ارائه یک سیستم ترکیبی جدید در تشخیص نوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت براساس مقادیر گازهای حل شده در روغن

امید قادری [۱] **محمدرضا فیضی** [۲]

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
omidghaderi@tabrizu.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
feyzi@tabrizu.ac.ir

چکیده: ترانسفورماتورهای قدرت یکی از تجهیزات مهم و پرهزینه در سیستم‌های قدرت هستند. تشخیص به‌موقع خطا در این تجهیزات یکی از زمینه‌های مهم و قابل بحث در علم مهندسی برق است. آنالیز گازهای حل شده در روغن یکی از تکنیک‌های مدرن در زمینه تشخیص خطا در این ترانسفورماتورها است. در همین رابطه، مهمترین روش‌های استفاده شده بر اساس آنالیز گازهای حل شده، شامل IEC، راجر (Roger)، Dornenburg و گازهای کلیدی است. در هر یک از این روش‌ها، نوع عیب موجود در ترانسفورماتور بر اساس نسبت گازها و یا مقادیر آن‌ها تشخیص داده می‌شود. محدود بودن رنج تشخیص و عدم تشخیص صحیح عیب موقع عبور از مقادیر آستانه در نسبت‌های تعریف شده، مهمترین عیب این روش‌ها به شمار می‌روند. با اعمال تکنیک‌های هوشمند، از جمله منطق فازی و شبکه‌های عصبی، می‌توان کارایی هر یک از روش‌های گفته شده را بهبود بخشید.

در این مقاله یک سیستم ترکیبی برای تشخیص عیب در ترانسفورماتورهای قدرت معرفی شده است. در این سیستم از ترکیب روش‌های راجر فازی، IEC فازی، و مقادیرآستانه گازها(فازی شده) در تشخیص نوع خطا استفاده می‌شود. همچنین، از الگوریتم سنجش فازی برای ترکیب نتایج حاصل شده از هر یک از روش‌های فوق استفاده می‌شود. در اعمال ۱۰۰ نمونه از مقادیر گازهای مربوط به ترانسفورماتورهای مختلف به سیستم مورد نظر، دقت این سیستم بالای ۹۸ درصد است و می‌تواند به‌عنوان روشی موثر در زمینه خطایابی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور قدرت، خطا، گازهای حل شده در روغن

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۷/۱۱/۱
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۹/۱۰/۱۹
نام نویسنده‌ی مسئول : امید قادری
نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.1- Spring & Summer 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

۱- – مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از تجهیزات حیاتی و مهم در یک سیستم قدرت به حساب می‌آیند. عمر طراحی شده و مورد انتظار این تجهیزات ۳۰-۲۵ سال است. امروزه در سراسر جهان ترانسفورماتورهای زیادی وجود دارند که در سال‌های آخر عمر طراحی شده خود و یا حتی بیشتر در حال سرویس دادن هستند و در معرض عیب و از کارافتادگی کلی قرار دارند. بنابراین، تشخیص وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت می‌تواند در افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت نقش تعیین کننده داشته باشد [۱].

آنالیز گازهای حل شده در روغن پرکاربردترین تکنیک در زمینه مونیتورینگ وضعیت در ترانسفورماتورهای قدرت است[۲و۳]. در این روش رابطه بین مقادیر گازهای تولیدی و نوع خطای ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می‌گیرد[۶-۴]. روش‌های راجر، Dornenburg، گازهای کلیدی، IEEE، IEC و مقادیر آستانه گازها از جمله روش‌های تحلیل بر اساس مقادیر گازها هستند. در طول سالیان متمادی هر یک از این روش‌ها بهبود پیدا کرده‌اند اما هیچکدام از آن‌ها هنوز به درستی و در تمام موارد قادر به تشخیص وضعیت داخلی ترانسفورماتورهای قدرت نیستند ولی ترکیب این روش‌ها در بالا بردن دقت کار مفید است[۹-۷].

در سال‌های اخیر تکنیک‌های هوشمند، از جمله سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی به صورت گسترده در تعیین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۱۲-۱۰]. نتایج حاصله از اعمال این تکنیک‌ها نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه در زمینه تشخیص است. از میان این روش‌ها منطق فازی به‌دلایلی، از قبیل سادگی و توانایی‌های بالقوه آن در تحلیل نتایج، دارای بیشترین کاربرد در این زمینه است[۱۷-۱۳].

در این مقاله یک سیستم ترکیبی جدید برای تشخیص نوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت معرفی می‌شود. در این سیستم از ترکیب روش‌های IEC فازی، راجر فازی و مقادیر آستانه فازی برای تشخیص خطا استفاده شده است. نتایج حاصله از روش‌های فوق به‌وسیله الگوریتم سنجش فازی[۱] ترکیب می‌شود[۱۸و۷]. اعمال نمونه‌های گرفته شده از ترانسفورماتورهای مختلف به‌سیستم مورد نظر نشان دهنده دقت بالای این سیستم است.

۲- تشخیص خطا در ترانسفورماتورهای قدرت براساس مقادیر گازهای حل شده در روغن

آنالیز گازهای حل شده در روغن پرکاربردترین تکنیک در زمینه مونیتورینگ و تشخیص وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت است. در این روش رابطه بین مقادیر گازهای تولیدی و نوع خطای ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این قسمت از میان روش‌های بکار گرفته شده در زمینه آنالیز گازهای حل شده در روغن، سه روش راجر، IEC و مقادیر آستانه گازها، که نسبت به سایر روش‌های موجود کاربردی‌تر و ساده‌ترند در این مقاله انتخاب شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- روش چهار نسبتی راجر

در روش راجر از چهار نسبت $R_1=\frac{CH_4}{H_2}$ ، $R_2=\frac{C_2H_6}{CH_4}$ و $R_3=\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ و $R_4=\frac{C_2H_2}{C_2H}$ به‌منظور تخمین نوع خطا و شرایط ترانسفورماتور استفاده شده است. هریک از این چهار نسبت با توجه به مقادیرشان کدهای صفر، ۱، ۲ و ۵ را اختیار خواهند کرد(جدول۱). ترکیبات مختلف این کدها نشان دهنده نوع خطا در ترانسفورماتور است. در این روش نوع خطای ترانسفورماتور به‌وسیله قوانین منطقی ساده قابل دست‌یابی بوده و به‌عنوان یک روش محاسباتی در خطایابی ترانسفورماتورهای قدرت قابل استفاده است. جدول۲ قوانین استفاده شده برای تعیین نوع خطا در این روش را نشان می‌دهد.

جدول(۱): کدهای تعریف شده برای هریک از نسبت‌های روش راجرز

$R_1=\frac{CH_4}{H_2}$	$R_1 \le ۰/۱$	۵
	$۰/۱ < R_1 < ۱$	۰
	$۱ \le R_1 < ۳$	۱
	$R_1 \ge ۳$	۲
$R_2=\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$R_2 < ۱$	۰
	$R_2 \ge ۱$	۱
$R_3=\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$R_3 < ۱$	۰
	$۱ \le R_3 < ۳$	۱
	$R_3 \ge ۳$	۲
$R_4=\frac{C_2H_2}{C_2H}$	$R_3 < ۰/۵$	۰
	$۰/۵ \le R_3 < ۳$	۱
	$R_3 \ge ۳$	۲

۲-۲- روش سه نسبتی IEC

در این روش از سه نسبت $R_1=\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ ، $R_2=\frac{CH_4}{H_2}$ ، $R_5=\frac{C_2H_4}{C_2H_5}$ به‌منظور خطایابی و تعیین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود. با توجه به‌مقادیر گازهای حل شده در روغن هر یک از نسبت‌های فوق مقادیر خاصی را اختیار خواهند کرد و با در نظر گرفتن این مقادیر می‌توان وضعیت ترانسفورماتور را طبق جدول۳ تخمین زد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

جدول(۲): تعیین شرایط ترانسفورماتور بر اساس کدهای تعریف شده در روش راجرز

تشخیص	کدها			
	R_4	R_3	R_2	R_1
نرمال	۰	۰	۰	۰
تخلیه جزئی	۰	۰	۰	۵
اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۱۵۰ درجه)	۰	۰	۰	۱و۲
اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۲۰۰-۱۵۰ درجه)	۰	۰	۱	۱و۲
اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۳۰۰-۲۰۰ درجه)	۰	۰	۱	۰
اضافه گرمای کلی	۰	۱	۰	۰
جریان گردشی در هادی‌ها	۰	۱	۰	۱
جریان گردشی در تانک وهسته	۰	۲	۰	۱
جرقه، بدون انتقال قدرت	۱	۰	۰	۰
قوس الکتریکی با انتقال قدرت	۱و۲	۱و۲	۰	۰
وجود قوس الکتریکی با انرژی پایین	۲	۲	۰	۰
دشارژجزئی با انرژی پایین	۱و۲	۰	۰	۵
دمای کاری ترانسفورماتور از حالت عادی بالاتر است	$\frac{CO_2}{CO}>۱۱$			

جدول(۳): تعیین نوع خطا با توجه به مقادیر سه نسبت R_5, R_2, R_1 در روش IEC

نوع خطا	$R_1=\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$R_2=\frac{CH_4}{H_2}$	$R_5=\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
تخلیه جزئی	خیلی کم	<۰/۲	<۰/۲
دشارژ با انرژی کم	>۱	۰/۱ -۰/۵	>۱
دشارژ با انرژی بالا	۰/۶ -۲/۵	۰/۱-۱	>۲
اضافه گرما با سطح پایین	<۰/۲	خیلی کم	<۱
اضافه گرما با سطح متوسط	<۰/۱	>۱	۱-۴
اضافه گرما با سطح بالا	<۰/۲	>۱	>۴

۳-۲- روش مقادیر آستانه گازها

در این روش مقادیر گازهای داخل روغن با مقادیر جدول۴ مقایسه شده و بر اساس آن نوع خطای ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود. این روش تقریبا شبیه روش گازهای کلیدی[۲] در تخمین وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتور است. در روش گازهای کلیدی محدوده خاصی برای مقادیر گازها وجود ندارد و به‌همین علت استفاده از آن در قالب یک برنامه کامپیوتری مشکل است.

جدول(۴): مقادیر آستانه گازهای حل شده در روغن برای تشخیص نوع خطا

نوع خطا	مقدار آستانه	گاز
دشارژجزئی	>۱۵۰۰	H_2
دشارژ با انرژی پایین	>۸۰	CH_4
دشارژ با انرژی بالا	>۷۰	C_2H_2
اضافه گرما سطح بالا	>۱۵۰	C_2H_4
اضافه گرما سطح پایین	>۳۵	C_2H_6
اضافه گرما شامل سلولز	>۱۰۰۰	CO
اضافه گرما شامل سلولز	>۱۰۰۰۰	CO_2

۳- سیستم مورد نظر

نمای کلی سیستم مورد نظر در شکل۱ آورده شده است. در این سیستم، در مرحله اول وجود هر گونه عیب و خطا با توجه به مقادیر گازهای داخل روغن توسط آشکار ساز خطا بررسی می‌شود و در صورت وجود خطا نوع آن توسط هر یک از روش‌های راجر فازی، IEC فازی و مقادیر آستانه فازی شده، تشخیص داده می‌شود. در مرحله آخر، نتایج حاصل از اعمال روش‌های فوق به‌وسیله الگوریتم سنجش فازی ترکیب شده و وضعیت کلی سیستم عایقی ترانسفورماتور مشخص می‌شود. در بخش زیر قسمت‌های سیستم مورد نظر بیشتر معرفی خواهند شد.

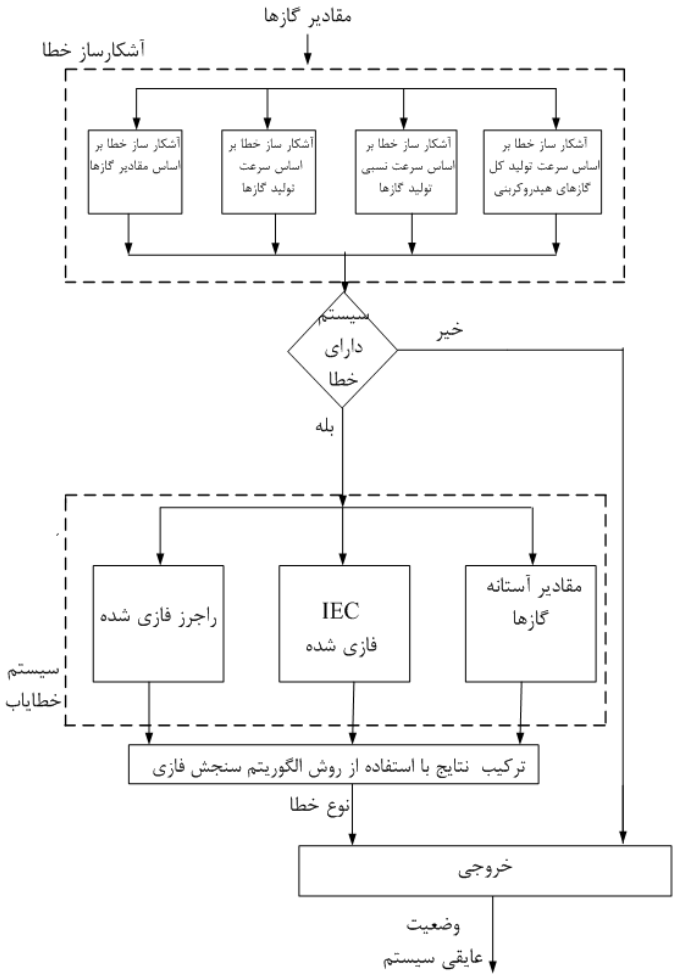
۳-۱- آشکار ساز خطا

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 شامل چهار آشکارساز کوچکتر است(شکل۱). در صورتی که هریک از آشکارسازهای نشان داده شده وجود عیب را تشخیص دهند ترانسفورماتور دارای وضعیت غیر عادی است و باید نوع خطای آن توسط سیستم خطایاب تعیین گردد.

۳-۱-۱- آشکارساز خطا بر اساس مقادیر گازها

این آشکارساز گازهای حل شده در روغن را که می‌تواند شامل H_2، CH_4، C_2H_2، C_2H_4، C_2H_6، COو CO_2 باشد با مقادیر جدول۵ مقایسه می‌کند. در صورتی‌که مقادیر هر یک از گازهای فوق از مقادیر داده شده در جدول۵ بیشتر باشد خروجی این آشکارساز وضعیت غیرعادی را در ترانسفورماتور نشان می‌دهد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.1- Spring & Summer 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]



شکل(۱): نمای کلی سیستم مورد نظر

۳-۱-۲- آشکارساز خطا براساس سرعت تولید گازها

در این آشکارساز سرعت تولید گازها برحسب $^{ppm}/_{day}$ محاسبه شده و با مقدار آستانه ۱۰ $^{ppm}/_{day}$ مقایسه می‌شود.

جدول (۵): مقادیر آستانه استفاده شده در آشکارساز خطا بر اساس مقادیر گازها

H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	TDGA
۴۰۰	۱۲۰	۳۵	۵۰	۶۵	۴۰۰	۴۰۰۰	۷۲۰

۳-۱-۳- آشکارساز خطا بر اساس سرعت نسبی تولید گازها

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

۳-۱-۴- 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 ۷۲۰ppm 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 بر حسب $^{ft^3}/_{day}$ محاسبه شده و با مقدار آستانه ۰/۱ $^{ft^3}/_{day}$ مقایسه می‌شود.

۳-۲- سیستم خطایاب

سیستم خطایاب موقعی فعال می‌شود که آشکارساز خطا وجود عیب یا خطا را در ترانسفورماتور تشخیص دهد. وظیفه اصلی سیستم خطایاب تعیین نوع خطای موجود در ترانسفورماتور است. در این سیستم پنج نوع خطای اصلی شامل تخلیه جزئی، تخلیه با انرژی پایین، تخلیه با انرژی بالا، اضافه دما با سطح پایین و اضافه دما با سطح بالا قابل تشخیص است.

در سیستم خطایاب از روش‌های راجر فازی شده، روشIEC فازی و روش مقادیر آستانه فازی شده برای تشخیص خطا استفاده می‌شود. این روش‌ها در واقع از اعمال منطق فازی به روش‌های راجر، IEC و مقادیر آستانه گازها حاصل می‌شوند[۱۰-۵]. چگونگی تشخیص توسط هر کدام از روش‌ها فوق در زیر به اختصار بیان می‌شود.

۳-۲-۱- راجر فازی

در بسیاری از حالات روش راجر قادر به تشخیص نوع خطا بر اساس مقادیر گازهای حل شده در روغن نیست. در روش راجر معمولی از عملگرهای and و or بر اساس کدهای جدول۱ در زمینه تشخیص خطا استفاده می‌شود(جدول۲) برای مثال برای تشخیص خطای تخلیه جزئی به صورت زیر عمل می‌شود.

$$f(1) = code_5(R_1)\,\text{AND}\,code_0(R_2)\,\text{AND}\,code_0(R_3)\,\text{AND}\,code_0(R_4) \quad (۱)$$

$f(1)$ دارای دو مقدار صفر(عدم وجود خطا) و یک(وجود خطا) است. در روش راجر معمولی، مقادیر آستانه دارای تغییرات آنی بین کدهای تعریف شده هستند که همین امر بزرگترین مشکل این روش در مقادیر نزدیک به آستانه کدها است. در اینجا کدهای ۰، ۱، ۲ و ۵ با مجموعه‌های فازی very low، low، medium وhigh جایگزین می‌شوند. بر این اساس، نسبت R_1 به‌وسیله بردار

$$[\mu_{verylow}(R_1)\,,\,\mu_{low}(R_1)\,,\,\mu_{medium}(R_1)\,,\,\mu_{high}(R_1)] \quad (۲)$$

و سایر نسبت‌ها به‌وسیله بردار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

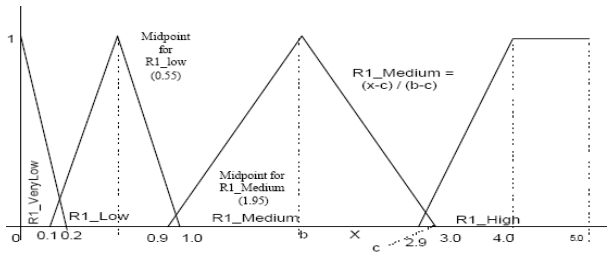
$$[\mu_{low}(R)\ ,\ \mu_{medium}(R)\ ,\ \mu_{high}(R)] \qquad (۳)$$

نشان داده خواهند شد که در آن‌ها μ_{high}، μ_{medium}، μ_{low} و $\mu_{verylow}$ به ترتیب توابع عضویت از مجموعه‌های فازی high، low، medium و very lowهستند. شکل۲ چگونگی فازی کردن کدهای مربوط به نسبت R_1 را نشان می‌دهد. جدول‌های ۶ الی ۹ چگونگی تبدیل مقادیر هر یک از نسبت‌های R_1، R_2، R_3 و R_4 به مقادیر فازی در مجموعه‌های فازی high، low، medium وvery low را نشان می‌دهند. در نهایت، طبق قواعد آورده شده در جدول۲ و جایگزینی عملگرهای and با min و or با max نوع خطای موجود در سیستم عایقی ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود. برای مثال قواعد اعمالی برای تشخیص تخلیه جزئی به صورت زیر خواهد بود:

$$F(1) = \min[\mu_{verylow}(R_1)\ ,\ \mu_{low}(R_2)\ ,\ \mu_{low}(R_3)\ ,\ \mu_{low}(R_4)] \qquad (۴)$$

جدول(۶): رنج مقادیر فازی شده در نسبت R_1

راجرز فازی شده			راجرز معمولی	
نقطه میانی	کد	رنج	کد	رنج
۰	R1_Very low	$R_1 < ۰/۲$	۵	$R_1 \geq ۰/۱$
۰/۵۵	R1_Low	$۰/۱ < R_1 < ۱$	۰	$۰/۱ < R_1 < ۱$
۱/۵۵	R1_Medium	$۰/۹ \leq R_1 < ۳$	۱	$۱ \leq R_1 < ۳$
۰	R1_High	$R_1 \geq ۲/۹$	۲	$R_1 \geq ۳$



شکل(۲): فازی کردن مقادیر نسبت R_1

۳-۲-۲- فازی IEC

در این حالت نیز از همان روش بکار رفته در روش راجر فازی استفاده می‌شود با این تفاوت که در اینجا از سه نسبت $R_1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$، $R_2 = \frac{CH_4}{H_2}$ و $R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_5}$ به‌منظور تعیین نوع خطا استفاده می‌شود. مجموعه‌های فازی استفاده شده شامل low، medium و high هستند. مقادیرهر سه نسبت مورد استفاده در این روش به‌وسیله بردار زیر نشان داده می‌شوند:

$$[\mu_{low}(R), \mu_{medium}(R), \mu_{high}(R)] \qquad (۵)$$

در این بردار، $\mu_{high}(R)$، $\mu_{medium}(R)$ و μ_{LOW} به‌ترتیب توابع عضویت از مجموعه‌های فازیhigh، medium، low هستند. شکل۳ توابع عضویت مورد استفاده برای نسبت R_1 را در این روش نشان می‌دهد. قواعد لازم برای تعیین نوع خطا دقیقا مانند روش راجر طبق جدول۳ اعمال خواهد شد. مثلاً، میزان احتمال وقوع خطای تخلیه جزئی طبق جدول۳ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F(1) = \min[\mu_{low}(R_1), \mu_{low}(R_2), \mu_{low}(R_5)] \qquad (۶)$$

محاسبه میزان احتمال وقوع خطا برای سایر خطاهای تعریف شده در روش IEC نیز به‌همین روش انجام می‌گیرد.

جدول(۷): رنج مقادیر فازی شده در نسبت R_2

راجرز فازی شده			راجرز معمولی	
نقطه میانی	کد	رنج	کد	رنج
۰	R2_ low	$R_2 < ۱$	صفر	$R_2 < ۱$
۰/۵۵	R2_High	$R_2 > ۰/۹$	۱	$R_2 > ۱$

جدول (۸): رنج مقادیر فازی شده در نسبت R_3

راجرز فازی شده			راجرز معمولی	
نقطه میانی	کد	رنج	کد	رنج
۰	R3_ low	$R_3 < ۱$	۰	$R_3 < ۱$
۱/۹۵	R3_Medium	$۰/۹ < R_3 < ۳$	۱	$۱ < R_3 < ۳$
۰	R3_High	$R_3 > ۲/۹$	۲	$R_3 \geq ۳$

جدول(۹): رنج مقادیر فازی شده در نسبت R_4

راجرز فازی شده			راجرز معمولی	
نقطه میانی	کد	رنج	کد	رنج
۰	R4_ low	۱>	صفر	$R_3 < ۰/۵$
۱/۷	R4_Medium	$۰/۴ \leq R_3 < ۳$	۱	$۰/۵ \leq R_3 < ۳$
۰	R4_High	$R_4 > ۲/۹$	۲	$R_3 \geq ۳$

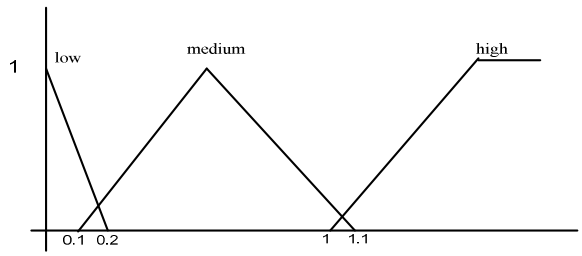
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.1- Spring & Summer 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

۳-۲-۳- روش مقادیر آستانه گازها(فازی شده)

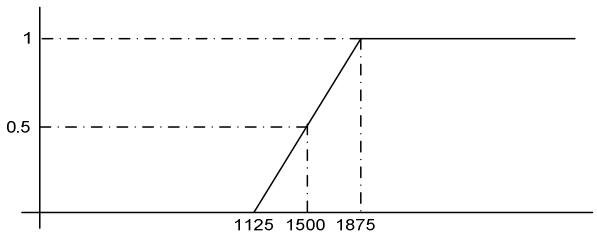
فازی کردن مقادیر گازها در این روش مشابه روش‌های قبلی است. جدول۱۰ مقادیر فازی شده گازها در مقادیر آستانه را نشان می‌دهد. تغییرات ۲۵ درصد در مقادیر آستانه هر یک از گارها برای فازی کردن اعمال شده است. شکل۴ چگونگی فازی کردن مقدار گاز هیدروژن را برای تعیین وجود خطا نشان می‌دهد. احتمال وجود یک خطای مشخص در مقادیر آستانه برابر ۰/۵ است. بدین صورت در هنگام برخورد با مقادیر آستانه، امکان اشتباه ناشی از انتخاب نادرست نوع خطا، به‌حداقل می‌رسد.. شکل۵ طرز محاسبه میزان احتمال خطای تخلیه جزئی را با توجه به مقدار گاز هیدروژن نشان می‌دهد. همین روش برای محاسبه سایر خطاها نیز قابل اعمال است.

جدول (۱۰): رنج تغییرات مقادیر آستانه فازی شده گازهای حل شده در روغن برای تشخیص نوع خطا

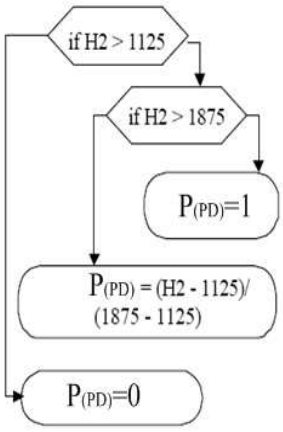
نوع خطا	مقدار آستانه فازی شده (ppm)	گاز
تخلیه جزئی	۱۱۲۵-۱۸۷۵	H_2
دشارژ با انرژی پایین	۶۰-۱۰۰	C_2H_4
دشارژ با انرژی بالا	۵۲/۵-۸۷/۵	C_2H_2
اضافه گرما با سطح بالا	۱۱۲/۵-۱۸۷/۵	C_2H_4
اضافه گرما با سطح پایین	۲۳/۲۵-۴۳/۷۵	C_2H_6



شکل(۳): توابع عضویت مربوط به نسبت R_1 (در روش IEC فازی)



شکل(۴): مقادیر فازی شده گاز هیدروژن



شکل(۵): طریقه محاسبه میزان احتمال وقوع تخلیه جزئی به‌وسیله روش مقادیر آستانه گازها(فازی شده)

۳-۳- ترکیب نتایج

در این قسمت نوع خطای ترانسفورماتور با توجه به میزان احتمال هر یک از خطاهای ممکن که به‌وسیله روش‌های راجر فازی، IEC فازی و مقادیر گازهای فازی شده محاسبه شده‌اند تعیین می‌شود. چگونگی ترکیب نتایج محاسبه شده توسط هر یک از روش‌های فوق به‌وسیله الگوریتم سنجش فازی نیز در این قسمت بیان شده است.

برای نشان دادن میزان احتمال هر یک از خطاهای تخلیه جزئی، تخلیه با انرژی پایین، تخلیه با انرژی بالا، اضافه دما با سطح کم و اضافه دما با سطح بالا، ماتریس E به‌عنوان خروجی سیستم خطایاب تعریف می‌شود. این ماتریس شامل سه بردار ستونی E_1 ، E_2 و E_3 ، به‌صورت زیر است:

$$E=[E_1,E_2,E_3] \qquad (۷)$$

در این ماتریس E_1 خروجی روش راجر فازی، E_2 خروجی روشIEC فازی و E_3 خروجی روش مقادیر گازها(فازی شده) است. هر یک از این بردارها میزان احتمال خطاهای آورده شده در قسمت قبل را نشان می‌دهند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} E_1&=[e_1^1,e_1^2,e_1^3,e_1^4,e_1^5]^{-1},\\ E_2&=[e_2^1,e_2^2,e_2^3,e_2^4,e_2^5]^{-1}\\ E_3&=[e_3^1,e_3^2,e_3^3,e_3^4,e_3^5]^{-1} \end{aligned} \qquad (۸)$$

در این بردارها e_i^j بیانگر احتمال خطای jام(PD، DL، DH، T1، T2) توسط روش iام(راجر، IEC ومقادیر گازها) است که در آن‌ها j=۱-۵ و i=۱-۳ است.

تابع m از مجموعه مرجع $A\in P(X)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &m:P(X)\to[0,1]\\ &m(\varphi)=0 \quad \text{شرط مرزی}\\ &\sum m(A)=1, A\in P(X) \end{aligned} \qquad (۹)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

تابع m نشان‌دهنده نگاشتی از مجموعه مرجع A به بازه بسته صفر و یک است. با استفاده از تعریف فوق ماتریس E را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$E=\begin{bmatrix} m_1^1 & m_2^1 & m_3^1 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 \\ m_1^3 & m_2^3 & m_3^3 \\ m_1^4 & m_2^4 & m_3^4 \\ m_1^5 & m_2^5 & m_3^5 \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

که در آن، ستون‌های اول، دوم و سوم این ماتریس به ترتیب بیانگر مقادیر نرمالیزه شده بردارهای E_1 و E_2 و E_3 طبق

جدول(۱۱): مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در تعیین نوع خطا

ردیف	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	IEC	راجرز	IEC فازی	مقادیر آستانه گازها	روش مورد نظر	خطای واقعی
۱	۶۰	۴۰	۶/۹	۱۱۰	۷۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۶۰	۴۹۰	۲۱۰	۶۳۰	۰	۵	–	۵	۱،۴،۵	۵	۵
۳	۳۸۰	۱۵۰	۸۷	۹۰۰	۳۵۰	–	–	۲	–	۲	۲
۴	۳۲۶	۱۲۰	۱۴	۱۸۰	۳۴۰	۲	۲	۱،۲	–	۲	۲
۵	۵۶۵	۵۳	۳۴	۴۷	۰	–	–	–	۱	۱،۲	۱
۶	۹۵	۱۱۰	۱۶۰	۵۰	۰	۴	–	۴	۲،۴	۴	۴
۷	۱۰۹	۴۹	۸۹	۶۱	۳۴۵	۲	–	–	۳،۴	۲	۲
۸	۲۰۰	۷۰۰	۲۵۰	۷۴۰	۱	۴،۵	–	۴،۵	–	۴،۵	۴،۵
۹	۲۰۰	۴۸	۱۴	۱۱۷	۱۳۱	۲،۳	۲	۲	–	۲	۲
۱۰	۹۸۰	۷۳	۳۴	۲۰	۰	–	۲	۲	۱،۲	۱،۲	۲

پس از ترکیب بردارهای E_1 و E_2، ماتریس E به یک ماتریس دو ستونی تبدیل می‌شود که ستون اول آن مربوط به بردار E_{12} و ستون دوم آن مقادیر نرمالیزه شده بردار E_1 و E_3 است. بردار جدید E_{12} و E_3 نیز به همان روش قبلی ترکیب شده و بردار E_{123} حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، بردار E_{123} ترکیب بردارهای E_1 و E_2 و E_3 است و به عنوان بردار خروجی و در بردارنده مقادیر نرمالیزه شده احتمال خطاهای ممکن در ترانسفورماتور معرفی می‌شود.

۴- نتایج

برای ارزیابی میزان موفقیت سیستم مورد نظر در زمینه تشخیص خطا، ۱۰۰ نمونه از مقادیر گازهای نمونه برداری شده از ترانسفورماتورهایی که عیب آن‌ها معلوم است، انتخاب شده و به‌این سیستم اعمال می‌شود.

علاوه بر آن، برای مقایسه میزان دقت سیستم مورد نظر با سایر روش‌های موجود، نوع خطای مربوط به این نمونه‌ها به‌وسیله روش‌های IEC، راجر، مقادیر آستانه گازها و IEC فازی تعیین می‌شود. نتایج مربوط به مقایسه عملکرد سیستم مورد نظر با سایر روش‌ها برای ۱۰ نمونه از مقادیر گازهای نمونه برداری شده از ترانسفورماتورهایی که عیب آن‌ها معلوم است، انتخاب شده و به‌این سیستم اعمال می‌شود.

در جدول۱۲ میزان دقت هریک از روش‌های فوق، در اعمال ۱۰۰ نمونه از مقادیر گازهای مربوط به‌ترانسفورماتورهای مختلف، آورده شده است. چنان‌که دیده می‌شود، صحت روش‌های راجر، IEC، IEC فازی و مقادیر آستانه گازها به‌ترتیب برابر ۴۶/۶۶، ۶۵، ۸۵/۴ و ۵۷ است در حالی که سیستم مورد نظر در ۹۸ درصد موارد نوع خطا را به درستی تشخیص داده است. بنابراین، میزان دقت سیستم مورد نظر نسبت به‌سایر روش‌ها به‌صورت چشم‌گیر بالاتر بوده ودر زمینه خطایابی می‌تواند بسیار موثر باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع سیستم ترکیبی جدید برای تخمین وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت معرفی شد. سیستم مورد نظر از ترکیب روش‌های IEC فازی، راجر فازی و مقادیر آستانه گازها(فازی شده)حاصل شده است. برای ترکیب کردن نتایج بدست آمده از روش‌های فازی، IECفازی و مقادیر آستانه(فازی) از الگوریتم سنجش فازی استفاده شده است. این روش توانسته است با استفاده از منطق فازی بر مشکلات موجود در روش‌های معمول، از قبیل عدم تصمیم‌گیری، تشخیص نادرست و عدم تشخیص در مواردی که

عبارت $m_i^j=\frac{e_h^j}{\sum e_i^j}$ هستند. مقادیر نرمالیزه شده بردارهای E_1 و E_2 به صورت زیر ترکیب می‌شوند:

$$m_{12}^k=\frac{m_1^i.m_2^j}{1-k_{12}},(i=j=k) \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$k_{12}=\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5}m_1^i.m_2^j,(i\neq j) \quad (۱۲)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.1- Spring & Summer 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

ترانسفورماتور بیش از یک نوع خطا داشته باشد، فایق آید. این سیستم علاوه بر اینکه مزیت‌های هر یک از روش‌های فازی استفاده شده در سیستم خطایاب را دارد دارای دقت بالاتری نیز نسبت به سایر روش‌ها است. همچنین استفاده از الگوریتم سنجش فازی در ترکیب نتایج تاثیر به سزایی در افزایش دقت این سیستم دارد. مزیت دیگر این سیستم سادگی آن برای پیاده‌سازی در قالب یک سیستم خبره-فازی، به صورت یک برنامه کامپیوتری است. نتایج بدست آمده حاکی از این است که دقت این سیستم نسبت به سایر روش‌های دیگر از قبیل راجر معمولی، IEC، IEC فازی و مقادیر آستانه گازها به صورت چشم‌گیری بالاتر است علاوه بر آن این روش توانسته است دقت روش‌های فازی معمولی(مانند IEC فازی) را بالا ببرد.

جدول۱۲. میزان دقت روش‌های مختلف در تعیین نوع خطا

روش	درستی٪	خطا ٪	بدون تشخیص٪
راجرز	۴۶/۶۶	۱۱	۴۲/۳۳
IEC	۶۵	۱۸	۱۷
IEC فازی	۸۵/۴	۱۱	۳/۶
مقادیر آستانه	۵۷	۳۱	۱۲
روش مورد نظر	۹۸	۲	۰

۶- مراجع

[1] H. H. Borsi, E. Gockenbach "Methods of Diagnosis of Power Transformer", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineering (IAEEE), vol. 1, no.1, Spring 2004.

[2] C E lin, J M ling. "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis," IEEE Trans on Power Delivery, vol.8, pp.231-238, Jun. 1993.

[2] Ming Lei. "handbook of power equipment diagnosis". Bejing: China Electric Power Press, pp.725-729, 2001.

[3] Tapan K. Saha "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.5, pp 903-917, October 2003.

[4] K. F. Thang, R. K. Aggarwal, and A. J. McGrail, "Analysis of power transformer dissolved gas data using the self-organizing map," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, No.4, pp. 1241–1248, Oct. 2003.

[5] Vladimiro Miranda, and Adriana Rosa Garcez 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 octubr 2005.

[6] 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.

[7] Diego Roberto Morais and Jacqueline Gisèle 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, April. 2006.

[8] Adriana Rosa Garcez Castro, , and Vladimiro Miranda, "Knowledge Discovery in Neural Networks With Application to Transformer Failure Diagnosis" IEEE Trans in power system, vol.20, No.2, pp 717-724 May 2005.

[9] 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

[10] Y Zhang, X Ding, Y Liu, P J Griffin. "An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis," IEEE Trans on Power Delivery, vol.1, pp.1836-1841, Oct. 1996.

[11] Z Wang, Y Liu, P J Griffin. "A Combined ANN and Expert System Tool for Transformer Fault Diagnosis," IEEE Trans on Power Delivery, vol.13, pp.1224-1229, Oct. 1998.

[12] Q Su. "A Fuzzy Logic Tool For Transformer Fault Diagnosis," IEEE Trans on Power System, vol.1, pp.265-268, Feb. 2000.

[13] J J Dukarm. "Transformer Oil Diagnosis Using Fuzzy Logic And Neural Network," in Proc. IEEE Canadian Conf, pp.329-332.May 1993

[14] K Tomsovic. "A Fuzzy Information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic Methods," IEEE Trans on Power Delivery, vol.8, pp.1638-1643, July 1993.

[15] Y C Huang, H T Yang, C L Huang. "Developing A New Transformer Diagnosis System Through Evolutionary Fuzzy Logic," IEEE Trans on Power Delivery, vol.12, pp.761-767, Apr1997.

[16] Q Su, C Mi, L L Lai. "A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for The Diagnosis of Multiple Incipient Faults in A Transformer," IEEE Trans on Power System, vol.15, No.2, pp. 593-598, May 2000

[17] Timothy J.Ross "Fuzzy Logic With Engineering Applications" McGraw-Hill, Inc, pp 556-580, 1997.

[1] Fuzzy measure

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]

A New Combined Technique for Fault Diagnosis of Power Transformers Based on Dissolved Gases

O. Ghaderi[1] M.R. Feyzi[2]

1- Msc, Electrical and Computer Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, Iran
omidghaderi@tabrizu.ac.ir

1- Associated Professor, Electrical and Computer Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, Iran
feyzi@tabrizu.ac.ir

Abstract:

Transformers are one of the important and at the same time expensive components of power systems. On timely diagnosis of fault in such systems is still among the researchers interest. Fault diagnosis of transformers based on the dissolved gas analysis is a new technique in the field of fault diagnosis of power transformers. IEC, Roger's and Dornenburg techniques are the mostly used techniques. However, each have a limited range for diagnosis and may fail a correct diagnosis when the amount of dissolve gases are close to the predefined margins. This problem can be solved by using intelligent techniques such as Fuzzy logics or neural networks. In this paper, a combined technique is proposed for the fault diagnosis of power transformers. It employs a combination of fuzzy Roger's, fuzzy IEC, and fuzzified dissolved gas thresholds for the fault diagnosis. The proposed technique is applied on some transformers with a sum of over 100 available data on their conditions and showed an accuracy of over 98%.

Keywords: Fault Diagnosis, Dissolved Gases, Transformers

Submission date: 20 Jan., 2009

Acceptance date: 9 Jan., 2011

Corresponding author: Omid Ghaderi

Corresponding author's address: Electrical and Computer Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, Iran

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-09]