تشخیص و رفع عیب ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ نیروگاه حرارتی طوس با تکنیک ترموگرافی

مهدی رضائی حسن آبادی، علی اکبر بنده طرقی

امور تعمیرات الکتریک، دفتر مهندسی و نظارت

شرکت مدیریت تولید برق طوس

مشهد، ایران

m.rezaee@tpgm.ir
a.bandehtarghi@tpgm.ir

چکیده — **این مقاله، به صورت اختصاصی به عیب‌یابی ترانسفورماتور قدرت به وسیله طیف حرارتی پرداخته است. در این مقاله سعی شده کاربرد و لزوم تصویر برداری حرارتی ترانسفورماتور در کنار روش‌های معمول عیب‌یابی آنلاین و آفلاین مانند تست روغن و تست-های الکتریکی بیان گردد. در این مقاله به صورت تئوری و عملی اثبات شده که اتصال ناقص در ترانسفورماتور قدرت باعث ایجاد حرارت شدید خواهد شد و این اتصال ناقص با انجام تست‌های روتین از جمله اندازه‌گیری مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قابل تشخیص نیست. همچنین یک نمونه تجربی عیب‌یابی صحیح و به موقع روی ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ نیروگاه حرارتی طوس آورده شده است. علاوه بر این اثر مخرب افزایش دما در محل خطا، شرح عملیات تعمیرات و چگونگی رفع خطا بیان شده است.**

واژه‌های کلیدی — ***ترانسفورماتور؛ ترموگرافی؛ طیف حرارتی؛ مادون قرمز؛ پایش وضعیت***

۱. مقدمه

پایش وضعیت[1] یکی از اجزای اصلی تعمیرات پیشگویانه[2]، دربرگیرنده اندازه‌گیری و پردازش پارامترهای حیاتی تجهیزات صنعتی مانند ارتعاش، دما، جریان، صدا و ... با هدف بررسی وضعیت و تشخیص عیوب احتمالی تجهیزات است.

رویکرد یکپارچه به موضوع نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت[3] یا نگهداری و تعمیرات پیشگویانه دارای مزایای بسیاری است؛ از جمله جلوگیری از بروز خطای ناخواسته در سیستم، کاهش زمان و هزینه تعمیرات که باعث شده در صنایع مهم از جمله نیروگاه‌ها مورد توجه قرار گیرد. از تکنیک‌های پایش وضعیت در تجهیزات الکتریکی می‌توان به آنالیز ارتعاشات، آنالیز جریان، آنالیز دما و آنالیز روغن اشاره نمود. در این مقاله سعی شده است به تصویر برداری حرارتی یا ترموگرافی[4] به عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارهای پایش وضعیت با دیدگاه عملی پرداخته شود. سپس یک مورد از تشخیص عیب به موقع ترانسفورماتور اصلی یکی از واحدهای نیروگاه طوس به صورت تخصصی بررسی می‌شود.

مقالات و گزارش‌های متعددی به پیاده‌سازی تکنیک ترموگرافی برای عیب‌یابی ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع پرداخته است. عیوب اصلی که در ترانسفورماتورها با ترموگرافی قابل تشخیص است عبارت است از: عیب در اتصالات، عیب در سیستم خنک کن و عیوبی که باعث ایجاد حرارت در سطوح ترانسفورماتور می‌شود.

مراجع و استانداردهایی روش ترموگرافی را برای عیب‌یابی ترانسفورماتورهای قدرت معرفی و تکنیک‌ها و معیارهای سنجش و نمونه-

[1] Condition Monitoring
[2] Predictive based maintenance
[3] Condition based maintenance (CBM)
[4] Thermography

های عملی را بیان نموده‌اند. مرجع [۱] چکیده مقالات و مطالب مختلف در رابطه با ترموگرافی به عنوان ابزاری برای پایش وضعیت تجهیزات الکتریکی اشاره کرده است. مرجع [۲] به صورت کلی به برخی کاربردهای ترموگرافی در نیروگاه‌ها پرداخته است. همان طور که اشاره شد عمده عیوب قابل تشخیص توسط ترموگرافی اشکال در سیستم خنک‌کن، اشکال در اتصالات الکتریکی و نقطه داغ ناخواسته می‌باشد که در [۳و۴] به آن پرداخته است. مرجع [۵] کاربردهای ترموگرافی را برای ترانسفورماتورهای شبکه توزیع شرح داده است که ۶ مورد عملی از عیوب این ترانسفورماتورها که با ترموگرافی قابل تشخیص بوده بیان شده است. عمده عیوب بیان شده در مقاله اتصال ناقص بوده است. در همین رابطه استاندارد NETA[۵] پیشنهادات و معیار سنجش برای تشخیص عیب بیان کرده است که بر اساس مقایسه حداکثر دمای اندازه‌گیری با دمای محیط و دمای تجهیزات مشابه است.

جدول1: استاندارد NETA برای مقایسه دما در تجهیزات الکتریکی [۶]

اقدام پیشنهادی	*افزایش دما نسبت به دمای محیط*	*اختلاف دما بین تجهیزات مشابه با بار مشابه*	*اولویت*
بازرسی زمان توقف	1-10 ºC	1-3ºC	4
تعمیر در اولین زمان	11-20 ºC	4-15 ºC	3
تحت نظر تا زمان تعمیر	21-40 ºC	----	2
توقف و تعمیر فوری	≥ 40 ºC	≥15 ºC	1

در این مقاله ابتدا به لزوم استفاده از تکنیک ترموگرافی جهت عیب‌یابی ترانسفورماتور اشاره می‌شود، سپس نحوه تشخیص عیب و در نهایت مراحل تعمیرات و رفع عیب بیان خواهد شد.

۲. لزوم استفاده از ترموگرافی به همراه تست‌های رایج ترانسفورماتور قدرت

ترانسفورماتور اصلی واحدهای[۶] نیروگاه طوس ساخت شرکت BBC به قدرت 176 MVA و نسبت تبدیل 11.5/132 kV و خنک کنندگی ODAF[۷] می‌باشد. این ترانسفورماتور نقش اساسی در قابلیت اطمینان واحد دارد چرا که به طور مستقیم در مسیر تولید واحد قرار دارد. همچنین سازنده‌ی نیروگاه برای این ترانسفورماتور یدکی در نظر نگرفته و در زمان تعمیر آن، تولید واحد متوقف خواهد بود. لذا پایش وضعیت و عیب‌یابی به موقع آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آنالیز روغن شامل گازکروماتوگرافی و اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی به طور مستمر انجام می‌شود. در تعمیرات اساسی نیز تست‌های اندازه‌گیری مقاومت عایقی (مِگِر)، مقاومت اهمی، FRA[۸] ، FDS[۹] و tg(δ) برای مجموعه ترانسفورماتور انجام می‌شود. لازم به ذکر است تست‌های فوق برای مجموعه ترانسفورماتور و بوشینگ‌ها انجام می‌شود. این پایش‌ها برای ترانسفورماتور با این درجه از اهمیت لازم است اما کافی نیست. ترموگرافی ابزار دیگری است که برای پایش وضعیت این ترانسفورماتور انجام می‌شود. ترموگرافی همان طور که در ابتدا گفته شد عیوبی شامل اتصال ناقص[۱۰]، عیب در خنک‌کنندگی و نقطه داغ ناخواسته را نشان می‌دهد. یافتن اتصال ناقص اصلی‌ترین کاربرد این روش است که با توجه به جریان بالا و تلفات اهمی بالا، کوچکترین اتصال ناقص می‌تواند باعث تولید حرارت زیاد و آسیب به ترانسفورماتور گردد. از رابطه‌های ۱ و ۲ به صورت تقریبی می‌توان افزایش دما به ازای تغییر در مقاومت مسیر را محاسبه نمود.

$$Q=hA(Ts-Ta) \quad (۱)$$

$$Q=P=RI^2 \quad (۲)$$

h = heat transfer coefficient [W/m^2*K]

Q = heat dissipated by convection [Watts]

A = convective surface area [m^2]

T_s= resistance temperature [K]

T_a= ambient temperature [K]

R = resistance [Ω]

I = current [A]

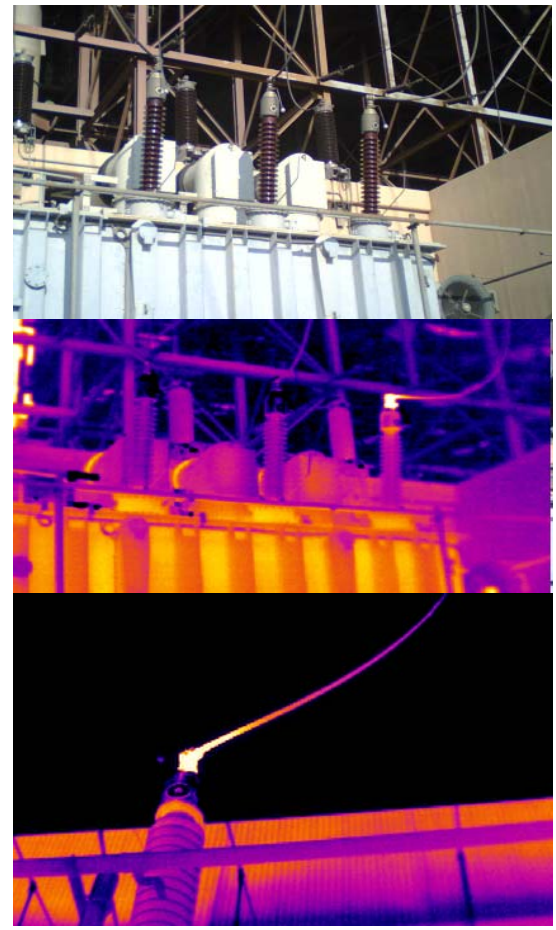
طبق روابط ۱ و ۲ افزایش مقاومت مسیر بوشینگ خروجی ترانسفورماتور به اندازه 12 Ωμ با توجه به ابعاد، جنس و شدت جریان عبوری می‌تواند افزایش دمایی حدود 10 ºC ایجاد کند. یعنی کوچکترین اتصال ناقص با توجه به جریان بالا، افزایش دمای شدید و خطرناک ایجاد می‌کند. اهمیت ترموگرافی آنجا مشخص می‌شود که اتصال ناقص با این مقدار جزئی در تست‌های ترانسفورماتور مانند مقاومت اهمی نشان داده نمی‌شود. حتی اگر تغییر مقاومت در این ابعاد کوچک قابل تشخیص باشد با توجه به پیچیدگی و تعداد نقاط اتصال، یافتن محل دقیق اتصال ناقص مشکل خواهد بود. فقط ترموگرافی یا تصویر برداری حرارتی محل دقیق

[5] InterNational Electrical Testing Association
[6] Main transformer
[7] Oil directed air forced
[8] Frequency response analysis
[9] Frequency domain spectroscopy
[10] Loose connection

اتصال ناقص و شدت آن را نشان می‌دهد. البته ناگفته نماند این اتصال ناقص فقط در صورتی قابل تشخیص است که در سطح به صورت افزایش دما (هر چند اندک) بروز کند. چرا که ترموگرافی دمای سطح را با دقت خیلی بالا اندازه‌گیری می‌کند. لازم به ذکر است طیف حرارتی با دوربین مادون قرمز InfRec G100EX ساخت ژاپن اندازه گیری شده است.

۳. تشخیص عیب توسط ترموگرافی

ترانسفورماتور بیان شده در قسمت ۲ تحت پایش وضعیت با روش ترموگرافی قرار می‌گیرد. بعد از انجام تصویر برداری مادون قرمز، طیف حرارتی تصویر با معیارهای استاندارد از جمله «جدول ۱» مقایسه و در صورت مشاهده مورد خاص، اقدامات لازم توسط واحد تعمیرات نیروگاه برای رفع عیب انجام خواهد شد.



شکل ۱: طیف حرارتی ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ قبل از رفع عیب

همانطور که در «شکل ۱» نشان داده شده است افزایش دما در بوشینگ خروجی ترانسفورماتور قابل مشاهده است. دمای مطلق محل خطا بیشتر از 130 ºC بود به عبارت دیگر اختلاف دمای محل خطا با دمای محیط (حدود 30 ºC) به بالاتر از 100 ºC رسیده بود. در مقایسه این مقادیر با «جدول ۱» رفع عیب در اولویت اول قرار می‌گیرد. همچنین حداکثر دمای محل خطا که در فاز سوم (W) بود با فازهای مشابه مقایسه گردید که باز هم در اولویت ۱ قرار می‌گرفت.

از آنجا که در پیک تابستان امکان توقف واحد وجود نداشت ترانسفورماتور با دوره زمانی کمتری (یک ماهه) تحت پایش وضعیت قرار گرفت. روند افزایش دمای نقطه خطا تحت نظر قرار گرفت و دمای محل خطا به 150 ºC رسید. در نهایت در اولین توقف واحد بعد از پیک تابستان ترانسفورماتور بی برق و مشکل بررسی گردید. همانطور که از قبل نیز پیش بینی می‌شد خطا از نوع اتصال ناقص بود که در قسمت ۴ به تفصیل در رابطه با نوع خطا و رفع آن صحبت خواهد شد.

نکته مهم اینکه در توقف واحد تمامی تست‌های بیان شده در قسمت ۲ برای ترانسفورماتور انجام شده بود. در هیچ کدام از تست‌ها مورد مشکوکی وجود نداشته است. در بین تست‌ها مقاومت اهمی یکی از تست‌هایی است که می‌تواند وجود اتصال ناقص را نشان دهد. اندازه‌گیری مقاومت اهمی با دقت میلی اهم انجام شده بود. مقادیر تست با مقادیر کارخانه‌ای مقایسه شده که شرایط طبیعی بوده و در این تست مورد خاصی مشاهده نگردیده است (جدول ۲). لازم به ذکر است مقاومت بین خروجی بوشینگ فشار قوی و نقطه زمین اندازه‌گیری می‌شود لذا تمام اتصالات از جمله بوشینگ را در بر می‌گیرد. جدول ۱ نشان می‌دهد اعداد اندازه گیری شده در آخرین توقف به اعداد معیار –زمان نصب– نزدیک است حتی از آنها پایین‌تر می‌باشد. لذا نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت اهمی نشان دهنده شرایط نرمال بود در حالی که ترموگرافی نشان داد عیب (اتصال ناقص) وجود دارد و باعث افزایش دمای شدید تا 150 ºC در اتصالات خروجی شده است. لذا اندازه-گیری مقاومت اهمی برای یافتن این نوع عیوب کارایی ندارد و بهترین ابزار ترموگرافی است.

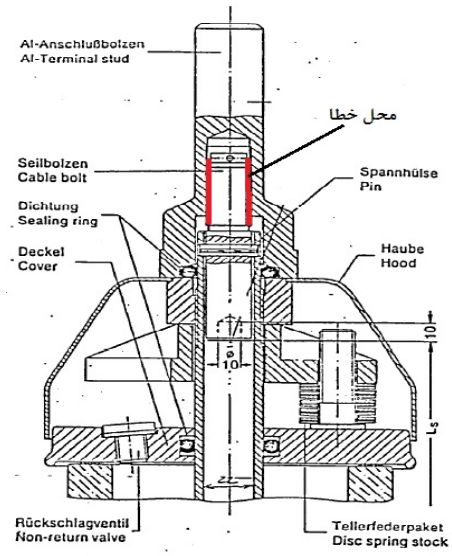
جدول ۲: مقاومت اهمی اندازه‌گیری شده در توقف واحد و اسناد کارخانه‌ای

موقعیت تپ چنجر	مقاومت DC اندازه گیری شده در تعمیرات اساسی(Ω at 15ºC)	مقاومت DC اندازه گیری شده زمان نصب(Ω at 15ºC)
۱	0.1526	0.1544
۱۰	0.1303	0.1316
۲۶	0.0916	0.0921

۴. شرح عیب و تعمیرات

در اولین گام پس از بررسی تصاویر ترموگرافی ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ نیروگاه طوس، حدس اولیه اتصال ناقص در قسمت بالایی بوشینگ در محل اتصال به کابل خروجی بود. به منظور تعیین محل عیب و اتخاذ تصمیم برای باز کردن اتصالات مربوطه، تست رادیوگرافی از محل مورد نظر انجام گرفت. نقشه بوشینگ نیز با توجه به اسناد نیروگاه طبق «شکل ۲» مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

با توجه به اطلاعات به دست آمده، اقدامات اولیه برای باز کردن قطعه آلومینیومی رابط بین راد و سرکابل (Al-Terminal stud) انجام شد. با بررسی مقدماتی مشخص شد اتصال پیچ شده (Cable bolt) بین راد مسی و قطعه مذکور بر اثر حرارت بسیار زیاد، محکم و جوش خورده شده بود. این مورد به وضوح در «شکل ۳» قابل مشاهده است. شایان ذکر است تفاوت جنس بین راد و قطعه رابط احتمالاً در جوش خوردگی تأثیر داشته است. با در نظر گرفتن حساسیت بوشینگ و برای جلوگیری از آسیب رسیدن و صدمه به راد و مجموعه بوشینگ از اعمال نیروی اضافی خودداری گردید. لذا قطعه آلومینیومی مذکور توسط دستگاه برش فرز و با رعایت ملاحظات ایمنی و فنی بریده شد. این امر به دلیل از بین رفتن رزوه‌های اتصال پیچی با صرف زمان و با دقت و موفقیت و بدون آسیب به سایر قسمت‌ها و به ویژه راد بوشینگ انجام شد.



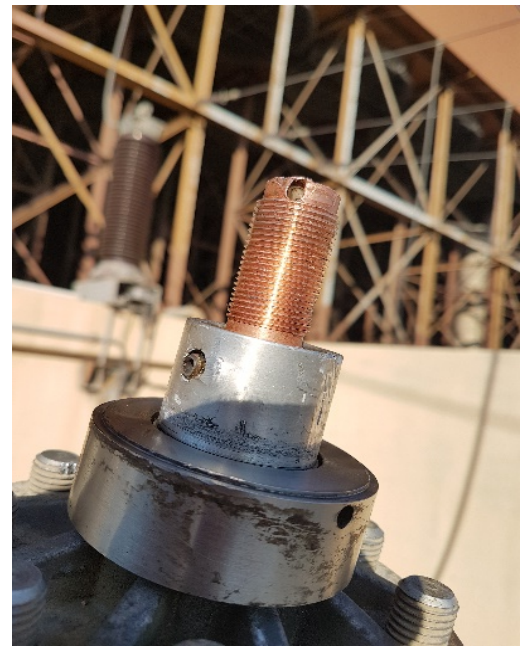
شکل ۲: شماتیک قسمت بالای بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور ژنراتور واحدهای نیروگاه طوس[۸]

همان طور که در «شکل ۳» مشخص است سطح مسی راد به شدت سیاه و تا حدودی خورده شده بود که ناشی از دمای بالای محل اتصال بوده است. با توجه به از بین رفتن رابط آلومینیومی در اثر بریده شدن، قطعه یدکی تهیه شد.

با عنایت به اینکه عمق خرابی روی سطح راد بوشینگ در محل رزوه-های پیچ سطح آن، خراب و غیر یکنواخت شده بود و در نظر گرفتن این نکته که راد به صورت سرتاسر تا قسمت پایین بوشینگ ادامه داشته و تعویض کامل آن غیر ضروری و حتی مستلزم صرف زمان زیادی بود، با بررسی بیشتر تصمیم بر این شد که محل رزوه‌های روی راد مجدداً رزوه زده شود و قلاویزکاری نهایی انجام شود. این کار پس از تعیین رزوه و قلاویز متناسب با رزوه خراب شده با دقت انجام شد «شکل ۴».

پس از اصلاح رزوه و قبل از بستن اتصالات مربوطه به منظور حصول اطمینان از وضعیت عایقی ترانسفورماتور و بوشینگ نسبت به انجام تست اندازه‌گیری مقاومت اهمی و عایقی سیم‌پیچ‌های فشار قوی و اندازه‌گیری تانژانت دلتای بوشینگ‌های فشار قوی ترانسفورماتور اقدام شد که مقایسه نتایج حاصله با تست‌شیت‌های کارخانه‌ای حاکی از شرایط نرمال ترانسفورماتور بود. سپس در مرحله بعد نسبت به تمیزکاری قسمت‌های مربوطه و بستن، محکم کردن و آچارکشی اتصالات اقدام شد و ترانسفورماتور آماده بهره‌برداری گردید.

شکل ۳: اثر حرارت زیاد بر راد بوشینگ پس از بازکردن درپوش



شکل ۴: راد بوشینگ بعد از تعمیر

پس از برق‌دار شدن ترانسفورماتور، ترموگرافی اتصال فاز W بوشینگ فشار قوی طی چند مرحله انجام شد و همان‌طور که در «شکل ۵» آمده است کاهش قابل توجه دمای محل اتصال حاکی از موفقیت آمیز بودن اقدامات تعمیراتی است.

همچنین به منظور حصول اطمینان از شرایط ترانسفورماتور، نمونه‌گیری و تست گازکروماتوگرافی روغن پس از برق‌دار شدن ترانسفورماتور انجام و مقایسه میزان گازهای محلول در روغن با مقادیر قبلی و همچنین بررسی روند رشد این گازها همگی حاکی از شرایط نرمال ترانسفورماتور بود.

شکل ۵: طیف حرارتی بوشینگ‌های ترانسفورماتور بعد از تعمیر

نتیجه‌گیری

در این مقاله به فرآیند پایش وضعیت ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ نیروگاه طوس با تکنیک ترموگرافی و گزارش رفع عیب پیش‌آمده پرداخته شد. فعالیت‌های صورت گرفته در راستای پایش وضعیت و پیدا کردن و رفع نقص بوشینگ ترانسفورماتور مذکور در این مقاله ارائه شد. توضیح دادیم اتصال ناقص و تعیین محل دقیق آن توسط تست‌های روتین ترانسفورماتور قابل تشخیص نیست و در مقابل، تکنیک ترموگرافی ابزار بسیار مناسبی برای این مهم است. همان طور که در مقاله آمده است با انجام ترموگرافی، اتصال ناقص در بوشینگ فاز سوم ترانسفورماتور اصلی واحد ۴ مشخص و در فاز تعمیر پس از بررسی نقشه‌ها و در حداقل زمان ممکن؛ عملیات رفع عیب انجام شد. پس از برق‌دار شدن ترانسفورماتور، ترموگرافی مجدد اتصالات بوشینگ فاز سوم انجام و مشخص گردید دمای محل اتصال کاهش قابل توجهی داشته و رفع نقص با موفقیت انجام شده است.

منابع

[1] S. Bagavathiappan, B. Lahiri, and others. (2013) “Infrared thermography for condition monitoring – A review” *journal of Infrared Physics & Technology 60*. PP. 35-55.

[2] Ralph, M. j. “Power Plant Thermography –Wide Range of Applications” *InfraMation 2004 Proceedings,* PP. 7-27

[3] Duke, G. (1998). “Predictive maintenance a case study in infrared thermography,” *Electrical Maintenance*, pp. 11-12.

[4] Wang, M., Wandermaar, A. J., Srivastava, K. D. (2002) “Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service” *IEEE Electrical Insulation Magazine,* VOL. 18, NO. 6, PP. 12-25.

[5] Mechkov E. (2017) “Application of Infrared Thermography Technique in Transformers Maintenance in Distribution Network” 15-th conference on electrical machine, drive and power system, pp. 354-357.

[6] Maintenance Testing Specifications for Electric Power Distribution Equipment and Systems, NETA (MTS-1997), International Electrical Testing Association, Inc., Morrison CO, 1997.

[7] James R. Welty; Charles E. Wicks; Robert E. Wilson; Gregory L. Rorrer., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass transfer" 5th edition, John Wiley and Sons.

[8] BBC Maintenance manual,Power transformers K8, Vol. 1.