منبع انبساط مشترک ترانسفورماتور و تپ‌چنجر تحت بار

Rainer Frotscher **Mehdi Djamali**

Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, Germany

مقدمه

تپ‌چنجـــر تحت بار محفظه روغن مختص خود را دارد که در آن دایورتر ســـوئیچ یا سلکتورســـوئیچ غوطه‌ور شـــده و روغن آن از روغن ترانسفورماتور جداست. این جداســـازی روغنها برای دایورتر و سلکتور سوئیچهای معمول الزامی است، چراکه خاموش سازی جرقه روغن را بشدت تخریب کرده و مقادیر زیادی ذرات معلق، دوده و گاز تولید می‌نماید. لذا باید تمهیدات لازم برای عدم آلوده شدن روغن ترانسفورماتور با این مواد فراهم شود. بهمین دلیل تپ‌چنجرهای منطبق با استانداردهای IEC و IEEE [۱] و [۲] باید مورد آزمون نشتی محفظه قرار گیرند. این آزمون تنها زمانی مورد قبول واقع می‌گردد که محفظه روغن تپ‌چنجر، در مقابل فشار روغن و خروج گاز مقاوم باشد. در عین حال تعداد زیادی تپ‌چنجر در ترانسفورماتورهای قدیمی مورد بهره‌برداری وجود دارند که دچار نشتی شده‌اند. لیکن این بدین معنی نیست که در همه این ترانسها روغن تپ‌چنجر با روغن ترانسفورماتور مخلوط شده اســـت؛ بلکه در این‌حالت، نتایج آزمون گازکروماتوگرافی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. ســـه راه برای نفوذ گازهای موجود در محفظه تپ‌چنجر برای ورود به روغن ترانسفورماتور وجود دارد:

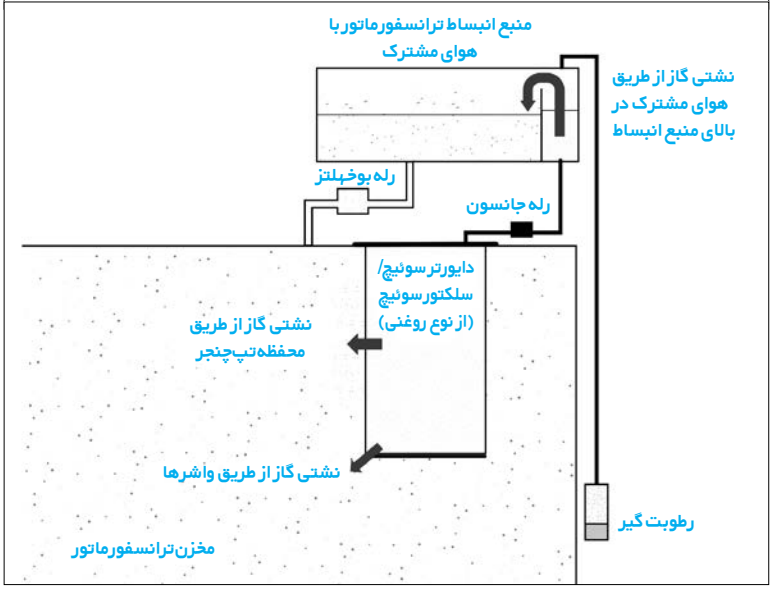
۱) محفظه تپ‌چنجر غیرمقاوم در برابر نفوذ گاز (که در برخی از انواع تپ‌چنجرهای قدیمـــی مانند تایپ‌های B, C, D, E, F ساخت شرکت MR استفاده می شود.)

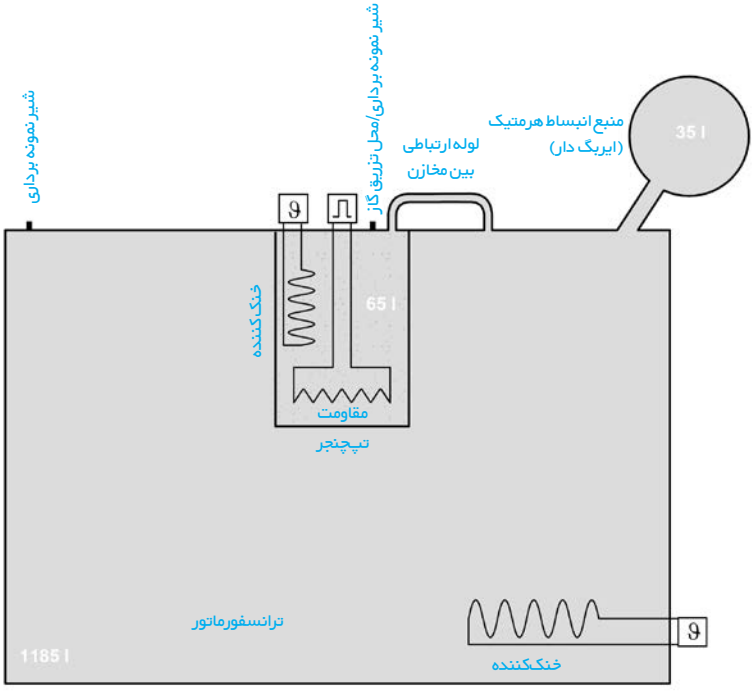
۲) نشتی در واشرها

۳) هوای مشـــترک بین محفظه تپ‌چنجر و ترانسفورماتور در منبع انبساط مطابق شکل یک

گرچه چندان توجهی به نشتی گاز از هوای مشترک موجود در منبع انبساط نشده است؛ لیکن این مسئله بخصوص در اروپای شرقی بسیار اتفاق می‌افتد. بسته به اختلاف فشار، گازهای موجود در منبع انبساط تپ‌چنجر بصورت نامحلول درآمده و از طریق هوای مشترک در منبع انبساط به سمت روغن ترانسفورماتور رفته و در آنجا مجدد در روغن ترانسفورماتور حل می‌شود. این حالت را استاندارد IEC60599 «تپ‌چنجر در ارتباط با روغن ترانسفورماتور» نامیده و مقادیر بیشتری از استیلن را مجاز می‌داند. در تپ‌چنجرهای مدرن برای خاموش سازی جرقه ناشی از سوئیچینگ، از خلاء استفاده شده و بدین شکل از آلوده شدن روغن جلوگیری می‌شود. در این نوع از تپ‌چنجر، دیگر ذرات کربن در روغن تولید نشـــده لیکن هنوز جرقه‌هایی با انرژی کم بوجود می‌آیند. این جرقه‌ها تنها مقادیر بســـیار کمی گاز ایجاد می‌نمایند. در داخل ترانســـفورماتور نیز جرقه‌های ناشی از سوئیچینگ خازنی، مقادیر کمی گاز تولید می‌کنند که در بیشتر اوقات حتی در نتایج گازکروماتوگرافی نیز قابل مشاهده نیست. همچنین اثر تخریبی این سوئیچینگ بر

شکل یک: راههای مختلف برای نفوذ گاز از محفظه تپ‌چنجر به مخزن ترانسفورماتور





شکل دو: آزمایش انجام‌شده برای شناسائی میزان تبادل گاز در مخازن مرتبط

روغن ترانسفورماتور قابل چشم‌پوشی است. در این تپ‌چنجرهای خلاء، روغن تنها به دلیل اثر حرارتی مقاومتهای گذرا پیر می‌شود. این اثر حرارتی را می‌توان تقریبا معادل اثر حرارتی سیم‌پیچ ترانسفورماتور بر روغن دانست.

تنشـــهای وارده بر روغن تپ‌چنجر خلاء و روغن ترانسفورماتور بسیار مشابه بوده و تقریبا مواد و گازهای مشابهی در روغن بوجود می‌آورند. از این‌رو می‌توان برای انجام آزمون نشتی محفظه تپ‌چنجر که در بالا بدان اشاره شد، در تپ‌چنجر خلاء استثناء قائل شد.

بطور خلاصه: شـــرایط روغن تپ‌چنجر خلاء و ترانســـفورماتور بسیار مشابه بوده و شاید نیازی به جداسازی این دو روغن از هم نباشد. اما چه چیزی مانع از یکپارچه سازی منابع انبساط روغن ترانس و تپ‌چنجر می‌شود؟ درحالیکه می‌دانیم این عمل سرویس و نگهداری روغن را آســـانتر کرده و صرفه‌جوئی اقتصادی نیز دارد.

یکپارچگی روغن ترانسفورماتور و تپ‌چنجر و مسئله تبادل گاز

یکپارچگی روغن ترانس و تپ‌چنجر تنها در تپ‌چنجرهای تحت بار خلاء از نوع داخـــل مخزنی مدل VV, VM, VR منطقی است؛ لیکن در تپ‌چنجرهای خلاء مدل RMV-II معمولا منبع انبساط تپ‌چنجر وجود ندارد چراکه افزایش حجم روغن براثر حرارت با کمک محفظه گاز زیر درپوش مخزن جبران می‌شود. این نوع از تپ‌چنجر کاملا با روغن پر نشده لذا ارتباط بین روغن ترانسفورماتور و روغن تپ‌چنجر منطقی نیست.

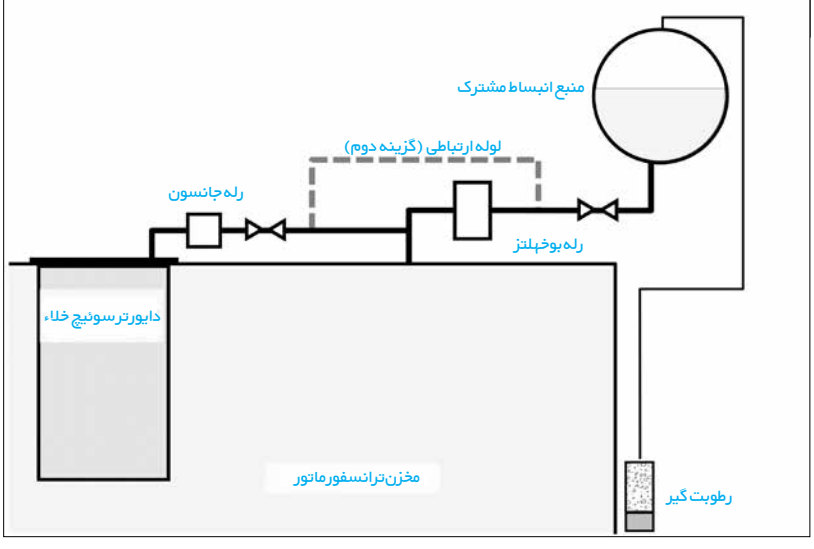
تپ‌چنجرهای خلاء داخل مخزنی باید کاملا در روغن غوطه ور باشند تا اطمینان حاصل شـــود که مکانیزم گردنده و همچنین فواصل عایقی فاز به زمین از روغن پر شده‌اند. این نوع از تپ‌چنجر نیاز به یک منبع انبساط داشته تا افزایش حجم روغن ناشـــی از حرارت را جبـــران کند. اگر ارتباط مستقیمی بین روغن تپ‌چنجر و ترانسفورماتور وجود داشته باشد، می‌توان این منبع انبساط را حذف نمود. پیش از این کار لازم است نحوه تعامل بین این دو روغن را بررسی کنیم.

درصورتیکه خطائی در تپ‌چنجر بوجود آید، گازهای محلول در روغن تپ‌چنجر با گازهای محلول در روغن ترانس بســـیار متفاوت بوده و ارتباط این دو روغن با هم می‌تواند آنالیز گازکروماتوگرافی ترانسفورماتور را نیز تحت تاثیر قراردهد.

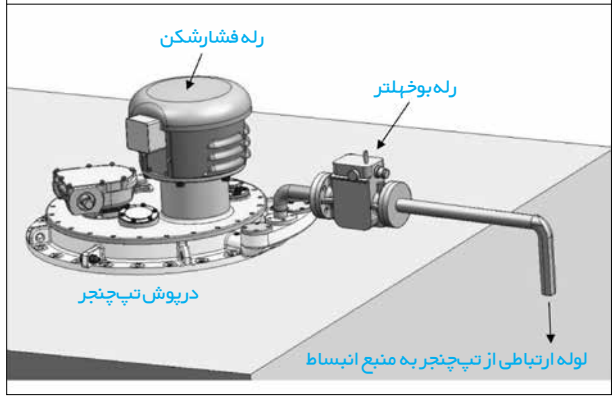
به منظور بررسی این موضوع، آزمایشی برروی یک ترانسفورماتور با دو مخزن مجزا انجام شـــد. مخزن کوچک به حجم ۶۵ لیتر مربوط به تپ‌چنجر بود که در داخل مخزن ترانس با حجم ۱۱۸۵ لیتر نصب شده بود. دو مخزن با یک لوله ارتباطی به هم متصل بوده و هردو از روغن معدنی نو فاقد گاز پر شدند. (شکل دو) به روغن تپ‌چنجر ppm ۱۵۰ گاز اســـتیلین تزریـــق و مقاومت درون محفظـــه تپ‌چنجر با کمک ایمپالســـهای جریانی کنترل شده توســـط منبع تغذیه الکترونیکی AC گرم شد. ایمپالســـهای جریانی در حقیقت شبیه‌سازی از عملیات ســـوئیچینگ بوده و جهشهای حرارتی ســـریعی را ایجاد نمودند که معادل افزایش دمای مقاومتهای تپ‌چنجر در شرایط بارگیری نرمال ترانسفورماتور (جهش حرارتی ۱۶۰ درجه) و شرایط اضافه بار۱/۵ برابر بار نامی (جهش حرارتی ۲۵۰ درجه) بودند. در مجموع ۳۰۰هزار ایمپالس جریانی اعمال شد. با کمک خنک‌کننده‌های تعبیه شده، حداکثر دمای روغن در هر دو مخزن حداکثر ۵۰ درجه سانتیگراد تنظیم شـــد تا اثر تولید خود به خودی گاز توسط روغن خنثی شود.

انرژی گرمائی ایجاد شـــده توسط مقاومت حرارتی، روغن محفظـــه تپ‌چنجر را گرم و حجم آنـــرا افزایش داد. با هر ایمپالـــس، حجم روغن تپ‌چنجـــر تقریبا یک میلی لیتر افزایـــش یافت. جهش حرارتـــی ۲۵ درجه (اختلاف بین حداکثر دمای روغن ۵۰ درجه سانتیگراد و دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد) موجب افزایش حجم روغن به حدود ۱/۲ لیتر شد. این افزایش حجم از طریق لوله ارتباطی به داخل

شکل سه: ارتباط بین روغن ترانس و تپ‌چنجر در ترانسفورماتورهای با منبع انبساط



شکل چهار: حفاظت تپ‌چنجر تحت بار



ترانسفورماتور رفته و سپس در زمان سرد شدن روغن به داخل محفظه تپ‌چنجر بازگشت. در مجموع ۱۷ سیکل گرمایش/سرمایش در مدت یک‌ماه اعمال شد که موجب نوسان ۱/۲لیتر روغن و جابجائی حدود ۲۰لیتر روغن شد. در حین آزمایش مرتبا از روغن هردو مخزن نمونه برداری شده و نمونه مورد آزمون گازکروماتوگرافی قرارگرفت. پس از اتمام آزمون، روغن تپ‌چنجر رشد اندکی (بین ۱ ppm تا ۷ ppm) در گازهای متان، اتیلن، پروپن و پروپان داشته لیکن در روغن ترانسفورماتور رشد این گازها کمتر از ۱ ppm بود. هیچ استیلنی در روغن ترانسفورماتور شناسائی نشد. می‌توان اینگونه فرض کرد که روغن جابجا شده کاملا در هرسیکل با روغن ترانس تبادل نکرده و در حقیقت بدلیل استفاده از یک لوله ارتباطی با قطر کوچک، روغن ترانس و تپ‌چنجر با هم مخلوط نشدند. در یک ترانسفورماتور مورد استفاده در شبکه برق، افزایش حجم روغن تپ‌چنجر بدلیل اثر مقاومتهای حرارتی و همچنین تفاوت درجه حرارت روزانه ترانسفورماتور، بسیار کم است. از اینرو نفوذ گازهای محلول در روغن از تپ‌چنجر به ترانس را می‌توان نادیده گرفت.

در تئوری و در شرایط ارتباط کامل روغن تپ‌چنجر و ترانسفورماتور مقدار ppm ۱۵۰ گاز استیلن می‌تواند موجب آلوده کردن روغن ترانس به ppm ۸ از این گاز شود. ($\frac{۶۵}{۱۱۸۵}$ × ۱۵۰) در شرایط واقعی، نسبت حجم روغنها بسیار بیشتر از مقدار تست شده است (نسبت یک به صد) بعلاوه مقدار ppm ۱۵۰ گاز استیلین در یک تپ‌چنجر خلاء در شرایط کار نرمال بوجود نمی‌آید. این مقدار گاز استیلین در یک تپ‌چنجر خلاء نشان‌دهنده خطا در تپ‌چنجر است.

بعنوان نتیجه‌گیری باید گفت در صورتیکه لوله ارتباطی بین محفظه تپ‌چنجر و مخزن ترانسفورماتور کوچک باشد، نتایج گازکروماتوگرافی ترانسفورماتور دستخوش تغییر نخواهد شد. تحقیقات مشابه نیز این موضوع را تایید نموده‌اند. [۴] و [۵]

عملیاتی کردن ارتباط مخزن ترانسفورماتور و محفظه روغن تپ‌چنجر

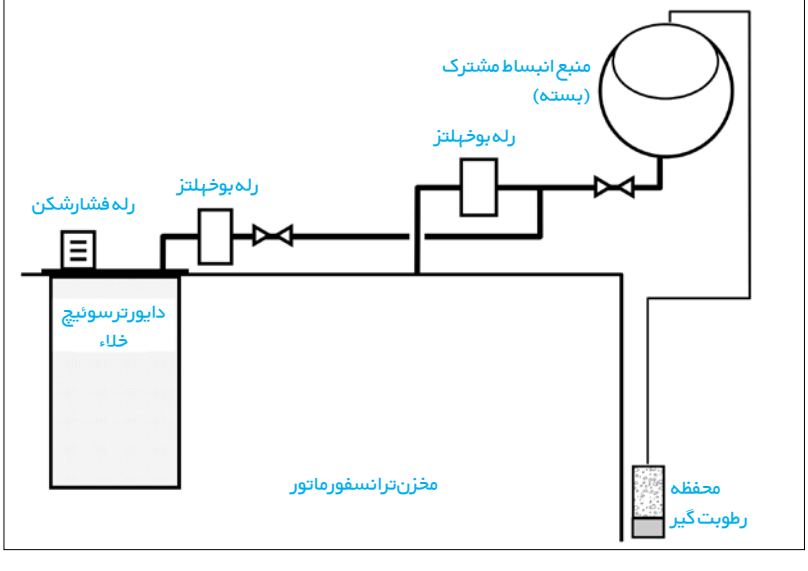
در عمل برای ارتباط روغن تپ‌چنجر و ترانسفورماتورهای با منبع انبساط و هرمتیک راهکارهای متفاوتی استفاده می‌شود. در شکل سه این راهکار برای ترانسفورماتورهای بامنبع انبساط نشان داده شده است. لوله محفظه تپ‌چنجر که معمولا به منبع انبساط تپ‌چنجر متصل می‌شد در این طرح به لوله ارتباطی بین مخزن ترانسفورماتور و منبع انبساط وصل شده است.

بدین شکل می‌توان منبع انبساط اختصاصی تپ‌چنجر و بالطبع نشانگر سطح و رطوبت‌گیر آنرا حذف نمود. لازم به ذکر است که در این طرح در صورت تولید گازهای حامل خطا، نمی‌توان با دقت مناسب خطا در ترانسفورماتور یا تپ‌چنجر را از یکدیگر تفکیک نمود. برای رفع این مشکل می‌توان با استفاده از یک لوله دیگر، محفظه تپ‌چنجر را به لوله اتصال مخزن ترانس به منبع انبساط (قبل از رله بوخهلتز) وصل کرد. (شکل سه) با اینکار تبادل گاز بین دو روغن به حداقل می‌رسد.

روش ایزوله سازی ترانسفورماتورهای ایربگ دار اغلب برای سازنده تپ‌چنجر ناشناخته است بهمین دلیل کارکرد مناسب رله جانسون، در طرح منبع انبساط مشترک، توسط سازنده تپ‌چنجر گارانتی نمی‌شود. تجهیز حفاظتی که صرفنظر از هر نوع روش ایزوله سازی مورد استفاده در ترانسفورماتور و ابعاد و موقعیت لوله‌های ارتباطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، رله فشارشکن است (شکل چهار). این رله، در شرایط ازپیش تعیین شده همواره عمل کرده و در نتیجه حفاظت بسیار مناسبی را برای تپ‌چنجر فراهم می‌آورد.

شرایط عملکرد رله فشارشکن با رله جانسون متفاوت است. خطاهای کوچک با تولید حبابهای گاز فشار داخل تپ‌چنجر را بسیار آرام افزایش داده و در نتیجه قابل شناسائی با رله فشارشکن نخواهد بود. لذا برای شناسائی این خطاهای احتمالی، لازم است از رله بوخهلتز در مسیر تپ‌چنجر به منبع انبساط استفاده شود. این رله در صورت تجمع گاز صرفا اعلام آلارم کرده و نیازی نیست ترانسفورماتور در این شرایط از مدار خارج شود. همچنین می‌توان از شناور حساس به جریان روغن نیز در این رله استفاده کرده و آنرا بعنوان حفاظت کمکی به فشار شکن در نظر گرفت.

شکل پنج: منبع انبساط مشترک روغن در ترانسفورماتورهای ایربگ دار (طرح اصلی)



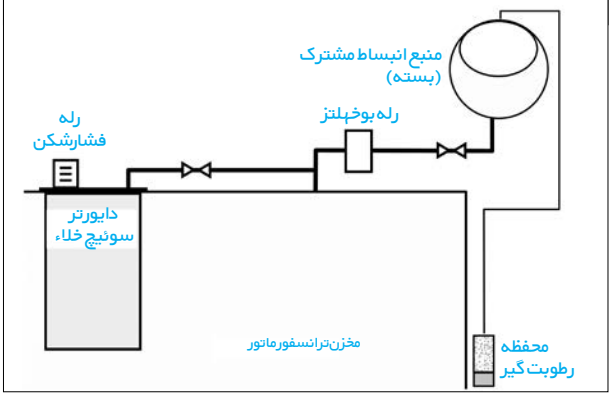
درصورتیکه حفاظت تپ‌چنجرهای بسته در ترکیب با سیستم لوله‌کشی شکل سه اعمال شود، می‌توان به راهکاری مطابق شکل پنج رسید. در صورتیکه الزامی به استفاده از آلارم گاز برای تپ‌چنجر نباشد، می‌توان مطابق شکل شش، تنها به رله بوخهلتز ترانسفورماتور بسنده کرد که در اینصورت منشاء تولید گازهای آزاد (ترانس یا تپ‌چنجر) دیگر قابل شناسائی نیست. در هرصورت حفاظت مناسب تپ‌چنجر برای ترانسفورماتورهای ایربگ دار کاملا رعایت می‌شود.

هردو این طرحها در عمل ساخته شده و در حال بهره برداری هستند.

حداقل لوله گذاری

شکل شش نشان‌دهنده طراحی بهینه است که مسائل حفاظتی را برای تپ‌چنجرهای بسته کاملا رعایت می‌کند. سالها بهره‌برداری از تپ‌چنجرهای خلاء نشان می‌دهد که این نوع از تپ‌چنجر در شرایط کاری نرمال، گاز آزاد تولید نمی‌کند. برخی از بهره‌برداران شجاع از گزینه آلارم گاز استفاده نمی‌کنند چراکه این گزینه الزامی نبوده و

شکل‌شش: منبع انبساط مشترک روغن در ترانسفورماتورهای ایربگ دار (طرح بهینه)



شکل هفت: صفحه ارتباطی برروی درپوش تپ‌چنجر برای ارتباط بین روغن ترانسفورماتور و روغن تپ‌چنجر خلاء

اختیاری است. کوتاهترین ارتباط بین دو روغن موجود در مخزن ترانس و محفظه تپ‌چنجر، متصل کردن فلنجهای E2 و Q (مطابق شکل هفت) است. E2 به مخزن ترانسفورماتور باز شده و Q به محفظه تپ‌چنجر منتهی می‌شود. این ارتباط را می‌توان با کمک یک صفحه فلزی (که به بست استخوانی معروف است) برقرار کرد. هردو فلنج با یک صفحه کورکننده پوشیده می‌شوند. ارتباط بین دو فلنج را می‌توان با یک پیچ و دو واشر مطابق شکل هشت باز و بسته کرد. در شرایط بهره‌برداری از ترانسفورماتور این پیچ می‌بایست باز باشد تا روغن منبسط شده براثر حرارت به داخل مخزن ترانسفورماتور سرریز شود. صفحه ارتباطی را می‌توان به یک صورت برای ترانسفورماتورهای با یا بدون ایربگ بکاربرد. لازم به ذکر است که در صورت باز بودن پیچ ارتباطی، فشار روغن داخل محفظه تپ‌چنجر و مخزن ترانس یکسان بوده که این فشار خود تابعی از ارتفاع منبع انبساط (در ترانسفورماتورهای فاقد ایربگ) یا فشار تنظیم شده (ترانسفورماتورهای دارای ایربگ) می‌باشد.

نفوذ گازهای محلول در روغن بین دو محفظه روغن به دلیل قطر کم لوله رابط، بسیار کم بوده و قابل چشم‌پوشی است.

از آنجاکه هیچ لوله خروجی از تپ‌چنجر به منبع انبساط (یا مخزن ترانسفورماتور) وجود ندارد، استفاده از رله جانسون (که حفاظت استاندارد برای ترانسفورماتورهای با منبع انبساط و فاقد ایربگ است) ضرورتی ندارد. بعنوان جایگزین لازم است از رله فشارشکن استفاده شود. در صورت وقوع خطای تخلیه الکتریکی یا نقص در مکانیزم عملکرد تپ‌چنجر، رله فشارشکن فرمان خروج ترانسفورماتور از مدار را صادر می‌کند. استفاده از این رله ضروری است. چراکه در صورت افزایش فشار داخل محفظه تپ‌چنجر، مسیر باریک بین مخزن ترانسفورماتور و محفظه تپ‌چنجر قادر به کاهش سریع فشار نیست.

نتیجه‌گیری

ارتباط مستقیم بین روغن ترانسفورماتور و تپ‌چنجر مزایای فنی و اقتصادی زیادی مانند کاهش لوله گذاری، حذف منبع انبساط تپ‌چنجر و ... دارد. بسته به نوع تنفس ترانسفورماتور (ایربگ، هرمتیک ولهای یا گازی) راه‌حلهای متفاوتی برای این مسئله وجود دارد. آسانترین و ارزانترین روش استفاده از «بست استخوانی» است. لازم به ذکر است کلیه راهکارهای ارائه شده برای ارتباط دادن روغن ترانسفورماتور و تپ‌چنجر منحصرا به تپ‌چنجرهای خلاء محدود می‌شود. مستقل از اینکه چه نوع ارتباطی بین مخازن روغن تپ‌چنجر و ترانسفورماتور طراحی شده باشد، لازم است محفظه روغن تپ‌چنجر، مقاوم در برابر فشار و خروج گاز طراحی شود.

منابع و مأخذ:

[1] IEC 60214-1, Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods

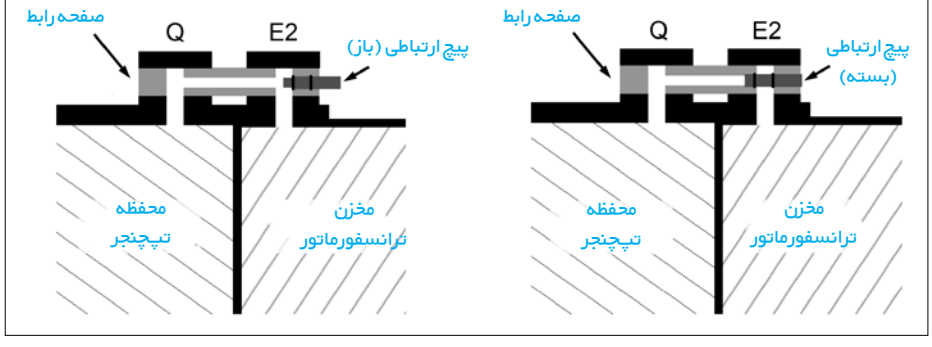
[2] IEEE C57.131, IEEE Standard Requirements for Tap Changers

[3] IEC60599, Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis

[4] T. Stirl, J. Harthun, ALSTOM, R. Frotscher, MR, Offshore Use – A Challenge for the Transformer, Stuttgarter Hochspannungssymposium, Germany, 2012

[5] R. Frotscher, MR, J. Findeisen, SIEMENS AG: Gemeinsamer Ölhaushalt von Transformator und Stufenschalter, ETG-Fachtagung VDE-Hochspannungstechnik, Berlin, 2016

شکل هشت: ارتباط بین محفظه روغن تپ‌چنجر و مخزن ترانسفورماتور



نقش عامل انسانی در بروز و یا کاهش حوادث ناشی از تپ‌چنجر

مهندس حمید غفرانی
شرکت آزمون نیروی فرهنگ

ترانسفورماتورها مهم‌ترین و گران‌قیمت‌ترین تجهیز در سیستم انتقال انرژی الکتریکی می‌باشند. به طور عمده، ولتاژ الکتریکی پس از شکل‌گیری در ژنراتورها، توسط ترانسفورماتورها افزایش می‌یابد و از طریق خطوط انتقال، به مناطق مصرف منتقل و مجدداً توسط ترانسفورماتورها سطح ولتاژ در چندین مرحله تا رسیدن سطح مشخص مصرف کاهش می‌یابد.

در فرایند فوق، در طول مسیر انتقال، مقداری افت ولتاژ اتفاق می‌افتد که اندازه‌ی آن بستگی به اندازه‌ی جریان مصرف و طول مسیر انتقال دارد. متداول‌ترین روش جبران افت ولتاژ، تغییر نسبت تبدیل ترانسفورماتورها با استفاده از تجهیزی به نام تپ‌چنجر است که خود تپ‌چنجر به دو دستهٔ عمده قابل تغییر در حین باردهی ترانسفورماتور یاتپ چنجر تحت بار[1] (OLTC) و یا قابل تغییر درحالت بی‌برق کردن ترانسفورماتور[2] (OCTC) تقسیم‌بندی می‌گردند.

ترانسفورماتورها به دلیل ماهیت استاتیکی ساختارشان، یکی از کم دردسرترین تجهیزات هستند ولیکن تنها قسمت دینامیکی در ترانسفورماتور همان تپ‌چنجر می‌باشد.

با نگاه به آمار حوادث و آسیب به ترانسفورماتورها، می‌بینیم که بیش از ۷۵درصد حوادث، از خارج به ترانسفورماتور تحمیل می‌گردد. که از این مقدار، ۹۰درصد آن به دلیل جریان‌های اضافی در کابل‌ها و سایر تجهیزات مثل بوشینگ‌ها و غیره می‌باشند؛ و بحث در مورد آن‌ها نیازمند یک مقاله مفصل دیگر است.

حوادث داخلی ترانسفورماتور به طور عمده ناشی از تپ‌چنجرهاست. همانگونه که در بالا نیز اشاره گردید، ترانسفورماتور (به استثنای تپ‌چنجر) یک سیستم استاتیکی بوده و خطای دینامیکی در آن بسیار ناچیز است و عمده اشکالات آن، ناشی از تغییرات خواص مواد در اثر پیری و یا شرایط بد محیطی است که برای حفظ پیوستگی موضوعی این نوشتار، از پرداختن به آنها صرفنظر می‌گردد. خطاهای ناشی از تپ‌چنجر دلایل متعددی دارند. ولی در اینجا به دلیل پیگیری هدف این نوشتار، خطاها را از نظر منشاء وقوع آنها بررسی کرده و به دو دسته عمدهٔ منشاء اشکالات خود تجهیز (تپ‌چنجر) و منشاء انسانی تقسیم‌بندی می‌کنیم.

هدف اصلی این یادداشت، انتشار مشاهدات و تجربیات نویسنده این نوشتار در مدت قریب به سی سال تجربه تعمیرات ترانسفورماتور می‌باشد و البته تمرکز خاصِ این یادداشت، بر روی حوادث و اشکالاتی است که به دلیل خطاهای انسانی در تپ‌چنجرها به وجود آمده است و امیدوارم که بتواند در آینده نقشی مؤثر در کاهش خطاها داشته باشد.

در این یادداشت، خطاهای انسانی را در دو گروه تپ‌چنجرهای OLTC و OCTC بررسی می‌کنیم:

۱ – خطاهای ناشی از عدم اجرای دستورالعمل‌هایی که باید اجرا و یا رعایت گردند ولی به دلایل عدم اطلاع و یا کوتاهی، رعایت نشده‌اند

۱ – ۱ – تپ‌چنجرهای OCTC

در ترانسفورماتورهای که مجهز به OCTC هستند، در ابتدای بهره‌برداری از ترانسفورماتور، موقعیت تپ‌چنجر انتخاب می‌گردد و ولتاژ بر حسب نیاز تنظیم می‌شود و بهره‌برداری از ترانسفورماتور انجام می‌پذیرد. با این نوع تپ‌چنجر، تغییرات لحظه‌ای ولتاژ قابل تنظیم نیست. این نوع تپ‌چنجر در ترانسفورماتورهای مختلف استفاده می‌شود.

- در ترانسفورماتورهای افزایندهٔ واحدهای نیروگاهی، به طوری که تغییرات لحظه‌ای ولتاژ توسط تغییر در تحریک ژنراتورها جبران می‌گردند.
- در ترانسفورماتورهای قدرت انتقال که معمولاً این ترانسفورماتورها علاوه بر آن به OLTC نیز جهت تنظیم ولتاژ لحظه‌ای مجهز می‌باشند.
- ترانسفورماتورهای توزیع انتهای شبکه به طور عمده به این نوع تپ‌چنجرها مجهز می‌باشند.

در ترانسفورماتورهایی که به OCTC مجهز هستند، تغییر موقعیت در طول مدت عمر ترانسفورماتور، یا انجام نمی‌شود و یا در بازه زمانی بسیار طولانی انجام می‌گیرد. طبیعی است که در محل کنتاکت تپ‌چنجر، مقاومت الکتریکی بیشتر از کابل‌های ارتباطی ظاهر می‌شود و با عبور جریان، تلفات انرژی الکتریکی ($W=RI^2$) ایجاد و آن نقطه گرم می‌شود. روغن در مجاورت آن گرما تجزیه شده و بر روی کنتاکت‌ها رسوبات ناشی از تجزیه روغن ایجاد می‌گردد. با ایجاد رسوبات، مقاومت و در نتیجه حرارت افزایش یافته و باعث افزایش رسوبات می‌گردد. این چرخه تا زمانی پیش می‌رود که تولید گاز ناشی از تجزیه روغن باعث عملکرد رله بوخهلتس شده و در شرایط نامساعد، باعث خوردگی بیش از حد کنتاکت و حتی عملکرد بد فنرهای کنتاکت به دلیل رسوبات می‌گردد. خوردگی کنتاکت‌ها و مخصوصاً عدم عملکرد متناسب فنر آنها، اتصال ناقص را باعث می‌شود؛ که به دلیل مقدار بزرگ سلف ترانسفورماتور، در موارد متعدد باعث چندین حادثه از دیاد ولتاژ و سوختن ترانسفورماتور شده است.

در اینجا دستورالعمل این است که هر چند وقت یکبار (حداقل سه یا چهار سال) در زمان‌های خاموشی و خارج بودن ترانسفورماتور از سرویس، تپ‌چنجر تغییر موقعیت داده شود تا رسوبات با سایش کنتاکت‌ها جدا شده و فنرها نیز با حرکت از معضل رسوبات رهایی یابند.

۱ – ۲ تپ چنجرهای OLTC

خطاهای انسانی ناشی از عدم اجرای دستورالعمل در تپ‌چنجرهای OLTC بر

اساس تجربه عبارتند از:

عدم سرویس و تعویض روغن و کنترل حفاظت‌های مربوطه

شرکت سازنده برای هر تپ‌چنجر، یک جدول زمانی برای تعویض روغن، سرویس و بازدید ارائه کرده است. لیکن نگارنده این نوشتار، به پشتوانه تجربه برخورد با حوادث متعدد و بیش از هزاران بازدید از تپ‌چنجر که در مدت خدمت سی ساله خود به دست آورده است، معتقد است که جدول فوق، تنها در تپ‌چنجرهایی که عملکرد نرمال دارند، صادق است. بنابراین:

- در تپ‌چنجرهایی که تغییر موقعیت بسیار زیاد در بازه‌های زمانی اندک دارند و همینطور در تپ‌چنجرهایی که تغییر موقعیت بسیار اندک و در بازه‌های زمانی طولانی دارند جدول زمانی خاص هرکدام باید توسط گروه متخصص، تدوین و اجرا گردد.
- برای تپ‌چنجرها به طور نرمال هر سه سال یک‌بار بنا به تجربه، بازه زمانی خوبی می‌باشد (البته در مورد تپ‌چنجرهای نوع خلاء دستورالعمل به گونه‌ای دیگر است).
- مطلب دیگر در مورد سرویس اولیه است که متاسفانه در دستورالعمل های هیچ یک از سازندگان به آن اشاره نشده است. حوادث ناشی از آن و خطاهایی که قبل از منجرشدن به حادثه، مشاهده و رفع گردیده در صنعت برق ایران کم نیست.

این خطاها به طور معمول در کارخانه‌های سازنده و نیز موقع نصب و راه‌اندازی اتفاق افتاده‌اند. مثل نبستن و یا شل بستن اتصالات دایورترسوئیچ، جاگذاشتن قطعاتی در محوطه دایورترسوئیچ (که تجربه‌ی یافتن ابزار و تکه زائد واشر هم مشاهده شده است). توصیه مبتنی بر تجربه، این است که در سال اول بهره‌برداری به سرویس اولیه توجه گردد.

- مورد دیگر اجرای دستورالعمل عملکرد دوره‌ای در تمام موقعیت‌ها در بازه زمانی حداقل سه سال یک‌بار است. زیرا موقعیت‌های بسیاری در تپ‌چنجر در حین بهره‌برداری مورد استفاده قرار نمی‌گیرند؛ که این کار باعث رسوب‌زایی می‌گردد. بخصوص در ترانسفورماتورهایی که به دلیل سطح ولتاژ منطقه قسمت کلید[3] از موقعیت + به – و یا بالعکس تغییر نمی‌کند. این مورد اخیر، در بسیاری از ترانسفورماتورها باعث خوردگی کنتاکت‌های این قسمت، تولید گاز و حادثه بوده است.

عدم تجدید بالشتک هوا (در برخی انواع تپ‌چنجرها)

در محفظه دایورترسوئیچ، به دلیل عملکرد آن و ایجاد قوس الکتریکی و گرما در مقاومت‌های گذرا، ایجاد گازهای قابل اشتعال عادی می‌باشد که به طور معمول گازهای ایجاد شده از طریق لوله ارتباطی به طرف کنسرواتور رفته و از آن خارج می‌گردد. با عملکرد دایورترسوئیچ، اولا توربولانسی در روغن ایجاد می‌شود و ثانیا حجم روغن به دلیل قوس الکتریکی و گرم شدن به طور ناگهانی تغییر می‌نماید. با عملکرد پی‌درپی تپ‌چنجر (دایورترسوئیچ) دامنه این تغییرات حجم زیاد شده و در برخی موارد باعث عملکرد رله تپ‌چنجر (موسوم به رله جانسون) و تریپ ترانسفورماتور می‌گردد. برخی سازندگان تپ‌چنجر در برخی از مدل‌های خود، پیش‌بینی یک بالشتک هوا را در قسمت فوقانی محفظه دایورترسوئیچ نموده‌اند. در این مدل‌ها، لوله ارتباطی محفظه دایورترسوئیچ به کنسرواتور، در بالاترین نقطه قرار ندارد. لذا در فضای بالاتر از لوله ارتباطی هوا وجود دارد که نقش ضربه‌گیردر مقابل تغییرات ناگهانی حجم را بازی می‌کند. این مدل تپ‌چنجرها تا کنون بهترین کارایی را در ترانسفورماتورهای کوره قوس الکتریکی که تغییر موقعیت بسیار زیاد (روزانه بیش از ۲۰۰ عملکرد) و پی‌درپی در بازه زمانی کوتاه دارند، داشته است.

اشکال بزرگ این ترفند این است که با ایجاد گازهای قابل اشتعال در اثر تغییرات تپ‌چنجر، گازها با هوای موجود، مخلوط شده و کم‌کم غلظت گازهای قابل اشتعال در محفظه بالا می‌رود. قابل ذکر است که حادثه انفجار در محفظه دایورترسوئیچ در ایران کم نبوده است. شرکت سازنده در کتابچه راهنمای این نوع تپ‌چنجرها دستورالعمل داده است که هر چند وقت یک‌بار (بسته به عملکرد تپ‌چنجر یکسال تا حداکثر سه سال) بالشتک هوا باید تجدید گردد و دستورالعمل تجدید را نیز آورده است. این حوادث هم از نوعی است که با عامل انسانی و به دلیل عدم اجرا بوجود می‌آید.

۲– خطاهای ناشی از عملکرد نادرست عامل انسانی

۲–۱ تپ‌چنجرهای OCTC

در تپ‌چنجرهای فوق، که معمولا درون ترانسفورماتور قراردارند، ممکن است در موقع تغییر موقعیت، کنتاکت‌ها در موقعیت صحیح خود قرار نگرفته و در زمان برق‌دار کردن ترانسفورماتور و بخصوص بارگیری از آن، به دلیل اتصال ناقص، حوادث کوچک و گاهی بزرگ را به وجود آورند. بعضی اوقات هم شفت انتقال حرکت در داخل ترانسفورماتور بریده شده، و اتصال ناقص مانده است.

برای جلوگیری از این پیامد در بسیاری موارد از تغییر وضعیت اجتناب می‌کنند؛ که این خود پیامد دیگری دارد که در متون بالا به آن اشاره شد.

دستورالعمل تجربی شخصی به ترتیب زیر ارائه می‌گردد:

۱- تغییر وضعیت حتما توسط شخص با تجربه انجام گیرد.

۲- در موقع تغییر وضعیت، تغییرات صدا و نیروی اعمالی ناشی از جدا شدن کنتاکت‌های متحرک از کنتاکت‌های ثابت، و اتصال به کنتاکت ثابت بعدی با حواس شنوایی و لامسه، تحت کنترل باشند و با شاخص موقعیت مطابقت داده شوند.

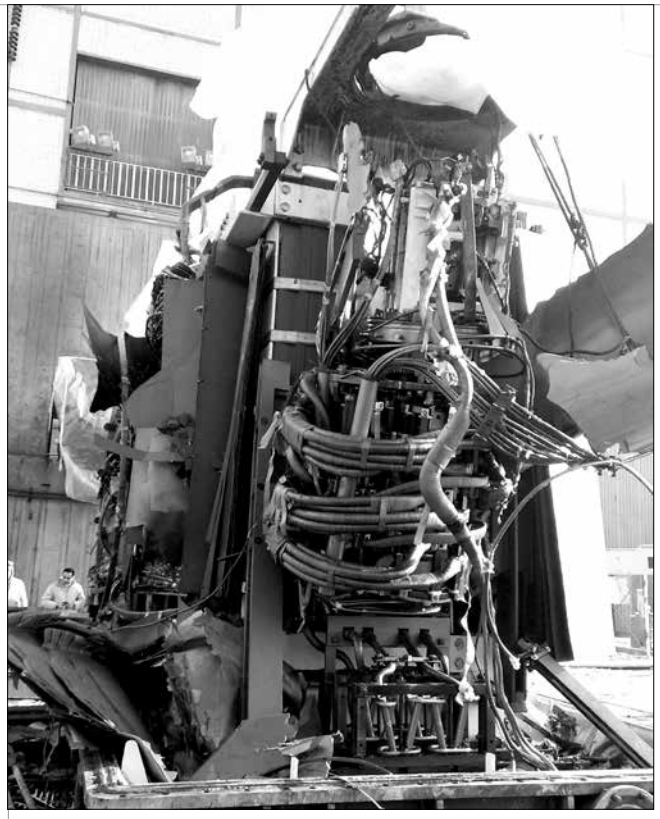
۳- اندازه‌گیری مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌های درگیر تپ‌چنجر قبل و بعد از مانور در موقعیت‌های خاص مشابه انجام و مقایسه گردند.

۲–۲– تپ‌چنجرهای OLTC

خطای انسانی در مورد OLTCها بسیار زیاد است که به چندین مورد آنها در محدوده حوصله این یادداشت اشاره می‌گردد. یادآوری می‌گردد که کلیه موارد اشاره شده

یک یا چندین بار باعث حوادث گوناگون کوچک و بزرگ شده‌اند و دانش و تجربه در اجتناب از آنها بسیار مؤثر است.

- شل بودن پیچ پایه گیربکس‌های انتقال نیرو[4] باعث کنتاکت ناقص در سلکتورسوئیچ، تولید گاز و نهایتا حادثه شـــده است. این مورد بیشتر در مرحله نصب ترانس و راه اندازی اولیه مشاهده شده است.
- شل بودن پیچ‌های اتصال شفت انتقال نیرو. این مورد نیز در نصب و راه‌اندازی اولیه بیشتر مشاهده شده و عواقب آن، اتصال ناقص کنتاکت‌های سلکتورسوئیچ می‌باشد. در برخی انواع تپ‌چنجر که در موقع سرویس لازم است شفت‌های انتقال نیرو دمونتاژ گردند، نیز در موقع مونتاژ مجدد این مساله، عامل حادثه بوده است.
- تزریق روغن با ولتاژشکست بسیار پایین. در برخی موارد مشاهده شده که حادثه انفجار دایورترسوئیچ به علت پایین بودن ولتاژشکست روغن تزریقی بوده‌است. این مورد با آزمایش ولتاژ شکست روغن قبل از تزریق کنترل و رفع می‌گردد.
- تنظیم نبودن عملکرد موتور درایو پس از ســـرویس و یا نصب اولیه به دلیل عدم اطلاع و یا توجه گروه سرویس، توالی عملکرد سلکتورسوئیچ و دایورترسوئیچ تنظیم نبوده، که باعث انفجار و خسارت سنگین شده است.
- منطبق نبودن موقعیت تپ‌چنجر با تابلوی موتور درایو. این خطا باعث سوختن بیش از ده‌ها ترانسفورماتور شده است، که سوختن دو دستگاه ترانسفورماتور مهم نیروگاهی و دو دستگاه ترانسفورماتور مهم انتقال فقط در عرض یک سال، از جمله این حوادث بوده است.
- بسته نشدن و یا شل بسته‌شدن پیچ‌های نگهدارنده دایورترسوئیچ
- بسته نشدن و یا شل بودن پیچ‌های اتصال جریان دایورترسوئیچ در مدل‌هایی که اتصال کنتاکت‌های جریان خروجی دایورترسوئیچ با پیچ بسته می‌شوند.
- شکستن شـــفت عایق انتقال نیرو. این معضل نیز به دلیل عدم انطباق موقعیت تپ‌چنجر با تابلوی موتور درایو به وجود می‌آید، بطوریکه تپ‌چنجر به انتهای موقعیت خود و ترمز مکانیکی می‌رســـد؛ ولی تابلو موتوردرایو هنـــوز به موقعیت انتهایی و ترمزهای الکتریکی و مکانیکی نرسیده است و با اعمال نیروی الکتروموتور و گیربکس شفت انتقال نیرو می‌شکند. چندین مورد مشابه باعث حادثه شکسته شدن شفت شده است.
- شفت‌های مذکور به نوعی طراحی و ساخته می‌شوند که در مواجهه با چنین خطای انسانی و یا گیر کردن مکانیکی تپ‌چنجر نقش فیوز مکانیکی را داشته باشد و مشاهده شده که پس از شکستن شفت برای جلوگیری از شکستن مجدد آن و به دلیل عدم دانش فنی، شفت جدید با مقاومت بیشتر ساخته و به کار برده شده و متاسفانه زمانی به این موضوع پی می‌بریم که در حادثه‌ای مشـــابه، بجای شکستن شفت، مکانیزم سلکتورسوئیچ خرد می‌گردد و خسارت بسیار وارد می‌نماید.
- شکستن پایه کنتاکت سلکتورسوئیچ و یا شکستن عایق کابل اتصال از سیم‌پیچ به پایه کنتاکت سلکتورســـوئیچ. این موارد در مواقعی پیش آمده که شـــخص غیر متخصص و ناآشنا به ســـاختار تپ‌چنجر و عایق، به داخل ترانسفورماتور رفته و از کابل‌ها و کنتاکت‌ها به عنوان نردبان صعود و فرود استفاده کرده است. این حوادث هم، در شبکه برق و نیروگاه‌ها کم نبوده است.
- مونتاژ ناصحیح دایورترســـوئیچ درون محفظه. در طی سالیان متمادی و کسب تجربه‌های تلخ، سازندگان تپ‌چنجر ســـعی در کاهش خطاهای انسانی در مونتاژ دایورترسوئیچ داشته و بسیاری از راه‌های خطا را نیز مسدود نموده‌اند. ولی هنوز دانش و تجربه، نیاز اساسی در چنین مواردی می‌باشد. چون قیمت ترانسفورماتور خیلی بیشتر از هزینه یک کارشناس خبره می‌باشد.
- اصرار نابجا برای هواگیری محفظه دایورترسوئیچ. در متون بالا یادآور شدیم که در بعضی از انواع تپ‌چنجر، نیاز به ایجاد بالشتک هوا وجود دارد. در این نوع تپ‌چنجرها، در بالاترین نقطه، پیچ هواگیری تعبیه نشده است. پس از سرویس دایورترسوئیچ و شارژ روغن مشاهده شده که با اصرار و شل کردن فلنج درپوش، اقدام به هواگیری می‌کنند. طبعاً با عملکرد تپ‌چنجر تحت بار، گازهای قابل اشتعال تولید و در محفظه بالا جمع می‌شوند و پس از مدتی فضای فوقانی مملو از گازهای قابل اشتعال خالص



می‌گردد که مانند بمب ساعتی، هر آن و با هر تغییر تپ، امکان انفجار وجود دارد. تعداد قابل توجهی حادثه، فقط به دلیل فوق، و یا عدم تخلیه گازهای قابل اشتعال و ایجاد بالشتک جدید هوا در شبکه حادث شده است.

- جا ماندن ابزار و یا قطعات مجزا مانند پیچ و یا مهره و واشر. تا کنون چندین مورد در حین سرویس تپ‌چنجر مشاهده شده که در سرویس‌های قبلی قطعاتی به جا مانده بود.

در ایران هم مانند هر کشـــوری، تنوع ترانسفورماتور، تپ‌چنجر و تجهیزات دیگر از سازنده‌های مختلف بسیار زیاد است. نگارنده در طول مدت ۳۰سال فعالیت مستمر و تخصصی خود، تجربه تعمیر کلی و جزئی و سرویس حدود ۷۰ مدل از ۲۰ شرکت سازنده تپ‌چنجر را داشته است که از نظر تکنولوژی به‌کاررفته در ساخت آنها متنوع بوده‌اند و طبعا امکان آموزش تخصصی و مخصوص همه انواع آنها وجود ندارد. لذا توجه و تاکید به ســـه مورد زیر در ارائه سرویس با کیفیت و جلوگیری و یا کاهش خطای انسانی می‌تواند بسیار موثر واقع شود.

۱- آموزش مستمر

۲- تفکر و تجزیه و تحلیل: با توجه به تنوع بسیار زیاد انواع تپ‌چنجر و تعطیل شدن بسیاری از کارخانه‌های تولید تپ‌چنجر، امکان آموزش عملی مدون برای تک‌تک انواع وجود ندارد. ولی یک کارشـــناس آموزش دیده و با تجربه، با استفاده از قدرت تفکر و تجزیه و تحلیل می‌تواند روشـــی صحیح به کار بسته؛ و با دقت، کنترل و بازبینیِ عملکرد خود در پایان کار، از صحت عملکرد خود اطمینان حاصل کند.

مطالعه حوادث و تجربیات پیشین و بررسی علل آنها، می‌تواند کمک بسزایی در این راستا باشد. که البته این یادداشت نیز با همین هدف نگاشته شده است.

1- on load tap changer (OLTC)
2- off circuit tap changer (OCTC)
3- change over
4- Bevel gear

CV2 با ساختار مقاوم خود و متشکل از دو سیستم قطع و وصل توامانِ کنتاکت های جرقه مکانیکی و وقفه دهنده های خلاء (vacuum interrupter) تعداد ۶۰۰،۰۰۰ عملکرد الکتریکی را فراهم ساخته و تا ۳۰۰،۰۰۰ عملکرد نیاز به هیچگونه خدمات سرویس و نگهداری دوره‌ای ندارد.

تپ چنجرهای خلاء مدل CV2 شرکت HM

(سوئیچ زنی در خلاء با پشتیبان عملکرد مکانیکی)

Muzaffer Onur UCAR
HM Elektromekanik Uretim A.S.

مقدمه

به پشتوانه هزاران محصول نصب شده و بیش از ده سال تجربه ی میدانی، تپ‌چنجر خلاء CV_2 به عنوان یک راه حل با قابلیت اطمینان بالا و قیمت کاملا اقتصادی ارائه شده است که برای ترانسفورماتورهای توزیع و انتقال تا سطح ولتاژ 132kV بکار گرفته می‌شود.

سلکتور قلب تپ‌چنجر می‌باشد که تعیین عمر تپ‌چنجر و نیاز احتمالی آن به سرویس، به ویژگی‌های سلکتور بستگی دارد. CV2 با ساختار سلکتور سوئیچی مقاوم خود، از یک ساختار یکپارچه متشکل از کنتاکت‌های جرقه مکانیکی و وقفه دهنده‌های خلاء[1] به صورت همزمان بهره می‌گیرد. این ساختار تعداد ۶۰۰،۰۰۰ عملکرد الکتریکی را ممکن می‌سازد و تا ۳۰۰،۰۰۰ عملکرد نیاز به هیچ‌گونه خدمات سرویس و نگهداری دوره‌ای ندارد.

محصولی برای کاربردهای باعملکرد بالا

در مقایسه با دایورتر سوئیچ، طرح‌های سلکتور سوئیچ ابعاد کوچکتر و قیمت مناسب‌تری دارند. این‌ها اغلب برای اتصالات ستاره و مثلث در ترانسفورماتورهای قدرت کوچک و متوسط تا سطح ولتاژ 132kV مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به تعداد ترانسفورماتورها در این سطوح ولتاژی، بزرگترین بخش تپ‌چنجرهای مصرفی آنلود در این محدوده ولتاژی و پایین‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، بدلیل موقعیت این رنج ولتاژی از ترانسفورماتورها در شبکه (که نوسانات ولتاژ هم از نظر تعداد و هم از نظر شدت بیشترین است)، تعداد عملکردهای تپ‌چنجرها در این رنج‌های ولتاژی، بیشترین است.

می‌دانیم که تعداد عملکرد بالاتر تپ‌چنجر، شرایط عملکرد را سنگین‌تر می‌کند. علاوه بر این، برای این رنج از تپ‌چنجرها سرویس و نگهداری بر مبنای دوره‌های پیشنهادی سازنده، کمتر مورد توجه است. (در مقایسه با تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای بزرگ). بنابراین به علت کاربرد گسترده، تعداد عملکرد بالا و سرویس و نگهداری ضعیف‌تر (نسبت به دستورالعمل سازنده)، وقوع مشکلات و نهایتا خطا در این رنج از تپ‌چنجرها چندان غافلگیر کننده نیست. غالب صدمات وارده ناشی از کیفیت پایین روغن بدلیل وجود رطوبت و ذرات کربن، خستگی و فرسودگی سیم‌های فلکسیبل و کنتاکت ها و همچنین تعداد عملکرد زیاد می‌باشد.

قابلیت اطمینان اثبات شده

تپ‌چنجرهای خلاء استفاده شده در ترانسفورماتورهای روغنی در اوایل هزاره اخیر وارد بازار شدند. تکنولوژی خلاء، طول عمر الکتریکی و شاخص‌های سرویس دوره‌ای و نگهداری تپ‌چنجرها را به کلی تغییر داده است.

تپ‌چنجرهای خلاء آنلود HM CV2 در سال ۲۰۰۶ وارد بازار شدند و پس از آن برروی هزاران ترانسفورماتور نصب گردیده است. این تپ‌چنجرها توانسته‌اند به بازه سرویس دوره‌ای ۳۰۰،۰۰۰ عملکرد و همچنین عمر عملکرد الکتریکی ۶۰۰،۰۰۰ دست یابند که سبب شده تا کارایی CV2 به علت طراحی برجسته و کیفیت ساخت آن کاملا به چشم بیاید.

قابلیت اطمینان یک تپ‌چنجر تا حدود زیادی به تکنولوژی ساخت آن و همچنین سهولت نگهداری دوره‌ای آن بستگی دارد. به عنوان یک مثال می‌توان به راهکار سازنده برای قراردادن کنتاکت‌های ثابت روی سیلندر روغن و قراردادن کنتاکت‌های متحرک روی شفت چرخان مرکزی اشاره کرد. این مساله همترازی بین کنتاکت‌های ثابت و متحرک را به شدت تعیین کننده می‌نماید والبته به مهارت خیلی زیادی نیاز دارد. برای مثال هنگام بازدید تپ چنجر که نیاز به بیرون آوردن شفت چرخان مرکزی از داخل سیلندرِ روغن احاطه کننده می‌باشد، اغلب منجر به بروز مشکلاتی می‌گردد؛ زیرا همین‌که شفت کنتاکت‌های متحرک بیرون آورده می‌شود، هیچ امکان و وسیله‌ای برای چک کردن مقاومت کنتاکت‌ها و توالی سوئیچینگ وجود ندارد. در واقع، امکان تست مقاومت کنتاکت و توالی سوئیچینگ، فقط همراه با سیم‌پیچ ترانسفورماتور وجود دارد. این مساله از منظر نگهداری پیشگیرانه و تست‌های تشخیصی قبل و حین سیکل عملکرد تپ‌چنجر، کاملا ناخوشایند است.

با این وجود،طراحی CV2 به گونه‌ای است که کنتاکت‌های ثابت و متحرک را در یک ساختار قفس مانند به صورت یکپارچه در خود جا داده است که برای اندازه‌گیری و بازرسی می‌تواند به طور کامل بیرون آورده شود.

بنابراین ریسک همترازی کنتاکت‌ها وجود نخواهد داشت و بسیار مهم‌تر اینکه در این جا یک ساختار مقاوم یکپارچه با قابلیت اطمینان بالا جهت بهره‌برداری طولانی مدت وجوددارد که مشکلات بالقوه مکانیکی در آن به حداقل رسیده است.

ویژگی‌های برجسته‌ی طراحی

تپ‌چنجرهای خلاء یک راه حل مناسب برای تنظیم ولتاژ می‌باشند. از آنجا که مشتریان همیشه به قابلیت اطمینان بالا نیاز دارند، HM در حال کار روی طرح‌هایی از تپ‌چنجرهای آنلود خلاء می‌باشد که قابلیت اطمینان آن‌ها حتی از مقدار موجود

تپ‌چنجرهای CV2 به علت نوآوري آن در یکپارچگی کنتاکت های ثابت و متحرک، ریسک از تنظیم خارج شدن کنتاکت‌ها را از بین برده است که در نتیجه قابلیت اطمینان را بالا برده است.

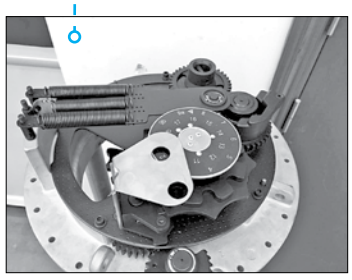
در CV2 یکپارچه کردن کنتاکت های جرقه مکانیکی بصورت سری با یک وقفه دهنده خلاء، سطح جدیدی از قابلیت اطمینان را فراهم نموده و پایش و حفاظت موثرتری را ایجاد می‌کند.

فعلی بیشتر باشد. طرح CV2 راه‌حل‌های مختلفی را برای این هدف بکار می‌گیرد.
بـــه عنوان مثـــال در طرح CV2 ، با وجود اســـتفاده از محفظه‌هـــای قطع و وصل خـــلاء، کنتاکت‌های جرقه مکانیکی با ظرفیت نامی خود کماکان حضور دارند. این کنتاکت‌های مکانیکال به صورت سری با وقفه‌دهنده‌های (قطع و وصل کننده های) خلاء قرار داده می‌شوند.
در عملکرد نرمال تپ چنجر، وقفه‌دهنده‌های خلاء جریان را از طریق جرقه‌هایی که داخل کپسول خلاء زده می‌شود، سوئیچ می‌نمایند. بعد از اینکه کنتاکت‌های مکانیکی در حالت بدون بار و مانند تپ‌چنجر غیرقابل قطع تحت ولتاژ عمل کرده‌اند، در حالتی که شـــرایط محفظه خلاء از دســـت برود، وقفه‌دهنده قادر به خاموش کردن جرقه نبوده و بنابراین جریان بار، در این حالت توســـط کنتاکت‌های جرقه مکانیکی قطع خواهد شد. همین که کنتاکت‌های مکانیکی جریان را سوئیچ کردند، این کار منجر به تولید کربن و گاز گردیده و یک سیگنال آلارم از طریق رله حفاظتی به موتور درایو تپ چنجر ارسال می‌گردد و عملکردهای بعدی کلید قفل می‌گردد. این یک پایش وضعیت و حفاظت بسیار موثر برای تپ چنجرهای آنلود خلاء می‌باشد.

تماس با ما

Address: Organize Sanayi Bolgesi
9. Cadde No:13/2 Merkez Balikesir TURKEY
Postal code: 10020
Tel: +90 216 232 2246
http://www.huaming.com.tr
info@huaming.com.tr

1- Vacuum Interrupter

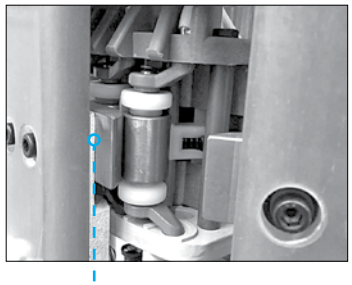


سیستم جمع کننده انرژی

- فنر در نقطه عملکرد آزاد می‌شود
- دو سیستم چرخ دنده وجود دارد. چرخ دنده پایینی در زیر صفحه نشان دهنده موقعیت، کنتاکت‌های انتخابگر تپ را جابجا می‌کند. چرخ دنده بالایی کنتاکت‌های متحرک را روی شفت عایق، حرکت می‌دهد.

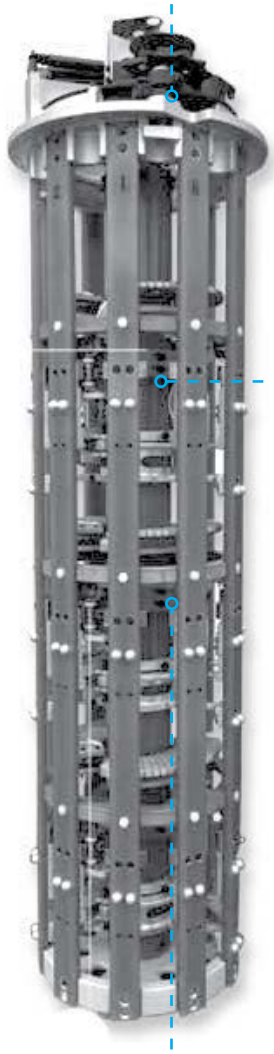
کنتاکت‌های خلاء

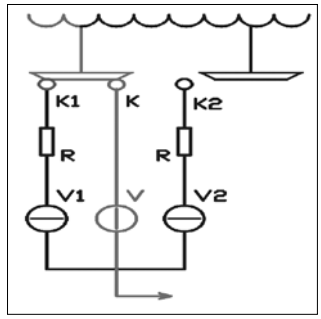
- از وقفه دهنده‌های خلاء EATON استفاده می‌کند که دارای طراحی خاص برای تپ‌چنجرهای آنلود روغنی میباشد.
- عمر کنتاکت کمتر از ۶۰۰،۰۰۰ عملکرد نبوده و از نظر مکانیکی عمر آن کمتر از ۱،۵۰۰،۰۰۰ عملکرد نمی‌باشد.



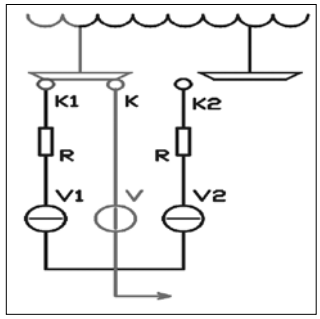
کنتاکت های مکانیکی

هنگامی که وقفه دهنده خلاء نمی تواند وظیفه‌ی خود را انجام دهد، کنتاکت مکانیکی که در واقع نقش پشتیبان را دارد، وظیفه وقفه‌دهنده را به دوش می‌کشد تا تپ‌چنجر به صورت نرمال عملکرد خود را داشته باشد. این همان دلیلی است که CV2 را بسیار با کیفیت و قابل اطمینان ساخته است.

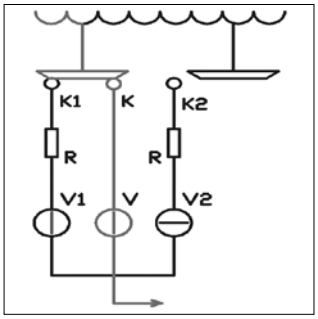




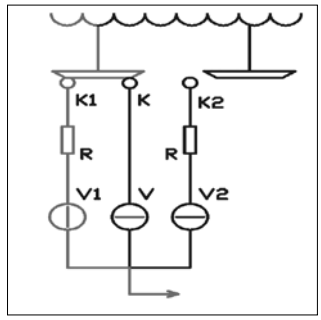
مرحله اول: در موقعیت عملکرد نرمال، جریان از وقفه دهنده خلاء اصلی شاخه V خارج می‌شود.



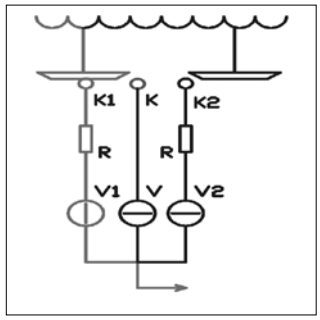
مرحله دوم: در شروع فرآیند سوئیچینگ، کنتاکت گذرای مکانیکی K_1 بسته است و جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء اصلی شاخه V خارج می‌شود.



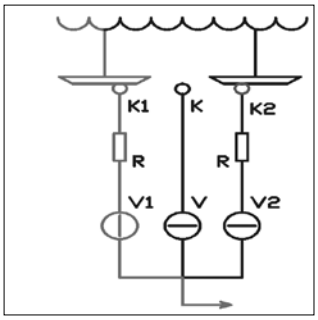
مرحله سوم: وقفه دهنده خلاء گذرای V_1 بسته شده و جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء اصلی شاخه V خارج می‌شود.



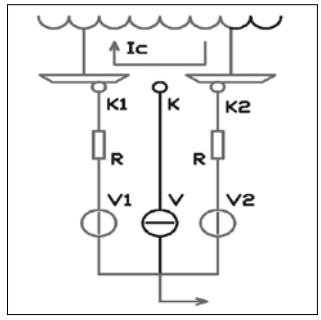
مرحله چهارم: وقفه دهنده خلاء اصلی V باز شده و قوس در داخل وقفه دهنده خلاء اتفاق می افتد. جریان از وقفه دهنده خلاء گذرای شاخه V_1 خارج می‌شود.



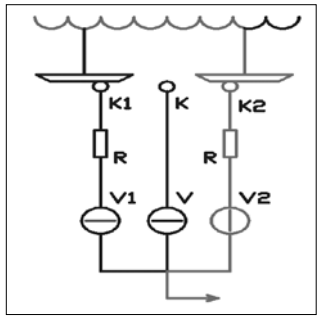
مرحله پنجم: قوس در داخل وقفه دهنده خلاء اصلی V خاموش می‌شود و کنتاکت مکانیکی K باز می‌شود جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء گذرای شاخه V_1 خارج می‌شود.



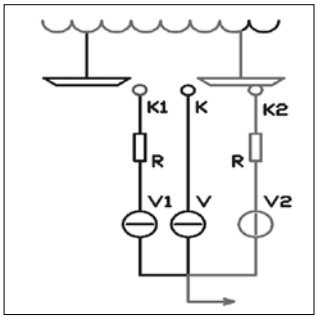
مرحله ششم: کنتاکت مکانیک گذرای K_2 در وضعیت بی بار بسته می‌شود جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء گذرای شاخه V_1 می گذرد.



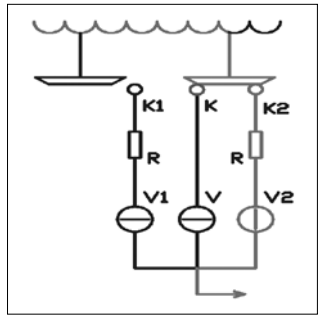
مرحله هفتم: وقتی وقفه دهنده خلاء انتقالی V_2 وصل می‌شود، یک مسیر جریان گردشی ایجاد می‌شود. جریان از مسیر وقفه دهنده خلاء گذرای هر دو شاخه خارج می‌شود.



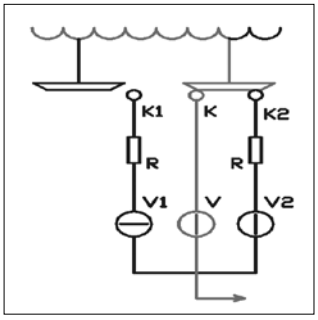
مرحله هشتم: وقتی وقفه دهنده خلاء انتقالی V_1 باز می‌شود، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود جریان از وقفه دهنده گذرای شاخه V_2 خارج می‌شود.



مرحله نهم: بعد از خاموش شدن قوس الکتریکی، کنتاکت گذرای مکانیکی K_1 باز می‌شود و جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء انتقالی شاخه V_2 می گذرد.



مرحله دهم: وقتی کنتاکت مکانیکی اصلی K بسته شود جریان هنوز از وقفه دهنده خلاء گذرای شاخه V_2 خارج می‌شود.



مرحله یازدهم: وقتی وقفه دهنده خلاء اصلی V بسته می‌شود، خروجی جریان به وقفه دهنده خلاء اصلی شاخه V منتقل خواهد شد. در این حالت پروسه سوئیچینگ کامل شده است

V	وقفه دهنده خلاء اصلی
V_1 /V_2	وقفه دهنده خلاء گذرا
K	کنتاکت مکانیکی اصلی با قابلیت تحمل قوس الکتریکی
K_1 / K_2	کنتاکت گذرای مکانیکی با قابلیت تحمل قوس الکتریک
R	مقاومت گذرا

تشخیص وضعیت تپ چنجر تحت بار ترانسفورماتورهای قدرت

حسن رضا میرزائی
شرکت ایران ترانسفو

عباس غایبلو
شرکت برق منطقه ای زنجان

کریم میرعلیخانی
شرکت ایران ترانسفو

حمیده محمدرضایی
شرکت برق منطقه ای زنجان

زینب سودی
شرکت برق منطقه ای زنجان

چکیده

درصد عمده ای از خرابی ها و عیوب ترانسفورماتورهای قدرت مربوط به تپ چنجرهای تحت بار آن‌ها است. از این رو، سرویس دوره ای تپ چنجرها از اهمیت فوق العاده ای برای کاهش نرخ خطا در ترانسفورماتورها برخوردار است. مهم‌ترین مشکل به وجود آمده در حین انجام سرویس دوره ای، لزوم بی‌برق شدن ترانسفورماتور می‌باشد. با تشخیص درست وضعیت تپ چنجر می توان از سرویس غیرضروری تپ چنجر و خارج شدن ترانسفورماتور از مدار جلوگیری کرد. همچنین می توان از ایجاد عیوبی که در بازه زمانی بین دو سرویس دوره ای ایجاد می شوند، اطلاع حاصل کرده و با تعمیر تپ چنجر و جلوگیری از رشد این عیوب، از بروز خطای غیرقابل پیش بینی در ترانسفورماتور ممانعت به عمل آورد.

مقدمه

برای تغییر ولتاژ ترانسفورماتورها از طریق تغییر تعداد دور سیم پیچ ها (نسبت دور)، از تپ‌چنجرهای تحت‌بار[1] (OLTC) استفاده می کنند که قابلیت کلیدزنی تحت‌بار و بدون قطع جریان بار را دارند. تپ‌چنجرها یکی از تجهیزات حساس ترانسفورماتور بوده و اطمینان از کارکرد صحیح آن‌ها با انجام مانیتورینگ برخط، تأثیر بسیار مهمی بر عدم خروج ناخواسته و غیرقابل‌پیش‌بینی ترانسفورماتورها از شبکه و جلوگیری از وقوع خطای مخرب بر روی آن‌ها دارد. طبق گزارش [۱] حدود ۴۰% از خرابی های ترانسفورماتور مربوط به نقص در عملکرد OLTC است. تجربیات چندین ساله شرکت هیدروکبک در زمینه بهره برداری ترانسفورماتورهای خود نیز نتایج مشابهی را طبق شکل یک نشان می‌دهد [۲].

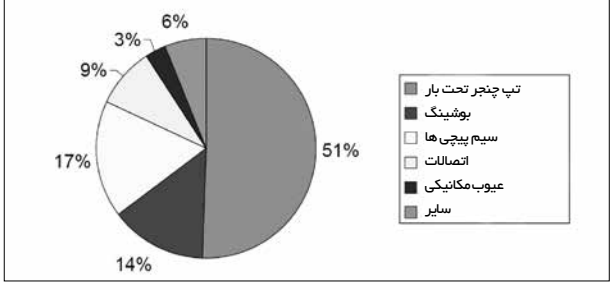
تحقیقات میدانی نشان می‌دهد که بازرسی‌های دوره ای تپ چنجر به اندازه کافی درباره تشخیص سریع خطای این تجهیزات مناسب نیستند، زیرا سرعت رشد عیوب آن‌ها از مراحل اولیه پیدایش تا ایجاد خطا زیاد بوده و دارای زمان رشدی بسیار کمتر از فواصل زمانی بین دو بازرسی دوره‌ای متوالی هستند [۳]. این موضوع اهمیت مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر برای اطمینان از صحت کارکرد آن و تشخیص عیب احتمالی در مراحل اولیه شکل گیری را روشن می سازد. ازاین‌رو، امروزه گرایش به دستگاه‌های مانیتورینگ جهت تشخیص عیب در مراحل ابتدایی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.

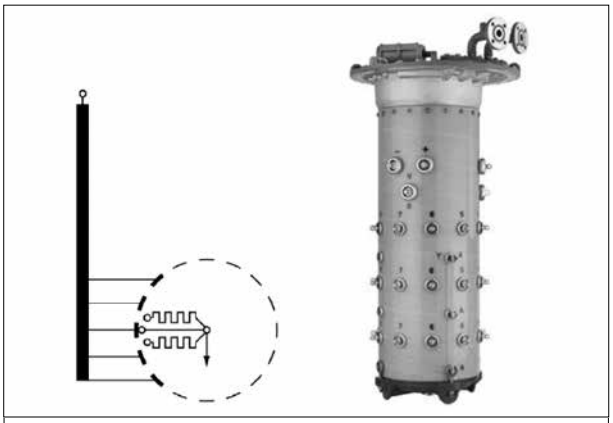
کلید تپ‌چنجر تنها بخش مکانیکی متحرک ترانسفورماتور است. خطاهای مکانیکی موجب نقص اساسی در ساختمان کلید می‌شود. همچنین مکانیسم‌های پیری متعددی بر کلید تأثیر می گذارند که از آن جمله می‌توان به مواردی نظیر کثیف شدن روغن در اثر قوس و پایین آمدن استقامت عایقی آن، بروز تخلیه الکتریکی درختی[2] بر روی عایق های رزینی و شفت عایقی سیستم درایو، خوردگی کنتاکت‌های قوس[3] و خوردگی مکانیکی کنتاکت‌ها اشاره نمود [۲].

در اثر ضعف عایقی بین فازها و یا تحلیل رفتن قدرت عایقی روغن (که در اثر پیری روغن و وجود ذرات و رطوبت در روغن) ممکن است شکست عایقی در داخل تپ چنجر ایجاد شود. همچنین باوجود پیشرفت در فنّاوری ساخت کلیدهای OLTC، اتصال ضعیف بین کنتاکت‌ها[4] هنوز هم یکی از خطاهای شایع این کلیدها است. قوس موجب ایجاد کربن پیرولیتیک[5] در روغن و خوردگی کنتاکت‌های قوس می‌شود. همچنین ممکن است کنتاکت‌های غیر قوس[6] نیز تحت شرایطی خاص نظیر کارکرد طولانی، عدم تعویض روغن به مدت طولانی، اضافه‌بار و عدم جابجایی و کارکرد کنتاکت‌ها به مدت طولانی آسیب ببینند [۴]. غیر هم‌تراز بودن کنتاکت‌ها نیز می‌تواند موجب افزایش سرعت خوردگی آن‌ها شود [۵].

به‌طورکلی خطای تپ چنجر را می‌توان به سه بخش خطاهای مکانیکی، الکتریکی و حرارتی تقسیم‌بندی کرد. معمولاً اکثر خطاهای کلیدهای تپ‌چنجر مکانیکی هستند که نهایتاً منجر به خطای الکتریکی نظیر سوختن کنتاکت‌ها ، مقاومت‌های انتقال و شکست عایقی می‌شود. خطای موتور، قطع منبع تغذیه و خطا در مدار کنترل در بعضی از اوقات منجر به توقف عملکرد تپ چنجر قبل از تکمیل روند تغییر تپ می‌گردد. این موارد موجب توقف مکانیسم تپ‌چنجر در موقعیتی ناخواسته شده و با قرار گرفتن کنتاکت‌ها در یک وضعیت نامطلوب موجب ایجاد قوس در دایورترسوئیچ

شکل یک: دسته‌بندی انواع عیوب ترانسفورماتور [۲]





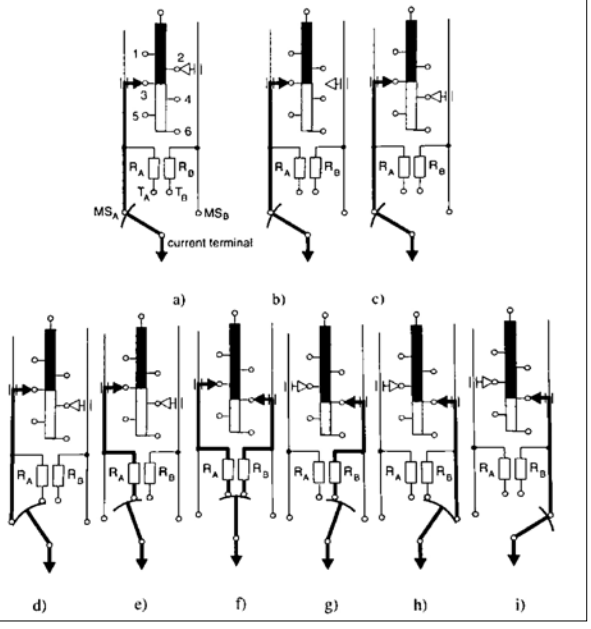
شکل دو: ساختمان و طرح کلی تپ‌چنجر دارای سلکتورسوئیچ [۷]

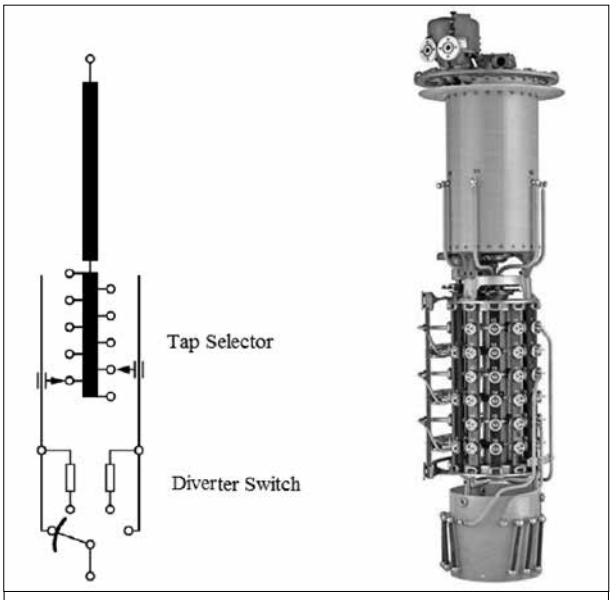
می‌شود که نیاز به تعمیر سریع دارد. خطای بخش مکانیکی موجب از دست رفتن سنکرونیزم بین دایورترسوئیچ و سلکتورسوئیچ شده و منجر به افزایش زمان قوس و سوختن کنتاکت‌ها و مقاومت‌های انتقال می‌شود [۴].

جدول یک نتایج بررسی وضعیت OLTC در لحظه رخداد خطا را نشان می‌دهد. طبق آمار، تنها تعداد کمی از خطاهای کلیدها در حین بازرسی مورد شناسایی و رفع عیب قرار می‌گیرند. تعداد زیادی از این خطاها در حین کار کلیدها و ترانسفورماتورها ایجاد می‌گردند. همچنین درصد بسیاری از خطاها بعد از سرویس‌های دوره‌ای کلید OLTC رخ می‌دهند. این امر نشان می‌دهد که سرویس و تعمیر ضعیف و ناکارآمد کلیدها یک منبع بالقوه برای وقوع عیب در آن‌ها است. یک سیستم مانیتورینگ مناسب علاوه بر اینکه باید بتواند وقوع عیب را قبل از ایجاد خطا تخمین بزند، بایستی قادر به کنترل کیفیت کار سرویس دوره‌ای OLTC نیز باشد [۴].

آمارها نشان می‌دهد که مکانیسم کنتاکت‌ها عامل اصلی بروز خطا در OLTC است.

شکل چهار: اصول توالی کلیدزنی تپ‌چنجر تحت‌بار از نوع تپ سلکتور ـ دایورترسوئیچ (a تا c: ترتیب عملکرد تپ‌سلکتور، d تا i: ترتیب عملکرد دایورترسوئیچ) [۷]





شکل سه: ساختمان و طرح کلی تپ‌چنجر دارای تپ‌سلکتور ـ دایورترسوئیچ [۷]

ازاین‌رو پالس‌های ارتعاشی ناشی از حرکت کنتاکت‌ها می‌تواند پارامتر مناسبی برای مانیتور کردن وضعیت کلید OLTC باشد. برای این منظور، داشتن اطلاعات از جزئیات نحوه حرکت کنتاکت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است [۴].

برنامه سرویس دوره‌ای تپ چنجر تحت بار توسط کارخانه‌های سازنده آن‌ها ارائه می‌شود. که شامل بازرسی منظم و دوره‌ای روغن (تصفیه یا تعویض) و بررسی خوردگی کنتاکت‌ها می‌باشد. این بازرسی‌های دوره‌ای معمولاً پرهزینه بوده، به نیروی کار و نفر-ساعت زیادی نیاز دارد و مستلزم خروج ترانسفورماتور از مدار است. همچنین طبق تجربه، میزان عیوب OLTC که در حین این بازرسی‌های دوره‌ای پیدا می‌شوند، نسبت به تعداد خطاهای این کلیدها کم است. همچنین تعداد خطاهای تپ چنجر که پس از بازرسی دوره‌ای کلیدها و در اثر بی‌دقتی نیروی انسانی در سرویس دوره‌ای به وقوع می پیوندد بالاست [۶].

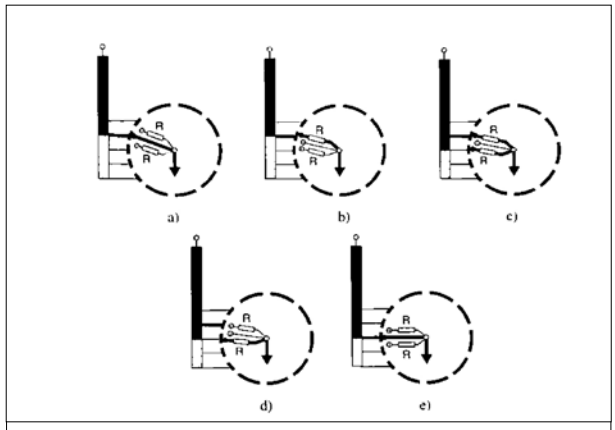
ساختمان تپ‌چنجرهای تحت‌بار [۷]

تپ‌چنجر دو کار اساسی انجام می‌دهد: انتخاب تپ بعدی بدون اختلال در جریان بار و سپس انتقال توان به تپ انتخاب شده بدون قطع جریان بار. ساده‌ترین نوع تپ‌چنجر تحت‌بار یعنی سلکتورسوئیچ[۷]، این دو کار را در یک وسیله به طور هم‌زمان انجام می‌دهد. در صورتی که برای ترانسفورماتورهای با توان بالا، برای انجام مجزای این دو کار از تپ‌سلکتور و دایورترسوئیچ استفاده می‌شود. بعد از انتخاب تپ توسط تپ‌سلکتور در حالت بدون جریان، دایورترسوئیچ انتقال جریان بار به تپ بعدی بر عهده دارد. در تمام طرح‌های تپ‌چنجر، همگامی مکانیکی[۸] میان تپ‌سلکتور، سلکتور تغییر وضعیت و دایورترسوئیچ ضروری است.

در هنگام جریان انتقال بار از یک تپ به تپ دیگر، این دو تپ باید هر دو موقتاً به ترمینال خروجی وصل شوند. در این وضعیت، برای جلوگیری از اتصال کوتاه بخشی

جدول یک: وضعیت کلید OLTC در لحظه رخداد خطا، a: در کار عادی، b: در حین بازرسی دوره‌ای، c: بعد از تعمیر، d: موارد دیگر [۴]

وضعیت	a	b	c	d
درصد (%)	۷۳/۵	۲	۲۲/۴	۲



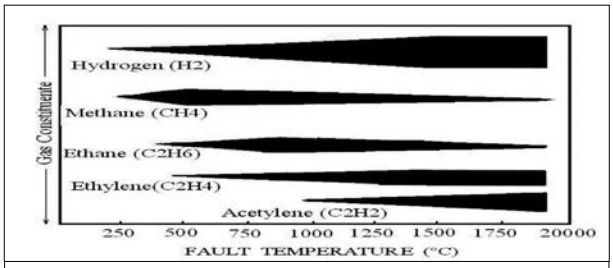
شکل پنج: اصول توالی کلیدزنی تپ‌چنجر تحت‌بار از نوع سلکتورسوئیچ [۷]

از سیم‌پیچ که بین دو تپ واقع شده است، از امپدانس انتقالی[۹] که می‌تواند راکتوری یا مقاومتی باشد استفاده می‌شود. بر اساس نوع امپدانس انتقالی مورد استفاده، دو روش متداول در زمینه تغییر تپ وجود دارد که عبارتند از روش کلیدزنی راکتوری سرعت پایین و روش کلیدزنی مقاومتی سرعت بالا.

با توجه به این واقعیت که اســـتفاده از کلیدزنی راکتوری در تپ‌چنجرهای تحت‌بار ســـبب اختلاف فاز ۹۰ درجه میان جریان کلیدزنی شده و ولتاژ بازگشتی[۱۰] دو سر کنتاکت‌های کلید می‌شود، تپ‌چنجرهای تحت‌بار راکتوری برای پله‌های بزرگ ولتاژ مناسب نیست. به علاوه هزینه راکتورهای انتقال با افزایش ولتاژ پله‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از این رو کلیدزنی راکتوری در طی ســـال‌های گذشته اهمیت خود را از دست داده است به طوری که از اواخر ۱۹۴۰ خیلی از تولید کننده های OLTC، تولید تپ‌چنجرهای راکتوری را متوقف کرده‌اند. با این حال در آمریکا هنوز این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تپ‌چنجرهای تحت‌بار با کلیدزنی ســـریع مقاومتی، با اختراع دایورترســـوئیچ[۱۱] و تپ‌سلکتور[۱۲] در ســـال ۱۹۲۶ توسط دکتر جانســـون ابداع شد. در این تپ‌چنجر، امپدانـــس انتقالی به صورت یک مقاومت اهمی اســـت، لذا جریان کلیدزنی و ولتاژ برگشتی هم فاز بوده و در نتیجه خاموش کردن قوس در صفر جریان راحت‌تر است. در این روش مقاومت انتقالی برای بارگذاری کوتاه‌مدت طراحی می‌شود. در نتیجه استفاده از تپ‌چنجرهای تحت‌بار را در پله‌های ولتاژی بزرگ و توان‌های بالا مقرون به صرفه می‌شود.

تپ‌چنجر تحت‌بار مقاومتی سرعت بالا در دو مدل طراحی می‌شوند؛ روش اول شامل



شکل شش: میزان گازهای تولیدی در روغن ترانسفورماتور در دماهای مختلف [۹]

تپ‌سلکتور-دایورترسوئیچ است و روش دوم که در آن سلکتورسوئیچ هر دو وظیفه تپ‌سلکتور و دایورترسوئیچ را با هم انجام می‌دهد. استفاده از سلکتورسوئیچ از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه است اما با توجه به برخی محدودیت‌های ذاتی، کاربرد آن به ترانســـفورماتورهای کوچک با ولتاژ حداکثر ۱۲۳kv و جریان نامی ۵۰۰ تا ۶۰۰ آمپر محدود می‌شـــود. نمای اصول عملکرد سلکتورسوئیچ در شکل دو نشان داده شده است.

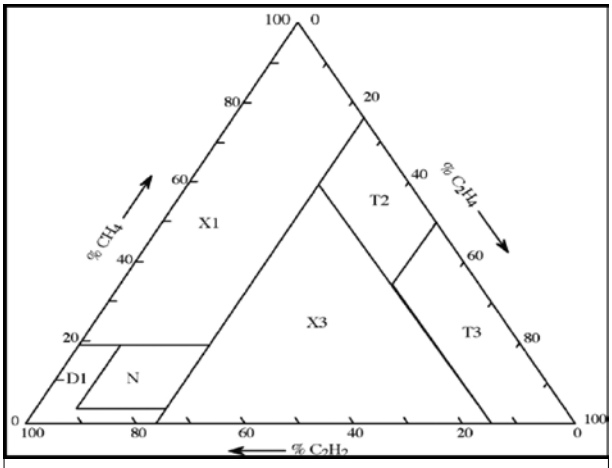
تپ‌چنجر از نوع تپ‌سلکتور-دایورترسوئیچ، برای ترانسفورماتورهایی با مقادیر نامی بسیار بالا قابل استفاده است (شکل سه). تخلیه سریع انرژی فنر در دایورترسوئیچ، زمان انتقال را به حدود ۴۰ms تا ۶۰ms (بسته به نوع طراحی تپ‌چنجر تحت‌بار) محدود می‌کند. آزاد شدن فنر باعث می‌شود که دایورترسوئیچ با سرعت بسیار بالایی جریان را از تپ در حال کار به تپ از پیش تعیین شـــده منتقل کند. در حین این عمل مقاومت‌های انتقالی برای جلوگیری از اتصال کوتاه تپ‌ها برای مدت‌زمانی حدود ۲۰ms تـــا ۳۰ms وارد مدار می‌شـــوند. کل مدت‌زمان یک عمل تغییر تپ از آغاز مکانیسم حرکت موتور درایو تا اتمام فرایند توسط دایورترسوئیچ، بسته به نوع کلید در حدود ۳ تا ۱۰ ثانیه طول می‌کشد.

توالی کلیدزنی یک فرایند تغییر تپ با استفاده از تپ‌سلکتور و دایورترسوئیچ در شکل چهار نشان داده شده است. در این شکل کنتاکت‌های اصلی نمایش داده نشده‌اند. عملکرد تپ‌سلکتور در شکل 4a تا 4c آورده شده است. این عملکرد دارای سرعت پایینی بوده و توسط مکانیسم موتور درایو فعال می‌شود. عملکرد دایورترسوئیچ که در شکل‌های 4d تا 4i نمایش داده شده، دارای سرعت بالایی بوده به وسیله ی مکانیسم فنر شارژ شده فعال می‌شود.

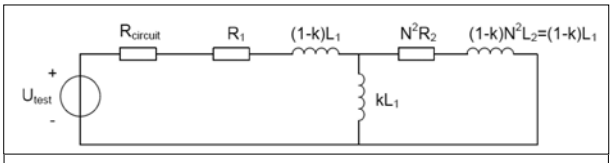
سلکتورسوئیچ تنها در یک گام عمل تغییر از یک تپ به تپ مجاور را انجام می‌دهد (شکل پنج). همان‌طور که اشاره شد مکانیسم موتور، یک عنصر ذخیره کننده‌ی انرژی (مکانیسم فنر) را شارژ می‌کند که بعد از آزاد شدن، کنتاکت متحرک سلکتورسوئیچ

جدول دو: مثلث دوآل برای تعیین منبع تولید گاز تپ چنجر [۹]

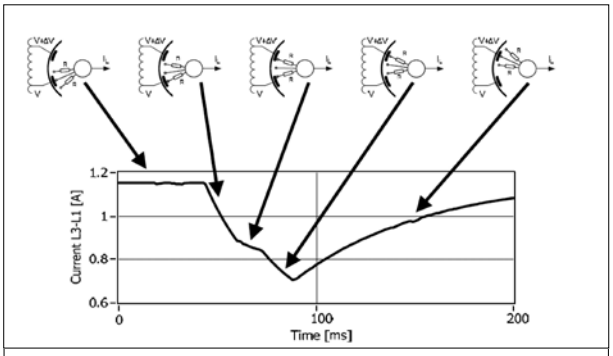
ناحیه	وضعیت تپ‌چنجر	کارهایی که باید جهت رفع خطا انجام داد
N	عملکرد نرمال	----------
T3	خطای گرمایی شدید (T>700 °C) : ایجاد لایه کربنی ضخیم روی کنتاکت‌ها	تعویض روغن– بازدید کنتاکت‌ها به منظور اینکه مشخص شود لایه کربنی به وجود آمده یا نه
T2	خطای گرمایی (300<T<700°C): پدید آمدن لایه کربنی روی کنتاکت‌ها	
X3	خطاهای T2 و T3 در حال شکل گیری، که معمولاً به دلیل تشکیل لایه نازک کربنی روی کنتاکت‌ها ایجاد می‌شود. یا قوس شدید	تست و بازدید کنتاکت‌ها جهت بررسی مقاومت کنتاکت‌ها و تشکیل لایه کربنی
D1	قوس‌های نامنظم و شدید	بازرسی کنتاکت‌ها جهت بررسی وجود قوس
X1	وجود قوس‌های نامنظم و شدید یا خطای حرارتی در حال ایجاد	بازدید از کنتاکت‌ها



شکل هفت: مثلث دوآل برای تپ چنجر [۹]



شکل نه: مدل T ترانسفورماتور [۹]

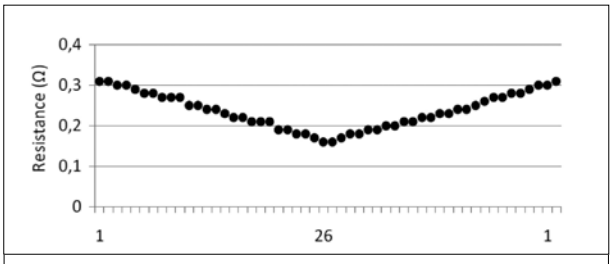


شکل یازده: نمودار جریان ترانسفورماتور در تست DRM در یک تغییر پله در سلکتور سوئیچ [۹]

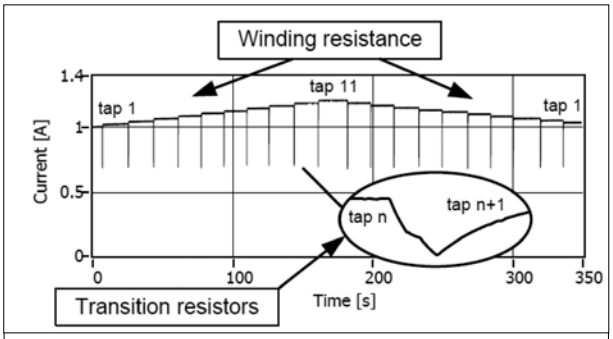
را فعال می‌کند. در این عملیات، کنتاکت به صورت سریع از یک تپ به تپ مجاور حرکت خواهد کرد. بسته به نوع و طراحی، زمان انتقال واقعی میان ۴۰ تا ۱۸۰ میلی ثانیه است، در حالی که زمان کل عملکرد مکانیسم موتور درایو ۳ تا ۱۰ ثانیه خواهد بود.

روش‌های مختلف مانیتورینگ و تشخیص وضعیت کلید تپ‌چنجر

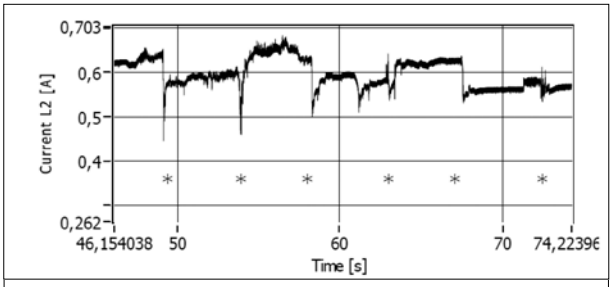
بسیاری از خطاهای ترانسفورماتورهای قدرت به عملکرد نادرست تپ‌چنجرهای تحت‌بار مربوط می‌شوند. روش‌های مختلفی برای تعمیر و سرویس تپ‌چنجرها موجود است. یکی از روش‌های مرسوم، روش سرویس دوره‌ای است که در آن طی یک بازه زمانی مشخص ترانسفورماتور از مدار خارج شده و در حالت بدون بار از اجزای ترانسفورماتور بازدید به عمل می آید و در صورت لزوم قسمت‌هایی که در معرض آسیب‌دیدگی قرار دارند، تعمیر می شوند. به این روش نگهداری، روش نگهداری مبتنی بر زمان[۱۳] گفته می‌شود. یک روش دیگر نگهداری، روش مبتنی



شکل هشت: نمودار تغییرات مقاومت در تست SRM



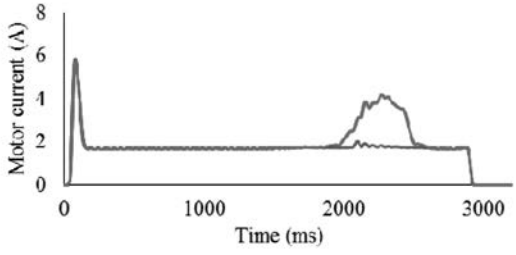
شکل ده: نمودار جریان اندازه‌گیری شده در عملکرد متوالی پله های تپ‌چنجر [۹]



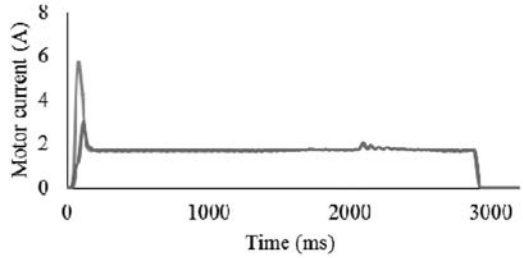
شکل دوازده: جریان‌های اندازه‌گیری شده در حالت وقوع خطا در سلکتور تغییر وضعیت [۹]

بر وضعیت[۱۴] است. در این روش به کمک برخی تست‌های غیر مخرب می‌توان از وضعیت ترانسفورماتور و تپ‌چنجر آگاهی حاصل کرد بدون اینکه نیازی به بازدید از تپ‌چنجر باشد. در این روش که در آن از تست‌های متنوعی استفاده می‌شود، نسبت به سرویس دوره‌ای دارای مزایایی نظیر کاهش هزینه‌های سرویس و نگهداری، دقت عمل بالاتر، افزایش عمر ترانسفورماتور و تپ چنجر، جلوگیری از بروز خطاهای مخرب و غیرقابل جبران، کاهش هزینه نفر-ساعت مورد نیاز برای عیب‌یابی و تعمیر می‌باشد. قابلیت اطمینان بهره برداری از ترانسفورماتورهای قدرت و افزایش طول عمر آن‌ها تا حد زیادی به مانیتورینگ وضعیت کاری و پارامترهای آن‌ها بستگی دارد. عموماً در مانیتورینگ برخط ترانسفورماتور، از روش‌هایی نظیر مانیتورینگ بوشینگ، گاز، PD، دما، وضعیت OLTC و ... استفاده می‌شود. یک سیستم مانیتورینگ علاوه بر اینکه نباید خیلی پیچیده باشد و بتواند وقوع عیب را به‌درستی تشخیص دهد، بایستی دارای هزینه معقولی نیز باشد.

در ادامه به بررسی روش‌های متعددی که امروزه برای مانیتورینگ و تشخیص وضعیت کلید تپ چنجر استفاده می شود، پرداخته خواهد شد.



شکل سیزده: بسته سیگنال جریان موتور در حالت سالم و با افزایش اصطکاک مکانیسم محرکه [۵]



شکل چهارده: بسته سیگنال جریان موتور در حالت سالم و شل بودن شفت درایو [۵]

روش آنالیز گازهای محلول[۱۵] (DGA) در روغن و کنترل کیفیت آن

یکی از روش‌های شناسایی خطای تپ چنجر استفاده از روش DGA است. انجام DGA از روغن مخزن دایورترسوئیچ می‌تواند برخی از خطاهای آن را آشکارسازی کند. بااین‌حال به دلیل قرار گرفتن تپ‌سلکتور در مخزن روغن ترانسفورماتور، شناسایی خطای آن به کمک روش DGA چندان آسان نیست [۸]. درحالی‌که از انجام DGA بر روی روغن مخزن ترانسفورماتور می‌توان برای مشخص کردن عیوب تپ‌سلکتور استفاده نمود، این روش به دلیل امکان اشتباه با دیگر خطاهای داخل ترانسفورماتور قدری مشکل است [۸].

تحت تنش های گرمایی و الکتریکی، مولکول‌های هیدروکربن روغن متلاشی و به شکل گازهایی نظیر متان (CH_4)، هیدروژن (H_2) ، اتان (C_2H_6)، اتیلن (C_2H_4) و استیلن (C_2H_2) درمی آیند. مقدار هر کدام از گازهای به وجود آمده به دما در نقطه تحت تنش بستگی دارد [۹]. همان‌طور که در شکل شش مشاهده می‌شود، هیدروژن در دمای پایین تولید می‌شود و مقدار آن به‌طور پایدار افزایش می‌یابد. در حالی که استیلن در دمای بالا تولید می‌شود (نزدیک ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) و مقدارش به طور ثابت و پایدار افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به میزان و نوع گازهای تولیدی می‌توان به نوع خطا پی برد. روش‌های مختلفی برای تعیین عیب با استفاده از DGA وجود دارد. یکی از این روش‌ها جهت تعیین نوع و محل خطا، مثلث دووآل نشان داده شده در شکل هفت است که سه گاز مهم اتیلن (C_2H_4) ، استیلن (C_2H_2) و متان(CH_4) تشکیل دهنده اضلاع آن می‌باشند. از آنجا که اغلب خطاهای مهم تپ‌چنجر موجب تولید این سه گاز می‌شوند، با دانستن مقدار آن‌ها می‌توان نوع و محل خطا را شناسایی نمود. همان‌طور که در شکل هفت پیداست مقادیر گازها به صورت درصدی از کل گازهای موجود در نمونه گازی برداشته شده از تپ‌چنجر بیان می‌شوند. در این مثلث شش ناحیه عملکرد وجود دارد که طبق جدول دو، هریک بیانگر وضعیت تپ‌چنجر می‌باشد [۹].

در حین تغییر تپ به دلیل ایجاد قوس در روغن، علاوه بر ایجاد گازهای مختلف، ترکیبات کربنی نیز در آن ایجادشده و در اثر سایش مکانیکی براده‌های فلزی خیلی ریز در آن آزاد می‌شود. این عوامل منجر به کاهش استقامت عایقی روغن شده و با افزایش زمان و انرژی قوس منجر به‌سرعت گرفتن روند تنزل کیفیت روغن می‌گردند.

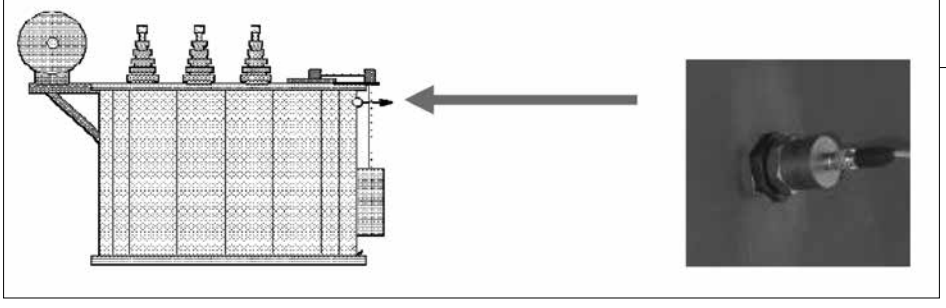
روش اندازه‌گیری استاتیک مقاومت سیم‌پیچ[۱۶] (SRM) [۹]

در تپ‌چنجرها، کنتاکت‌های دایورترسوئیچ یا سلکتورسوئیچ به علت انتقال جریان بار و ایجاد قوس دچار خوردگی می‌شوند که این عیب متداول‌ترین عیب تپ‌چنجرهای تحت بار محسوب می‌شود. این خوردگی کنتاکت‌ها که با رسوب کردن مقداری کربن روی کنتاکت‌ها خود را نشان می‌دهد، باعث افزایش مقدار مقاومت کنتاکت‌ها می‌گردد. این تولید کربن که ناشی از تجزیه‌ی روغن در اثر حرارت قوس می‌باشد، با افزایش مقاومت کنتاکت‌ها و لذا افزایش تلفات اهمی آن‌ها در اثر عبور جریان بار، شدت بیشتری به خود می‌گیرد و در نهایت ممکن است باعث ایجاد سوراخ‌هایی در کنتاکت‌هاشود.

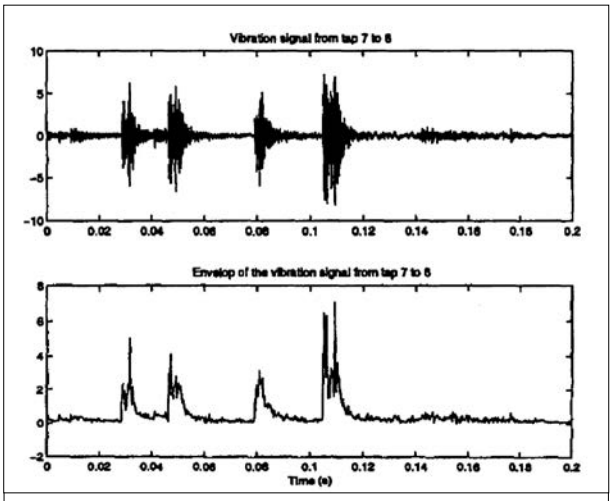
در روش SRM میزان فرسایش و خوردگی کنتاکت‌های OLTC توسط اندازه‌گیری مقاومتی تعیین می‌شود. در این روش یک ولتاژ DC به ترانسفورماتور اعمال شده و جریان آن اندازه گیری می شود. با تقسیم ولتاژ ترانسفورماتور بر جریان می‌توان مقاومت آن را به دست آورد که شامل مجموع مقاومت سیم پیچ ها و کنتاکت های تپ چنجر می باشد. مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده در هر تپ در حالت سکون تپ‌چنجر انجام می‌گیرد و همین موضوع سبب نام‌گذاری این روش به اندازه‌گیری استاتیکی مقاومت شده است.

در روش SRM به دلیل اینکه فقط جریان DC در مدار برقرار است و تپ ترانسفورماتور ثابت می‌باشد، لذا سیم‌پیچ‌ها فقط خاصیت اهمی از خود بروز داده و فاقد خاصیت سلفی هستند. لذا مقدار امپدانس اندازه‌گیری شده برابر با مجموع مقاومت سیم‌پیچی و مقاومت کنتاکت‌های تپ‌چنجر می‌باشد. با رسم مقاومت به دست آمده در تمامی تپ‌ها می‌توان نموداری شبیه به شکل هشت را رسم نمود. در صورتی که کنتاکت‌های تپ‌چنجر معیوب باشد، نمودار آن با نمودار حالت سالم متفاوت بوده و به این ترتیب می‌توان به عیب تپ‌چنجر پی برد.

در صورتی که مجموع مقاومت سیم‌پیچ و تپ‌چنجر در دمای T_S اندازه‌گیری شده باشد به کمک رابطه زیر می‌توان آن را با مقاومت اندازه‌گیری شده در دمای مرجع



شکل پانزده: نصب حس‌گر پیزوالکتریک [۱۰]



شکل شانزده: سیگنال صوتی یک تپ‌چنجر (بالا) و بسته آن (پایین) [۴]

T_M مقایسه نمود.

$$R_S = R_M \frac{(T_S + T_K)}{(T_M + T_K)}$$

در این رابطه:

R_M: مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده کلید و سیم‌پیچ اولیه در دمای اولیه T_M

R_S: مقدار مقاومت سیم‌پیچ در دمای T_S

T_M: دمای اندازه‌گیری مرجع

T_S: دمای اندازه‌گیری

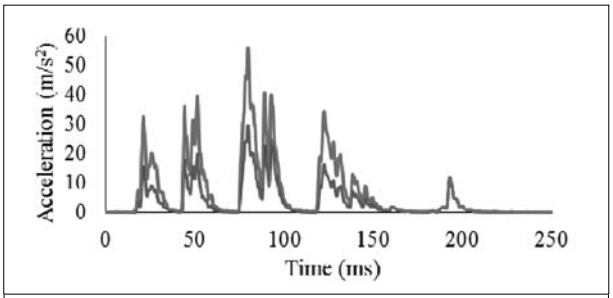
T_K: ثابت دمائی

روش اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی[۱۷] (DRM)

یک روش مهم برای شناسایی عیب OLTC استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی ترانسفورماتور است که به‌صورت بی برق انجام می‌گیرد. در این روش، مجموع مقاومت سیم‌پیچ، مقاومت کنتاکت‌های دایورترسوئیچ و سلکتورسوئیچ و مقاومت‌های انتقال با اعمال یک ولتاژ DC و اندازه‌گیری جریان قابل محاسبه است[۸ و ۹]. از روی مقاومت دینامیکی محاسبه‌شده در حین تغییر از یک تپ به تپ دیگر، می‌توان خطای مقاومت‌های انتقال و مقاومت کنتاکت‌های دایورترسوئیچ و همچنین خطای غیر همزمان بودن فواصل زمانی را تشخیص داد. همچنین از روی مقاومت دینامیکی به‌دست‌آمده از کلیه تپ‌ها، می‌توان خطا در مقاومت کنتاکت سلکتورسوئیچ، سلکتور تغییر وضعیت یا سلکتور معکوس ساز را نیز مشخص کرد[۳و۹].

در روش DRM هم مثل روش SRM برای تشخیص اشکالات به وجود آمده در تپ چنجر از اندازه‌گیری مقدار مقاومت OLTC استفاده می‌کنند، با این تفاوت اساسی که در این روش در حین اندازه‌گیری، تپ در حال تغییر بوده و لذا دیگر نمی‌توان از خاصیت سلفی سیم‌پیچ صرف نظر نمود. مزیت این روش مدت زمان خیلی کوتاه تست نسبت به SRM است. در آزمون SRM مدت زمان زیادی طول می کشد تا مقدار مقاومت اندازه‌گیری شود، زیرا در هر تپ باید به اندازه چند ثابت زمانی L/R صبر نمود تا جریان مدار ثابت گردد. ولی در تست DRM تپ‌ها پشت سر هم و با فاصله زمانی خیلی کمی تغییر می‌کنند. از این رو هر چند سرعت انجام تست بسیار بالاست، ولی به علت خاصیت سلفی، دیگر نمی‌توان مقاومت سیم‌پیچ و کنتاکت‌ها را با روش مرسوم و ساده به دست آورد [۹].

در این روش نیز یک نمودار مشخصه به دست می‌آید که می‌توان آن را با نمودارهایی که از قبل ثبت شده اند (در حالتی که تپ‌چنجر و ترانسفورماتور سالم بودند) مورد



شکل هفده: بسته سیگنال صوتی ثبت‌شده در حالت سالم و معیوب [۵]

مقایسه قرار داد. هرگونه تغییر و انحراف بین نمودار مشخصه در مقایسه با نمودارهای مشخصه از قبل ثبت شده حاکی از وجود خرابی و وجود اشکال در تپ‌چنجر می‌باشد. در اندازه‌گیری به روش DRM یک سمت ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده و به سمت دیگر یک ولتاژ DC اعمال و جریان آن ثبت می‌شود. پاسخ گذرای جریان در سمت تغذیه دارای دو قسمت مشخص و مجزا با ثابت زمانی متفاوت خواهد بود. شکل نه مدل ساده شده T ترانسفورماتور را در حالتی که ثانویه اتصال کوتاه است، نشان می‌دهد:

در این شکل:

R_2: مقاومت سیم‌پیچی ثانویه

R_1: مقاومت سیم‌پیچی اولیه

R_{circut}: مقاومت اعمالی توسط واحد اندازه‌گیری

$(1\text{-}K)L_2$: مقدار اندوکتانس خودی که از ثانویه به اولیه انتقال داده شده است

L_1: مجموع اندوکتانس خودی سمت اولیه

$(1\text{-}K)L_1$: مقدار اندوکتانس نشتی خودی در سمت اولیه

K: ضریب تزویج مغناطیسی

N: نسبت دور ترانسفورماتور

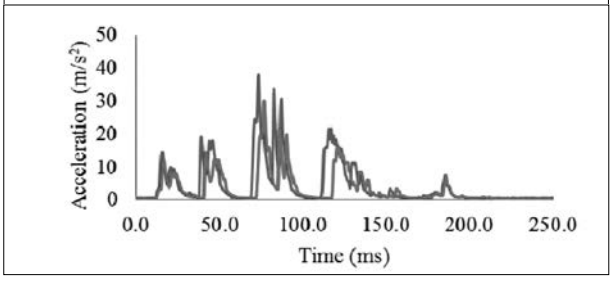
U: ولتاژ تست پله

این دیاگرام می‌تواند برای محاسبه پاسخ جریان سمت اولیه (جریان گذرنده از R_1) که با دو ثابت زمانی مجزا گذرا خواهد بود، استفاده شود [۹].

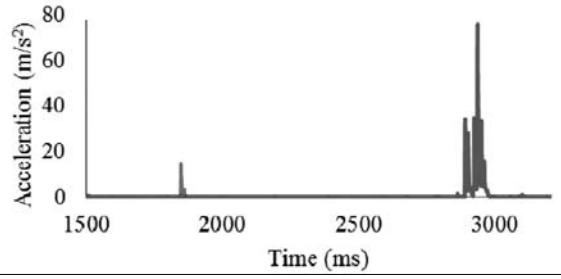
شکل‌های ده و یازده یک نمونه از نتایج به دست آمده در تست DRM را نشان می‌دهد.

اگر خطایی در تپ‌چنجر رخ بدهد، شکل موج دچار تغییر خواهد شد که یک نمونه از آن در شکل دوازده نشان داده شده است. با مشاهده این تغییرات می توان از وجود عیب اطلاع پیدا کرده و نوع آن را تشخیص داد.

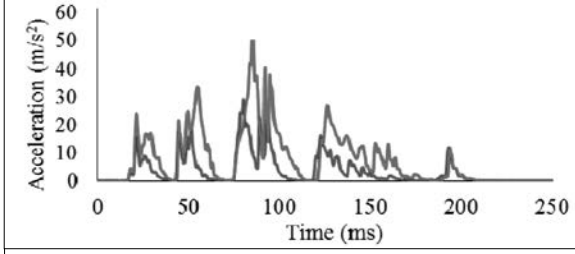
روش اندازه‌گیری جریان و توان موتور درایو



شکل هجده: بسته سیگنال صوتی ثبت‌شده در حالت سالم و معیوب با فنرشل [۵]



شکل بیست: بسته سیگنال صوتی در حالت سالم و قوس غیرعادی در سلکتور تغییر وضعیت [۵]



شکل نوزده: بسته سیگنال صوتی ثبت‌شده در حالت سالم و عدم کار هم‌زمان فازها [۵]

در مدت‌زمان کارکرد موتور، پدیده‌های مختلفی نظیر شارژ فنر، عملکرد سلکتور و غیره رخ می‌دهد. در صورت وجود برخی از عیوب در کلید، توان مصرفی موتور تغییر خواهد کرد. شکل موج جریان موتور، یک سیگنال سینوسی است ولی معمولاً برای آنالیز اطلاعات، از سیگنال مقدار مؤثر آن استفاده می گردد.

پارامترهایی نظیر مقدار مؤثر جریان موتور، جریان هجومی در حین شـــروع به کار موتور، و مدت‌زمان جاری شدن جریان در موتور به‌عنوان شاخص‌هایی برای تعیین وضعیت OLTC به کار می‌روند. تغییر مقدار این پارامترها می‌تواند معیاری از وجود خوردگی، نیاز به روغن‌کاری و یا مشکلات هم‌زمانی (سنکرونیزم) باشد [۶]. به عنوان مثال اصطکاک در موتور درایو، موجب افزایش دامنه جریان موتور نسبت به حالت نرمال می‌شـــود (شکل سیزده). همچنین شـــل بودن شفت درایو منجر به کاهش غیرعادی جریان راه‌اندازی اولیه موتور می گردد (شکل چهارده).

روش آشکارسازی ارتعاشات کلید

هنگام تغییر تپ، وقوع یک ســـری از پدیده‌های مکانیکی و الکتریکی موجب ایجاد امواج آکوستیک و الگوی صوتی منحصربه‌فردی می‌شوند. درصورتی‌که در طول زمان و کارکرد کلید، این الگوها دچار تغییر شوند، می‌توان به وقوع عیب در ساختار کلید پی برد [۶]. در این روش یک حس‌گر[۱۸] پیزوالکتریک شتاب سنج[۱۹] بر روی مخزن نصب‌شـــده، الگوهای صوتی کلید را آشکار کرده و از آن برای تشخیص وقوع عیب استفاده می‌شود [۱۰]. تشـــخیص وضعیت تپ‌چنجر به کمک روش آشکارسازی ارتعاشـــات آن نسبت به روش‌های دیگر مزایایی چون قابلیت اجرا به‌صورت برخط، حساسیت هم‌زمان به عیوب مکانیکی و الکتریکی و هزینه کم است.

تعیین محل نصب حس‌گر روی مخزن نقش بسیار مهمی دارد و تأثیر زیادی روی بسیاری از مشخصات اندازه‌گیری دارد. برای تعیین محل مناسب برای نصب حس‌گر روی مخزن پارامترهای مختلفی باید در نظر گرفته شوند که عبارت‌اند از [۱۰]:

۱- به دلیل برخط بودن تســـت، بایستی فاصله مناسبی از قسمت‌های برق‌دار برای نصب حس‌گرها لحاظ شود.

۲- توصیه می‌شود حس‌گر نزدیک بخش‌های محکم و سخت مخزن نظیر پره‌های افزایش استحکام مکانیکی صفحات مخزن نصب شود و یا به‌طور دقیق‌تر ۱۵ سانتی متر زیر لبه درپوش مخزن نصب شود (شکل پانزده).

۳- حس‌گر بر روی قسمت‌هایی از مخزن که حاوی روغن (و نه گاز) باشد نصب گردد.

۴- توصیه می‌شود از نصب حس‌گر در وسط صفحات بزرگ فلزی مخزن و مخصوصاً روی دریچه‌های بازدید جلوگیری به عمل آید. زیرا این صفحات با لرزش‌های ذاتی و مخصوص خود حساسیت اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

به‌طورمعمول ســـیگنال‌های صوتی دارای ارتعاشات مختلف نوسانی هستند که با یکدیگر همپوشانی دارند. تعداد پالس‌های صوتی و فاصله زمانی بین آن‌ها وابسته به ساختار و طراحی کلید می‌باشد. شکل شانزده یک سیگنال صوتی و بسته مربوط به آن را نمایش می‌دهد. برای آنالیز اطلاعات سیگنال‌های صوتی، معمولاً بسته سیگنال استخراج می شود. این بسته سیگنال می تواند به صورت مقدار مؤثر آن در نظر گرفته شود (شکل شانزده) [۴].

شـــکل سیگنال آکوستیک یک تپ با تپ دیگر ممکن است متفاوت باشد. ازاین‌رو دانستن شماره تپ الزامی است. مهم‌ترین مشخصه ها و ویژگی‌های استخراج‌شده از شکل موج آکوستیک برای تعیین وضعیت کلید OLTC عبارت‌اند از:

۱- تعداد پالس‌های صوتی

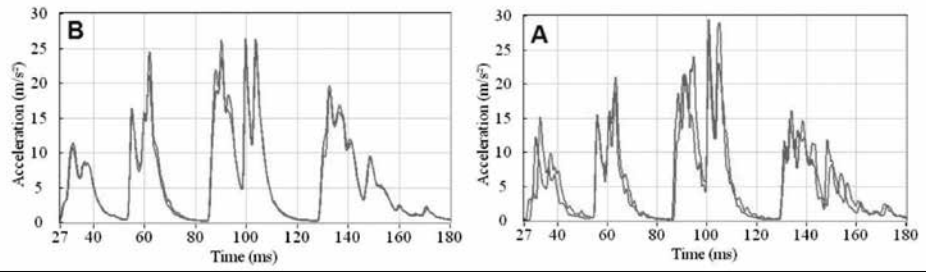
۲- قدرت پالس‌های صوتی

۳- فاصله زمانی بین پالس‌های صوتی

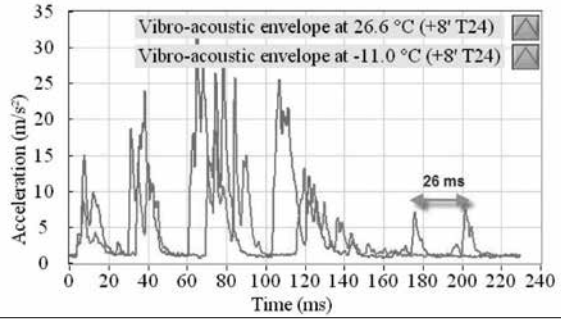
مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده مشخص کرده اند که مواردی نظیر عدم حضور یک پالس مشخص در سیگنال صوتی و تفاوت فاصله زمانی بین پالس‌های متوالی به‌عنوان مؤثرترین ویژگی‌ها در شناسایی نوع عیب کلید کاربرد دارند. تعداد و قدرت پالس‌های صوتی به طراحی و نوع OLTC و همچنین جریان بار وابسته است. ولی فاصله زمانی بین آن‌ها وابسته به کارکرد OLTC است. لازم به ذکر است که الگوهای صوتی در هر سه حالت یک ترانسفورماتور تحت‌بار، برق‌دار بدون بار و بی برق به دلیل بروز قوس و یا عدم آن، و همچنین شدت قوس ایجادشده متفاوت است که این موضوع باید در مقایسه الگوهای صوتی مدنظر قرار گیرد.

در ادامه به بررسی چند مورد شناسایی عیب با استفاده از الگوی سیگنال آکوستیک پرداخته می شود.

خوردگی کنتاکت‌ها



شکل بیست و یک: مثال‌هایی از تکرارپذیری نتایج تست [۲]



شکل بیست و دو: اثر دما بر روی سیگنال‌های صوتی [۲]

کنتاکت‌هـــای اصلی کلید، که جریان بار و جریان چرخشـــی را قطع می‌کنند، در اثر قوس و حرکت مکانیکی شـــدید دچار خوردگی می‌گردند. خوردگی کنتاکت‌ها می‌تواند موجب افزایش دامنه پالس مربوطه در سیگنال صوتی می‌شود (شکل هفده).

ضعیف شدن فنر

برای قطع و وصل سریع جریان در دایورترسوئیچ از فنر استفاده می‌شود. این فنر ابتدا شـــارژ شده و سپس انرژی آن به‌طور ناگهانی آزاد می‌شود. درصورتی‌که فنر ضعیف شـــده باشد، زمان انتقال (مدت‌زمانی که طی آن کنتاکت متحرک از کنتاکت ثابت قبلی جدا شده و به کنتاکت ثابت جدید متصل می‌شود) افزایش یافته و همچنین فاصله زمانی بین پالس‌ها و دامنه آن‌ها دچار تغییر می‌شود (شکل هجده).

کارکرد غیر هم‌زمان فازها

به علت تنبلی مکانیکی[۲۰] شفت متحرکی که هر سه فاز را می چرخاند، ممکن است اختـــلاف زمانی بین کارکرد فازها به وجود آمده و در نتیجه عرض زمانی هر پالس صوتی در همه تپ‌ها افزایش یابد (شکل نوزده).

قوس غیرعادی

تشـــخیص یک قوس غیرعادی در حین عملکرد کلید اصلی دایورترسوئیچ توسط روش های دیگر به سختی قابل تشخیص است. ولی اگر قوس غیرعادی در خارج از کلید روی دهد، به عنوان مثال در حین کار سلکتور تغییر وضعیت، یک پالس صوتی جدید در ناحیه بی‌صدای سیگنال صوتی ایجاد می‌شود که به راحتی قابل تشخیص می باشد (شکل بیست).

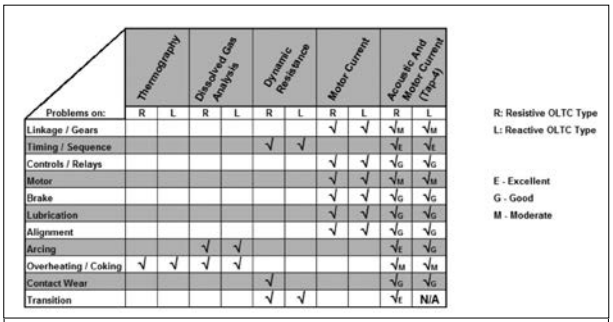
تکرارپذیری نتایج تست

به‌طور طبیعی حتی در حالت سالم کلید OLTC نیز قدری تفاوت بین الگوهای صوتی در تغییر از یک تپ به تپ یکسان دیگر وجود دارد. شکل‌های 21a و 21b مواردی از این دست را نشان می‌دهند. ضریب همبستگی سیگنال‌های نشان داده‌شده در این شکل‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۴۷ و ۰/۹۹۵ است. ضریب همبستگی پارامتری برای سنجش میزان شباهت دو سیگنال است، به‌گونه‌ای که ضریب همبستگی دو سیگنال کاملاً مشابه برابر با عدد یک و دو سیگنال کاملاً متفاوت برابر با عدد صفر است [۲].

تأثیر دما

شکل بیست و دو تأثیر دما روی الگوی صوتی یک کلید OLTC سالم در دو دمای متفاوت ۲۷ و ۱۱- درجه ســـانتی‌گراد را نشـــان می‌دهد. در دمای کم، زمان کلی کلیدزنی به اندازه ۲۶ میلی ثانیه بیشـــتر شده است (۱۲ درصد افزایش). در صورت عدم دقت، ممکن است این افزایش زمان کلیدزنی به اشتباه به‌عنوان بروز عیب تعبیر شود [۲].

مقایسه روش‌های مختلف مانیتورینگ کلید تپ‌چنجر



شکل بیست و سه: مقایسه انواع روش‌های تشخیص وضعیت کلید OLTC [۱۱]

روش‌های موجود جهت شناسایی عیوب تپ چنجر عبارتند از: بررسی حرارتی، تحلیل گازهای محلول در روغن (DGA)، اندازه‌گیری مقاومت دینامیکی (DRM)، بررسی جریان موتور و بررسی سیگنال های آکوستیک تپ چنجر. قابلیت شناسایی عیوب مختلف OLTC توسط این روش‌ها در شکل بیست و سه آورده شده است. طبق این جدول، اندازه‌گیری هم‌زمان امواج آکوستیک و جریان موتور می‌تواند اغلب عیوب تپ چنجر تحت بار را آشکار نماید [۱۱].

1- On Load Tap Changer (OLTC)
2 Treeing discharge
3Arcing contact
4Bad contact
5 Pyrolitic carbon
6Non-arcing contacts
7 Selector switch
8 Mechnical synchronism
9 Transition Impedance
10Recovery Voltage
11-Diverter Switch
12Tap Selector
13 time-based
14 condition-based
15 Dissolved Gas Analysis
16 static resistance measurement
17 Dynamic resistance measurement
18 Sensor
19 Accelerometer
20 Mechanical sluggishness

مراجع

[1]- Ibrahim A. Metwally, “Failures, monitoring, and new trends of power transformers”, IEEE Potentials, pp. 36-43, May-June 2011.
[2]- P. Picher, S. Riendeau, M. Gauvin, F. Leonard, L. Dupont, J. Goulet, C. Rajotte, “New Technologies for Monitoring Transformer Tap-Changers and Bushings and Their Integration into a Modern IT Infrastructure”, CIGRE paper, Paris, France, 2012.
[3]- Dorel Nedelcut, Dumitru Sacerdotiano, Gabriel Tanasescu, Serban Nicolae, Lucian Voinescu, “On-Line and Off-Line Monitoring-Diagnosis System (MDS) for Power Transformers” International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.
[4]- Pengju Kang, David Birtwhistle, John Daley, and David McCulloch, “Non-invasive On-Line Condition Monitoring of On-Load Tap Changers”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 2223-2228,2000.
[5]- N. Abeywickrama, O. Kouzmine, S. Kornhuber, L. Cheim, P. Lorin, M. Gauvin,F. Leonard and P. Picher, “Application of Novel Algorithms for Continuous Bushing and OLTC Monitoring for Increasing Network Reliability”, CIGRE paper, Paris, France, 2014.
[6]- Marc Foata, Real Beauchemin, Claude Rajotte, “On-Line Testing of On-Load Tap Changers with a Portable Acoustic System”, IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, IEEE ESMO, 2000.
[7]- Axel Kramer, “On-Load Tap-Changers for Power Transformers, Operation Principles, Applications and Selection”, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, 2000.
[8]- Edwin Rivas, Juan Carlos Burgos, Juan Carlos Garcia-Prada, “Vibration Analysis Using Envelope Wavelet for Detecting Faults in the OLTC Tap Selector”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1629-1636 July 2010.
[9]-Juriaan Jonathan Erbrink, “On-load Tap Changer Diagnosis on High-Voltage Power Transformers using Dynamic Resistance Measurements”, Ph. D. thesis, Technical University of Delft, 2011.
[10]- Fouad Brikci, “Vibro-Acoustic Testing Applied on Tap Changers and Circuit Breakers”, available at: www.zensol.com/Articles/J_12_Vibration_Analyses.PDF
[11]- Edwin Rivas, Juan Carlos Burgos, Juan Carlos Garcia-Prada, “Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 687-694, April 2009.