

کاربردهای بازرسی ترموگرافی در پایش وضعیت تجهیزات الکتریکی کارخانجات تولید سیمان

احمد کندی^۱، علیرضا رضایی^۲

چکیده

بازرسی ترموگرافی بعنوان یکی از آزمونهای غیر مخرب و ابزارهای غیر تماسی در ارزیابی وضعیت حرارتی تجهیزات الکتریکی فشار قوی و فشار ضعیف، جایگاه ویژه‌ای در بین تکنیکهای پایش وضعیت به خود اختصاص داده است. در اغلب موارد، بازرسی ترموگرافی تنها ابزاری است که می‌تواند الگوی حرارتی و عیوب ناشی از افزایش و یا کاهش دما را تشخیص دهد. در این مقاله، پتانسیلهای بازرسی تجهیزات الکتریکی، رویه بازرسی و نکات مهمی که شخص ترموگرافر در هنگام بازرسی از تجهیزات الکتریکی کارخانجات سیمان باید از آنها آگاه باشد، مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌هایی از عیوب پر تکرار نیز در قالب تصاویر حرارتی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: بازرسی ترموگرافی، تجهیزات الکتریکی، پتانسیلهای بازرسی، کارخانجات سیمان.

۱. مقدمه

تکنیک ترموگرافی یکی از ابزارهای ارزشمند و پرکاربرد در برنامه‌های پایش وضعیت است که در اغلب واحدهای صنعتی، از آن استفاده میشود. گسترده‌ترین دامنه کاربرد ترموگرافی در ارزیابی وضعیت حرارتی تجهیزات الکتریکی است. در این روش بازرسی، بدون نیاز به تماس مستقیم با تجهیزات برقدار و از فاصله ایمن، می‌توان وضعیت حرارتی اتصالات و المانهای الکتریکی را مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به اینکه افزایش دما و تمرکز حرارت، از اولین نشانه‌های بروز عیب در اغلب تجهیزات الکتریکی است، دوربینهای ترموگرافی بهترین و توانمندترین ابزار برای تشخیص عیوب حرارتی در این تجهیزات بشمار می‌روند. با بکارگیری صحیح این ابزار و تدوین و پیاده سازی یک برنامه منظم و منسجم، میتوان به نتایج ارزشمند و قابل توجهی در زمینه عیب‌یابی تجهیزات الکتریکی با استفاده از تکنیک ترموگرافی دست یافت.

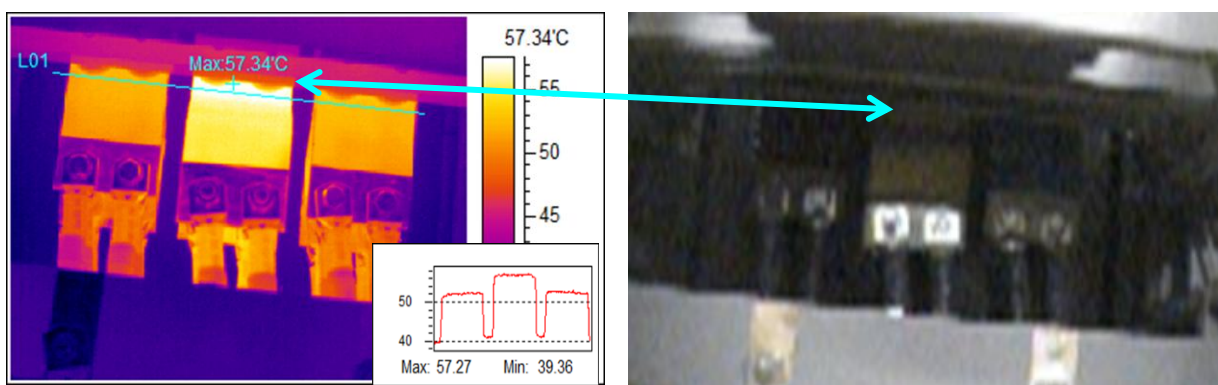
۲. دسته بندی تجهیزات الکتریکی جهت انجام بازرسی ترموگرافی

هدف از دسته بندی تجهیزات و مشخص نمودن نواحی و نقاط مورد نظر جهت انجام بازرسی، افزایش دقت و کیفیت ارزیابی تجهیزات است. از آنجا که تجهیزات الکتریکی از تنوع نسبتاً بالایی برخوردارند، جهت تدوین یک برنامه بهینه، لازم است که تجهیزات الکتریکی شامل در برنامه بازرسی ترموگرافی، به شکل مناسبی دسته بندی گردند. بر اساس تجربه، تجهیزات الکتریکی کارخانجات تولید سیمان جهت بازرسی ترموگرافی به سه دسته اصلی تقسیم میشوند که هر کدام از آنها شامل

زیرمجموعه و جزئیات بیشتری خواهند بود. این دسته بندی شامل گروه اول: تجهیزات پستهای اصلی و فرعی، گروه دوم: تابلوهای الکتریکی محلی در سطح کارخانه و گروه سوم: ترانسفورماتورها میباشد. در ادامه به بررسی تجهیزات بر اساس این دسته بندی می پردازیم.

۲- ۱. بازرسی ترموگرافی از پستهای اصلی و فرعی

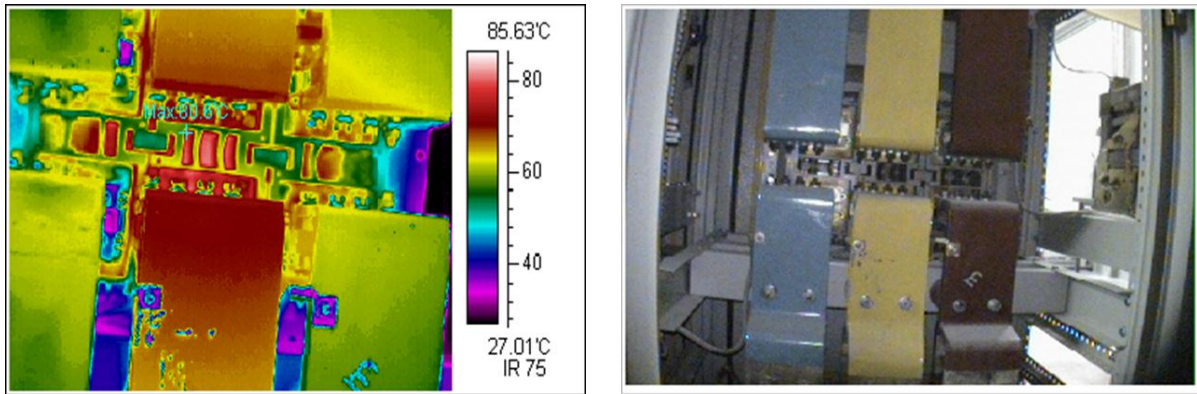
بخش نسبتاً زیادی از تجهیزات الکتریکی و ابزار دقیقی یک کارخانه سیمان در داخل پستها نصب شده است. کلیه تابلوها، پانلها و باکسهای که امکان باز نمودن درب آنها در حالت برقرار وجود داشته باشد، در بازرسی ترموگرافی مورد ارزیابی قرار می گیرند. تجهیزاتی مانند مدارات فرمان، مدارات قدرت، سیستمهای حفاظتی، رلهها و بسیاری تجهیزات دیگر که هر یک وظیفه خاصی را در تداوم تولید و پایداری عملکرد مجموعه برعهده دارند. با توجه به اینکه عبور جریان از هر تجهیز یا مدار الکتریکی، بطور ذاتی با تغییرات (افزایش) دما همراه است، این افزایش دما باعث گرم شدن تجهیزات و اتصالات خواهد شد. از طرف دیگر بدلیل اینکه حذف کامل پارامتر مقاومت از مدارات و المانهای الکتریکی غیر ممکن است، متناسب با وجود مقاومت در هریک از بخشهای مدارات الکتریکی، مقداری افزایش دما و تمرکز حرارت را شاهد خواهیم بود. اما در صورت افزایش مقاومت و یا وجود محدودیت در عبور جریان از مدارات و اتصالات، مقدار درجه حرارت در نواحی و نقاطی که این محدودیت بوجود آمده، افزایش خواهد یافت. این افزایش دما و تمرکز حرارت، نقطه شروع عیب در تجهیزات و اتصالات الکتریکی بوده و بسیاری از حوادث، خرابیها و تحمیل هزینههای گزاف، بدنبال همین موارد افزایش دمای ناشی از محدودیت در عبور جریان خواهد بود. در پستهای اصلی که ورودی انرژی الکتریکی به مجموعه می باشند، با توجه به بالا بودن سطح ولتاژ و جریان، بازرسی تجهیزات این مجموعه از اهمیت بیشتری برخوردار است. از جمله تجهیزات مهم پستهای اصلی مانند ترانسفورماتورهای اصلی، مقرهها و تجهیزات خطوط ورودی، بوشینگها، باس بارها، سگسیونرها را میتوان نام برد. در صورت وجود مشکلاتی از قبیل شل بودن اتصالات، بد یا ناقص بودن اتصالات و برخی از عیوب دیگر، افزایش دما و تمرکز حرارت، از اولین نشانههای وجود مشکل در این تجهیزات است. با بکارگیری تکنیک ترموگرافی می توان با دقت و کیفیت بالا و از فاصله ایمن، کلیه عیوب منجر به افزایش دمای این تجهیزات را تشخیص داد. در شکل ۱ نمونه ای از مشکل حرارتی در شین فاز وسط خروجی از یک بریکر 6.6 kv نشان داده شده است. نواحی متمایل به رنگ روشنتر بیانگر بالاتر بودن دما بدلیل ناقص بودن سطوح تماس اتصال بین شین مسی و ترمینالهای خروجی کلید است. منحنی گوشه تصویر حرارتی نیز بالاتر بودن دمای شین وسط را به خوبی نشان میدهد.



شکل ۱ - وجود مشکل در شین فاز وسط خروجی یک کلید 6.6 KV

در شکل ۲ نمونه دیگری از وجود مشکل در کلیدهای قدرت نشان داده شده است. الگوی حرارتی ایجاد شده بر روی تصویر ترموگرام (تصویر سمت چپ) بیانگر تمرکز حرارت بر روی فینگرهای فاز وسط این یک کلید میباشد. مشکلاتی مانند وجود رسوبات کربن بر روی سطوح تماس فینگرها و یا شل بودن اتصالات ثابت و متحرک باعث پدیدار شدن چنین الگوی حرارتی

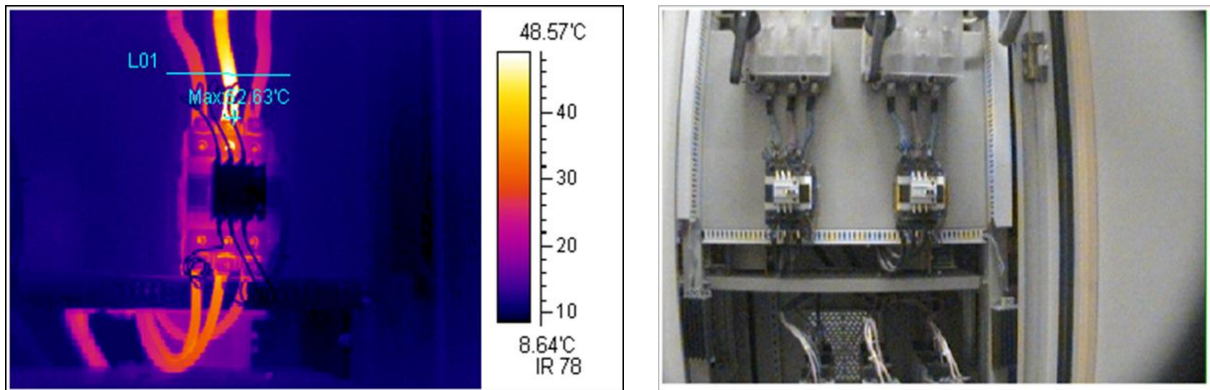
شده است. در اینگونه موارد جهت جلوگیری از توسعه عیب و تخریب بیشتر، ضروری است پس از بی برق شدن مسیر، کلید مذکور از محل اتصال جدا شده و سطوح تماس در هر دو طرف بازدید، سرویس و آچارکشی گردند. جهت روانکاری و جلوگیری از احتمال خراشیده شدن سطوح فینگرها در هنگام جا زدن و یا بیرون آوردن بریکر و همچنین جهت ایجاد سطح تماس بهتر و بیشتر، توصیه میشود سطوح تماس فینگرها در هر دو طرف با گریسهای رسانا آغشته گردد.



شکل ۲- وجود مشکل در فینگرهای بریکر فاز وسط یک کلید مدار قدرت

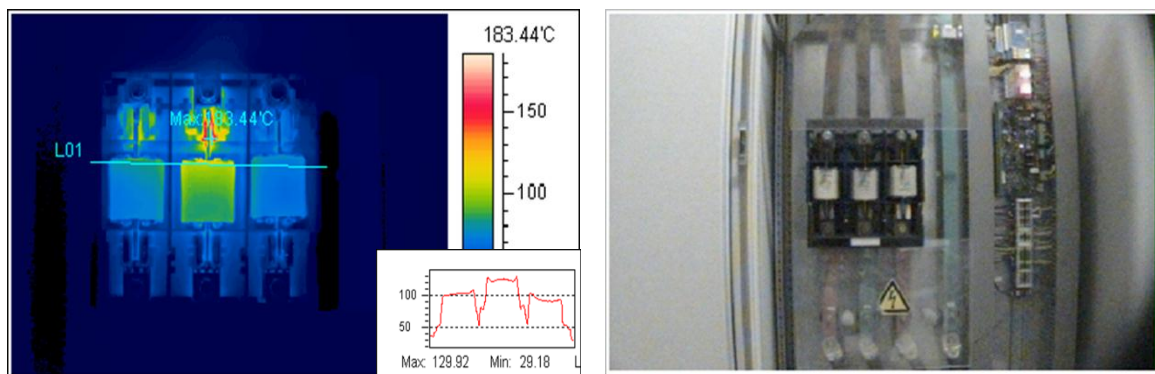
در ارزیابی وضعیت تجهیزات پستهای فرعی، هر چند که سطح ولتاژ آنها نسبتاً پایین است اما بدلیل تنوع و تعداد زیاد تجهیزات این مجموعه، احتمال بروز عیوب حرارتی بر اثر اشکالات مختلف نیز به همین میزان بالاتر خواهد بود. عیوبی مانند شل بودن اتصالات، ناقص بودن اتصالات، عدم تعادل جریان عبوری از کابلها و تجهیزات، عواملی هستند که موجب افزایش دمای تجهیزات و المانهای موجود در این پستها خواهد شد. بر اساس تجربیات بدست آمده، مشکل شل بودن اتصالات، از پرتعدادترین عیوب الکتریکی است که باعث افزایش دما در نقاط اتصال و المانهای تجهیزات الکتریکی می شود. یکی دیگر از مشکلاتی که باعث ایجاد عیوب حرارتی در تجهیزات الکتریکی می شود، پایین بودن کیفیت تعمیرات و همچنین پایین بودن کیفیت نگهداری و بهره برداری تجهیزات است. در صورتیکه فعالیتهای تعمیراتی بر اساس استانداردهای مربوط به هر تجهیز نباشد، این احتمال وجود دارد که پس از پایان فعالیتهای تعمیراتی، عیوب جدید در تجهیزات تعمیر شده بوجود آید. در بحث نگهداری و بهره برداری تجهیزات نیز در صورتیکه معیارهای مربوطه بطور صحیح اجرا نشوند و تجهیزات در شرایطی غیر از موارد ارائه شده توسط سازنده، مورد بهره برداری قرار گیرند، ضمن کاهش پایداری، تداوم تولید و عملکرد تجهیزات، عیوب مختلف یکی پس از دیگری بروز خواهند کرد. در شکل ۳ نمونه‌ای از مشکل شل بودن اتصال در ورودی فاز وسط یک کنتاکتور نشان داده شده است. در صورت شل بودن و یا ناقص بودن اتصال، علاوه بر افزایش دما و تمرکز حرارت در ناحیه معیوب، که تلفات انرژی الکتریکی را بدنبال دارد، موجب دفرمه و خشک شدن عایق روکش کابلها و در موارد حاد ذوب شدن آنها و ذوب شدن بدنه کنتاکتورها در اطراف نواحی داغ خواهد شد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، شل بودن اتصالات جزو پرتعدادترین عیوب الکتریکی است که علاوه بر تلفات الکتریکی، میتواند باعث ایجاد اختلال در عملکرد تجهیزات و بروز خطاهای پیش بینی نشده در تجهیزات گردد. مهمترین عاملی که میتواند موجب کاهش موارد عیوب حرارتی در اتصالات الکتریکی گردد، افزایش دقت در هنگام مونتاژ و نصب تجهیزات و اتصالات است. در صورتیکه در اینگونه موارد دقت و نظارت کافی بعمل آید، مشکلاتی از این قبیل به حداقل خواهد رسید. نکته دیگری که نباید از نظر فراموش کرد این است که بدلیل تغییرات دما و ایجاد انبساط و انقباض در تجهیزات و اتصالات، و همچنین احتمال لرزش بر اثر فرمانهای استارت و استپ تجهیزات، احتمال شل شدن برخی از اتصالات در دراز مدت وجود دارد. لذا توصیه می شود در هنگام تعمیرات دوره‌ای که پستها بطور کامل بی برق می شوند، کلیه

اتصالاتی که احتمال شل شدن آنها بر اثر عوامل مذکور وجود دارد، بازدید و آپارکشی شده و از محکم بودن آنها اطمینان حاصل گردد.



شکل ۳ - مشکل Loose Connection در اتصال فاز وسط به کنتاکتور

در شکل ۴ نمونه‌ای از ناقص بودن اتصال در پایه بالایی یک فیوز نشان داده شده که دمای محل اتصال بیش از 183 °C است. مشکل مذکور نیز جزو عیوب پر تکرار در تجهیزات الکتریکی محسوب می‌شود. از مهمترین عوامل ایجاد چنین عیوبی، میتوان به شل شدن محل اتصال پایه فیوز، وجود رسوبات کربن بر اثر جرقه‌های ریز و درنهایت کافی نبودن سطوح تماس بین تیغه فیوز و پایه اشاره نمود.

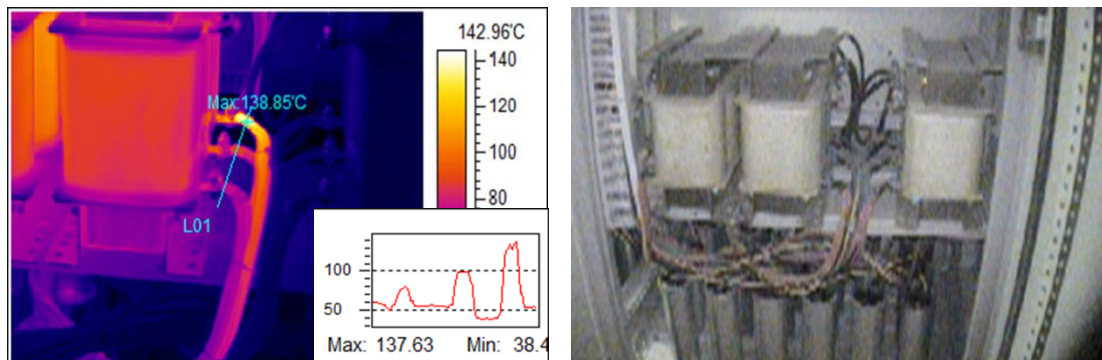


شکل ۴ - مشکل ناقص بودن سطح تماس اتصال در پایه فیوز فاز وسط

۲-۲. بازرسی ترموگرافی از پانلها و تابلوهای الکتریکی

در ارزیابی وضعیت حرارتی تابلوهای الکتریکی محلی، اولین نکته‌ای که باید به آن توجه شود، معیارهای انتخاب و اولویت بندی تابلوها برای انجام بازرسی ترموگرافی است. با توجه به اینکه تعداد زیادی تابلوهای کوچک و بزرگ در نقاط مختلف کارخانه وجود دارند و وظیفه هر یک از آنها متفاوت میباشد، مرتبه اهمیت آنها در بحث بازرسی و تعمیرات نیز متفاوت خواهد بود. بعنوان مثال، تابلوی محلی یک جرثقیل یا کرین سقفی که تعداد و بازه زمانی استارت و استپ آن در سال کم است، کمتر دچار مشکل و خرابی میشود. در مقابل آن تابلوی محلی مربوط به تغذیه روشنایی داخل سالنها که بطور دائم در مدار است و یا تابلوی محلی تغذیه کمپرسورها، علاوه بر اهمیت تداوم عملکرد آن، میزان استهلاک تجهیزات و المانهای الکتریکی آن بالاتر بوده و به

همین میزان، احتمال بروز خرابی در آن بالاتر خواهد بود. این موضوع در مورد سایر تجهیزات و بخشهای تحت بازرسی نیز صادق بوده و بایستی برنامه بازرسی، بر اساس مرتبه اهمیت تجهیزات تدوین گردد.

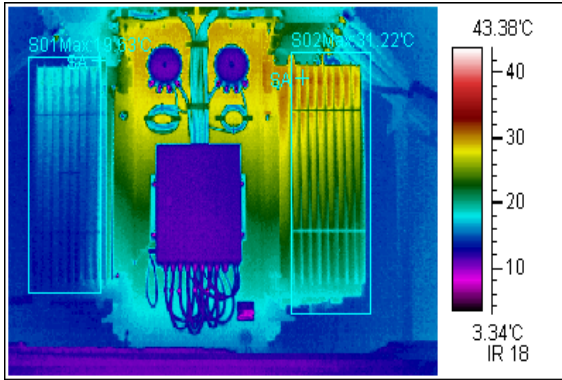


شکل ۵ - اتصالات ورودی ترانسها

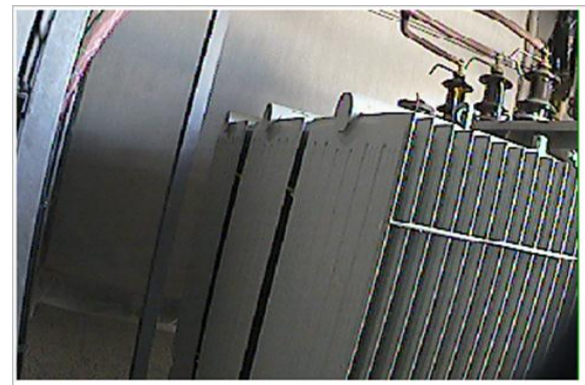
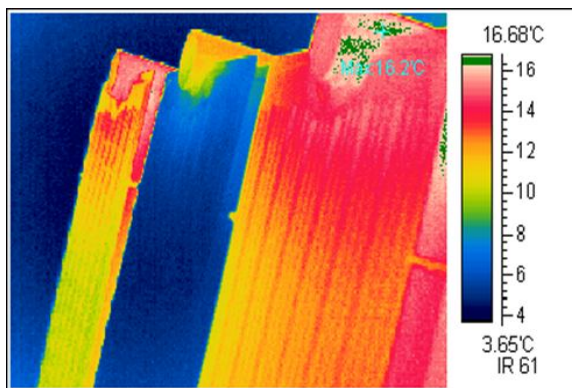
در شکل ۵ بخشی از تابلوی مدار تغذیه یک بانک خازن نشان داده شده است. همانطور که در تصویر حرارتی (سمت چپ) و منحنی توزیع حرارت آن مشخص است، بر روی محل اتصال فاز وسط بالایی ترانس، بدلیل شل بودن کابلشوی اتصال، افزایش دما و تمرکز حرارت مشاهده می‌شود. اهمیت تداوم عملکرد، ارزش تجهیزات داخل تابلو، پیامدهای ناشی از توقف عملکرد، و سایر عواملی که اهمیت تابلوها را برای انجام بازرسی ترموگرافی مشخص میکند از جمله معیارهای انتخاب و اولویت بندی بازرسی این تابلوها و تجهیزات داخل آنها است.

۲ - ۳. بازرسی ترموگرافی از ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها جزو اصلی ترین و گران قیمت ترین تجهیزات هر واحد صنعتی میباشند. به همین دلیل روشهای مختلفی برای حفاظت و نگهداری آنها ارائه شده است. روشهایی مانند آنالیز روغن ترانس، آزمونهای الکتریکی، تستهای مربوط به عایق و سایر روشهایی که هر یک بخش خاصی از اجزاء ترانس را مورد پایش و بررسی قرار میدهند. عبور جریان از ترانسها موجب گرم شدن سیم پیچها، گرم شدن روغن و در نتیجه آن، تبادل حرارتی روغن با از طریق سطوح رادیاتورها با محیط خواهد شد. در برخی از ترانسها فرآیند سیرکولاسیون و خنک کاری بطور گردش طبیعی و متناسب با میزان درجه حرارت روغن میباشد. در برخی از ترانسهای با قدرت و سایز بزرگتر که از سیستم سیرکولاسیون و تهویه اجباری برخوردارند، این فرآیند به کمک پمپهای روغن و فنهای خنک کاری انجام می شود. با استفاده از تکنیک ترموگرافی می توان وضعیت توزیع حرارت و مقادیر دمای سطوح بدنه پمپها، فنها و رادیاتورهای روغن ترانسها را از زوایای مختلف مورد ارزیابی قرار داد. همچنین بررسی وضعیت حرارتی اتصالات ورودی و خروجی ترانس در حالت برقرار که از بدلیل محدودیتهای ایمنی امکان نزدیک شدن به آنها وجود ندارد، تنها با بکارگیری دوربین ترموگرافی امکان پذیر است. در تصاویر شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌هایی از مشکلات مربوط به چرخش روغن در رادیاتورهای ترانسها، نشان داده شده است. وجود چنین مشکلاتی باعث کاهش میزان راندمان خنک کاری ترانس شده و احتمال افزایش دما در سیم پیچها وجود خواهد داشت.

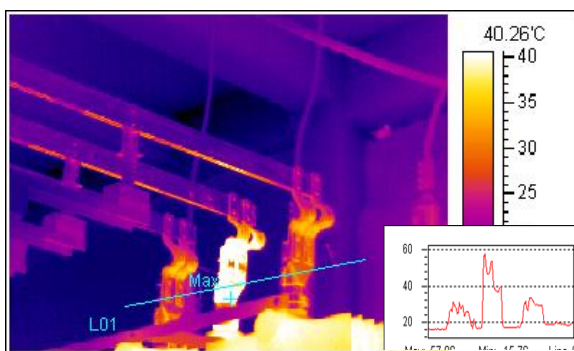


شکل ۶ - الگوی حرارتی نامتقارن سیرکولاسیون روغن در رادیاتورهای یک ترانسفورماتور



شکل ۷ - عدم چرخش روغن در رادیاتور وسط یک ترانس 20/6.6 kv

در شکل ۸ نمونه‌ای وجود مشکل در اتصال فاز وسط یک ترانسفورماتور اصلی 230/20 kv نشان داده شده است. الگوی حرارتی بیانگر شل بودن اتصال این فاز و تمرکز حرارت بر روی آن می‌باشد. میزان اختلاف دما و الگوی توزیع حرارت، به کمک نرم افزار ترموگرافی بر روی تصویر حرارتی مشخص شده است.

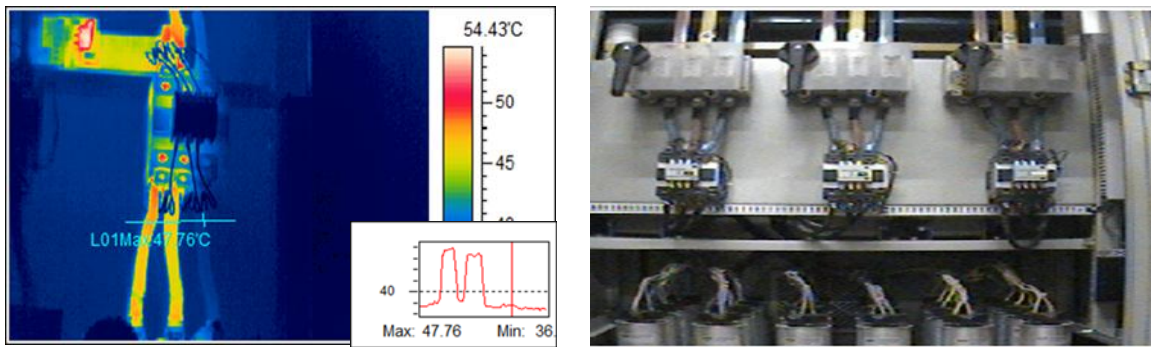


شکل ۸ - افزایش دما و تمرکز حرارت بر روی بوشینگ فاز وسط خروجی ترانسفورماتور اصلی برق ورودی به کارخانه

۲-۴. موارد استثناء

گاهی اوقات نشانه‌های بروز عیب، بصورت افزایش دما یا Hot spot ظاهر نمی‌شوند. در برخی از تجهیزات پستهای فرعی مانند مدارات توزیع فشار ضعیف و یا تغذیه بانکهای خازن، در صورت عدم توزیع متعادل ولتاژ و یا ایجاد قطعی در بخشی از مدار

(بخصوص در مدارات سه فاز)، الگوی حرارتی بصورت Cold spot یا نقاط سرد ظاهر میشود. در شکل ۹ نمونه‌ای از وجود قطعی در فاز سمت راست کنتاکتور سمت نشان داده شده است. مسیر مذکور مربوط به تغذیه یک بانک خازن است که بدلیل بی برق شدن فاز سمت راست، بخشی از خازن‌ها از مدار خارج شده‌اند.



شکل ۹ - فاز سمت راست در هر دو مدار، فاقد جریان عبوری می‌باشد.

۳. نتیجه گیری:

پایش وضعیت و عیب یابی تجهیزات الکتریکی، از گسترده ترین کاربردهای تکنیک بازرسی ترموگرافی در صنعت است. عیوبی که به کمک این روش در همان مراحل اولیه قابل تشخیص هستند، در صورت عدم تشخیص و تعمیر به موقع، باعث بروز خسارات و صدمات زیادی خواهند شد. ذوب شدن اتصالات، آتش سوزی و انفجار تابلوها از جمله صدماتی است که در پی مشکلات حرارتی در اتصالات و تجهیزات الکتریکی بوجود خواهد آمد. تدوین یک برنامه اصولی و صحیح، تعیین اولویت بندی درست و انجام یک بازرسی دقیق و منظم، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان و پایداری تجهیزات الکتریکی، از بروز صدمات و خسارات مذکور جلوگیری نموده و افزایش دقت و کیفیت فعالیتهای تعمیرات را در پی خواهد داشت. نکته دیگری که در پایان باید به آن اشاره شود، بحث آموزش است. مهارت در بکارگیری قابلیت‌های دوربین ترموگرافی متناسب با تجهیزات مورد بازرسی، داشتن دید و اطلاعات کافی نسبت به عملکرد تجهیزات الکتریکی و تجربه و توانایی تحلیل تصاویر حرارتی، در ارائه گزارشهای دقیق و قابل استناد نقش مهم و تعیین کننده‌ای در بهینه سازی کاربردهای تکنیک بازرسی ترموگرافی ایفا خواهد نمود.

۴. مراجع

۱. گزارشهای حاصل از نتایج بازرسی ترموگرافی از کارخانجات سیمان کشور.
۲. احمد کندی، حسین وروانی فراهانی - ارزیابی وضعیت تجهیزات دیپارتمان پخت کارخانجات سیمان با استفاده از بازرسی ترموگرافی - اولین کنفرانس سیمان انرژی و محیط زیست - زمستان ۱۳۹۱ - دانشگاه تهران.
3. Electrical inspections Using Thermal Imaging - By Jim White, Shermco Industries - Fluke Corporation.
4. Implementing an Infrared Thermography Maintenance Program - John Snell - 2005 Fluke Corporation.
5. Condition Monitoring Using Infrared Imaging - Racheal Lim - SESB Technical Conference - 2009.
6. Infrared Inspection of Electric Utility Equipment - James Brady, Level III Certified Infrared Thermographer - Brady Infrared Inspections, Inc.
7. Principles of Non-Contact Temperature Measurement - Klaus Dieter Gruner - Raytek