
Fault detection and condition assessment of power transformers using practical signal processing methods

Morteza Saeid¹, MSc. Student, Hamed Zeinoddini-Meymand², Assistant professor, Davoud Abootorabi Zarchi³,
Assistant professor,

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
Email: mortezasaeid.13651365@gmail.com

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
Email: h.zeinoddini@kgut.ac.ir (Corresponding author)

3- Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
Email: d.abootorabi@yazd.ac.ir

Abstract: Dissolved gases in transformer oil indicate the occurrence of a fault in the transformer. Many standards use the ratio of dissolved gases in transformer oil to detect faults in transformers. These traditional methods cannot, however, be used in cases in which the transformer needs to be immediately removed from service in case of a serious error such as electric arcs to prevent the error from spreading. For this purpose, this paper uses signal processing methods that analyze the signal online. The paper assumes that CO and CO₂ dissolved gases in transformer oil are measured online by a sensor and then some signal processing methods are applied to the measurement data. These methods include Fast Fourier Transform, Discrete Wavelet Transform, Hilbert Transform, Gabor Transform, the combination of discrete wavelet and Hilbert transform, the combination of discrete wavelet and Gabor transform, and spectrogram. These methods are continuously applied to these two gases that are soluble in transformer oil to determine their variations in the transformer oil at a certain time or a certain frequency. The gases are also modified and then the performance of each of the processing methods mentioned in these changes is investigated. Fault detection reference is the CIGER 761-2019 standard. The purpose of this paper is to find out the samples of gases change in a frequency interval or timeframe together irrespective of the faults in the transformer and changes in the volume of dissolved gases in transformer oil, analyze the signal processing methods, and detect the type of fault using CIGRE 761-2019 standard. The fast Fourier transform method analyzes signal power by frequency. The discrete wavelet transform method extracts high-frequency components of gases and detects faults based on the largest components. The Hilbert transform method converts the signal into two real and imaginary parts. Then, it uses the imaginary part that represents the signal phase to detect faults. The Gabor transform method extracts instantaneous frequencies in the time-frequency plane and uses this method to detect faults. In the methods that combine discrete wavelet transform and Hilbert or Gabor transform, high-frequency components are extracted by discrete wavelet transform, and then Hilbert or Gabor transform methods are applied. The spectrogram method also indicates the size of the short-time Fourier transform, which is used to analyze the signal. These signal processing methods are compared in several features, and the discrete wavelet transform method is introduced as the best method for fault detection.

Keywords: Power Transformer, Fault detection, Discrete Wavelet Transform, Hilbert Transform, Fast Fourier Transform, Gabor Transform, Spectrogram

Submit date: 2021/09/03

Accepted date: 2021/12/05

Corresponding author Name: Hamed Zeinoddini-Meymand

Corresponding author address: Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

تشخیص خطا و ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از روش‌های کاربردی پردازش سیگنال

نوع مطالعه: پژوهشی

مرتضی سعید^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، حامد زین‌الدینی میمند^۱، استادیار، داود ابوترابی زارچی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

h.zeinoddini@kgut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد- یزد- ایران

d.abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده:

تشخیص نوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت اهمیت زیادی دارد، زیرا ترانسفورماتورها تحت تأثیر تنش‌های الکتریکی مانند موج سیار، کلیدزنی‌ها، و همچنین تنش‌های حرارتی مانند اضافه بار و واکنش‌های شیمیایی در روغن دی‌الکتربیک هستند. ارزیابی شرایط و جلوگیری از گسترش خطا در ترانسفورماتور باعث افزایش طول عمر ترانسفورماتور، کاهش هزینه‌ها و تداوم بهره‌برداری در نیروگاه‌ها و پست‌های انتقال می‌شود. در این مقاله فرض بر این است که دو گاز CO₂ و CO محلول در روغن ترانسفورماتور توسط سنسور TM8 به صورت آنلاین اندازه‌گیری شده و با استاندارد به استاندارد CIGRE 761-2019 جهت تشخیص خطا، هفت روش ۱- تبدیل فوریه گسسته، ۲- تبدیل موجک گسسته، ۳- تبدیل هیلبرت، ۴- تبدیل گابور، ۵- ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور، ۶- اسپکتروگرام، ۷- ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت، بصورت پیوسته بر روی این دو گاز محلول در روغن ترانسفورماتور اعمال می‌شود تا مشخص شود که در یک زمان یا یک فرکانس مشخص کدام یک از گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور تغییر می‌کنند و همبستگی زمانی تغییر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور چگونه است، تا بتوان خطاهای تعیین شده توسط استاندارد CIGRE 761-2019 را تشخیص داد. هدف از این مقاله نشان دادن برتری روش‌های تشخیص خطا و سنجش آنلاین گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور نسبت به روشهای سنتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور قدرت، تشخیص خطا، تبدیل موجک گسسته، تبدیل هیلبرت، تبدیل فوریه سریع، تبدیل گابور، اسپکتروگرام

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حامد زین‌الدینی میمند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمان - انتهای اتوبان هفت باغ علوی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

۱- مقدمه

نشان‌دهنده خطای اضافه بار ترانسفورماتور می‌باشد و وجود گاز C_2H_2 نشان‌دهنده خطای قوس الکتریکی (Arcing) در ترانسفورماتور است که می‌تواند در اثر خرابی کنتاکت‌های تپ چنجر یا اتصال حلقه در ترانسفورماتور باشد.

اگر گازهای CH_4 ، C_2H_4 ، C_2H_6 ، CO ، CO_2 همزمان در روغن دی‌الکتریک تولید شوند ترانسفورماتور دارای خطای فلز داغیست که عایق کاغذی را می‌سوزاند. گاز H_2 نشان‌دهنده خطای تخلیه جزئی است. البته این گاز در هنگام وقوع اکثر خطاها مقداری تولید می‌شود. جدول (۱) خطاهای تعیین شده توسط استاندارد CIGRE 761-2019 را نشان می‌دهد.

جدول (۱): خطاهای تعیین شده در استاندارد CIGRE 761-2019

نوع خطا	نوع گاز
پیری تسریع شده عایق کاغذی	CO - CO ₂
فلز داغ	CH ₄ - C ₂ H ₄ - C ₂ H ₆
سوختن عایق کاغذی با فلز داغ	CH ₄ - C ₂ H ₄ - C ₂ H ₆ - CO - CO ₂
قوس الکتریکی	C ₂ H ₂
تخلیه جزئی	H ₂

استانداردهای زیادی برای تشخیص نوع خطا با استفاده از گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور ارائه شده است که در برخی از مراجع از روش‌های منطق فازی و ANFIS با استناد به این استانداردها برای تشخیص خطا استفاده می‌شود (Khan et al., 2015; Hooshmand et al., 2012; Khan et al., 2014; Cui et al., 2014; Kim et al., 2013; Duraisamy et al., 2007; Veerasamy et al., 2018).

خواص الکتریکی، فیزیکی و شیمیایی روغن نیز بیانگر بعضی از خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور می‌باشد (Barbosa et al., 2009; Ushakov et al. 2022).

بعضی از گازهای تولید شده در روغن ترانسفورماتور احتراق پذیر می‌باشند که این گازها نیز در اثر خطاهای حرارتی بوجود می‌آیند (Yang & Hu, 2013; Li et al., 2018). معمولاً مؤلفه فوران پارامتری است که برای تشخیص سلامت عایق کاغذی و نسبت گازهای محلول برای تشخیص خطا استفاده می‌شود (Duval, 2002; Faiz & Soleimani, 2017). سیستم‌های هوشمند که پارامترهای ولتاژ، جریان، مؤلفه رطوبت داخل روغن، تخلیه جزئی و ارتعاش ترانسفورماتور را اندازه‌گیری می‌کنند قادر به تشخیص بعضی از خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور هستند (Ma et al., 2015; Silva et al. 2020). از ارتعاش سیم پیچ‌ها و در نظر گرفتن مدل جرم فنر و دمپر برای تشخیص خطای رخ داده در سیم پیچ ترانسفورماتور نیز استفاده می‌شود (Zhou et al., 2016). ارتعاش و جابجایی سیم پیچ‌های ترانسفورماتور بستگی به نیروهای الکترومغناطیسی سیم پیچ دارد. آنالیز پاسخ فرکانسی (FRA) روشی برای تشخیص خطا در سیم پیچ‌های ترانسفورماتور می‌باشد (Hashemnia et al., 2015, Senbari et al. 2018). تشخیص نوع خطای آنالین در ترانسفورماتورها از آسیب دیدن اجزای

مانیتورینگ آنالین می‌تواند روشی ارزشمند برای ارزیابی شرایط ترانسفورماتورهای قدرت باشد. تعداد زیادی از دستگاه‌های مانیتورینگ آنالین از روش‌های آنالیز مشترک و داده‌های پیوسته برای آشکارسازی خطا و ارزیابی شرایط ترانسفورماتور استفاده می‌کنند. بعضی از دستگاه‌های مانیتورینگ آنالین پیچیده، گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور را اندازه‌گیری نموده و از روش‌هایی مانند گازهای کلیدی و مثلث دوال برای تحلیل آنها استفاده می‌کنند. روش مثلث دوال یک روش گرافیکی است که ماهیت خطا را مشخص می‌کند. به هر حال برای ارزیابی کامل شرایط ترانسفورماتور باید تمامی خطاها را به همراه ظرفیت‌ها و محدودیت‌های سیستم مانیتورینگ در نظر گرفت و چون تمامی اجزای ترانسفورماتور بصورت پیوسته مانیتورینگ نمی‌شود، ارزیابی کامل شرایط ترانسفورماتور تنها می‌تواند با ترکیب داده‌های پیوسته و دیگر داده‌ها انجام شود. مثلاً دستگاهی که گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور را اندازه‌گیری می‌کند نمی‌تواند ذرات رسانا یا مقاومت روغن ترانسفورماتور را مشخص کند. زمانی که یک ترانسفورماتور تحت تأثیر خطاهای داخلی یا خارجی (خطاهای شبکه) قرار می‌گیرد بسته به نوع خطا دمای سیم پیچ‌های ترانسفورماتور افزایش یافته و همزمان با افزایش دمای سیم پیچ، دمای روغن که وظیفه خنک کاری و عایق بودن را بر عهده دارد نیز بالا رفته و مقداری گاز در روغن تولید می‌شود. از آنجایی که برنامه نمونه‌گیری و آنالیز روغن در دوره‌های زمانی معین (Time-Based) و یا در هنگام بروز خطا انجام می‌شود ممکن است بعضی از خطاها آشکار نگردد و یا اینکه برطبق این برنامه ثابت دوره‌ای، انجام تست پس از بوجود آمدن یک شرایط بحرانی برای ترانسفورماتور انجام گردد. از اشکالات دیگر این روش آن است که نمی‌توان همبستگی زمانی بین تولید گازها را با عوامل مختلف تأثیرگذار بر عملکرد ترانسفورماتور نظیر تغییرات بار، ولتاژ، دما و ... که در گذشته اتفاق افتاده و منشأ تولید گاز بوده‌اند را پیدا نمود.

روش‌های سنتی که برای تشخیص خطا در ترانسفورماتور استفاده می‌شوند از نسبت گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور به منظور تشخیص خطا استفاده می‌کنند. در سیستم مانیتورینگ آنالین با قرار دادن یک دستگاه آشکارساز (سنسور) گاز در روغن می‌توان مقدار گاز را به طور پیوسته اندازه‌گیری کرد. در صورت بروز خطا در ترانسفورماتور و تغییر حجم گازهای محلول در روغن، توسط این دستگاه برای بهره‌بردار هشدار مناسب جهت آگاهی از خطای رخ داده و ارزیابی شرایط ترانسفورماتور ایجاد می‌شود. مرجع (CIGRE A2.49, 2019) انواع گازهای تولید شده در روغن ترانسفورماتور را بسته به نوع خطا، بصورت زیر تقسیم‌بندی می‌کند. گازهای CO و CO₂ در ترانسفورماتور نشان‌دهنده خطای فرسودگی و تجزیه عایق کاغذی است. گازهای CH₄، C₂H₄، C₂H₆

			کم
$0.1 \leq X_1 \leq 3$	$0.1 \leq X_2 \leq 1$	$X_3 < 1$	تخلیه جزئی با چگالی انرژی زیاد
$0.1 \leq X_1 \leq 3$ or $X_1 > 3$	$X_2 < 0.1$	$1 \leq X_3 \leq 3$ or $X_3 > 3$	قوس الکتریکی با انرژی کم
$0.1 \leq X_1 \leq 3$	$X_2 < 0.1$	$X_3 > 3$	قوس الکتریکی با انرژی زیاد
$X_1 < 0.1$	$X_2 < 0.1$	$1 \leq X_3 \leq 3$	خطای حرارتی کمتر از 150°C
$X_1 < 0.1$	$X_2 > 1$	$X_3 < 1$	خطای حرارتی بین 150 و 300°C
$X_1 < 0.1$	$X_2 > 1$	$1 \leq X_3 \leq 3$	خطای حرارتی بین 300 و 700°C
$X_1 < 0.1$	$X_2 > 1$	$X_3 > 3$	خطای حرارتی بیشتر از 700°C

همانطور که در جداول فوق مشاهده می‌شود از نسبت‌های متفاوت با بازه‌های مختلف برای تشخیص اولیه نوع خطا استفاده می‌شود که نوع کلی خطا را مشخص می‌کند. مشکل اول در استفاده از این نسبت‌های سنتی تفاوت‌های بین آنها در تشخیص خطا است که استفاده از هر کدام ممکن است نتایج متفاوتی بدهد. مشکل دوم این است که این نسبت‌ها دقت بالایی نداشته و فقط کلیات اولیه مرتبط با خطا را مشخص می‌کند و احتمال به اشتباه افتادن آنها وجود دارد. بنابراین از چند سال پیش تا به امروز تحقیقات مختلف برای یافتن روش‌های مختلف هوشمند برای افزایش قابلیت اطمینان در تشخیص خطا در ترانسفورماتور آغاز شده و تا کنون نیز ادامه دارد.

در جدول (۵) نیز تعدادی از مطالعات انجام شده جهت تشخیص خطا در ترانسفورماتور آورده شده است که می‌توان گفت به نوعی روش‌های سنتی استانداردها را بهبود داده و به دقت آنها افزوده‌اند (Khan et al., 2015; Hooshmand et al., 2012; Yang et al., 2019; Bacha et al., 2012; Zhang et al., 2022; Taheri & Sedighzadeh, 2021; Tavakoli et al., 2020; Yu et al., 2016; Malik et al., 2013; Senobari et al., 2018; Yadaiah & Ravi, 2011). این روش‌ها شامل شبکه عصبی، سیستم فازی، ترکیب عصبی و فازی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تبدیل موجک و انواع روش‌های خوشه‌بندی و طبقه‌بندی می‌باشند. در جدول زیر جزئیات هر کدام از این مراجع مرور شده است.

ترانسفورماتورها جلوگیری می‌کند. در ابتدا روند تشخیص خطا توسط نسبت گازها در مراجع مختلف را بررسی می‌کنیم. در جدول‌های (۲)، (۳) و (۴) تعدادی از روش‌های نسبت گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور و نحوه تعیین خطا در آنها نشان داده شده است.

جدول (۲): تشخیص خطا بر اساس استاندارد IEEE C57.104

استاندارد IEEE C57.104 روش نسبت Doernenburg	$X_1 = \text{CH}_4/\text{H}_2$	$X_2 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$X_3 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	$X_4 = \text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$	تشخیص نوع خطا
	$X_1 > 1$	$X_2 < 0.75$	$X_3 < 0.3$	$X_4 > 0.4$	تجزیه حرارتی
	$X_1 < 0.1$	-	$X_3 < 0.3$	$X_4 > 0.4$	تخلیه جزئی با چگالی انرژی کم
	$0.1 < X_1 < 1$	$X_2 > 0.75$	$X_3 > 0.3$	$X_4 < 0.4$	قوس الکتریکی با چگالی انرژی زیاد

جدول (۳): تشخیص خطا بر اساس روش Rogers

روش نسبت Rogers	$X_1 = \text{CH}_4/\text{H}_2$	$X_2 = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$X_3 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	تشخیص نوع خطا
	$0.1 < X_1 < 1$	$X_2 < 1$	$X_3 < 0.1$	بدون خطا
	$X_1 < 0.1$	$X_2 < 1$	$X_3 < 0.1$	تخلیه جزئی با چگالی انرژی کم
	$0.1 \leq X_1 \leq 1$	$X_2 > 3$	$0.1 \leq X_3 \leq 3$	قوس الکتریکی با انرژی زیاد
	$0.1 < X_1 < 1$	$1 \leq X_2 \leq 3$	$X_3 < 0.1$	اضافه بار دمای پایین
	$X_1 > 1$	$1 \leq X_2 \leq 3$	$X_3 < 0.1$	خطای حرارتی کمتر از 700°C
	$X_1 > 1$	$X_2 > 3$	$X_3 < 0.1$	خطای حرارتی بیشتر از 700°C

جدول (۴): تشخیص خطا بر اساس استاندارد IEC 60599

استاندارد IEC 60599	$X_1 = \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$X_2 = \text{CH}_4/\text{H}_2$	$X_3 = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	تشخیص نوع خطا
	$X_1 < 0.1$	$X_2 < 0.1$	$X_3 < 1$	بدون خطا
	$X_1 < 0.1$	$0.1 \leq X_2 \leq 1$	$X_3 < 1$	تخلیه جزئی با چگالی انرژی

پایان عمر عایق کاغذی ترانسفورماتور بیان کننده پایان عمر ترانسفورماتور می‌باشد. با افزایش درجه حرارت در عایق کاغذی و تجزیه عایق کاغذی گازهای CO و CO₂ در روغن تولید می‌شوند. گازهای CO₂ و CO به عنوان معیاری جهت تشخیص خرابی عایق کاغذی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. در این مقاله بدلیل اهمیت عایق کاغذی ترانسفورماتور، گازهای CO و CO₂ که نشان دهنده پیری سریع و تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در اثر تنش های حرارتی هستند جهت شبیه سازی با استفاده از روشهای مختلف پردازش سیگنال استفاده شده‌اند و در نهایت نتایج این روش‌ها با هم مقایسه شده است.

با وجود خطا در روغن ترانسفورماتور مقداری گاز تولید می‌شود. روغن ترانسفورماتور مقدار معینی از گازهای تولید شده در اثر خطا را در خود حل کرده و به حالت اشباع می‌رسد و قابلیت حل کردن سایر گازها را ندارد. سپس این گازها از ترانسفورماتور خارج شده و به محیط منتقل می‌شوند، در نتیجه حجم گازی که بصورت غیر آنلاین در ترانسفورماتور اندازه‌گیری می‌شوند ممکن است مقدار دقیق حجم گاز در اثر خطا نباشد. بنابراین یکی از مزایای این مقاله استفاده از اندازه‌گیری آنلاین گازها در روغن ترانسفورماتور است. مزیت دیگر در این است که معمولاً انجام آزمایش‌ها بصورت غیر آنلاین (ادواری) بوده و انجام هر آزمایش چند ماه بطول می‌انجامد اگر در این حالت در ترانسفورماتور خطایی رخ بدهد چون اندازه‌گیری گازها بصورت آنلاین نیستند نمی‌توان از گسترش خطا و آسیب دیدن هر چه بیشتر ترانسفورماتور جلوگیری کرد.

نوآوری این مقاله در این است که بصورت آنلاین از آنالیز تغییرات فرکانسی گازهای محلول در روغن با استناد به استاندارد CIGRE761-2019 جهت تشخیص خطا استفاده می‌شود. همچنین استفاده از روشهای پردازش سیگنال جهت تشخیص خطا در ترانسفورماتور یک روش جدید می‌باشد که هدف از این روش، تشخیص آبی خطا در ترانسفورماتور و جلوگیری از گسترش خطا با استفاده از سنسورهای تشخیص گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور می‌باشد. همچنین هدف از بررسی تغییرات گازها در بازه های زمانی یا فرکانسی، تعیین گازهایی است که بطور همزمان یا در یک فرکانس مشخص در روغن ترانسفورماتور تولید می‌شوند تا بتوان نوع خطاها را با توجه به استاندارد CIGRE761-2019 تشخیص داد.

۲- روش‌های مختلف پردازش سیگنال برای مسئله تشخیص خطای ترانسفورماتورها

در مرحله تشخیص نوع خطا فرض بر این است که گازهای CO و CO₂ محلول در روغن ترانسفورماتور ابتدا توسط سنسور TM8 اندازه‌گیری شده است. گاز CO در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ دارای تغییرات است ولی گاز CO₂ علاوه بر نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰، در

جدول (۵): روشهای مختلف تشخیص خطا در ترانسفورماتور

روش استفاده شده	مرجع تشخیص خطا	سال	مرجع
ANFIS - Fuzzy	IEC 60599 IEEE C57.104 Roger's Method	2015	(Khan et al., 2015)
ANFIS - ANN	IEC 60599 IEEE C57.104 Roger's Method	2012	(Hooshmand et al., 2012)
BAPNN - PSO PNN - GA PNN - PNN	IEC 60599	2019	(Yang et al., 2019)
SVM - Fuzzy - MLP - RBF	IEC 60599	2012	(Bacha et al., 2012)
XGBOOST - GNB - SVM - ELM - MLP	نسبت و مجموع گازها	2022	(Zhang et al., 2022)
جریان هجومی ترانسفورماتور	فیلتر با پنجره متحرک	2021	(Taheri & Sedighzadeh, 2021)
SVM	ارتعاش ترانسفورماتور	2020	(Tavakoli et al., 2020)
PNN - BPNN - Fuzzy - Decision-making tree - Bayesian algorithm	IEC 60599 IEEE C57.104 Roger's Method	2016	(Yu et al., 2016)
PNN - BPNN	CO ₂ /CO	2013	(Malik et al., 2013)
FRA	خرابی سیم پیچ‌ها	2018	(Senobari et al., 2018)
Wavelet Transform	Roger's Method	2011	(Yadaiah & Ravi, 2011)

همانطور که در مرور مراجع جدول (۵) مشاهده می‌شود در اکثر مراجع از انواع روش‌های عصبی و فازی استفاده شده است. همچنین در برخی مراجع از روش‌های طبقه‌بندی از جمله SVM، XGBOOST استفاده شده است. در بعضی مراجع هم از روش‌های مبتنی بر فرکانس از جمله روش آنالیز پاسخ فرکانسی (FRA) و روش تبدیل موجک (Wavelet) استفاده شده است. با ارزیابی جدول (۵) میتوان چنین استنباط کرد که تشخیص خطا در ترانسفورماتور منحصراً در استفاده از نسبت گازها نیست و با استفاده از روش‌های متعدد انجام می‌شود. با توجه به جدول (۵) مشخص می‌شود که دقت روش‌های هوشمند تشخیص خطا نسبت به روش‌های سنتی استانداردها کاملاً متفاوت می‌باشد. در جدول (۵) روش‌هایی که بیشترین دقت را در تشخیص خطا داشته‌اند با رنگ قرمز مشخص شده است.

(۲)

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot g[n-k]$$

در مراحل بعدی دوباره سیگنال عبور کرده از فیلتر پایین گذر مرحله اول از یک فیلتر پایین گذر و بالا گذر عبور می‌کند. سیگنال عبور کرده از فیلتر بالا گذر، جزئیات و سیگنال عبور کرده از فیلتر پایین گذر، تقریب گفته می‌شود. این دو فیلتر به یکدیگر مرتبط بوده و به عنوان فیلتر آینه چهارگوش شناخته می‌شوند. از آنجا که هر یک از دو خروجی فیلتر، نیمی از محتوای فرکانسی سیگنال ورودی را دارند، بنابراین رزولوشن فرکانس دو برابر شده است. به عبارتی سیگنالی که از فیلتر بالاگذر عبور می‌کند دارای مؤلفه‌های فرکانس بالا و سیگنالی که از فیلتر پایین گذر عبور می‌کند دارای مؤلفه‌های فرکانس پایین است. رابطه (۳) بیانگر مؤلفه‌های فرکانس پایین یا تقریب (approximation) و رابطه (۴) بیانگر مؤلفه‌های فرکانس بالا یا جزئیات (detail) می‌باشند (Yadaiah & Ravi, 2011).

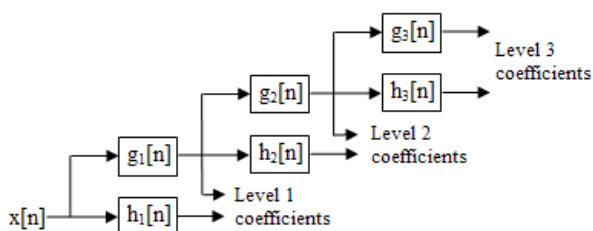
(۳)

$$Y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot g[2n-k]$$

(۴)

$$Y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[2n-k]$$

در هر مرحله می‌توان سیگنال تقریب مرحله قبل را از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر عبور داد و سیگنال‌های جزئیات (مؤلفه‌های فرکانس بالا) و سیگنال‌های تقریب (مؤلفه‌های فرکانس پایین) را تعیین کرد.



شکل (۱): استفاده از تبدیل موجک گسسته به عنوان فیلتر

در شکل (۱) سیگنال داده است که توسط دو فیلتر بالاگذر و پایین گذر تجزیه می‌شود. خروجی $x[n]$ دارای سیگنال تقریب $g_1[n]$ و سیگنال جزئیات $h_1[n]$ می‌باشد. در مرحله دوم خروجی سیگنال $g_1[n]$ به دو سیگنال تقریب $g_2[n]$ و سیگنال جزئیات $h_2[n]$ تقسیم می‌شود و در مرحله سوم خروجی سیگنال تقریب $g_2[n]$ به دو سیگنال تقریب $g_3[n]$ و جزئیات $h_3[n]$ تقسیم می‌شود. در هر مرحله با تقسیم سیگنال پایین گذر به دو سیگنال

نمونه ۳۰۰ به بعد هم دارای تغییرات می‌باشد. سپس روش‌های تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک گسسته، تبدیل هیلبرت، تبدیل گابور، اسپکتروگرام و ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور بر مبنای پردازش سیگنال بر روی این دوگاز اعمال می‌شود. هدف از تشخیص خطا تعیین همبستگی زمانی یا فرکانسی بین گازها است تا مشخص شود در چه زمان یا چه فرکانسی کدامیک از گازها تغییر نموده است. سپس با استناد به استاندارد CIGRE 761-2019 و تقسیم‌بندی نوع خطا، خطای رخ داده تعیین می‌شود.

۲-۱- تبدیل فوریه سریع^۱

تبدیل فوریه سریع (FFT) یکی از مهمترین الگوه‌های مورد استفاده در پردازش سیگنال و آنالیز داده است. در واقع FFT یک الگوریتم است که برای محاسبه تبدیل فوریه گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنالیز فوریه می‌تواند یک سیگنال از حوزه اصلی، که معمولاً زمان یا فضا است را به نمایشی در حوزه فرکانس تبدیل کند. این تبدیل در بسیاری از زمینه‌ها مفید است، اما مشکلی که وجود دارد این است که محاسبه مستقیم این تبدیل با استفاده از تعریف آن بسیار کند است و در عمل کاربردی ندارد.

تبدیل فوریه گسسته معمولاً از طریق تجزیه دنباله مقادیر، به عناصر با فرکانس‌های متفاوت محاسبه می‌شود. تبدیل فوریه سریع روشی است که به وسیله آن می‌توان تبدیل فوریه گسسته را به سرعت محاسبه کرد. تبدیل فوریه سریع پردازشگری سیگنالی و مفهومی آنالیزی برای یک دنباله با مقادیر فاصله برابر است. فرمول تبدیل فوریه گسسته مستقیم به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود (Zakaria & Le Ruyet, 2016).

(۱)

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi kn/N}$$

که در رابطه بالا N تعداد نمونه‌ها، و n نمونه فعلی است. همچنین x_n مقدار سیگنال در زمان n ، k فرکانس فعلی (0 تا $N-1$) هرترز و X_k نتیجه حاصل از تبدیل فوریه گسسته است.

۲-۲- تبدیل موجک گسسته^۲

تبدیل موجک گسسته یک سیگنال با عبور از یک سری فیلتر محاسبه می‌شود (Atto et al., 2016; Prabhakar et al., 2002; Ghods & Lee, 2016). ابتدا نمونه‌ها از یک فیلتر پایین گذر با پاسخ ضربه g و یک فیلتر بالا گذر عبور داده می‌شوند که کانونولوشن آنها برابر با رابطه (۲) می‌باشد (Prabhakar et al., 2002).

^۱Fast Fourier Transform

^۲Discrete Wavelet Transform

ایجاد می‌کند. تبدیل گابور، رابطه تبدیل فوریه زمان کوتاه را که نسخه‌ای از تبدیل فوریه با پنجره لغزشی (sliding window) بصورت رابطه (۷) می‌باشد را در صفحه زمان فرکانس تعیین می‌کند و فرکانس‌های لحظه‌ای سیگنال f را که بصورت رابطه (۸) می‌باشند را در پنجره طیفی g بصورت تبدیل گابور در رابطه (۹) نشان می‌دهد (Thakur & Wu, 2011).

(۷)

$$V_g f(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g(x-t) \cdot e^{-j2\pi\eta(x-t)} dx$$

(۸)

$$\Omega_g f(t, \eta) = \frac{\partial V_g f(t, \eta) / \partial t}{j2\pi \cdot V_g f(t, \eta)}$$

(۹)

$$T_g f(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_g f(t, \eta) \cdot \delta(\omega - \Omega_g f(t, \omega)) d\eta$$

که $V_g f(t, \eta)$ پنجره‌ای است که تغییرات فرکانس و زمان را نشان می‌دهد، t زمان، η فرکانس، $g(x-t)$ تابع پنجره، x واگرد زمان (مقدار شیفت زمانی سیگنال)، ω فرکانس لحظه‌ای می‌باشند.

مقادیر تبدیل سنکرونیزه فشرده می‌شوند به طوری که در اطراف منحنی‌های فرکانس‌های لحظه‌ای در صفحه زمان-فرکانس متمرکز می‌شوند (Wu & Zhou, 2018).

۲-۵- ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور

در این قسمت مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال گازهای CO و CO₂ که بیانگر تغییرات این سیگنال‌ها می‌باشند توسط تبدیل موجک جدا شده سپس از تبدیل گابور برای بررسی تغییرات این مؤلفه‌ها استفاده می‌شود.

۲-۶- اسپکتروگرام^۵

اسپکتروگرام نمایشی از طیف فرکانسی سیگنال‌هایی است که نسبت به زمان تغییرات زیادی دارند. اسپکتروگرام معمولاً با دو روش ساخته می‌شود.

۱- تقریب زدن بصورت یک بانک فیلتری (مجموعه‌ای از فیلترهای میان گذر)

۲- استفاده از تبدیل فوریه در حوزه زمان

در این مقاله از روش دوم جهت تشخیص خطا و بررسی سیگنال گازهای CO و CO₂ استفاده می‌شود.

۲-۷- ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت

در این روش مؤلفه‌های فرکانس بالای گازهای CO و CO₂ توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه شده و سپس از تبدیل هیلبرت این

پایین گذر و بالاگذر مرحله بعد، رزولوشن فرکانس دو برابر می‌شود. می‌توان از رزولوشن فرکانسی سیگنال بالاگذر برای بهینه سازی داده‌ها (حذف داده‌های کم اهمیت)، حذف نویز و همچنین تشخیص خطا استفاده نمود. با حذف سیگنال جزئیات در هر مرحله به عنوان داده‌های کم اهمیت، می‌توان از سیگنال تقریب آن مرحله برای محاسبات استفاده کرد. در این مقاله از پارامترهای فرکانس بالا جهت تشخیص خطا استفاده می‌شود. با وقوع خطا دامنه مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال گازها افزایش یافته و با تحلیل این مؤلفه‌ها می‌توان زمان و تغییر هر کدام از گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور را تعیین کرد.

۲-۳- تبدیل هیلبرت^۳

از نظر فیزیکی تبدیل هیلبرت معادل یک فیلتر خطی است که در آن دامنه طیف‌های سیگنال ثابت است ولی فاز آن $-\pi/2$ تغییر می‌کند. بنابراین تبدیل هیلبرت سیگنال $x(t)$ که در رابطه (۵) آورده شده است، انتگرال کانولوشن $x(t)$ در $(\pi t)^{-1}$ می‌باشد (Feldman, 2011).

$$H[X(t)] = \tilde{x}(t) = \pi^{-1} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (۵)$$

سیگنال پیچیده یک سیگنال دو بعدی است که مقدار آن در یک لحظه از زمان توسط دو قسمت مشخص می‌شود، یک قسمت حقیقی و دیگری قسمت موهومی (Feldman, 2011).

(۶)

$$X(t) = x(t) + i\tilde{x}(t)$$

که $\tilde{x}(t)$ قسمت موهومی سیگنال می‌باشد که توسط تبدیل هیلبرت مشخص می‌شود (Feldman, 2011; Trembl et al., 2019).

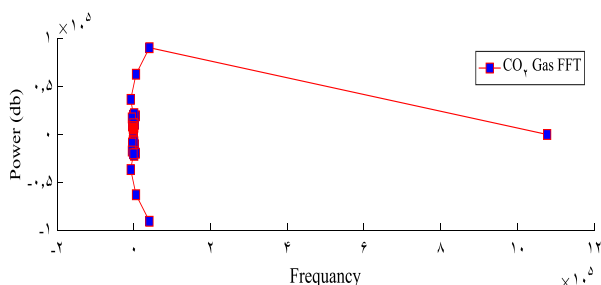
جایی که قسمت حقیقی سیگنال دارای بیشترین تغییرات است فاز سیگنال که توسط تبدیل هیلبرت تعیین می‌شود دارای کمترین مقدار می‌باشد. در واقع فاز سیگنال بصورت قسمت موهومی سیگنال اصلی ترسیم می‌شود. از این خاصیت می‌توان برای تشخیص خطا بر روی سیگنال داده‌ها استفاده کرد.

۲-۴- تبدیل گابور^۴

تبدیل گابور ترکیبی از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و همگام سازی می‌باشد. روند همگام‌سازی انرژی تبدیل فوریه زمان کوتاه را در فرکانس‌های آنی فشرده می‌کند و یک نمودار با صفحه زمان-فرکانس متمرکز ایجاد می‌کند (Thakur & Wu, 2011; Wang et al., 2018).

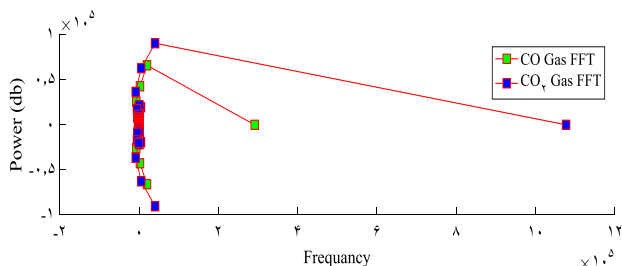
تبدیل گابور براساس تحلیل طیفی تبدیل فوریه زمان کوتاه استوار می‌باشد. برای انواع خاصی از سیگنال‌های غیرایستا تبدیل گابور وضوح فرکانسی بیشتری نسبت به تبدیل فوریه زمان کوتاه

^۳ Hilbert Transform^۴ Gabor Transform^۵ Spectrogram

شکل (۴): FFT گاز CO₂

نقطه قرمز رنگ در شکل (۴) نشان‌دهنده بزرگترین تغییرات سیگنال گاز CO₂ می‌باشد. در این نقطه منظور از بزرگترین تغییرات سیگنال، افزایش نویز در سیگنال گاز CO₂ است که باعث کاهش چگالی طیفی توان سیگنال یا همان FFT می‌شود (Zakaria & Le Ruyet, 2016). ولی سیگنال گاز CO علاوه بر نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰، در نمونه‌های ۳۰۰ به بعد هم دارای تغییرات می‌باشد.

با ترسیم FFT هر دو سیگنال گاز CO و CO₂ در شکل (۵) مشاهده می‌شود که FFT هر دو شکل دارای نقطه قرمز رنگ مشترکی می‌باشند ولی اندازه توان سیگنال‌ها برحسب (db) متفاوت است.

شکل (۵): FFT گازهای CO و CO₂

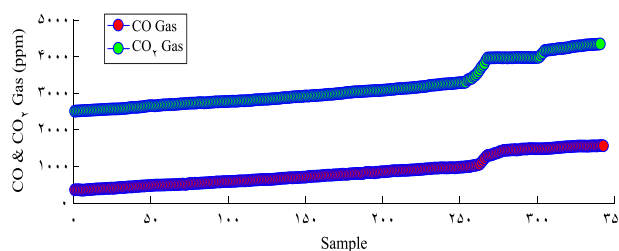
FFT در شکل‌های (۳) و (۴) فقط تغییرات نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ را در نظر گرفته (جایی که به دلیل نویز زیاد، چگالی طیفی سیگنال صفر شده است). ولی در شکل (۴) تغییرات نمونه‌های ۳۰۰ به بعد را در نظر نگرفته است. بنابراین روش FFT فقط نشان‌دهنده بزرگترین تغییرات سیگنال است و تغییرات کوچکتر را در نظر نمی‌گیرد. به عبارتی بزرگترین نویز رخ داده در سیگنال را در نظر گرفته و چگالی طیفی توان سیگنال در این نویز به سمت صفر میل می‌کند. به عنوان مثال در شکل (۴) تغییرات نمونه‌های بازه ۳۰۰ به بعد در FFT گاز CO₂ ایجاد نشده است. پس برای تشخیص خطا از روی سیگنال گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور روش FFT فقط بزرگترین تغییرات هر سیگنال متناسب با بزرگترین تغییرات (خطای رخ داده در ترانسفورماتور متناسب با هر گاز) را لحاظ می‌کند ولی تعداد وقوع خطا در این روش مشخص نیست.

در شکل‌های (۶) و (۷) سیگنال گازهای CO و CO₂ توسط تبدیل موجک گسسته به مؤلفه‌های تقریب a_1 و جزئیات d_1 تبدیل

مؤلفه‌ها، که نشان‌دهنده فاز این مؤلفه‌ها می‌باشد برای تشخیص خطا استفاده می‌شود.

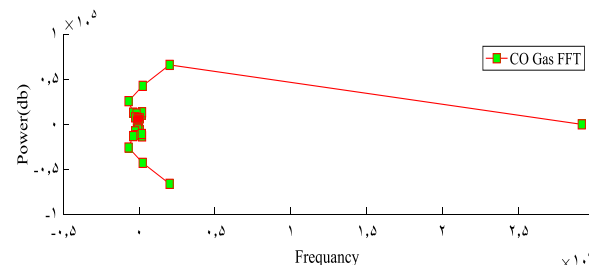
۳- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله از دو سیگنال گازهای CO و CO₂ که بیانگر تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در اثر حرارت می‌باشند استفاده شده است. این دو سیگنال در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

شکل (۲): سیگنال گازهای CO و CO₂

با دقت در سیگنال‌های گاز CO و CO₂ مشاهده می‌شود که گاز CO در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ دارای بیشترین تغییرات می‌باشد ولی گاز CO₂ علاوه بر نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰، در نمونه‌های ۳۰۰ به بعد هم دارای تغییرات می‌باشد.

روش FFT بیانگر تغییرات توان سیگنال بر حسب دسی‌بل (db) به ازای تغییرات فرکانس می‌باشد. در شکل (۳) FFT بصورت جداگانه برای سیگنال گاز CO نشان داده شده است.

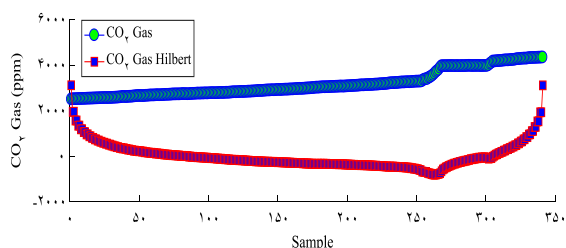


شکل (۳): FFT گاز CO

نقطه قرمز رنگ در شکل (۳) نشان‌دهنده بزرگترین تغییرات سیگنال گاز CO می‌باشد. در این نقطه منظور از بزرگترین تغییرات سیگنال، افزایش نویز در سیگنال گاز CO است که باعث کاهش چگالی طیفی توان سیگنال یا همان FFT می‌شود (Zakaria & Le Ruyet, 2016). این نقطه بیانگر تغییرات نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ بر روی شکل (۳) می‌باشد، جایی که سیگنال گاز CO بیانگر خطای تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در اثر حرارت می‌باشد. در شکل (۴) FFT بصورت جداگانه برای سیگنال گاز CO₂ نشان داده شده است.

در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ که سیگنال گاز CO دارای بیشترین تغییرات و بیانگر وقوع خطا است، فاز سیگنال دارای کمترین تغییرات برای این گاز می‌باشد. به عبارتی در این مقاله از تبدیل هیلبرت که بیانگر فاز سیگنال می‌باشد برای تشخیص خطا استفاده شده است.

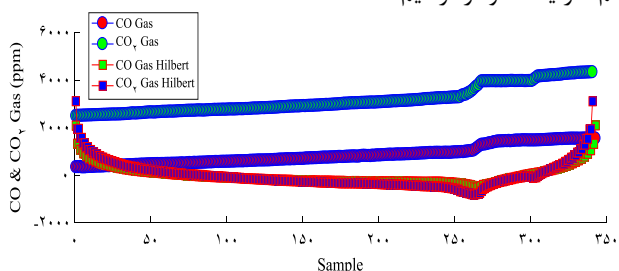
در شکل (۹) متناسب با تغییرات سیگنال گاز CO₂ تغییرات فاز سیگنال توسط تبدیل هیلبرت رسم شده است.



شکل (۹): تبدیل هیلبرت گاز CO₂

در شکل (۹) بازه زمانی نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ و نمونه‌های ۳۰۰ به بعد که سیگنال گاز CO₂ دارای بیشترین تغییرات و بیانگر وقوع خطا است، فاز سیگنال دارای کمترین تغییرات برای این گاز می‌باشد.

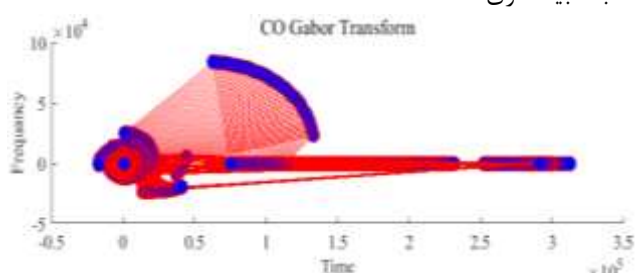
در شکل (۱۰) تبدیل هیلبرت سیگنال گازهای CO و CO₂ با هم در یک نمودار ترسیم شده است.



شکل (۱۰): تبدیل هیلبرت گازهای CO و CO₂

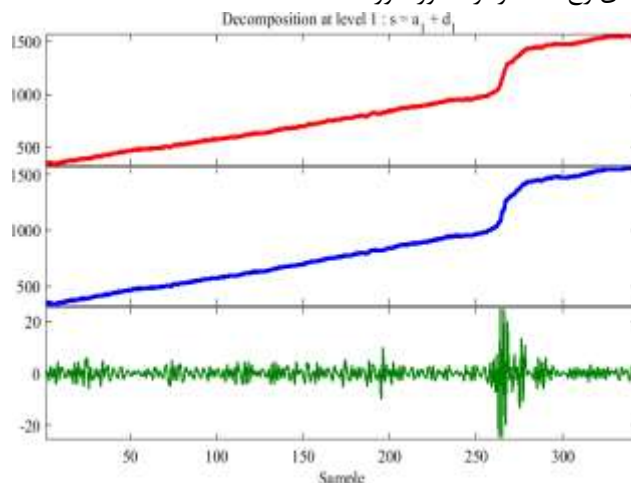
در این شکل در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ فاز سیگنال‌های هر دو گاز CO و CO₂ که توسط تبدیل هیلبرت رسم شده‌اند حالت نزولی دارند و این خطا بیانگر تجزیه عایق کاغذی ترانسفورماتور در این بازه زمانی از نمونه‌ها می‌باشد. البته این خطا برای گاز CO₂ در نمونه‌های ۳۰۰ به بعد هم اتفاق افتاده است.

در شکل (۱۱) تبدیل گابور برای سیگنال گاز CO در نرم‌افزار متلب شبیه سازی شده است.



شکل (۱۱): تبدیل گابور گاز CO

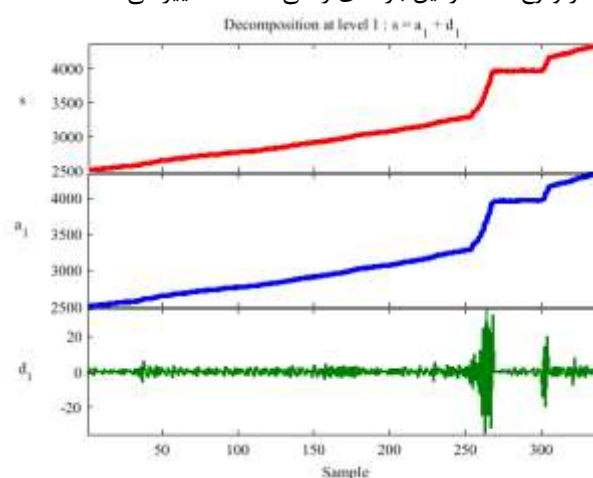
می‌شوند که مؤلفه‌های جزئیات بیانگر تغییرات سیگنال گازها و خطای رخ داده در ترانسفورماتور هستند.



شکل (۶): تبدیل موجک گسسته گاز CO

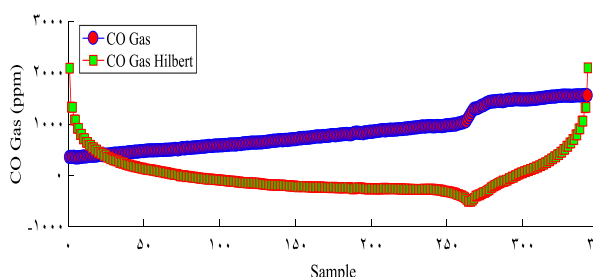
در شکل (۶) متناسب با تغییرات سیگنال گازهای CO در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ مؤلفه‌های جزئیات در سیگنال CO تغییر می‌کنند و بیانگر وقوع خطا در بازه زمانی نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ هستند.

در شکل (۷) متناسب با تغییرات سیگنال گاز CO₂ در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ و نمونه‌های ۳۰۰ به بعد مؤلفه‌های جزئیات که بیانگر وقوع خطا در این بازه‌های زمانی هستند تغییر می‌کنند.

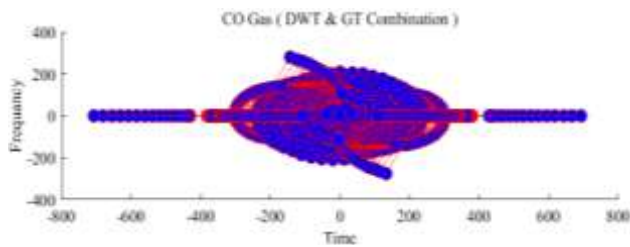


شکل (۷): تبدیل موجک گسسته گاز CO₂

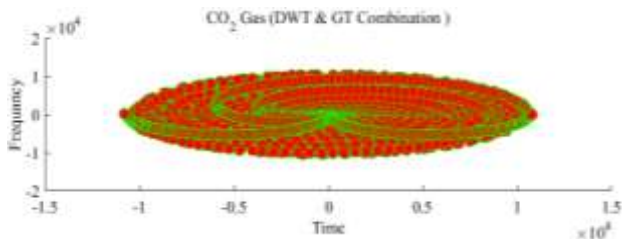
در شکل (۸) متناسب با تغییرات سیگنال گاز CO تغییرات فاز سیگنال توسط تبدیل هیلبرت آورده شده است.



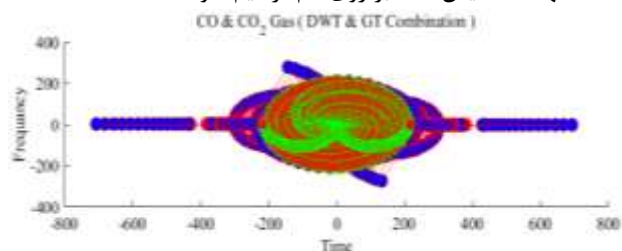
شکل (۸): تبدیل هیلبرت گاز CO



شکل (۱۴): ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور برای گاز CO
 شکل (۱۴) یک شکل متقارن می‌باشد و تحلیل تغییرات سیگنال جهت تشخیص خطا در این شکل توسط تبدیل گابور پیچیده می‌باشد. چون تعیین تغییرات فرکانسی اعمال شده در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ در سیگنال CO مشکل می‌باشد. در شکل (۱۵) مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال گاز CO₂ توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه شده و سپس از تبدیل گابور برای بررسی این مؤلفه‌ها جهت تشخیص خطا استفاده شده است.



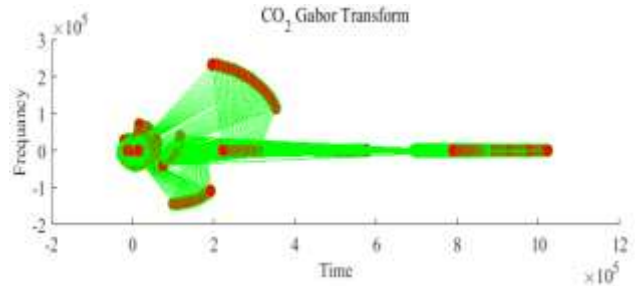
شکل (۱۵): ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور برای گاز CO₂
 شکل (۱۵) نیز مانند شکل (۱۴) یک شکل متقارن می‌باشد و تحلیل تغییرات سیگنال جهت تشخیص خطا در این شکل نیز توسط تبدیل گابور پیچیده می‌باشد. همچنین تعیین تغییرات فرکانسی اعمال شده در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ و نمونه ۳۰۰ به بعد در سیگنال CO₂ مشکل می‌باشد. در شکل (۱۶) مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال گاز CO₂ بر عدد ۵۰ تقسیم شده‌اند تا بتوانند ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور هر دو سیگنال گازهای CO و CO₂ جهت تشخیص خطا بر روی هم ترسیم شوند.



شکل (۱۶): ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور برای گازهای CO و CO₂

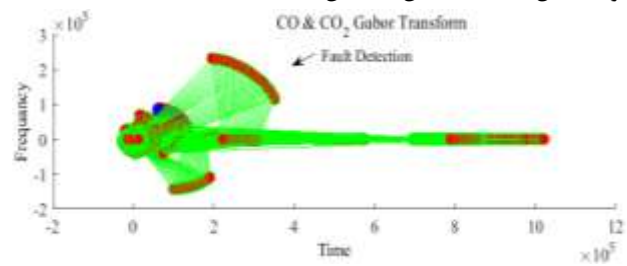
در شکل (۱۶) تعیین بررسی تغییرات فرکانسی نمونه‌ها و تشخیص خطا برای سیگنال گازهای CO و CO₂ مشکل می‌باشد. در شکل (۱۷) اسپکتروگرام (تحلیل طیفی) سیگنال گاز CO ترسیم شده است. اسپکتروگرام در حقیقت اندازه تبدیل فوریه زمان کوتاه یک سیگنال را نشان می‌دهد (Wu & Zhou, 2018).

در این شکل مقادیر تبدیل گابور حول منحنی فرکانس‌های لحظه‌ای در صفحه زمان-فرکانس متمرکز می‌شوند. در شکل (۱۲) تبدیل گابور برای سیگنال گاز CO₂ در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است.



شکل (۱۲): تبدیل گابور گاز CO₂

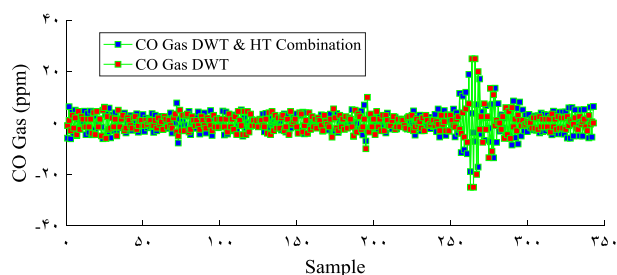
در شکل (۱۲) نیز مانند شکل (۱۱) مقادیر تبدیل گابور حول منحنی فرکانس‌های لحظه‌ای در صفحه زمان-فرکانس متمرکز می‌شوند و امکان شناسایی خطا در یک بازه زمانی یا بازه فرکانسی مشکل می‌باشد. ولی در شکل (۱۳) با ترسیم تبدیل گابور برای هر دو سیگنال گاز CO و CO₂ بیشترین تغییرات تبدیل گابور برای هر دو سیگنال با علامت فلش مشخص شده است.



شکل (۱۳): تبدیل گابور گازهای CO و CO₂

این فلش برای تعدادی از نمونه‌های هر دو گاز (قرمز و آبی رنگ) که دارای بیشترین تغییرات هستند رسم شده است. محور افقی در شکل (۱۳) برحسب میلی‌ثانیه می‌باشد. بدلیل اختلاف جزئی در تغییر نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ برای هر دو سیگنال گاز CO و CO₂ تغییرات زمانی روی محور افقی تبدیل گابور در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) اندکی متفاوت می‌باشد. اما با توجه به شکل (۲) تغییرات فرکانس برای هر سیگنال متفاوت می‌باشد، در نتیجه تغییرات فرکانس نیز در محور عمودی شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) متفاوت خواهد بود.

در شکل (۱۴) مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال گاز CO توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه شده و سپس از تبدیل گابور برای بررسی این مؤلفه‌ها جهت تشخیص خطا استفاده شده است.

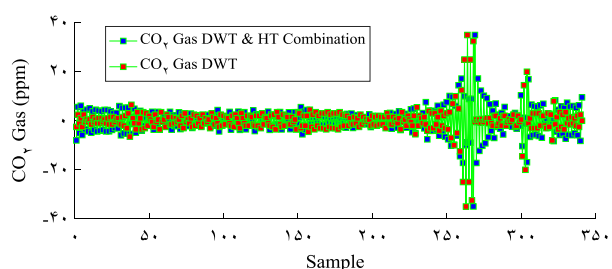


شکل (۲۰): ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت گاز CO

در شکل (۲۰) بدلیل کوچک بودن مؤلفه‌های تجزیه شده از سیگنال گاز CO توسط تبدیل موجک گسسته، اندازه فاز سیگنال موهومی (تبدیل هیلبرت) به درستی لحاظ نمی‌شود. به عنوان مثال در شکل (۸) که دامنه نمونه‌های گاز CO از ۳۵۰ ppm شروع می‌شود، شروع سیگنال فاز تبدیل هیلبرت برای این گاز از عدد ۲۰۰۰ می‌باشد. به عبارتی شروع سیگنال فاز (تبدیل هیلبرت) از لحاظ عددی بزرگتر از شروع دامنه سیگنال می‌باشد.

در ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت، دامنه مؤلفه‌های فرکانس بالایی که در تبدیل موجک گسسته دامنه کوچکتری دارند، بزرگتر شده و مؤلفه‌های فرکانس بالایی که دامنه کوچکتری دارند، دامنه آنها افزایش می‌یابد. این تغییر مؤلفه‌ها و مقایسه تبدیل موجک گسسته با ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت در شکل (۲۰) نشان داده شده است. این افزایش و کاهش مؤلفه‌ها در ابتدا و انتهای سیگنال شکل (۲۰) به خوبی مشاهده می‌شود.

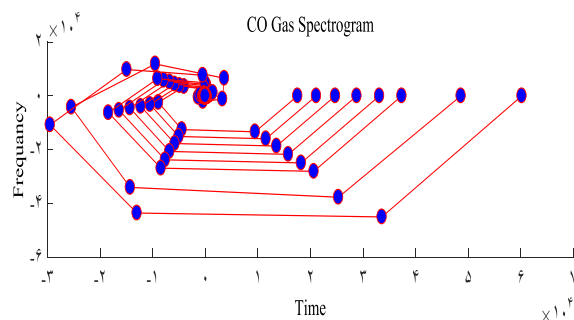
در شکل (۲۱) نیز بدلیل کوچک بودن مؤلفه‌های تجزیه شده از سیگنال گاز CO₂ توسط تبدیل موجک گسسته، اندازه فاز سیگنال موهومی (تبدیل هیلبرت) به درستی لحاظ نمی‌شود. به عنوان مثال در شکل (۹) که دامنه نمونه‌های گاز CO₂ از ۲۵۰۰ ppm شروع می‌شود، شروع سیگنال فاز تبدیل هیلبرت برای این گاز از عدد ۳۰۰۰ می‌باشد. به عبارتی شروع سیگنال فاز (تبدیل هیلبرت) از لحاظ عددی بزرگتر از شروع دامنه سیگنال می‌باشد.

شکل (۲۱): ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت گاز CO₂

در جدول (۶) یک مقایسه و ارزیابی جامع از روش‌های پردازش سیگنال در تشخیص خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور آورده شده است.

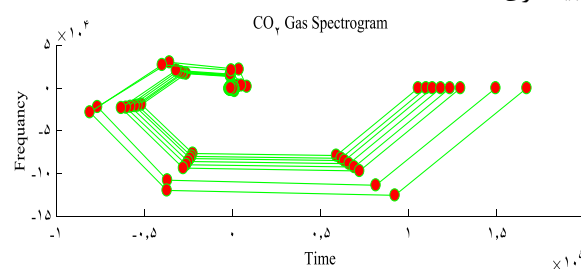
جدول (۶): مقایسه و ارزیابی روش‌های پردازش سیگنال در

تشخیص خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور

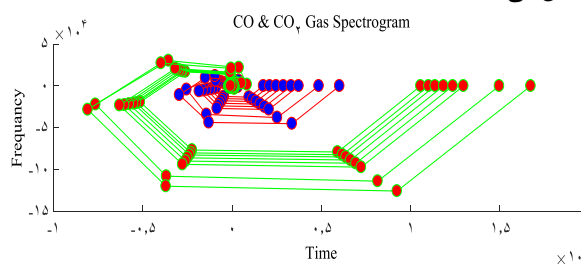


شکل (۱۷): اسپکتروگرام سیگنال گاز CO

تغییر فرکانس نمونه‌های گاز CO نسبت زمان در شکل (۱۷) نشان داده شده است، اما تعیین تغییرات فرکانسی سیگنال در نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ در سیگنال CO مشکل می‌باشد. در شکل (۱۸) نیز اسپکتروگرام سیگنال گاز CO₂ در نرم افزار متلب شبیه‌سازی شده است.

شکل (۱۸): اسپکتروگرام سیگنال گاز CO₂

تعیین تغییرات فرکانسی نمونه‌های ۲۶۰ تا ۲۷۰ و نمونه ۳۰۰ به بعد در سیگنال CO₂ مشکل می‌باشد. در شکل (۱۹) اسپکتروگرام سیگنال گازهای CO و CO₂ با هم ترسیم شده است. اسپکتروگرام این دو سیگنال تقریباً شبیه یکدیگر هستند و تعیین تغییرات فرکانسی اعمال شده در نمونه‌های هر کدام از این دو سیگنال و تشخیص خطا از این روش برای دو سیگنال ذکر شده مشکل می‌باشد.

شکل (۱۹): اسپکتروگرام سیگنال گاز CO و CO₂

در شکل (۲۰) مؤلفه‌های فرکانس بالای گاز CO توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه شده اند و سپس این مؤلفه‌ها در تبدیل هیلبرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در تبدیل هیلبرت فاز سیگنال بصورت قسمت موهومی سیگنال معرفی می‌شود.

تبدیل فوریه گسسته، تبدیل موجک گسسته، تبدیل هیلبرت، تبدیل گابور، ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور، اسپکتروگرام، ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت بصورت پیوسته بر روی این دو گاز اعمال شده تا مشخص کند که در یک زمان یا یک فرکانس مشخص همبستگی زمانی یا فرکانسی تغییر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور چگونه است. روش FFT نشان‌دهنده بزرگترین تغییرات سیگنال (بزرگترین وقوع خطا) در یک فرکانس مشخص است و تعداد تغییرات سیگنال یا به عبارت دیگر تعداد وقوع خطا را مشخص نمی‌کند و به تغییرات سایر نمونه‌های اندازه‌گیری شده حساس نمی‌باشد. به عبارتی FFT یک سیگنال در هنگام بزرگترین تغییرات سیگنال که همراه با بیشترین مقدار نویز است را در نظر گرفته و چگالی طیفی توان سیگنال به صفر میل می‌کند که این مورد از معایب روش FFT می‌باشد.

در روش تبدیل موجک گسسته سیگنال اصلی به دو سیگنال مؤلفه فرکانس پایین (تقریب) و مؤلفه فرکانس بالا (جزئیات) تقسیم می‌شود. با وقوع خطا دامنه مؤلفه‌های فرکانس بالا افزایش یافته و به خوبی بازه زمانی و نمونه‌های وقوع خطا در این روش مشخص می‌شود. در روش تبدیل هیلبرت با وقوع خطا فاز سیگنال تغییر کرده و بازه زمانی وقوع خطا در این روش به خوبی مشخص می‌شود. در روش تبدیل گابور مقادیر نمونه‌ها حول منحنی فرکانس‌های لحظه‌ای در صفحه زمان-فرکانس متمرکز می‌شوند و امکان شناسایی خطا در یک بازه زمانی یا بازه فرکانسی برای یک گاز مشکل می‌باشد. چون امکان تعیین کردن نمونه‌هایی که دچار تغییرات شده‌اند وجود ندارد. اما با ترسیم تبدیل گابور برای همه گازها با هم می‌توان تشخیص داد که کدامیک از گازها در چه فرکانس یا زمانی با هم تغییر کرده‌اند و با توجه تقسیم‌بندی خطا در استاندارد CIGRE 761 نوع خطا را مشخص نمود. البته این روش تحلیلی پیچیده دارد. استخراج مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال‌ها توسط تبدیل موجک گسسته و استفاده از تبدیل گابور برای این مؤلفه‌ها باعث تولید شکل‌های متقارنی می‌شود که تعیین تغییرات فرکانسی برای نمونه‌ها و تشخیص خطا مشکل می‌باشد. روش اسپکتروگرام اندازه تبدیل فوریه زمان کوتاه یک سیگنال را تعیین می‌کند و تعیین تغییرات فرکانسی برای نمونه‌ها و تشخیص خطا مشکل می‌باشد. در روش ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت دامنه مؤلفه‌های فرکانس بالایی که توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه شده‌اند، توسط تبدیل هیلبرت تغییر می‌کنند و ممکن است تشخیص خطا با مشکل مواجه شود.

با توجه به موارد ذکر شده در جدول (۶) بهترین روش جهت تشخیص خطا در ترانسفورماتور با استفاده از پردازش سیگنال، روش تبدیل موجک گسسته می‌باشد. زیرا به تغییر فرکانس همه نمونه‌های اندازه‌گیری شده حساس می‌باشد، و رزولوشن فرکانسی خوبی

روش پردازش سیگنال	رزولوشن فرکانسی	حساسیت نسبت به تغییر نمونه‌ها	وابستگی به دامنه یا فاز سیگنال	وابستگی به تغییرات زمان یا فرکانس	تحلیل روش
تبدیل فوریه گسسته (FFT)	کم	به بزرگترین نمونه حساسیت دارد	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس	آسان
تبدیل موجک گسسته (DWT)	زیاد	به همه نمونه‌ها حساسیت نشان می‌دهد	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس	آسان
تبدیل هیلبرت (HT)	در مؤلفه‌های دامنه بالا و زیاد و در مؤلفه‌های فرکانس پایین کم	به بزرگترین نمونه حساسیت دارد	وابسته به فاز سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس	در مؤلفه‌های دامنه بالا آسان
تبدیل گابور (GT)	کم	به همه نمونه‌ها حساسیت نشان می‌دهد	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس در طول زمان	تحلیل پیچیده و مشکل
ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور	کم	به همه نمونه‌ها حساسیت نشان می‌دهد	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس در طول زمان	در روش تبدیل گابور به تغییرات فرکانس در طول زمان وابسته است
اسپکتروگرام	کم	کم	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس در طول زمان	تحلیل پیچیده و مشکل
ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت	در روش تبدیل موجک گسسته زیاد در روش تبدیل هیلبرت برای مؤلفه‌های فرکانس بالا کم	در روش تبدیل موجک گسسته زیاد در روش تبدیل هیلبرت برای مؤلفه‌های فرکانس بالا کم	وابسته به دامنه سیگنال	وابسته به تغییرات فرکانس	تحلیل پیچیده و مشکل

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرض بر این است که دو گاز محلول در روغن ترانسفورماتور توسط یک سنسور اندازه‌گیری شده و روش‌های

- Hooshmand, R.A., Parastegari, M., & Forghani, Z., (2012). Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 28(5), 32-42.
- Hashemnia, N., Abu-Siada, A., & Islam, S., (2015). Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 1: axial displacement simulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 556-563.
- Khan, S.A., Equbal, M.D., & Islam, T., (2015). A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 590-596.
- Khan, S.A., Equbal, M.D., & Islam, T., (2014). ANFIS based identification and location of paper insulation faults of an oil immersed transformer, 6th IEEE Power India International Conference, 1-6.
- Kim, S.W., Kim, S.J., Seo, H.D., Jung, J.R., Yang, H.J., & Duval, M., (2013). New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: application of gas-ratio combinations, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(2), 685-690.
- Li, A., Yang, X., Dong, H., Xie, Z., & Yang, C., (2018). Machine learning-based sensor data modeling methods for power transformer PHM, *Sensors*, 18(12), 4430.
- Ma, H., Saha, T.K., Ekanayake, C., & Martin, D., (2015). Smart transformer for smart grid-intelligent framework and techniques for power transformer asset management, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 1026-1034.
- Malik, H., Yadav, A.K., Mishra, S., & Mehto, T., (2013). Application of neuro-fuzzy scheme to investigate the winding insulation paper deterioration in oil-immersed power transformer, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 256-271.
- Prabhakar, S., Mohanty, A.R., & Sekhar, A.S., (2002). Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults, *Tribology International*, 35(12), 793-800.
- Silva, S., Costa, P., Santana, M., & Leite, D., (2020). Evolving neuro-fuzzy network for real-time high impedance fault detection and classification, *Neural Computing and Applications*, 32(12), 7597-7610.
- Senobari, R.K., Sadeh, J., & Borsi, H., (2018). Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review, *Electric Power Systems Research*, 155, 172-183.
- Taheri, B., & Sedighzadeh, M., (2021). A moving window average method for internal fault detection of power transformers, *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100195.
- Tavakoli, A., De Maria, L., Valecillos, B., Bartalesi, D., Garatti, S., & Bittanti, S., (2020). A Machine Learning approach to fault detection in transformers by using vibration data, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 13656-13661.
- Treml, A.E., Flauzino, R.A., & Brito, G.C., (2019). EMD and MCSA improved via Hilbert Transform analysis on
- برای مؤلفه‌های فرکانس بالا و پایین دارد، و به دامنه نمونه‌های اندازه‌گیری شده وابسته است. با انطباق مؤلفه‌های فرکانس بالای همه گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور می‌توان به راحتی خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور را با استناد به استاندارد CIGRE 761 تعیین نمود.
- دومین روش مؤثر جهت تشخیص خطا روش تبدیل هیلبرت می‌باشد. اما این روش رزولوشن فرکانسی کمتری نسبت به تبدیل موجک گسسته دارد و به فاز سیگنال وابسته می‌باشد. در روشهای FFT، تبدیل گابور، ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل گابور، اسپکتروگرام و ترکیب تبدیل موجک گسسته و تبدیل هیلبرت، ارزیابی تعیین تغییرات فرکانسی تمامی نمونه‌ها پیچیده می‌باشد و براحتی نمی‌توان خطاهای رخ داده در ترانسفورماتور را تشخیص داد.

مراجع

- Atto, A.M., Trouvé, E., Nicolas, J.M., & Lê, T.T., (2016). Wavelet operators and multiplicative observation models-Application to sar image time-series analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(11), 6606-6624.
- Barbosa, F.R., Almeida, O.M., Braga, A.P.S., & Tavares, C.M., (2009). Artificial Neural Network Application in Estimation of Dissolved Gases in Insulating Mineral Oil from Physical-Chemical Datas for Incipient Fault Diagnosis, 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, IEEE, 1-5.
- Bacha, K., Souahlia, S., & Gossa, M., (2012). Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine, *Electric Power Systems Research*, 83(1), 73-79.
- CIGRE A2.49, (2019). Condition Assessment of Power Transformers, Technical Brochure CIGRE, No. 761.
- Cui, Y., Ma, H., & Saha, T., (2014). Improvement of power transformer insulation diagnosis using oil characteristics data preprocessed by SMOTEBoost technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2363-2373.
- Duraisamy, V., Devarajan, N., Somasundareswari, D., Vasanth, A.A.M., & Sivanandam, S.N., (2007). Neuro fuzzy schemes for fault detection in power transformer, *Applied Soft Computing*, 7(2), 534-539.
- Duval, M., (2002). A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(3), 8-17.
- Faiz, J., & Soleimani, M., (2017). Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review, *IEEE Transactions Dielectrics Electrical Insulation*, 24(2), 1239-1248.
- Feldman, M., (2011). Hilbert transform in vibration analysis, *Mechanical systems and signal processing*, 25(3), 735-802.
- Ghods, A., & Lee, H.H., (2016). Probabilistic frequency-domain discrete wavelet transform for better detection of bearing faults in induction motors, *Neurocomputing*, 188, 206-216.

asynchronous machines for broken bar detection using vibration analysis, IEEE Milan PowerTech Conf., 1-6.

Thakur, G., & Wu, H.T., (2011). Synchrosqueezing-based recovery of instantaneous frequency from nonuniform samples, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 43(5), 2078-2095.

Ushakov, V.Y., Mytnikov, A.V., Lavrinovich, V.A., & Lavrinovich, A.V., (2022). *Transformer Condition Control: Standardized Technologies of Condition Monitoring for High Voltage*, Springer, 23-68.

Veerasamy, V., Abdul Wahab, N. I., Ramachandran, R., Mansoor, M., Thirumeni, M., & Lutfi Othman, M., (2018). High impedance fault detection in medium voltage distribution network using discrete wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference system, *Energies*, 11(12), 3330.

Wang, S., Chen, X., Selesnick, I. W., Guo, Y., Tong, C., & Zhang, X., (2018). Matching synchrosqueezing transform: A useful tool for characterizing signals with fast varying instantaneous frequency and application to machine fault diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100, 242-288.

Wu, G., & Zhou, Y., (2018). Seismic data analysis using synchrosqueezing short time Fourier transform, *Journal of Geophysics and Engineering*, 54(4), 1663-1672.

Yang, M.T., & Hu, L.S., (2013). Intelligent fault types diagnostic system for dissolved gas analysis of oil-immersed power transformer, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(6), 2317-2324.

Yang, X., Chen, W., Li, A., Yang, C., Xie, Z., & Dong, H., (2019). BA-PNN-based methods for power transformer fault diagnosis, *Advanced engineering informatics*, 39, 178-185.

Yu, S., Zhao, D., Chen, W., & Hou, H., (2016). Oil-immersed power transformer internal fault diagnosis research based on probabilistic neural network, *Procedia Computer Science*, 83, 1327-1331.

Yadaiah, N., & Ravi, N., (2011). Internal fault detection techniques for power transformers, *Applied Soft Computing*, 11(8), 5259-5269.

Zhou, H., Hong, K., Huang, H., & Zhou, J., (2016). Transformer winding fault detection by vibration analysis methods, *Applied Acoustics*, 114, 136-146.

Zhang, D., Li, C., Shahidehpour, M., Wu, Q., Zhou, B., Zhang, C., & Huang, W., (2022). A bi-level machine learning method for fault diagnosis of oil-immersed transformers with feature explainability, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134, 107356.

Zakaria, R., & Le Ruyet, D., (2016). Theoretical analysis of the power spectral density for FFT-FBMC signals, *IEEE Communications Letters*, 20(9), 1748-1751.