مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر تحت‌بار ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از الگوهای سیگنال آکوستیک و جریان موتور

حسن‌رضا میرزائی[۱،۲،۳]، عباس غایبلو[۱،۲]، کریم میرعلیخانی[۳]، زینب سودی[۲]
[۱] دانشگاه زنجان
[۲] شرکت برق منطقه‌ای زنجان
[۳] شرکت ایران ترانسفو

چکیده — تپ‌چنجرهای تحت‌بار به دلیل داشتن حرکت‌های مکانیکی نسبتاً شدید و ایجاد قوس الکتریکی با انرژی بالا، دارای فرسایش و نرخ تخریب بسیار بالاتری نسبت به دیگر قطعات و تجهیزات به کار رفته در ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشند. به همین دلیل معمولاً در پست‌های فشارقوی طبق یک برنامه از پیش تعیین شده، اقدام به اجرای عملیات بازدید و سرویس این تجهیزات می‌گردد. لزوم بی‌برق شدن ترانسفورماتور در این عملیات و خارج شدن آن از شبکه برای چند روز، یکی از مهم‌ترین معایب این روش‌های سرویس و نگهداری معمول برای ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشد. برای رفع این مشکل، اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر شده است. در این مقاله به بررسی تجربیات و نتایج تست‌های انجام شده توسط این دستگاه که بر روی چند ترانسفورماتور مختلف در داخل کارخانه ایران ترانسفو و چند پست فشارقوی شده است، پرداخته خواهد شد.

واژه‌های کلیدی — مانیتورینگ برخط؛ تپ‌چنجر تحت‌بار؛ ترانسفورماتور قدرت؛

۱. مقدمه

وقوع هر گونه عیب و خطا در ترانسفورماتورهای قدرت علاوه بر ایجاد هزینه‌های بسیار بالای تعمیر یا جایگزینی ترانسفورماتور، موجب ایجاد اختلال در انتقال توان الکتریکی می‌شود که به نوبه خود نه تنها موجب تحمیل هزینه و ضرر اقتصادی هنگفتی می‌گردد، بلکه موجب کاهش قابلیت اطمینان شبکه نیز خواهد شد. از این رو تشخیص وضعیت این تجهیزات از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برای بهره‌برداران و مالکان ترانسفورماتورهای قدرت برخوردار است. طبق گزارش مراجع معتبر بین‌المللی، وقوع خطا در تپ-چنجرهای تحت‌بار[1] (OLTC) بخش عمده‌ای (بیش از ٤٠٪) از عیوب و خطاهای ایجاد شده در ترانسفورماتورها را به خود اختصاص داده است [۱ و ۲]. دلیل این موضوع آن است که تپ‌چنجر تحت‌بار تنها تجهیز داخل ترانسفورماتور است که دارای حرکت‌های مکانیکی بسیار شدیدی بوده و در شرایط عادی کار، در داخل آن قوس با انرژی بالا ایجاد می‌گردد. تحت این شرایط، بروز عیوبی نظیر خوردگی کنتاکت‌ها، آلودگی روغن، شل شدن اتصالات مکانیکی، ضعیف شدن فنر و غیره کاملاً محتمل می‌باشد.

برای جلوگیری از تبدیل عیوب داخل تپ‌چنجر به یک خطای مخرب در ترانسفورماتور و از دست رفتن انتقال توان، معمولاً طی یک برنامه نگهداری مشخص و پس از یک تعداد کارکرد مشخص یا دوره زمانی معین، اقدام به دمونتاژ، بازدید و سرویس تپ‌چنجر می‌گردد. مهم‌ترین نقص این‌گونه روش‌های سرویس و نگهداری معمول، لزوم بی‌برق شدن ترانسفورماتور حتی در صورت سالم بودن تپ‌چنجر می‌باشد. همچنین طبق برخی گزارش‌ها، نرخ قابل توجهی از خطاهای ایجاد شده در تپ‌چنجر مربوط به مواردی است که با وجود سالم بودن تپ‌چنجر، اقدام به سرویس و دمونتاژ آن شده است، ولی بر اثر خطای انسانی در حین مونتاژ مجدد، خطا و عیب جدیدی در داخل آن ایجاد شده است. برای رفع این نقیصه، مانیتورینگ دائمی و برخط[2] تپ‌چنجر ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان سه مزیت مهم اجرای مانیتورینگ دائمی تپ‌چنجر و تشخیص وضعیت درست آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

[1] On Load Tap Changer (OLTC)
[2] On Line

- عدم دمونتاژ غیر ضروری تپ‌چنجر سالم که علاوه بر جلوگیری از بی-برق شدن غیر ضروری ترانسفورماتور، موجب جلوگیری از ایجاد عیب در داخل آن بر اثر خطای انسانی می‌گردد.
- کاهش هزینه سرویس و نگهداری
- شناسایی عیوبی که قبل از فرارسیدن موعد برنامه سرویس و نگهداری ممکن است ایجاد شده و تبدیل به یک خطای مخرب گردند.

برای دستیابی به مزایای ذکر شده، اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر تحت‌بار شده است. در این دستگاه مانیتورینگ، از سیگنال‌های آکوستیک سلکتورسوئیچ[1] یا دایورترسوئیچ[2] و تپ‌سلکتور[3] و همچنین سیگنال جریان موتور تپ‌چنجر استفاده شده است. از این سیگنال‌ها می‌توان برای تشخیص عیوبی نظیر موارد زیر استفاده نمود [۲-٤]:

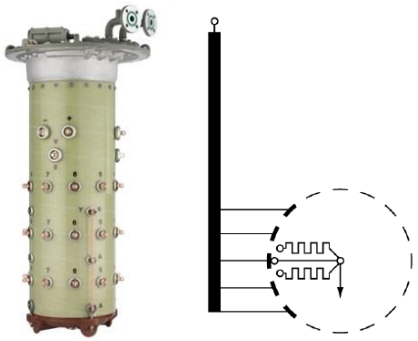
- خرابی و خوردگی کنتاکت‌های دایورترسوئیچ، تپ‌سلکتور، سلکتور تغییر وضعیت[4] و کلید معکوس‌ساز[5]
- شل شدن فنر
- شکسته شدن قطعات مکانیکی
- سفت شدن و عدم روغن‌کاری مناسب سیستم انتقال نیرو
- ایجاد قوس غیر عادی
- افزایش غیر عادی گشتاور مورد نیاز در سیستم محرکه مکانیکی
- خرابی موتور

در این مقاله ابتدا ساختار یک تپ‌چنجر تحت‌بار به صورت اجمالی بررسی شده و سپس دستگاه مانیتورینگ ساخته شده معرفی خواهد شد. نهایتاً به بررسی نتایج تست‌های انجام شده توسط این دستگاه، که در شرکت ایران-ترانسفو و چند پست فشارقوی در شرکت برق منطقه‌ای زنجان انجام شده است، پرداخته خواهد شد.

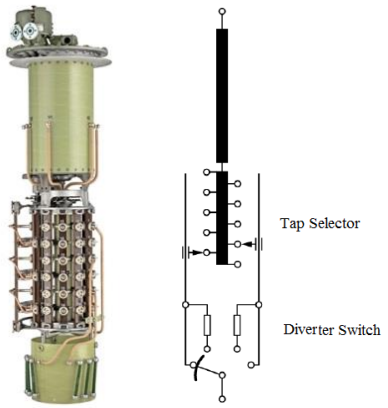
۲.بررسی ساختار تپ‌چنجر تحت‌بار و کارکرد آن

به کمک تپ‌چنجر تحت‌بار، می‌توان ولتاژ ترانسفورماتورها را با کم یا زیاد کردن تعداد دور و تحت جریان بار تنظیم نمود. در هنگام انتقال جریان بار بین دو تپ مجاور، این دو تپ باید به طور موقت به یکدیگر متصل گردند. در این وضعیت، برای جلوگیری از اتصال کوتاه مستقیم بخشی از سیم‌پیچ که بین دو تپ واقع شده است، از امپدانس انتقالی[6] (از نوع مقاومتی یا راکتوری) استفاده می‌شود.

تپ‌چنجر دو کار اساسی انجام می‌دهد که عبارت‌اند از انتخاب تپ بعدی و سپس انتقال توان به آن بدون قطع جریان بار. تپ‌چنجر تحت‌بار از نوع سلکتورسوئیچ، این دو کار را در یک وسیله به طور هم‌زمان انجام می‌دهد (شکل ۱). در صورتی که در ترانسفورماتورهای با توان بالا، از یک تپ‌چنجر با دو بخش مجزا، شامل تپ‌سلکتور و دایورترسوئیچ، برای انجام این دو وظیفه استفاده می‌کنند (شکل ۲). در این نوع از تپ‌چنجر، بعد از انتخاب تپ بعدی توسط تپ‌سلکتور، دایورترسوئیچ بدون قطع شدن جریان بار، آن را از تپ کنونی به تپ انتخاب شده انتقال می‌دهد.



شکل ۱- ساختمان و طرح کلی تپ‌چنجر از نوع سلکتورسوئیچ [۵].



شکل ۲- ساختمان و طرح کلی تپ‌چنجر از نوع تپ‌سلکتور-دایورترسوئیچ [۵].

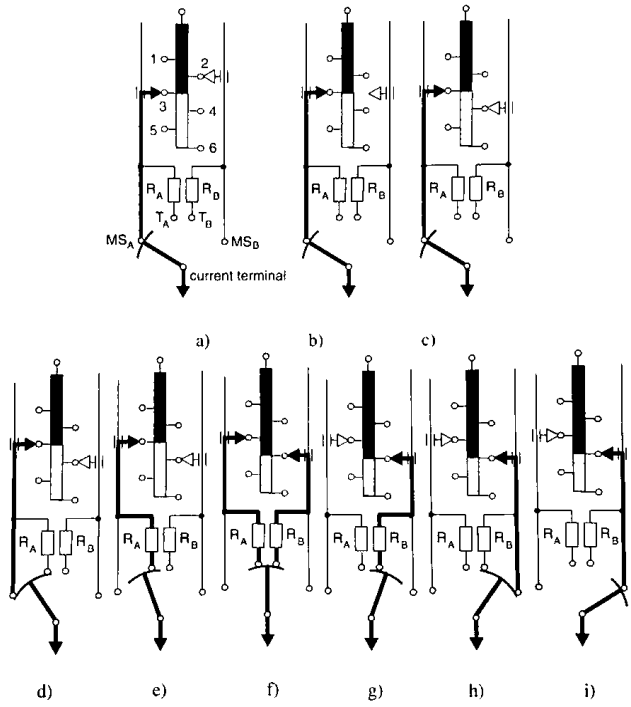
در حین عملکرد تپ‌چنجر، قوس الکتریکی داخل روغن (البته در نوع روغنی) ایجاد می‌گردد که این امر به تدریج موجب آلودگی روغن آن خواهد شد. نیروی لازم برای انجام کامل عملیات تغییر تپ توسط یک موتور الکتریکی تأمین می‌شود. این موتور از طریق یک سری چرخ‌دنده، تپ‌سلکتور را با سرعت پایین فعال کرده و هم‌زمان یک فنر ذخیره کننده انرژی را شارژ

[1] Selector switch
[2] Diverter switch
[3] Tap selector
[4] Change-over selector
[5] Reversing switch

[6] - Transition Impedance

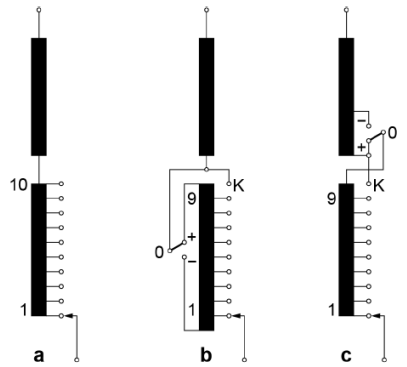
می‌کند. پس از شارژ کامل، انرژی فنر با سرعت بسیار زیاد آزاد شده و موجب کارکرد دایورترسوئیچ می‌شود. تخلیه سریع انرژی فنر در دایورترسوئیچ، زمان انتقال جریان بار و اتصال کوتاه تپ‌ها را در آن را به شدت کاهش می‌دهد.

کل مدت‌زمان یک عمل تغییر تپ از آغاز مکانیسم حرکت موتور درایو تا اتمام فرایند، بسته به نوع کلید در حدود ۳s تا ۱۰s طول می‌کشد. در شکل ۳ توالی کلیدزنی در یک فرایند تغییر تپ با استفاده از دایورترسوئیچ و تپ‌سلکتور نشان داده شده است. عملکرد تپ‌سلکتور در شکل ۳a تا ۳c آورده شده است. این عملکرد دارای سرعت پایینی بوده و توسط مکانیسم موتور درایو فعال می‌شود. عملکرد دایورترسوئیچ که در شکل‌های ۳d تا ۳i نمایش داده شده، دارای سرعت بالایی بوده و به وسیله‌ی مکانیسم فنر شارژ شده فعال شده و زمانی در حدود ۴۰ms تا ۶۰ms (بسته به نوع طراحی تپ‌چنجر تحت‌بار) طول می‌کشد. در حین کار دایورتر سوئیچ و برای جلوگیری از اتصال کوتاه تپ‌ها، هر یک از مقاومت‌های انتقالی برای مدت‌زمانی حدود ۲۰ms تا ۳۰ms وارد مدار می‌شوند. در شکل ۳، M_A و M_B کنتاکت‌های کلیدزنی، MS_A و MS_B کنتاکت‌های اصلی کلیدزنی و R_A و R_B مقاومت‌های انتقال به ترتیب در سمت‌های A و B هستند [۵]. در این شکل کنتاکت‌های اصلی دایورترسوئیچ نمایش داده نشده‌اند.



شکل ۳- توالی کلیدزنی تپ‌چنجر تحت بار از نوع تپ‌سلکتور-دایورترسوئیچ (a تا c: ترتیب عملکرد تپ‌سلکتور، d تا i: ترتیب عملکرد دایورترسوئیچ) [۵].

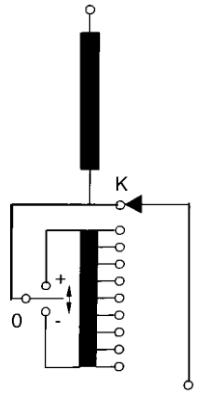
آرایش‌های مختلفی برای سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گردد که چند نوع متداول آن در شکل ٤ نشان داده شده است. بسته به نوع آرایش، ممکن است در ساختمان کلید تپ‌چنجر تغییراتی ایجاد گردد. اگر تعداد پله‌های تنظیم ولتاژ ترانسفورماتور محدود باشد، می‌توان از یک سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ با تعداد تپ کم استفاده نمود (شکل ٤a). برای افزایش تعداد پله‌ها، می‌توان طبق شکل ٤b با اضافه کردن یک کلید معکوس‌ساز به تپ‌چنجر، سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ را به صورت مستقیم یا معکوس وارد مدار کرد. البته عیب این روش افزایش تلفات بار ترانسفورماتور است. برای برطرف کردن این مشکل، می‌توان از آرایش سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ درشت–ریز[1] و اضافه کردن یک سلکتور تغییر وضعیت[2] به تپ‌چنجر استفاده نمود.



شکل ٤- آرایش سیم‌پیچ‌های تنظیم ولتاژ و کلید تپ‌چنجر، a) آرایش خطی، b) آرایش مستقیم-معکوس با کلید معکوس‌ساز و c) آرایش سیم‌پیچ تنظیم درشت-ریز با کلید تغییر وضعیت [۵].

تغییر موقعیت کلیدهای معکوس‌ساز و سلکتور تغییر وضعیت، همانند کلید تپ‌سلکتور، بدون اختلال در جریان بار انجام می‌شوند. البته بایستی دقت کرد که مطابق شکل ۵، در حین تغییر موقعیت کلید معکوس‌ساز، سیم‌پیچ تنظیم ولتاژ و در حین تغییر سلکتور تغییر وضعیت سیم‌پیچ درشت تنظیم ولتاژ برای مدت کوتاهی به صورت پتانسیل شناور قرار می‌گیرند. در این حالت ممکن است به علت تقسیم خازنی ولتاژ بین سیم‌پیچ‌ها، یک قوس اضافی در کنتاکت کلید معکوس‌ساز یا سلکتور تغییر وضعیت ایجاد شده و به آن‌ها آسیب بزند. به منظور جلوگیری از این مشکلات و ایجاد گاز، پیشگیری‌های خاصی لازم است. راهکارهای مختلفی جهت غلبه بر این مشکل وجود دارد که عبارت‌اند از روش کنترل مقاومتی، روش کنترل خازنی و یا استفاده از سلکتور تغییر وضعیت دومسیره[3] [۵].

[1] Coarse-Fine regulating windings
[2] Change over selector
[3] Double reversing switch



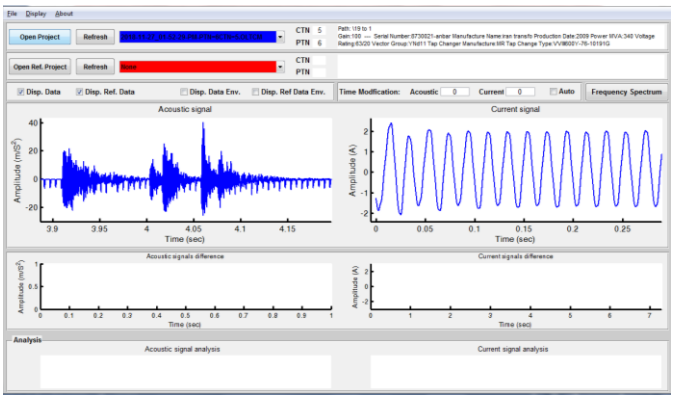
شکل ۵- تپ‌چنجر تحت‌بار با سلکتور معکوس‌ساز در موقعیت میانی با سیم‌پیچ تنظیم با پتانسیل شناور [۵].

۳.دستگاه مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر

دستگاه ساخته شده برای مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر ترانسفورماتور در شکل ٦ نشان داده شده است. این دستگاه قادر به نصب و انجام کار در دو حالت برق‌داری و بی‌برقی ترانسفورماتور می‌باشد. در این دستگاه از یک سنسور جریان کلمپی برای اندازه‌گیری جریان موتور با حساسیت ۲mV/A استفاده شده است که دور سیم تغذیه یکی از فازهای موتور نصب می‌گردد. سنسور پیزوالکتریک به کار رفته در این دستگاه دارای حساسیت ۹/۸mV/g بوده و محدوده فرکانسی کار آن ۱Hz تا ۲۵kHz با فرکانس رزونانس ۵۳kHz می‌باشد. این سنسور توسط یک آهن‌ربا به مخزن ترانسفورماتور نصب می‌گردد. برای افزایش حساسیت اندازه‌گیری، بهتر است تا حد امکان محدوده‌ای از مخزن برای نصب سنسور پیزوالکتریک انتخاب گردد که نزدیک محل نصب تپ‌چنجر بوده و از مناطق دارای جوش، درپوش و دیگر متعلقات نصب شده بر روی مخزن دور باشد.

پس از آشکارسازی و تقویت سیگنال‌های آنالوگ آکوستیک و جریان موتور توسط سنسورها، دستگاه مانیتورینگ با انجام نمونه‌برداری آن‌ها را تبدیل به سیگنال‌های دیجیتال نموده و برای ذخیره‌سازی به یک کامپیوتر می‌فرستد. با توجه به اینکه شماره تپ فعلی و قبلی ترانسفورماتور در شکل موج سیگنال‌های آکوستیک و جریان موتور تأثیرگذار است، دستگاه فوق‌الذکر این اطلاعات را نیز قرائت کرده و ذخیره می‌نماید. با مقایسه سیگنال‌های ثبت شده در حالت معیوب یا مشکوک یک تپ‌چنجر با سیگنال‌های ثبت شده در حالت سالم آن، می‌توان به وضعیت کلید پی برد. برای این منظور یک نرم‌افزار گرافیکی طراحی و اجرا شده است. وظیفه این نرم‌افزار، ایجاد ارتباط با سخت‌افزار دستگاه مانیتورینگ و انتقال اطلاعات دیجیتال از دستگاه مانیتورینگ به کامپیوتر، ذخیره‌سازی آن‌ها و سپس آنالیز گرافیکی و کامپیوتری اطلاعات موجود در سیگنال‌های آکوستیک و جریان موتور می‌باشد. در شکل ۷، شمایی از این نرم‌افزار نشان داده شده است. در این شکل سیگنال‌های ثبت شده آکوستیک و جریان موتور در یک اندازه‌گیری عملی قابل مشاهده می‌باشد.

شکل ٦- دستگاه مانیتورینگ تپ‌چنجر OLTC-Monitor-01 در حین انجام یک تست برخط.



شکل ۷- شمایی از نرم‌افزار OLTC Monitor.

وظیفه تشخیص وضعیت تپ‌چنجر به دو صورت قابل انجام است. در روش اول، یک فرد خبره شکل موج آکوستیک و جریان موتور را مشاهده کرده و با توجه به نتایج تست‌ها و تجربیات قبلی خود اقدام به تفسیر وضعیت کلید می‌نماید. به این روش، اصطلاحاً تشخیص وضعیت توسط فرد خبره گفته می‌شود. به عنوان مثال، افزایش دامنه جریان موتور می‌تواند نشانگر معیوب شدن سیستم انتقال نیرو در داخل تپ‌چنجر باشد. همچنین حذف یا

اضافه شدن یکی از پالس‌های آکوستیک دایورترسوئیچ، کم و زیاد شدن دامنه آن‌ها و یا افزایش یا کاهش فاصله زمانی بین دو پالس مجاور، می‌تواند در تشخیص وقوع عیب و نوع آن معیارهای مناسبی هستند.

در روش دوم می‌توان به صورت نرم‌افزاری شکل موج به دست آمده در یک اندازه‌گیری را (ثبت شده در حالت مشکوک یا معیوب کلید) با اندازه‌گیری مرجع (ثبت شده در حالت سالم کلید) مقایسه کرده و با سنجش مقدار همبستگی و شباهت آن‌ها، سالم یا معیوب بودن تپ‌چنجر را تشخیص داد. لازم به ذکر است که مقادیر حدود همبستگی قابل قبول، بایستی قبلاً با ایجاد بانک اطلاعاتی از عیوب مختلف کلید تپ‌چنجر استخراج گردد.

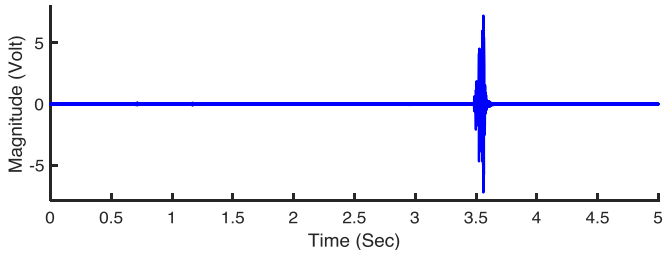
٤.بررسی نتایج اندازه‌گیری‌های عملی

در راستای شناسایی تجربی رفتار امواج آکوستیک و جریان ناشی از فعالیت تپ‌چنجر، اقدام به انجام چند تست عملی گردید که در این بخش به بررسی نتایج آن‌ها پرداخته می‌شود.

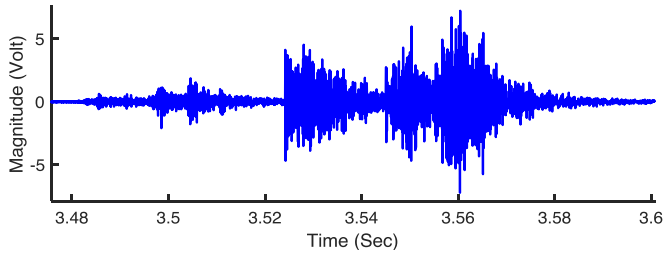
۴,۱ . ترانسفورماتور #۱

در حین انجام تست مانور تپ‌چنجر در حالت برق‌داری یک ترانسفورماتور و در حین عملکرد تپ‌چنجر در تپ نامی، صداهای نامتعارفی به گوش شنیده شد، در حالی که این صداها در حالت بی‌برقی و همچنین در سایر تپ‌ها به گوش نمی‌رسید. برای بررسی موضوع و تعیین علت این موضوع، امواج آکوستیک ناشی از این عملکرد تپ‌چنجر در این تپ در حالت بی‌برقی ترانسفورماتور آشکارسازی شده و ثبت گردید. امواج آکوستیک ثبت شده در حالت بی‌برقی در شکل ۸ نشان داده شده است. پالس‌های نشان داده شده در این شکل ناشی از عملکرد دایورترسوئیچ می‌باشند. با انجام بزرگنمایی، این پالس‌ها در شکل ۹ مجدداً نشان داده شده‌اند. هریک از این پالس‌ها، مربوط به عملکرد یکی از سوئیچ‌های کلیدزنی دایورترسوئیچ است که قبلاً در شکل ۳ توضیح داده شد. لازم به توضیح حذف شدن یکی از این پالس‌ها یا اضافه شدن پالس جدید، نشان‌دهنده ایجاد یک عیب در دایورترسوئیچ باشد.

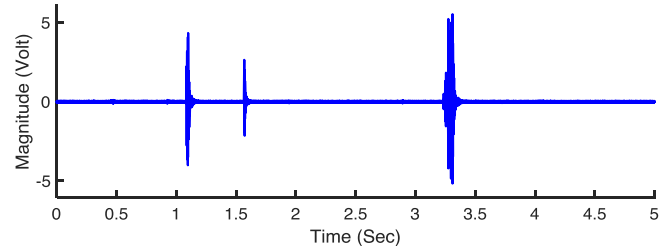
سپس در حین انجام تست بی‌باری ترانسفورماتور تحت ولتاژ نامی، بار دیگر امواج آکوستیک ناشی از عملکرد کلید در تپ نامی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ آورده شده است. در مقایسه شکل ۱۰ با شکل ۸، علاوه بر پالس‌های ناشی از عملکرد دایورترسوئیچ، دو پالس اضافی دیگر نیز در زمان‌های ۱/۱s و ۱/٦s مشاهده می‌گردد. با انجام بررسی‌های فنی، مشخص گردید در حین عملکرد کلید در تپ نامی، سیم‌پیچ درشت تنظیم ولتاژ برای لحظاتی دارای پتانسیل شناور شده و این موضوع موجب ایجاد قوس در کنتاکت‌های سلکتور تغییر وضعیت می‌شود. این قوس هرچند زود خاموش شده و از بین می‌رود، ولی در صورت دارا بودن انرژی بالا، به تدریج می‌تواند موجب وارد شدن آسیب به کنتاکت‌های این سلکتور گردد. از طرف دیگر با توجه به این‌که سلکتور تغییر وضعیت در مخزن اصلی ترانسفورماتور قرار دارد، گاز تولید شده موجب ایجاد اختلال در روند تحلیل گازهای محلول در روغن (DGA) اصلی ترانسفورماتور خواهد شد. در صورتی که انرژی قوس بالا باشد، باید از یکی از روش‌های کنترلی که در بخش ۲ مورد اشاره قرار گرفت، استفاده گردد.



شکل ۸- امواج آکوستیک ناشی از عملکرد تپ‌چنجر ترانسفورماتور #۱ در تپ نامی در حالت بی‌برقی



شکل ۹- بزرگنمایی امواج آکوستیک ناشی از عملکرد دایورترسوئیچ تپ‌چنجر ترانسفورماتور #۱ در تپ نامی در حالت بی‌برقی

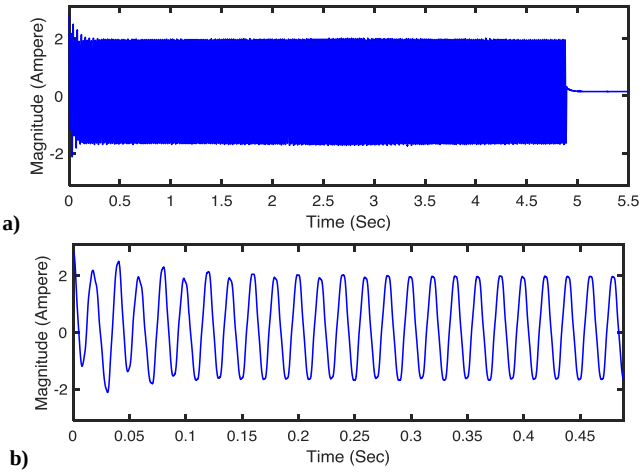


شکل ۱۰- امواج آکوستیک ناشی از عملکرد تپ‌چنجر ترانسفورماتور #۱ در تپ نامی در ولتاژ نامی

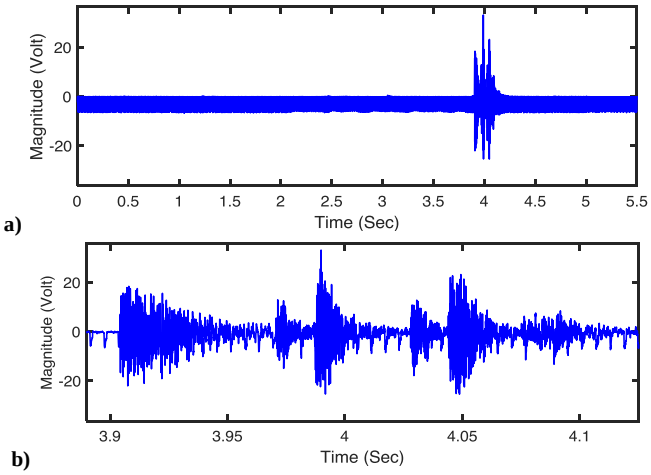
۴,۲ . ترانسفورماتور #۲

بر روی یک ترانسفورماتور ٦٣/٢٠kV رزرو بی‌برق چند تست عملی با استفاده از سیستم مانیتورینگOLTC-Monitor-01 انجام گردید. در این تست‌ها، مانور تپ‌چنجر از تپ ۱ تا ۱۹ و بر عکس انجام شده و همزمان

سیگنال‌های آکوستیک و جریان موتور ثبت گردید. به عنوان نمونه، شکل موج جریان موتور در تغییر از تپ ۱۱ به تپ ۱۲ در شکل ۱۱a نشان داده شده است. با توجه به زمان صفر شدن سیگنال جریان موتور، می‌توان لحظه اتمام کار کلید تپ‌چنجر و تکمیل روند تغییر تپ را مشاهده کرد. همچنین با بزرگنمایی شکل موج جریان، می‌توان جریان هجومی راه‌اندازی موتور را نیز ملاحظه نمود (شکل ۱۱b).



شکل ۱۱- شکل موج جریان موتور در تغییر از تپ ۱۱ به ۱۲ در ترانسفورماتور ۲#، a) شکل موج کامل، b) شکل موج بزرگنمایی شده.

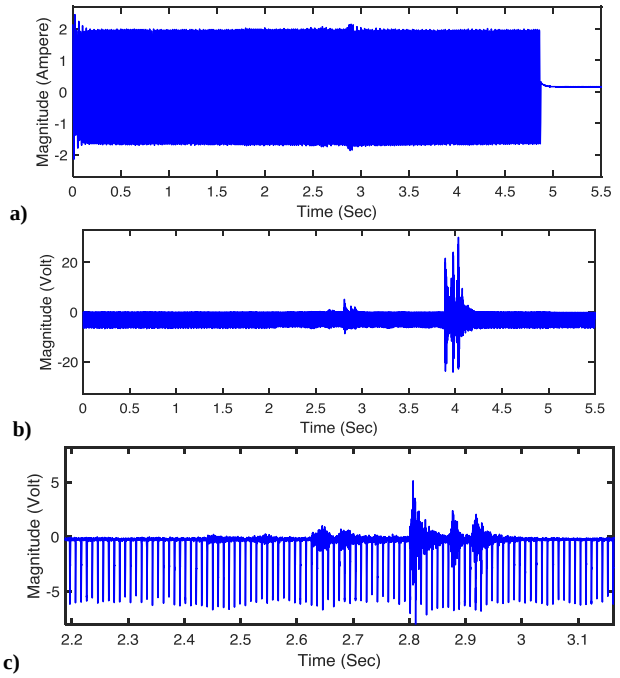


شکل ۱۲- شکل موج آکوستیک در تغییر از تپ ۱۱ به ۱۲ در ترانسفورماتور ۲#، a) شکل موج کامل، b) شکل موج بزرگنمایی شده.

شکل موج آکوستیک در این تغییر تپ نیز در شکل ۱۲a، و بزرگنمایی آن که شامل پالس‌های دایورترسوئیچ می‌باشد در شکل ۱۲b نشان داده شده است. فاصله زمانی بین این پالس‌ها، که هر یک مربوط به کار یک سوئیچ کلیدزنی دایورترسوئیچ است، از اهمیت بالایی در تشخیص وضعیت تپ-چنجر می‌باشد. این فواصل زمانی متأثر از عوامل مکانیکی و طراحی کلید بوده و در صورت وقوع برخی از عیوب نظیر کاهش سختی فنر، ممکن است تغییر کند.

با توجه به اینکه می‌دانیم در این ترانسفورماتور از آرایش سیم‌پیچ‌های تنظیم ولتاژ درشت–ریز استفاده شده است، می‌دانیم که تپ‌چنجر مربوطه دارای سلکتور تغییر وضعیت بوده و در عملکرد تپ‌چنجر در تپ نامی شاهد کار آن خواهیم بود. برای بررسی این موضوع، شکل موج‌های ثبت شده در تغییر از تپ ۱۰ به تپ ۱۱ در شکل ۱۳ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۳a ملاحظه می‌گردد، در فاصله زمانی ۲/٦s تا ۳s شاهد افزایش دامنه جریان موتور هستیم. این موضوع به دلیل افزایش گشتاور بار موتور به دلیل چرخاندن شفت مکانیکی سلکتور تغییر وضعیت است.

مقارن با این فاصله زمانی (۲/٦s تا ۳s) در شکل ۱۳b نیز شاهد وقوع یک سری پالس‌های آکوستیک جدید هستیم که مربوط به کارکرد همین سلکتور می‌باشد (پالس‌های مربوط به دایورترسوئیچ نیز در زمان تقریبی ٤s روی می‌دهند). بزرگنمایی پالس‌های آکوستیک سلکتور تغییر وضعیت در شکل ۱۳c آورده شده‌اند.

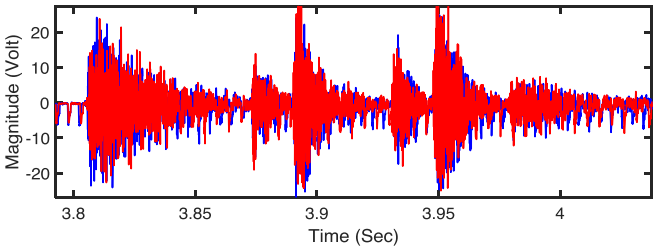


شکل ۱۳- شکل موج‌های ثبت شده در تغییر از تپ نامی ۱۰ به ۱۱ در ترانسفورماتور ۲#، a) شکل موج جریان، b) شکل موج آکوستیک، c) شکل موج آکوستیک بزرگنمایی شده ناشی از کار سلکتور تغییر وضعیت.

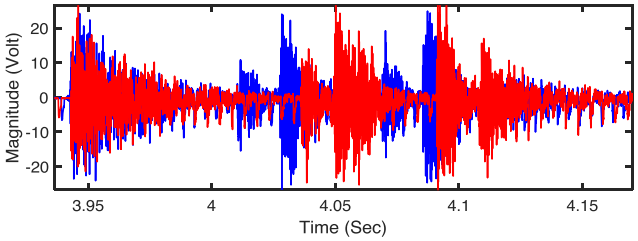
به منظور انجام بررسی بیشتر، در شکل ١٤، شکل موج پالس‌های آکوستیک دایورترسوئیچ در تغییر از تپ ۱۵ به ١٦ (با رنگ قرمز) و تغییر از

تپ ۱۶ به ۱۷ (با رنگ آبی) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هر دو تغییر تپ افزایشی هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، فاصله زمانی بین پالس‌های تولید شده توسط سوئیچ‌های کلیدزنی داخلی دایورترسوئیچ در هر دو شکل موج یکسان است.

در شکل ۱۵ نیز، شکل موج پالس‌های آکوستیک دایورترسوئیچ در تغییر از تپ ۱۶ به ۱۷ (عملکرد افزایشی) و تغییر از تپ ۱۷ به ۱۶ (عملکرد کاهشی) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با وجود آنکه شماره تپ‌ها در هر دو عملکرد یکسان است، مشاهده می‌گردد یک اختلاف زمانی بین پالس‌های دو عملکرد دایورترسوئیچ وجود دارد. با توجه به سالم بودن تپ‌چنجر، مشخص می‌گردد که افزایشی یا کاهشی بودن شماره تپ در پالس‌های آکوستیک تولید شده تأثیرگذار است. بنابراین برای مقایسه پالس‌های دو عملکرد کلید، بهتر است علاوه بر یکسان بودن شماره تپ‌ها، جهت تغییر آن‌ها نیز یکسان باشد.



شکل ۱۴- مقایسه شکل موج‌های آکوستیک ثبت شده دایورترسوئیچ ترانسفورماتور #۲ در تغییر از تپ ۱۵ به ۱۶ (با رنگ قرمز) و تغییر از تپ ۱۶ به ۱۷ (با رنگ آبی).

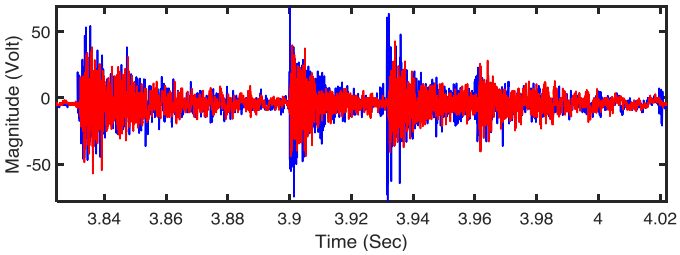


شکل ۱۵- مقایسه شکل موج‌های آکوستیک ثبت شده دایورترسوئیچ ترانسفورماتور #۲ در تغییر از تپ ۱۷ به ۱۶ (با رنگ قرمز) و تغییر از تپ ۱۶ به ۱۷ (با رنگ آبی).

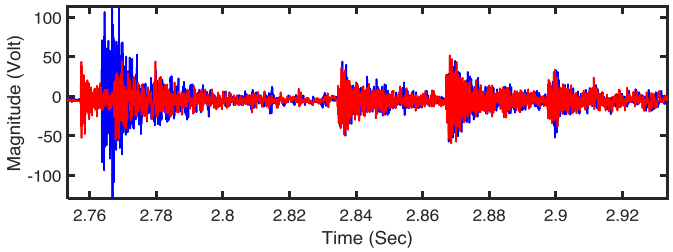
۳,۴. ترانسفورماتور #۳

بر روی یک ترانسفورماتور تحت‌بار ۶۳/۲۰kV در یک پست فشارقوی، تست عملی به صورت برخط انجام گردید. در شکل ۱۶، شکل موج پالس‌های آکوستیک دایورترسوئیچ در تغییر از تپ ۷ به ۸ و تغییر از تپ ۸ به ۹ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌گردد فاصله زمانی بین پالس‌های دایورترسوئیچ در هر دو عملکرد یکسان است.

در شکل ۱۷ نیز شکل موج پالس‌های آکوستیک دایورترسوئیچ در دو عملکرد مختلف تغییر از تپ ۹ به ۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در آن یک تغییر قابل ملاحظه در پالس اول مشاهده می‌گردد. با توجه به اطمینان از سالم بودن تپ‌چنجر، می‌توان علت این تغییر را در جریان لحظه‌ای عبور جریان از تپ‌چنجر ترانسفورماتور جستجو نمود. این موضوع نشان‌دهنده آن است که به منظور افزایش دقت تشخیص وضعیت تپ‌چنجر، باید تا حد امکان تست را به صورت بی‌بار انجام داد.



شکل ۱۶- مقایسه شکل موج‌های آکوستیک ثبت شده دایورترسوئیچ ترانسفورماتور #۳ در تغییر از تپ ۷ به ۸ (با رنگ قرمز) و تغییر از تپ ۸ به ۹ (با رنگ آبی).



شکل ۱۷- مقایسه شکل موج‌های آکوستیک ثبت شده دایورترسوئیچ ترانسفورماتور #۳ در تغییر از تپ ۹ به ۸ در دو عملکرد متفاوت.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی دستگاه مانیتورینگ برخط تپ‌چنجر تحت‌بار و نتایج اندازه‌گیری به دست آمده توسط آن بر روی چند ترانسفورماتور پرداخته شد. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده توانمندی روش ارائه شده در تشخیص وضعیت تپ‌چنجر ترانسفورماتور می‌باشد. دستگاه ساخته شده قادر به تشخیص تغییرات ایجاد شده در سیگنال‌های آکوستیک تپ‌چنجر و جریان آن می‌باشد. با توجه به اینکه اغلب عیوب تپ‌چنجر موجب ایجاد تغییر در این سیگنال‌ها می‌شود، می‌توان به وقوع عیب در آن‌ها پی برده و اقدام به رفع عیب نمود. با این حال بایستی تغییرات ایجاد شده در اثر عواملی نظیر جریان بار، دما و ... را نیز شناسایی کرده و از ایجاد اشتباه در تشخیص وقوع عیب جلوگیری نمود.

همچنین برای ایجاد امکان مقایسه مطمئن‌تر سیگنال‌های آکوستیک و جریان موتور تپ‌چنجر در دو حالت سالم (اندازه‌گیری مرجع) و مشکوک (اندازه‌گیری فعلی) ، بهتر است شرایط زیر مد نظر قرار گیرد:

- انجام هر دو تست بر روی یک ترانسفورماتور واحد
- انجام هر دو تست در تپ یکسان فعلی و تپ یکسان قبلی
- انجام هر دو تست در دمای یکسان ترانسفورماتور
- انجام هر دو تست در بار یکسان ترانسفورماتور

٦. تقدیر و تشکر

این کار تحقیقاتی با حمایت مالی شرکت برق منطقه‌ای زنجان و پشتیبانی فنی شرکت ایران ترانسفو انجام شده است. مؤلفین مقاله از حمایت‌های انجام شده توسط مسئولین مربوطه و کارشناسان محترم این دو شرکت قدردانی می‌نمایند.

منابع

[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] 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.

[4] 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.

[5] Axel Kramer, “On-Load Tap-Changers for Power Transformers, Operation Principles, Applications and Selection”, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, 2000.