

بررسی و مطالعه تستهای گازکروماتوگرافی و کنترل کیفی ۳۰۰ دستگاه ترانسفورماتور صنایع کشور

محمد مرادی^۱ و^۳

احمد غلامی^۲

۱- موسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران

۲- دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشگاه رازی کرمانشاه

کلمات کلیدی: عیب یابی ترانسفورماتورهای قدرت، گازکروماتوگرافی، تسه‌های کنترل کیفی

گازکروماتوگرافی یک دستگاه ترانسفورماتور نیز بررسی و نتایج آن با واقعیت مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۱- مقدمه

اهمیت ترانسفورماتورهای قدرت و نقش آنها در سیستم‌های کارخانجات صنعتی و شبکه بر کسی پوشیده نیست. این مسئله را می‌توان از سه جنبه قابلیت اطمینان سیستم، هزینه اقتصادی و امنیت پرسنل در تجهیزات مجاور بررسی نمود. تخریب ترانسفورماتور و پیری آنها می‌تواند موجب خاموشی سیستم برق و یا صرف هزینه‌های اقتصادی برای خرید مجدد یک ترانسفورماتور شود. همچنین انفجار ترانسفورماتور می‌تواند باعث صدمه جدی به تجهیزات اطراف و پرسنل گردد. لذا نگهداری و مراقبت وضعیت ترانسفورماتورها مخصوصاً آنهايي

چکیده: روغن از جمله مهمترین مواد عایقی بکار رفته

در ترانسفورماتورهای قدرت است که وظایف متعددی از جمله وظیفه عایقی و خنک‌کنندگی را ایفا می‌کند. علاوه بر وظایف فوق از روغن ترانسفورماتورهای قدرت می‌توان به منظور عیب‌یابی و ارزیابی وضعیت این دستگاهها نیز استفاده نمود. تستهای گازکروماتوگرافی به منظور تحلیل عیب احتمالی و تستهای کنترل کیفی به منظور ارزیابی روغن اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌کنند. این مقوله به تشریح این مطالب و پیشرفتهای اخیر در این زمینه می‌پردازد. در این مقاله با بررسی نتایج گازکروماتوگرافی، تستهای کنترل کیفی و فورفورال بیش از ۳۰۰ دستگاه ترانسفورماتور موجود در شبکه برق کشور، پارامترهای مختلف و همچنین ارتباط آنها با همدیگر مطالعه می‌شود. در انتها یک مورد مطالعه عملی در مورد آنالیز

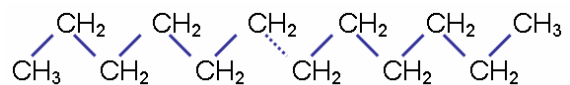
که زمان بالایی از عمر آنها گذشته است در درجه اول اهمیت قرار دارد. به منظور کنترل وضعیت و بهره برداری بهتر از ترانسفورماتورها، مخصوصاً ترانسفورماتورهای پیر، تستهای متعددی پیشنهاد شده است که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱ - آنالیز گازکروماتوگرافی

۲ - تستهای کنترل کیفی روغن

۳- اندازه گیری فورفورال

با توجه به اینکه ملکول روغن از ترکیبات هیدروکربن ساخته شده است حرارت یا شکست الکتریکی می تواند باعث شکست ملکولهای روغن و کاغذ و تولید گازهای قابل احتراقی مانند اتیلن، اتان، متان، استیلن، گاز مونو اکسید کربن و دی اکسید کربن شود. در شکل (۱) نمونه ای از زنجیره هیدروکربنی مربوط به ملکول روغن پارافینیک دیده می شود. با اندازه گیری و تحلیل مقادیر گازهای به وجود آمده میتوان اطلاعات ارزشمندی از خطاهای به وجود آمده در داخل ترانسفورماتور به دست آورد. به چنین تحلیلهای در اصطلاح آنالیز گازکروماتوگرافی می گویند. در کشورهای مختلف که استانداردهای مختلف نوشته شده است با نمونه برداری و گازکروماتوگرافی ترانسفورماتورهای مختلف حدود معمول برای مقادیر گازهای مختلف شناخته شده است. در این مطالعه نیز سعی بر آن است که حدود معمول برای مقادیر مختلف گازها در ترانسفورماتورهای سالم صنایع مختلف ایران مشخص شود.



شکل (۱) زنجیره مربوط به ملکول روغن پارافینیک

علاوه بر تستهای گازکروماتوگرافی، لازم است که وضعیت روغن نیز همواره تحت نظر باشد زیرا پیری و تخریب عایق روغنی اثرات جبران ناپذیری بر ترانسفورماتور دارد. از جمله مهمترین فاکتورهای لازم جهت ارزیابی وضعیت روغن می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- ولتاژ شکست (Breakdown Voltage)

۲- اسیدیته (Acidity)

۳- کشش سطحی (IFT)

۴- مقدار آب (Water Content)

۵- ویسکوزیته (viscosity)

۶- نقطه ریزش و نقطه اشتعال (poor point and flash point)

۷- ضریب تلفات عایقی (DDF)

با توجه به پیشنهاد استاندارد IEC599 مبنی بر انجام تستهای فورفورال زمانی که مقدار مونو اکسید کربن داخل روغن ترانسفورماتور نشان دهنده احتمال وجود خطای عایق کاغذی است، جدیداً در برخی مراکز ارزیابی وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت این تست نیز انجام می شود.

برای حفاظت از صدمات جدی به ترانسفورماتور لازم است که تستهای فوق الذکر به همراه تستهای گازکروماتوگرافی بصورت پریودیک و منظم انجام شده و با کمک گرفتن از افراد خبره در تحلیل نتایج تستها، اقدامات لازم انجام شود.

۲- مشخصات مربوط به ترانسفورماتورهای مورد

مطالعه

ترانسفورماتورهایی که داده های آنها مورد بررسی واقع شده است مربوط به شرکتها و صنایع مختلف کشور می باشند که به عنوان نمونه میتوان به صنایع فولاد سازی، صنایع سیمان، صنایع پتروشیمی، نیروگاهها، برق های منطقه ای اشاره نمود. لیست تعدادی از ترانسفورماتورهای مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است. میانگین عمر این ترانسفورماتورها ۲۰ سال بوده و در میان آنها ترانسفورماتورهایی با عمر حداقل ۴ سال و حداکثر ۴۴ سال دیده می شوند. همچنین محدوده سطح ولتاژها از ۳/۳ کیلوولت تا ۴۰۰ کیلو ولت را دارا می باشند.

بسیاری از ترانسفورماتورهای بررسی شده ترانسفورماتورهای قدرت معمولی و در چندین مورد هم ترانسفورماتورهای خاص

مانند ترانسفورماتورهای کوره و ترانسفورماتورهای یکسو ساز بوده اند.

جدول (۱) تعدادی از ترانسفورماتورهای مورد مطالعه

ردیف	شرکت	تعداد ترانسفورماتورها
۱	سیمان بهبهان	۳۰
۲	مس کرمان	۳۰
۳	پتروشیمی اراک	۳۰
۴	سیمان آبیک	۳۰
۵	فولاد مبارکه اصفهان	۵۹
۶	فولاد خوزستان	۳۶

۳- ارتباط پارامترهای مختلف روغن

ترانسفورماتورهای تست شده در بسیاری از موارد تمامی تستهای کنترل کیفی و تستهای گازکروماتوگرافی و فورفورال روی آنها انجام شده است. در بعضی از موارد نیز با توجه به عدم نیاز به انجام بعضی تستها، آزمایشات بصورت کامل انجام نشده اند. در هر صورت با مقایسه پارامترهای مختلف موجود در ترانسفورماتورهای مختلف می توان اطلاعات ارزشمندی از آنها را به دست آورد.

۴- گازهای محلول در روغن

در میان تکنیکهای مختلف عیب یابی ترانسفورماتورهای قدرت آنالیز گازکروماتوگرافی برای آشکار سازی انواع خطاها مقبولیت فراوانی یافته است. گازهای محلول در روغن در اثر تخریب روغن عایقی و یا انواع کاغذهای موجود در ترانسفورماتور به وجود می آیند. مهمترین گازهای به وجود آمده در داخل ترانسفورماتور در اثر خطا، شامل گازهای زیر می باشند:

- گازهای هیدروکربن: متان (CH₄)، اتان (C₂H₆)، اتیلن (C₂H₄)، استیلن (C₂H₂) و هیدروژن (H₂).
- اکسیدهای کربن: مونو اکسید کربن (CO) و دی اکسید کربن (CO₂).

- گازهای موجود در هوا: نیتروژن (N₂) و اکسیژن (O₂)

گازهای متان و هیدروژن بر اثر خطاهای با انرژی پایین به وجود می آیند و گازهای اتیلن و اتان در اثر داغ شدن یک فلز داخل ترانسفورماتور تشکیل می شوند. معمولاً این دو گاز را گازهای فلز داغ می نامند. گاز استیلن فقط در دماهای بسیار بالا که در هنگام وقوع قوس الکتریکی قوی به وجود می آید، ظاهر می شود. مقادیر کوچکی از این گاز نشان دهنده قوس الکتریکی در داخل ترانسفورماتور می باشد [۲]. مقدار میانگین استیلن در داخل ترانسفورماتورهای تست شده بجز چند مورد که دارای خطا بوده اند تقریباً صفر بوده است. در ترانسفورماتورهای سالم دارای OLTC ممکن است مقادیر گاز استیلن به علت ارتباط محفظه OLTC و تانک اصلی ترانسفورماتور به وجود آید. در این حالت مقدار استیلن موجود در روغن دارای مقدار بسیار بیشتری نسبت به هیدروژن می باشد. هرگاه مقدار استیلن داخل روغن در حال افزایش باشد، نشان دهنده خطای جدی در ترانسفورماتور می باشد و به منظور جلوگیری از بروز خطای حاد، ترانسفورماتور باید از مدار خارج شود. به منظور عیب یابی ترانسفورماتور توسط شخص متبحر لازم است که مقادیر نرمال و نوعی گازهای مختلف در ترانسفورماتور سالم شناخته شود. بر این اساس در استانداردهای مختلف با اندازه گیری گازهای محلول در روغن ترانسفورماتورهای سالم شبکه این محدوده ها تعیین شده اند. به عنوان مثال استاندارد IEEE و استاندارد IEC هر کدام مطابق جدول (۲) مقادیری را به عنوان مقادیر طبیعی و نرمال ترانسفورماتور در حال کار تعیین نموده اند. مطابق استاندارد IEC ۹۰٪ ترانسفورماتورهای موجود در شبکه دارای مقادیر گازهای نرمال کمتر از مقادیر جدول (۲) می باشند [۴].

معمولاً گازهای مونو اکسید کربن و گاز دی اکسید کربن به علت تخریب عایق کاغذی ترانسفورماتور به وجود می آیند. مقادیر معمول گازهای مونو اکسید کربن و دی اکسید کربن برای ترانسفورماتورهای سالم در استاندارد IEEE، ۳۵۰ ppm

جدول (۲) مقادیر مجاز گازهای محلول در روغن بر حسب ppm

گاز	IEEC	IEEE
هیدروژن (H2)	۶۰-۱۵۰	۱۰۰
متان (CH4)	۴۰-۱۱۰	۱۲۰
مونو اکسید کربن (Co)	۵۴۰-۹۰۰	۳۵۰
دی اکسید کربن (Co2)	۵۱۰۰-۱۳۰۰۰	۲۵۰۰
استیلن (C2H2)	۳-۵۰	۳۵
ایتیلن (C2H4)	۶۰-۲۸۰	۵۰
اتان (C2H6)	۵۰-۹۰	۶۵

و ۲۵۰۰ ppm می باشند. مقادیر مشابه در استاندارد IEC برابر ۹۰۰ ppm و ۱۳۰۰۰ ppm مشخص شده اند.

۵- مقدار گاز در داخل ترانسفورماتورهای باتنفس

با اندازه گیری گازهای موجود در ترانسفورماتورهای مختلف تست شده مقادیر ۹۰٪ برای این ترانسفورماتورها مطابق جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، نزدیکی بسیار زیادی بین این مقادیر و مقادیر عنوان شده در استاندارد IEC وجود دارد. تنها تفاوت موجود، در مقدار گاز اتان می باشد. در ترانسفورماتورهای نمونه گیری شده این گاز دارای مقادیر بیشتری می باشد.

جدول (۳) مقادیر ۹۰٪ گازهای محلول در روغن بر حسب ppm

گاز	مقدار ۹۰٪ گاز
هیدروژن (H2)	۱۲۸
متان (CH4)	۱۱۶
مونو اکسید کربن (Co)	۷۵۰
دی اکسید کربن (Co2)	۶۳۸۷
استیلن (C2H2)	۱
ایتیلن (C2H4)	۶۶
اتان (C2H6)	۲۰۹

۶- پارامترهای کنترل کیفی ترانسفورماتور

پارامترهای کنترل کیفی ترانسفورماتور را می توان به دو دسته الکتریکی و شیمیایی تقسیم بندی نمود:
پارامترهای الکتریکی مانند ضریب تلفات عایقی، مقاومت عایقی، ولتاژ شکست روغن در طول کارکرد ترانسفورماتور نباید از محدوده های مجاز تجاوز نمایند [۱].

برخلاف خصوصیات الکتریکی روغن، خصوصیات شیمیایی آن می تواند در محدوده وسیع تغییر نماید و در صورت تجاوز پارامترها از محدوده های مجاز، ترانسفورماتور هنوز ممکن است در سرویس بماند. در هنگام خروج ترانسفورماتور از مدار به هر علتی می توان با جایگزینی و یا تصفیه روغن خصوصیات از دست رفته روغن ترانسفورماتور را به آن بازگرداند. در این حالت نیز لازم است که این پارامترها برای کنترل وضعیت روغن تست شوند. این مشخصات شامل چگالی، ویسکوزیته، کشش سطحی روغن، نقطه اشتعال، اسیدیته، مقدار مواد آنتی اکسیدان، ذرات معلق و رنگ روغن می باشند. جدول (۴) مقادیر مجاز مجاز برای روغن نو (مطابق استاندارد IEC296) و روغن کارکرده (مطابق استاندارد IEC422) برای ترانسفورماتورهای با ولتاژ کمتر از ۷۲ کیلوولت (را نشان میدهد).

جدول (۴) مقادیر مجاز پارامترهای مختلف

پارامتر	مقدار مجاز روغن نو (IEC296)	مقدار مجاز روغن کارکرده (IEC422)
ولتاژ شکست (kV)	۷۰	۳۰
اسیدیته (mgKOH/gr)	۰/۰۱	۰/۳
ضریب تلفات عایقی در ۹۰ °C	۰/۰۰۵	۰/۵
کشش سطحی (mN/mm)	۴۰	۲۲
مقدار آب در ۲۰ °C (ppm)	۳۰	۲۵
ویسکوزیته (Cst)	حداکثر ۱۲	-
نقطه اشتعال (°C)	حداقل ۱۳۵	تغییر کمتر از ۱۰ درجه از مقدار اولیه

۱-۶ ولتاژ شکست و مقدار آب

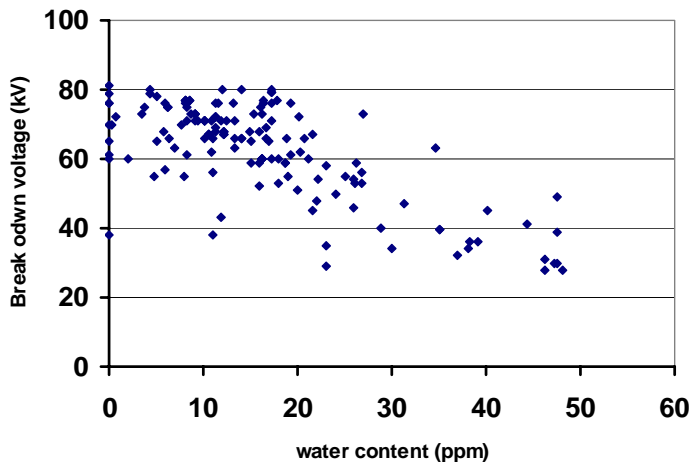
ولتاژ شکست از جمله پارامترهای مهم روغن می باشد که میزان قدرت عایقی آن را نشان می دهد. این پارامتر متاثر از مقدار آب موجود در روغن، ذرات معلق و دمای تست می باشد. ولتاژ شکست روغن نو بعد از فیلتر باید بیشتر از ۷۰ کیلوولت و در هنگام کار ترانسفورماتور (برای ترانسفورماتورهای قدرت کمتر از ۷۲ کیلوولت) بیشتر از ۳۰ kV باشد. با توجه به متاثر بودن ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور از مقدار آب محلول در آن در صورت کاهش مقدار ولتاژ شکست روغن از مقادیر مجاز، روغن ترانسفورماتور حتماً باید تصفیه فیزیکی شود.

یکی از مهمترین دلایل کاهش ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتور آب محلول در آن می باشد. افزایش مقدار آب در داخل ترانسفورماتور ممکن است به خاطر مشکلات هنگام ساخت و یا طراحی نامناسب سیستم عایقکاری رطوبتی ترانسفورماتور باشد. علاوه بر منابع بیرونی، ممکن است عمده آب تولیدی در ترانسفورماتور ناشی از پیری کاغذ و یا اکسیداسیون روغن ترانسفورماتور باشد. اندازه گیری رطوبت آب روغن ترانسفورماتور به کمک روش کارل فیشر و مطابق استاندارد (IEC 60814) انجام می شود. در شکل (۲) مقدار ولتاژ شکست روغن ترانسفورماتورهای تست شده بر حسب مقدار آب محلول در روغن آنها نشان داده شده است. افزایش آب محلول در روغن باعث کاهش ولتاژ شکست روغن می شود. کاهش ولتاژ شکست ممکن است دلایل دیگری غیر از مقدار آب داشته باشد که این مسئله در شکل (۲) مشخص است.

۲-۶ میزان اسیدیته و کشش سطحی

اسیدی شدن روغن ناشی از پیری عایق کاغذی و روغن می باشد و این مسئله روند پیری را تسریع می نماید. مقدار اسیدیته روغن ترانسفورماتور در حین کار (برای ترانسفورماتورهای

قدرت با ولتاژ کمتر از ۷۲ کیلوولت) نباید از mgKOH/gr ۰/۳ بیشتر شود [۶] حتی مقادیر نزدیک به این مقدار هم ممکن است باعث تخریب و خوردگی عایق کاغذی ترانسفورماتور شود.



شکل (۲) تاثیر ولتاژ شکست روغن از مقدار آب موجود در روغن

برای حذف اسیدیته لازم است که روغن ترانسفورماتور تعویض و یا تصفیه شیمیایی شود.

از دیگر ملاکهای مشخص کننده پیری روغن ترانسفورماتور، کشش سطحی آن است. روغنهای کهنه و مستعمل دارای کشش سطحی بسیار کمتری نسبت به روغنهای نو می باشند. کشش سطحی روغن ترانسفورماتور در حال کار مطابق [۶] باید از ۲۲ mN/m بیشتر باشد. معمولاً روغنهای نو دارای مقادیر کشش سطحی بالاتر از ۴۰ mN/m می باشند.

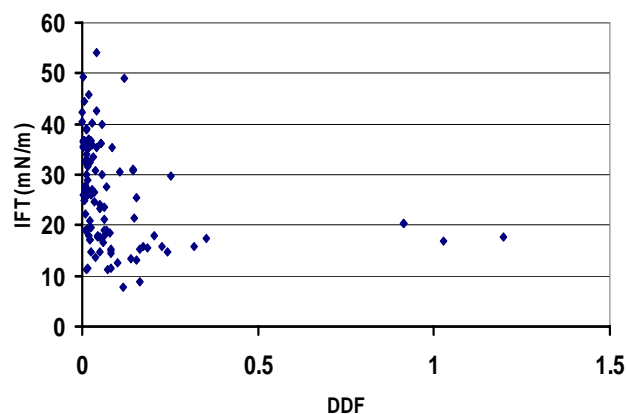
کشش سطحی و میزان اسیدیته معیاری از پیری روغن ترانسفورماتور می باشند. با افزایش عمر روغن ترانسفورماتور معمولاً انتظار می رود که اسیدیته و کشش سطحی به ترتیب افزایش و کاهش یابند. در شکل (۳) ارتباط بین مقادیر کشش سطحی و اسیدیته ترانسفورماتورهای مورد مطالعه نشان داده شده است.

با مطالعه داده های مربوط به روغن ترانسفورماتورهای قدرت متوجه می شویم که ترانسفورماتورهایی اکنون در مدار هستند

۳-۶ ضریب تلفات عایقی و کشش سطحی

شکل (۵) ارتباط بین داده های مربوط به کشش سطحی و ضریب تلفات عایقی ترانسفورماتورها را نشان می دهد. ضریب تلفات عایقی ترانسفورماتور ارتباط نزدیکی با مقدار آب موجود در روغن، مقدار ذرات معلق در آن و همچنین ترکیبات قطبی داخل روغن دارد.

با توجه به شکل (۵) بدیهی است که روغن ترانسفورماتور ممکن است ضریب تلفات عایقی پایین و نیز کشش سطحی پایین داشته باشد ولی در صورت افزایش ضریب تلفات عایقی به احتمال زیاد کشش سطحی روغن پایین خواهد بود.



شکل (۵) ارتباط کشش سطحی روغن با ضریب تلفات عایقی

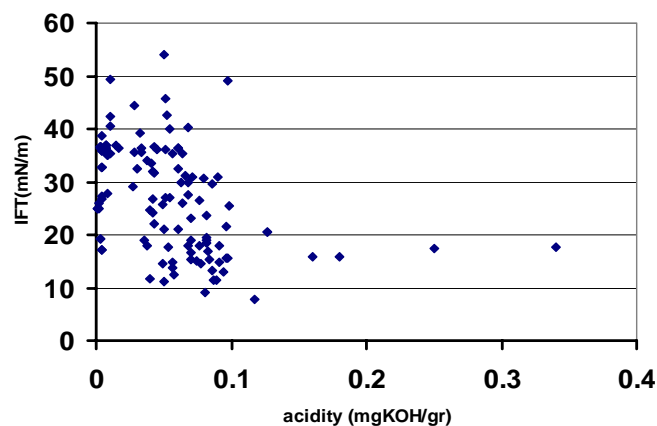
۴-۶ مقدار گرانیوی و نقطه اشتعال

گرانیوی روغن معیاری برای سنجش قدرت خنک سازی روغن ترانسفورماتور قدرت می باشد که رابطه آن با سرعت چرخش روغن در ترانسفورماتور مطابق رابطه (۱) می باشد.

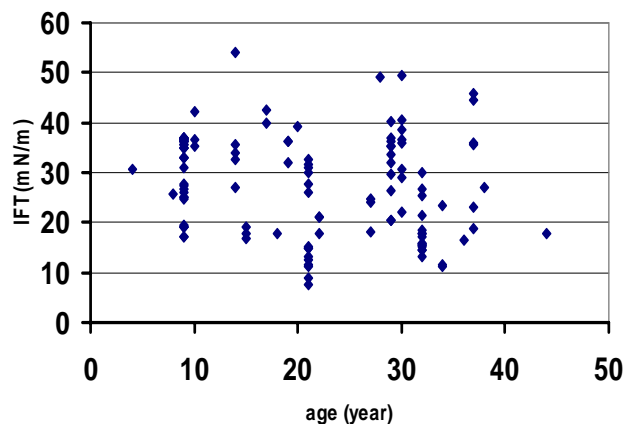
$$W = f \frac{T_2 - T_1}{V} \quad (1)$$

که در آن W سرعت شارش روغن، f یک ضریب ثابت و V مقدار گرانیوی در دمای مربوطه و T_1 و T_2 دمای روغن در بالا و کف تانک ترانسفورماتور مطابق شکل (۶) می باشند. با توجه به این رابطه هر چه مقدار گرانیوی روغن ترانسفورماتور پایین باشد، سرعت چرخش بهتر بوده و باعث خنک کنندگی بهتر ترانسفورماتور می شود. گرانیوی روغن با افزایش دما پایین

که دارای مقادیر کشش سطحی پایتتر از 10 mN/m می باشند و هنوز به صورت نرمال کار عادی خود را انجام می دهند. همچنین میانگین کشش سطحی ترانسفورماتورها 29 mN/m می باشد که در مقایسه با مقدار مجاز (22 mN/m) در استاندارد IEC مقدار بالاتری را نشان می دهد. در شکل (۴) مقدار کشش سطحی ترانسفورماتور بر حسب سن آن نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد هیچگونه ارتباطی بین سن ترانسفورماتور و مقدار کشش سطحی آن وجود ندارد. بدین معنی که ممکن است ترانسفورماتوری با عمر پایین (کمتر از ۱۰ سال) دارای کشش سطحی روغن بسیار پایتتری نسبت به ترانسفورماتور دیگر با عمر بالا باشد.

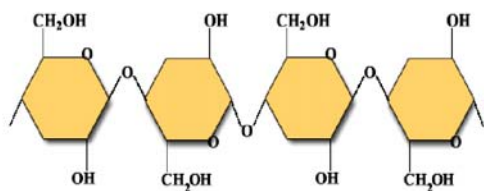


شکل (۳) ارتباط کشش سطحی روغن با اسیدیته



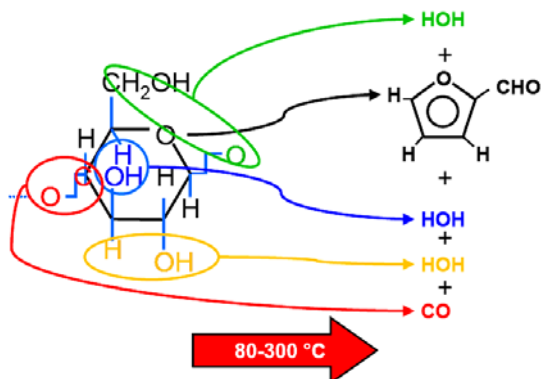
شکل (۴) ارتباط کشش سطحی روغن با سن ترانسفورماتور

تخریب شود دیگر ترانسفورماتور قابل بازیافت نیست. در این حالت ترانسفورماتور به انتهای عمر خود رسیده است.



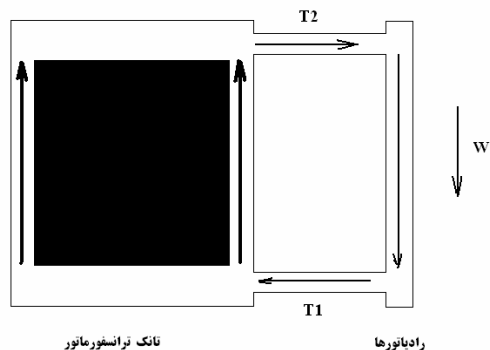
شکل (۸) زنجیره های سلولز عایق کاغذی

عایق کاغذی یک ماده سلولزی است و شامل حدود ۹۰٪ سلولز، ۷-۶٪ لیگنین و مابقی پتوسانس و آب است. ماده سلولزی نوعی پلیمر است که در ساختار آن واحدهای تکراری به نام گلوکز مطابق شکل (۸) وجود دارد. سلولز عنصری ارگانیک بوده و در آن تعداد حلقه های گلوکز و یا مونومرهای آن حدود ۱۰۰۰ می باشد. تعداد متوسط این مونومرها در زنجیره عایق کاغذی ترانسفورماتور را به اصطلاح درجه پلیمریزاسیون آن می نامند. مطابق شکل (۹) هنگام تجزیه مونومرهای عایق کاغذی تحت تاثیر عواملی همچون گرما، اکسیژن و رطوبت مقادیری گاز مونو اکسید کربن، آب و فورفورال آزاد می شوند. آب موجود در روغن ترانسفورماتور ممکن است منبعی غیر از پیری کاغذ ترانسفورماتور داشته باشد. ولی ظهور گاز مونو اکسید کربن در مقادیری که با گاز دی اکسید کربن قابل مقایسه باشد و همچنین حضور فورفورال نشان دهنده خطای حرارتی و یا تجزیه و پیری عایق کاغذی است.



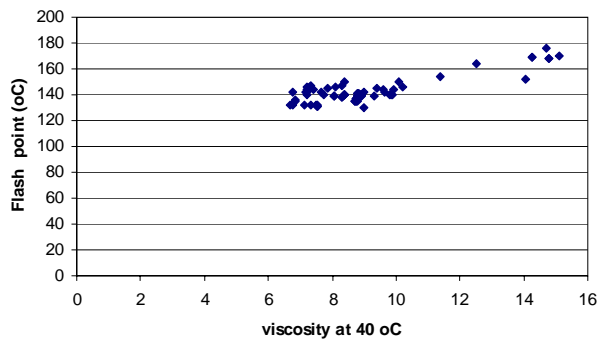
شکل (۹) تجزیه مونومرهای گلوکز

می آید. در ویرایش جدید استاندارد IEC 296 گرانروی روغن نو در دمای 40°C نباید از ۱۲Cst تجاوز نماید. معمولاً نقطه اشتعال روغن ترانسفورماتور نسبت مستقیمی با گرانروی آن دارد. بدین معنی که با افزایش گرانروی روغن، معمولاً نقطه اشتعال آن نیز بالا می رود.



شکل (۶) سیستم خنک کاری ترانسفورماتور

برای مطالعه بیشتر، نقطه اشتعال روغن ترانسفورماتورهای تست شده بر حسب مقدار گرانروی آنها در شکل (۷) نشان داده شده اند. رابطه مستقیم دو پارامتر در این شکل مشخص است.



شکل (۷) ارتباط کشش سطحی روغن با سن ترانسفورماتور

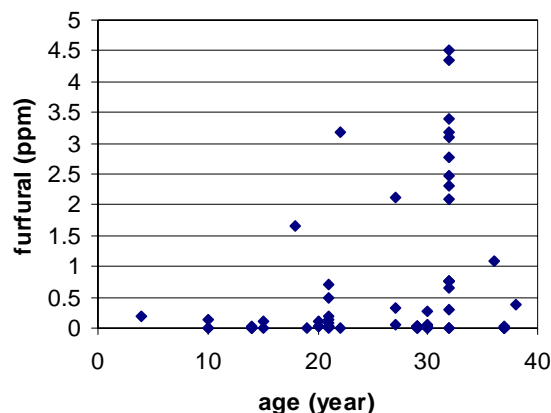
۷- پیری ترانسفورماتور و مقدار فورفورال

آنچه ناگفته می دانیم از تخریب عایق کاغذی ترانسفورماتورها در مباحث مربوط به مدیریت عمر این تجهیزات به عنوان ملاک پایان عمر نام برده می شود. به زبان دیگر در صورتی که روغن ترانسفورماتور، تپ جنجر و ... دچار تخریب گردند می توان آنها را تعمیر و یا تعویض نمود ولی در صورتی که کاغذ دچار

با پیر شدن ترانسفورماتور و در صورت عدم فیلتراسیون مقدار فورفورال موجود در روغن افزایش می یابد و در برخی موارد به مقادیر بالای ۱ ppm نیز می رسد. به عنوان مثال پتروشیمی بندر امام دارای دو دستگاه ترانسفورماتور یکسو ساز با قدرت ۳۲MVA می باشد که دارای مقدار فورفورال بالاتر از ۱ ppm می باشند. یکی از ترانسفورماتورها به علت عملیات کلید زنی از مدار خارج و دیگری همچنان به کار خود ادامه می دهد. البته توصیه شده است که تا جای ممکن از کلید زنی روی ترانسفورماتور اجتناب شود.

ترانسفورماتورهای دیگری وجود دارند که دارای مقادیر بسیار بیشتری فورفورال می باشند ولی با این شرایط هنوز در سرویس می باشند. به عنوان مثال ترانسفورماتورهای توزیع شرکت سیمان بهبهان را می توان نام برد که ۲ دستگاه از این ترانسفورماتورها دارای مقدار فورفورالی بیشتر از ۱۰ ppm می باشند. این مقدار فورفورال معادل درجه پلیمریزاسیون ۱۴۰ می باشد که مقدار بسیار پایینی است. هرچند بیشتر از ۴۰ سال از عمر ترانسفورماتورهای مذکور می گذرد اما این تجهیزات هنوز در سرویس می باشند.

شکل (۱۰) ارتباط بین سن ترانسفورماتور و مقدار فورفورال آنها را نشان می دهد آنچنانکه مشخص است هیچگونه ارتباطی بین این دو پارامتر وجود ندارد و این مسئله آشکار می نماید که سن ترانسفورماتور با پیری آن کاملاً متمایز است.



شکل (۱۰) مقدار فورفورال روغن ترانسفورماتورها بر حسب سن آنها

بیشتر مواقع کاغذ نه از لحاظ الکتریکی بلکه بیشتر به خاطر از دست دادن استحکام مکانیکی لازم، قادر به انجام وظیفه نیست. همچنانکه گفتیم معمولاً قدرت مکانیکی کاغذ را با عدد پلیمریزاسیون آن نشان می دهند. عدد پلیمریزاسیون در کاغذ نو در حدود ۱۴۰۰-۱۰۰۰ می باشد. کاهش عدد پلیمریزاسیون به مقادیر کمتر از ۲۰۰ به معنای عدم استحکام مکانیکی لازم برای استفاده در ترانسفورماتور می باشد. به منظور فهمیدن درجه پلیمریزاسیون کاغذ لازم است که نمونه هایی از آن در آزمایشگاه تحت تست و آزمایش قرار گیرد. از آنجا که کاغذ ترانسفورماتور در دسترس نیست می توان از روی مقادیر فورفورال روغن به وضعیت عایق کاغذی پی برد. اندازه گیری فورفورال روغن مطابق استاندارد ASTM D5837-99 انجام می شود. در مراجع مختلف روابط مختلفی برای ارتباط مقدار فورفورال روغن و درجه پلیمریزاسیون کاغذ ارائه شده است که مهمترین آنها رابطه چنگدونگ [۳] مطابق (۲) می باشد که بیانگر رابطه خطی بین لگاریتم مقدار فورفورال و درجه پلیمریزاسیون عایق کاغذی است.

$$\text{Log}(F) = 1.51 - 0.0035(DP) \quad (2)$$

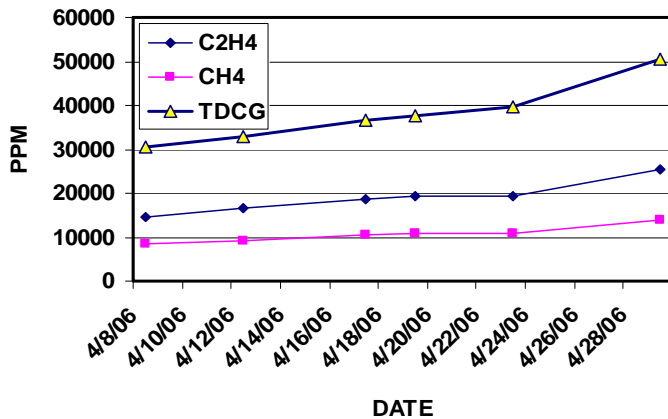
فورفورال روغن ترانسفورماتور ممکن است به علت تخریب موضعی کاغذ ترانسفورماتور و یا تخریب تدریجی و کلی آن باشد. با توجه به این مسئله ممکن، بالا بودن مقدار فورفورال روغن ترانسفورماتور لزوماً به معنای خروج ترانسفورماتور از سرویس نیست ولی لزوم نگهداری و مراقبت بیشتر ترانسفورماتور و برنامه ریزی برای جایگزینی آنرا نشان می دهد. مقادیر معمول فورفورال در روغن ترانسفورماتورهای در حال کار در هیچ استاندارد قید نشده است ولی با توجه به نتایج تستهای انجام شده روی ترانسفورماتورهای قدرت که موضوع این مقاله است این مقدار در اکثر موارد کمتر از ۰/۰۵ ppm می باشد.

۷- مطالعه موردی

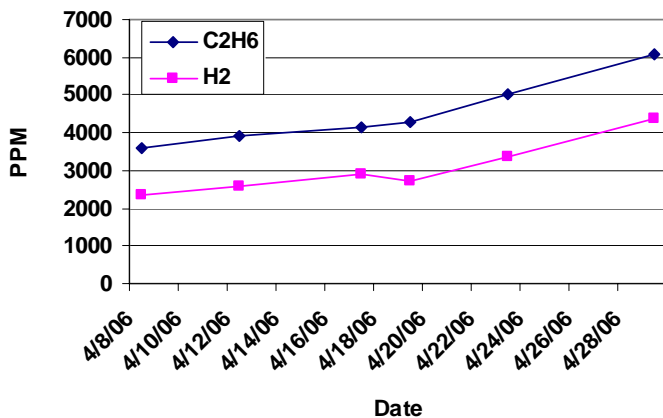
نتایج حاصل از گازکروماتوگرافی ترانسفورماتور کوره دو فولاد مبارکه اصفهان با قدرت ۹۰MVA و بار دیف ولتاژی ۶۳kV در تاریخ ۸۵/۱/۱۵ غیر معمول گردید به نحوی که مقادیر گازها خطای حرارتی بالاتر از ۷۰۰ سانتیگراد را نشان می داد. نرخ رشد گازها و مقادیر آنها در شکلهای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و همچنین در جدول (۵) نشان داده شده اند. با توجه به نرخ رشد بسیار بالای گاز و همچنین لزوم در مدار بودن ترانسفورماتور به منظور حصول برنامه تولید، ترانسفورماتور از مدار خارج نگردید ولی مقادیر رشد گازها در فواصل کوتاه کنترل شد. همچنانکه مشخص است رشد گاز اتیلن بسیار بالا و دارای رشدی در حدود ۱۰۰۰ ppm در روز بوده است که احتمال خطای حرارتی را بیشتر نشان می دهد. آنالیز خطا مطابق استانداردهای مختلف IEEE, IEC بیان کننده خطای حرارتی با دمای بالاتر از 700°C می باشد. آنالیز خطا مطابق مثلث دوال [۷] نیز در شکل (۱۴) نشان دهنده خطای حرارتی بالاتر از 700°C می باشد. رشد گازها در ماه بسیار بیشتر از ۱۰٪ مقدار گازها بوده و نشان دهنده خطای حاد در ترانسفورماتور می باشد.

با تداوم بار گذاری ترانسفورماتور به مدت ۲۰ روز بالاخره ترانسفورماتور از مدار خارج و تحت بازرسی قرار گرفت. در ابتدا مجموعه ای از تستهای الکتریکی به منظور پیدا نمودن علت و محل عیب احتمالی شامل تستهای تقسیم شار، جریان بی باری، مقاومت هسته و سایر تستهای الکتریکی انجام شد. ولی با انجام تستها نتیجه ای حاصل نگردید و در نتیجه تانک ترانسفورماتور در قسمت تعمیرات باز شد. نتایج جالب توجه بود. در روی شینه های خروجی ترانسفورماتور که دارای جریان نامی حدود ۲۰ kA است، قطعه پارچه سوخته ای دیده می شد که مانع از تبادل حرارتی شینه با روغن ترانسفورماتور می شد و باعث افزایش حرارت محلی در آن نقطه شده بود. شکل (۱۴) شینه سوخته و قطعه های سیاه شده پارچه را نشان می دهد. با بر طرف نمودن عیب مذکور و همچنین تعویض شینه ها

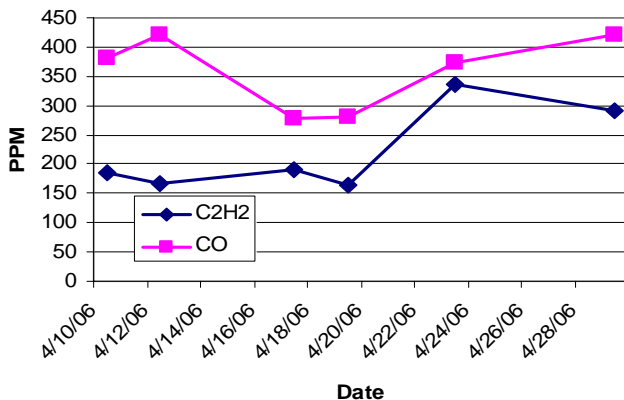
ترانسفورماتور مورد نظر در مدار قرار گرفت و هم اکنون بدون هیچ مشکلی به کار خود ادامه می دهد.



شکل (۱۱) تغییرات مقدار گازهای روغن ترانسفورماتور



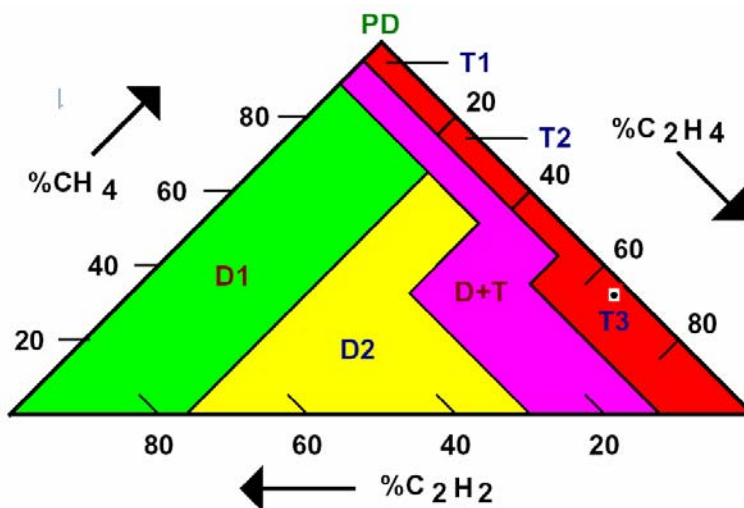
شکل (۱۲) تغییرات مقدار گازهای روغن ترانسفورماتور



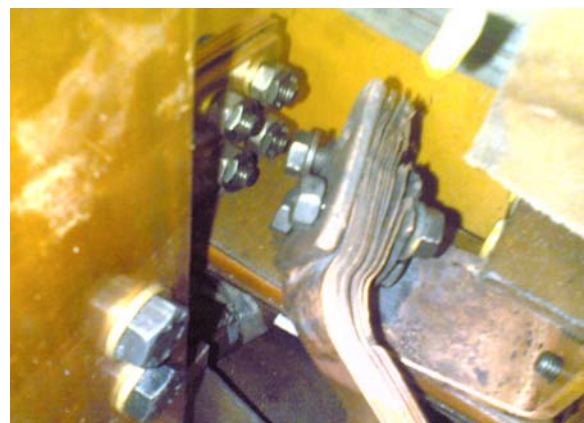
شکل (۱۳) تغییرات مقدار گازهای روغن ترانسفورماتور

جدول (۵) مقدار گازهای قابل احتراق در ترانسفورماتور تست شده در تاریخهای مختلف

	2006/4/08	2006/4/12	2006/04/17	2006/4/19	2006/4/23	2006/4/29
H2	2327	2589	2920	2737	3372	4383
CH4	8437	8989	10394	10693	10988	14027
C2H6	3613	3903	4166	4298	5041	6056
C2H4	15617	16680	18765	19443	19397	25356
C2H2	166	166	190	165	335	290
CO	352	422	278	281	373	420
CO2	1070	1151	986	981	1089	1078
O2	1968	1711	11297	15474	356	50
N2	30022	2 4218	43155	25811	33660	26572
TDCG	30512	3 2749	36713	37617	39506	50532
CO2/CO	3.04	2.73	3.55	3.49	2.92	2.57



شکل (۱۳) تحلیل خطا توسط مثلث دوال



شکل (۱۴) شینه خروجی سوخته ترانسفورماتور فولاد مبارکه اصفهان در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد (راست) و بقایای کربنیزه شده جسم خارجی پیدا شده

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

نکته مهم در بحثهای مدیریت عمر ترانسفورماتورهای قدرت و ارزیابی وضعیت آنها این است که سن ترانسفورماتور با پیری آن متفاوت است. ترانسفورماتورهای زیادی در شبکه وجود دارند که با وجود گذشت زمان زیاد از شروع به کار آنها همچنان دارای کارکرد مطلوبی می باشند. در این مقاله حدود مقادیر معمول گازهای قابل احتراق برای ترانسفورماتورهای صنایع مختلف ایران شناسایی و ارتباط پارامترهای مختلف با همدیگر بررسی شد. بعضی از پارامترها با همدیگر ارتباط نزدیک و بعضی دیگر فاقد هر نوع ارتباطی می باشند. پارامترهای شیمیایی روغن ممکن است دارای مقادیری فراتر از حدود مجاز باشند ولی ترانسفورماتور به کار خود در مدار ادامه دهد. ولی چنین مسئله ای در مورد خصوصیات الکتریکی صادق نیست.

۹- مراجع

- [1] V. G. Arakelin, "Effective Diagnostics for oil filled equipment" , IEEE Electrical Insulation Magazine, Nov/Dec 2002-Vol. 18, No. 6.
- [2] Tapan K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for assessing Insulation Condition in aged Transformers", *IEEE Trans. On dielectrics and electrical insulation*.
- [3] X. Chendung, F. Oiming, and X. Shiheng, "To estimate the aging status of transformers by furfural concentration in the oil", CIGRE Study Comitee 33 Colloquium, Leningrad, Moscow, 1991.
- [4] Mineral Oil Impregnated electrical equipment in Service: Guide to the interpretation of dissolved and free gasses analysis" IEC 60599, 1999
- [5] Fluids For electro technical Aplications- unused mineral oils for transformers and switchgear , IEC 60296, 2003
- [6] Supervision and Maintenance guide for Mineral Insulating oils in electrical Equipment IEC60422 Ed3 , 2003.
- [7] Michel dual, James Dukarm, "Improving the reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis", IEEE Electrical Insulation Magazine, July/August 2005, Vol. 21, No.4