مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور جهت بررسی تاثیر دمای محیط بر روی عمر عایقی آن

عباس شیری[1] ، عباس شولایی و حسین نصیر اقدم

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه علم و صنعت ایران

[1]abbas_shiri@yahoo.com

واژه های کلیدی: دمای محیط- ترانسفورماتور- دمای نقطه داغ- عمر عایقی

چکیده

ترانسفورماتورها یکی از تجهیزات مهم موجود در سیستمهای قدرت بوده بطوری که عملکرد صحیح آنها نقش مهمی را در تامین قابلیت اطمینان این سیستمها ایفا می کند. با توجه به اتصال دائم ترانسفورماتورها به شبکه های توزیع و انتقال، هر نوع اقدام در جهت افزایش عمر آنها باعث بهبود در عملکرد سیستمهای قدرت شده و از نظر اقتصادی صرفه جویی های قابل توجهی را در پی خواهد داشت. در این میان عمده ترین عاملی که در عمر عایقی ترانسفورماتورها نقش دارد عامل دما، بخصوص دمای نقطه داغ عایق آن می باشد. برای تعیین دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، دمای محیط به طور مستقیم یا غیر مستقیم وارد معادلات می شود که این امر نشان دهنده اهمیت دمای محیط در تعیین عمر عایقی ترانسفورماتورها می باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این مقاله مدلی برای تخمین دمای نقطهٔ داغ ترانسفورماتورها ارائه شده و با استفاده از آن تاثیر تغییر دمای محیط بر روی دمای نقطه داغ و عمر عایقی ترانسفورماتور بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۱) مقدمه

با توجه به تعداد بیشمار ترانسفورماتورها در سیستمهای توزیع و قدرت، دستیابی به پیشرفتی هرچند کم در بهبود کارایی و طول عمر این گونه تجهیزات باعث صرفه جویی قابل ملاحظه در صنعت برق کشور می شود. عامل مهم تهدید کننده عمر عایقی و قابلیت بارگذاری ترانسفورماتورها عامل دما، بخصوص دمای روغن بالای کانال و دمای نقطه داغ آن می باشد. دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در دوره های مختلف کاری بایستی کمتر از مقدار پیش بینی شده باشد و به خاطر همین موضوع تمایل زیادی وجود دارد تا به طریقی دمای نقطه داغ را برای بارها و دماهای مختلف محیط در اختیار داشته باشیم. نظر به

اهمیت موضوع محاسبه دمای روغن بالای کانال و دمای نقطه داغ ترانسفورماتورها، مدلهای حرارتی مختلفی برای تخمین این دماها ارائه شده است. استاندارد IEEE مدلی بر پایه افزایش دمای روغن بالای کانال ترانسفورماتور نسبت به دمای محیط ارائه داده است[۱] که در این مدل تأثیر دمای محیط به خوبی در معادلات دیده نمی شود. مرجع [۲] با الگو گرفتن از مدل IEEE ، اثر دمای محیط را در معادلات وارد کرده است. در مرجع [۳] مدلی بر پایه اصول ترمودینامیک و انتقال حرارت ارائه شده است. مرجع [۴] مدلهایی بر اساس تکنیکهای برازش توابع ارائه و اثرات تابش آفتاب را در معادلات وارد کرده است. اخیراً مدلهای الکتریکی معادلی برای محاسبه دمای روغن و دمای نقطه داغ ارائه شده اند و با استفاده از آنها دمای روغن ترانسفورماتور تخمین زده شده است[۵]- [۸]. بالاخره مرجع [۹] خطاهای ممکن در مدلهای مختلف را بررسی و عامل عمده خطا در محاسبات را داده های ورودی به مدلها معرفی کرده است. با توجه به اهمیت تاثیر دمای محیط بر روی افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور و در نتیجه عمر عایقی آن، در این مقاله مدلی جدید برای تخمین دمای نقطهٔ داغ ترانسفورماتور ارائه شده و با استفاده از آن اثر تغییر دمای محیط بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور بررسی و مورد بحث قرار گرفته است.

۲) مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور

۲-۱) مدل IEEE (مدل افزایش دمای روغن بالای کانال نسبت به دمای محیط)

این مدل برای محاسبه اختلاف دمای روغن بالای کانال ترانسفورماتور و محیط ارائه شده است و از معادله دیفرانسیل زیر پیروی می کند[۱]:

$$T_o \frac{d\theta_o}{dt} = -\theta_o + \theta_u \qquad (۱)$$

معادله فوق دارای جوابی به صورت زیر می باشد:

$$\theta_o = (\theta_u - \theta_i)(1 - e^{-\frac{t}{T_o}}) + \theta_i \qquad (۲)$$

در معادلات فوق، θ_o و θ_i به ترتیب افزایش دمای بالای کانال روغن و افزایش دمای اولیه آن نسبت به محیط، T_o ثابت زمانی حرارتی و θ_u افزایش دمای نهایی نسبت به دمای محیط می باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\theta_u = \theta_{fl}\left(\frac{K^2R+1}{R+1}\right)^n \qquad (۳)$$

که در آن θ_{fl} افزایش دما در بار نامی نسبت به محیط، R نسبت تلفات بار نامی به تلفات بی باری، K نسبت جریان به جریان نامی و نمای n با توجه به سیستم خنک کاری ترانسفورماتور بین ۰/۸ تا ۱ تغییر می کند. اگر $R>1$ و $K^2R>1$ می توان معادله(۲) را به فرم گسسته زیر نوشت:

$$\theta_o[k] = K_1\theta_o[k-1] + K_2 I[k]^{2n} \qquad (۴)$$

با استفاده از تکنیکهای حداقل مربعات و داده های اندازه گیری شده ضرایب K_1 و K_2 محاسبه می شوند. برای سیستمهای خنک کاری تحت فشار، $n=1$ و معادله (۲) به صورت زیر در می آید:

$$\theta_o[k] = K_1\theta_o[k-1] + K_2 I[k]^2 + K_3 \qquad (۵)$$

با محاسبه θ_o می توان دمای نقطه بالای کانال روغن و از آن دمای گرمترین نقطه ترانسفورماتور را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$T_{hs} = \theta_o + \theta_{amb} + \Delta T_{hswo} \qquad (۶)$$

که در آن ΔT_{hswo} اختلاف دمای بین روغن بالای کانال و گرمترین نقطه ترانسفورماتور و θ_{amb} دمای محیط می باشد.

۲-۲) مدل حرارتی ارائه شده

با توجه به اینکه در مدل IEEE دمای محیط در معادلات وارد نشده، این مدل نمی تواند دمای بالای کانال روغن را با دقت خوبی تخمین بزند[۴]. برای بهبود میزان دقت تخمین می توان دمای محیط را در محاسبات وارد کرده و معادله (۱) را به صورت زیر اصلاح کرد:

$$T_o \frac{d\theta_{top}}{dt} = -\theta_{top} + \theta_u + \theta_{amb} \qquad (۷)$$

که دارای جوابی به صورت زیر است:

$$\theta_{top} = (\theta_u + \theta_{amb} - \theta_{topi})(1 - e^{-(t/T_o)}) + \theta_{topi} \quad (۸)$$

در معادلهٔ بالا θ_{top}، دمای روغن بالای کانال و θ_{topi}، دمای روغن بالای کانال برای t=0 می باشد. با استفاده از روش گسسته سازی اولر پیشرو به صورت زیر:

$$\frac{d\theta_{top}[k\Delta t]}{dt} = \frac{d\theta_{top}[k\Delta t] - d\theta_{top}[(k+1)\Delta t]}{\Delta t} \quad (۹)$$

و با استفاده از معادلهٔ (۳) و فرضهای بخش قبل ($K^2R > 1, R > 1$ و n=1) می توان معادلهٔ (۸) را به فرم گسسته زیر در آورد:

$$\theta_{top}[k] = K_1\theta_{top}[k-1] + (1-K_1)\theta_{amb} + K_2 I[k]^2 + K_3 \quad (۱۰)$$

می توان ضریب مستقل دیگری به جای $1+K_1$ تعریف کرده و عملکرد مدل را باز هم بهبود داد. با انجام اینکار به معادله زیر می رسیم:

$$\theta_{top}[k] = K_1\theta_{top}[k-1] + K_4\theta_{amb}[k] + K_2 I[k]^2 + K_3 \quad (۱۱)$$

با توجه به اینکه هدف ما در این مقاله بررسی تاثیر دمای محیط بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور می باشد، بایستی تاثیرات دمای محیط به صورت دقیق در مدل دیده شود. برای اینکار ضرایب دیگری برای دمای محیط با استفاده از داده های نمونه های قبلی که معمولاً در اختیار می باشند، تعریف می کنیم؛ با انجام اینکار به مدل زیر برای دمای روغن بالای کانال می رسیم:

$$\theta_{top}[k] = K_1\theta_{top}[k-1] + K_2 I[k]^2 + K_3 + K_4\theta_{amb}[k] + K_5\theta_{amb}[k-1] + K_6\theta_{amb}[k-2] \quad (۱۲)$$

با توجه به خطی بودن رابطهٔ فوق، مقادیر ضرایب K_1 تا K_6 را می توان با استفاده از روش حداقل مربعات بدست آورد.

بدست آوردن ضرایب مدل با استفاده از داده های واقعی

برای اعتبار سنجی مدل، از داده های واقعی یک ترانسفورماتور ۱۸۰ MVA و ۲۳۰/۶۳ kV که در طی ۷۰۰ ساعت کار در زیر بارهای مختلف در مرداد ماه بدست آمده، استفاده شده است. این داده ها در شکل ۱ نشان داده شده اند. برای بدست آوردن ضرایب مدل با استفاده از روش حداقل مربعات از نرم افزار matlab استفاده شده است. با توجه به رابطهٔ (۱۲) ورودیهای مسأله، بار کشیده شده از ترانسفورماتور، دمای روغن بالای ترانسفورماتور و دمای محیط می باشند. مقادیر بدست آمده برای ضرایب K_1 تا K_6 در جدول ۱ داده شده اند.

جدول ۱- ضرایب K بدست آمده برای مدل ارائه شده

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
۰/۷۵۳	۶/۹۹۵	۸/۱۰۱	۰/۰۹۸	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۳۲

به طوری که ملاحظه می شود هر چند ضرایب K_5 و K_6 دارای مقادیر کوچکی هستند ولی می توانند دقت تخمین را بالا ببرند.

برای اطمینان از صحت مدل ، با استفاده از ضرایب بدست آمده و با فرض اینکه دمای محیط و بار ترانسفورماتور معلوم می باشند، اقدام به تخمین دمای روغن بالای کانال در ترانسفورماتور کردیم که نتایج آن همراه با داده های واقعی در شکل ۲ نشان داده شده است. میزان خطای تخمین در پایین شکل ۲ نشان داده شده است و حداکثر خطای مدل برابر $1/67^{\circ}C$ بدست آمده است.

محاسبهٔ دمای نقطهٔ داغ

با استفاده از دمای تخمین زده شده توسط مدل پیشنهادی (رابطهٔ (۱۲))، می توان دمای نقطهٔ داغ را از رابطهٔ زیر محاسبه کرد[۱]:

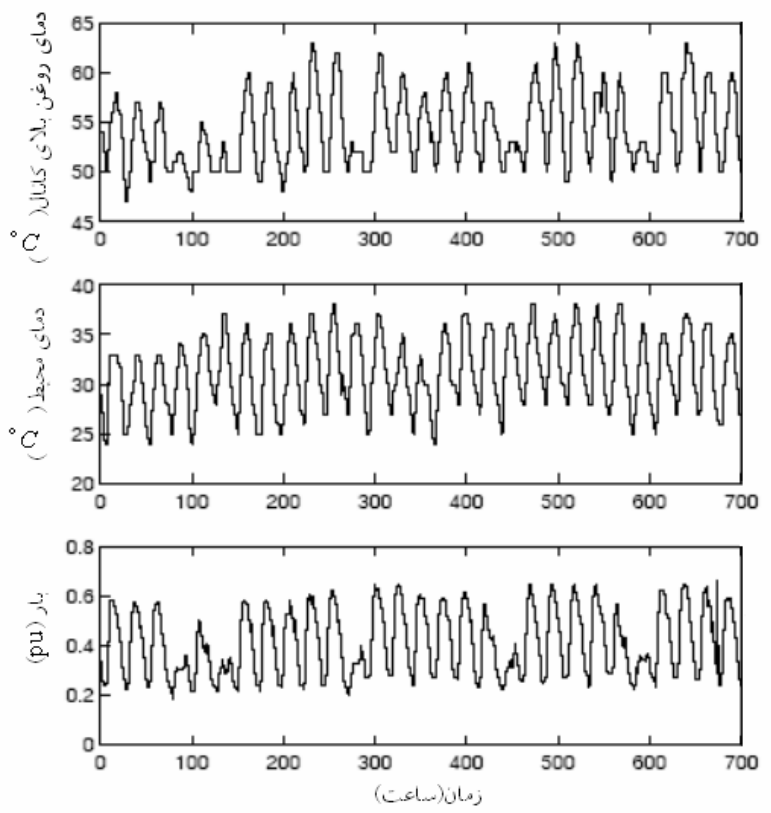
$$\theta_h = \theta_{top} + \theta_{hm}K^{2m} \quad (۱۳)$$

که در آن θ_{hm}، حداکثر دمای نقطهٔ داغ در بار نامی است که توسط سازنده داده می شود و برای ترانسفورماتور مورد مطالعه در این مقاله برابر $19/7^{\circ}C$ می باشد. K، نسبت جریان به جریان نامی و مقدار m بسته به نوع سیستم خنک کنندهٔ مورد استفاده، می تواند بین ۰/۸ تا ۱ تغییر

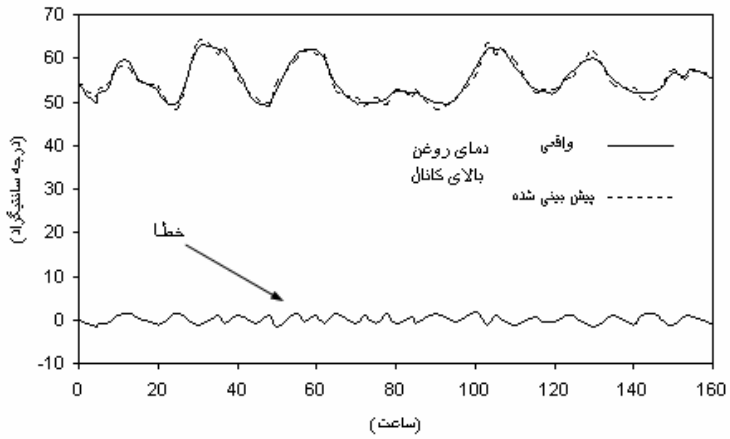
نماید. برای سیستم خنک کننده با گردش اجباری هوا و روغن m برابر یک می باشد.

۳) عمر عایقی ترانسفورماتور

پیری یا خرابی عایقی تابعی زمانی از دما رطوبت و اکسیژن موجود می باشد. با سیستمهای خنک کاری مدرن امروزی می توان تاثیر عوامل دوم و سوم در پیری عایقی را حداقل کرد ولی عامل دما تهدید کننده اصلی عایق ترانسفورماتورها بوده و نباید از حد معینی تجاوز نماید. با توجه به عدم توزیع یکنواخت دما در عایق ترانسفورماتور، قسمتی از عایق که دارای حداکثر دماست در معرض بیشترین تخریب قرار دارد، بنابراین در مطالعات پیری معمولا گرمترین نقطه عایقها که به دمای نقطه داغ معروف است بررسی می شود.



شکل ۱- داده های واقعی ورودی به مدل



شکل ۲- مقایسهٔ دمای روغن بالای کانال حاصل از مدل و نمونه های واقعی

معادلات پیری

شواهد تجربی نشان می دهد که عمر عایقی ترانسفورماتورها با افزایش دمای نقطه داغ از حد مجاز، کاهش یافته و از رابطه نمایی زیر پیروی می کند[۱]:

$$\text{عمرعایقی برحسب پریونیت} = Ae^{\frac{B}{\theta_h + 273}} \qquad (۱۴)$$

در معادله بالا θ_h دمای نقطه داغ سیم پیچی بر حسب درجه سانتیگراد و A و B ضرایب ثابتی هستند که با توجه به کلاس عایقی و دمای مبنا که عمر عایق نسبت به آن دما سنجیده می شود، تعیین می شوند. این رابطه برای هر دو نوع ترانسفورماتور توزیع و قدرت بکار می رود چرا که عایقهای به کار رفته در هر دو نوع معمولاً از جنس سلولز یا پرسبورد می باشد. برای نمونه اگر دمای نقطه داغ مبنا برای عمر عایقی ۱۱۰ درجه سانتیگراد باشد به این معنی است که اگر ترانسفورماتور با این دما به طور مداوم کار کند طول عمر آن ۱ پریونیت خواهد بود (عمر به ساعت نیز با توجه به جنس عایق به کار رفته تعیین می شود). با این فرض ضرایب A و B قابل محاسبه بوده و رابطه (۱۴) بصورت زیر خواهد شد:

$$\text{عمرعایقی برحسب پریونیت} = 9.8*10^{-18} * e^{\frac{15000}{\theta_h+273}} \qquad (۱۵)$$

اگر تغییرات عمر عایقی را به ازای تغییر دماهای نقطهٔ داغ محاسبه کنیم ملاحظه می شود که عمر عایقی در دماهای نزدیک به ۱۹۰ درجه به کمتر از ۰/۰۰۱ پریونیت کاهش می یابد؛ این موضوع اهمیت بحث پیرامون دمای نقطهٔ داغ در ترانسفورماتور را آشکار می سازد. همچنین می توان با استفاده از معادلهٔ (۱۵) ضریبی به عنوان ضریب تسریع پیری برای عایق ترانسفورماتور تعریف کرده و با استفاده از آن اثر تغییر دمای نقطه داغ سیم پیچی را بر روی عمر عایقی بررسی کرد. ضریب تسریع پیری نسبت به دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F_{aa} = e^{[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_h+273}]} \qquad (۱۶)$$

از رابطهٔ بالا ضریب تسریع پیری در ۱۱۰ درجه سانتیگراد برابر ۱ بوده و نشان می دهد که در این دما عایق عمر معمولی خود را سپری می کند ولی با افزایش هر ۷ درجه در دمای نقطه داغ، ضریب تسریع پیری تقریبا دو برابر می شود یعنی عمر عایقی با افزایش ۷ درجه در دمای نقطه داغ، تقریباً نصف می شود.

رابطه (۱۶) ضریب تسریع پیری را با این فرض بدست می دهد که دمای θ_h در طول عمر عایق ثابت باشد ولی در عمل دمای نقطه داغ با توجه به میزان بار و دمای محیط مقادیر متفاوتی را به خود می گیرد و بایستی این موضوع در تعیین عمر عایقی مورد توجه قرار گیرد. به این منظور ضریب تسریع پیری معادل تعریف می شود و برابر است با:

$$F_{Eaa} = \frac{\sum_{n=1}^{N} F_{aa,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^{N} \Delta t_n} \qquad (۱۷)$$

که در آن F_{Eaa} ضریب تسریع پیری معادل برای کل دوره زمانی، N تعداد فواصل زمانی که در آنها دمای نقطه داغ ثابت فرض می شود، Δt_n فاصله زمانی nام و $F_{aa,n}$ ضریب تسریع پیری در فاصله Δt_n می باشند.

۴) اثر دمای محیط بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور

دمای محیط یکی از عوامل مهم در تعیین عمر عایقی ترانسفورماتور می باشد چرا که با افزایش دمای محیط، دمای نقطه داغ سیم پیچیها افزایش یافته و باعث کاهش عمر عایق می شود. چنانکه در بخش ۳ دیدیم افزایش دمای نقطه داغ به میزان ۷ درجه باعث کاهش عمر عایق به نصف مقدار قبلی می شود. در این بخش با استفاده از مدل ارائه شده، اثر تغییر دمای محیط را بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور بررسی می کنیم. بدین منظور ابتدا دمای نقطهٔ بالای کانال ترانسفورماتور را با استفاده از رابطهٔ (۱۲) برای دمای محیط و بار داده شده بدست آوردیم سپس دمای نقطهٔ داغ را از رابطهٔ (۱۳) محاسبه کردیم. این کار

برای دماهای مختلف محیط انجام شده که نتایج آن همراه با تغییرات طول عمر عایقی ترانسفورماتور و ضریب تسریع پیری در جدول ۱ داده شده است (دمای مبنا برای عمر عایقی ۱۱۰ درجه سانتیگراد می باشد). در بدست آوردن جدول ۱ به این ترتیب عمل شده که متوسط دمای محیط برای هر چهار ساعت محاسبه و در ستون اول قرار داده شده است. به طوری که در بخش قبل نیز عنوان شد برای محاسبات پیری بایستی از رابطهٔ (۱۷) یعنی از ضریب تسریع پیری معادل استفاده نماییم. یعنی:

$$F_{Eaa} = (.2745 + .3507 + .3753 + .5124 + .5205 + .7604 + .7877 + 1.1051) * 4/(8 * 4) = .5858$$

ضریب بدست آمده برای ضریب تسریع پیری معادل برابر ۰/۵۸۵۸ است که مقدار قابل قبولی است. حال اگر ترانسفورماتور مورد مطالعه را در مکانی گرمتر نصب کنیم به طوری که دمای محیط در آن در بارهای متناظر با حالت مطالعه شده، مطابق ستون اول جدول ۲ باشد، دمای نقطهٔ داغ و ضریب تسریع پیری با استفاده از مدل پیشنهادی به صورت جدول ۲ بدست می آید. ضریب تسریع پیری معادل در این مورد برابر ۲/۰۱۷۴ می باشد با مقایسهٔ نتایج دو حالت مشاهده می شود که درصد ضریب تسریع پیری معادل از مقدار ۰/۵۸۵۸ در حالت اول به مقدار ۲/۰۱۷۴ در حالت دوم برای منطقه ای گرمتر افزایش یافته است و این بدان معنی است که اگر دو ترانسفورماتور مشابه (از نظر طراحی) از نوع ترانسفورماتور مورد مطالعه در دو نقطه مختلف کشور با تفاوت میانگین دمایی ۱۶ درجه داشته باشیم، عمر عایقی ترانسفورماتوری که در منطقه با دمای بالا کار می کند تقریباً ۳/۴۴ برابر کمتر از ترانسفورماتوری است که در منطقه با دمای پایین کار می کند. این نتیجه هر چند برای نوع خاصی از ترانسفورماتور بدست آمده است ولی می توان به سایر ترانسفورماتورها نیز که دارای سیستم خنک کاری مشابه و جنس عایقی یکسانی هستند، اعمال کرد.

جدول(۱) تغییرات دمای نقطه داغ، ضریب تسریع پیری و عمر عایقی ترانسفورماتور(مورد مطالعه) با تغییر دمای محیط

در صد عمر عایقی (پریونیت)	ضریب تسریع پیری، F_{aa}	دمای نقطه داغ، θ_{hs} (درجه سانتیگراد)	دمای محیط، θ_{amb} (درجه سانتیگراد)
۳/۶۴۴۸	۰/۲۷۴۵	۹۷/۷۶	۲۳
۲/۸۵۲۴	۰/۳۵۰۷	۱۰۰/۰۲	۲۵
۲/۶۶۵۴	۰/۳۷۵۳	۱۰۰/۶۵	۲۷
۱/۹۵۲۴	۰/۵۱۲۴	۱۰۳/۵۷	۲۹
۱/۹۲۱۷	۰/۵۲۰۵	۱۰۳/۷۲	۳۱
۱/۳۱۵۵	۰/۷۶۰۴	۱۰۷/۳۴	۳۳
۱/۲۷۰۰	۰/۷۸۷۷	۱۰۷/۶۸	۳۵
۰/۹۰۵۲	۱/۱۰۵۱	۱۱۰/۹۸	۳۷

جدول(۲) تغییرات دمای نقطه داغ، ضریب تسریع پیری و عمر عایقی ترانسفورماتور(نصب شده در محیط آب هوایی گرمتر) با تغییر دمای محیط

در صد عمر عایقی (پریونیت)	ضریب تسریع پیری، F_{aa}	دمای نقطه داغ، θ_{hs} (درجه سانتیگراد)	دمای محیط، θ_{amb} (درجه سانتیگراد)
۰/۷۵۶۶	۱/۳۲۲۱	۱۱۲/۷۵	۳۹
۰/۶۰۵۷	۱/۶۵۱۵	۱۱۴/۹۷	۴۱
۰/۶۰۲۱	۱/۶۶۱۴	۱۱۵/۰۳	۴۳
۰/۴۵۱۱	۲/۲۱۷۶	۱۱۷/۹۵	۴۵
۰/۴۴۳۶	۲/۲۵۴۹	۱۱۸/۱۲	۴۷
۰/۳۱۹۱	۳/۱۳۵۰	۱۲۱/۵۱	۴۹
۰/۳۱۴۲	۳/۱۸۳۷	۱۲۱/۶۷	۵۱
۰/۲۵۶۷	۳/۸۹۶۸	۱۲۳/۷۸	۵۳

۵) نتیجه گیری

در این مقاله مدلی جدید برای تخمین دمای روغن بالای کانال ترانسفورماتور ارائه و با استفاده از این مدل، تاثیر تغییر دمای محیط بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته است. مدل حرارتی ارائه شده هر چند برای بررسی تاثیر دمای محیط بر روی عمر عایقی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گرفته است ولی مدلی کامل بوده و می تواند برای پیش بینی دمای روغن بالای کانال نیز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش دمای محیط به میزان ۱۶ درجه سانتیگراد می تواند عمر عایقی ترانسفورماتور را تا ۳/۴ برابر کاهش دهد؛ با توجه به این موضوع و با توجه به تنوع آب و هوایی و اختلاف فاحش دمای هوا در نقاط مختلف کشور، استفاده از ترانسفورماتورها با طراحی مشابه در نقاط مختلف می تواند دارای محدودیتهایی باشد و بایستی در طراحی این گونه ترانسفورماتورها و یا در سیستم خنک کاری آنها با توجه به منطقهٔ نصبشان، این مساله مورد توجه قرار گیرد.

۶) مراجع

[1] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers", IEEE Standard C57.91-1995.

[2] B. C. Lesieutre, W.H. Hagman and J.L. Kirtley, "An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 249–256, Jan. 1997.

[3] L. W. Pierce, "Predicting liquid filled transformer loading capability," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 1, pp. 170–178, Jan. /Feb. 1994.

[4] D.J. Tylavsky, Quin He, J. Si, G.A. McCulla and J.R. Hunt, "Transformer Top-Oil Temperature Modeling and Simulation", IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. 36, NO. 5, Sept. /Oct. 2000.

[5] G. Swift, T.S. Molinski, and W. Lehn, "A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling—Part I: Theory and Equivalent Circuit", IEEE Tran. On Power Delivery, VOL. 16, NO. 2, APRIL 2001.

[6] Z. Radakovic and K. Feser, "A New Method for the Calculation of the Hot-Spot Temperature in Power Transformers with ONAN Cooling", IEEE Tran. On Power Delivery, VOL. 18, NO. 4, October 2003.

[7] Z. Radakovic, E. Cardillo and K. Feser, " Algorithm of the microprocessor thermal protection of oil power transformers" , Eighth IEE Conference on Developments in Power System Protection, Volume 1, pp: 380-383. April 2004.

[8] G. Swift, T.S. Molinski, and W. Lehn, "A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling. II: Field Verification", IEEE Tran. On Power Delivery, VOL. 16, NO. 2, pp: 176-180, APRIL 2001.

[9] D.J. Tylavsky, Qing He, G.A. McCulla, and James R. Hunt, “Sources of Error in Substation Distribution Transformer Dynamic Thermal Modeling”, IEEE Tran. On Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000.