بررسی جنبه‌های عملی مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها

بهرام جابری، احمد عاطفی پویا
شرکت توسعه خدمات فوق تخصصی ترانسفورماتور پارس

چکیده — از چندین دهه گذشته مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها به عنوان یک گزینه جذاب در مقایسه با جایگزینی آنها با ترانسفورماتورهای جدید مطرح بوده‌است. همزمان با پیشرفت فناوری و معرفی تجهیزات کمکی، ورق هسته، هادی‌ها و مواد عایقی جدید، تدوین نرم‌افزارهای توانمند طراحی به‌کمک رایانه و دگرگونی در دانش طراحی ترانسفورماتور، روش‌های شناخته شده مدرنیزاسیون نیز متحول گردیده اند. در این مقاله جنبه‌های عملی روش‌های موجود مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها بررسی گردیده‌اند.

بر روی ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی ترانسفورماتورها بمنظور افزایش ظرفیت بارگیری آنها، بعنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های مدرنیزاسیون، تاکید ویژه شده است. در همین رابطه نقش سیستم خنک‌کنندگی درونی و سیستم خنک‌کنندگی بیرونی و نیز شیوه‌های بازبینی عملکرد حرارتی ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی — ترانسفورماتور، مدرنیزاسیون، ظرفیت بارگیری، سیستم خنک کنندگی، عملکرد حرارتی.

1. مقدمه

قطعات، تجهیزات کمکی، هادی‌ها، مواد عایقی بکار رفته در ترانسفورماتور پیوسته شاهد دگرگونی و پیشرفت بوده اند. در موارد متعددی مالکین یا بهره‌برداران با ملاحظه مزایای روشن فنی – اقتصادی به استفاده از آنها در ترانسفورماتورهای موجود خود تمایل پیدا می‌کنند.

در بخش (۲) این مقاله کوشش شده است تا لیست نسبتا کاملی از روش های مختلف مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها که بمنظور ارتقاء کارائی و افزایش قابلیت اطمینان آنها اجراء می‌شوند، ارائه شود. با در نظر گرفتن شرایط فنی ترانسفورماتور موجود، نوع مسائلی که بهره‌بردار تمایل به حل آنها دارد و محدودیت‌های موجود، معمولا یک یا ترکیبی از این روش‌ها انتخاب و بکار بسته می‌شوند.

در مواردی همچون رشد ساخت و ساز و افزایش ساکنین مناطق شهری، توسعه ساختمان‌های تجاری، توسعه خطوط تولید واحدهای صنعتی، توسعه شهرک‌های صنعتی، شرکت‌های توزیع برق و همچنین برخی بنگاه‌های صنعتی و مجتمع‌های مسکونی و تجاری که مالکیت پست‌های کاهنده را خود بعهده دارند، اغلب به دلیل اتصال مصرف‌کنندگان جدید به شبکه و افزایش بار با دشواری‌هائی در رابطه با محدودیت ظرفیت پست‌ها و ترانسفورماتورها روبرو می‌شوند. محدودیت ظرفیت بویژه در پست‌های توزیع و فوق توزیع دارای دو یا چند ترانسفورماتور و در صورت معیوب شدن یکی از ترانسفورماتورها در فاصله زمانی جایگزینی آن با ترانسفورماتور رزرو یا بازگشت آن به بهره‌برداری پس از پایان تعمیرات، بشکل بمراتب حادتری بروز می‌نماید، زیرا ترانسفورماتور(های) در حال بهره‌برداری قادر به تحمل بار اضافی ناشی از خروج از مدار ترانسفورماتور معیوب نخواهد بود.

بطور سنتی مساله افزایش ظرفیت پست، از طریق بازسازی آنها به‌همراه جایگزینی ترانسفورماتورهای موجود توسط ترانسفورماتورهای با ظرفیت نامی بالاتر و یا از طریق تاسیس پست جدید حل می‌شود. اما چنین راه‌حلی نیازمند حجم بالای سرمایه‌گذاری، بازطراحی، عملیات زمان‌بر عمرانی، نصب تجهیزات پست، سفارش و ساخت ترانسفورماتور جدید است. روشن است که این راه‌حل بنابه دلایلی همچون کاهش طولانی مدت ظرفیت در دسترس، محدودیت فضا در شرایط ساخت‌وساز متراکم، محدودیت منابع مالی و مانند آنها، همیشه گزینه مطلوبی محسوب نخواهد شد.

جایگزینی ساده ترانسفورماتورها توسط ترانسفورماتورهای جدید با ظرفیت نامی بالاتر نیز راه‌حل مناسبی بنظر نمی‌رسد زیرا ترانسفورماتورهای دارای ظرفیت نامی بالاتر اغلب قابل نصب در محل ترانسفورماتورهای قدیمی نمی‌باشند. به‌عبارت دیگر در اینصورت نیازمند حجم چشمگیری از عملیات عمرانی به منظور بازسازی پست خواهیم بود. جایگزینی توسط ترانسفورماتور دارای ظرفیت بالاتر بمعنای قیمت گرانتر نیز هست که بروشنی نیازمند صرف منابع محدود مالی است. از سوی دیگر، مالکین متفرقه پست‌ها شامل مجتمع‌های تجاری و مسکونی و بنگاه‌های صنعتی به‌نسبت کوچکتر که معمولا فاقد محل جایگزین برای استفاده از تجهیزات قدیمی‌اند، با معضل عدم امکان فروش آنها به قیمت عادلانه روبرو می‌شوند.

یک گزینه جذاب‌تر از دیدگاه فنی – اقتصادی در این خصوص می‌تواند مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها به‌منظور افزایش ظرفیت بارگیری آنها باشد که موضوع بخش (۳) مقاله بشمار می‌آید. این بخش به مسائل عملی مرتبط با ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بیرونی بمنظور افزایش ظرفیت بارگیری ترانسفورماتورها، بعنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های مدرنیزاسیون، می‌پردازد.

در روند مدرنیزاسیون بمنظور افزایش ظرفیت بارگیری ترانسفورماتورها تکیه صرف بر ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بیرونی و افزایش توان خنک کنندگی آن بدون انجام محاسبات حرارتی و در نظر گرفتن پارامترهای سیستم خنک‌کنندگی درونی ترانسفورماتورها مخاطره بالایی بهمراه خواهد داشت. در همین رابطه در بخش (۴) نکات مربوط به عملکرد سیستم خنک‌کنندگی بیرونی و رابطه آن با سیستم خنک‌کنندگی درونی تحلیل می‌شوند.

2. روش‌های مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها

برخلاف روش‌های عادی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه که تنها شامل برطرف کردن عیب و ایراد یا جایگزینی تجهیزات و اجزاء فرسوده با موارد کاملا مشابه هستند، مدرنیزاسیون با هدف ارتقاء کارائی و افزایش قابلیت اطمینان یا افزایش عمر باقیمانده ترانسفورماتورها انجام می‌شود. بدیمنظور از یک یا ترکیبی از چند روش استفاده می‌شود. برخی ازین روش‌ها که شناخته شده و متعارف هستند در پرتو پیشرفت فناوری، دانش مهندسی و امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری که طراحی بکمک رایانه را ارتقاء بخشیده‌اند، دگرگون شده‌اند و برخی دیگر را می‌توان تنها دستاورد سال‌های اخیر بشمار آورد [۱]:

(الف) جایگزینی کامل اکتیو پارت ترانسفورماتور، شامل هسته و سیم‌پیچ ها با اکتیو پارت دارای مشخصات فنی جدید از جمله تلفات بی‌باری کمتر و ظرفیت نامی بالاتر. روشن است که بدیمنظور فضای موجود مخزن برای نصب و چیدمان اکتیوپارت جدید، کلید تغییر انشعاب، سیم‌کشی‌های داخلی و اتصالات بوشینگ‌ها باید در نظر گرفته شود.

(ب) بهینه‌سازی و بازطراحی سیم‌پیچ‌ها با استفاده مجدد از هسته موجود. بدین منظور یک راه‌کار ممکن می‌تواند افزایش چگالی جریان سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور با جایگزینی هادی‌های سیم‌پیچ‌ها و سیم‌کشی‌های داخلی توسط هادی‌های دارای مقاومت الکتریکی کمتر، به‌عبارت دقیق‌تر جایگزینی هادی‌های آلومینیومی توسط هادی‌های مسی با حفظ ابعاد هندسی اولیه سیم پیچ‌ها، باشد. با این راهکار می‌توان ظرفیت نامی ترانسفورماتور را افزایش داد. راه‌کار دیگر جایگزینی عایق‌بندی سیم‌پیچ‌ها توسط مواد دارای کلاس حرارتی بالاتر [۲] بجای عایق سلولزی عادی [۳، ۴] است. این راه‌کار نیز گذشته از اینکه گزینه مناسبی برای موارد بروز عیب و ایراد در عایق‌بندی سیم‌پیچ هاست می‌تواند با افزایش استقامت حرارتی سیم‌پیچ‌ها ظرفیت بارگیری ترانسفورماتور را ارتقاء بخشد.

در صورت ارتقاء ظرفیت بارگیری، گذشته از سیم پیچ‌ها، دمای دیگر اجزاء حامل جریان همچون تجهیزات کمکی شامل بوشینگ‌ها، کلیدهای تغییر انشعاب، سیم کشی‌ها و نیز اتصالات آنها باید مورد ارزیابی قرار گیرند. بر اساس داده‌های سازندگان، دمای کاری مجاز این تجهیزات مقدار جریان عبوری آنها را در دامنه ۵,۱ برابر جریان نامی محدود می‌سازد. همچنین لازم است حجم و فشار روغن نیز که از عوامل محدود کننده و تابعی از دمای ترانسفورماتور هستند مورد بررسی قرار گیرند.

در صورت ارتقاء ظرفیت بارگیری ترانسفورماتورها نیازی به انجام محاسبات حرارتی هسته وجود ندارد زیرا افزایش بار تاثیری بر روی تلفات بی‌باری ندارد و در نتیجه وضعیت حرارتی آن ثابت باقی خواهد ماند.

جایگزینی سیم‌پیچ‌ها همچنین می‌تواند با اهداف دیگری همچون بهبود خواص مکانیکی و افزایش پایداری در برابر اتصال کوتاه (بعنوان نمونه استفاده از سیم صمغی که با عملیات حرارت‌دهی بصورت یکپارچه در می-آید) و یا کاهش تلفات اضافی ناشی از جریان‌های گردابی با استفاده از هادی چند رشته‌ای عایق بین هم و ترانسپوز شده، انجام گیرد.

(ج) ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بمنظور افزایش ظرفیت نامی ترانسفورماتور. با ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی می‌توان حرارت کاری ناشی از افزایش بار سیم‌پیچ‌ها که توسط روغن به بیرون انتقال می‌یابد به میزان مجاز، که توسط سازنده و برپایه کلاس حرارتی عایق‌بندی استفاده شده معین می

شود، کاهش داد. در پاسخ به تقاضای بازار برای سیستم‌های خنک‌کنندگی موثرتر، در دهه اخیر شماری از سازندگان قطعات تکمیلی ترانسفورماتور مدل های مختلفی از خنک‌کننده روغن با ظرفیت خنک‌کنندگی بالاتر معرفی نموده اند که ابعاد و سطح نویز آنها در حد همان رادیاتورهای عادی حفظ شده‌است [۵]. برخی از کارخانجات سازنده ترانسفورماتور با استفاده از خنک¬کننده های روغن جدید، توانسته‌اند ظرفیت سیستم خنک‌کنندگی محصولات خود را بدون افزودن بر ابعاد کل آنها، ارتقاء دهند. استفاده از محرکه‌ها و سیستم کنترل مدرن راه‌اندازی و تغییر سرعت فن‌ها و پمپ‌ها (در سیستم‌های خنک کنندگی با گردش اجباری روغن)، روند فرسودگی این تجهیزات را کندتر ساخته و به قابلیت اطمینان آنها می‌افزاید. افزون بر این، برخورداری از سیستم¬های کنترل سرعت به‌روز شده و محرکه‌های بر پایه الکترونیک قدرت، هوشمندسازی سیستم خنک‌کنندگی برای انتخاب حالت بهینه کاری با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون میزان بار، دمای محیط، دمای نقطه داغ سیم‌پیچ، دمای لایه بالائی و دمای لایه پائینی روغن را امکان‌پذیر می‌سازد که افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی را به‌همراه خواهد داشت [۶ – ۸].

(د) جایگزینی سیستم خنک‌کنندگی. بطور کلی عمر میانگین تجهیزات خنک‌کنندگی بسیار کمتر از دیگر بخش‌های ترانسفورماتور همچون هسته و مخزن است، پس طبیعی است که در طول عمر مفید ترانسفورماتورها شاهد نیاز به جایگزینی این تجهیزات به علت فرسودگی فیزیکی آنها باشیم. نیاز به جایگزینی سیستم خنک‌کنندگی می‌تواند همچنین ناشی از جابجائی محل بهره‌برداری ترانسفورماتور و مطرح شدن الزامات جدید نسبت به ابعاد آن بدلیل محدودیت فضا یا میزان مجاز نویز در محل جدید نصب باشد. تجهیزات خنک‌کنندگی بهمراه هسته و سیم‌پیچ‌ها منابع اصلی نویز در ترانسفورماتورها بشمار می‌آیند.

(ه) مدرنیزاسیون ساختار مکانیکی، نصب حفاظ جریان‌های گردابی (مسی یا آلومینیومی) و الکترومغناطیسی (پوشش داخلی مخزن) بمنظور کاهش تلفات اضافی ناشی از میدان پراکندگی. بویژه در ترانسفورماتورهای با ظرفیت بالا که امپدانس اتصال کوتاه بالاتری نیز دارند سهم تلفات اضافی ناشی از میدان پراکندگی در اجزاء مخزن، درپوش، چهارچوب اکتیو پارت و دیگر قطعات فولادی افزایش می‌یابد. میزان این تلفات در برخی ترانسفورماتورهای طراحی شده در دهه‌های گذشته می‌تواند در حد چشمگیری بالا باشد که گاهی در روند بهره برداری تشخیص داده می‌شود. در مجاورت محل نصب بوشینگ‌ها نیز امکان دارد میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان الکتریکی باعث تلفات و حرارت بالا شود. با افزایش قابلیت‌های نرم‌افزارهای تحلیلی در سال‌های اخیر محل و میزان این‌گونه تلفات بسهولت و دقت بیشتری قابل تعیین است که نتیجتا برطرف کردن آن را امکان‌پذیر می‌سازد. اما روشن است که حصول چنین نتایج دقیقی در گرو داده‌های بسیار دقیق طراحی و چیدمان هندسی اجزاء ترانسفورماتور خواهد بود که تنها در اختیار کارخانه سازنده است. در صورت تشخیص و برطرف شدن این گونه تلفات کارائی، عملکرد حرارتی، هزینه بهره‌برداری و طول عمر ترانسفورماتور در حد چشمگیری بهبود خواهد یافت.

(و) جایگزینی بوشینگ‌های طرف اولیه یا ثانویه. بعنوان نمونه می‌توان به جایگزینی بوشینگ‌های قدیمی RBP توسط بوشینگ‌های نو RIP اشاره نمود.

(ز) جایگزینی کلید تنظیم ولتاژ (تعویض‌کننده انشعاب). در صورت خرابی‌های پی در پی یا فرسودگی فیزیکی، کلید تنظیم ولتاژ توسط مدل‌های بروزتر و دارای قابلیت اطمینان بالاتر جایگزین می‌شود. جایگزینی مدل‌های قدیمی‌تر کلیدهای تنظیم ولتاژ در مواردی مانند توقف تولید آنها و قطع پشتیبانی فنی از سوی سازندگان یا تامین‌کنندگان نیز امری کاملا منطقی است.

(ح) جایگزینی تجهیزات حفاظت و اندازه‌گیری توسط تجهیزات نسل جدید با کارائی و قابلیت اطمینان بیشتر. افزون بر این در دهه‌های اخیر نصب سیستم پایش پیوسته بویژه برای ترانسفورماتورهای دارای ظرفیت بالاتر که به دلیل تغذیه شبکه‌های گسترده‌تر جایگاه کلیدی در پایداری سیستم دارند، رواج بسیاری یافته است [۹ – ۱۱]. تجربه نشان می‌دهد که در صورتیکه عملکرد حرارتی ترانسفورماتور بدقت مورد پایش قرار گیرد میزان مخاطره مربوط به حالت اضافه بار در حد چشمگیری کاهش خواهد یافت.

3. ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بیرونی ترانسفورماتورها بمنظور افزایش ظرفیت بارگیری آنها

راهکار اتصال به‌هم سیستم خنک‌کنندگی دو یا سه ترانسفورماتور که بشکل موازی در حال بهره‌برداری هستند و در صورت خروج از مدار یک یا دو دستگاه از آنها بدلیل حوادث پیش‌بینی نشده یا تعمیرات برنامه‌ریزی شده، از چندین دهه پیش در ایالات متحده شناخته شده است. در این راهکار ظرفیت ترانسفورماتوری که برای مثال با دو یا سه سیستم خنک‌کننده (یکی مربوط به خود و یک یا دو سیستم دیگر مربوط به ترانسفورماتور یا ترانسفورماتورهائی که از مدار خارج می‌شوند) تجهیز می‌شود، می‌تواند از ۳۳ تا ٪۷۵ افزایش یابد [۱۲، ۱۳]. چنین راهکاری با امکان‌پذیر ساختن کاهش

ظرفیت نصب شده ترانسفورماتورها در پست و همچنین در بسیاری از موارد اجتناب از هزینه‌های مربوط به تهیه و نصب ترانسفورماتور رزرو، در شماری از کشورها از دیدگاه اقتصادی مطلوب و بصرفه تلقی می‌شود.

اما باید در نظر داشت که چنین میزانی از ارتقاء ظرفیت بارگیری از سوئی و رواج گسترده آن از سوی دیگر مستلزم تمهیدات ویژه طراحی نیز هست. جهش حرارتی سیم‌پیچ نسبت به روغن در ترانسفورماتور طراحی شده بمنظور بهره‌برداری با ظرفیت چند مرحله‌ای، در حالت کمترین میزان بار در مقایسه با ترانسفورماتورهائی که تنها برای حالت خنک‌کنندگی طبیعی در نظر گرفته می‌شوند، کمتر است.

روش ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بیرونی ترانسفورماتورها در صورتیکه دارای شرایط فنی مناسب و عمر باقیمانده کافی باشند کم هزینه‌ترین گزینه برای افزایش ظرفیت بارگیری آنها بشمار می‌آید. این روش مبتنی بر ارزیابی حرارتی ترانسفورماتور، ظرفیت و ابعاد سیستم خنک‌کنندگی موجود، ظرفیت و ابعاد سیستم خنک‌کننده جایگزین یا افزوده شده، بررسی فضای موجود برای نصب تجهیزات جدید و غیره است.

شمار راهکارهای موجود برای ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی ترانسفورماتورها بسیار محدودند:

(الف) برای سیستم خنک کنندگی با گردش طبیعی روغن و گردش طبیعی هوا ONAN می‌توان بر شمار رادیاتورها افزود، رادیاتورهای موجود آن را با رادیاتورهای با ظرفیت بالاتر جایگزین نمود یا بر روی رادیاتورهای موجود فن نصب کرد که دو مورد اول بمنزله افزایش سطح خنک کنندگی و مورد اخیر به معنای تبدیل سیستم ONAN به سیستم ONAN/ONAF است. با نصب فن بر روی رادیاتورها ظرفیت حرارت‌زدائی آنها را می‌توان نزدیک به ۴۰ تا ۵۰٪ افزایش داد. اما برای عملی ساختن این راهکارها یافتن فضا بر روی دیواره‌های مخزن اغلب با دشوارهائی همراه است.

(ب) سیستم ONAF را نیز می‌توان با افزودن بر شمار فن‌ها و یا استفاده از فن‌های با توان بالاتر ارتقاء داد اما این راهکار نیز می‌تواند در بسیاری از موارد با محدودیت فضا روبرو شود.

(ج) در سال‌های اخیر سیستم‌های جایگزین رادیاتورهای سنتی با نام تجاری خنک‌کننده روغن (oil cooler) که بر پایه گردش اجباری روغن و هوا OFAF کار می‌کنند، معرفی گردیده‌اند. این خنک‌کننده‌های روغن با ابعاد و سطح نویز برابر با رادیاتورهای رایج در مقایسه با آنان ظرفیت بالاتر و محرکه‌های مدرنتر، بر مبنای الکترونیک قدرت، دارند. بهمین دلیل در صورت نیاز به ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی یک جایگزین مناسب بشمار می‌آیند. قابلیت‌های آنها در بند (ج) بخش (۲) معرفی شده است.

در صورت جایگزینی گردش طبیعی با گردش اجباری روغن باید در نظر گرفت که در اثر افزایش سرعت و بسته به مقاومت ئیدرولیکی میسرهای موجود که ناشی از ساختار و چیدمان اجزاء داخلی ترانسفورماتور است، امکان تغییر در مسیر گردش روغن یا تغییر حجم روغن عبوری وجود دارد. مثلا ممکن است در برخی ترانسفورماتورها بخشی از روغن بجای عبور از کانال‌های خنک‌کنندگی ساق‌های هسته و سیم‌پیچ‌ها از مسیر مجاور دیواره مخزن عبور نماید که گذشته از عدم مشارکت در خنک‌کنندگی بخش بزرگی از سیم‌پیچ‌ها و اکتیو پارت، با رسیدن به لایه بالائی و اختلاط با روغن عبوری از مسیر اکتیو پارت باعث خطای اندازه‌گیری نشانگر حرارت لایه بالائی روغن نیز بشود. همچنین کاهش محتمل حجم روغن گردشی از برخی مسیرها و یا حتی خارج شدن برخی نواحی از دسترس گردش روغن باعث افزایش حرارت و ایجاد نقاط داغ در این نواحی خواهد شد. افزایش سرعت گردش روغن همچنین ممکن است به فرسایش مواد عایقی جامد واقع در مجاورت مسیر آن بیانجامد.

در برخی از ترانسفورماتورها با پیش‌بینی امکان ارتقاء سیستم خنک-کنندگی به گردش اجباری روغن در صورت افزایش محتمل بار در آینده، پیشاپیش کانال‌ها و مسیر مناسب گردش روغن طراحی می‌شود.

عملکرد حرارتی و توزیع تنش حرارتی در ترانسفورماتور پیش و پس از مدرنیزاسیون باید مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد. بدین‌منظور هم از روش سنتی بر مبنای آزمون حرارتی و هم از روش‌های نسبتا جدیدتر اندازه‌گیری مستقیم و نرم‌افزارهای تحلیلی استفاده می‌شود که در بخش‌های بعدی معرفی خواهند شد.

در صورت ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی بمنظور افزایش ظرفیت بارگیری ترانسفورماتورها، محدودیت جریان نامی دیگر تجهیزات و عناصر شامل کلید تغییر انشعاب، سیم‌کشی‌های داخلی و بوشینگ‌ها باید بررسی شوند.

در خصوص ترانسفورماتورهائی که بیش از بیست و پنج سال از بهره برداری آنها گذشته باشد در نظر گرفتن گزینه جایگزینی آنها با ترانسفورماتورهای جدید و یا روش (ب) بخش (۲)، جایگزینی سیم‌پیچ‌ها و عایق‌بندی‌ها، منطقی‌تر خواهد بود.

4. ملاحظاتی پیرامون عملکرد سیستم خنک کنندگی بیرونی و سیستم خنک کنندگی درونی از دیدگاه افزایش ظرفیت بارگیری ترانسفورماتورها

اغلب کارشناسان بهره‌بردار تنها به سیستم خنک‌کنندگی بیرونی، که کارکرد آن بطور منظم و پیوسته توسط آنان نظارت می‌شود، توجه دارند. اما باید در نظر داشت که سیستم خنک‌کنندگی بیرونی تنها نقش انتقال حرارت از روغن به هوای پیرامون را ایفا می‌کند و در واقع ترانسفورماتور دارای یک سیستم خنک‌کنندگی درونی نیز هست که وظیفه انتقال حرارت از تمامی قسمت‌ها و اجزاء ترانسفورماتور از جمله سیم‌پیچ‌ها، هسته، چهارچوب آن، سیم‌کشی‌های داخلی، ... و مخزن، به روغن را بعهده دارد. ازین دیدگاه سیم پیچ‌ها، بدلیل داشتن بالاترین میزان حرارت، عایق‌بندی سلولزی حساس به حرارت، سریعترین میزان افزایش حرارت ناشی از عبور جریان‌های اضافه بار و تلفات اضافی، جایگاه ویژه‌ای دارند. بدین ترتیب روشن می‌شود که اهمیت سیستم خنک‌کنندگی درونی در عملکرد حرارتی ترانسفورماتور کمتر از سیستم خنک‌کنندگی بیرونی نیست.

در خصوص عملکرد سیستم خنک‌کنندگی درونی و سیستم خنک‌کنندگی بیرونی یادآوری نکات ذیل ضروری به‌نظر می‌رسد:

(الف) سیستم خنک‌کنندگی درونی تعیین‌کننده جهش حرارتی هسته و سیم‌پیچ‌ها نسبت به روغن و سیستم خنک‌کنندگی بیرونی تعیین‌کننده جهش حرارتی روغن نسبت به محیط خنک‌کننده است.

(ب) وجود هر گونه نارسائی در سیستم خنک‌کنندگی درونی، یا ارتکاب اشتباه در محاسبات مربوط به تبادل حرارت درون سیم‌پیچ‌ها می‌تواند باعث معیوب شدن ترانسفورماتورها شود. بعنوان نمونه درصورت مسدود شدن کانال‌های افقی روغن ناشی از شل‌شدگی عایق‌بندی تکمیلی بشقاب‌ها از کیفیت خنک‌کنندگی کاسته شده که در ادامه می‌تواند به داغی و شکست عایق‌بندی منجر شود.

وجود نقص در سیستم خنک‌کنندگی بیرونی (نشتی روغن، معیوب شدن یا از کار افتادن فن‌ها، پمپ‌ها و مانند آن) معمولا ترانسفورماتور را بلافاصله از کار نمی‌اندازد. موارد استثنائی شامل افتادن اشیاء خارجی (براده فلزی، دوده، رطوبت، هوا و مانند آن) به داخل مخزن است که می‌تواند باعث بروز تخلیه الکتریکی و شکست عایقی گردد.

(ج) وقتی‌که ترانسفورماتور تحت بار و در حالت بهره‌برداری است با روش‌ها و تجهیزات در دسترس سنتی نمی‌توان بر کارکرد سیستم خنک کنندگی درونی، تاثیر آن بر روی تبادل حرارتی سیم‌پیچ‌ها و حفظ دمای عایق بندی در محدوده مجاز بطور مستقیم نظارت نمود، بهمین دلیل بروز نارسائی در آن معمولا بموقع شناسائی نمی‌شود.

آسیب‌هایی ناشی از نارسائی در سیستم خنک‌کنندگی درونی یا فرسودگی طبیعی عایق‌بندی از طریق تحلیل نمونه روغن مخزن ترانسفورماتور، نمونه گاز رله بوخ هولتز، تحلیل گازهای محلول در روغن، قابل شناسائی هستند. دمای نقطه داغ بنابه تاثیر انباشتی و برگشت‌ناپذیر آن بر روی فرسودگی عایقی یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای طراحی ترانسفورماتور و مهمترین عامل محدود کننده میزان بارگیری آن بشمار می‌آید و بهمین دلیل حفظ آن در تمام دوره بهره‌برداری در کمتر از حد پیش‌بینی شده الزامی است.

روش رایج برای ارزیابی عملکرد حرارتی و توزیع تنش حرارتی در ترانسفورماتورها، انجام آزمون حرارتی، که آزمون نوعی (Type Test) بشمار می‌آید، می‌باشد. شیوه انجام این آزمون توسط استانداردهای بین‌المللی تعیین شده است [۱۴، ۱۵]. در این آزمون دمای ثبات یافته روغن لایه بالائی و لایه پائینی بصورت مستقیم و یا غیر مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند. دمای میانگین سیم‌پیچ برپایه تغییر نتیجه اندازه‌گیری مقاومت سیم‌پیچ بدست می‌آید. پارامترهای حرارتی مزبور برای ساختن مدل یا دیاگرام دمائی ترانسفورماتور روغنی بکار می‌روند که بر اساس آن دمای نقطه داغ سیم‌پیچ نیز قابل استنتاج است.

نتایج حاصل از آزمون حرارتی از پارامترهای کلیدی برای ارزیابی تحمل ترانسفورماتورها در برابر اضافه بار یا قابلیت افزایش ظرفیت آنها از طریق مدرنیزاسیون سیستم خنک‌کنندگی بشمار می‌آیند.

اشکال اصلی این آزمون پرزحمت اینست که نتایج آن تنها شامل پارامترهای حرارتی عمومی ترانسفورماتور بوده و تصویر دقیقی از توزیع تنش حرارتی در بشقاب‌ها بطور جداگانه و داغی‌های محلی به‌دست نمی‌دهد.

در پاراگراف‌های بعدی راهکارهای دیگری که در سال‌های اخیر برای ارزیابی دقیقتر عملکرد حرارتی ترانسفورماتورها معرفی شده‌اند، بررسی خواهند شد.

نظارت بر کارکرد سیستم خنک‌کنندگی بیرونی از طریق بازبینی خارجی آن انجام می‌شود. روش بسیار آسان و شناخته شده بمنظور کسب اطمینان از توزیع مناسب حرارت در پره‌های رادیاتورها و عدم گرفتگی لوله‌های رابط

آنها، لمس آنها با انگشتان دست است. در سالیان اخیر با رواج دوربین‌های حرارتی برپایه حسگرهای مادون قرمز، کارکرد سیستم خنک‌کنندگی شامل رادیاتورها، فن‌ها، پمپ‌های روغن، و نیز منبع انبساط، بوشینگ‌ها و بطور کلی وضعیت حرارتی بدنه بیرونی ترانسفورماتور را می‌توان با دقت، اطمینان و سرعت بالاتری بازبینی نمود.

پرسنل بهره‌بردار همزمان با بازبینی کارکرد رادیاتورها، دمای لایه بالائی روغن و دمای نقطه داغ سیم‌پیچ‌ها را نیز از طریق نشانگرهای مربوطه قرائت می‌نمایند. در ترانسفورماتورهای بسیار قدیمی‌تر تنها دمای لایه بالائی روغن، از طریق نصب حسگر حرارتی بر روی ناحیه میانی سرپوش ترانسفورماتور، و دمای لایه پائینی روغن، از طریق نصب حسگر حرارتی روی کف مخزن ترانسفورماتور، اندازه‌گیری می‌شد. بعلت وجود میدان‌های الکتریکی قوی که مانع نصب حسگر حرارتی برای اندازه‌گیری مستقیم دمای سیم‌پیچ‌هاست، در ترانسفورماتورهای نسبتا جدیدتر بصورت متعارف نشانگر حرارتی ترمومکانیکی سیم‌پیچ، با همان اصول کاری حسگر حرارتی روغن و با استفاده از روش غیر مستقیم اندازه‌گیری بر پایه شبیه‌سازی دمای سیم‌پیچ، بکار می‌رود. از خروجی‌های نشانگرهای فوق‌الذکر همچنین بمنظورهای حفاظتی و هشدار (آلارم) نیز استفاده می‌شود.

از آنجائیکه دمای واقعی نقطه داغ تابعی از چندین پارامتر طراحی از جمله توزیع عموما غیر یکنواخت تلفات اصلی (اهمی) و تلفات اضافی ناشی از جریان‌های گردابی حاصل از میدان پراکندگی و جریان‌های گردشی، اثر بخشی کانال‌های خنک‌کننده و مانند آنها می‌باشد، روشن است که دمای نشان داده شده توسط نشانگر حرارتی سیم‌پیچ دمای دقیق نقطه داغ سیم‌پیچ نبوده و با تقریب بالائی همراه است.

از اواسط دهه ۸۰ سده گذشته میلادی حسگرهای حرارتی فیبر نوری، که اندازه‌گیری مستقیم دمای یک نقطه خاص را امکان‌پذیر ساخته‌اند [۲]، معرفی شده‌اند. این نوع حسگرها را می‌توان دقیقا در جاهایی از سیم‌پیچ که برپایه آزمون‌های قبلی یا نتایج محاسبات انتقال حرارت، پیش‌بینی می‌شود محل داغ‌ترین نقطه سیم پیچ‌ها باشد، قرار داده و نتایج واقعی را بدست آورد [۱۶]. علیرغم چنین مزیت تعیین‌کننده‌ای، معایبی همچون قیمت بالا و شکنندگی، کاربرد آن‌را در طول سالیان بطور عمده به تحقیقات آزمایشگاهی محدود ساخته بود. اما در سال‌های اخیر در پرتو بهبود ویژگی‌های مکانیکی شامل افزایش استحکام و خمش‌پذیری و تسهیل اتصال عبوری آن از طریق دیواره مخزن، کاربرد آن رواج بیشتری یافته است. امروزه روش اندازه‌گیری مستقیم توسط حسگرهای حرارتی فیبر نوری در کنار آزمون حرارتی که از سوی استانداردهای بین‌المللی توصیه شده‌اند بعنوان یکی از راهکارهای مطمئن ارزیابی عملکرد حرارتی ترانسفورماتور و کارائی سیستم خنک‌کنندگی آن مطرح شده است. افزون بر کاربرد صرفا آزمایشگاهی و پژوهشی، گزارش های منتشر شده اخیر گویای استفاده از این روش حتی در مرحله بهره‌برداری ترانسفورماتورها نیز هست. اما بنابه دلایل فوق‌الذکر کاربرد این روش در حال حاضر تنها محدود به برخی کشورهای دارای فناوری پیشرفته است.

(د) سیستم خنک‌کنندگی درونی برخلاف سیستم خنک‌کنندگی بیرونی از دیدگاه عملکرد نه یک بخش مستقل بلکه بخشی جدائی‌ناپذیر از اکتیو پارت ترانسفورماتور بشمار می‌آید. بهمین دلیل در مرحله طراحی الزامات مربوط به عملکرد حرارتی سیم‌پیچ‌ها و هسته با الزامات پایداری الکترودینامیکی سیم پیچ‌ها، استقامت الکتریکی عایق‌بندی و مانند آنها همزمان دیده می‌شوند. با در نظر گرفتن پیچیدگی و زمان‌بری محاسبات مربوطه و نیاز به تکرار چندین باره آنها از چندین دهه گذشته استفاده از نرم‌افزارهای طراحی بکمک رایانه در فرایند طراحی ترانسفورماتورها رواج یافته است. با افزایش پیوسته قابلیت های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری از سوئی و تدوین روش‌های کامل‌تر و کارآمدتر طراحی و محاسبات از سوی دیگر، صنعت ترانسفورماتور شاهد تحول ژرفی در این زمینه بوده است.

این نرم‌افزارها یا بسته‌های نرم‌افزاری همچنین قابلیت تحلیل دقیق عملکرد حرارتی ترانسفورماتورها و کارائی سیستم خنک‌کنندگی ترانسفورماتورها را دارند. همانطور که بخوبی روشن است عملکرد حرارتی ترانسفورماتورها بر پایه گردش روغن که بعنوان یک سیال هم نقش عایق الکتریکی و هم نقش عامل انتقال‌دهنده حرارت را بعهده دارد، استوار است. به‌همین علت نرم‌افزارهایی که وظیفه تحلیل عملکرد حرارتی ترانسفورماتورها را بعهده دارند برپایه شیوه‌های تحلیلی مکانیک سیلات و انتقال حرارت تدوین گردیده‌اند [۱۷].

بکمک این نرم‌افزارها همچنین می‌توان مدل دقیقی از سیستم خنک کنندگی درونی و بیرونی را ساخت که می‌تواند در کنار آزمون حرارتی و اندازه‌گیری مستقیم، بعنوان یک روش دقیق ارزیابی عملکرد حرارتی و توزیع تنش حرارتی در ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد.

اما در عین حال باید در نظر داشت که استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی با حجم چشمگیری از داده‌های تفضیلی از جزئیات ساختار شامل جنس، خواص، ابعاد و اندازه‌های دقیق هندسی عایق‌بندی سلولزی، روغن، هادی‌ها، و چهارچوب اکتیو پارت، مخزن و همچنین اجزاء تجهیزات کمکی همچون

کلید تغییر انشعاب، بوشینگ ها و ... ، در رابطه است که با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های ساختار ترانسفورماتور کار با چنین حجمی از داده‌ها بسیار پر زحمت خواهد بود. نکته بسیار مهم دیگر عدم دسترسی بهره‌بردار به این داده هاست، زیرا این جزئیات طراحی معمولا از سوی سازنده عرضه نمی‌شود. امری که بویژه در مورد مدل‌های قدیمی‌تر ترانسفورماتورها بشکل بمراتب حادتری مطرح خواهد بود.

در صورت محاسبه و طراحی صحیح سیستم خنک‌کنندگی و متعاقبا رعایت دستورالعمل‌های بهره‌برداری، دمای بخش‌های مختلف ترانسفورماتور در دامنه مجاز پیش‌بینی‌شده محدود مانده و عایق‌بندی ترانسفورماتور، که نقشی تعیین‌کننده در میزان فرسودگی فیزیکی آن دارد، قابلیت‌های خود را در دوره عمر قابل پیش‌بینی ترانسفورماتور حفظ خواهد نمود.

5. نتیجه گیری

در مقاله روش‌های مختلف مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها و موارد کاربرد آنها معرفی گردیدند. ضمن اشاره به مزایای افزایش ظرفیت بارگیری از طریق ارتقاء سیستم خنک‌کنندگی که یکی از رایج‌ترین روش‌های مدرنیزاسیون ترانسفورماتورها بشمار می‌آید راهکارهای موجود برای این منظور نیز مورد بحث قرار گرفتند. نقش سیستم خنک‌کنندگی درونی و سیستم خنک‌کنندگی بیرونی در عملکرد حرارتی ترانسفورماتور و نارسائی آزمون حرارتی بعنوان روش سنتی و همچنین روش اندازه‌گیری مستقیم بعنوان روش جدیدتر بازبینی عملکرد حرارتی و توزیع تنش حرارتی مورد تحلیل واقع شد. قابلیت های نرم‌افزارهای طراحی بکمک رایانه در مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور و سیستم خنک‌کنندگی آن و نیز محدودیت‌های این نرم افزارها بررسی شدند.

منابع

[1] A.Prieto, M.Cuesto, P.Pacheco, M.Oliva, L.Prieto, A. Fernandez, L. Navarro, H. Gago, M. Burgos, "Optimization of power transformers based on operative service conditions for improved performance" the 44th CIGRE Session, 26th - 31st August 2012, Paris, France.

[2] B. S. Kang, M. R. Levit, R. P. Marek, R. C. Wicks, R. L. Provost "Development of a New Solid Insulation for Liquid-Immersed Transformers" 2014 Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8 to 11 June 2014.

[3] Prevost, T. A., & Oommen, T. V. "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - history and development" IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No. 1. January/February 2006.

[4] Oommen, T. V., & Prevost, T. A. "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life" IEEE Electrical Insulation Magazine, 22(2), Vol. 22, No. 2. March/April 2006.

[5] Wolfgang Siffring "Variable-speed air-forced cooler technology / Solutions for upgrading or expansion of transformer oil cooling systems" Transformers Magazine Volume 3, Issue 2, 2016

[6] Zoran Radakovic, Dusan Jacic, Jelena Lukic and Srdjan Milosavljevic "Loading of transformers in conditions of controlled cooling system" European Transactions on Electrical Power, 2012.

[7] Waheed Aftab Khan, Manzoor Ellahi, Bilal Masood, "Design of Smart Cooling System for Power Transformer" 2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies ICEET.

[8] Yu. N. Timonin "An Electric Drive Control for a Cooling System of High Power Mains Transformers" Russian Electrical Engineering, 2011, Vol. 82, No. 12.

[9] Walter A. Castillo, Rekha T. Jagaduri and Prasanna K. Muralimanohar, "Implementation of a Transformer Monitoring Solution per IEEE C57.91-1995 Using an Automation Controller" 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, Texas, April 2–5, 2012.

[10] Bartlomiej Dolata, Sebastian Coenen "Online Condition Monitoring Becomes Standard Configuration of Transformers - Practical Application for Optimized Operation, Maintenance and to Avoid Failures" The 5th International Advanced Research Workshop on Transformers e-ARWtr2016, La Toja Island, Spain, (2)3 -5 October 2016.

[11] Marcos E. G. Alves, Daniel P. Santos, Gilberto A. Moura, "Equipment Condition Monitoring (ECM) Using Smart Sensors for Power Transformers with Special Focus on Real Time Asset Diagnosis and Prognosis" The 5th International Advanced Research Workshop on Transformers e-ARWtr2016, La Toja Island, Spain, (2)3 -5 October 2016.

[12] L. W. Schoenig, and T. H. Progler, "Saving through dual cooling", Allis Chalmers Electrical Review (USA), Vol. 25, No. 2, Second Quarter, 1960.

[13] H. L. Deloney and W. W. Renbers, "Heat exchanger ups transformer capacity 35 %", Electrical World (USA), Vol. 159, No. 8, Feb. 25, 1963.

[14] IEC 60076-2:2011 Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers.

[15] IEEE Std C57.12.90™-2015 "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers" IEEE, New York, USA.

[16] CIGRE Working Group 09 of Study Committee 12 "Direct Measurement of the Hot-Spot Temperature of Transformers" ELECTRA, No 129, pp47-51, March 1990

[17] Marina A. Tsili, Eleftherios I. Amoiralis, Antonios G. Kladas, Athanassios T. Souflaris, "Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model" International Journal of Thermal Sciences Volume 53, March 2012.