودار این الگوریتم در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۷): نمودار روش پیشنهادی با رویکرد منطق فازی برای تشخیص نوع خطا

جدول (۱۱): داده‌های ۳۰ ترانسفورماتور تحت بررسی برای تشخیص خطا

شماره	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
۱	۹	۳۰۲	۱۲۴	۶۵۱	۹
۲	۱۳	۱	۱	۳۷	۰
۳	۱۴۹	۲۸	۲۸	۲۱۱	۱۹۰
۴	۲	۰	۰	۰	۰
۵	۶۹۰	۵۰	۵۰	۴۹۴	۵۲۵
۶	۰	۰	۰	۴	۰
۷	۱۲۷	۱۳۷	۱۳۷	۱۰۷۷	۱۹
۸	۸۲	۱۹۶	۱۹۶	۴۰۱	۰
۹	۲	۰	۰	۳	۰
۱۰	۵۲۲	۸	۸	۲۳	۲۷
۱۱	۵	۲	۲	۴۶	۱
۱۲	۱۵۳	۷۲	۷۲	۲۰۲	۴
۱۳	۱۳۵	۸	۸	۷	۰
۱۴	۲۰۰	۷۰۰	۲۵۰	۷۴۰	۱
۱۵	۵۶	۶۱	۷۵	۳۲	۳۱
۱۶	۳۳	۲۶	۶	۵/۳	۰/۲
۱۷	۱۷۶	۲۰۵/۹	۴۷/۷	۷۵/۷	۶۸/۷
۱۸	۷۰/۴	۶۹/۵	۲۸/۹	۲۴۱/۲	۱۰/۴
۱۹	۳۴۵	۱۱۲/۲۵	۲۷/۵	۵۱/۵	۵۸/۷۵
۲۰	۱۷۲/۹	۳۳۴/۱	۱۷۲/۹	۸۱۲/۵	۳۷/۷
۲۱	۲۵۸۷/۲	۷/۸۸۲	۴/۷۰۴	۱/۴	۰
۲۲	۱۶۷۸	۶۵۲/۹	۸۰/۷	۱۰۰۵/۹	۴۱۹/۱
۲۳	۲۰۶	۱۹۸/۹	۷۴	۶۱۲/۷	۱۵/۱
۲۴	۱۸۰	۱۷۵	۷۵	۵۰	۴
۲۵	۱۰۶	۲۴	۴	۲۸	۳۷
۲۶	۱۸۰/۸۵	۰/۵۷۴	۰/۲۳۴	۰/۱۸۸	۰
۲۷	۲۷	۹۰	۲۴	۶۳	۰/۲
۲۸	۱۳۸/۸	۵۲/۲	۶/۷۷	۶۲/۸	۹/۵۵
۲۹	۱۲۳	۵	۳	۲	۰
۳۰	۱۷	۵۹	۹۱	۳	۰

جدول (۱۲): نتایج بررسی ترانسفورماتورها بر اساس منطق فازی در روش نسبت راجرز

شماره	R_1	R_2	R_3	R_5	خطا
۱	L	V	H	L	Out
۲	L	M	L	L	N
۳	M	L	H	L	D2
۴	L	M	L	L	N
۵	M	L	H	L	D2
۶	L	L	L	L	PD
۷	L	V	H	L	Out
۸	L	V	M	L	T1
۹	L	M	L	L	N
۱۰	M	M	M	L	Out
۱۱	L	M	H	L	T3
۱۲	L	M	M	L	T2
۱۳	L	L	L	L	PD
۱۴	L	V	M	L	T2
۱۵	M	H	L	H	T1
۱۶	L	M	L	L	N
۱۷	M	H	M	L	T1
۱۸	L	M	H	L	T1
۱۹	M	M	M	L	D1
۲۰	M	M	H	L	T3
۲۱	L	M	L	L	N
۲۲	M	M	H	L	D2
۲۳	L	M	H	L	T1
۲۴	L	M	L	L	N
۲۵	M	M	H	L	D2
۲۶	L	L	L	L	PD
۲۷	L	V	M	L	T2
۲۸	M	M	H	L	D2
۲۹	L	L	L	L	PD
۳۰	L	V	L	H	T1

جدول (۱۳): نتایج بررسی ترانسفورماتورها بر اساس منطق فازی در روش گاز کلیدی

شماره	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	خطا
۱	L	M	L	V	H	H	T1-T2
۲	L	L	L	L	L	L	N
۳	M	L	V	V	L	L	D
۴	L	L	L	L	L	L	N
۵	M	M	V	V	L	L	D
۶	L	L	L	L	L	L	N
۷	M	H	L	V	H	M	T3
۸	L	M	L	V	V	M	T1-T2
۹	L	L	L	L	L	L	N
۱۰	M	L	L	L	L	H	Out
۱۱	L	L	L	L	L	H	T1-T2
۱۲	M	M	L	V	M	L	T1-T2
۱۳	L	L	L	L	L	L	N
۱۴	M	H	L	V	V	L	T3
۱۵	L	L	L	L	M	M	Out
۱۶	L	L	L	L	L	L	N
۱۷	M	M	M	M	L	L	Out
۱۸	L	L	L	V	L	L	T3
۱۹	M	L	M	M	L	L	PD
۲۰	M	M	M	V	V	M	T3
۲۱	V	L	L	L	L	L	PD
۲۲	H	H	V	V	M	L	Out
۲۳	M	M	L	V	M	L	T3
۲۴	M	M	L	L	M	M	T1-T2
۲۵	M	L	M	L	L	L	Out
۲۶	M	L	L	L	L	M	Out
۲۷	L	L	L	M	L	L	Out
۲۸	M	L	L	L	L	L	Out
۲۹	M	L	L	L	L	M	T1-T2
۳۰	L	L	L	L	M	M	T1-T2

Very High = V , High = H , Med = M , Low = L *

جدول (۱۴): نتایج بررسی ترانسفورماتورها بر اساس منطق منطقی فازی در روش نسبت دورنبرگ

شماره	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	خطا
۱	L	H	M	H	T
۲	L	L	L	L	N
۳	H	M	M	L	D
۴	L	L	L	L	N
۵	H	M	M	L	D
۶	L	L	L	L	N
۷	L	H	M	H	T
۸	L	H	M	L	Out
۹	L	L	L	L	N
۱۰	H	L	M	L	Out
۱۱	L	H	M	H	T
۱۲	L	H	M	H	T
۱۳	L	L	L	L	N
۱۴	L	H	M	H	T
۱۵	H	H	L	H	Out
۱۶	L	M	M	H	Out
۱۷	H	H	M	H	Out
۱۸	L	M	M	H	Out
۱۹	H	M	M	H	Out
۲۰	L	H	M	H	T
۲۱	L	L	L	L	N
۲۲	H	M	M	L	D
۲۳	L	M	M	H	Out
۲۴	L	M	L	H	Out
۲۵	L	L	M	L	Out
۲۶	L	L	M	L	Out
۲۷	L	H	H	H	T
۲۸	L	M	M	H	Out
۲۹	L	L	L	H	PD
۳۰	L	H	L	H	T

تشخیص نوع و محل خطای ترانسفورماتور توسط تجزیه و تحلیل گاز محلول با استفاده از منطق فازی

جدول (۱۵): نتایج بررسی ترانسفورماتورها بر اساس منطق فازی در روش نسبت IEC

شماره	R ₁	R ₂	R ₃	خطا
۱	L	H	H	T3
۲	L	M	L	N
۳	M	L	L	D2
۴	L	M	L	N
۵	M	M	H	D2
۶	L	M	L	N
۷	L	H	H	T3
۸	L	L	M	T2
۹	L	M	L	N
۱۰	M	M	M	Out
۱۱	L	H	H	T3
۱۲	L	H	M	T2
۱۳	L	M	L	N
۱۴	L	H	M	T2
۱۵	M	H	L	D2
۱۶	L	M	L	N
۱۷	M	H	M	D2
۱۸	L	M	H	T1
۱۹	M	M	M	D1
۲۰	L	H	H	T3
۲۱	L	L	L	PD
۲۲	M	M	H	D1
۲۳	L	L	H	T1
۲۴	L	M	L	N
۲۵	M	M	H	D1
۲۶	L	L	L	PD
۲۷	L	H	M	T2
۲۸	M	M	H	D1
۲۹	L	L	L	PD
۳۰	L	H	L	T1

جدول (۱۶): نتایج بررسی ترانسفورماتورها بر اساس منطق فازی در روش مثلث دووال

شماره	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄	خطا
۱	S6	P1	Z1	T3
۲	S1	P1	Z1	N
۳	S5	P6	Z1	D2
۴	S1	P1	Z1	N
۵	S5	P6	Z1	D2
۶	S1	P1	Z1	N
۷	S5	P1	Z1	T3
۸	S5	P1	Z1	T3
۹	S1	P1	Z1	N
۱۰	S4	P5	Z2	D2
۱۱	S6	P2	Z1	T3
۱۲	S6	P1	Z1	T3
۱۳	S1	P1	Z1	N
۱۴	S6	P1	Z1	T3
۱۵	S4	P5	Z1	D2
۱۶	S1	P1	Z1	N
۱۷	S3	P5	Z2	D2
۱۸	S6	P2	Z1	T3
۱۹	S4	P5	Z2	D1
۲۰	S6	P2	Z1	T3
۲۱	S2	P1	Z4	T1
۲۲	S5	P5	Z1	DP
۲۳	S6	P2	Z1	T3
۲۴	S3	P2	Z1	T3
۲۵	S4	P6	Z1	D2
۲۶	S4	P1	Z3	T2
۲۷	S5	P1	Z2	T2
۲۸	S2	P3	Z1	T3
۲۹	S4	P1	Z3	T2
۳۰	S3	P1	Z5	T1

خطایی یکسان را تشخیص ندهند، به روشی تکمیلی نیاز است تا بتوان هم به نتیجه‌گیری نهایی درباره نوع خطا رسید و هم در صورت وجود خطاهای ترکیبی، آن‌ها را تشخیص داد؛ از این رو، از روش مثلث دووال با رویکرد منطق فازی به عنوان روش تکمیلی استفاده شده است.

روش پیشنهادی در این مقاله برای تشخیص خطا در ۳۰ ترانسفورماتور قدرت استفاده شده است. اطلاعات پنج گاز این ۳۰ دستگاه ترانسفورماتور در جدول (۱۱) ارائه شده است. نتایج تشخیص خطا با روش پیشنهادی در این مقاله و همچنین روش‌های دیگر در جدول (۱۷) ارائه شده است. ستون سمت راست جدول که با عنوان «واقعی» معرفی شده

روش گاز کلیدی و روش نسبت دورنبرگ با رویکرد منطق فازی بهترین روش‌ها برای تشخیص سالم و معیوب بودن ترانسفورماتورها هستند؛ ولی در تعیین نوع دقیق خطا دقت زیادی ندارند؛ از این رو، از این دو روش برای تعیین سالم یا معیوب بودن ترانسفورماتور استفاده شده است. از هر یک از این دو روش می‌توان به‌تنهایی استفاده کرد؛ ولی، در این مقاله، برای افزایش دقت در تشخیص سالم بودن ترانسفورماتور، هر دو روش با هم ملاک تصمیم‌گیری قرار گرفته‌اند. در ادامه، برای تشخیص نوع خطا در ترانسفورماتور، از دو روش نسبت راجرز و روش نسبت IEC استفاده شده است. در صورتی که این دو روش

هایلایت شده است بیانگر این هستند که خطا توسط آن روش درست تشخیص داده شده است و خانه های نارنجی که عبارت روی آن‌ها با رنگ قرمز هایلایت شده است بیانگر این هستند که خطا توسط آن روش اشتباه تشخیص داده شده است.

✓ در ردیف آخر جدول (۱۷)، مقدار دقت روش‌های مختلف درج شده است و همان‌طور که دیده می‌شود، روش پیشنهادی این مقاله با ۹۶/۷ درصد دارای بیشترین دقت در مقایسه با روش‌های پیشین است.

است، خطای واقعی آن ترانسفورماتور را بیان می‌کند.

نکاتی در رابطه با جدول (۱۷):

✓ در این جدول، خانه‌هایی که با رنگ آبی نشان داده شده‌اند تشخیص درست خطا را نشان می‌دهند.

✓ خانه های قرمز رنگ تشخیص اشتباه خطا یا خارج کد بودن را نشان می‌دهند.

✓ جفت‌خانه‌های نارنجی به تشخیص غیریکسان توسط روش راجرز و روش IEC مربوط می‌شوند.

✓ خانه‌های نارنجی که عبارت روی آن‌ها با رنگ آبی

جدول (۱۷): مقایسه‌ای بین میزان دقت تشخیص نوع خطا در روش پیشنهادی و سایر روش‌ها

شماره	گاز کلیدی	دورنبرگ	راجرز	IEC	دووال	پیشنهادی	واقعی
۱	T1-T2	T	!	T3	T3	T3	T3
۲	N	N	N	N	N	N	N
۳	D2	D	D2	D2	D2	D2	D2
۴	N	N	N	N	N	N	N
۵	D2	D	D2	D2	D2	D2	D2
۶	N	N	PD	N	N	N	N
۷	T3	T	!	T3	T3	T3	T3
۸	T1-T2	T	T1	T1	T3	T1	T1
۹	N	N	N	N	N	N	N
۱۰	-	-	-	-	D2	D2	D2
۱۱	T1-T2	T	T3	T3	T3	T3	T3
۱۲	T1-T2	T	T2	T2	T3	T2	T2
۱۳	N	N	PD	N	N	N	N
۱۴	T3	T	T2	T2	T3	T2	T2
۱۵	-	-	T1	D2	D2	D2	PD
۱۶	N	N	N	N	N	N	N
۱۷	-	-	T1	D2	D2	D2	D2
۱۸	T3	-	T1	T1	T3	T1	T1
۱۹	PD	-	D1	D1	D1	D1	D1
۲۰	T3	-	T3	T3	T3	T3	T3
۲۱	PD	-	PD	PD	DT	PD	PD
۲۲	-	D	D2	D2	D2	D2	D2
۲۳	T3	-	T1	T1	T3	T1	T1
۲۴	T1-T2	-	N	T1	T1	T1	T1
۲۵	-	D	D2	D2	D2	D2	D2
۲۶	-	-	PD	PD	T2	PD	PD
۲۷	-	T	T2	T2	T2	T2	T2
۲۸	-	-	D2	D2	D2	D2	D2
۲۹	T1-T2	PD	PD	PD	T2	PD	PD
۳۰	T1-T2	T	T1	T1	T1	T1	T1
درصد	۵۰	۵۶/۷	۷۳/۳	۹۳/۳	۷۳/۳	۹۶/۷	-

سلولزی تخریب شده است و باید مشکل آن را برطرف کرد)

۴-۷- نتایج و ارائه روش پیشنهادی برای تشخیص محل خطا با رویکرد منطق فازی

در حالت کلی، خطا در دو نقطه رخ می‌دهد: در کاغذ سلولزی و در روغن عایق ترانسفورماتور که به طور کلی، خطای در کاغذ جدی‌تر است؛ بنابراین، تخریب کاغذ ممکن است به اتصال کوتاه یا قوس الکتریکی شدید منجر شود. تخریب مواد سلولزی با تولید گازهای CO₂، CO و مقادیری بسیار کمتر از گازهای دیگر همراه است. از نسبت CO₂/CO به عنوان شاخص تجزیه کاغذ سلولزی استفاده می‌شود. کاهش این نسبت باعث تخریب درجه حرارت زیاد در سلولز می‌شود. اگر این نسبت کمتر از تقریباً ۳ یا بیشتر از تقریباً ۱۱ باشد، احتمال خطای مربوط به تخریب سلولز وجود دارد [۳۲]. این حالت که برگرفته از روش گازهای کلیدی است شامل سه وضعیت است که عبارت‌اند از:

– عادی: در این وضعیت، ترانسفورماتور حالت نرمال را دارد و خطایی وجود ندارد.

– خطر: در این وضعیت، ترانسفورماتور ممکن است دارای خطایی ویژه باشد که لازم است مرتباً کنترل شود (امکان تخریب کاغذ سلولزی وجود دارد و باید به طور مرتب سلامت کاغذ سلولز را چک کرد).

– بحرانی: در این وضعیت، ترانسفورماتور دارای خطایی ویژه است که باید سریعاً مشکل آن را برطرف کرد (کاغذ

جدول (۱۸): کد و دسته‌بندی قواعد فازی برای تشخیص محل خطا

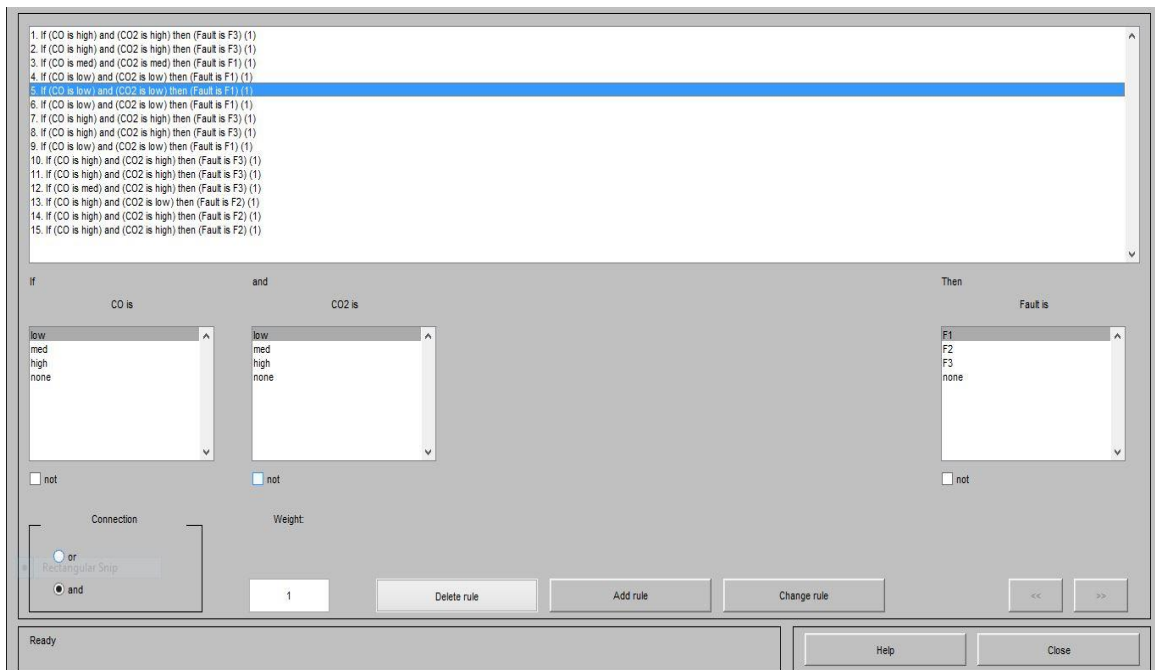
شماره	CO	CO ₂	حالت
۱	۰-۱	۰-۱	عادی
۲	۲	۰	هشدار
۳	۰	۲	
۴	۱	۲	بحرانی
۵	۲	۲	
۶	۲	۱	

۸-۴- توابع عضویت تشخیص محل خطا

با استفاده از جدول (۱۸)، توابع عضویت تشخیص محل خطا با رویکرد منطق فازی تعریف شده‌اند که در شکل (۸) آورده شده‌اند. با استفاده از توابع عضویت مربوط، محل تقریبی خطا تشخیص داده می‌شود.

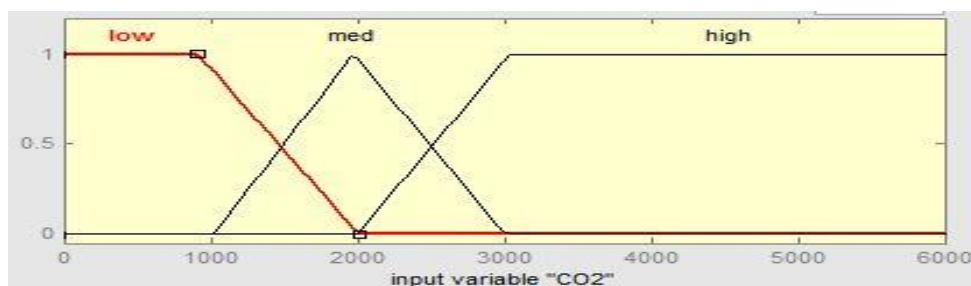
یک نمونه قاعده فازی برای روش پیشنهادی تشخیص محل خطا به قرار زیر (شکل ۹) است:

If (CO is high) and (CO2 is low) Then (Fault is F2)

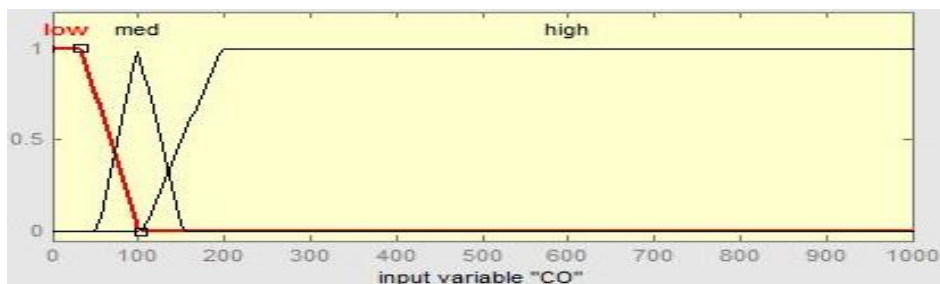


شکل (۹): قواعد فازی روش پیشنهادی تشخیص محل خطا

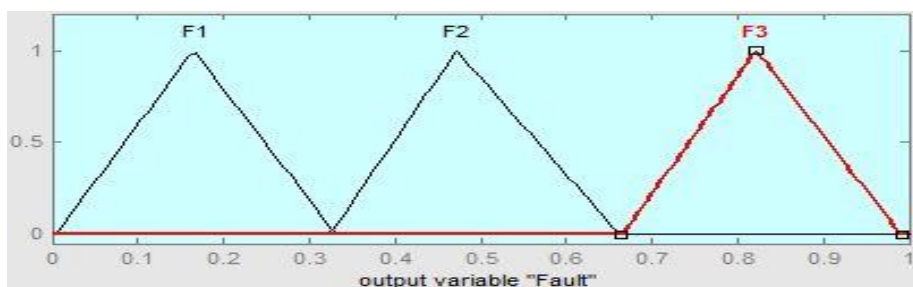
تشخیص نوع و محل خطای ترانسفورماتور توسط تجزیه و تحلیل گاز محلول با استفاده از منطق فازی



(الف)



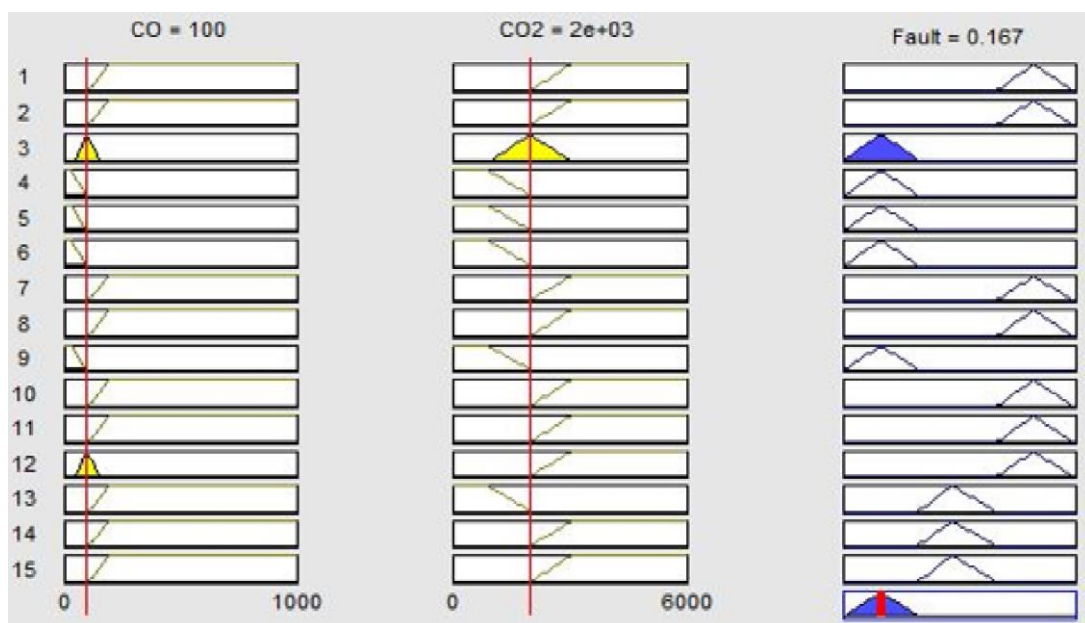
(ب)



(پ)

شکل (۸): توابع عضویت تشخیص محل خطا: الف) توابع عضویت ورودی مربوط به CO_2 . ب) توابع عضویت ورودی مربوط به CO

و پ) توابع عضویت خروجی



شکل (۱۰): نمایشگر قواعد فازی روش پیشنهادی تشخیص محل خطا

جدول (۱۸): بررسی جدیدترین مقاله‌های منطق فازی برای تشخیص نوع و محل خطا در ترانسفورماتور

شماره مرجع	گاز کلیدی	دورنبرگ	راجرز	IEC	دووال	محل خطا
۱۳	-	✓	✓	✓	-	-
۱۷	✓	-	-	-	-	-
۱۸	✓	-	-	✓	✓	-
۱۹	✓	-	-	-	✓	-
۲۰	-	-	✓	✓	-	-
۲۱	-	-	✓	✓	-	-
۲۲	-	-	-	✓	-	-
۲۳	-	-	✓	✓	-	-
۲۴	-	-	-	✓	-	-
۲۵	-	-	-	-	✓	-
۲۶	-	-	✓	✓	-	-
۲۷	-	-	-	✓	-	-
۲۸	✓	✓	-	-	-	-
۲۹	-	-	-	✓	-	✓
۳۰	✓	✓	-	-	✓	-
۳۱	✓	✓	✓	✓	✓	-
۳۲	-	-	-	-	-	✓
روش پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۵- نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل گازهای درون روغن (DGA) یکی از بهترین روش‌ها برای تشخیص زودهنگام عیوب ترانسفورماتور است. در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر منطق فازی و با استفاده از ۵ روش DGA (روش گاز کلیدی، روش نسبت دورنبرگ، روش نسبت راجرز، روش IEC و روش مثلث دووال) برای ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در ابتدا، سالم یا

معیوب بودن ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود. این مرحله بر اساس روش‌های گاز کلیدی و روش نسبت دورنبرگ با رویکرد منطق فازی انجام می‌شود. سپس، در صورت تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور در مرحله قبل، با استفاده از روش‌های راجرز و IEC، نوع خطا تشخیص داده می‌شود و اگر تشخیص خطا توسط این دو روش به نتیجه‌ای یکسان رسید، تشخیص نوع خطا خاتمه می‌یابد و اگر نتیجه حاصل از دو روش یادشده یکسان نبود،

- insulating fluids with defferent chemical compositions", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 21, No. 3, pp. 1071-1078, 2014.
- [7] N. A. Bakar, A. Abu-Saida, S. Islam, "A review of dissolved gas analysis measurment and interpretation techniques", IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 30, No. 3, pp. 39-49, 2014.
- [8] E. Dornenburg, W. Strittma, "Monitoring Oil-Cooled Transformers by Gas-Analysis", Brown Boveri Rev, Vol. 61, pp. 238-247, 1974.
- [9] R. Rogers, "IEEE and IEC codes to interpret incipient fault in transformers using gas in oil analysis", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 75, No. 5, pp. 49-354, 1978.
- [10] IEC Standards 60599, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in Service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis", 1999.
- [11] IEEE Std C57.104, "IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil- immersed transformers, 2019-06-13", IEEE, Vol. 2019. pp. 0-97.
- [12] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 18, No. 3, pp. 8-17, 2012.
- [13] Sh. A. Khan, Md. D. Eqbal, T. Islam, "A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 22, No. 1, pp. 590-596, 2015.
- [14] Z. Wang, Y. Liu, P. J. Griffin, "Neural net and expert system diagnose transformer faults", IEEE Comput. Appl. Power, Vol. 13, No. 1, pp. 50-55, 2000.
- [15] J. Faiz, M. Soleimani, "Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review", IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul, Vol. 24, No. 2, pp.1239-1248, 2017.
- [16] M. Grisar, "Basic principles of DGA-PartII learning, using and creating view on DGA", Transformer Magazine, Jun 2021 .
- [17] A. P. Khlebtsov, A. N. Shilin, A. V. Rybakov, A. Y. Klyucharev, "Development of a fuzzy expert system for power transformer diagnostics", J. Phys: Conf. ser 2091012064, 2021.
- [18] N. Poonnoy, C. Suwanasri, Th. Suwanasri, "Fuzzy logic approach to disoolved gas analysis for transformer failure index and fault identification", Energies, Vol. 1, No. 36, 2021.
- [19] W. Warid, "Detection of incipient faults in oil-immersed power transformers based on dissolved gas analysis: Case studies", IOP Conf. series: Material Science and Engineering, 1122, 2021.
- [20] F. Mohamad, Kh. Hosny, T. Barakat, "Incipient fault detection of electric power transformers using fuzzy logic based on ROGERS and IEC method", in Proceedings- ICCES2019, pp. 303-309.
- [21] S. Apte, R. Somalwar, A. Wajirabadkar, "Incipient fault diagnosis of transformer by DGA using fuzzy logic", IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- برای تشخیص نوع خطا از روش مثلث دووال با رویکرد منطق فازی استفاده می‌شود و نتیجه حاصل از این بررسی تعیین‌کننده نوع خطای ترانسفورماتور خواهد بود. این روش پیشنهادی دارای دقت تشخیص خطای ۹۶/۷ درصد است که در مقایسه با بهترین نتایج مقاله‌های پژوهشی قبلی مربوط به منطق فازی که در آن‌ها دقت تشخیص حدود ۹۵ درصد بود، دقت تشخیص را بهبود بخشیده است. در این مقاله، علاوه بر تشخیص نوع خطا، محل خطا با استفاده از نسبت CO_2/CO و روش گاز کلیدی با رویکرد منطق فازی بررسی و تشخیص داده شده است.
- از آنجا که برای داده‌های اولیه از نیروی انسانی استفاده می‌شود، احتمال دارد اعداد به‌دست‌آمده از گازها دارای خطا باشند که این یکی از محدودیت‌های روش پیشنهادی است. همچنین، هرگاه تعداد ترانسفورماتورهای تحت بررسی بسیار زیاد شود، امکان اشتباه هم افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا تعداد معادله‌ها افزایش پیدا می‌یابد و فضای کار پیچیده می‌شود. برای کاهش این محدودیت‌ها، می‌توان از روش‌های ترکیبی همچون شبکه فازی - عصبی یا ترکیب منطق فازی با الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک یا روش‌های یادگیری عمیق استفاده کرد

مراجع

- [1] A. Abu-Saida, S. Islam, "A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 19, No. 3, pp. 1007-1012, 2012.
- [2] Y. C. Huang, H. C. Sun, "Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 20, No. 3, pp. 974-981, 2013.
- [3] M. Yang, L. Hu, "Intelligent fault types diagnostic system for dissolved gas analysis of oil-immersed power transformer", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 20, No. 6, pp. 2317-2324, 2013.
- [4] T. K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 10, No. 5, pp. 903-917, 2003.
- [5] H. de Faria, J. G. S. Costa, J. L. M. Olivas, "A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis", Renew. Sustain. Energy. Rev, Vol. 46, pp. 201-209, 2015.
- [6] H. M. Wilhelm, C. C. Santos, G. B. Stocco, "Dissolved gas analysis(DGA) of natural ester

- transformer fuzzy logic and dissolved gas analysis method", IJECE, Vol. 12, No. 2, pp. 1139-1146, April 2022.
- [29] C. I. Nicola, M. C. Nitu, A. M. Aciu, "Fuzzy logic system based on dissolved gas analysis, Furan analysis for power transformer fault diagnosis, UPB Scientific Bulletin, Series: Electrical Engineering, Vol. 81, pp. 183-196. 2019.
- [30] E. Aburaghiega, M. E. Farrag, D. Hepburn, A. Haggag, "Enhancement of power transformer state of health diagnostics based on fuzzy logic system of DGA", IEEE, pp. 400-405, 2019.
- [31] 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 Electr. Insul, Vol. 28, No. 5, pp. 32-42, 2012.
- [32] D. Bhalla, R. K. Bansal, H. O. Gupta, "Transformer Incipient Fault Diagnosis Based on DGA using Fuzzy Logic", India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), 2011.
- [33] Sh. A. Wani, A. S. Rana, Sh. Sohail, O. Rahman, Sh. Parveen, Sh. A. Khan, "Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 149, October 2021, 111347.
- [22] O. M. Elmabrouk, F. A. Masoud, N. S. Abdelwanis, "Diagnosis of power transformer faults using fuzzy logic techniques based on IEC method", ICEMIS, Aug 2020.
- [23] A. Abu-Siada, S. Hmood, S. Islam, "A New Fuzzy Logic Approach for Consistent Interpretation of Dissolved Gas in- oil Analysis", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 20, No. 6, 2013.
- [24] S. Genc, S. Karagol, "Fuzzu logic application in DGA methods to classify fault type in power transformer", 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) ,49412.(2020).9152896
- [25] Th. U. Mawelela, A. F. Nnachi, A. O. Akumu, B. T. Abe, "Fault diagnosis of power transformers using Duval triangle", IEEE PES/IAS Power Africa, 2020.
- [26] R. L. Z. Pacori, J. H. A. Alcantara, "Identification of Internal failure in power transformers using fuzzy logic through the dissolved gas analysis in mineral insulating oil", IEEE Trans. Dielectr. Insul. 2020.
- [27] R. Dhadekar, S. Tarare, A. Meshram, Sh. Golhar, Y. Raut, "Condition Monitoring of Power Transformer using Fuzzy Logic in Matlab Software", IJRASET, Vol. 10, No. 5, May 2022.
- [28] V. M. Levin, A. A. Yahya, D. A. Boyarova "Predicting the technical condition of the power

¹ Central Electricity Generating Board

² No Detection

