مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۶- شماره ۱- سال ۱۴۰۰
www.ElitesJournal.ir

بررسی و مروری بر عوامل موثر حرارتی در کاهش عمر ترانسفورماتور

علی حسنی آزاد[۱]، غلامرضا تطهیری[۲]، وحید منفرد[۳*]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

* vahid_monfared@alum.sharif.edu

ارسال: اسفند ۹۹ پذیرش: فروردین ۱۴۰۰

چکیده

ترانسفورماتورهای توزیع برای کار در یک محدوده درجه حرارت روغن طراحی می شوند که محدوده مجاز نامیده می شوند این محدوده به عوامل مختلفی نظیر کلاس عایقی سیم پیچ ها، سیال خنک کن، نحوه خنک کاری و عوا مل محیطی بستگی دارد. اگر یک ترانسفورماتور در دمای پایین کار کند عمر عایقی آن افزایش می یابد، بر این اساس می توان گفت که درجه حرارت یک عامل مهم در بهینه سازی ترانسفورماتور می باشد. یکی از مشکلات مهم شبکه توزیع برق گرم شدن بیش از حد ترانسفورماتورهای توزیع در هنگام تابستان و خراب شدن آنها می باشد. افزایش بار مصرفی ناشی از کاربرد دستگاه های خنک کننده و تابش خورشید بر روی ترانسفورماتو ها سبب گرمایش آنها شده و به افزایش دمای آن کمک می کند. عمرنرمال عایق ترانس ۸۵۰۰۰ ساعت معادل با ۱۰ سال برای عایق کلاس A می باشد. این عمر به ازای هر ۸ درجه بالا یا پایین رفتن دما از مقدار مشخص شده نصف یا دو برابرمی گردد. دمای نقطه داغ، یکی از پارامترهای مهم و کلیدی در تعیین عمر عایقی ترانسفورماتور می باشد. دمای نقطه داغ ترانسفورماتور به دمای محیط، دمای بالای روغن و دمای سیم پیچ بستگی دارد. همچنین دمای نقطه داغ سیم پیچ تابعی از سرعت باد، تابش حرارتی خورشید و ارتفاع نصب ترانسفورماتور نسبت به سطح دریای آزاد است. در این مقاله، تأثیر نوع روغن، تابش خورشید، رنگ و عوامل محیطی خارجی بر گرمایش ترانسفور ماتورهای توزیع به صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: دمای نقطه داغ ،تابش خورشید، ترانسفورماتور، سایبان خورشیدی، رنگ، افزایش عمر.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات بسیار مهم و حیاتی سیستم قدرت محسوب شده و نقش مهمی در تداوم برق رسانی و قابلیت اطمینان سیستم دارند. تاکنون مطالعات زیادی برای تخمین عمرترانسفورماتورها انجام شده است که تمرکز همه این مطالعات برمیزان عمر عایق این تجهیز بوده است. افزایش دمای بالای روغن و در نتیجه افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتورسبب پیری زودرس عایق و در نتیجه کاهش عمر آن می شود. همچنین رطوبت و اکسیژن عوامل تسریع کننده پیری عایق و کاهش عمر ترانسفورماتور محسوب می شوند. یکی از عوامل مهم پیری ترانسفورماتور، تنشهای حرارتی اعمالی به عایقهای آن است. این تنش ها ناشی از تلفات آهنی و مسی، افزایش دما به سبب بارگیری، توزیع غیریکنواخت دما در سیم پیچ ترانسفورماتور و شرایط

www.SID.ir

Archive of SID

محیطی به ویژه دما و ارتفاع از سطح دریای آزاد است. همچنین سرعت باد و میزان تابش خورشید بر این ازدیاد دما موثر خواهد بود. لذا عوامل مذکور می بایست در مطالعات پیری مد نظر قرار گیرند.

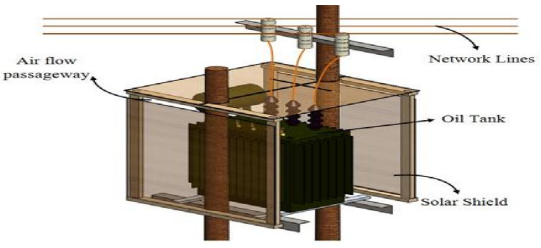
۲- بررسی نقش رنگ بدنه ترانسفورماتور برگرمایش آن

علاوه بر تابش مستقیم خورشید، رنگ بدنه ترانسفورماتور نیزبر روی میزان تابش جذب شده و افزایش دمای روغن ترانسفورماتور بسیار مؤثر است به گونه ای که استفاده ازرنگ های با ضریب جذب خورشیدی پایین در کاهش دمای بدنه و روغن درون ترانسفورماتور موثر می باشد. همانطور که ذکر شد، مدلی جهت پیش بینی رفتار ترانسفورماتور درحالت های مختلف بدست آمده است. به کمک مقایسه نتایج مدل بانتایج تجربی اعتبار آن مورد تأیید قرار گرفت. در این قسمت به کمک این مدل به بررسی تأثیر رنگ بدنه ترانسفورماتور درگرمایش روغن درون آن پرداخته می شود. در مواردی که نیاز به دفع حرارت خورشیدی می باشد، می توان از رنگ اپوکسی استفاده کرد. در بین رنگ ها رنگ سفید نه تنها در طول موج های کوتاه خاصیت انعکاسی دارد بلکه در طول موج های بلندتر هم خاصیت صدوری دارد که باعث خنک باقی ماندن سطح می شود. در سطوح انتخابی، جنس رنگ به کار برده شده بر روی سطح در خواص تشعشعی آنها تأثیر دارد. ساختن بیشتر پوشش های انتخابی بسیار مشکل است، ولی رنگ زدن روش نسبتاً ساده تری می باشد.

مقادیر αs و ضریب صدور برای چند رنگ مختلف درجدول۱ ارائه شده اند در این جدول پارامتر$\alpha s/\varepsilon$ یک پارامترمهم مهندسی است. مقادیر کم این پارامتر هنگامی مطلو ب است که سطح بخواهد گرما را دفع کند و مقادیر زیاد آن هنگامی لازم خواهد بود که نقش سطح، گردآوری انرژی خورشید باشد[۱].

۳- تابش خورشید

در این مقاله تأثیر تابش خورشید بر گرمایش ترانسفورماتور های توزیع در شرایط آب و هوایی اهواز به طور تجربی و تحلیلی بررسی و مرور شده است. برای این کار دمای روغن ترانسفورما تور در دو حالت، یکی وقتی که ترانسفورماتور تحت تابش خورشید است و دیگری وقتی که سایبان بر روی ترانسفورماتور قرار دارد اندازه گیری می گردد. همچنین مدل سازی حرارتی ترانسفورماتور ومعادلات حاکم بر آن استخراج شده و نتایج حل عددی باتجربی مقایسه می شود. علاوه بر این میزان کاهش دما توسط تغییر رنگ بدنه ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می گیرد. ترانسفورماتور مورد آزمایش و سایبان به کار رفته در آن درشکل ۱ نشان داده شده است. ترانسفورماتور دارای قدرت kVA ۵۰۰ و ساخت کارخانه ایران ترانسفو می باشد. آزمایشات تجربی بر روی این ترانسفورماتور در دو حالت با سایبان و بدون سایبان، در طول تابستان و در اهواز انجام گردید. برای اینکار دماسنج دیجیتالی (Testo 175-T3) که دارای دو ترموکوپل نوع K می باشد استفاده گردیده است. یکی از ترموکوپل ها در تانک انبساط روغن و دیگری در محل دماسنج موجود بر روی ترانسفورماتورکه برای همین کارتعبیه شده است نصب می گردد [۲]. دمای ترانسفورماتور در حالت بدون سایبان برای مدت ۲۶ روز متوالی و در حالت با سایبان برای ۲۷ روز متوالی به فاصله زمانی هر ۵ دقیقه اندازه گیری شده است. مقایسه بین تغییرات دمای روغن در دو حالت باسایبان و بدون آن صرفاً برای روزهایی که از نظر دما و صافی هوا مشابه بودند صورت گرفت. نصب سایبان چوبی به گونه ای بوده است که جریان خنک کاری هوای طبیعی به سمت بالا مسدود نگردد.



شکل ۱- نمای سه بعدی ترانسفورماتور در حالت وجود سایبان [۳]

www.SID.ir

Archive of SID

برای محاسبه تابش خورشیدی (qsolar) در هر ساعت از ضرایب صافی هوا استفاده می شود. ضریب صافی ماهیانه (KT) که میزان تابش بر صفحه افقی در زمین به مقدار آن در(KT) خارج از جو است برای شهر اهواز در مرداد ماه برابر با۰/۶۳. می باشد این مقدار برای دیگر ماه های سال در مرجع آمده است[۳].

روغن ترانسفورماتور یکی از مواد پر مصرف در پستهای کشور است. روغن در طول سرویس به تدریج کیفیت اولیه خود را از دست داده، ثابت دی الکتریک آن کاهش یافته و مقدار اسیدیته آن افزایش می یابد. درجه حرارت بالای محیط به خصوص در استان های جنوبی نظیر فارس و هرمزگان، تماس بااکسیژن هوا، و تماس با فلزات ساختمان ترانسفورماتور و نفوذ رطوبت، از عوامل فساد روغن هستند. این فرایند در نتیجه انجام عمل اکسیداسیون روغن، تشکیل آب، آلدئیدهای فرار و اسیدهای آلی سبک و پاپلیمرهای سنگین که برخی از آنها در روغن به صورت محلول می باشند، صورت می گیرد. ترکیبات فرار در سطح فلزات و در بالای سطح روغن کندانسه شده و موجب خوردگی آنها می شوند. آب واسیدهای آلی و سایر مواد پلیمری به مواد عایقی و محافظ ترانسفورماتور نظیر مواد سلولزی، لعابی، رنگی و کاغذی نفوذ کرده و ضمن واکنش با آنها، ترکیباتی از نوع الیاف یا لجن بوجود می آورند. ترکیبات قطبی به خصوص آب و الیاف ناشی از فساد مواد عایق ساختمان ترانسفورماتور در مجاورت یکدیگر، ثابت دی الکتریک روغن را کاهش داده و به جهت تجمع لجن غیر محلول در روغن، میزان انتقال حرارت را نیزپایین می آورند. کاهش میزان انتقال حرارت موجب گرم شدن موضعی برخی از قسمتهای ترانسفورماتورمی شود که در نتیجه آن حتی اگر شرایط غیر عادی در کار ترانسفورماتور پیش نیاید درجه حرارت روغن بالا رفته و عمل اکسیداسیون تسریع می شود و این امر می تواند تا جایی پیش رود که مقاومت عایقی روغن تا حد زیادی کاهش یابد و امکان بروز جرقه بین سیم پیچ ها و بدنه ترانسفورماتور را بوجود آورد. بر این اساس عوامل و پارامترهای انتخاب یک روغن با کیفیت خوب و همچنین بررسی عوامل موثر در تخریب زود هنگام روغنهای ترانسفورماتور جهت جلوگیری از ایجاد خطا در داخل ترانسفورماتور امری ضروری خواهد بود. همچنین جهت افزایش عمر مفید روغن، گرفتن ناخالصی های ناشی از فساد و اکسیداسیون روغن ضروری بوده که به طور خلاصه بهترین روشهای تصفیه روغن نیز بیان می گردد. مشخصات ذیل از یک روغن با کیفیت خوب مورد انتظار است،

۱- استقامت دی الکتریکی و قابلیت مقاومت الکتریکی روغن بالا باشد.

۲-ویسکوزیته روغن باید پایین بوده تا عمل انتقال حرارت را به طور موثر انجام دهد.

۳-به خاطر مسائل ایمنی نقطه آتش آن بالا باشد

۴-نسبت به مواد ساختمانی ترانسفورماتور بی اثر باشد.

۵- در برابر درجه حرارتهای موضعی و زیاد مقاوم باشد.

۶- در مقابل اکسیداسیون و تولید ترکیبات اسیدی و تشکیل لجن مقاومت نماید.

۷-قابلیت کاربرد در درجه حرارتهای پایین تر را داشته باشد.

۸- عاری از هرگونه آب و ناخالصی باشد.

۹- ضریب تلفات عایقی آن در طول کارکرد ترانسفورماتور پایین و تغییرات آن کم باشد.

۱۰-خواص الکتریکی خود را در مدت زمان نسبتاً زیاد سرویس حفظ نماید [۴].

برای نمونه روغن پایه بدون حضور گرافن با اعمال ولتاژ رفتار حرارتی روغن در دماهای مختلف افت پیدا می کند بطوریکه این افت با افزایش دما بیشتر مشهود است به عنوان مثال در دمای ۶۸ درجه سانتی گراد که ناشی از اعمال ولتاژ KV ۷۰ می باشد میزان افت حرارتی حدود ۳/۷ ٪ می باشد در حالی که با افزایش دما تا ۸۷ درجه این افت به ۴/۶ ٪ می رسد. بنابراین نتیجه می شود میدان الکتریکی ناشی از عبور ولتاژ در ترانس خود باعث افت رفتار حرارتی در روغن می شود این اثر در کنار سایر اثرات منفی ناشی از جریان الکتریسیته که اغلب ناپایداری شیمیایی روغن را به دنبال دارد از تبعات منفی ناشی از شرایط عملیاتی می باشد که لزوم کاهش این اثرات به کمک راه کارهای موجود بیشتر اثبات می شود. یکی از راه کارهای قابل اجرا اضافه کردن نانو صفحات گرافنی درون

www.SID.ir

Archive of SID

روغن است که با هدف افزایش سطح انتقال حرارت، تسهیل رفتار انتقالی درون روغن توسط الکترون های آزاد موجود در ساختار گرافن و بهره بندی از خواص ذاتی بالای گرافن در هدایت گرما انجام می شود. ملاحظه شده است که در غلظت های مختلف گرافن موجود در روغن میزان افت رفتار حرارتی ناشی از ولتاژ به افزایش حضور گرافن کاهش یافته است. به طور مثال در ولتاژ ۱۴۵ KV برای نمونه حاوی ۰/۵ ٪ وزنی گرافن مقدار افت رفتار حرارتی ۱/۶ ٪ می باشد در حالی که برای نمونه حاوی ۱٪ وزنی این مقدار به ۱/۲٪ کاهش می یابد. این اثر نشان می دهد که حضور بیشتر گرافن مقدار افت حرارتی روغن را کاهش داده است به عبارتی رفتار حرارتی روغن را در شرایط عملیاتی پایدارتر می کند سپس با افزایش غلظت گرافن تا ۱/۵٪ وزنی این افت در شرایط یکسان تنها به ۰/۲۴٪ می رسد که بسیار ناچیز است در نتیجه حضور گرافن در روغن نسبت به پایداری رفتار حرارتی آن نیز کمک شایانی کرده است این موضوع در کنار ارتقای رفتار حرارتی روغن قابل توجه است بطوریکه در مقایسه با روغن پایه ضریب هدایت حرارتی ۲۹/۱٪ نیز افزایش داشته است [۵]. برای بدست آوردن ضریب صافی ساعتی ازرابطه (۱) که رابطه آن با ضریب صافی ماهیانه استفاده می شود:

$$a = 0.409 + 0.5016\sin(\omega_s - 60)$$
$$b = 0.6607 - 0.4767\cos(\omega_s - 60) \quad (۱)$$
$$K_T = [a + b\cos 2\pi/24(t-12)]\overline{K_T}$$

که در این رابطه K_T ضریب صافی ساعتی، t زمان، ω_s زاویه مربوطبه طلوع و غروب خورشید می باش[۶].

معادله افزایش دمای روغن در استاندارد IEEE.C.57.91.1995 با در نظر گرفتن تغییر دمای محیط اصلاح شده است[۷]. اندازه گیری مستقیم دمای نقطه داغ، هزینه های زیادی به همراه دارد و لذا برای پیش بینی آن ازمدل های مختلفی استفاده می شود[۸]. شلاباخ تأثیر سایبان بر بهبود بارترانسفورماتورهای قدرت را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت در کشورهای با دمای بالا و تشعشع خورشید شدید، تأثیر سایبان بسیار مهم می باشد[۹].

۴- روغن

ترانسفورماتور یک دستگاه ساکن بوده و تلفات اصطکاکی درآن وجود نداشته و فقط تلفات آهنی و مسی در آن ایجاد می گردد. تلفات ترانسفورماتور عبارتند از تلفات آهنی که شامل تلفات هیسترزیس و فوکو می باشد و تلفات مسی یا ژولی که به سبب عبور جریان از سیم پیچ های اولیه و ثانویه بوجود می آید. این تلفات باعث بالا رفتن دمای سیم پیچ های ترانسفورماتور می شود. برای خنک کاری، سیم پیچ و هسته رادر تانک پر از روغن قرار می دهند تا در تبادل حرارتی با روغن، گرمای آنها گرفته شده و توسط دیواره ها ی تانک به بیرون از ترانسفورماتور هدایت شود[۱۰].

۵- بحث و مروری بر نتایج

در ترانسفورماتور های توزیع خنک کاری تنها توسط جابجایی آزاد روغن بر روی سطح سیم پیچ ها صورت می پذیرد. میزان تلفات آهنی ترانسفورماتور که از آزمایش مدار باز بدست می آید در زمان ساخت محاسبه می شود. از آنجا که در زمان بارگیری ترانسفورماتور به شبکه وصل است، فرکانس و ولتاژ اولیه ثابت می ماند. این موضوع سبب می شود تا مقدار تلفات آهنی در زمان بارگیری ثابت بماند. تلفات مسی از آزمایش اتصال کوتاه بدست می آید. در این آزمایش خروجی ترانسفورماتوررا اتصال کوتاه کرده و مقاومت سیم پیچ آن را محاسبه می کنند.با مشخص شدن مقاومت سیم پیچ ها میزان انرژی تلف شده درشرایط مختلف کاری برای ترانسفورماتور بصورت زیرحساب می گردد[۱۱].

$$P_{Cu,nom} = R_t \times I^2 \quad (۲)$$

که در این رابطه $P_{Cu,nom}$ تلفات مسی در شرایط نامی، I جریان نامی عبوری از سیم پیچ ها ، R_t مقاومت کلی سیم پیچ ها می باشد. از عوامل مذکور، استقاومت الکتریکی روغن مهمترین مشخصه آن محسوب می شود و لذا باید عاری از هرگونه

www.SID.ir

Archive of SID

ناخالصی و به ویژه آب باشد. ناخالصی ها عمدتاً از فساد روغن در سرویس ناشی می شوند و آب ممکن است در نتیجه فساد مواد عایقی یا جذب رطوبت در مخازن ذخیره و تاسیسات ترانسفورماتور باشد. اثر این گونه ناخالصی ها بر روی استقامت الکتریکی روغن، در مجاورت یکدیگر بسیار شدید است. در طول زمان و به دلایل مختلف مشخصات روغن ترانسفورماتورها تغییر می کند. یکی از عوامل مهم، جذب رطوبت توسط روغن می باشد که استقامت الکتریکی آن را به میزان قابل ملاحظه ای پایین آورده و تلفات عایقی آن را زیاد می کند. مقدار آبی که روغن در درجه حرارت ۲۰ درجه می تواند در خود حل کند در حدود ۴۰ تا ۱۰۰ ppm است مقادیر بیشتر آب به صورت ذرات ریز شناور در روغن و یا به صورت قطرات درشت ته نشین می گردد.

برای ارتقا بهبود عملکرد دفع حرارتی روغن ، از روغن های حاوی گرافن استفاده می شود. به منظور آماده سازی این نوع روغن ها ابتدا گرافن با درصد های حجمی مختلف شامل ۰/۵ و ۱ و۱/۵ درصد وزنی به روغن ترانسفورماتور اضافه شد . به عنوان مثال برای ساخت نانوسیال ۰/۵ ٪ وزنی مقدار ۰/۵ گرم پودر کاملا خشک گرافن به ۱۰ گرم روغن اضافه و تحت همزن با دور ۴۵۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه قرار می گیرد سپس به مدت ۳ ساعت عملیات بال میل بر روی آن اجرا شده و در نهایت در دمای محیط تحت امواج اولتراسونیک به مدت ۳۵ دقیقه قرار می گیرد و نانوسیال بدست آماده دارای پایداری مناسبی نسبت به ته نشینی گرافن از خود نشان می دهد.

برای محاسبه $qsolar$ از رابطه (۳) استفاده می شود که رابطه *بین میزان تابش خورشید به یک سطح شیب دار با تشعشع مستقیم و پراکنده*وارد شده به همان سطح را نشان می دهد [۱۱].

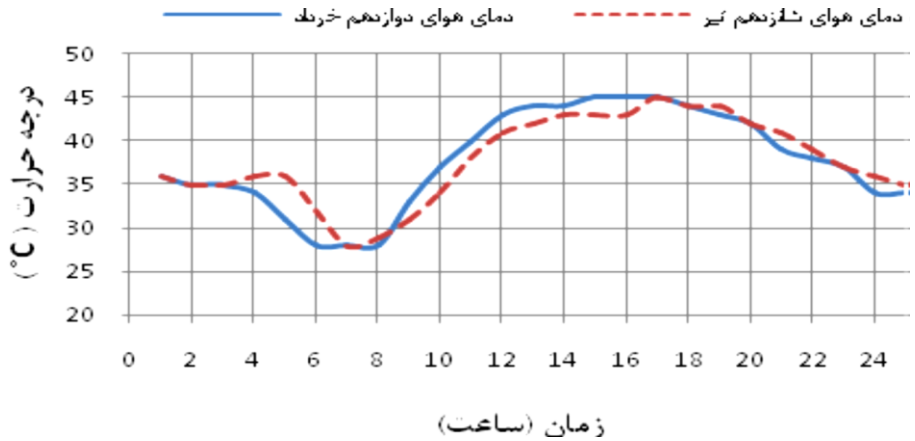
$$q_{\text{solar}} = \mathrm{q_{dir}}\,\mathrm{R_b} + 0.5 \times q_{\text{ind}}(1+\cos\beta) + \rho_{gr}(\mathrm{q_{dir}} + q_{\text{ind}}) \times 0.5\,(1-\cos\beta) \qquad (۳)$$

در این رابطه کل تشعشع وارده به یک صفحه شیبدار با زاویه شیب β می باشد qdir وqind به ترتیب تشعشع مستقیم وپراکنده هستند و R_b نسبت تشعشع روی صفحه شیبدار به صفحه افقی می باشد .ضریب انعکاس زمین نیزبا ρgr نشان داده می شود. آزمایش های تجربی بر روی ترانسفورماتورهای در حال کار در دو حالت زیر اندازه گیری شده است،

الف) " تحت تابش خورشید "از تاریخ ۷ خرداد الی ۱ تیر

ب) " مجهز به سایبان "از تاریخ ۱۰ تیر الی ۶ مرداد

برای مقایسه عملکرد حرارتی ترانسفورماتور تحت تابش خورشید و مجهز به سایبان، فقط روزهایی مورد مقایسه قرارگرفتندکه شرایط آب و هوایی از نظر دما وصافی هوا یکسان بودند. برای مثال دو روز ۱۲ خرداد و ۱۶ تیر که شرایط محیط تقریباً یکسان بود، جهت مقایسه رفتار حرارتی ترانسفورماتوردر نظر گرفته شد . شکل ۲ دمای هوای محیط را برای این دوروز نشان می دهد که تقریباً مشابه می باشد.

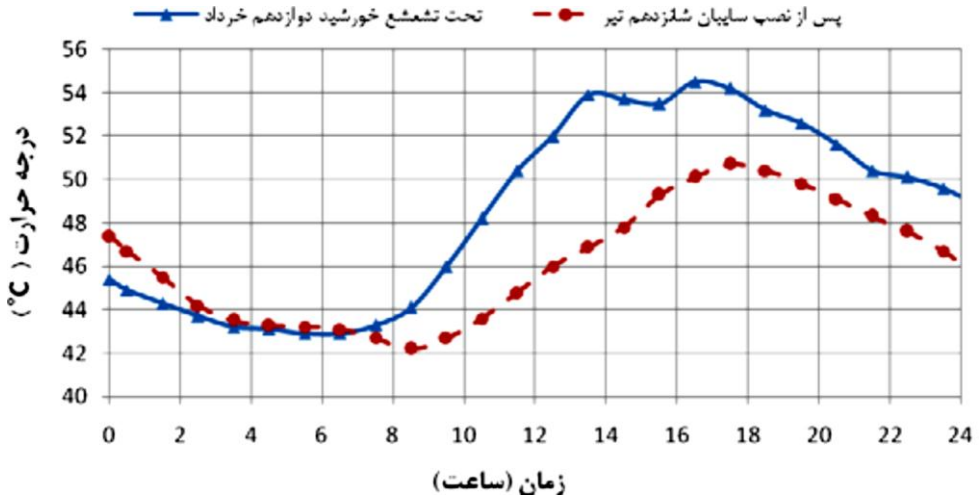


شکل ۲ – نمودار دمای هوا در روزهای ۱۲ خرداد و ۱۶ تیر ۱۳۸۷ [۳]

www.SID.ir

Archive of SID

در شکل ۳ دمای روغن ترانسفورماتور را برای دوحالت تجربی نشان می دهد. بنا براین شکل نصب سایبان در ماکزیمم حالت ۷ درجه، دما را کاهش می دهد.



شکل ۳ - دمای تجربی روغن ترانسفورماتور در حال کار در دو حالت با و بدون تابش مستقیم خورشید [۳]

از طرفی ایجاد شرایط کاری نرمال ترانسفورماتور در بار نامی، نیازمند مطالعه دقیق رفتار حرارتی ترانسفورماتور می باشد. تنوع بارگیری ازترانسفورماتور در حالت نرمال واضطراری سبب افزایش دمای روغن ترانسفورماتور می شود [۱۲]. در این مقاله با در نظر گرفتن عوامل درونی مانند روغن و تغییر عوامل محیطی مانند سرعت باد، دمای محیط، تابش خورشید و ارتفاع از سطح دریای آزاد، دمای نقطه داغ ترانسفورماتور پیش بینی، مرور و ارزیابی شده است. برای بررسی اثر ولتاژ بر عملکرد روغن که با هدف تعیین رفتار حرارتی روغن در شرایط عملیاتی انجام می شود ابتدا بسته به شرایط کارکرد ترانسفورماتور در ولتاژهای مختلف مقدار دمای روغن را بصورت میدانی اندازه گیری می کنیم.

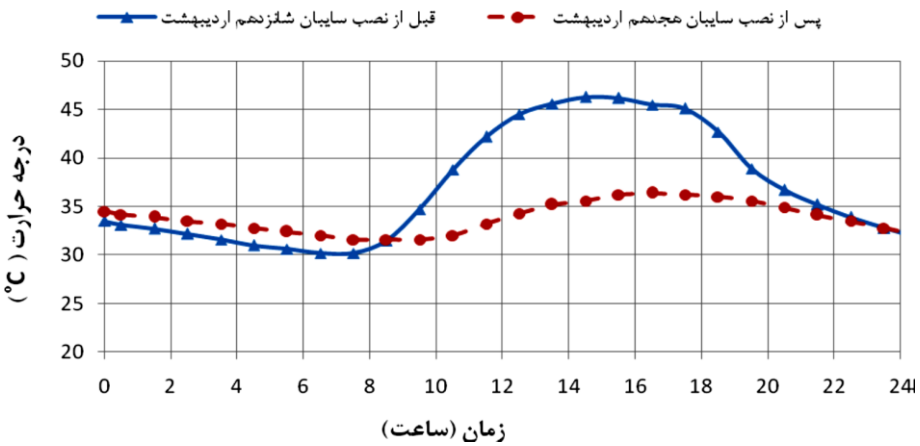
به منظور اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی روغن پایه ، ابتدا روغن در راکتر و دو جداره دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی KD-2 ریخته می شودکه بطور ثابت به یک پایه متصل شده است. سپس ترموکوپل دستگاه در وسط استوانه قرار گرفته و محکم می شود. با برقراری جریان سیرکولاتور دمای مورد نظر به روغن اعمال شده و پس از رسیدن دمای روغن به دمای مورد نظر و ایجاد تعادل حرارتی ، ضریب هدایت حرارتی آن اندازه گیری و ثبت می شود. سپس به مدت ۱۵ دقیقه مجدد ضریب هدایت حرارتی اندازه گیری شده واین عمل سه بار تکرار می شود و نتیجه آن بصورت متوسط عددی محاسبه و گزارش می شود.

با بررسی اثر دما بر رفتار حرارتی روغن مشاهده شد که با افزایش دمای روغن ضریب هدایت حرارتی در کلیه نمونه ها افزایش می یابد که عمدتا به دلیل افزایش حرکات تصادفی نانو ذرات درون روغن است با افزایش غلظت گرافن از ۰/۵ به ۱/۵ ٪ وزنی ضریب هدایت حرارتی روغن افزایش یافته است . بشترین مقدار افزایش به نمونه حاوی ۱/۵٪ وزنی متعلق است که در دمای محیط ۲۸/۴٪ و در دمای ۸۷ درجه سانتی گراد ۲۴/۱۷٪ افزایش را دارد . یکی از دلایل اصلی افزایش هدایت حرارتی روغن توسط گرافن افزایش قابل توجه سطح انتقال حرارت به علت حضور صفحات گرافنی در روغن است که با فزایش غلظت نیز افزوده می شود و همچنین رفتار ذاتی گرافن به دلیل تسهیل انتقال الکترون و بهره مندی از ضریب هدایت حرارتی بسیار بالا بهبود رفتار هدایتی روغن را به دنبال دارد [۱۳]. دربحث بارگیری از ترانسفورماتور باید به این نکته اشاره کرد که عامل اصلی افزایش دمای نقطه داغ،گرمای تولید شده ناشی از تلفات بار است [۱۴]. برای سایر روزهای مشابه نیز مقایسه بین دمای روغن ترانسفورماتور در دو حالت تحت تابش خورشید و بدون تابش خورشید انجام گرفت که اختلاف دمای آنها در شکل ۵ نشان داده شده است.همچنین آزمایش هایی برای تعیین تأثیر تابش خورشید بر روی ترانسفورماتور بدون بار انجام گرفت که شکل ۴ نتایج آن رانشان می دهد . در این حالت نصب سایبان در ماکزیمم حالت۱۰/۸ درجه ، دما را کاهش داده است. در شکل ۵ اختلاف دمای ماکزیمم ایجاد شده

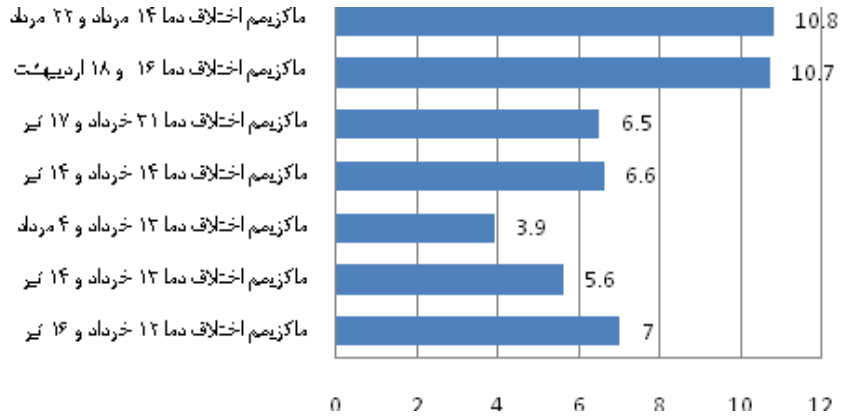
www.SID.ir

Archive of SID

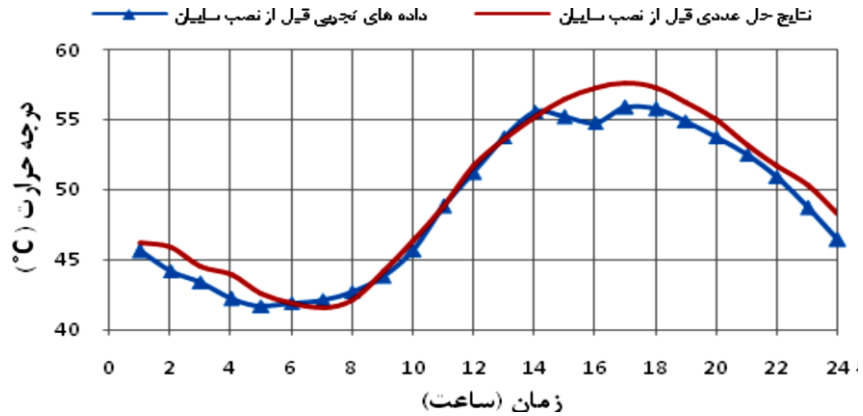
در اثر نصب سایبان برای روزهای مختلف رسم شده است. همانطور که در این شکل نیز معلوم می شود، در حالت بدون بار بطور مثال روزهای ۱۶ و ۱۸ اردیبهشت اختلاف دما در اثر نصب سایبان زیاد می باشد، به عبارتی دیگر با بالا رفتن حرارت تولیدی درون ترانسفورماتور متوسط اختلاف دما در اثر نصب سایبان کاهش می یابد. بر اساس مشاهده نمودارهای توزیع دما، حداکثر درجه حرارت به طور معمول در ساعت ۱۵-۱۶ بعدازظهر اتفاق می افتد و منحنی های توزیع دما در هر روز بین مقادیر حداکثرو حداقل خود بصورت سینوسی تغییر می کنند. در شرایطی که تشعشع مستقیم خورشید با نصب سایبان حذف می شود، اختلاف بین حداکثر و حداقل دما در طول شبانه روز کاهش می یابد. مدلسازی کامپیوتری مسئله به کمک نرم افزار مطلب صورت پذیرفته است که در ادامه به مقایسه آن با نتایج تجربی می پردازیم. شکل ۶ نتایج پیشبینی مدل برای ترانسفورماتور تحت بار قبل از نصب سایبان را نشان داده و آن را با داده های تجربی مقایسه می نماید. همچنین شکل ۷ نتایج پیش بینی مدل را برای دمای روغن ترانسفورماتور تحت بار بعد از نصب سایبان نشان داده و آن را با نتایج تجربی مقایسه می کند.



شکل ۴ - دمای تجربی روغن ترانسفورماتور بدون بارگیری در دو حالت با و بدون تابش مستقیم خورشید [۳]



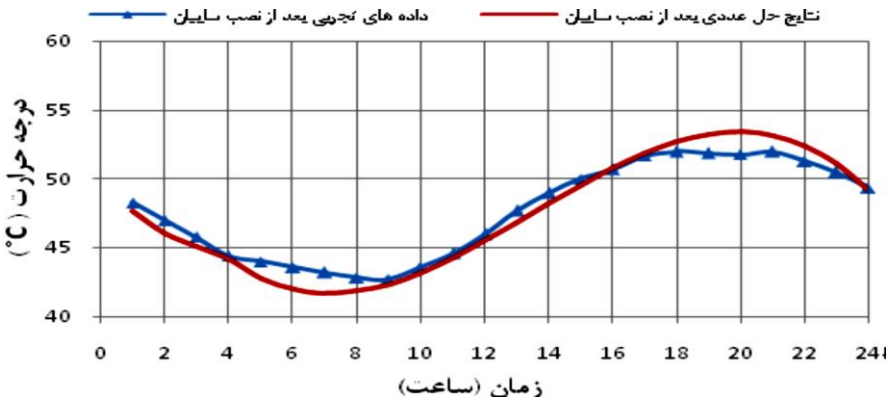
شکل ۵ - ماکزیمم اختلاف دما در اثر نصب سایبان برای داد ههای تجربی [۳]



www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۶ – مقایسه تجربی و عددی دمای روغن ترانسفورماتور در حال کار و تحت تابش خورشید در نیمه خرداد ۱۳۸۷ [۳]



شکل ۷ – مقایسه تجربی و عددی دمای روغن ترانسفورماتور در حال کار و درون سایه در نیمه تیر ۱۳۸۷ [۳]

همانطور که از شکل ها مشخص می باشد نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار می باشد. درصد خطا با معیار قرار دادن نتایج تجربی و تقسیم اختلاف دمای بین نتایج تجربی و عددی بر نتایج تجربی محاسبه شده اند. ماکزیمم مطلق خطا ۹/۴ ٪ بوده و ماکزیمم نسبی خطا برابر ۳/۶ ٪ می باشد .با توجه به پایین بودن میزان خطا می توان نتیجه گرفت که مدل موجود ازدقت قابل قبولی برخوردار بوده و می تواند برای پیش بینی رفتار ترانسفورماتور در سایر شرایط مورد استفاده قرار گیرد.

همانطور که انتظار میرود با افزایش بار ترانسفورماتور دمای روغن افزایش می یابد . با بررسی اختلاف ایجاد شده در اثر نصب سایبان برای بارهای مختلف مشاهده می شود که اختلاف دما با افزایش بار کاهش می یابد. در بارهای پایین درصد زیادی از عوامل گرمایش ترانسفورماتور ناشی از جذب تشعشع خورشید توسط بدنه آن می باشد .به همین منظور با در نظر گرفتن مشخصات چهاررنگ سفید، سبز، خاکستری و سیاه از جدول ۱ برای خواص تشعشعی سطح ترانسفورماتور، تأثیر تغییر رنگ بدنه ترانسفورماتور بر دمای روغن درون آن مورد بررسی قرار گرفته است.

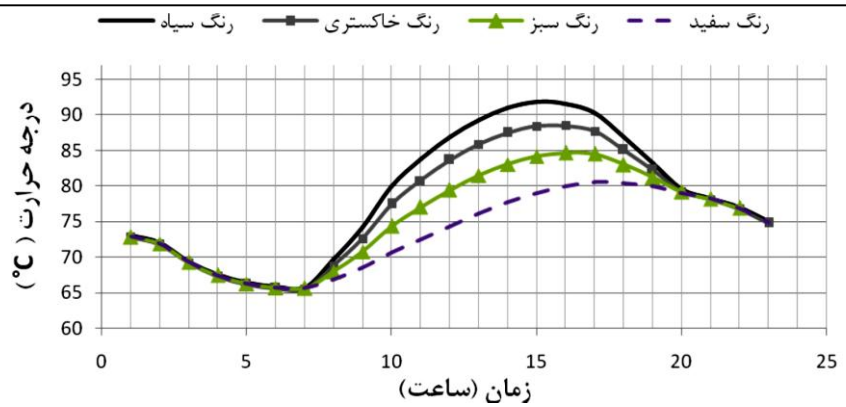
جدول ۱ – ضریب صدور و جذب خورشیدی چند رنگ مختلف [۳]

رنگ	αs	ε	$\alpha s/\varepsilon$
سفید	۰/۲۰	۰/۹۱	۰/۲۲
سبز	۰/۵۰	۰/۹۰	۰/۵۶
خاکستری	۰/۵۷	۰/۸۸	۰/۷۹
سیاه	۰/۹۳	۰/۹۳	۱/۰

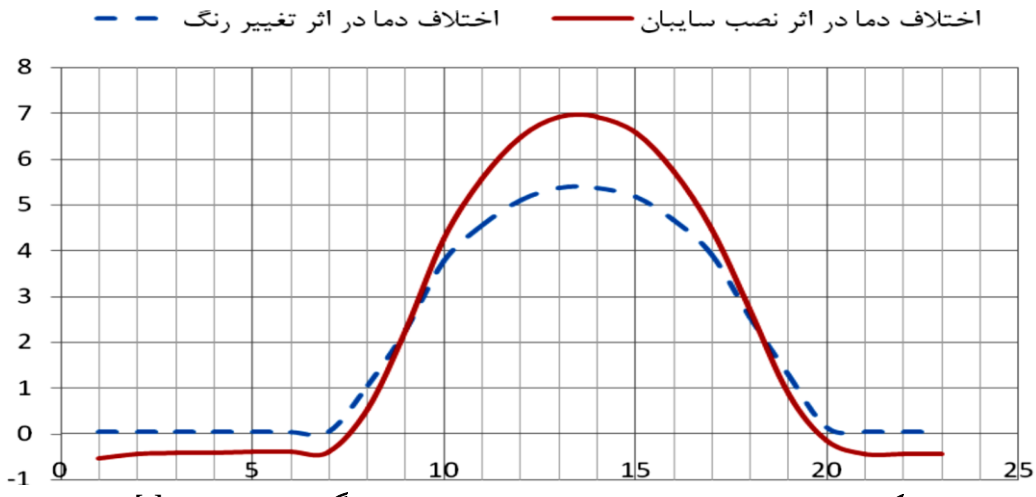
تغییر دمای روغن ترانسفورماتور در بار ۷۰٪ برای رنگ های سفید، سبز، خاکستری و سیاه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رفت، رنگ سیاه از آنجا که دارای ضریب جذب خورشیدی بالایی می باشد باعث افزایش بیش از حد دمای روغن ترانسفورماتور می شود. در شکل۹ اختلاف دمای به وجود آمده در حالتی که رنگ بدنه از سبز به سفید تغییر می کند با حالتی که بر روی ترانسفورماتور با رنگ بدنه سبز، سایبان نصب شده است مقایسه شده است. این شکل برای حالتی که ترانسفورماتور دربار ۷۰٪ در حال کار می باشد اختلاف دما را نشان می دهد. همانطور که در این شکل نیز مشخص است تغییر رنگ بدنه ترانسفورماتور از سبز به سفید در ماکزیمم حالت۵/۵ درجه دما را کاهش می دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



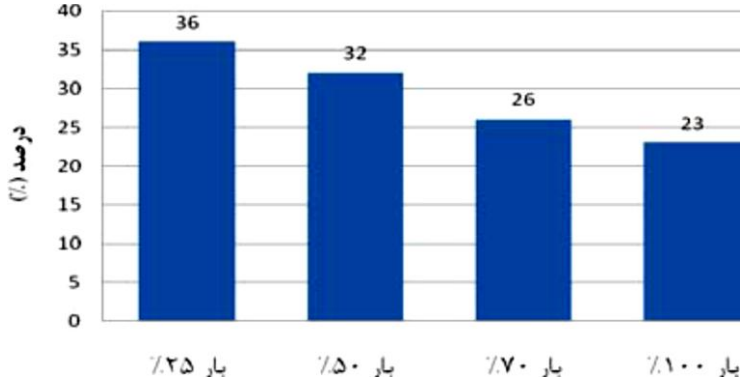
شکل۸ – پیش بینی دمای روغن ترانسفورماتور در بار۷۰٪ با تغییر رنگ بدنه آن [۳]



شکل۹ – مقایسه اختلاف دمای ایجاد شده در اثر نصب سایبان و تغییر رنگ بدنه ترانسفورماتور [۳]

۶– پیش بینی افزایش عمر ترانسفورماتور

با استفاده از رابطه ۲ می توان طول عمر ترانسفورماتور را درشرایط مختلف بدست آورد. برای اینکار میانگین دمای روغن درون ترانسفورماتور در هر ساعت از شبانه روز محاسبه شده و در دو حالت با سایبان و بدون سایبان طول عمرترانسفورماتور تعیین گردیده است. در شکل ۱۰ درصد افزایش عمر ترانسفورماتور در اثر نصب سایبان در بارهای مختلف نشان داده شده است .نصب سایبان بطور متوسط ۲۹٪ عمر ترانسفورماتور را افزایش می دهد. هزینه نصب سایبان بسیار پایین بوده و در حدود ۲٪ قیمت ترانسفورماتور می باشدکه از نظر اقتصادی بسیار با صرفه است.



شکل ۱۰ – درصد افزایش عمر ترانسفورماتور در اثر نصب سایبان [۳]

www.SID.ir

Archive of SID

ترانسفورماتورهای مورد استفاده در ایران با توجه به استاندارد IEC 60076 به نحوی ساخته و طراحی شده اند که بتواند توان نامی را در بالاترین دمای محیط که ترانسفورماتور برای آن طراحی شده است، ارائه کند که این دما برای ترانسفورماتورهای توزیع کم تلفات ۴۵ درجه سانتی گراد و برای ترانسفورماتورهای توزیع غیرکم تلفات ۴۰ درجه سانتی گراد است. قابل ذکر است که ترانسفورماتورها از تجهیزات مهم، اصلی و پر اهمیت توزیع برق به حساب می آیند و در فرآیندهای انتقال و توزیع برق با هدف تغییر سطح ولتاژ الکتریکی برای کاهش تلفات ولتاژ کاربرد وسیعی دارند. بنابراین، در ترانسفورماتور ازسیال روغن به عنوان یک سیال عامل برای اهداف مخصوصی استفاده می شود. این روغن یک روغن پایه معدنی است که عمدتاً از هیدروکربن های مشتق از نفت خام تولید شده و پس از یک عملیات پالایشی دقیق و صحیح مورد استفاده قرار می گیرد. این روغن باید دارای خواص اولیه معین و مشخصی باشد تا بتواند در ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد. از جمله این خواص ها عایق الکتریکی، هادی حرارت، پایداری شیمیایی مناسب و بالا، خنثی بودن آن در مقابل مسایل خوردگی می باشد [۱۵]. تا وقتی که دمای محیط کمتر از دمایی که ترانس برای آن طراحی گردیده است باشد (۴۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد)، می توان بار نامی را به ترانسفورماتور دریافت نمود. البته بسته به نوع ،ساختمان وطریقه خنک شدن ترانسفورماتور و بسته به قطر سیم پیچ وضخامت عایق بندی، ترانس می تواند جریان اضافه بار را بدون اثرات نامطلوب تا مدت معینی تحمل کند. اگر بارهای اضافی را نتوان کنترل نمودد، با گذشت زمان ترانسفورماتور پیر،کهنه و ازکارافتاده شده، و به عبارتی ب پیری عایقی مبتلا می شود و در نهایت طول عمر مفید ترانس دربرابر تحمل تنش های الکتریکی وارده و مکانیکی ناشی از بار اضافی، اتصال کوتاه شبکه و یا سایر عوامل شدیدا کاهش می یابد. همچنین، سیال روغن مذکور برای داشتن خاصیت خنک کنندگی مناسب و بالا، بایستی دارای ویسکوزیتهٔ پایین و برای داشتن خاصیت عایقی خوب ولتاژ شکست بالایی باشد. نفوذ و یا ترکیب آب در سیال روغن ترانسفورماتور باعث کاهش ولتاژ شکست آن می شود [۱۶].

۷- نتیجه گیری

حضور نانو صفحات گرافنی در روغن علاوه بر اینکه ضریب هدایت حرارتی روغن را تا ۳۰٪ می تواند افزایش دهد موجب ثبات رفتار حرارتی آن در دماهای بالای ناشی از عبور ولتاژ در ترانس می شود که خود عملکرد حرارتی روغن را از دو منظر مجزا و موازی بهبود داده است. دلیل این پدیده ناشی از اثرات مختلفی است که صفحات گرافنی بر روغن پایه می گذارد که اهم آن عبارت است از،

- صفحات گرافنی باعث افزایش سطح انتقال حرارت در روغن شده و در نتیجه رفتار حرارتی آن را ارتقا می دهد.
- رفتار ذاتی گرافن در انتقال حرارت به دلیل وجود الکترون های آزاد ساختاری به میزان حضورشان در روغن در مجموع باعث ارتقای رفتار حرارتی نانو سیال حاصل از آن می شود.
- پدیده شبکه ای شدن صفحات گرافنی که با افزایش غلظت گرافن در روغن تقویت و تکمیل می شود موجب دسترسی به ساختاری چند راهه درون روغن می گردد که مقاومت الکتریکی حرکت الکترونها را درون روغن کاهش می دهد.
- وجود نقایص ساختاری موجود بر سطح نانو صفحات گرافنی به عنوان سایت های فعالی عمل می کنند که باعث بهم ریختگی میدان الکترومغناطیس وارد شده بر روغن شده و الگوی منظم آنرا دستخوش تغییرات قرار می دهد در نتیجه اثر تخریبی این میدان بر رفتار هدایتی روغن کاهش می یابد و روغن با یکنواختی بیشتر رفتار هدایتی خود را به ظهور می رساند.

مدل سازی رفتار حرارتی ترانسفورماتور با در نظر گرفتن تابش خورشید در شرایط دمایی مختلف انجام گرفت و دمای ترانسفورماتور در دو حالت وجود تابش خورشید و حذف تابش مستقیم خورشید با دقت قابل قبولی پیش بینی شده و با نتایج تجربی مقایسه گردید و مشخص شد که مدل ارائه شده از دقت مناسبی برخوردار می باشد. بررسی نتایج تجربی و عددی نشان میدهد که نصب سایبان وحذف تشعشع مستقیم خورشید بر روی ترانسفورماتور، باعث کاهش دمای روغن می شود. معمولاً بیشترین کاهش دما درهنگام بعد از ظهر اتفاق می افتد که بیشترین مقدار جذب تابش خورشیدی وجود دارد. باکاهش دمای روغن انتظار می رودکه دمای سیم پیچ و نقطه داغ کاهش یافته و عمرترانسفورماتور افزایش یابد. نتایج تجربی و شبیه سازی نشان

www.SID.ir

Archive of SID

می دهد که هر چه بار ترانسفورماتور بیشتر باشد، اختلاف دمای ترانسفورماتور در دو حالت با و بدون سایبان کمتر می شود که این را می توان به علت کاهش نقش تابش خورشید در گرمایش ترانسفورماتور دانست .نتایج بدست آمده نشان می دهد که نصب سایبان بطور متوسط ۲۹٪ عمرترانسفورماتور را افزایش می دهد.

بررسی نتایج عددی نشان می دهد که تغییر رنگ بدنه ترانسفورماتور از سبز به سفید جذب انرژی خورشیدی راکاهش داده و باعث پایین آمدن دمای روغن ترانسفورماتورمی گردد. از نتایج عددی مشخص می شود در یک ترانسفورماتور که با بار۷۰٪ کار می کند، ۲۵٪ عمر آن با استفاده از رنگ سفید بر روی بدنه افزایش می یابد.

۸- منابع و مراجع

۱. ع .مطلبی،" ترانسفورماتور یک فاز و سه فاز تئوری وساختمان"، جلد اول، چاپ سوم، انتشارات دریا، ۱۳۶۹

۲. م .بهادری نژاد، س .میرحسینی،" ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران"، مقالات سومین همایش مصرف سوخت در ساختمان، بهمن ۱۳۸۲ ، ص ۶۰۳-۶۱۵

۳. ابراهیم حاجی دولو، محمد محمدیان فرد، امین رضا نقره آبادی، اردیبهشت ۱۳۸۸

۴. عزت سعیدی" - مروری بر فرسودگی و پیری روغن در ترانسفورماتورهای برق"، مجله برق شماره ۱۲،۱۳۸۸

۵. ا . قضاتلو ، س . عظیمی ملکی،" بررسی تغییرات و افزایش ولتاژ ترانسفورماتور بر رفتار حرارتی روغن ونقش گرافن در ارتقا و پایداری آن چهارمین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی، شهریور ۱۳۹۵

6. J.A. Duffie 1 and W.A. Beckman 2,Solar Engineering of Thermal Process, John Wily&Sons, New York. INC, 1980.

7. IEEE Standard , C57.91-1995,IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer , 1996

8. Daniel J.Tylavsky, Qing He, Gary A. McCulla and James R. Hunt "Sources of Error in Substation Distribution Transformer Dynamic Thermal Modeling" IEEE Trans. On Power Delivery,Vol. 15, No.1 , January 2000

9. J. Schlabbach 1, "Improvement of Permissible Loading of Transformers by Solar Shield", EUROCON 2003 Ljubljana Slovenia, PP. 305-309

10. F.M. Modest 1, Radiation Heat Transfer, 2nd Edition, Academic Press INC., 2003.

11. F.M. Modest 1, Radiation Heat Transfer, 2nd Edition, Academic Press INC. 2005.

12. L.Jauregui Rivera and D.J.Tylavsky"Acceptability of fourtransformer top-oil thermal models-Part 2: Comparing metrics,IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 2, April 2008, pp. 866–872

13. Jong-chul Leec ,Hyeon –Seok Seob , Youn-Jea Kimb,The increased dielectric break down voltage of transformer oil –based nanofluids by an external magnetic field, International Journal of Thermal Sciences , 62(2012) 29-33

14. M.Srinivasan , A.Krishnan "Effects of Enviromental Factors inTransformers Insulation Life" Wseas Trans. on Power Systems ,Volume 8, January 2013

15. Alina Marieta Simion, Hideaki Miyata, Mitsunori Kakeda, Naoyoshi Egashira, Yoshiharu Mitoma, Cristian Simion, Direct and complete cleansing of transformer oil contaminated by PCBs, Separation and Purification Technology, 103, 2013, 267-272.

16. C. Choi, H.S. Yoo, J.M. Oh, Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants, Current Applied Physics, 2008, 8, 710–712.

www.SID.ir

Archive of SID

Investigation and Review on Effective Thermal Factors in Reducing the Life of Transformer

Ali Hasani Azad[1], Gholamreza Tathiri[2], Vahid Monfared[3*]

1- Department of Mechanical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.
2- Ph.D., Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.
3- Ph.D., Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

* vahid_monfared@alum.sharif.edu

Abstract

Distribution transformers are designed to operate in an oil temperature range named the allowable range. This range depends on various factors such as the insulation class of the coils, the cooling fluid, the cooling method and the environmental conditions. If a transformer operates at a low temperature, its insulation life will increase. Based on this fact, it can be said that temperature is an important factor in transformer optimization. One of the major problems of the power distribution network is the overheating of the distribution transformers during the summer that resulted to failure and damage of that. Increasing the load due to the use of cooling devices and solar radiation on the transformers causes them to heat up and helps to increase its temperature. The normal life of transformer insulation is 85,000 hours, which is equivalent to 10 years for Class A insulation. This life is halved or doubled for every 8 degrees of rise or fall of the specified value. Hot spot temperature is one of the important and key parameters in determining the insulation life of the transformer. The hot spot temperature of the transformer depends on the ambient temperature, high oil temperature and coil temperature. Also, the temperature of the hot point of the coil is a function of wind speed, thermal radiation of the sun and the height of the transformer installation relative to the sea level. In the present article, the effect of oil type, solar radiation, color and external environmental factors on the heating of distribution motors is reviewed and investigated experimentally and analytically.

Keywords: Transformer, Thermal factors, Life time, Oil type, Solar radiation, Color and external environmental factors.

www.SID.ir