

کاربرد و اصول گاز کروماتوگرافی در پایش وضعیت ترانسفورماتور

محمد جواد حسینی شاهی

شرکت توان کاونت

Hosseinshahi@gmail.com

چکیده

یکی از اصلی ترین روش های پایش وضعیت ترانسفورماتور، آنالیز گازهای حل شده در روغن ترانس توسط گاز کروماتوگرافی میباشد. تجزیه و تحلیل این گازها اطلاعات مفیدی در رابطه با وضعیت ترانسفورماتور و انواع خطاهای ایجاد شده در ترانسفورماتور را تخمین می زند. خاصیت عایقی روغن به وسیله عوامل متعددی مانند فرسودگی روغن، اضافه ولتاژها، اضافه جریانها و... پایین می آید و باعث تولید گازهای مختلفی می شود. در این مقاله به اصول کروماتوگرافی گازی و کاربرد آن و گریزی مختصر به روش های مختلف ارزیابی گازهای محلول در روغن به طور خلاصه پرداخته شده است.

کلید واژه: پایش وضعیت ، ترانسفورماتور ، گاز کروماتوگرافی

مقدمه

جلوگیری و یا کاهش خسارات ناشی از خطاها در سیستم های توزیع برق یکی بزرگترین دغدغه های کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه می باشد، زیرا صدمات و خطرات جبران ناپذیر جانی و اقتصادی را بدنبال دارد. ترانسفورماتورها بی شک یکی از مهمترین اجزای تشکیل دهنده توزیع برق در یک کشور می باشند. پایش وضعیت مداوم و مرتب این اجزای مهم در صنعت برق رسانی امری با اهمیت می باشد، زیرا مورد مطالعه قرار دادن آنها ننتنها جلوگیری از خطرات ناشی از خطاها را بدنبال دارد بلکه صرفه جویی اقتصادی را نیز بدنبال دارد.

تشخیص خطا در ترانسفورماتورها با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن روشی با اهمیت می باشد. تشکیل گاز در ترانسفورماتورها امری عادی محسوب می شود، که ممکن است در ترانسفورماتور های سالم نیز دیده شود، گازهایی از که شاکله ی کلی آنها را هیدروکربن هایی از قبیل متان، اتان، اتیلن، استیلن ... می باشند. بررسی و نرخ رشد این گازها از اهمیت ویژه ای برای پایش وضعیت یک ترانس برخوردار است. افزایش غیرعادی دما، جرقه هایی با انرژی کم، قوس الکتریکی، تخلیه کرونا و اضافه بارهای شدید می تواند هر یک به تنهایی منجر به افزایش نرخ رشد گازهای محلول در روغن شود.

پایش وضعیت مناسب و مداوم پس از هر بار تعمیرات و تغییرات سبب می شود بطور کلی طول عمر یک تجهیز را افزایش دهد در مورد ترانسفورماتور ها نیز انواع و اقسام تست های تجزیه از قبیل عدد اسیدی، شکست ولتاژ، ضریب تلفات عایقی، کروماتوگرافی و... وجود دارد.

امروزه کروماتوگرافی نقش بسزایی در پایش وضعیت روغن ترانس دارد. کروماتوگرافی در ارزیابی روغن ترانس به طور کلی به دو قسمت کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا برای اندازه گیری فورفورال و کروماتوگرافی گازی برای اندازه گیری گازهای محلول در روغن مورد استفاده قرار می گیرد، در ادامه به چگونگی و روش های اندازه گیری گاز های محلول در روغن با استفاده از کروماتوگرافی گازی پرداخته می شود.

با استفاده از اندازه گیری و تجزیه و تحلیل گاز های محلول در روغن و گاز های موجود در رله بوخهلتمس می توان به عیب و یا عیوب موجود در یک ترانسفورماتور پی برد، که برای رسیدن به تفسیر مناسب علاوه بر تخصص نیاز به تجربه، آگاهی از شرایط ترانس (شرایط محیطی، آب و هوا، دما و...) و سوابق قبلی ترانس و... می باشد [۱].

عوامل تولید گاز در روغن ترانس واکنش های منجر به تولید گاز

از عوامل اصلی تشکیل گاز می توان به تنش های الکتریکی و حرارتی اشاره کرد. تلفات اهمی ناشی از بار، با تجزیه حرارتی روغن و عایق جامد باعث تولید چند نوع گاز می شود. همچنین ممکن است در اثر حرارتهای تولیدی انواع گوناگونی از قوس ها، روغن و عایق جامد تجزیه و انواع مختلفی از گازها تولید شود. در برخی موارد نیز بمباران یونی باعث تولید گاز می گردد در این حالتها، نقش حرارت کم و ناچیز بوده و تولید گازها عمدتاً در اثر تخلیه های کم انرژی کرونا می باشد. به طور کلی می توان گفت که از تخریب روغن و عایق کاغذی ترانسفورماتور، گازهای کلیدی زیر بوجود می آیند:

الف) تخریب روغن ترانسفورماتور هیدروژن (H_2) - متان (CH_4) - اتان (C_2H_6) - اتیلن (C_2H_4) - استیلن (C_2H_2)

ب) تخریب عایق سلولزی:

کربن مونوکسید (CO) - اکسیژن (O_2) - کربن دی اکسید (CO_2)

نمودار تولید گازهای قابل احتراق برحسب دما در شکل ۱ نشان داده شده است.

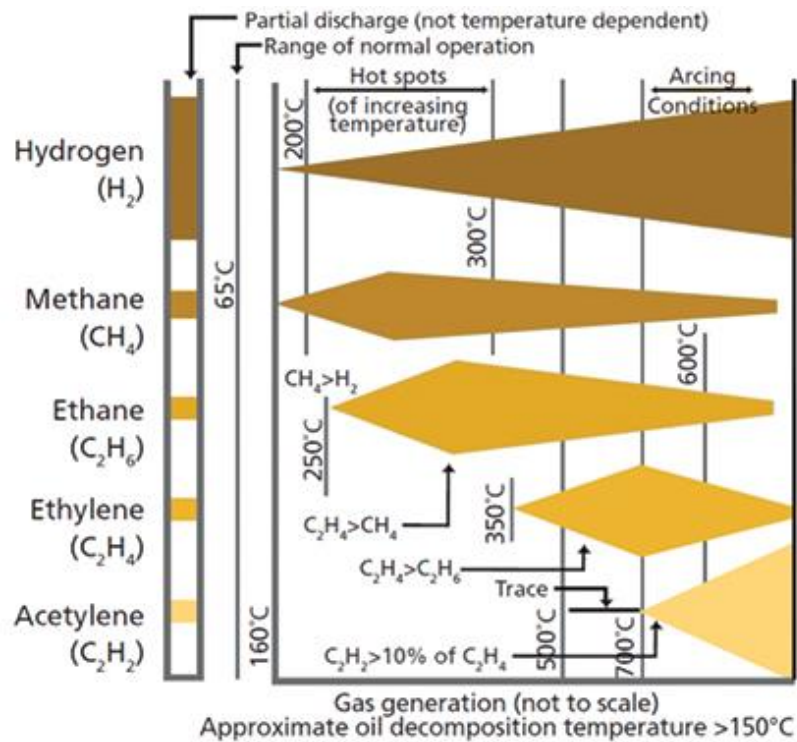
خطاهای حرارتی

همانطور که می دانیم عمده عایق ترانسفورماتور روغن و کاغذ می باشد. عایق روغن ترانسفورماتور در دماهای ۱۵۰-۵۰۰ درجه سانتی گراد تجزیه شده و متناسب با دما، گازهایی با وزن مولکولی کم (نظیر هیدروژن و متان) و همچنین با وزن مولکولی زیاد (نظیر اتیلن و اتان) را تولید می نماید. لذا با تجزیه حرارتی روغن و همچنین تجزیه حرارتی کاغذ سلولز و دیگر عایق های جامد، مونواکسید کربن، دی اکسید کربن و قطرات آب نیز در دماهایی کمتر از دمای تجزیه حرارتی کاغذ سلولز و متناسب با دما تولید می شود. از طرفی عایق کاغذ در مقایسه با روغن در دماهای پائین تری خاصیت عایقی آن افت نموده و در دماهای معمول نیز گازهایی از آن استخراج می شود. نکته قابل توجه این که نسبت دی اکسید کربن به مونواکسید کربن تولیدی در آن می تواند نشان دهنده تجزیه حرارتی سلولز باشد که این نسبت بطور عادی بیشتر از ۷ است. این موضوع که در یک ترانسفورماتور بزرگ پر شده با روغن، در هر نقطه ای که عیبی وجود داشته باشد، روغن به عنوان یک مایع اشباع کننده وجود دارد، حقیقتی با ارزش می باشد. خطاهای داخلی ترانسفورماتور باعث تجزیه روغن و عایق سلولزی ترانسفورماتور گردیده و گازهای مختلفی تولید می کنند. با نمونه گیری از روغن ترانسفورماتور و تجزیه کمی آن توسط گاز کروماتوگرافی می توان شرایط ترانسفورماتور در حال کار را تفسیر نمود و اقدامات آتی را پیشنهاد نمود. این نکته قابل توجه می باشد که مقادیر کمی از گازهای متان، هیدروژن و مونوکسید کربن بر اثر پیرشدگی تولید می گردند. همچنین تجزیه حرارتی سلولز نیز باعث تولید متان، اکسیژن، دی اکسید کربن و مونوکسید کربن می گردد. تجزیه عایق سلولزی در دمای کمتر از 100°C آغاز می گردد. بنابراین عملکرد ترانسفورماتورها در دماهای زیر 90°C مناسب می باشد. اغلب اتان و اتیلن گازهای فلز داغ نامیده شوند. در صورت تولید این گازها و در نبود گاز اسیتیلن معمولاً عیب داخل ترانسفورماتور مربوط می باشد و یا ممکن است یک اتصال نادرست در تپ چنجر و یا در هر جایی از مدار اصلی ترانسفورماتور وجود داشته باشد. همچنین جریانهای سرگردان با برخورد به تانک ممکن است گازهای فلز داغ تولید نمایند. در این صورت الکتریسیته ساکن در آنها جمع شده که می تواند در سطح زمین تخلیه شده و گازهای فلز داغ تولید نماید. جدول ۱ میزان گازهای تولیدی در ترانسفورماتور را به همراه خطاها و مشکلات داخلی آن را نشان می دهد [۲].

جدول ۱- میزان گازهای تولیدی در ترانسفورماتور

گازهای تولیدی	نوع خطا
H ₂	کرونا در روغن
- CO - CO ₂ H ₂	کرونا در سلولز
CH ₄ - C ₂ H ₆	اضافه حرارت در روغن - دمای پایین
C ₂ H ₄ - H ₂ (C ₂ H ₆ - CH ₄)	اضافه حرارت در روغن - دمای بالا
CO ₂ (CO)	اضافه حرارت در سلولز - دمای پایین
CO (CO ₂)	اضافه حرارت در سلولز - دمای بالا
H ₂ - C ₂ H ₂ (C ₂ H ₄ -C ₂ H ₆ - CH ₄)	ارک

خطاهای
الکتریکی
ی به همراه
تخلیه
با شدت
کم



شکل ۱- نمودار تولید گازهای قابل احتراق برحسب دما

تخلیه های با شدت کم همچون تخلیه های الکتریکی و جرقه های کم انرژی ، گاز هیدروژن به همراه مقدار کمی متان تولید می نماید. همچنین شدت این تخلیه ها می تواند اتیلن را نیز افزایش دهد.

خطاهای الکتریکی به‌مراه تخلیه با شدت بالا

شدت تخلیه های الکتریکی، جرقه یا دشارژهای ممتد می تواند در دماهایی از ۷۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی گراد به‌مراه گاز استیلن ایجاد نماید. با توجه به موارد مذکور، ترکیب کاغذ - روغن در ترانسفورماتورها، تحت تاثیر تنشهای حرارتی یا الکتریکی، می توانند گازهای مختلفی را با مکانیزم های خاص تولید کنند. تحت این شرایط، مولکول های هیدروکربنی روغن معدنی، تجزیه شده و به شکل هیدروژن و دیگر انواع هیدروکربنها درمی آیند که اینها می توانند با یکدیگر ترکیب و گازهایی همچون هیدروژن، متان، اتان، اتیلن، استیلن و... غیره تولید نمایند. نقاط داغ در ترانسفورماتورها باعث ایجاد دماهایی در محدوده 200°C تا 300°C می‌گردند.

کروماتوگرافی گازی

اصول

یکی از روش های کروماتوگرافی است که برای بررسی و جداسازی مواد فرار بدون تجزیه شدن آنها، بکار می‌رود. در کروماتوگرافی گازی، فاز گازی یک گاز بی اثر (برای مثال هلیوم، نیتروژن، آرگون) است و به فاز متحرک گاز حامل نیز می‌گویند. فاز ساکن یک جسم جامد جاذب یا لایه نازکی از یک مایع غیر فرار است که به دیواره داخلی ستون یا به صورت پوششی روی سطح گلوله‌های شیشه ای یا فلزی قرار داده شده‌است. در صورتی که فاز ساکن جسم جامد جاذب باشد اصطلاحاً کروماتوگرافی گازی گویند و اگر فاز ساکن مایع غیر فرار باشد آن را کروماتوگرافی گاز مایع گویند. اما هر دو به کروماتوگرافی گازی معروف هستند. در کروماتوگرافی گازی، جداسازی اجزا یک مخلوط متناسب با میزان توزیع اجزا تشکیل دهنده مخلوط بین فاز متحرک گازی و فاز ساکن جامد یا مایع صورت می‌گیرد. در این روش گاز حامل مخلوط را درون ستون حرکت می‌دهد و بین دو فاز در حالت تعادل (گاز-مایع) اجزا تشکیل دهنده مخلوط توزیع می‌شوند؛ بنابراین فاز متحرک اجزا تشکیل دهنده نمونه را به طرف بیرون ستون حرکت می‌دهد و هر مولکولی که با ارتباط سست تر جذب ستون شده‌است، زودتر و جزئی که قدرت جذب بیشتری با ستون دارد، دیرتر از ستون خارج می‌شوند؛ بنابراین، اجزا مخلوط از یکدیگر جدا می‌شوند. کروماتوگرافی گازی برای جداسازی و شناسایی اجزا تشکیل دهنده یک مخلوط از مواد فرار و تجزیه کمی آنها نیز کاربرد دارد [۳].

اجزای تشکیل دهنده

این سیستم دارای قسمت‌های: منبع گازی حامل، سیستم تنظیم‌کننده مقدار گاز، محل تزریق نمونه، ستون کروماتوگرافی، کوره و سیستم تنظیم درجه حرارت محل تزریق، آشکارساز و سیستم شناساگر می‌باشد.

منبع گاز حامل

یک کپسول گاز با فشار زیاد به عنوان منبع گاز کامل استفاده می‌شود. غالباً این گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد می‌باشد اما گازهای دیگری همانند هلیوم، آرگون و دی‌اکسید کربن نیز استفاده می‌شود. در آنالیز گازهای موجود در روغن ترانسفورماتور بدلیل اندازه گیری دو گاز نیتروژن و دی‌اکسید کربن از گاز آرگون به عنوان گاز حامل استفاده می‌شود.

ستون و آون

ستون در داخل آون قرار دارد و در واقع به منزله قلب دستگاه کروماتوگرافی گازی هستند. ستون‌ها دو نوع هستند. ۱- ستون‌های پر شده ۲- ستون‌های مویین. در آنالیز روغن های ترانسفورماتور جهت تعیین مقادیر گاز های یاد شده از ستون های پر شده استفاده می‌شود.

آشکارساز

آشکارسازهای متداول در کروماتوگرافی گازی چهار نوع هستند:

یونش شعله‌ای

هدایت گرمایی

نورسنج

الکترون گیر

در آنالیز روغن به دلیل اندازه گیری گازهای هیدروکربن دار آشکار ساز یونش شعله مورد استفاده قرار می گیرد و برای اندازه گیری هیدروژن اکسیژن و نینروژن از آشکار ساز هدایت گرمایی استفاده می شود.

آشکار ساز یونش شعله

بسیاری از ترکیبات آلی در دمای شعله هیدروژن/ هوا، پیرولیز شده (از هم پاشیدگی یک ترکیب به وسیله ی گرما) و واسطه های یونی و الکترونیایی تولید می کنند که الکتروسیسته را از درون شعله هدایت می کنند. گونه های باردار تولید شده در یک جمع کننده، جمع آوری می شود و سپس جریان الکتریکی حاصل برای اندازه گیری به یک تقویت کننده هدایت می شود. این مطلب اساس کار آشکارساز یونش شعله ای است. گروه های عاملی نظیر کربونیل، الکل، هالوژن و آمین، یون های بسیار کمی تولید می کنند و یا اصلا تولید نمی کنند.

علاوه بر آن ، این آشکارساز به گازهای احتراق ناپذیر از قبیل SO_2 ، H_2O ، CO_2 و NO_x حساس نیست، لذا این آشکارساز برای تجزیه بیشتر نمونه های آلی که شامل آب و اکسیدهای نیتروژن یا گوگرد نیز هستند بسیار مفید است. حساسیت این آشکارساز بالاست و دارای محدوده

عکس العمل خطی بالا و نویز کم می باشد.

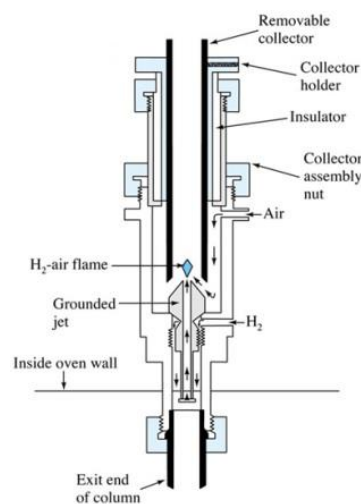
است. یکی از عیب های این آشکارساز این

۲ شمایی از آشکارساز یونش شعله ای می

علاوه بر این به راحتی قابل استفاده

است که نمونه را تخریب می کند. شکل

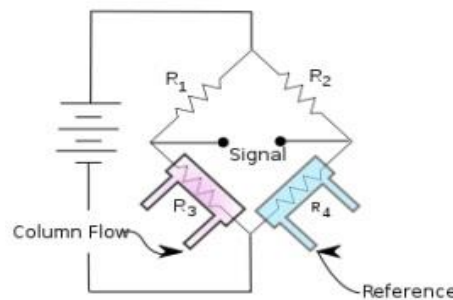
باشد.



شکل ۲ آشکار ساز یونش شعله ای

آشکار ساز هدایت گرمایی

یکی از انواع آشکارساز کروماتوگرافی گازی، آشکارساز TCD می باشد که از دو محفظه کاملاً هم اندازه تشکیل شده که هر یک دارای یک سیم پیچ (پلاتین، طلا یا تنگستن) داغ است. گاز حامل (هیدروژن، هلیوم و یا آرگون) از یکی از سیم پیچ ها عبور نموده و پس از گذر از ستون وارد سیم پیچ دوم می شود که اگر گاز حامل خارج شده از ستون حاوی نمونه نیز باشد در این صورت چون گرما رسانندگی همه ی ترکیبات آلی از هیدروژن، هلیوم و آرگون کمتر است لذا سیم پیچ داغتر شده و مقاومت آن افزایش می یابد که حاصل آن کاهش شدت جریان است در این صورت آشکارساز اختلاف جریان را ثبت نموده و به شکل پیک ظاهر می کند. شکل ۳ شمایی از آشکارساز هدایت گرمایی می باشد.



شکل ۳ شمایی از آشکارساز هدایت گرمایی

استخراج گازهای محلول در روغن

گازهای محلول در روغن بایستی با روشی مناسب که بیشترین میزان استخراج آنها را به دنبال داشته باشد، مورد استخراج قرار گیرند استاندارد تعیین شده برای استخراج گازهای محلول در روغن سه روش متفاوت را پیشنهاد می کند که عبارتند از:

۱- استخراج گاز در خلاء

۲- استخراج با ستون

۳- استخراج در فضای فوقانی

امروز به طور معمول از دو روش استخراج در خلاء و استخراج در فضای فوقانی استفاده می شود زیرا بیشترین بازدهی استخراج، آسوده تر و فارغ از هرگونه تهدید شیمیایی می باشد، روش دوم به همین دلیل کمتر مورد استفاده قرار می گیرد روش سوم که به شکل متداولتری مورد استفاده قرار میگیرد خود به زیر روش های دیگری از قبیل استخراج مستقیم از سرنگ و استخراج از فضای فوقانی در ظروف نمونه انجام میگیرد.

روش های استخراجی مطرح شده در سال ۲۰۱۱ مطالعه ای قرار گرفت نمونه ای استاندارد با غلظت مشخصی از گازهای مورد مطالعه در پایش وضعیت ترانسفورماتور با سه روش مشخص که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است [۴].

جدول ۲ نتایج حاصل از سه روش متفاوت در سه آزمایشگاه متفاوت

غلظت گازها برحسب ppm									تکرار	گازها	آزمایشگاه (روش)
C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂	O ₂	H ₂			
۹	۱۰	۱۰	۳۳	۱۱	۱۰	۶۵۴۰۰	۱۸۰۰۰	۱۰	مقادیر استاندارد	نمونه استاندارد	
۸-۱۰	۹-۱۱	۹-۱۱	-۳۸ ۲۸	۹-۱۳	۹-۱۲	-۶۲۱۰۰ ۶۹۰۰۰	-۱۷۱۰۰ ۱۸۹۰۰	۹-۱۲			دامنه قابل قبول
۹	۹	۱۰	۴۸	۱۲	۱۱	۷۱۴۹۳	۱۹۹۷۷	۱۱	اول	مقادیر استخراج	آزمایشگاه یک (استخراج باسرنگ)
۹	۹	۹	۴۲	GC	بعد	قبل	قبل	میانگین			
۹	۹	۹/۵	۴۵	CO ₂	۱۹۵۹	۲۷۴۰	۲۸۱۲	مقادیر استخراج	آزمایشگاه دو (استخراج در خلاء)		
۱۰	۱۲	۱۱	۳۵	CO	۱۳۹	۱۹۴	۱۵۵	میانگین			
۱۲	۱۲	۱۰	۳۶	CH ₄	۲۸	۱۳۴	۱۱۶	مقادیر استخراج	آزمایشگاه سه (استخراج در خلاء)		
۱۱	۱۲	۱۰/۵	۳۵/۵	C ₂ H ₆	۴۲	۲۶۸	۲۳۱	میانگین			
۶	۶	۷	۶۷	C ₂ H ₄	۳	۱۸	۶	مقادیر استخراج	آزمایشگاه چهار (استخراج در خلاء)		
۴	۲	۳	۴۱	C ₂ H ₂	۰	۲۴	۰	میانگین			
۵	۴	۵	۵۴	H ₂	۲۱	۸۱	۱۶	مقادیر استخراج	آزمایشگاه پنج (استخراج فضای فوقانی)		
۹	۱۰	۹	۳۰	O ₂	۱۸۳۱۴	۱۷۸۱۰	۱۱۱۰۱	میانگین			
۱۰	۱۰	۹	۳۱	N ₂	۷۳۲۴۱	۳۷۸۴۶	۶۷۲۱۰	دوم	آزمایشگاه شش (استخراج فضای فوقانی)		
۹/۵	۱۰	۹	۳۰/۵	۱۴	۹	۷۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۶/۵		میانگین	
۱۰	۱۱	۱۱	۶۱	۱۱	۱۱	۶۱۹۰۰	۱۸۰۰۰	۱۱	اول	مقادیر استخراجی	آزمایشگاه هفت (استخراج فضای فوقانی)
۱۰	۱۰	۱۱	۷۰	۱۱	۱۱	۶۱۳۰۰	۱۷۷۰۰	۱۲	دوم		
۱۰	۱۰/۵	۱۱	۶۵/۵	۱۱	۱۱	۶۱۶۰۰	۱۷۸۵۰	۱۱/۵	میانگین		

نتایج حاصله نشان داد انحراف معیار در روش اندازه گیری مستقیم باسرنگ کمترین انحراف معیار را در مقایسه با دوروش دیگر نسبت به نمونه استاندارد دارد. استفاده از استخراج با سرنگ راحت تر، سریع تر از روش استخراج با خلاء می باشد، اگرچه روش استخراج فضای فوقانی امکان اتومات شدن دارد اما انتقال نمونه از سرنگ به ظرف های مخصوص استخراج علاوه بر صرف زمان امکان آلودگی نمونه و یا از دست رفتن نمونه را به دنبال دارد.

آزمایش بر روی نمونه واقعی

نتایج جاصل از ترانس مورد آزمایش پس از مشاهده نرخ رشد گازهای مورد تحلیل قرار گرفت و اقدامات لازمه انجام پذیرفت و پس از گاز زدایی و تعمیرات دوباره مورد آزمون قرار گرفت، نتایج حاصله در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- میزان غلظت گازهای محلول در روغن برحسب ppm

ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور

در این بخش روش های ارزیابی گازهای اندازه شده جهت تشخیص وضعیت ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می گیرد.

آنالیز گازهای قابل احتراق محلول در روغن

یک راهنمای DGA چهار سطحی مطابق جدول ۴ به منظور طبقه بندی عیوب احتمالی در ترانسفورماتور در استاندارد IEEE ارائه شده است. این راهنما از ترکیب غلظت هر گاز به تنهایی و غلظت کل گازهای قابل اشتعال استفاده می کند. این راهنما در تمام دنیا قابل قبول نبوده و تنها معیاری برای ارزیابی ترانسفورماتورها محسوب می گردد.

مطابق جدول ۳، اگر مجموع گازهای قابل اشتعال محلول در روغن (TDGC) کمتر از محدوده مشخص شده در سطح ۱ باشد در این صورت ترانسفورماتور در وضعیت نرمال قرار دارد. چنانچه TDCG در سطح ۲ قرار گیرد، احتمال بروز خطا در ترانسفورماتور وجود داشته و بنابراین افزایش هر یک از گازهای قابل اشتعال از مقدار تعیین شده در جدول ۳ نیاز به بررسی دارد. قرار گرفتن TDCG در سطح ۳، نشان دهنده تخریب زیاد در روغن و عایق سلولزی بوده و بالطبع سطح افزایش هر گاز قابل اشتعال نیاز به بررسی مجزا و دقیق تر دارد. مقدار TDCG در سطح ۴ نیز بیانگر تخریب شدید روغن و یا عایق سلولزی بوده و ادامه بهره برداری می تواند باعث از کار افتادن ترانسفورماتور و خارج شدن آن از مدار گردد.

در جدول ۳ فرض شده است که هیچ تست DGA قبلی بر روی ترانسفورماتور انجام نشده است یا حتی روند جدیدی از تغییر گازها هم وجود ندارد. اگر DGA های قبلی موجود باشند، باید بازبینی شوند و مشخص شود که آیا وضعیت پایدار است (گازها افزایش چشمگیری ندارند) یا ناپایدار است (گازها افزایش چشمگیری دارند).

قضاوت در مورد وضعیت ترانسفورماتور با توجه به شدت افزایش گازها برای هر ترانسفورماتور خاص منحصر به فرد می باشد. اگر شدت تولید هر یک از گازهای کلیدی بر حسب ppm با مقایسه DGA های فعلی با DGA های قبلی در هر روز و یا مقدار کل گازهای قابل اشتعال محلول بر حسب ppm افزایش ناگهانی یابد، خطایی فعال در ترانسفورماتور وجود دارد. دستورالعمل پیشنهادی بر اساس مقدار کل گازها بر حسب ppm و شدت تولید هر گاز در روز بر حسب ppm در استاندارد ارایه شده است. اگر مقدار هر گاز به تنهایی یا مجموع گازهای قابل اشتعال سطح بالاتری برای ترانسفورماتور ایجاد نماید، در این صورت احتمال وجود خطا در آن سطح بالاتر بوده و ریسک خرابی در آن بیشتر می باشد. برای مثال اگر مقدار TDCG نشان دهد که ترانسفورماتور در سطح ۳ و مقدار یکی از گازها در سطح ۴ قرار داشته باشد، ترانسفورماتور در سطح ۴ می باشد. همیشه باید محافظه کارانه عمل نمود و بدترین حالت را در نظر گرفت مگر خلاف آن ثابت شود. تصمیم گیری هرگز نباید بر اساس تنها یک DGA انجام شود.

جدول ۴- میزان غلظت گازهای محلول در روغن بر حسب ppm

وضعیت	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
سطح ۱	۱۰۰	۱۲۰	۲۵	۵۰	۶۵	۳۵۰	۲۵۰۰	۷۲۰
سطح ۲	-۷۰۰	-۴۰۰	۳۶-۵۰	۵۱-۱۰۰	۶۶-۱۰۰	-۵۷۰	-۴۰۰۰	-۷۲۱

۱۹۲۰	۲۵۰۰	۳۵۱				۱۲۱	۱۰۱	
-۱۹۲۱	-۱۰۰۰۰	-۱۴۰۰	-۱۵۰	-۲۰۰		-۱۰۰۰	-۱۸۰۰	
۴۶۳۰	۴۰۰۱	۵۷۱	۱۰۱	۱۰۱	۵۱-۸۰	۴۰۱	۷۰۱	سطح ۳
۴۶۳۰ <	۱۰۰۰۰ <	۱۴۰۰ <	۱۵۰ <	۲۰۰ <	۸۰ <	۱۰۰۰ <	۱۸۰۰ <	سطح ۴

زیرا نمونه براحتی می تواند در تماس تصادفی با هوا آلوده گردد یا درج برچسب اشتباهی می تواند به هنگام نمونه گیری رخ داده باشد و... اگر از روی DGA مشخص گردید که عیبی در ترانسفورماتور وجود دارد اولین کار، گرفتن نمونه های دیگر برای مقایسه است.

آنالیز گازهای آزاد قابل احتراق

نرخ تولید گاز متناسب با انرژی آزاد شده در حین خطا می باشد. در صورتی که انرژی آزاد شده در حین خطا زیاد باشد (قوس الکتریکی)، می تواند باعث رشد زیاد گاز و در نتیجه عملکرد رله بوخهلتس گردد. حبابهای گاز ایجاد شده به سرعت به رله بوخهلتس رسیده و کمتر در روغن حل می شوند. در این صورت گازهای جمع شده در رله در حالت موازنه با گازهای حل شده در روغن نمی باشند. هر چند اگر این گازها برای مدت در رله باقی بمانند برخی از آنها در روغن حل می شوند که میزان حل شدن آنها بستگی به نوع گاز جمع شده در رله دارد. به عنوان مثال استیلن که بر اثر قوس الکتریکی به مقدار زیاد تولید می شود قابلیت حلالیت بالایی در روغن داشته و ما را به نتایج گمراه کننده رهنمون می سازد. در کل نحوه تجزیه و تحلیل گازهای جمع شده در رله بوخهلتس مشابه آنالیز گازهای حل شده در روغن می باشد. در هر صورت اگر رله عمل کرده و گاز به مقدار زیاد در آن جمع شده باشد، باید انتظار یک خطای جدی را داشت و از روی آنالیز این گازها باید به نوع خطا پی برد. رله بوخهلتس ممکن است پس از چند روز گرم و سپس کاهش شدید دمای هوا در شب، در نتیجه تجمع هوا به اشتباه اعلام آلام کند. از این رو لازم است که از گاز و روغن داخل رله و روغن داخل مخزن اصلی به سرعت نمونه برداری شود. اگر تجمع گاز در رله تدریجی و آهسته باشد، آنالیز گازهای حل شده در روغن بسیار سودمندتر از آنالیز گازهای آزاد خواهد بود. اگر در ترانسفورماتور تحت بارگیری مقدار گازهای آزاد قابل احتراق یا رشد آنها افزایش قابل ملاحظه ای یافت، احتمالاً خطایی در داخل ترانسفورماتور وجود دارد. فواصل زمانی جهت نمونه گیری و اقدامات لازم براساس گازهای آزاد قابل احتراق در استاندارد مشخص شده است [۵].

روش گازهای کلیدی

با توجه به اطلاعات آماری بدست آمده در خصوص تجزیه حرارتی روغن، عایقهای سلولزی، گازهای استخراج شده و بر اساس عیوب مختلفی که بطور معمول بر روی ترانسفورماتور رخ می دهد می توان تعیین نوع خطا را با توجه به مقادیر گازها در دماهای مختلف پایه ریزی کرد. برخی از گازها بسته به نوع خطا در محدوده مشخصی غالب و شاخص می شوند. اینگونه گازهای کلیدی محسوب شده و به شرح زیر مشخصه عیب مربوط به خود هستند. در بکارگیری این روش از مقادیر حالت اول روش کارگیری TDCG بعنوان شاخص کلیدی استفاده می شود.

بکارگیری روشهای نسبت گازها

بکارگیری نسبت گازها برای شناسایی یک عیب احتمالی، یک روش تجربی بر اساس کارهای تحقیقاتی و صنعتی متنوع انجام شده روی تعداد زیادی از ترانسفورماتورهاست که اولین بار توسط دورنبرگ و راجرز بنیان گذاری گردید. در این روش بر اساس تجزیه حرارتی روغن و عایق سلولزی، نسبتهای گازهای کلیدی به عنوان شاخص های عیب، مورد استفاده قرار می گیرند. این روشها شامل روش دورنبرگ، راجرز، مثلث دوال که به هر کدام به اختصار پرداخته شده است.

روش درنبرگ

استفاده از نسبت گازها برای مشخص کردن خطای احتمالی یک روش تجربی بوده که به مهارت شخصی بستگی دارد. در روش دورنبرگ نسبت گازهای قابل احتراق کلیدی CH_4/H_2 ، C_2H_2/C_2H_4 ، C_2H_2/CH_4 و C_2H_6/C_2H_2 به عنوان معیاری جهت شناسایی عیب بکار می رود. مقادیر این گازها ابتدا با یک مقادیر حداقلی مقایسه شده تا از وجود عیب در دستگاه و مقدار کافی گازهای تولید شده جهت استفاده از نسبتها اطمینان حاصل شود سپس نسبتها با مقادیر ذکر شده در جدول ۵ مقایسه شده تا عیب به وجود آمده شناسایی شود [۶]. جدول ۶ حداقل مقدار گازها را برای استفاده از روش درنبرگ نشان می دهد.

جدول ۵ نسبت گازهای کلیدی، در روش دورنبرگ برای گازهای حل شده

عیب احتمالی	نسبت اول $R_1 = CH_4/H_2$	نسبت دوم $R_2 = C_2H_2/C_2H_4$	نسبت سوم $R_3 = C_2H_2/CH_4$	نسبت چهارم $R_4 = C_2H_6/C_2H_2$
تخریب حرارتی	> 1	< 0.75	< 0.3	> 0.4
کرونا	< 0.1	ناچیز	< 0.3	> 0.4
قوس الکتریکی	> 0.1	> 0.75	> 0.3	< 0.4

جدول ۶ حداقل مقادیر گازهای محلول

گاز کلیدی	حداقل مقدار گاز (ppm)
هیدروژن	۱۰۰
متان	۱۲۰
مونوکسید کربن	۳۵۰
استیلن	۳۵
اتیلن	۵۰
اتان	۶۵

روش راجرز

روش راجرز از نسبتهای CH_4/H_2 ، C_2H_2/C_2H_4 و C_2H_4/C_2H_6 استفاده می کند. برای اینکه عیب یابی معتبر باشد، گازهای مورد استفاده در نسبتها باید حداقل ۵۰ ppm برای هیدروژن و حداقل ۱۰ ppm برای سایر گازها باشد. هرچقدر مقدار گازها بیشتر باشد تشخیص نوع خطا با روش نسبت راجرز مطمئن تر خواهد بود اگر گاز استفاده شده در مخرج یک کسر صفر باشد

یا در نتایج DGA مشخص نشده باشد، از حد مشخص شده برای آن گاز در مخرج کسر استفاده می شود. در جدول ۷ مقادیر نسبت‌های گاز مورد نظر بر حسب نوع خطا داده شده اند [۷].

جدول ۷ نسبت گازهای کلیدی روش راجرز

نوع عیب	C_2H_2/ C_2H_4	CH_4/ H_2	C_2H_4/ C_2H_6
نرمال	$< 0/1$	$0/1-1/0$	$< 1/0$
تخلیه کم انرژی	$< 0/1$	$< 0/1$	$< 1/0$
قوس الکتریکی	$0/1-3/0$	$0/1-1/0$	$3/0 <$
اضافه باری کم دما	$< 0/1$	$0/1-1/0$	$1/0-3/0$
خطای حرارتی	$< 0/1$	$1/0 <$	$1/0-3/0$
خطای حرارتی بیش از ۷۰۰ درجه سانتی گراد	$< 0/1$	$1/0 <$	$3/0 <$

روش مثلث دوال

اساس این روش استفاده از سه گاز متان (CH_4)، اتیلن (C_2H_4) و استیلن (C_2H_2) می باشد. این روش دقیق بوده و درستی آن در طول سال‌ها اثبات شده و روز به روز استفاده از آن رایج ترمی شود. برای استفاده از مثلث دوال که در شکل ۴ نشان داده شده است ابتدا باید با استفاده از روش IEEE و یا جدول ۷ تعیین نمود که عیبی در ترانس وجود دارد یا خیر. حداقل یکی از گازهای هیدروکربن و یا هیدروژن باید در وضعیت سوم IEEE و در نرخ افزایش G2 از جدول ۷ قرار داشته باشند. برای استفاده از جدول ۷ بدون روش IEEE، حداقل یکی از گازها باید L1 یا بالاتر و نرخ تولید حداقل آن در G2 باشد. حدود L1 و نرخ‌های تولید گاز از جدول ۷ قابل اطمینان تر از روش IEEE می باشند. با اینحال هر دو روش برای تایید وجود عیب باید مورد بررسی قرار بگیرند [۸].

زمانی که خطایی وجود دارد، مجموع گازهای مثلث دوال را محاسبه کرده و درصد هر یک از گازها تعیین می شود. با مشخص کردن درصد گازها بر روی اضلاع مثلث و تعیین نقطه تلاقی آنها، ناحیه مورد نظر مشخص و در نتیجه نوع عیب تعیین می گردد. انواع عیوب قابل تشخیص به صورت زیر می باشند:

- خطای حرارتی ۳۰۰ درجه سانتی گراد – (T1)

تخلیه جزئی (PD)

- خطای حرارتی مابین ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد (T2)

- خطای حرارتی بزرگتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد (T3)

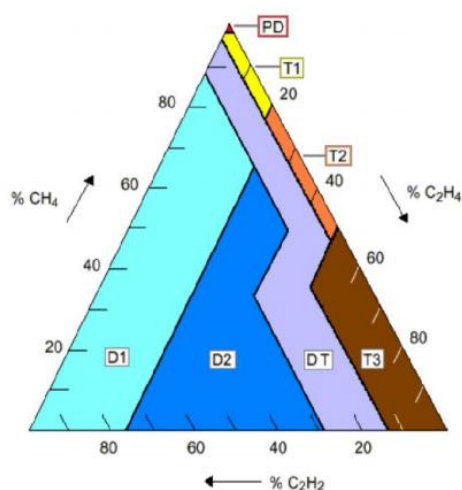
- جرقه های کم انرژی (D1)

- قوس های پر انرژی (D2)

- ترکیبی از خطاهای حرارتی و الکتریکی (DT)

جدول ۸ نرخ تولید گاز

G2	G1	L1	گازها
۵۰	۱۰	۱۰۰	هیدروژن
۳۸	۸	۷۵	متان
۳	۳	۳	استیلن
۳۸	۸	۷۵	اتیلن
۳۸	۸	۷۵	اتان
۳۵۰	۷۰	۷۰۰	مونوکسید کربن
۳۵۰۰	۷۰۰	۷۰۰۰	دی اکسید کربن



شکل ۳ مثلث دو ال

نتیجه گیری

در این مقاله به اهمیت پایش وضعیت در تجهیزات توزیع برق اشاره شد، از عوامل و خطاهایی که منجر به تولید گاز در ترانسفورماتورها یاد شد، به اصول کروماتوگرافی گازی و روش های اندازه گیری گازهای محلول در روغن و روش های ارزیابی متداول برای تجزیه و تحلیل پرداخته شد.

منابع

[1] M. Dual, "A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers," IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2002, Vol.18, No.3, pp.8-17

- [2] M. Dual and A. DePablo, "Interpretation of Gas-in-Oil Analysis using new IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases," IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2001, Vol.17, No.2, pp.31-41.
- [3] A. Skoog, Donald M. West, F. James Holler and Stanley R. Crouch Fundamentals of Analytical Chemistry
- [4] N.Lelekakis "Comparison of Dissolved Gas-in-Oil Analysis Methods Using a Dissolved Gasin-Oil Standard. IEEE Electrical Insulation Magazine" · September 2011, Vol. 27, No. 5
- [5] IEEE Std, "IEEE Guide for the interpretation of Gases Generated in OilImmersed Transformers," IEEE Std C57.104-1991.
- [6] IEC Publication 60599, "Interpretation of the Analysis of Gases in Transformers and other Oil-Filled Electrical Equipment in Service", 1999.
- [7] R.R. Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, using Gas in Oil Analysis," IEEE Transactions on Electrical Insulation, October 1978, Vol.13, No.5, pp.349-354.
- [8] M. Dual, "Dissolved Gas Analysis: It can save your transformer," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.5, No.6, pp.22-27, 1989.