

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

محمد رضا فیضی<sup>۲</sup>

امید قادری<sup>۱</sup>

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران  
[omidghaderi@tabrizu.ac.ir](mailto:omidghaderi@tabrizu.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران  
[feyzi@tabrizu.ac.ir](mailto:feyzi@tabrizu.ac.ir)

**چکیده:** ترانسفورماتورهای قدرت یکی از تجهیزات مهم و پرهزینه در سیستم‌های قدرت هستند. تشخیص به موقع 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 مقادیر آستانه گازهای (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 به عنوان روشی موثر در زمینه خطا یابی 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

## ۱- مقدمه

مقدادیر آستانه گازها، که نسبت به سایر روش‌های موجود کاربردی‌تر و ساده‌ترند در این مقاله انتخاب شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۲- روش چهار نسبتی راجر

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

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

#### راجرز

$R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$	$R_1 \leq 0 / 1$	۵
	$0 / 1 < R_1 < 1$	.
	$1 \leq R_1 < 3$	۱
	$R_1 \geq 3$	۲
$R_2 = \frac{C_2H_6}{CH_4}$	$R_2 < 1$	.
	$R_2 \geq 1$	۱
$R_3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$R_3 < 1$	.
	$1 \leq R_3 < 3$	۱
	$R_3 \geq 3$	۲
$R_4 = \frac{C_2H_2}{C_2H}$	$R_4 < 0 / 5$	.
	$0 / 5 \leq R_4 < 3$	۱
	$R_4 \geq 3$	۲

### ۲- روش سه نسبتی IEC

در این روش از سه نسبت  $R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_5}$ ،  $R_2 = \frac{CH_4}{H_2}$ ،  $R_1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$  به منظور خطایابی و تعیین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌شود. با توجه به مقدادیر گازهای حل شده در روغن هر یک از نسبت‌های فوق مقدادیر خاصی را اختیار خواهد کرد و با در نظر گرفتن این مقدادیر می‌توان وضعیت ترانسفورماتور را طبق جدول ۳ تخمین زد.

ترانسفورماتورهای قدرت از تجهیزات حیاتی و مهم در یک سیستم قدرت به حساب می‌آیند. عمر طراحی شده و مورد انتظار این تجهیزات ۰-۳۵ 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 مقدادیر گازهای تولیدی و نوع خطای ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می‌گیرد [۴-۶]. روش‌های راجر، Dornenburg کلیدی، IEEE و مقدادیر آستانه گازها از جمله روش‌های تحلیل بر اساس مقدادیر گازها هستند. در طول سالیان متعددی هر یک از این روش‌ها بهبود پیدا کرده‌اند اما هیچکدام از آن‌ها نهونز 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 [۷-۹]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های هوشمند، از جمله سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی به صورت گسترش در تعیین وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۲]. 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 [۱۳-۱۷].

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 مقدادیر آستانه فازی برای تشخیص خطا استفاده شده است. نتایج حاصله از روش‌های فوق به وسیله الگوریتم سنجش فازی<sup>۱</sup> ترکیب می‌شود [۱۸و۱۹]. اعمال نمونه‌های گرفته شده از ترانسفورماتورهای مختلف به سیستم مورد نظر نشان دهنده دقت بالای این سیستم است.

## ۲- تشخیص خطا در ترانسفورماتورهای قدرت براساس مقدادیر 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 مقدادیر 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

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

## تشخیص نوع خطا

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

## ۳- سیستم مورد نظر

نمای کلی سیستم مورد نظر در شکل ۱ 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 به وسیله الگوریتم سنجش فازی ترکیب شده و وضعیت کلی سیستم عایقی ترانسفورماتور مشخص می‌شود. در بخش زیر قسمت‌های سیستم مورد نظر بیشتر معرفی خواهد 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(شکل ۱). 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 خطاگذاری تعیین گردد.

## ۳-۱-۱- آشکار ساز خطا بر اساس مقادیر گازها

این آشکارساز گازهای حل شده در روغن را که می‌تواند شامل  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$  و  $CO_2$  باشد با مقادیر جدول ۵ مقایسه می‌کند. در صورتی که مقادیر هر یک از گازهای فوق از مقادیر داده شده در جدول ۵ بیشتر باشد خروجی این آشکارساز وضعیت غیرعادی را در ترانسفورماتور نشان می‌دهد.

جدول(۲): تعیین شرایط ترانسفورماتور بر اساس کدهای تعريف

## شده در روش راجرز

کدها				تشخیص
$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
.	.	.	.	نرمال
۵	.	.	.	تخلیه جزئی
۲۱	.	.	.	اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۱۵۰ درجه)
۲۱	۱	.	.	اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۱۵۰-۲۰۰ درجه)
.	۱	.	.	اضافه گرما با سطح پایین (زیر ۲۰۰-۳۰۰ درجه)
.	۰	۱	۰	اضافه گرمای کلی
۱	۰	۱	۰	جریان گردشی در هادیها
۱	۰	۲	۰	جریان گردشی در تانک و هسته
.	۰	۰	۱	جرقه، بدون انتقال قدرت
.	۰	۲۱	۲۱	وجود قوس الکتریکی با انرژی پایین
.	۰	۲	۲	دشارژ جزئی با انرژی پایین
۵	۰	۰	۲۱	دمای کاری ترانسفورماتور از حالت عادی بالاتر است
$\frac{CO_2}{CO} > 11$				

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

## روش IEC

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

## ۲- روش مقادیر آستانه گازها

در این روش مقادیر گازهای داخل روغن با مقادیر جدول ۴ مقایسه شده و بر اساس آن نوع خطا ترانسفورماتور تشخیص داده می‌شود. این روش تقریباً شبیه روش گازهای کلیدی [۲] در تخمین وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتور است. در روش گازهای کلیدی محدوده خاصی برای مقادیر گازها وجود ندارد و بهمین علت استفاده از آن در قالب یک برنامه کامپیوتری مشکل است.



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 ۷۲۰ ppm مقایسه می‌شود. در صورتی که مقدار کل گازها بیش از مقدار فوق باشد نشانه وجود خطا است. علاوه بر این، سرعت تولید کل گازهای حل شده در روغن بر حسب  $\text{ft}^3/\text{day}$  محاسبه شده و با مقدار آستانه  $1/\text{ft}^3/\text{day}$  مقایسه می‌شود.

۲-۳ - سیستم خطایاب

سیستم خطایاب موقعی فعال می‌شود که آشکارساز خطأ وجود عیب یا خطأ 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، روش IEC 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 [۵-۱۰]. چگونگی تشخیص توسط هر کدام از روش‌ها فوق در زیر به اختصار بیان می‌شود.

۳-۲-۱- داچ فازی

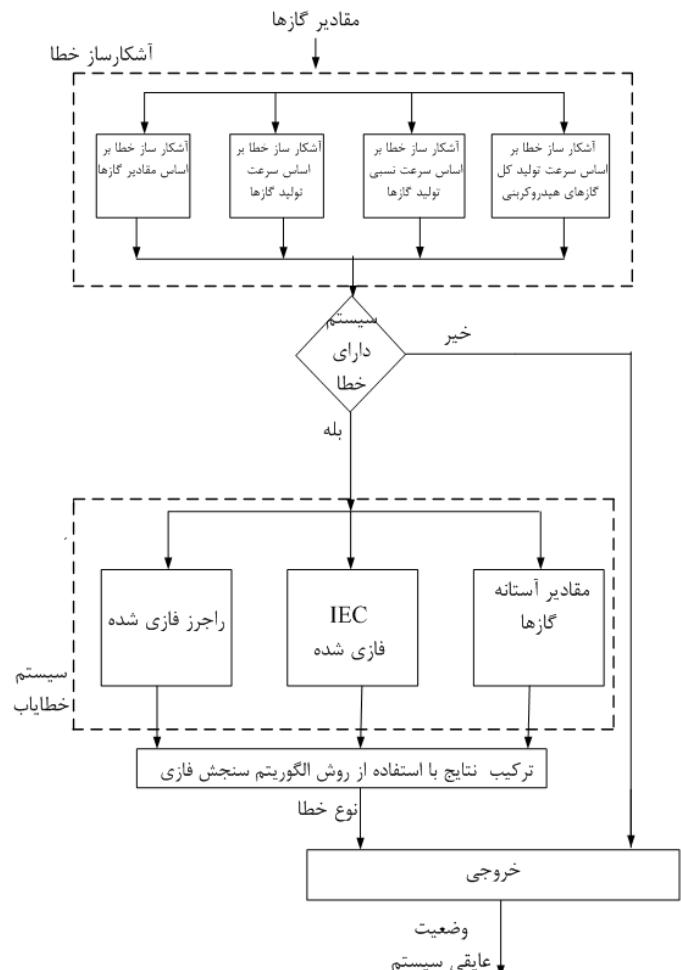
در بسیاری از حالات روش راجر قادر به تشخیص نوع خطا بر اساس مقادیر گاهاشی حل شده در روغن نیست. در روش راجر معمولی از عملگرهای and و or بر اساس کدهای جدول ۱ در زمینه تشخیص خطا استفاده می‌شود(جدول ۲) برای مثال برای تشخیص خطای تخلیه جزئی به صورت زیر عمل می‌شود.

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

(1) f دارای دو مقدار صفر(عدم وجود خطأ) و یک(وجود خطأ) 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 low، very low، medium و high جایگزین شوند. این اساساً نسبت  $R$  به مسلله بدل.

$$[\mu_{\text{...},l}(R_1), \mu_{l,\text{...}}(R_1), \mu_{\text{...},l,\text{...}}(R_1), \mu_{l,\text{...},l}(R_1)] \quad (5)$$

و سایر نسبت‌ها به وسیله پرداز



### شکل(۱): نمای کلی سیستم مورد نظر

### ۳-۱-۲- آشکار ساز خطاب اساس، سرعت تولید گازها

در این آشکارساز سرعت تولید گازها بر حسب ppm/day محاسبه شده و با مقدار آستانه ۱۰ ppm/day مقایسه می‌شود.

حدو، (۵): مقادیر آستانه استفاده شده در آشکارساز خطاب 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	۴۰۰	۷۲۰

۳-۱-۳- آشکارساز خطاب بر اساس سرعت نسبی تولید

در این آشکارساز سرعت نسبی گازها بر حسب درصد محاسبه شده و با مقدار آستانه ۱۰ د.صد.د. ماه مقابله م شود.

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

$$[\mu_{low}(R), \mu_{medium}(R), \mu_{high}(R)] \quad (5)$$

در این بردار،  $(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)$  به ترتیب توابع عضویت از مجموعه‌های فازی  $very low$ ,  $low$ ,  $medium$ ,  $high$  و  $very high$  هستند. شکل ۳ تابع عضویت مورد استفاده برای نسبت  $R_1$  را در این روش نشان می‌دهد. قواعد لازم برای تعیین نوع خطا دقیقاً مانند روش راجر طبق جدول ۳ اعمال خواهد شد. مثلاً، میزان احتمال وقوع خطای تخلیه جزئی طبق جدول ۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F(1) = \min[\mu_{low}(R_1), \mu_{low}(R_2), \mu_{low}(R_5)] \quad (6)$$

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

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

راجرز معمولی		راجرز فازی شده		
رنج	کد	رنج	کد	نقطه میانی
$R_2 < 1$	صفرا	$R_2 < 1$	R2_low	.
$R_2 > 1$	۱	$R_2 > 0/9$	R2_High	۰/۵۵

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

راجرز معمولی		راجرز فازی شده		
رنج	کد	رنج	کد	نقطه میانی
$R_3 < 1$	.	$R_3 < 1$	R3_low	.
$1 < R_3 < 3$	۱	$0/9 < R_3 < 3$	R3_Medium	۱/۹۵
$R_3 \geq 3$	۲	$R_3 > 2/9$	R3_High	.

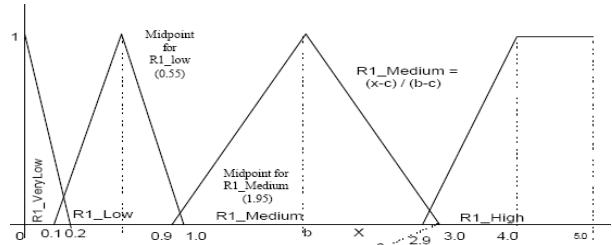
جدول (۹): رنج مقادیر فازی شده در نسبت  $R_4$

راجرز معمولی		راجرز فازی شده		
رنج	کد	رنج	کد	نقطه میانی
$R_4 < 0/5$	صفرا	۱>	R4_low	.
$0/5 \leq R_4 < 3$	۱	$0/4 \leq R_4 < 3$	R4_Medium	۱/۷
$R_4 \geq 3$	۲	$R_4 > 2/9$	R4_High	.

$$F(1) = \min[\mu_{verylow}(R_1), \mu_{low}(R_2), \mu_{low}(R_3), \mu_{low}(R_4)] \quad (4)$$

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

راجرز فازی شده		راجرز معمولی	نقطه میانی
رنج	کد	رنج	کد
$R_1 \geq 0/1$	۵	$R_1 < 0/2$	R1_Very low
$0/1 < R_1 < 1$	.	$0/1 < R_1 < 1$	R1_Low
$1 \leq R_1 < 3$	۱	$0/9 \leq R_1 < 3$	R1_Medium
$R_1 \geq 3$	۲	$R_1 \geq 2/9$	R1_High

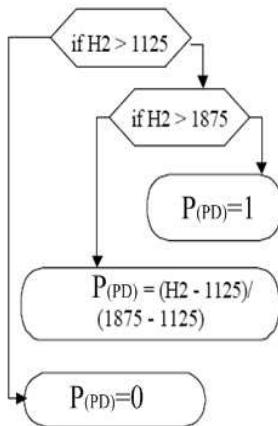


شکل (۲): فازی کردن مقادیر نسبت  $R_1$

## IEC -۲-۲-۳ فازی

در این حالت نیز از همان روش بکار رفته در روش راجر فازی استفاده می‌شود با این تفاوت که در اینجا از سه نسبت  $R_1 = \frac{C_2 H_2}{C_2 H_4}$ ,  $R_2 = \frac{C_2 H_4}{C_2 H_5}$  و  $R_5 = \frac{C_2 H_4}{C_2 H_5}$  به منظور تعیین نوع خطا استفاده می‌شود. مجموعه‌های فازی استفاده شده شامل  $low$ ,  $medium$ ,  $high$  هستند. مقادیر سه نسبت مورد استفاده در این روش به وسیله بردار زیر نشان داده می‌شوند:

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



شکل (۵): طریقه محاسبه میزان احتمال وقوع تخلیه جزئی به وسیله 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 به وسیله روش های راجر فازی، IEC فازی و مقادیر گازهای فازی شده محاسبه شده اند تعیین می شود. چگونگی ترکیب نتایج محاسبه شده توسط هر یک از روش های فوق به وسیله 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 بعنوان خروجی سیستم خطایاب تعریف می شود. این ماتریس شامل سه بردار ستونی  $E_1$ ,  $E_2$  و  $E_3$ ، به صورت زیر است:

$$E = [E_1, E_2, E_3] \quad (7)$$

در این ماتریس  $E_1$  خروجی روش راجر فازی،  $E_2$  خروجی روش IEC 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 می دهند که به صورت زیر بیان می شوند:

$$\begin{aligned} E_1 &= [e_1^1, e_1^2, e_1^3, e_1^4, e_1^5]^{-1}, \\ E_2 &= [e_2^1, e_2^2, e_2^3, e_2^4, e_2^5]^{-1} \\ E_3 &= [e_3^1, e_3^2, e_3^3, e_3^4, e_3^5]^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

در این بردارها  $e_i^j$  بیانگر احتمال خطای  $j$ ام PD است.  $i=1-3$  و  $j=1-5$  است.  $i=1-3$  است.

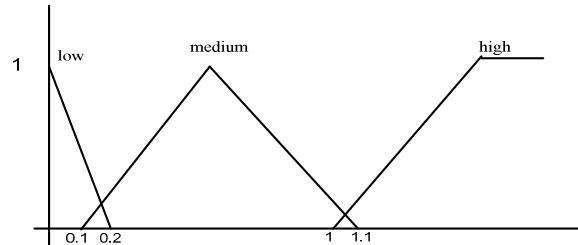
تابع  $m$  از مجموعه مرجع  $A \in P(X)$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} m : P(X) &\rightarrow [0,1] \\ m(\varphi) &= 0 \quad \text{شرط مرزی} \\ \sum m(A) &= 1, A \in P(X) \end{aligned} \quad (9)$$

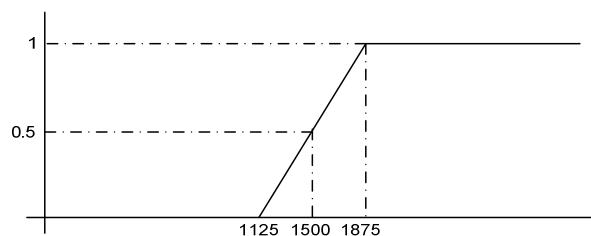
فازی کردن مقادیر گازها در این روش مشابه روش های قبلی است. جدول ۱۰ مقادیر فازی شده گازها در مقادیر آستانه را نشان می دهد. تغییرات ۲۵ درصد در مقادیر آستانه هر یک از گازها برای فازی کردن اعمال شده است. شکل ۴ چگونگی فازی کردن مقدار گاز هیدروژن را برای تعیین وجود خطای نشان می دهد. احتمال وجود یک خطای مشخص در مقادیر آستانه برابر  $0/5$  است. بدین صورت در هنگام برخورد با مقادیر آستانه، امکان اشتباه ناشی از انتخاب نادرست نوع خطای، به حداقل می رسد. شکل ۵ طرز محاسبه میزان احتمال خطای تخلیه جزئی را با توجه به مقدار گاز هیدروژن نشان می دهد. همین روش برای محاسبه سایر خطاهای نیز قابل اعمال است.

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

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



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



شکل (۴): مقادیر فازی شده گاز هیدروژن

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

$$m_{12}^k = \frac{m_1^i \cdot m_2^j}{1 - k_{12}}, (i = j = k) \quad (11)$$

که در آن:

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

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

$$E = \begin{bmatrix} m_1^1 & m_2^1 & m_3^1 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 \\ m_1^3 & m_2^3 & m_3^3 \\ m_1^4 & m_2^4 & m_3^4 \\ m_1^5 & m_2^5 & m_3^5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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 (11): مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در تعیین نوع خطا

خطای واقعی	روش مورد نظر	مقادیر آستانه گازها	فازی IEC	راجرز	IEC	$C_2H_2$	$C_2H_4$	$C_2H_6$	$CH_4$	$H_2$	ردیف	
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۷۰	۱۱۰	۶/۹	۴۰	۶۰	۱	
۵	۵	۱،۴۵	۵	-	۵	۰	۶۳۰	۲۱۰	۴۹۰	۶۰	۲	
۲	۲	-	۲	-	-	۳۵۰	۹۰۰	۸۷	۱۵۰	۳۸۰	۳	
۲	۲	-	۱۰۲	۲	۲	۳۴۰	۱۸۰	۱۴	۱۲۰	۳۲۶	۴	
۱	۱،۲	۱	-	-	-	۰	۴۷	۳۴	۵۳	۵۶۵	۵	
۴	۴	۲،۴	۴	-	۴	۰	۵۰	۱۶۰	۱۱۰	۹۵	۶	
۲	۲	۳،۴	-	-	۲	۳۴۵	۶۱	۸۹	۴۹	۱۰۹	۷	
۴،۵	۴،۵	-	۴،۵	-	۴،۵	۱	۷۴۰	۲۵۰	۷۰۰	۲۰۰	۸	
۲	۲	-	۲	۲	۲	۲،۳	۱۳۱	۱۱۷	۱۴	۴۸	۲۰۰	۹
۲	۱،۲	۱،۲	۲	۲	-	۰	۲۰	۳۴	۷۳	۹۸۰	۱۰	

نمونه از مقادیر این گازها در جدول ۱۱ آورده شده است.

در جدول ۱۲ میزان دقت هریک از روش‌های فوق، در اعمال ۱۰۰ نمونه از مقادیر گازهای مربوط به ترانسفورماتورهای مختلف، آورده شده است. چنان‌که دیده می‌شود، صحت روش‌های راجر، IEC فازی و مقادیر آستانه گازها به ترتیب برابر  $46/66$ ،  $46/46$ ،  $85/4$ ،  $85/4$  و  $57$  است در حالی که سیستم مورد نظر در  $98$  درصد موارد نوع خطا را به درستی تشخیص داده است. بنابراین، میزان دقت سیستم مورد نظر نسبت به سایر روش‌ها به صورت چشم‌گیر بالاتر بوده و در زمینه خطایابی می‌تواند بسیار موثر باشد.

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  $E_{123}$  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.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع سیستم ترکیبی جدید برای تخمین وضعیت سیستم عایقی ترانسفورماتورهای قدرت معروفی 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، IEC فازی 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 تضمیم‌گیری، تشخیص نادرست و عدم تشخیص در مواردی که

## ۴- نتایج

برای ارزیابی میزان موفقیت سیستم مورد نظر در زمینه تشخیص خطا، 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



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.

---

<sup>1</sup> Fuzzy measure

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 سزاوی 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 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.

جدول ۱۲. میزان دقت روش‌های مختلف در تعیین نوع خطا

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

## 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

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

O. Ghaderi<sup>1</sup>

M.R. Feyzi<sup>2</sup>

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

