# پارامترها و کمیت‌های مهم در تجهیزات برق فشارقوی و چگونگی اندازه‌گیری آن‌ها به‌کمک سنسورهای هوشمند در جهت تحقق اهداف تعمیرات پیش‌بینانه

حمید یدالهی/ دفتر برنامه‌ریزی ارتباطات و اتوماسیون شبکه، شرکت برق منطقه‌ای خراسان/ h.yadollahi@krec.ir

**چکیده**

**استفاده از سنسورهای هوشمند در پست‌های برق فشارقوی نقش مهمی را در بهبود بهره‌برداری، مانیتورینگ زمان‌واقعی، جلوگیری از خرابی‌های اساسی در تجهیزات و به طبع آن افزایش پایداری شبکه قدرت ایفا می‌کند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با اندازه‌گیری پارامترها و کمیت‌های ویژه در تجهیزات قدرت توسط سنسورهای هوشمند، امکان پیش‌بینی خطاهای ممکن در تجهیزات میسر می‌شود. در این پژوهش پارامترهای کلیدی در ترانسفورماتور قدرت، تپ‌چنجر، بریکر و سایر تجهیزات بررسی شده و سنسورهای هوشمند متناظر با آن‌ها نیز معرفی می‌گردد. همچنین در ادامه با توجه به وجود بسترهای مناسب اتوماسیون در پست‌های برق فشارقوی خراسان، چگونگی تحقق رسیدن به اهداف تعمیرات پیش‌بینانه(PDM) بررسی می‌گردد.**

**کلمات کلیدی:** سنسورهای هوشمند، تعمیرات پیش‌بینانه، اتوماسیون، گازهای محلول، دما، ارتعاش، سطح روغن

## ۱-مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های نوین تعمیرات در پست‌های برق فشارقوی رشد چشم‌گیری داشته است. با ورود سیستم‌های اتوماسیون در پست‌های برق فشار قوی، بستر مانیتورینگ و کنترل پیشرفته‌ای فراهم شده است. همچنین ساخت سنسورهای هوشمند با قابلیت‌های ارتباطی و اتصال به شبکه، نقطه شروعی برای بهره‌مندی از کاربردهای یک سیستم اتوماسیون همگون یک‌پارچه است. یکی از این کاربردها استفاده در حوزه تعمیرات است. اجرای تعمیرات پیش‌بینانه یا PDM(Predictive Maintenance) در پست‌های برق فشارقوی بر اساس دریافت اطلاعات کلیدی از طریق سنسورهای هوشمند و همچنین پردازش زمان‌واقعی آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین نیاز سرکشی و تعمیرات دوره‌ای منظم در پست‌ها مرتفع شده و هزینه‌های مربوطه را کاهش می‌دهد. پروژه اجراء شده در ساندیگو، جنوب کالیفرنیا توسط کمپانی SDG&E (San Diego Gas & Electric) نشان می‌دهد که با نصب ۸۹ سنسور بی‌سیم در دو پست برق فشارقوی و مانیتورینگ آن در یک نقطه، از وقوع خطاهای اساسی در پست جلوگیری می‌شود[۱]. همچنین نقش سنسورهای هوشمند در بهبود بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات فشارقوی در ایالت متحده امریکا نیز بررسی شده است[۲]. در [۳] نیز روش پیشرفته میرات پیش‌بینانه توسط مانیتورینگ زمان‌واقعی دما، جریان و ارتعاشات برای ترانسفورماتور MVA166 بررسی و اجرا شده است.

در این مقاله ابتدا کلیه کمیت‌ها و پارامترهای مهم و تاثیرگذار در تعیین سلامت و کیفیت کارکرد تجهیزات قدرت شامل ترانسفورماتور، تپ‌چنجر و بریکر معرفی می‌شوند. همچنین ضمن تعیین مقادیر مطلوب هر پارامتر، نوع عیب پیش‌بینی شده در تجهیز نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری این کمیت‌ها نیز سنسورهای

هوشمند متناظر معرفی شده و در ادامه آن به چگونگی تحقق اهداف تعمیرات پیش‌بینانه و مزایای آن در پست‌های برق فشارقوی می‌پردازیم.

## ۲- کمیت های مورد اندازه گیری در پست‌های برق فشارقوی

شناخت کمیت‌های مهم و تاثیر گذار در بهبود وضعیت بهره‌برداری و همچنین تعمیرات پیش‌بینانه تجهیزات کلیدی قدرت در پست‌های برق فشارقوی، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. پژوهش‌های خوبی در مراکز تحقیقاتی برای تعیین این پارامترها و ارتباط آن‌ها با نوع عیب ایجاد شده در تجهیزات صورت گرفته است. در این بخش با مطالعه موردی که بر روی تجهیزات کلیدی یک پست برق، شامل ترانسفورماتور، تپ‌چنجر و بریکرهای فشارقوی انجام شده است، کمیت‌های کلیدی مربوطه بیان شده و ارتباط هر یک نیز با خطا یا عیب ایجاد شده بررسی می‌شود.

### ۲-۱-پارامترهای مهم در ترانسفورماتورهای قدرت

اصلی‌ترین و گران‌بهاترین تجهیز مورد استفاده در یک پست برق، ترانسفورماتور قدرت است. عملکرد صحیح ترانسفورماتور قابلیت سیستم را بالا می‌برد. در وضعیت فعلی علی‌رغم اختصاص حفاظت‌های گوناگون برای ترانسفورماتورها، همچنان پارامترهای مهمی در این تجهیز وجود دارد که با تشخیص آن می‌توان از بروز خطاهای اساسی در ترانس جلوگیری نمود. یکی از نیازها در ترانسفورماتورهای قدرت، مدیریت طول عمر و ارزیابی شرایط عایقی آن است. طول عمر روغن با اندازه‌گیری خواصی از آن مانند دما، گذردهی، از بین رفتن استحکام، قدرت شکست، اسیدیته، مقدار آب، نقطه اشتعال و کشش‌سطحی تعیین می‌گردد. تجزیه و تحلیل گازهای حل شده در روغن نیز به عنوان یک ابزار تشخیص قدرتمند برای تعیین شرایط کاری ترانسفورماتور است. در ادامه به تشریح و بررسی این پارامترها می‌پردازیم.

### ۲-۲-گازهای محلول در روغن ترانس(Oil dissolved gas)

مطالعه بر روی گازهای محلول در روغن ترانس، کمک شایانی در تعیین وضعیت و میزان سلامت (Healthy) ترانس می‌نماید. روغن ترانسفورماتورها از تصفیه روغن معدنی تهیه می‌شود که در دمای ۱۰۵ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد به جوش آمده است. این روغن پس از تصفیه از لحاظ شیمیایی کاملاً خالص بوده و تنها شامل هیدروکربن‌های مایع می‌باشد[۴]. تجزیه روغن ترانس در شرایط تخلیه جزیی، اضافه جریان، شکست عایقی و همچنین حرارت زیاد سیم‌پیچ‌ها رخ می‌دهد که منجر به تولید گازهایی می‌شود. این گازها شامل H2 ، CO،CO2 و همچنین مشتقاتی از هیدروکربن‌ها شده که در محفظه تانک ترانس انباشته می‌شوند. با تجزیه و تحلیل و مطالعه بر روی این گازها مطابق با جدول (۱)، مشکل یا خطای ایجاد شده در داخل ترانسفورماتور مشخص می‌گردد[۵].

**جدول ۱ : معرفی گازهای تولید شده د ر محفظه‌ی تانک ترانس**

| نوع خطا | گاز تولید شده | |
|---|---|---|
| گرمایش موضعی | $H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8$ | ۱ |
| گرمایش‌موضعی‌درعایق‌جامد | $CO, CO_2, H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8$ | ۲ |
| تخلیه‌ی جزیی در روغن | $H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_3H_6$ | ۳ |
| تخلیه‌ی جزیی درعایق جامد | $CO, CO_2, H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_3H$ | ۴ |

همچنین در حالت پیش‌فرض نیز گازهایی در روغن ترانس به‌صورت محلول وجود دارند که اگر میزان آن‌ها از حد مجاز تجاوز نکند، بیان‌گر وضعیت عادی می‌باشد. جدول (۲) حدود مجاز گازهای محلول در روغن ترانس را نشان می‌دهد[۵].

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در رابطه با گازهای TCG چنانچه میزان این گازها به 700 ppm رسیده و میزان C2H4 نیز به 100ppm و نرخ افزایش ماهانه TCG در حدود 70ppm/month باشد، این وضعیت می‌بایست که هرچه سریع‌تر پیگیری شود.

**جدول ۲ : معرفی میزان معمول و مجاز گازهای حل شده در روغن ترانس**

| گازها | سطح معمول | سطح قابل پیگیری |
|---|---|---|
| $C_2H_2$ | 0.5ppm > | 5ppm |
| H2 | 400ppm > | - |
| $C_2H_2$ | 100ppm > | 100ppm > $C_2H_4$<br>با درنظرگرفتن شرایط:<br>700ppm >TCG |
| CO | 300ppm > | 300ppm >CO<br>با درنظرگرفتن شرایط:<br>نرمال $CO_2$ / CO >3<br>غیرنرمال $CO_2$/CO<3 |
| *TCG | 700ppm > | با درنظرگرفتن شرایط:<br>Increasing rage 70ppm/ month of TCG<br>$C_2H_4$:100ppm<br>TCG:700ppm |

Total Combustible Gas*

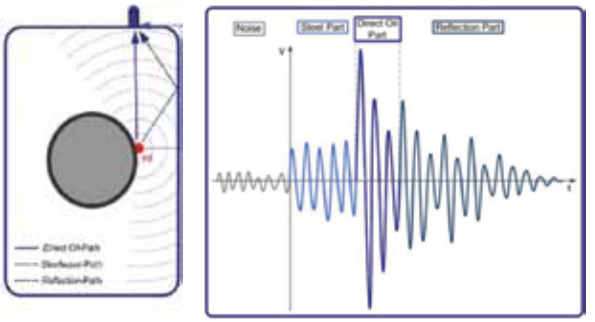
سنسورهای اندازه‌گیری گازهای محلول در دسته‌بندی سنسورهای شیمیایی قرار گرفته‌اند که بر اساس تعداد گازهایی که می‌توانند تشخیص دهند، به دو نوع ساده و پیچیده تقسیم می‌شوند. سنسورهای ساده مانند Hydrocall 1003, Hydran وCalisto که تنها قابلیت تشخیص چند گاز محدود از قبیل CO و H2 را دارند. در حالی‌که سنسورهای پیچیده مانند Trans fix، Hydrocal1008 و Serveron TM8 که با نام DGA sensor(dissolved gas analysis) شناخته می‌شوند، میزان گازهای بیش‌تری از قبیل H2، C2H2، C2H4، C2H6، CH4 نیتروژن و اکسیژن حل‌شده را می‌توانند اندازه‌گیری نمایند.[۴].

در شکل (۱) نمایی از سنسور هیدران مشاهده می شود.

**شکل ۱: سنسور هیدران جهت اندازه گیری گازهای محلول در روغن ترانس**

## ۳-۲-تخلیه جزئی در داخل ترانس

تخلیه‌جزیی (PD) در واقع اصلی‌ترین منبع خرابی عایق در ترانس‌های قدرت می‌باشد. وجود تخلیه‌جزیی با گذشت زمان باعث تخریب عایق بین سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و در نهایت شکست کامل عایقی و انهدام ترانس خواهد شد. تخلیه جزیی یا partial discharge در واقع به جرقه‌های کوچک درون یک ماده عایقی که در یک میدان الکتریکی قوی، واقع شده گویند. عامل اصلی ایجاد این جرقه‌ها میدان الکتریکی غیر یکنواخت می‌باشد.

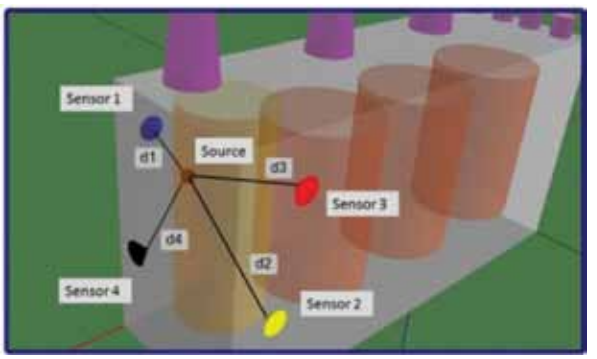



شکل ۲: روش های انتشار طول موج ساطع شده در PD داخل ترانس

در شکل (۲) امواج صدا ناشی از تخلیه جزیی در ترانس از طریق روغن و جداره ترانس به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به سنسور نصب شده بر روی جداره ترانس منتقل می شود. با استفاده از سنسورهای آکوستیکی می‌توان این فرکانس‌ها را اندازه‌گیری و آنالیز نمود. در شکل (۳) نمونه‌ای از این سنسور و نحوه نصب آن نشان داده شده است.

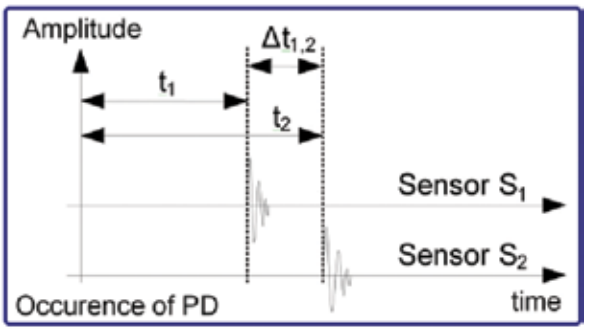
شکل ۳: سنسورهای آکوستیکی برای اندازه‌گیری طول موجPD

همچنین با توجه به شکل (۴) زیر برای تشخیص دقیق محل PD بایستی از چندین سنسور به‌طور توامان استفاده نمود.




شکل ۴: طریقه نصب سنسورهای PD روی جداره خارجی ترانس

با توجه به زمان رسیدن سیگنال PD به هر سنسور می‌توان محل آن را شناسایی نمود. شکل (۵) نشان دهنده تاخیر زمانی این سیگنال‌ها می‌باشد.




شکل ۵: تاخیر زمانی سیگنال PD دریافت شده توسط سنسورهای آکوستیکی بسته به فاصله قرارگیری آن از محل PD

همچنین برای اندازه‌گیری PD در محیط سویچگیر و حتی فیدرهای 20KV نیز می‌توان از سنسورهای اندازه گیری PD به‌صورت پرتابل استفاده نمود. نمونه‌ای از این سنسورها در شکل(۶) نشان داده شده است.

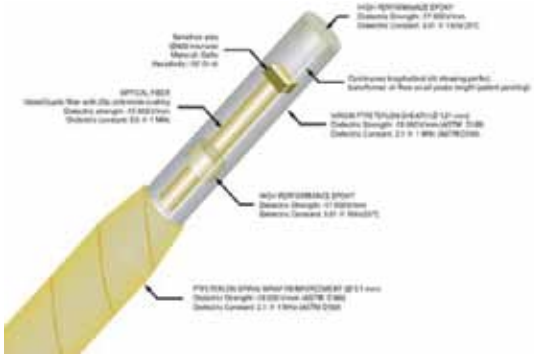
شکل ۶: نمونه‌ای از سنسورهای پرتابل برای اندازه‌گیری سیگنال‌های PD

مطابق شکل(۷) با در دست داشتن این سنسور در محیط پست و حتی در زیر خطوط انتقال و توزیع نیز می‌توان از وجود PD مطلع شد.

شکل ۷: نمونه دیگری از سنسورهای پرتابل PD برای استفاده در محیط سویچ گیر

## ۴-۲- نقطه داغ ترانس

نقطه داغ ترانس به دو روش اندازه‌گیری آنلاین و اندازه‌گیری به‌صورت شبیه‌سازی نقطه داغ صورت می‌گیرد. در روش شبیه‌سازی مطابق با استاندارد IEC 60354 با اندازه‌گیری پارامترهای جریان بار ترانس، دمای قسمت بالای روغن ترانس و همچنین در نظر گرفتن سن ترانس امکان‌پذیر می‌باشد. در روش آنلاین از سنسورهای نوری با تکنولوژی مبتنی بر نیمه هادی گالیوم ارسنید با طول موج عملکرد ۷۰۰-۹۰۰ نانومتر دمای سیم‌پیچ با طول موج مدل می‌شود. در شکل (۸)نمونه از این سنسور و نصب آن در میان سیم‌پیچ‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۸: ساختمان داخلی سنسور نوری بر پایه نیمه هادی گالیوم ارسنید به منظور اندازه گیری دما

نحوه نصب این سنسورها نیز در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

شکل ۹: طریقه نصب سنسورهای دمای نوری بر روی سیم پیچ های ترانس

### ۵-۲-سطح روغن ترانس

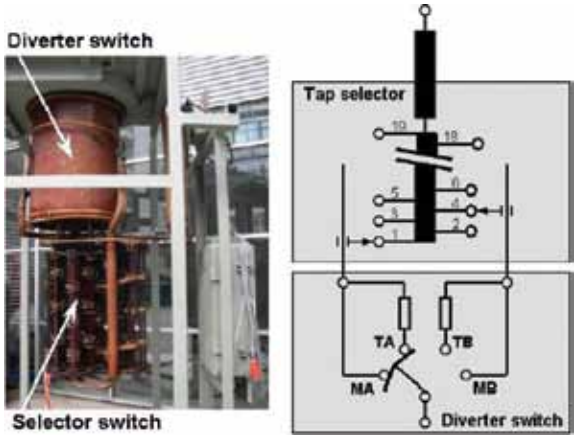
در ترانسفورماتورهای روغنی، حجم روغن در اثر تغییرات درجه حرارت، تغییر قابل ملاحظه‌ای دارد. اما عوامل دیگری نیز نظیر اضافه بار، تولید گاز در روغن و همچنین نشتی روغن باعث تغییر سطح روغن در ترانس می‌شود. بنابراین پارامتر سطح روغن جزء فاکتورهای مهم اندازه‌گیری می‌باشد.

## ۳-پارامترهای مهم در تپ‌چنجر

ترکیب پیچیده اجزای مکانیکی، ولتاژ و جریان‌های بالا و حرکت کنتاکت‌های الکتریکی باعث دشواری بررسی LTCهای تحت سرویس می‌شود. این عوامل آنها را به یکی از مهم‌ترین و مشکل‌سازترین اجزای سیستم قدرت تبدیل می‌کند. با توجه به [۶]، تپ‌چنجر معمولا خرابی بیشتری نسبت به ترانسفورماتور دارد. بنابراین بررسی وضعیت این بخش از ترانسفورماتور و پیش‌بینی تمهیدات لازم برای جلوگیری از خطای تپ‌چنجر از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهایی که در این تجهیز برای نیل به این هدف لازم و ضروری است شامل ارتعاشات و روغن تپ‌چنجر می‌شود. در این بخش به بررسی این کمیت‌ها می‌پردازیم.

### ۳-۱-ارتعاش در تپ‌چنجر

به هنگام انجام فرآیند تغییر پله در تپ‌چنجر حرکت Diverter switch بر روی مقاومت‌های موقتی ارتعاشاتی غیرقابل چشم پوشی، در محفظه تپ ایجاد می‌کند. در صورت خوردگی کنتاکت‌ها و یا تضعیف قدرت عایقی روغن، میزان ارتعاشات شدت یافته که با اندازه‌گیری و بررسی این ارتعاشات می‌توان از بروز عیب‌های اساسی جلوگیری نمود. نحوه عملکرد حرکت Diverter switch و اتصال آن به زبانه‌های MA، TA، TB و MB به‌منظور تغییر نرم تپ ترانس در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

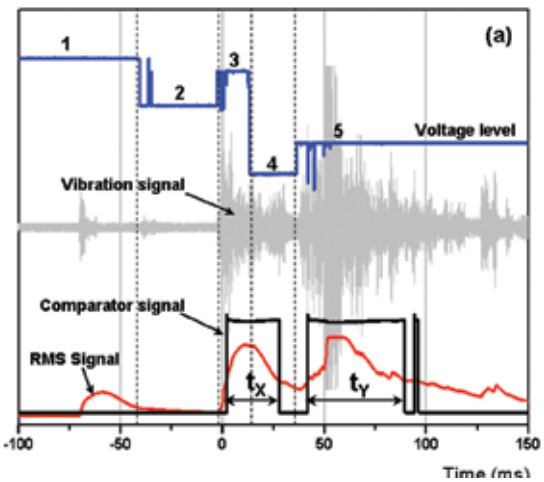



شکل ۱۰: تصویری از بررسی ارتعاش تپ‌چنجر در آزمایشگاه

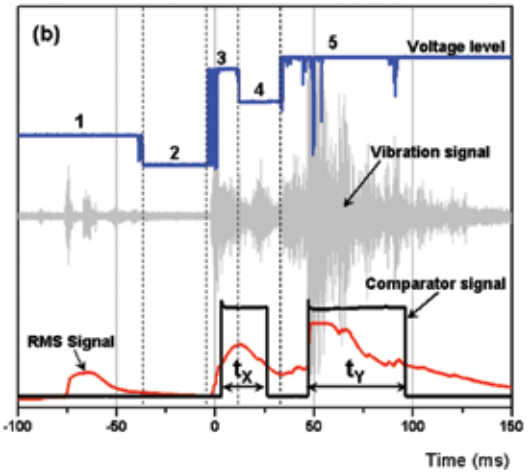
حرکت این کلید بدین‌ترتیب است که با هر بار تغییر تپ، ۵ مرحله طی می‌شود. در حالت اول MA و TA درحال بسته شدن هستند و در حالت دوم با حرکت کلید MA باز شده و TA بسته می‌شود. سپس در حالت سوم TA و TB به یکدیگر متصل شده و با ادامه حرکت کلید در مرحله چهارم TA جدا شده و تنها TB وصل می‌باشد. نهایتاً در مرحله پنجم TB و MB به یکدیگر متصل شده و تغییر تپ ترانس به‌صورت کامل اجرا می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده در [۷] با بررسی ۵ حالت مذکور در یک پله خاص از تپ و مقایسه میزان ارتعاش ایجادشده، با توجه به شکل (۱۱) و (۱۲) ملاحظه می‌شود که در حالت‌های ۳ و ۵ جایی که کنتاکت‌های Diverter switch بسته می‌شوند، میزان ارتعاش بیشتر می‌باشد. بنابراین به علت تاثیر بیشتر این دو حالت در ایجاد ارتعاش نسبت به حالت‌های دیگر، مشخصه زمانی tx را به حالت ۳ و ty را به حالت ۵ اختصاص می‌دهیم.

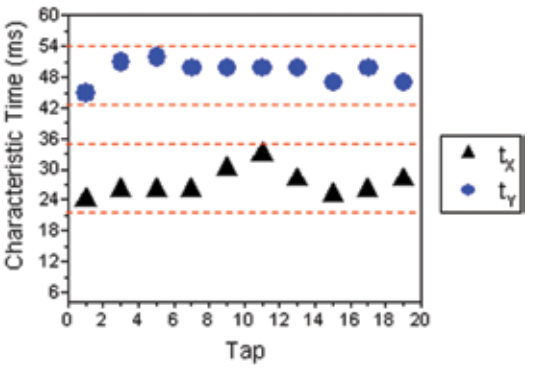
با تکرار بررسی ارتعاشات تپ در پله‌های زوج و پله‌های فرد و اندازه‌گیری مشخصه‌های زمانی tx و ty در ۱۹ تپ مختلف، نتایجی حاصل شد که در نمودارهای شکل(۱۳) و (۱۴) گنجانده شده است.



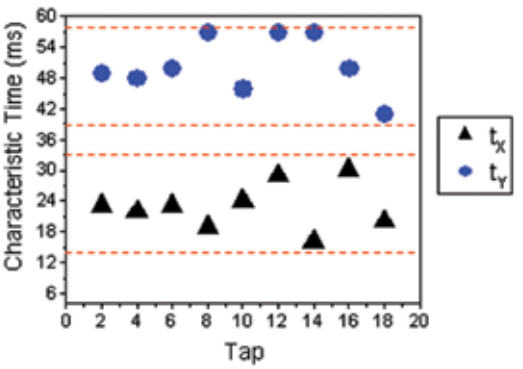

شکل ۱۱: بررسی ارتعاش در شرایط عادی و موقعیت فرد در تپ‌چنجر




شکل ۱۲: بررسی ارتعاش در شرایط عادی و موقعیت زوج در تپ‌چنجر




شکل ۱۳ : اندازه‌گیری مشخصه زمانی tx و ty در موقعیت فرد تپ‌چنجر




شکل ۱۴: اندازه گیری مشخصه زمانی tx و ty در موقعیت زوج تپ‌چنجر

از آنجا که بررسی‌های انجام شده در شرایط نرمال تپ بوده است، با توجه به ثابت بودن تفاوت محدوده زمانی tx و ty در تپ‌های زوج و فرد و همچنین تعداد دفعات اندازه‌گیری K، با تعیین معیار σt می‌توان به شرایط کاری هر لحظه از کنتاکت‌های تپ‌چنجر پی برد.

$$\bar{t}_x = \frac{t_{x1} + t_{x2} + t_{x3} + \ldots + t_{xk}}{k}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_x - \bar{t}_x)^2}{k}}$$

جدول۳: تعیین رنج واقعی ارتعاشات و مقدار مجاز آن

| | رنج tx | رنج ty | $\bar{t}_x$ | $\bar{t}_y$ | $\bar{\sigma}_{tx}$ | $\bar{\sigma}_{ty}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| تپ فرد | ۲۴-۳۳ | ۴۵-۵۳ | ۲۷ | ۴۹ | ۲,۵ | ۲,۱ |
| تپ زوج | ۱۶-۳۰ | ۴۱-۵۷ | ۲۳ | ۵۱ | ۴,۲ | ۵,۲ |

با دردست داشتن معیارهای نامبرده در جدول (۳) و مقایسه مقادیر لحظه‌ای با این معیارها، می‌توان به چگونگی عملکرد صحیح کنتاکت‌ها پی‌برد. بدین صورت که اگر در یک بررسی، $\sigma_t$ از مقادیر $\bar{\sigma}_t$ محاسبه شده در جدول(۳) بیش‌تر باشد، در واقع مقدار tx و ty از $\bar{t}_x$ و $\bar{t}_y$ متناظر خود بیش‌تر بوده که به ترتیب بیان‌گر عدم کارکرد صحیح کنتاکت‌های درگیر در مرحله ۳ و ۵ Diverter switch می‌باشد[۷].

### ۲-۳-روغن تپ‌چنجر

رر هر بار عملکرد تپ‌چنجر و تعویض پله آن، به‌علت فرآیند arc-ing در روغن تپ‌چنجر، گازهای $H_2$ و $C_2H_2$ تولید می‌شود. بنابراین استیلن به‌عنوان یک گاز کلیدی برای تشخیص این فرآیند به‌حساب می‌آید. گازهای اتان، متان و اتیلن مجموعه‌ای از گازهای کلیدی هستند که بیانگر به جوش آمدن روغن و ایجاد تغییر شیمیایی در آن هستند. جدول (۴) معیاری از میزان گازهای مجاز، در روغن انواع تپ‌چنجر را ارایه می‌دهد[۶].

جدول۴: معیاری برای گازهای مختلف در انواع تپ‌چنجر

| نوع تپ‌چنجر | هیدروژن ($H_2$) | استیلن ($C_2H_2$) | اتیلن ($C_2H_4$) |
|---|---|---|---|
| free breather | >1500 ppm | >1000 ppm | >1000 ppm |
| sealed | >5000 ppm | >9000 ppm | >1200 ppm |
| vaccum | >10 ppm | >5 ppm | >100 ppm |

همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقادیر کمتر از میزان مذکور، قابل قبول می‌باشد. در صورت افزایش مقدار گازها از حدود ارایه شده، بازبینی روغن تپ‌چنجر ضروری است.

## ۴-پارامترهای مهم بریکر

بریکرها یکی از حیاتی‌ترین تجهیزات پست‌های فشارقوی هستند، که نقش مهمی در جداسازی شبکه‌های برق دارند. اصلی‌ترین مشخصه این تجهیز، سرعت و کیفیت عملکرد آن، به هنگام باز و بسته شدن تیغه‌ها می‌باشد. با توجه به مکانیزم قطع بریکر، بررسی پارامترهایی نظیر میزان گازهای حل شده در روغن بریکرهای روغنی، فشار گاز SF6 و مشخصاتی از این گاز نظیر خاموش‌کنندگی، استحکام عایقی و ضریب انتقال حرارت در بریکرهایی با گاز SF6، از اهمیت بالایی برخوردار است. هرچند تکنولوژی CBها گسترش یافته است، اما CBهای روغنی هنوز هم در تعداد زیادی از شبکه‌های قدرت امروزه استفاده می‌شوند[۸].

در شکل (۱۵) دوربین محصول شرکت Flir با مدل GF306 است که نشت گاز SF6 را تشخیص داده و نشان می‌دهد.

### ۴-۱-سرعت عملکرد بریکر

بریکرها باید قادر باشند مدار الکتریکی را در ضمن عبور جریان باز کنند. این وظیفه مهم، می‌بایست در کوتاه‌ترین زمان ممکن صورت گیرد. بنابراین سرعت عملکرد بریکر یکی از خصوصیات اصلی حفاظت مناسب آن است.

### ۴-۲-گازهای حل شده در بریکر روغنی

طبق[۸]، در زمانی که بریکر باز می‌شود، به دلیل قطع شدن سریع،

آرک شدیدی در محفظه کنتاکت‌ها رخ می‌دهد. در این زمان روغن نقش خفه‌کنندگی خود را ایفا می‌کند. تحت گرمای شدید ناشی از آرک ایجاد شده، مقداری از روغن بریکر معمولا به گازهای هیدروژن و استیلن، و نیز ذراتی از کربن تجزیه می‌شود. البته تولید گاز هیدروژن به سرد کردن کنتاکت‌ها و در نتیجه سریع خاموش شدن آرک، کمک می‌کند.

مطابق با تحقیقات انجام شده در [۹]، انواع خرابی در بریکرهای روغنی به شامل فرسودگی بوشینگ داخلی توسط نشتی روغن و رطوبت، نفوذ رطوبت به تانک اصلی، خوردگی و ترک برداشتن کنتاکت‌ها و کربونیزه شدن روغن می‌شود.

شکل ۱۵ : اندازه گیری مشخصه زمانی tx و ty در موقعیت زوج تیچنجر

### ۴-۳-تغییرات گاز SF6 در برابر دما

یکی از سنگین‌ترین گازهای عایقی شناخته شده که تراکم مولکولی بالایی دارد، گاز SF6 است. تراکم مولکولی این گاز در شرایطی مشابه با هوا، ۵ برابر بیش‌تر است. دلایل مذکور باعث ایجاد مقاومت بیشتر نسبت به تغییرات دما در این گاز شده است. ضریب انتقال حرارت گاز SF6از هوا بیش‌تر بوده و میزان سردکنندگی آن توسط روش هم‌رفت، حدودا ۱.۶ برابر هوا می‌باشد[۱۰].

### ۴-۴-استقامت عایقی گاز SF6

با افزایش فشار، استقامت عایقی گاز SF6 افزایش پیدا می‌کند، تا جایی که در فشار ۳ اتمسفر، میزان استحکام عایقی آن با روغن ترانس برابری می‌کند. میزان تغییرات استقامت عایقی این گاز در مقابل تغییر فاصله الکترودها، بسیار کمتر عایق هوا است. همچنین به‌منظور جلوگیری از مایع شدن گاز SF6 در بریکرها، هیترهایی با عنوان SF6 Heater در آن‌ها تعبیه می‌شود.

شکل ۱۶ : AE WIRELESS SENSOR

### ۴-۵-سنسور تشخیص ارتعاش در بریکر

یکی از سنسورهای تشخیص ارتعاش در پست‌های برق Acoustic sensor می‌باشد. عملکرد این سنسور بدین صورت است که پس از تشخیص سیگنال صوتی منتشر شده توسط لرزش، از طریق کریستال پیزوالکتریک به ولتاژ تبدیل شده و برای اندازه‌گیری و پردازش به مدارات واسط ارسال می‌گردد. این سنسور از طریق پروتکل TCP/IP و شبکه اترنت به سایر ادوات متصل شده و داده‌های خود را برای اتخاذ تصمیم لازم به اشتراک می‌گذارد. با پشتیبانی توپولوژی Mesh در این سنسورها، می‌توان دیتای آن‌ها را به‌صورت بی‌سیم و از فواصل بسیار دور مانیتورینگ نمود. تغذیه این سنسورها از طرق مختلفی قابل تامین است که یکی از این روش‌ها صفحات خورشیدی می‌باشد[۷-۱۲].

در شکل(۱۶) نمونه از نصب سنسورهای آکوستیکی AE نشان داده شده است.

### ۴-۶-سنسورهای تشخیص فشار

تنظیم بودن میزان فشار روغن در ترانس و بریکرهای روغنی و نیز فشار گاز SF6 بریکرها در پست‌های فشار قوی از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از سنسورهایی که برای اندازه‌گیری فشار داخلی روغن ترانس کاربرد فراوانی دارد، Shock Sensor می‌باشد (شکل ۱۷). این سنسور علاوه بر اندازه‌گیری فشار داخلی ترانس، نسبت به تغییرات فشار نیز حساس است. با وقوع جرقه شدید در بین حلقه‌های سیم‌پیچ و تجزیه روغن به گازهای ذکر شده، تغییر ناگهانی در فشار داخلی ترانس ایجاد می‌شود. تحلیل فرکانسی سیگنال خروجی این سنسور و ثبت آن در سیستم مانیتورینگ، اطلاعات ارزشمندی در اختیار ما می‌گذارد.

شکل ۱۷ : shouck sensor

سنسور Leak SF6، با تعیین محل نشتی گاز SF6 به تشخیص میزان فشار این گاز در محفظه بریکر کمک می‌کند[۱۳].این سنسور در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود.

شکل ۱۸: Leak SF6

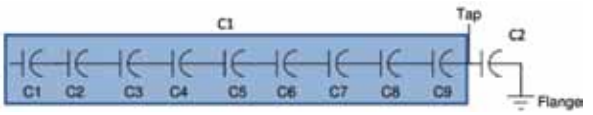
## ۵-پارامترهای مهم در بوشینگ

یکی از مهم‌ترین بخش‌های ترانس که باعث بروز بیش از ۱۵٪ خطاهای ترانس می‌شود بوشینگ است. همچنین ترکیدگی این تجهیز

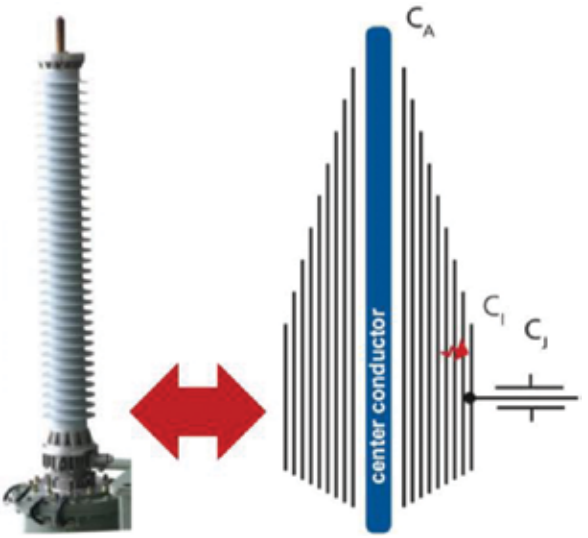
با سرریز شدن روغن ترانس همراه است که باعث آتش‌سوزی ترانس و تجهیزات اطراف آن می‌شود. مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری که تحلیل آنها سبب جلوگیری از این قبیل حوادث می‌شود به شرح ذیل است:

-تغییرات ظرفیت خازنی بوشینگ
- تغییرات تانژانت دلتا(ضریب تلفات عایقی)
- جریان نشتی خازنی
- مقایسه نرخ رشد پارامترها در بوشینگ

بوشینگ را میتوان به صورت چندین لایه خازن سری مطابق با شکل (۱۹) و (۲۰) مدل کرد.




شکل ۱۹ : مدل الکتریکی بوشینگ




شکل ۲۰: لایه‌های خانی متعدد در بوشینگ های فشارقوی

شرکت‌های مختلفی با اندازه‌گیری پارامترهای مذکور اقدام به ساخت تجهیزاتی جهت مانیتورینگ آنلاین بوشینگ نموده که از بروز حادثه در این تجهیز و به تبع آن ترانس جلوگیری می‌نماید. در شکل(۲۱) نمونه‌ای از این تجهیز که محصول شرکت ABB، مدل TMU100 است؛ نشان داده شده است.

شکل ۲۱: نمای روبروی TMU100 برای مانیتورین آنلاین بوشینگ‌های فشارقوی

در این تجهیز با استفاده از نمونه‌های آنلاینی که از Test tap بوشینگ مطابق شکل زیر گرفته می شود عمل حفاظت بوشینگ‌ها صورت می‌گیرد. در شکل(۲۲) نحوه اتصال کابل به Test tap بوشینگ برای اندازه‌گیری و مانیتورینگ توسط TMU100 نشان داده شده است.

شکل۲۲ : اتصال کابل به Test tap بوشین هت اندازه‌گیری پارامترهای کلیدی بوشین

## ۶-تحقق اهداف پیش‌بینانه

تعمیرات در پست‌های برق منطقه‌ای خراسان به‌صورت پیشگیرانه (Preventive maintenance) انجام می‌شود. بنابراین تعمیرات در این روش بدون در نظر گرفتن وضعیت هر تجهیز، مطابق با برنامه‌های از پیش تعریف شده انجام می‌شود. این امر علاوه بر افزایش احتمال خرابی تجهیزات، باعث صرف هزینه زیادی در بخش بهره‌برداری از پست‌ها می‌شود.

امروزه با استفاده از روش تعمیرات پیش‌بینانه و به‌کارگیری سنسورهای هوشمند، می‌توان اطلاعات دقیقی از پارامترهای کلیدی و نحوه عملکرد تجهیزات به‌دست آورد که با استفاده از آن زمان انجام تعمیرات بهینه شود، که در این صورت از تعمیراتی مبتنی بر زمان (PM) به سمت تعمیراتی مبتنی برشرایط (PDM) حرکت می‌کنیم. با استفاده از این روش علاوه بر کاهش نرخ هزینه‌های تعمیر ونگهداری، طول عمر مفید تجهیزات نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۳، مهم‌ترین گام در جهت تحقق اهداف PDM، به‌کارگیری سنسورهای هوشمند و مانیتورینگ زمان واقعی آن‌ها می‌باشد. نکته حائز اهمیت برای نیل به این هدف، وجود بسترهای اتوماسیون در پست‌ها است. بنابراین با توجه به وجود این بستر در اغلب پست‌های جدید، امکان استفاده و بهره‌مندی از مزایای آن وجود دارد. از مزایای این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود[۱۴].

- کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری
- کاهش میزان خرابی‌های اضطراری به میزان ۵۵٪
- کاهش ۳۰ درصدی زمان تعمیر و overhaul
- افزایش شاخص MTBF(Mean time between failure ) تا ۳۰ ٪
- کاهش نگرانی‌های مرتبط با اجرای دقیق برنامه‌های زمان‌بندی تعمیرات در PM
- عدم بروز خطای جدی در تجهیزات به‌علت تشخیص زود هنگام آن‌ها
- فرصت و فراغت بیشتر برای تعمیرکاران

## ۷-نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این مقاله، استفاده از سنسورهای هوشمند برای اندازه‌گیری پارامترهای کلیدی در تجهیزات برق فشارقوی، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به مهیا بودن بسترهای ارتباطی و اتوماسیون در اغلب پست‌های برق خراسان، استفاده از این سنسورها علاوه بر بهبود روش تعمیرات و نگهداری، سبب کاهش هزینه‌ها در طولانی مدت می‌شود. هزینه نیروی انسانی متخصص از یک طرف، و هزینه‌های تعمیرات اساسی در تجهیزات از طرفی دیگر باعث افزایش هزینه در تعمیرات فعلی PM می‌شود. در حالی‌که با استفاده و بهره‌مندی از روش تعمیرات پیش‌بینانه، مدت زمان تعمیرات بر اساس وضعیت سلامت تجهیز متغیر است. همچنین پیش‌بینی و تشخیص زود هنگام خطا در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن آن، علاوه بر افزایش طول عمر ترانس، به بهبود بهره‌برداری در طول دوره عمر مفید آن منجر می‌شود. علاوه بر این با استفاده از قابلیت‌هایی که در این مقاله ذکر شده است، احداث پست‌هایی تنها با یک ترانس قدرت، دور از ذهن نمی‌باشد.

### مراجع


[1] J.Roger Bowman, D.Wahl, “Advanced Distributed Sensor Networks For Electric Utilities”, San Diego, CA92121, Science Application International Corporation, 2012

[2] R. Moghe, A. Iyer, F. C. Lambert, D. Divan, “A Robust Smart Sensor for Smart Substations”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pages 1-8,July 2012

[3] R.Shoureshi, J.Work, “Advanced Sensor And Diagnostic Technologies For Development Of Intelligent Substations”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol.1, pages 727-746, June 2004

[4] J.Dončuk, V.Mentlík, J.Velek, “Condition assessment of power transformer using gas detection methods”, journal in PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2013

[5] Shihlin Electric & Engineering Corporation, “Instructions Maintenance For Power Transformer” Taiwan

[6] R.Youngblood, C.Baker, FJakob, N.Perjanik, Application Of Dissolved Gas Analysis To Load Tap Changer

[7] R.Vilaithong, S.Tenbohlen, T.Stirl, On-Line Tap Changer Diagnosis Based On Acoustic Technique

[8] A.Prevost, “Oil Circuit Breaker Diagnostic” 7th Annual Weidmann Technical Conference, New Orleans, September 2008

[9] IEEE Standard, “IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers” IEEE Power & Energy Society, August 2002

[10] Hydroelectric research and technical services group, “Maintenance Of Power Circuit Breaker” Facilities instructions, standards and technique, Vol.3-16, December 1999

[11] K.Malmedal, P.K.Sen, “Potential of Massively Deployed Sensors Applications in Substation Engineering” IEEE Research

[12] A.Nunez, “Acoustic Emission Wireless Sensors applications On Power Equipment” MISTRAS Group

[13] MISTRAS Group, “SF6 Leak Detection Solution” 2011

[14] R.Keith Mobley, “Plant Engineer’s Handbook” Butterworth-Heinemann, first edition, march 2001.


***

ادامه از صفحه ۴۴ »

می‌یابد. در سالیان اخیر، سیاست‌های حمایتی و بسته‌های تشویقی ویژه به منظور ایجاد انگیزه برای سرمایه‌گذاران در توسعه مولدین تولید پراکنده در نظر گرفته شده است.

**جدول ۵: صورتحساب فروش انرژی**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۱- مقدار انرژی الکتریکی تولید شده سیم توانیر در ساعات کم‌باری KWh | $(a_1)$ | شهریور | 22,761 |
| | | مهر | 400,197 |
| ۲- مقدار انرژی الکتریکی تولید شده سیم توانیر در ساعات بار عادی KWh | $(a_2)$ | شهریور | 110,850 |
| | | مهر | 461,875 |
| ۳- مقدار انرژی الکتریکی تولید شده سیم توانیر در ساعات اوج بار KWh | $(a_3)$ | شهریور | 29,657 |
| | | مهر | 136,203 |
| ۴- عدد n تعیین شده در قرارداد (جهت محاسبه ضریب تعدیل) | | | 0.5 |
| ۵- نرخ پایه تبدیل انرژی (ریال بر کیلووات ساعت)(با اعمال ضریب تعدیل) | (b) | | 996.00 |
| ۶- مبلغ تخفیف (ریال بر کیلووات ساعت) | (c) | | 0 |
| ۷- میزان گاز مصرفی قابل قبول برای تولید یک کیلووات ساعت برق (مترمکعب) | (d) | | 0.2 |
| ۸- نرخ هر متر مکعب گاز مصرفی (ریال بر مترمکعب) | (e) | | 0 |
| ۹- متوسط هزینه‌ی متغیر AVC (ریال بر ساعت) | (f) | | 166.00 |
| ۱۰- میزان آمادگی در ساعات کم‌باری (کیلو وات ساعت) | $(g_1)$ | | 0 |
| ۱۱- میزان آمادگی در ساعات بار عادی (کیلو وات ساعت) | $(g_2)$ | | 0 |
| ۱۲- میزان آمادگی در ساعات اوج بار (کیلو وات ساعت) | $(g_3)$ | | 0 |
| ۱۳- سایر هزینه‌های اضافی (ریال) | (h) | | 0 |
| ۱۴- مبلغ کل ناخالص صورتحساب این دوره (ریال) | (I) | شهریور | 180,818,322 |
| | | مهر | 930,641,982 |

$$I=[(a_1*m_1+a_2*m_2+a_3*m_3)*(b-c+d*e)]+[(g_1*m_1+g_2*m_2+g_3*m_3)*(b-c-f)]+h$$

$$m_1=0.5 \;\&\; m_2=1 \;\&\; m_3=2$$

### پی‌نوشت‌ها

1-Combined Heat & Power (CHP)

2-Combined Cold & Heat & Power (CCHP)

### مراجع


[۱] شیوه محاسبه پیش‌پرداخت و نرخ تخفیف خرید برق در قراردادهای تضمینی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ۱۳۸۹.

[۲] راهنمای سرمایه‌گذاران احداث مولدهای مقیاس کوچک، سازمان بهره وری انرژی ایران، ۱۳۸۹.

[3] D.W. Wu, R.Z. Wang, Combined cooling, heatingand power: A review, Institute of Refrigerationand Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Dongchuan Road 800, Shanghai 200240, China, Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006) 459–495

[4] H.I. Onovwiona & V.I. Ugursal, “Residentialcogeneration systems: review of the currenttechnology”, Renewable and Sustainable EnergyReviews 10 (2006).


***