مدلسازی تلفات ناشی از جریانهای گردابی به منظـــور مطالعهٔ حالت گذرا در سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتورهای قدرت

بهروز طوسی
دانشجوی دکترا

گئورگ قره‌پتیان
استادیار

مهرداد عابدی
استاد

جواد شکرالهی مغانی
استادیار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر

چکیده

مناسب‌ترین روش برای مطالعات حالات گذرای سیم پیچ ترانسفورماتور استفاده از مدل مشروح (Detailed) است. مدل مشروح اثرات سلفی حلقه ها، اثرات خازنی بین حلقه ها و تلفات در هادیـها و عـایق سـیم پیـچ را بصـورت المانـهای هـای فشـرده در نظـر می‌گیرد. تلفات این مدل در میرائی نوسانات حالتهای گذرا نقش بسیار بسزایی دارد و در واقع دامنه اضافه ولتاژها را تعیین می‌کننـد بنابر این لازم است این پارامتر وابسته به فرکانس با دقت بیشتری مدل شـود. در ایـن مقالـه تلفـات ناشـی از جریانـهای گردابـی در هادیهای سیم پیچ به کمک ماتریس تلفات ارائه می گردد. ابتدا عناصر این ماتریس در فرکانس پایین بکمـک روش اجـزاء محـدود (FEM) محاسبه شده و سپس به فرکانسهای بالا تعمیم داده می‌شوند. عناصر ایـن مـاتریس از جنـس مقـاومت بـوده و پدیـده هـای همجواری و پوسته را در برمی‌گیرند. مقایسه نتایج بدست آمده از محاسـبات مسـتقیم و محاسـبات بـر مبنـای روش پیشـنهادی نشـان می‌دهند که روش ارائه شده از تقریب خوبی جهت تعمیم فرکانس بالای ماتریس تلفات برخوردار است.

Modeling the Eddy Current Losses of the High Voltage Winding of Power Transformers for Transient Studies

B. Tousi
Ph. D. Student

G. Gharepetian
Assistant Professor

M. Abedi
Professor

J. S. Moghani
Assistant Professor

Department of Electrical Engineering
AmirKabir University of Technology

Abstract

One of the most suitable models for studing the electromagnetic transient behavior of the high voltage winding of the power transformers is the detailed model. This model consists of inductive and capacitive effects as well as the eddy current and dielectric losses in the form of lumped parameters. The losses have significant effects on the damping of transient overvoltages. In this paper, the eddy current losses are expressed by a matrix which its elements satisfy the proximity effects and skin effects precisely. The matrix is

calculated at low frequency by the finite element method (FEM) and then generalized to the high frequencies. Simulations are presented for illustration and validation.

مقدمه

اهمیت انجام بررسی‌های حالت گذرا برای طراحان سیستم قدرت کاملا آشکار است. طراحی بسیاری از اجزای سیستم قدرت با توجه به شرایط ایجاد شده بعلت بروز حالتهای گذرا است [۱] این مسئله در مورد ترانسفورماتورهای قدرت نیز صادق است. شبکه هایی که دارای سطوح ولتاژ متفاوت اند توسط ترانسفورماتورهای قدرت به یکدیگر ارتباط می یابند. خروج آنها از شبکه به هر علت که باشد، باعث اختلال در کار شبکه و موجب ضررهای اقتصادی است. لذا بررسی حالات گذرای ترانسفورماتور برای سازندگان و استفاده کنندگان آن ضروری است. در پایان دهۀ ۶۰ و اوایل دهۀ ۷۰ میلادی خطاهای متعددی در عایق بندی سیم پیچ های فشار قوی ترانسفورماتورهای قدرت مشاهده شد. محل بروز این خطاها در نقاط غیر قابل انتظاری از سیم پیچ ها یعنی در نقاط داخلی سیم پیچ ها بود. در ابتدا دلیلی برای بروز این خطاها پیدا نشد [۲]. بعد از بررسی رفتار نوسانی سیم پیچها در اواسط دهۀ هفتاد مشخص شد که بروز تشدید در داخل سیم پیچ فشار قوی باعث صدمه موضعی عایق و نهایتا باعث خرابی ترانسفورماتور می‌گردد [۳].

دلیل بروز این نوسانات وجود ظرفیتهای الکتریکی اجتناب ناپذیر در کنار اندوکتانسهای سیم پیچ است. این ظرفیتها در فرکانسهای مربوط به حالت گذرا خود را نشان می‌دهند و مجموعۀ سیم پیچ را به یک سیستم قابل نوسان تبدیل می‌کنند. مناسبترین راه کار برای بررسی رفتار نوسانی و تنشهای الکتریکی در داخل سیم پیچ استفاده از مدل مشروح می‌باشد. در روش مدلسازی مشروح، کوچکترین عنصر در سیم پیچ، یک حلقه [۴] و یا گروهی از حلقه ها (مثلا یک دیسک) است [۵-۶]. هر جزء در این مدل معمولا با یک مدار RLC موازی مدل می گردد. هر جزء در شبکۀ مدل دارای یک ظرفیت خازنی نسبت به زمین است و اندوکتانسها دارای القاء متقابل اند [۶]. این روش مدلسازی توسط Blume، Wagner و Boyajian پایه گذاری شده [۷] و توسط Bewley و Lewis با گامهای اساسی تکمیل شده است [۸-۹]. مزیت اصلی این روش کارائی صحیح مدل در حوزۀ فرکانسی مورد نظر است. البته دقت عمل مدل مشروح به چگونگی تخمین و تعیین پارامترهای آن از جمله تلفات بستگی دارد. در این مقاله تلفات ناشی از جریانهای گردابی مطرح و بحث شده است. تلفات در بررسی میرائی اضافه ولتاژهای داخلی سیم پیچ نقش مهمی را بازی می‌کنند. بررسی مقالات منتشره نشان می‌دهد که در مورد مدلسازی تلفات و تاثیر دادن آن در مدل مشروح سیم پیچ هنوز جای تحقیق و کار بسیاری وجود دارد[۱۰-۱۲].

تلفات ناشی از جریانهای گردابی در هادیهای سیم پیچ عموما" براساس دو پدیدۀ فیزیکی که همزمان در هادیها رخ می‌دهند تقسیم بندی می‌شوند [۱۱].

الف ـ اثر پوسته

ب ـ اثر همجواری

منظور از اثر پوسته توزیع غیر یکنواخت جریان در داخل هادی در اثر میدان مغناطیسی ناشی از جریان جاری در خود هادی است که سبب افزایش تلفات می‌گردد.

از طرفی اثر هم جواری توزیع غیریکنواخت جریان در داخل هادی در اثر میدان مغناطیسی ناشی از جریان جاری در هادیهای هم جوار است که سبب افزایش مضاعف تلفات می‌گردد.

بعضی نویسندگان به منظور محاسبۀ تلفات جریانهای گردابی، تلفات مربوط به اثر پوسته (p_{skin}) و اثر هم جواری ($p_{prox.}$) را جداگانه محاسبه کرده و مجموع تلفات ناشی از این دو پدیده را بعنوان تلفات جریانهای گردابی منظور می دارند. باید توجه داشت که این در حالتی صحیح می‌باشد که جریانهای بوجود آمده در اثر این دو پدیده در هادی یا ناحیۀ مورد نظر متعامد باشند [۱۳].

استفاده از این فرضیه به منظور محاسبۀ تلفات ناشی از جریانهای گردابی در یک سیم پیچ بخاطر شکل و ابعاد هادیها و خود سیم پیچ دارای خطای چشمگیری است. یکی از دلایل استفاده از محاسبۀ جداگانه مؤلفه‌های تلفات ناشی از جریانهای گردابی بخاطر بهره گیری از سادگی روشهای تحلیلی است. روشهای تحلیلی در این گونه مسائل مجبورند ساده سازی های دیگری علاوه بر مفاهیم در هندسۀ مسئله نیز انجام دهند [۱۵-۱۶]. هنگامیکه مطالعۀ حالت گذرا در فرکانسهای پائین مورد نظر باشد تلفات چندان چشمگیر نمی باشند و برای همین است که برخی مدلها از آن صرف نظر می‌کنند و یا شکل ساده مقاومت ac هادی مجزا را با اعمال ضریبی در مدل سیم پیچ قرار می‌دهند.

تلفات ناشی از هم جواری در فرکانسهای بالا خیلی بیشتر از تلفات مربوط به اثر پوسته می باشد. بنابراین برای بدست آوردن تلفات در یک دیسک یا یک حلقه بایستی اثر

دیگر حلقه ها نیز در نظر گرفته شوند. این امر سبب می‌شود نتوان از روشهای تحلیلی استفاده کرد.

مناسب‌ترین کار برای مدل کردن تلفات ناشی از جریانهای گردابی، بیان تلفات بصورت یک ماتریس است. آقای Semelyen در مقالهٔخود [۱۱] به نحو خوبی این ماتریس را در مدل مشروح سیم پیچ مورد استفاده قرار داده است. محاسبهٔ ماتریس تلفات تنها در صورتی می‌تواند از دقت بالائی برخوردار باشد که کل سیم پیچ بخاطر اثرات متقابل جریان حلقه‌ها بطور یکجا مورد تحلیل قرار گیرد.

ایشان برای بدست آوردن عناصر ماتریس هر بار دو واحد سیم پیچ را در نظر گرفته‌اند. این روش از لحاظ اینکه میدان مغناطیسی با حذف هادیهای دیگر دچار تغییر می‌شوند از دقت بالائی برخوردار نمی‌باشد. به عبارت دیگر اثر ثانویه مربوط به جریانهای گردابی در هادیهائی که نزدیک هم هستند در نظر گرفته نشده است. همچنین از آنجائیکه تلفات کل در سیم پیچ اساس محاسبات می‌باشد لذا حذف هادیهایی که جریان در آنها در واقع صفر فرض شده است سبب بروز خطا خواهد شد.

در این مقاله عناصر ماتریس تلفات در فرکانس پائین محاسبه شده و به فرکانسهای بالا تعمیم داده داده خواهد شد. مزیت این روش در این است که کل مجموعه سیم پیچ به منظور محاسبات تلفات با روش اجزاء محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش اجزاء محدود، زمان محاسبات و حافظه مورد نیاز بستگی به نوع و هندسه مسئله و فرکانس دارد. به همین دلیل ماتریس تلفات در فرکانس پایین محاسبه شده و به فرکانس‌های مورد نظرتعمیم داده می‌شود.

۲- تلفات جریانهای گردابی

۲-۱-تلفات ناشی از جریانهای گردابی در یک هادی مجزا

مقاومت ac هادیها وابسته به فرکانس بوده و در مورد یک هادی با پهنای 2a و ضخامت 2b (a>>b) از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است [۱۳]:

$$r_{ac} = r_{dc}\frac{\gamma}{2}\frac{\sinh\gamma + \sin\gamma}{\cosh\gamma - \cos\gamma} \qquad (۱)$$

که در آن؛

$$r_{dc} = \frac{l}{4ab\sigma} \quad ، \quad \gamma = \frac{2b}{\delta} \quad ، \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}$$

δ عمق نفوذ، μ پرمابلیته، σ رسانایی و l طول هادی می باشد. در حالتی که $2b>5\delta$ باشد می‌توان رابطهٔ (۱) را با تقریب خوبی بصورت زیر نوشت:

$$r_{ac} = r_{dc}\frac{b}{\delta} \qquad (۲)$$

این مقاومت بخاطر اثر پوسته تابعی از عمق نفوذ و یا با توجه به تعریف δ تابعی از جذر فرکانس است.

توان مختلط برای یک هادی با مشخصات فوق در صورتیکه مقدار مؤثر میدان مغناطیسی H در سطح آن معلوم باشد بصورت زیر قابل محاسبه است[۱۳]:

$$s = \frac{4a|H|^2\sqrt{j\omega\mu\sigma}}{\sigma}\tanh(b\sqrt{j\omega\mu\sigma}) \qquad (۳)$$

قسمت حقیقی رابطهٔ (۳) تلفات مربوط به جریان هادیهای هم جوار است که در هادی مفروض بوجود می‌آید و اصطلاحا به آن اثر هم جواری گفته می‌شود. این تلفات نیز وابسته به فرکانس بوده و در حالتی که $2b>5\delta$ باشد عبارت تابع هیپربولیک به سمت یک میل می‌کند و در نتیجه این تلفات نیز تابعی از عمق نفوذ و یا به بیان دیگر تابعی از جذر فرکانس می‌باشد.

۲-۲- تلفات اثر پوسته و اثر هم جواری در یک گروه هادی

میدان مغناطیسی ناشی از جریان عبوری از هادیهای هم جوار سبب توزیع غیر یکنواخت جریان در هادی می‌شود که ممکن است تلفات کل بوجود آمده در آن را کاهش یا افزایش دهد. این پدیده همانطوریکه قبلا ذکر شد به اثر هم جواری معروف است. در فرکانسهای بالا اندازه آن از مقدار مربوط به اثر پوسته به مراتب بزرگتر است.

برخی مؤلفین معمولا این دو را جداگانه حساب کرده و با جمع آثار مجموع آنها را بعنوان تلفات ناشی از جریانهای گردابی در نظر می‌گیرند. یعنی:

$$p_e = p_{skin} + p_{prox.} \qquad (۴)$$

چگالی تلفات در یک ناحیهٔ مفروض از یک هادی تابعی از توان دوم چگالی جریان است. فرض کنید در سطح مقطع S یک هادی طویل چگالی جریان مربوط به اثر پوسته و اثر هم جواری به ترتیب J_s و J_p باشد. (J_s چگالی جریان در حالتی که هادی تحت تاثیر میدان‌های مغناطیسی هم

جوار قرار ندارد و J_p چگالی جریان القا شده در هادی توسط میدان مغناطیسی خارجی می‌باشد) توان تلف شدهٔ لحظه‌ای در هادی را می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود[۱۳]:

$$p_e = \frac{1}{\sigma}\int_s (J_s+J_p)^2\, ds$$

$$= \frac{1}{\sigma}\int_s (J_s^2 + J_p^2 + 2J_sJ_p)ds \qquad (۵)$$

با توجه به رابطهٔ بالا توان تلف شدهٔ کل در صورتی برابر مجموع تلفات مربوط به اثرات پوستی و هم جواری خواهد بود که داشته باشیم:

$$\int_s 2J_sJ_p\, ds = 0 \qquad (۶)$$

رابطهٔ (۶) وقتی امکان پذیر است که J_s و J_p در محدودهٔ انتگرال گیری متعامد باشند. در مورد دو هادی طویل که مسئله پیچیده نمی باشد J_s یک تابع زوج و J_p یک تابع فرد نسبت به صفحهٔ تقارن است و انتگرال رابطهٔ (۶) در مورد آنها صدق می‌کند. در مسائلی که شرط رابطهٔ (۶) صدق نکند نمی توان دو عامل تلفات را جداگانه محاسبه و مجموع آنها را بعنوان تلفات جریانهای گردابی در نظر گرفت. موضوع فوق به عنوان یک مثال در مورد یک سیم پیچ از نوع دیسکی بکار گرفته شد و مشاهده گردید که درصد خطا برای تلفات کل در هادیهای سیم پیچ در حدود ۲۰ می‌باشد. این شبیه‌سازی نشان داد که رابطهٔ (۶) برای سیم پیچ واقعی نمی‌تواند صادق باشد و فرض متعامد بودن اثر پوسته و اثر هم جواری در مورد سیم پیچ ایجاد خطای چشمگیری در محاسبهٔ تلفات می‌کند.

۳- محاسبه تلفات ناشی از جریانهای گردابی در سیم پیچ

۳-۱- مقایسه روشها

یکی از روشهای محاسبهٔ تلفات جریانهای گردابی در سیم پیچ ها روش تحلیلی می باشد. مقالات زیادی در این رابطه وجود دارند که سعی کرده اند برای محاسبهٔ تلفات و در حالت کلی برای محاسبهٔ مقاومت ac سیم پیچ فرمولهای بسته ارائه دهند[۱۴-۱۶]. ارائه روشهای تحلیلی در این گونه مسائل که پیچیدگی خاص خود را دارند مشکل و در بسیاری از موارد امکان پذیر نمی باشند. به همین خاطر است که این روشها مجبورند ساده سازی‌هایی در هندسه و شرایط مرزی مسئله انجام دهند. از جمله این ساده سازیها می توان، تعمیم فرمولهای بسته مربوط به هادیهای چهارگوش به هادیهای دایره ای [۱۶]، فرض طول بی نهایت برای سیم پیچ، فرض متعامد بودن تلفات مربوط به اثر پوسته و اثر همجواری و صرفه نظر کردن از فواصل موجود بین لایه ها یا دیسکهای سیم پیچ را نام برد[۱۴-۱۵].

روش دیگر برای بدست آوردن تلفات روش اندازه گیری است[۱۷]. روش اندازه گیری بخاطر زمان بر بودن پیاده سازی آن، همچنین گرانقیمت بودن وسائل اندازه گیری و ضرورت دسترسی به سیم پیچ ساخته شده و آماده محدودیت دارد. بخصوص در مواردیکه ضریب توان خیلی کوچک باشد خطای اندازه گیری چشمگیر است. البته این مسئله در اندازه گیریهای حوزه فرکانس کمتر دیده می‌شود. ولی کلا" در مرحله طراحی در صورت عدم ساخت نمونه (Prototype) باید به سمت روشهای محاسباتی تحلیلی یا روشهای عددی رفت. روش عددی روش دیگر حل این گونه مسائل است. روشهای عددی از چند لحاظ حائز اهمیت می باشند. یکی اینکه مسائل پیچیده از نظر هندسی را می توان توسط آنها به سهولت حل نمود. دوم اینکه نتایج از دقت بالایی برخوردارند. عمده عیب این روش بخاطر نیاز به حافظه بیشتر کامپیوتر و همچنین طولانی بودن زمان محاسبات است.

یکی از روشهای عددی که از قابلیت بسیار بالائی برخوردار است روش اجزاء محدود می باشد. در این مقاله برای مدلسازی تلفات ناشی از جریان های گردابی به محاسبهٔ تلفات کل سیم پیچ بازاء جریانهای مختلف در حلقه ها نیاز است. این کار را با استفاده از نرم افزار FLUX2D که مسائل الکترومغناطیسی را با روش اجزاء محدود حل می‌نماید انجام خواهد شد. همانطوریکه نشان داده شده است توزیع چگالی جریان سینوسی در داخل هادی از تابع نمائی تبعیت می‌نماید[۱۳]، بطوریکه هر چه به داخل هادی نزدیکتر شویم از مقدار آن کاسته می‌شود. در آرگومان این تابع نمائی " δ " ظاهرمی‌شود، بنابراین برای حل به روش اجزاء محدود، تعداد المانها در جدارهٔ خارجی هادی (حداقل به ضخامت پنج برابر عمق نفوذ) بایستی دست کم پنج المان درجهٔ دو باشد تا توزیع جریان و در حالت کلی متغیرها به مقدار واقعی نزدیکتر باشند. با افزایش فرکانس عمق نفوذ (δ) کاهش می‌یابد. این کاهش سبب بکارگیری اجزاء بیشتر در مدل اجزاء محدود می‌شود و برای حل مسائلی با تعداد هادیهای نسبتا زیاد، نظیر سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت در فرکانسهای بالا، عملاً در استفاده از روش اجزاء محدود

محدودیت ایجاد می‌شود.

۳-۲- ماتریس تلفات سیم پیچ (R)

در این قسمت ماتریسی بنام ماتریس تلفات سیم پیچ معرفی خواهد شد که در محاسبهٔ افت ولتاژ مربوط به تلفات ناشی از جریانهای گردابی در سیم پیچ مفید است. عناصر قطر اصلی این ماتریس مدل کننده افت ولتاژ در حلقه‌های سیم پیچ به خاطر عبور جریان از خود حلقه‌ها (مقاومت خودی؛ r_{ii}) و عناصر دیگر مدل کننده افت ولتاژ در حلقه‌های سیم پیچ بخاطر عبور جریان از حلقه های دیگر (مقاومت متقابل؛ r_{ij}) است. عناصر ماتریس تلفات وابسته به فرکانس بوده و استفاده از آن در مدل مشروح سیم پیچ سبب ارزیابی دقیقتر از نحوهٔ میرائی و فرکانسهای تشدید می گردد.

در [۱۱] بطور تحلیلی نشان داده شده است که توان تلف شدهٔ کل برای n هادی حامل جریان را می‌توان بصورت رابطه ماتریسی زیر نوشت:

$$P_l = I\ R\ I^T \qquad (۷)$$

که در آن؛

$$I = [I_1 \quad I_2 \quad \cdots \quad I_n]$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ . & . & \cdots & . \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

و I_i فازور جریان هادی i-ام می باشد.

در تنها روشی که این مقالهٔ به محاسبهٔ عناصر ماتریس تلفات پرداخته است، چنین برداشت می‌شود که عناصر روی قطر اصلی یعنی مقاومتهای خودی برابر هستند در حالیکه بعداً نشان خواهیم داد که مقدار آن برای حلقه‌های میانی بیشتر از حلقه های انتهائی است دیگر اینکه روش محاسبه به گونه ای است که خطای محاسبات را بالا برده است. در واقع برای بدست آوردن عناصر ماتریس هر بار دو حلقه در محاسبات میدان در نظر گرفته شده و حلقه های دیگر عملا نقشی در محاسبات ندارند. در حالیکه بخاطر نزدیک بودن هادیها در سیم پیچ ترانسفورماتور، اثر ثانویه جریانهای گردابی در شکل و اندازه میدان مغناطیسی بسیار موثر است و بایستی همهٔ آنها درگیر محاسبات شوند.

در این مقاله ماتریس R با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود FLUX2D محاسبه خواهد شد. برای این منظور سیم پیچ واقعی با فرض تقارن نسبت به محور طولی سیم پیچ در مختصات دو بعدی (R,θ) مدل می‌شود.

با توجه به تقارن، ماتریس R دارای $n(n+1)/2$ مجهول می باشد و بنابر این احتیاج به همین تعداد معادله داریم. برای بدست آوردن آنها $n(n+1)/2$ بردار مستقل جریان تولید شده و هربار یک بردار جریان بعنوان جریان حلقه ها برای سیم پیچ در نظر گرفته شده و توان تلف شده در کل سیم پیچ به کمک FLUX2D محاسبه می‌گردد. با داشتن بردارهای جریان و توان تلف شده متناظر با هر بردار جریان می‌توان به کمک رابطهٔ (۷) یک دستگاه معادلات تشکیل داد که با حل آن عناصر ماتریس R بدست می‌آیند.

مطالعهٔ حالت گذرای سریع سیم پیچ در فرکانسهای بالا اهمیت پیدا می‌کند. مدل کردن سیم پیچ واقعی با روش اجزاء محدود در فرکانسهای بالا که عمق نفوذ در مقایسه با ابعاد هادیها بسیار کوچک است ناممکن می‌باشد. زیرا از تعداد بیشتری المان، در مدل اجزاء محدود بایستی استفاده شود. برای رفع این مشکل در این مقاله ماتریس R در فرکانس پائین مستقیما به کمک روش اجزاء محدود محاسبه شده و برای فرکانسهای بالا تعمیم داده می‌شود. همانطوریکه قبلا بحث شد برای فرکانسهائی که $2b>5\delta$ باشد تلفات مربوط به اثر پوسته و اثر هم جواری با تقریب بسیار خوبی متناسب با جذر فرکانس تغییر می‌نمایند. بنابراین نتیجه می گیریم که می توان ماتریس R را در فرکانسی که $2b>5\delta$ است محاسبه کرد و به فرکانسهای بالا تعمیم داد. یعنی هر عنصر ماتریس R را می‌توان از رابطهٔ زیر تخمین زد.

$$r_{ij}^{f_x} = r_{ij}^{f_0}\sqrt{\frac{f_x}{f_0}} \qquad (۸)$$

که در آن $r_{ij}^{f_x}$ مقدار عنصر ijام در فرکانس دلخواه f_x می‌باشد.

لازم بذکر است که چنانچه در محاسبهٔ ماتریس R حلقه بعنوان واحد مدل انتخاب شود تعداد مجهولات بسیار زیاد شده و بنابراین به تعداد زیادی شبیه‌سازی نیاز است. با این حال با توجه به رنج فرکانسی که در مطالعه حالت گذرا مورد نظر است می‌توان ابعاد ماتریس R را کاهش داد. برای مثال اگر دیسک یا زوج دیسک بعنوان واحد مدل انتخاب شود در آنصورت بردار I در رابطهٔ (۷) کوچک می‌شود و این امر سبب می‌شود که تعداد شبیه سازیها به منظور بدست آوردن عناصر ماتریس R کاهش یابد. توجه داشته باشید که ماتریس R با توجه به توان تلف شده در کل سیم پیچ محاسبه می‌شود و نمی توان به کمک این ماتریس تلفات

موضعی را در سیم پیچ مشخص کرد.

در قسمت بعدی به کمک شبیه سازی روش بدست آوردن ماتریس R مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این شبیه سازی دیسک بعنوان واحد مدلسازی انتخاب خواهد شد و در نتیجه ابعاد ماتریس مربعی R برابر با تعداد دیسکهای سیم پیچ خواهد بود. البته اگر مطالعهٔ حالت گذرا در فرکانسهای خیلی بالا مد نظر باشد بایستی حلقه بعنوان واحد مدلسازی انتخاب شود و در اینصورت ابعاد ماتریس R برابر با تعداد حلقه های سیم پیچ خواهد شد که باعث می‌شود به تعداد بیشتری شبیه سازی یا FE به منظور بدست آوردن عناصر ماتریس نیاز داشته باشیم.

٤-ارزیابی روش پیشنهادی

در این قسمت روش ارائه شده برای یافتن ماتریس تلفات در مورد یک سیم پیچ از نوع دیسکی ارزیابی می‌شود. سیم پیچ مورد نظر شامل ۱۸ دیسک و هر دیسک آن حاوی ۱۰ حلقه می باشد. هادیها از نوع تخت بوده و ابعاد سطح مقطع آنها ۳×۱۶میلیمتر، فاصله بین دو هادی در یک دیسک ۲ میلیمتر، فاصلهٔ بین دو دیسک ۶ میلیمتر، شعاع داخلی سیم پیچ ۷۵۰ میلیمتر و رسانایی هادیها 5.8×10^7 می‌باشد. ابعاد ماتریس تلفات این سیم پیچ ۱۸×۱۸ بوده و تعداد عناصر مجهول آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$m=\frac{n(n+1)}{2}=\frac{18(18+1)}{2}=171$$

یک چهارم سیم پیچ مزبور، با فرض وجود تقارن نسبت به محور طولی و همچنین نسبت به صفحه شعاعی که در وسط سیم پیچ عمود بر محور طولی است در مختصات دو بعدی (R,θ) با نرم افزار FLUX2D مدل می‌شود. با این کار تعداد المانهای لازم برای حل مسئله با روش اجزاء محدود بطور چشمگیری کاهش یافته و در زمان اجرا و حافظهٔ کامپیوتر صرفه جویی می‌شود. برای سیم پیچی که دارای ۱۸ دیسک با شرایط بالاست، مدل اجزاء محدود آن مطابق شکل (۱) دارای ۹ دیسک خواهد بود. حال در مدل اجزاء محدود مدل ۹ دیسکی، شرایط مرزی را در محل خطی که (خط ab) سیم پیچ را دو نیم کرده است دیرکلیه (Drichlet) اعمال کرده و ماتریس تلفات را مطابق روش مقاله برای آن بدست می‌آوریم. تعداد مجهولات این ماتریس از رابطهٔ زیر بدست می‌آید.

$$m=\frac{n(n+1)}{2}=\frac{9(9+1)}{2}=45$$

طبیعی است که بردار جریان در رابطهٔ (۷) در این حالت دارای ۹ عضو خواهد بود و مسئله بایستی ۴۵ بار با بردارهای مستقل جهت محاسبهٔ تلفات کل حل شود تا با تشکیل دستگاه معادلات بردار مجهولات که آنرا با R_d نشان می‌دهیم بدست آید.

بردار مجهولات دیگری که آنرا با R_n نشان می‌دهیم برای مسئله فوق با عوض کردن شرایط مرزی از دیرکلیه به نیومن (Neumann) بدست می‌آید. با داشتن این دو بردار، عناصر مجهول ماتریس تلفات برای سیم پیچ واقعی که دارای ۱۸ دیسک و ۹۰ عضو است بصورت زیر خواهد بود:

$$\left[\tfrac{1}{2}(R_n+R_d)\quad \tfrac{1}{2}(R_n-R_d)\right] \qquad (۹)$$

لازم به ذکر است که چگونگی شماره گذاری دیسکها، به ترتیب قرار گرفتن عناصر بردار (۹) در ماتریس تلفات اثر می‌گذارد.

همانطوری که قبلا ذکر شد در فرکانسهای بالا محاسبهٔ ماتریس تلفات با توجه به محدودیت محاسباتی با روش اجزاء محدود، تقریبا غیر ممکن است ولی محاسبهٔ آن در فرکانس پائین و تعمیم آن به فرکانسهای بالا با استفاده از روش ارائه شده عملی است.

جهت ارزیابی روش پیشنهادی ابتدا ماتریس تلفات در سه فرکانس ۴ ، ۱۲/۵ و ۴۰ کیلوهرتز برای سیم پیچ مورد نظر مستقیما با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود محاسبه گردید. شکل۲-الف عناصر روی قطر اصلی این ماتریسها را نشان می‌دهد. عناصر روی قطر اصلی، در واقع مقاومتهای خودی دیسکها می باشند. در این شکل منحنیهای خط چین و نقطه چین بترتیب عناصر قطر اصلی ماتریس تلفات در فرکانس ۴۰ کیلو هرتز را نشان می دهند که با اعمال روش مقاله بر روی ماتریس تلفات در ۴ و ۱۲/۵ کیلو هرتز بدست آمده اند. همانطوریکه ملاحضه می‌شود، تخمین ماتریس تلفات در ۴۰ کیلوهرتز با استفاده از ماتریس تلفات در ۱۲/۵ کیلوهرتز بهتر از فرکانس ۴ کیلوهرتز می‌باشد. دلیل این امر این است که فرکانس ۴ کلیوهرتز شرط $2b>5\delta$ را با دقت کمتری برآورده می سازد. با توجه به شکل ۲-الف مقاومت خودی دیسک میانی بیشتر از دیسکهای انتهایی است.

در شکل ۲-ب سطر اول از ماتریس تلفات در فرکانسهای ۴، ۱۲/۵ و ۴۰ کیلوهرتز نشان داده شده است. منحنی‌های خط چین و نقطه چین در این شکل، بترتیب تخمین سطر اول ماتریس تلفات در ۴۰ کیلوهرتز از فرکانسهای ۴ و ۱۲/۵ کیلوهرتز را نشان می‌دهند و

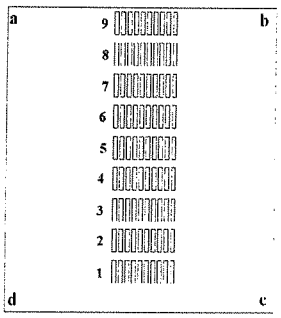
همانطور که ملاحضه می‌شود، همانند شکل قبل تخمین بر مبنای نتایج فرکانس ۱۲/۵ بهتر از تخمین بر مبنای نتایج فرکانس ۴ کیلوهرتز است.

شکل ۲-ج نمایش سه بعدی ماتریس تلفات در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل برخی از عناصر ماتریس تلفات (مقاومتهای متقابل) مقادیر منفی به خود میگیرند و اندازه قدر مطلق مقاومت متقابل برای دیسکهایی که فاصله شان بیشتر است میتواند بزرگتر از آن دیسکهایی که به یکدیگر نزدیکترند باشد.به عبارت دیگر ماتریس تلفات بایستی با در نظر گرفتن اثر همه هادیها محاسبه گردد.

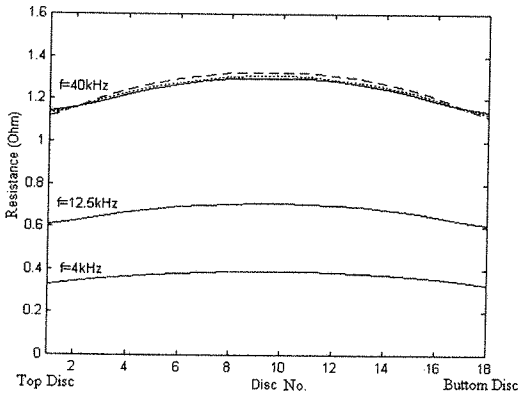
در جدول ۱ ارائه کننده رابطهٔ (۷) در حالتی است که جریان عبوری از همهٔ دیسکها یک آمپر است ولی محاسبات در سه فرکانس ۴ ، ۱۲/۵ و ۴۰ کیلوهرتز انجام گرفته است. این جدول نشان می‌دهد که مقاومت کل سیم پیچ که با استفاده از ماتریس R محاسبه شده است تطابق بسیار خوبی با نتایج بدست آمده از محاسبهٔ مستقیم مقاومت با استفاده از روش اجزاء محدود دارد.

جدول (۱) مقایسه مقدار محاسبه شده مقاومت سیم پیچ با استفاده از ماتریس R و FEM.

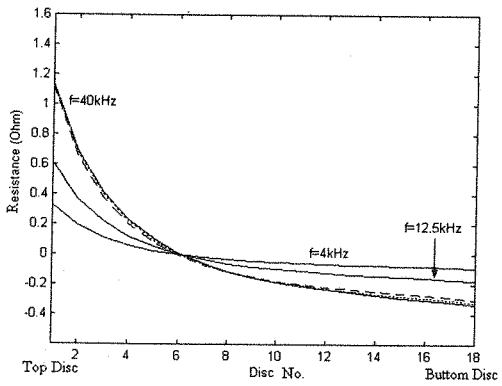
Freq. (kHz)	R(Ohm) FEM	R(Ohm) $\sum\sum r_{ij}$
۴	۱۶/۴۱۵۲	۱۶/۴۱۴۴
۱۲/۵	۳۰/۲۹۶۰	۳۰/۲۹۶۴
۴۰	۵۵/۸۹۰۰	۵۵/۸۸۹۴



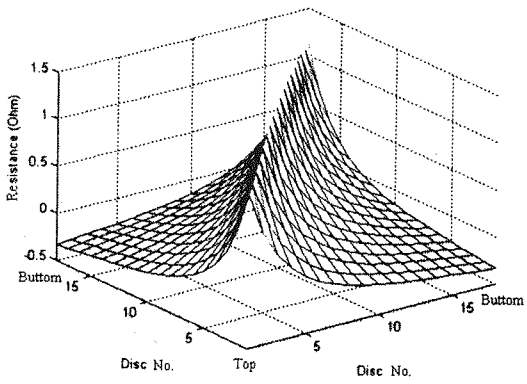
شکل(۱) یک چهارم سیم پیچ ۱۸ دیسکی جهت شبیه سازی با نرم افزار اجزاء محدود (ابعاد مرز abcd واقعی نیستند).



(۲-الف)



(۲-ب)



(۲-ج)

شکل (۲-الف) مقادیر عناصر قطر اصلی ماتریس تلفات (مقاومت خودی دیسکها) ب ـ مقادیر عناصر سطر اول ماتریس تلفات ج ـ نمایش سه بعدی ماتریس تلفات در فرکانس ۴۰ کیلو هرتز.

۵-نتیجه گیری

دخالت دادن تلفات ناشی از جریانهای گردابی در مدل مشروح سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت کمک زیادی به بررسی دقیق اضافه ولتاژها و فرکانسهای تشدید در داخل سیم پیچ می‌نماید. در این مقاله ماتریس تلفات

برای این منظور معرفی گردید. برای بدست آوردن عناصر این ماتریس نیاز محاسبه به تلفات کل سیم پیچ بازاء جریانهای مختلف دیسکها میباشد. این کار بکمک نرم افزار اجزاء محدود انجام گرفت. در حالات گذرا دانستن اندازه تلفات ناشی از جریانهای گردابی در فرکانسهای بالا مهم می‌باشد. محاسبات با روش اجزاء محدود در فرکانسهای بالا با توجه به نیاز به المانهای بیشتر در آن فرکانسها، مقدور نمی‌باشد. برای حل این مشکل ابتدا ماتریس تلفات در فرکانس پایین محاسبه گردید و سپس به فرکانسهای بالا تعمیم داده شد. نتایج نشان می‌دهند که با انتخاب مناسب فرکانسی که در آن ماتریس تلفات مستقیماً محاسبه می‌شود میتوان ماتریس را در فرکانسهای بالا با تقریب بسیار خوبی برون‌یابی نمود.

مراجع

[1] A.G. Phadke and et. al., " Digital Simulation of Electrical Transient Phenomena", IEEE Tutorial course, course text 81EH0173-5-PWR

[2] A.J.McElroy, "On the Significance of Resent EHV Transformer Failures Involving Winding Resonance", IEEE Trans. on power App. and Sys.,Vol. PAS-94, No 4, July/August 1975, pp. 1301-1307

[3] H.B. Margolis, "Experience With Part Winding Resonance in EHV Autotransformers: Diagnosis and Corrective Measures", IEEE Trans. On power App. and Sys., Vol. PAS-94, No. 4, July/August 1975, pp. 1294-1300

[4] F. de Leon and A.Semlyen, "Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 9, No. 1, Jan. 1994, pp. 231-239

[5] V. Brandwajn, H.W. Dommel, " Mtrix Repersentation of Three-phase N-winding Transformer for Steady State and Transient Studies", IEEE Trans. on power App. And Sys.,Vol. PAS-101, No 6, June 1982, pp. 1369-1378

[6] R.C. Degeneff, "A General Method for Determining Resonances in Transformer Windings", IEEE Trans. on power App. and Sys.,Vol. PAS-96, No 2, March/Apr. 1977, pp. 423-430

[7] L.F. Blume, A. Boyajian, "Abnormal Voltage Whitin Transformers", AIEE, Vol. 38, 1919, pp. 577-614

[8] T.J. Lewis, "The Transient Behavior of Ladder Network of the Type Representing Transformer and Machine Windings", Proc. IEE Vol. 101, pt. II No.2, pp. 541-553, 1954

[9] L. V. Bewley, J.H. Hagenguth, "Methods of Determining Natural Frequencies in Coils and Windings", AIEE, Vol. 60, 1941, pp. 1145-1150

[10] F. de Leon and A.Semlyen, "Time Domain Modelling of Eddy Current Effects for Transformer Transients", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 8, No. 1, Jan. 1993, pp. 271-280

[11] F. de Leon and A.Semlyen, "Detailed Modelling of Eddy Current Effects for Transformer Transients", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 9, No. 1, Jan. 1994, pp. 1143-1150

[12] O. Moreau, Y. Guillot, "SUMER: A Software for Overvoltage Surges Computaion Inside Transformers", ICEM'98, Istanbul-Turkey, pp. 965-970, 2-4 Sep., 1998

[13] R. Stoll, "The Analysis of Eddy Currents", Clarendon Press, Oxford, 1974.

[14] P.P. Birringer, "Analytical Approximations for Determining the Current Density and Power Loss Distributions in Multilayer Sheet Windings", IEEE Trans. Ind. Applications, vol. IA-13, No. 4, pp. 315-320 1, July 997.

[15] M. Stafl, Electrodynamics of Electrical Machines, Parague: Academia, 1967

[16] J. Ferreira, "Improved Analytical Modeling of Conductive Losses in Magnetic Components," IEEE Trans. Power Electron, vol. 9, pp. 127-131, Jan. 1994.

[17] G.B. Ghrehpetian, H. Mohseni and K. Moller,"Hybrid Modeling of Inhomogeneous Transformer Windings for Very Fast Transient Overvoltage Studies", IEEE Trans. Power delivery, vol. 13, No. 1,pp. 157-163, Jan. 1998.