

مدل سازی حرارتی سیم پیچهای ترانسفورمرها با استفاده از کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی در یک محیط المان محدود

چکیده:

محاسبه مولفه های مختلف تلفات ترانسفورمرها توسط روشهای محاسباتی به علت پیچیدگی هندسه ساختمان ترانسفورمرها، وابسته بودن خواص مواد به کار رفته با درجه حرارت و غیر خطی بودن رفتار مغناطیسی آنها معمولا مشکل می باشد. در این بین استفاده از روشهای عددی همانند المان محدود یک روش کارآمد برای محاسبه و پیشگویی این تلفات به منظور محاسبه گرمترین درجه حرارت ترانسفورمر می باشد. در این مقاله یک مدل دو بعدی (2D) مغناطیسی و حرارتی برای پیشگویی حداکثر درجه حرارت سیم پیچی ترانسفورمرها ارائه شده است. مدل به کار رفته برای مطالعه حرارتی حالت ماندگار و گذرای سیم پیچهای فشار قوی و ضعیف به کار خواهد رفت. واژه های کلیدی: ترانسفورمر، المان محدود، گرمترین نقطه، میدانهای مغناطیسی

مقدمه:

ترانسفورمرها از قطعات مهم سیستمهای قدرت و توزیع می باشند، به طوری که مطالعه رفتار مغناطیسی به همراه رفتار حرارتی قسمتهای مختلف آنها دارای اهمیت بسزائی می باشد. قسمتهای مختلف یک ترانسفورمر منجمله سیم پیچها توسط تلفات داخلی سیستم همانند تلفات dc و تلفات ادی سیم پیچها شروع به گرم شدن می نمایند. محاسبه این تلفات توسط روشهای عددی همانند روش المان محدود توسعه یافته است [۱]، [۲]. حداکثر درجه حرارت مجاز قسمتهای مختلف یک ترانسفورمر تحت انواع مختلف بارگذاری برای ترانسفورمرها غوطه ور در روغن توسط استانداردهای IEEE معرفی و محاسبه گردیده اند. مطابق با این استانداردها عمر عایقی ترانسفورمرها کاملا در ارتباط با درجه حرارت می باشد [۳]، [۴]. مشخصات مواد به کار برده شده در ساختمان ترانسفورمرها عموما ثابت نبوده و تابع درجه حرارت می باشد [۵]. به عنوان مثال مقاومت مخصوص مس ممکن است به ازای یک بازه تغییرات ۱۰۰ درجه ای به میزان ۳۰٪ تغییر نماید. بنابراین کل تلفات ایجاد شده در قسمتهای مختلف ترانسفورمرها معمولا ثابت نبوده و تابع درجه حرارت می باشد. بنابراین استفاده از کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی برای محاسبه تلفات و توزیع حرارت در ترانسفورمرها الزامی می باشد [۶]، [۷]. در این مقاله مطالعه مغناطیسی و حرارتی یک ترانسفور توزیع ۵۰ KVA که دارای ۷۲ عدد سیم پیچ از نوع فویلی در طرف فشار ضعیف می باشد به منظور یافتن حداکثر درجه حرارت سیم پیچهای آن مورد نظر می باشد. اطلاعات مربوط به ابعاد و تلفات سیم پیچهای این ترانسفورمر در مرجع [۸] آورده شده است.

توسعه معادلات الکترومغناطیس در یک محیط المان محدود:

با فرض وابسته بودن مشخصات الکتریکی مواد با درجه حرارت، صورت کلی معادله پواسن در مورد یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان به صورت زیر بیان می شود.

$$\nabla \cdot (\nu_r(T) \nabla A) - \mu \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial T} = -\mu J_0 \quad (1)$$

در یک محیط دو بعدی، A مولفه Z از پتانسیل مغناطیسی متغیر با زمان بوده که به صورت زیر تعریف می شود.

$$A(t) = A.e^{j\omega t} \quad (2)$$

با فرض استفاده از مختصات کارتزین معادله ۱ به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -J_0 + j\omega \sigma A \quad (3)$$

در روابط بالا μ ضریب نفوذ مغناطیسی، σ رسانائی الکتریکی و J_0 چگالی جریان کل سیم پیچها بوده که شامل دو مولفه چگالی جریانهای منبع و جریانهای ادی می باشد.

معادلاتی که رفتار یک میدان مغناطیسی را در محیط المان محدود بیان می دارند بایستی توسط یک سری شرایط مرزی محدود گردند. بر طبق شرط مرزی نیومن برای آنکه حل المان محدود یک مساله الکترومغناطیس یک جواب منحصر به فرد داشته باشد بایستی مشتق عمود آن پارامتر در هر نقطه از مرز برابر صفر باشد. یعنی

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

توسعه معادلات حرارتی در یک محیط المان محدود:

گرادینان گرمائی ایجاد شده در اثر وجود شار گرمائی در مورد یک جسم همگن تک بعدی بر طبق قانون فوریه را می توان به صورت زیر نوشت.

$$Q = -\lambda \nabla T(x, t) \quad (5)$$

در رابطه بالا T درجه حرارت ماده و λ ضریب هدایت حرارتی ماده بوده و وابسته به درجه حرارت می باشد. بر طبق قانون بقای انرژی حرارتی، هنگامی که شار حرارتی خارج شده از یک جسم در مقایسه با نرخ تولید انرژی در واحد حجم آن جسم (q) کمتر باشد، دمای جسم شروع به کاهش می یابد. یعنی

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T(x, t)) + q = \rho \cdot c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (6)$$

تحلیل مسائل انتقال حرارت نیازمند دانستن شرایط مرزی و اولیه مناسب می باشد. در تحلیل حرارتی یک مساله مفروض بسته به هندسه مساله و محیط مورد بررسی، سه نوع شرط مرزی زیر ممکن است تعیین شود.

۱- شرط مرزی با دمای معلوم برای سطح

در بعضی از موارد دمای سطح مرزی معلوم بوده به طوری که مقدار آن می تواند در طول تحلیل ثابت باقی مانده یا تغییر نماید. به عنوان نموده با فرض معلوم بودن دما در سطح D

$$T|_D = T_0 \quad (7)$$

۲- شرط مرزی با شار حرارتی معلوم برای سطح

معلوم بودن شار حرارتی بر روی سطح D بر طبق شرط مرزی نیومن میتواند به صورت زیر بیان شود.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_D = Q_N \quad (8)$$

برای مشخص نمودن یک سطح عایق که قابلیت انتقال حرارت آن صفر است معادله بالا به صورت همگن قابل تعریف می باشد.

۳- شرط مرزی با معلوم بودن ضریب همرفت برای سطح

در بسیاری از کاربردها انتقالات گرما به محیط اطراف آن از طریق همرفت انجام می گیرد. این کار به خاطر وجود اختلاف دمای سطح و دمای سیال اطاف آن می باشد. بیان ریاضی این شرط مرزی از موازنه انرژی به صورت بیان می شود.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_D = h(T - T_{\infty}) \quad (9)$$

در رابطه بالا T_{∞} درجه حرارت سیال و h ضریب انتقال همرفتی برای سطح مورد نظر می باشد.

مدل مغناطیسی دو بعدی سیم پیچها (2D model)

سیم پیچهای ترانسفورماتورها معمولاً جزو ظرفیترین قسمتهای ترانس در مدل سازی المان محدود می باشند. آنها معمولاً برای مدل سازی تلفات ژول وادی ناشی از سیم پیچها و انتقالین تلفات به میدانهای حرارتی به کار برده می شوند. در شرایط اعمال بار به ثانویه ترانس جریان سیم پیچهای اولیه و ثانویه افزایش یافته و به تبع آن شار پراکندگی سیم پیچها نیز افزایش می یابد. تلفات حالت بارداری ترانسها شامل دو مولفه کلی می باشد. مولفه اول ناشی از تلفات سیم پیچها و مولفه دوم ناشی از وجود چگالی جریانهای ادی سیم پیچها به علت وجود شارهای مغناطیسی ناشی می باشد که به تلفات ناشی از شارهای پراکنده یا تلفات ادی مرسوم می باشد. عموماً دو مدل کلی برای مدلسازی سیم پیچهای ترانسفورماتورها در محیط المان محدود قابل تعریف می باشد. یکی استفاده از سیم پیچهای رشته ای (Stranded Coil) و دیگری استفاده از سیم پیچهایی به صورت شمشهای توپر (Massive conductor) می باشد.

۱- سیم پیچهای نوع رشته ای

در این حالت کویلها از یک سری سیم پیچها با سطح مقطع بسیار بزرگتر از عمق نفوذ مجموعه تشکیل شده اند به طوری که تقسیم سطح مقطع هر هادی به تعدادی مش جداگانه لازم نمی باشد. به علت کوچک بودن سطح مقطع سیم پیچها از اثر تلفات ادی ناشی از شارهای ناشی ترانس صرف نظر می گردد. از این مدل بیشتر برای مدل سازی سیم پیچهای فشار قوی که دارای سیم پیچهایی با سطح مقطع کوچکتر و تعداد دور بیشتر می باشند استفاده می شود

۲- سیم پیچهای نوع شمشی

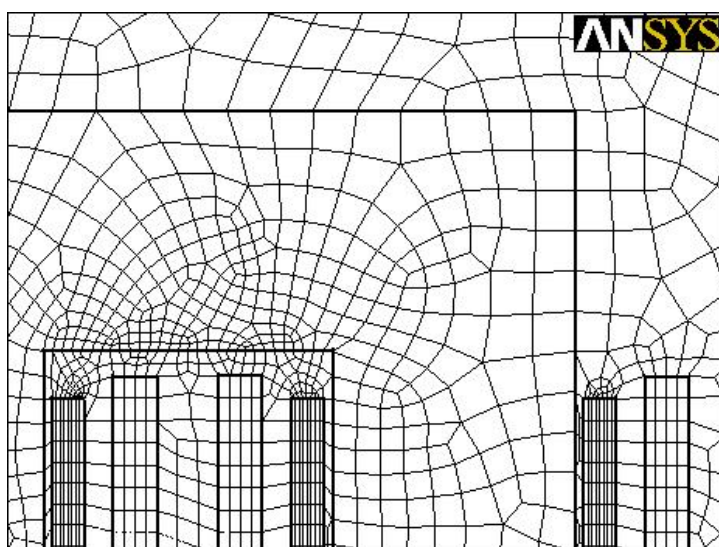
از این مدل بیشتر زمانی که تلفات ناشی از شارهای پراکنده بر روی سیم پیچها مهم باشد استفاده می شود. در این حالت به منظور مدل سازی چگالی جریانهای ادی، هرکدام از سیم پیچها به طور مجزا مش بندی می شوند. در این حالت المانهای به کار برده شده بایستی دارای ابعادی کوچکتر از عمق نفوذ باشند. از این روش بیشتر برای مدلسازی سیم پیچهای فشار ضعیف که دارای سطح مقطعی بسیار بزرگتر از عمق نفوذ می باشند استفاده میشود.

از آنجائی که سیم پیچهای فشار قوی دورتر از سطح هسته قرار گرفته اند و اثر شارهای ناشی بر روی آنها بسیار ضعیف می باشد لذا از تلفات ادی این سیم پیچها می توان صرف نظر نمود. بنابر این لزومی به یکسان بودن مدل به کار برده شده در سیم پیچهای فشار قوی و ضعیف وجود ندارد.

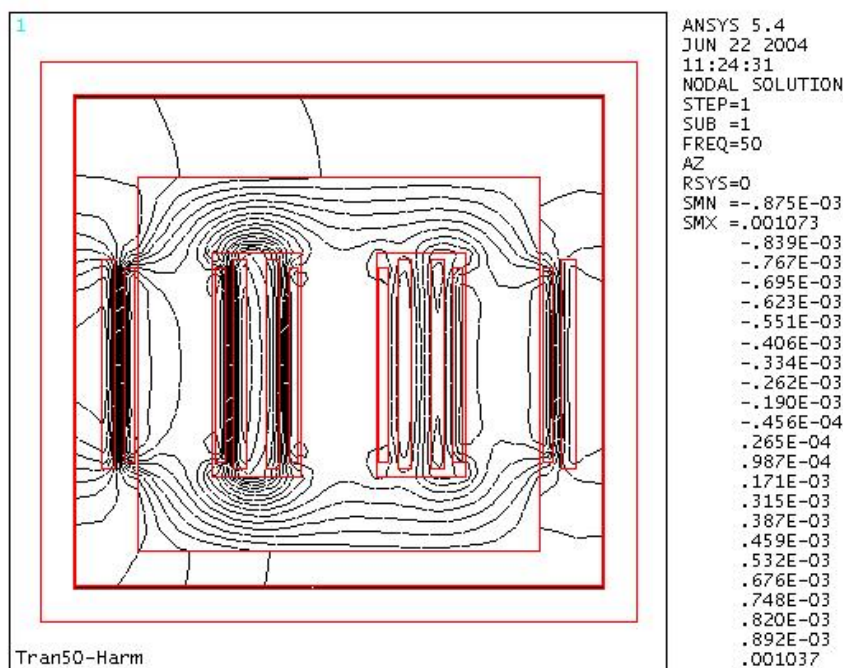
شکل ۱، یک چهارم از سطح مقطع مدل دوبعدی (2D) ترانس سه فاز مورد مطالعه را به همراه مش بندی سیم پیچهای اولیه و ثانویه آن نشان می دهد. قسمت داخلی مربوط به سیم پیچهای فشار ضعیف و از نوع شمشی و قسمت خارجی مربوط به سیم پیچهای فشار قوی و از نوع رشته ای می باشد.

آنالیز مغناطیسی برای بدست آوردن تلفات سیم پیچها

برای تعیین مولفه های تلفات حالت بارداری نظیر تلفات dc تلفات ناشی از تاثیر شارهای نشتی در سیم پیچها و به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی المان محدود این تلفات با نتایج اندازه گیری شده [۸]، مدل دو بعدی این ترانس در حالت اتصال کوتاه و در یک محیط المان محدود مورد شبیه سازی قرار گرفت. شکل ۲ توزیع مولفه های حقیقی خطوط شار مغناطیسی داخل هسته و اطراف سیم پیچها در مدل اتصال کوتاه این ترانس را نشان می دهد. مقدار واقعی تلفات dc و ادی سیم پیچها به منظور مقایسه با مقادیر محاسبه شده این کمیتها توسط محیط المان محدود در جدول ۱ آورده شده اند.



شکل ۱ - یک چهارم از سطح مقطع مدل دوبعدی یک ترانس به همراه مش بندی سیم پیچها و هسته



شکل ۲ - مولفه حقیقی خطوط شار مغناطیسی داخل هسته و اطراف سیم پیچها در مدل اتصال کوتاه ترانس

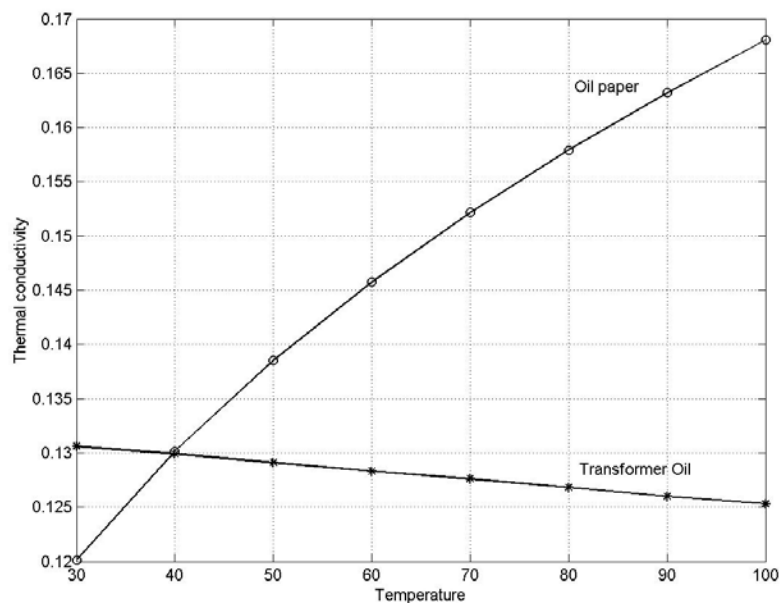
مقدار تلفات	مقدار واقعی تلفات (وات)	تلفات محاسبه شده توسط مدل المان محدود (وات)
dc سیم پیچهای فشار ضعیف	۳۸۴/۹۲	۳۹۴/۴۶
dc سیم پیچهای فشار قوی	۵۳۴/۷۳	۵۳۹/۷۲
ادی سیم پیچهای فشار ضعیف	۶۴/۳۸	۸۰/۰۷
ادی سیم پیچهای فشار قوی	۱/۳۸	-

جدول ۱- مقدار واقعی تلفات dc و ادی سیم پیچها به همراه مقادیر محاسبه شده این کمیتهها توسط محیط المان محدود

مدل حرارتی دو بعدی سیم پیچها:

مشخصات حرارتی مواد هادی و عایق به کار رفته در ترانسفورمرها عموماً ثابت نبوده و تابعی از درجه حرارت می باشد. به عنوان نمونه تغییرات ضریب هدایت حرارتی روغن و یک نوع کاغذ آغشته به روغن که به عنوان عایق بین سیم پیچها مورد استفاده قرار می گیرد در شکل ۳ نشان داده شده است.

مدل سازی حرارتی تک تک سیم پیچهای ترانسفورمرها در محیط المان محدود به خاطر بالا بودن تعداد دور سیم پیچها و متفاوت بودن مشخصات عایقی مواد به کار رفته در آنها مشکل و غالباً غیر ممکن می باشد. همچنین به خاطر متفاوت بودن نحوه پیچی و ابعاد هادی های به کار رفته در سیم پیچهای فشار قوی و فشار ضعیف، استفاده از یک مدل واحد به منظور مطالعه حرارتی آنها ممکن نمی باشد



شکل ۳- تغییرات تغییرات ضریب هدایت حرارتی روغن و یک نوع کاغذ آغشته به روغن با درجه حرارت

۱- مدل حرارتی سیم پیچهای فشار قوی

در مورد سیم پیچهای فشار قوی به خاطر استفاده از سیم پیچهای نوع رشته ای و به علت متقارن بودن توزیع مواد هادی و عایقی استفاده شده در آنها رفتار کل سیم پیچها را می توان همانند یک جسم همگن با مشخصات حرارتی معادل که به صورت زیر تعریف می شود در نظر گرفت.

$$\lambda^{AB} = \frac{\lambda^A V^A + \lambda^B V^B}{V^A + V^B} \quad \text{و} \quad C^{AB} = \frac{C^A \rho^A V^A + C^B \rho^B V^B}{\rho^A V^A + \rho^B V^B} \quad \text{و} \quad \rho^{AB} = \frac{\rho^A V^A + \rho^B V^B}{V^A + V^B} \quad (10)$$

λ ضریب هدایت گرمائی ($W.m^{-1}.c^{-1}$)

C ظرفیت حرارتی ($J.kg^{-1}.c^{-1}$)

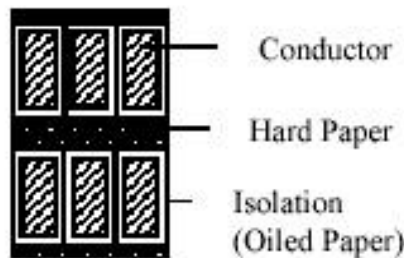
ρ چگالی حجمی ($Kg.m^{-3}$)

V حجم جسم (m^3)

بالا نویس های B,A در رابطه ۱۰ به ترتیب نشان دهنده محیط هادی و عایق اطراف آنها می باشد.

۲- مدل حرارتی سیم پیچهای فشار ضعیف

در سیم پیچهای فشار ضعیف به خاطر استفاده از سیم پیچهای فویلی و نیز به خاطر متفاوت بودن ضخامت لایه عایقی به کار رفته در امتداد y,x، رفتار حرارتی کل سیم پیچها نمی تواند همانند یک جسم همگن در نظر گرفته شود. بنابر این سیم پیچهای فشار ضعیف را می توان همانند یک جسم غیر همگن با ضریب هدایت حرارتی متفاوت در امتداد y,x تصور نمود. شکل ۴ سطح مقطع این نوع سیم پیچی را نشان می دهد.



شکل ۴- سطح مقطع سیم پیچهای فشار ضعیف

با توجه به اینکه ارتفاع کل سیم پیچهای فشار ضعیف در مقایسه با عرض آنها بسیار بیشتر می باشد، با تقریب می توان تصور نمود که شار حرارتی ایجاد شده ناشی از تلفات سیم پیچها فقط در جهت x و عمود بر ارتفاع سیم پیچها انتقال می یابد. بنابر این گرادیان دما در جهات z,y نسبت به مقدار آن در جهت x ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد. شار حرارتی در جهت x از سیم پیچها توسط دو ضریب هدایت حرارتی متفاوت λ_y, λ_x منتقل می شود. λ_x ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت عمود بر فویلها بوده و به صورت هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی سری که شامل هادی و عایق می باشد تعریف می گردد. یعنی

$$\lambda_x = \frac{(d_A + d_B)}{\left(\frac{d_A}{\lambda_A} + \frac{d_B}{\lambda_B}\right)} \quad (11)$$

در رابطه بالا d نشان دهنده ضخامت محیط مورد نظر می باشد. λ_y ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت فویلها بوده و به صورت هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی موازی که شامل هادی و عایق می باشد تعریف می گردد. یعنی

$$\lambda_y = \frac{(\lambda_A d_A + \lambda_B d_B)}{(d_A + d_B)} \quad (12)$$

محاسبه شرط مرزی همرفت بر روی دیوارهای سیم پیچ:

مدل حرارتی ارائه شده برای ترانسفورمر تنها شامل سیم پیچهای فشار قوی و ضعیف می باشد. برای حل مدل ارائه شده در محیط المان محدود نیازمند دانستن شرایط مرزی در مرزهای سیم پیچها هستیم. یکی از شرایط مرزی که معمولاً توسط روشهای محاسباتی قابل محاسبه می باشد، شرط مرزی ضریب همرفت بر روی دیواره های سیم پیچها می باشد. مقدار این ضریب معمولاً ثابت نبوده و تابعی از ارتفاع، درجه حرارت سطح، مشخصات فیزیکی سیال اطراف سیم پیچها و هندسه سطح می باشد. در هر مکان y از ارتفاع سیم پیچها مکانی مثل $x = \delta(y)$ در شاره وجود دارد که درجه حرارت آن 0.99 درجه حرارت سیال باشد. مکان هندسی چنین نقاطی لایه مرزی گرمائی نامیده میشود. طبق نظریه Eckert [9] ضخامت لایه مرزی حرارت در داخل یک سیال توسط رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\delta(y) = 3.93 \cdot x \cdot Pr^{-0.5} (0.952 + Pr)^{0.25} Gr^{-0.25} \quad (13)$$

$\delta(y)$ ضخامت لایه مرزی

y ارتفاع سیم پیچ

Pr ضریب بدون بعد پراوندالت

Gr ضریب بدون بعد گراشهف

در رابطه بالا ضریب بدون بعد گراشهف به صورت زیر قابل محاسبه می باشد

$$Gr(y) = \frac{g \cdot \beta \cdot q_w'' \cdot y^4}{\lambda \cdot \nu^2} \quad (14)$$

g شتاب جاذبه ($m \cdot s^{-2}$)

β ضریب انبساط حجمی ($^{\circ}C^{-1}$)

q_w'' شار حرارتی منتقل شده از سطح سیم پیچها ($W \cdot m^{-2}$)

ν ویسکوزیته سیال ($m^2 \cdot s^{-1}$)

با توجه به روابط ۱۳ و ۱۴ و با فرض دانستن مشخصات حرارتی روغن [9]، حداکثر ضخامت لایه مرزی گرما در حداکثر ارتفاع سیم پیچها و با فرض حداکثر میانگین درجه حرارت روغن داخل کانال برابر با 100 درجه سانتیگراد به صورت زیر خواهد بود.

$$Gr|_{y=0.28} = 2.7 \times 10^{10}$$

$$\delta|_{y=0.28} = 1.06 \times 10^{-3} (m)$$

همانطور که ملاحظه می گردد حداکثر ضخامت لایه مرزی گرمائی در مقایسه با عرض کانال بین سیم پیچها که برابر 4 میلیمتر می باشد بسیار کوچک می باشد. بر طبق نظریه Eckert، برای حالتی که ضخامت لایه مرزی سیال در بالاترین نقطه سیم پیچها در مقایسه با عرض کانال کوچک باشد جریان سیال داخل کانال آرام بوده و ضریب همرفت توسط رابطه تجربی زیر محاسبه می گردد.

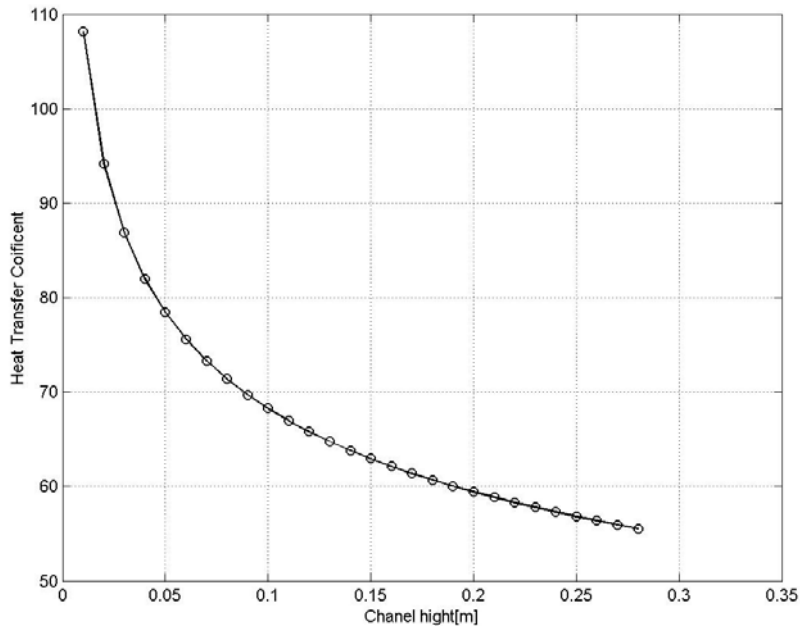
$$h(y) = (Nu(y) \times \lambda) / y \quad \text{و} \quad Nu(y) = 0.6(Gr(y) * Pr)^{0.2} \quad (15)$$

$Nu(y)$ ضریب بدون بعد ناسلت

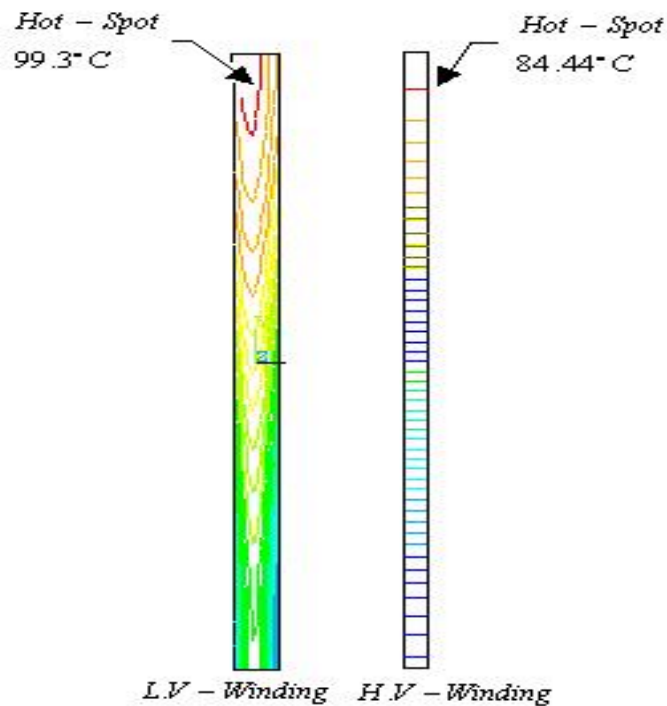
مقدار تغییرات این ضریب نسبت به ارتفاع کانال در شکل ۵ آمده است.

آنالیز حرارتی ترانسفورمر مورد مطالعه برای بدست آوردن حداکثر درجه حرارت سم پیچی ها:

با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آنالیز مغناطیسی در مورد تلفات سیم پیچها و نیز مدل حرارتی ارائه شده برای سیم پیچهای ترانسفورمر، مدل حرارتی ترانسفورمر مورد مطالعه در محیط المان محدود و در حالت ماندگار مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ توزیع درجه حرارت قسمتهای مختلف سیم پیچهای فشار قوی و ضعیف را به ازای بارگذاری عادی ترانسفورمر نشان می دهد.



شکل ۵- تغییرات ضریب همرفت نسبت به ارتفاع کانال



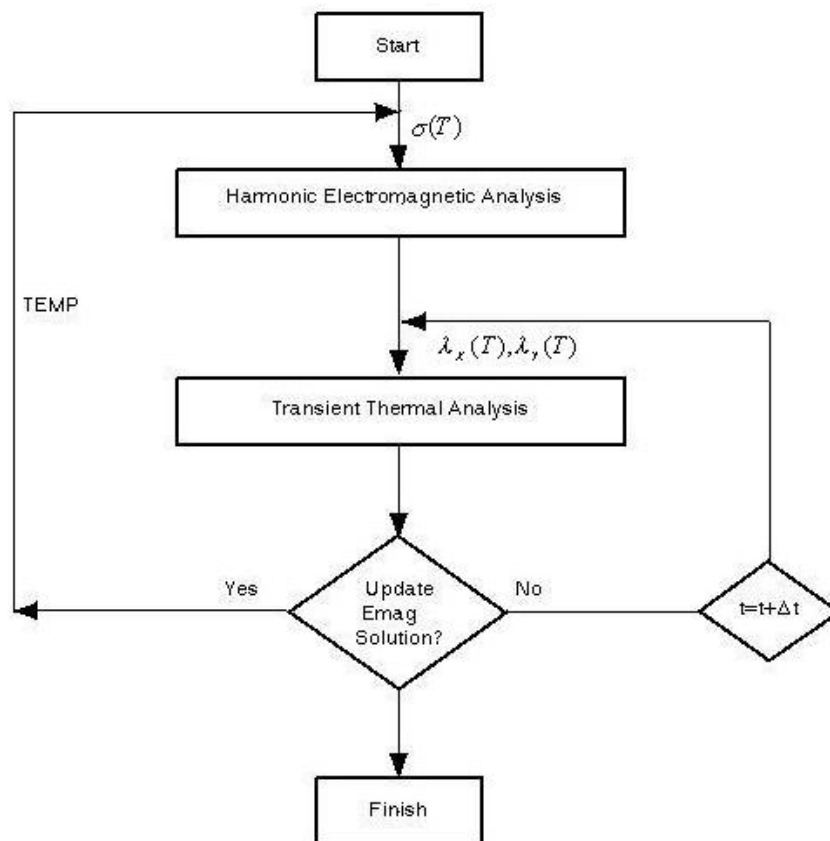
شکل ۶- خطوط هم دما در یک سیم پیچ فشار قوی و ضعیف

همانطور که از شکل ۶ نیز مشخص است حداکثر درجه حرارت برای سیم پیچ فشار ضعیف برابر ۹۹/۳ درجه و برای سیم پیچ فشار قوی برابر ۸۴/۴۴ درجه می باشد. همچنین با دقت در شکل ملاحظه می شود درجه حرارت قسمت داخلی سیم پیچهای فشار ضعیف (سمت چپ) به علت تمرکز شارهای ناشی و بالا بودن تلفات ادی سیم پیچها از درجه حرارت سایر قسمتهای سیم پیچ بالاتر می باشد. همچنین شکل فوق نشان می دهند مکان حداکثر درجه حرارت سیم پیچها در قسمت بالائی آنها قرار گرفته است.

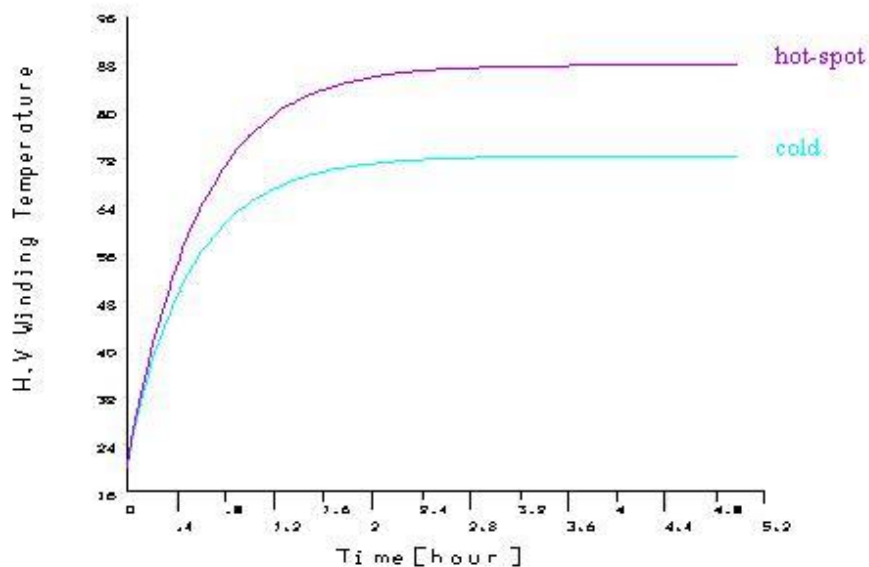
کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی به منظور تحلیل گذرای درجه حرارت سیم پیچها:

به منظور تحلیل گذرای درجه حرارت سیم پیچها، میدانهای مغناطیسی و حرارتی در محیط المان محدود کوپل شده و یک حل مغناطیسی- حرارتی بر پایه تکرار با بازه زمانی معلوم انجام گرفت. در این مدل به جای استفاده از آنالیز حرارتی ماندگار از آنالیز گذرا با پله های زمانی مشخص استفاده شده است. حرارت ایجاد شده از تحلیل مغناطیسی به عنوان ورودی برای تحلیل حرارتی اعمال می گردند. این حرارت در داخل مدل حرارتی و به ازای بازه زمانی بسیار کوتاه Δt توزیع شده، سپس درجه حرارت قسمتهای مختلف مدل در انتهای این بازه زمانی به منظور یافتن مشخصات غیر خطی و تابع حرارت مدل مغناطیسی، به مدل مغناطیسی اعمال می گردد. شکل ۷ الگوریتم انجام این تحلیل را نشان می دهد

تغییرات حداکثر و حداقل درجه حرارت سیم پیچهای فشار قوی نسبت به زمان، بدست آمده از این تحلیل در شکل ۸ آمده است.



شکل ۷- الگوریتم استفاده شده برای کوپل میدان های مغناطیسی و حرارتی



شکل ۸- تغییرات حداکثر و حداقل درجه حرارت سیم پیچهای فشار قوی نسبت به زمان

نتیجه گیری:

در این مقاله تحلیل ماندگار و گذرای مغناطیسی و حرارتی سیم پیچهای یک ترانسفورمر غوطه ور در روغن نمونه با استفاده از کوپل بین میدانهای مغناطیسی و حرارتی در یک محیط المان محدود انجام گرفت. یک مدل مغناطیسی به همراه مدل حرارتی سیم پیچها برای محاسبه گرمترین درجه حرارت و توزیع خطوط هم دما ارائه شده است. انتظار می رود مدل ارائه شده، یک روش مناسب برای محاسبه مقدار درجه حرارت سیم پیچها به منظور پیشگویی حداکثر قابلیت بار گذاری ترانسفورمرها باشد.

مراجع:

[۱]	K. Tekletsadih and M. Saravolac, "Calculation of Losses in Structural Parts of Transformers By FE method"
[۲]	D.Pavilk and R. S. Girgis, "Calculation and Reduction of Stray and Eddy Losses in Core-Form Transformer Using a Highly Accurate Finite Element Modeling Technique" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, April 1993, pp. 239-245.
[۳]	IEEE STD C57.91-1995, "IEEE Guide For Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers."
[۴]	IEEE c57.92.1981, "American National Standard Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Power Transformer."
[۵]	K. Karsai and L.Kiss, "Large Power Transformers", New York, Elsevier, 1985
[۶]	J. Driesen and G. Deliege, "Coupled Thermo-Magnetic Simulation of a Foil- Winding Transformer Connected to Non-Linear Load." IEEE Trans. On Magnetic, Vol. 36, No. 36, July 2000, pp.1381-1385
[۷]	G. Driesn and R.Belmans, "Methodologies for coupled Transient Electromagnetic-Thermal Finite Element Modeling if Electrical Energy Transducers, ", IEEE Trans. On Magnetic, Vol. 36, No. 36, July 2000, pp.681-686
[۸]	دانشکده فنی - ، پایان نامه کارشناسی ارشد، تخمین تلفات متفرقه در ترانسفورمرها و نحوه کاهش آنها" علی زراعت پرور" دانشگاه تبریز، آبان ۱۳۷۹
[۹]	M. Necati, "Heat Transfer: A Basic Approach", McGraw-Hill, 1985