

اصلاح مدل شبکه نردبانی سیم‌پیچ به منظور تفکیک تلفات عایقی در گذرای سریع

سیدمجتبی حسینی بافقی^۱، حمیدرضا اکبری^{۲*}، سیدامین سعید^۳

۱- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Smh1365@iauyazd.ac.ir

*۲- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران H.Akbari@iauyazd.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Saied1696@iauyazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۶

چکیده: مدل شبکه نردبانی^۱ به عنوان یک مدل گذرای سریع سیم‌پیچ جهت مطالعات پدیده‌های گذرای سریع و در فرکانس‌های بالا معرفی شده است. در این مطالعه، مدل عایق سیم‌پیچ از شبکه نردبانی تفکیک شده و تمامی روابط مداری مربوط به این مدل بازنویسی می‌شوند. پارامترهای الکتریکی عایق به روش جایگزینی در مدار تشدید محاسبه می‌شود. سیم‌پیچ‌های یک فاز از ماشین القایی ۶kV به کمک مدل پیشنهادی طراحی و با شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس ماکسول^۲، شکل موج توزیع ولتاژ، ضریب تلفات عایقی و همچنین تلفات عایقی در نقاط مختلف سیم‌پیچ نشان داده می‌شود. در ادامه شکل موج توزیع ولتاژ گره‌ها، جریان عبوری از کویل‌ها، ولتاژ روی کویل‌ها و توان تلفاتی در کویل‌ها توسط دو مدل کلاسیک شبکه نردبانی و مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته می‌شود. در این مطالعه با توجه به تفکیک تلفات عایقی از تلفات سیم‌پیچ در گذرای سریع و در فرکانس‌های بالا، مدل پیشنهادی می‌تواند به صورت یک ابزار مناسبی جهت رسیدن به پاسخ‌های دقیق‌تر پدیده‌های گذرای سریع مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سیم‌پیچ‌های قدرت، ضریب تلفات عایقی، گذرای سریع، مدل عایقی.

۱- مقدمه

در صد و دامنه اضافه ولتاژها در ماشین‌های حائز اهمیت فراوان می‌باشد [۳-۵].

بررسی حالت‌های گذرای الکترومغناطیس در ماشین‌های قدرت (ماشین‌های گردان، ترانسفورماتورهای قدرت) از طریق شبیه‌سازی بر روی کامپیوتر، مستلزم مدل‌سازی اجزای ماشین با روابطی است که بتواند نحوه و میزان تغییرات متغیرهای ولتاژ و جریان را در نقاط مختلف سیم‌پیچ نمایان سازد. با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده، دو دیدگاه فیزیکی و جعبه سیاه جهت مدل‌سازی سیم‌پیچ بیان شده است. جهت طراحی و هماهنگی عایقی در سیستم‌هایی با ولتاژ بالا نیاز به مدل‌های جعبه سیاه برای اجزای متفاوت سیستم قدرت دارد. دیدگاه فیزیکی مد نظر مهندسیین طراح ماشین‌های الکتریکی می‌باشد زیرا جهت طراحی عایق‌بندی سیم‌پیچ‌ها می‌بایست رفتار نوسانی ماشین و تنش‌های الکتریکی بوجود آمده در حالات گذرا در داخل سیم‌پیچ

امروزه با توجه به گسترش روزافزون کاربرد ماشین‌های الکتریکی در بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی، تعمیر و نگهداری و حفاظت از این عناصر بیش از پیش مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱]. ولتاژ گذرا به دلیل افزایش دامنه موج به هنگام طراحی ماشین می‌بایست مورد توجه قرار گیرد زیرا این امر عایق‌بندی ماشین را در معرض تنش‌های شدید الکتریکی قرار می‌دهد. شناخت بهتر از این امر با رایانه‌های دیجیتال امروزی امکان پذیر است. با استفاده از این اطلاعات، مهندسان طراحی می‌توانند ساختار عایق‌بندی مطمئن‌تر و احتمالاً اقتصادی‌تر ایجاد کنند که مهمترین مسئله در هزینه ماشین‌ها می‌باشد [۲]. در هنگام قطع و وصل کلیدهای قدرت، ولتاژ شبکه به طور موقت و برای کوتاه مدت از مقدار نامی خود تجاوز کرده و عایق‌بندی ماشین را در نقاط مختلف آن تحت تاثیر قرار می‌دهد و به همین دلیل شناخت

۴-بازنویسی پارامترهای الکتریکی سیم پیچ به روش المان محدود و اجرای شبیه سازی در نرم افزار انسیس ماکسول.

در نهایت با مدل سازی و شبیه سازی، شکل موج توزیع ولتاژ، ضریب تلفات عایقی و همچنین تلفات عایقی در نقاط مختلف سیم پیچ نشان داده می شود و شکل موج توزیع ولتاژ گره ها، جریان عبوری از کویل ها، ولتاژ روی کویل ها و تلفات توان توسط دو مدل کلاسیک RLC و مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته می شود.

۲- مدل شبکه نردبانی

مدار معادل یک واحد سیم پیچ فشارقوی در شکل (۱) نشان داده شده است. همه المان ها با عناصر متمرکز مدل شده و با واحدهای دیگر نیز در ارتباط است. پارامترهای مدل برای واحد سیم پیچ به شرح ذیل تعریف می شود [۲۰].

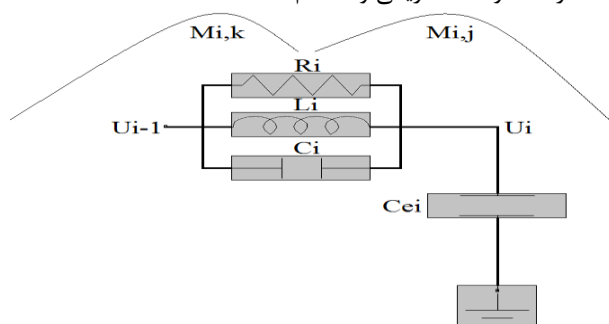
L_i : اندوکتانس معادل واحد آم سیم پیچ است که شار پراکندگی دوره های واحد آم را نمایش می دهد.

$M_{i,j}$: القای متقابل بین واحد i و j است.

C_i : ظرفیت طولی معادل برای واحد آم می باشد.

C_{e_i} : ظرفیت خازنی بین واحد آم و پتانسیل زمین است.

R_i : معرف مقاومت الکتریکی واحد آم است.



شکل (۱) : مدار معادل یک واحد سیم پیچ فشارقوی

۳- مدل الکتریکی عایق

وقتی عایق در یک میدان الکترواستاتیکی قرار می گیرد در مقابل عبور جریان مقاومت می کند. عایق های جامد به صورت یک مقاومت و خازن موازی می توانند مدل شوند. در ولتاژ متناوب در صورتی که خازن هیچ گونه تلفات انرژی نداشته باشد، جریان خازن ۹۰ درجه جلوتر از ولتاژ دو سر آن است. اگر با اتصال خازن به ولتاژ متناوب انرژی تلف شود، جریان و ولتاژ کمتر از ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. متمم زاویه بین جریان و ولتاژ خازن را با δ نمایش می دهند و تانژانت این زاویه را ضریب تلفات عایقی می خوانند. در این مدل، ضریب تلفات عایقی از نسبت جریان اهمی به جریان خازنی به دست می آید [۲۱-۲۶]. تانژانت دلتا بر حسب شریط دمای هوا، رطوبت و فرکانس متفاوت است. مطابق با شکل (۲) این ضریب از رابطه (۱) به دست می آید.

برآورد نماید. مدل RLC از مدل های مطرح شده از دیدگاه فیزیکی می باشد [۶] [۷]. مدلی که اجزای آن در رابطه مستقیم با واقعیت های فیزیکی می باشند یعنی سیم پیچ های فشارقوی در مدل به اجزائی تقسیم می شوند که هر جزء آن دارای مفهوم فیزیکی است و این اجزاء را واحد سیم پیچ می نامند و وابسته به فرکانس هستند [۸-۱۰]. مدل های مداری RLC به طور گسترده ای برای تجزیه و تحلیل گذراهای ناشی از صاعقه و یا سوئیچینگ در ترانسفورماتور استفاده شده است و به عنوان یک مدل فرکانس بالای سیم پیچ به تایید رسیده است [۱۱]. در سال ۲۰۰۹، از مدل RLC جهت تعیین ضرایب امواج سیار در ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شد. از آنجا که جهت تعیین این ضرایب نیاز به انجام آزمایشاتی دشوار، پرهزینه و حتی گاهی غیرممکن بود، از این مدل برای محاسبه این ضرایب استفاده شد [۱۲]. جدی ترین صدمات در ماشین های فشارقوی به دلیل خرابی عایق است. تخلیه جزئی^۳ منبع اصلی خرابی عایق است. در محدوده فرکانس مرتبط با PD، رفتار سیم پیچ ماشین به صورت یک شبکه RLC عمل می کند. برای ارزیابی PD، مدلی لازم است که ابعاد فیزیکی سیم پیچ ها را دقیقاً در محدوده فرکانس قابل قبول توصیف کند. بنابراین هر بخش از سیم پیچ به عنوان یک واحد RLC در نظر گرفته می شود [۱۳]. در سال های ۲۰۱۵، روش عددی برای محاسبه ماتریس های مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس سیم پیچ ترانسفورماتور و در سال ۲۰۱۷، محاسبه پارامترهای فشرده وابسته به فرکانس بر اساس پاسخ فرکانسی امیدانس و همچنین به روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. اهمیت محاسبه دقیق پارامترهای سیم پیچ شبیه سازی شده به روش RLC به منظور دستیابی به شکل موج دقیق تر توزیع ولتاژ در سیم پیچ ها نشان داده شد. در مدل سازی و تجزیه و تحلیل ماشین های الکتریکی برخی مسائل عملی وجود دارد که معادلات مربوط به در آن ها یا شناخته شده نیست و یا اصلاً وجود ندارد با این وجود در این سال ها محققان با مشروح تر کردن مدل RLC و با بالا بردن دقت محاسبات پارامترهای مدل به روش های متعدد به بهبود مدل سازی سیم پیچ ماشین به روش RLC پرداختند تا نتایج حاصل از شبیه سازی را به واقعیت نزدیک تر کنند [۱۴-۱۸].

ضریب تلفات عایقی از جمله پارامترهای وابسته به فرکانس است که با آن رابطه مستقیم دارد. ضریبی که گاهی در مدل سازی های سیم پیچ به روش RLC نادیده گرفته می شود. اگر ضریب تلفات دی الکتریک به طور مرتب بررسی و مقایسه شود، می توان با پیش بینی های لازم از خرابی تجهیزات الکتریکی جلوگیری کرد [۱۹].

در این مطالعه فرایند بررسی، محاسبه و به دست آوردن پارامترهای الکتریکی سیم پیچ با هدف مقایسه نتایج شبیه سازی به شرح زیر انجام گرفت:

۱- تفکیک مدل عایقی سیم پیچ از مدل کلاسیک شبکه نردبانی

۲- بازنویسی تمامی معادلات مداری مدل سازی سیم پیچ

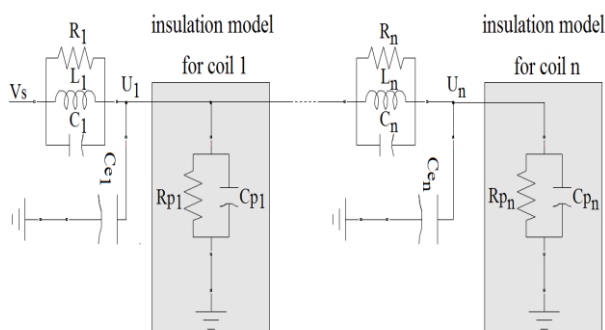
۳- محاسبه پارامترهای الکتریکی مدل عایق سیم پیچ به روش جایگزینی در مدار تشدید و جایگذاری در مدل پیشنهادی

$$\begin{cases} Q = \frac{R_x}{X_c} \\ X_c = \frac{1}{2\pi f_r (C + C_x)} \end{cases} \rightarrow R_x = \frac{Q}{2\pi f_r (C + C_x)} \quad (2)$$

که در آن f_r فرکانسی است که در آن تشدید رخ داده است. به این ترتیب پارامترهای ماده عایقی جهت محاسبه ضریب تلفات عایقی بدست می‌آید.

۴- مدل پیشنهادی کوئل

به منظور تفکیک تلفات عایقی از تلفات سیم‌پیچ در گذراهای سریع لازم است تا در ابتدا میزان ظرفیت خازنی و مقاومت عایقی از طریق جایگزینی عایق کوئل در مدار تشدید محاسبه شود و سپس این مقدار از میزان ظرفیت خازنی و مقاومتی کوئل تفکیک شود. اگر فرض شود که مدل عایقی بدست آمده از مدار تشدید برای هر واحد از سیم‌پیچ به مدل شبکه نردبانی آن مطابق با شکل (۴) اضافه گردد برای تحلیل مدار، می‌بایست هر شاخه را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد و نهایتاً با استفاده از قضیه جمع آثار نتیجه نهایی را گرفت، بنابراین شاخه‌های سلفی، خازنی و مقاومتی به طور جداگانه بررسی می‌گردند.



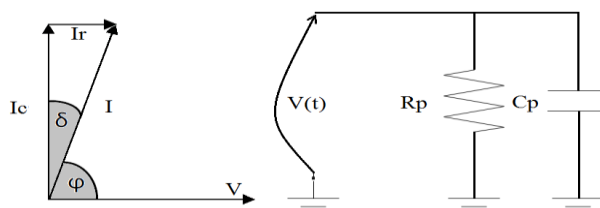
شکل (۴): مدار RLC به همراه مدل عایقی سیم‌پیچ

برای شاخه سلفی داریم:

$$\begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ \vdots \\ U_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & \dots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ M_{2,1} & L_2 & \dots & M_{2,n-1} & M_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{n-1,1} & M_{n-1,2} & \dots & M_{n-1,n-1} & M_{n-1,n} \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \dots & M_{n,n-1} & M_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ \vdots \\ I_{Ln} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\rightarrow U_L = M I_L$$

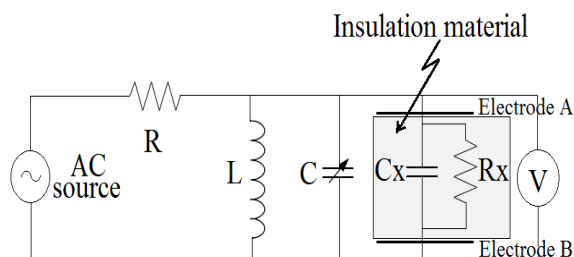
در ادامه به تشریح جریان تزریقی در گره‌ها می‌پردازیم. جهت ادامه کار سعی داریم ولتاژ شاخه‌ها را به ولتاژ گره‌ها تبدیل کنیم به همین منظور ابتدا ماتریس تلاقی در شبکه سلفی را مطابق با قواعد مدار به دست می‌آوریم لذا داریم:



شکل (۲): مدل الکتریکی عایق به صورت یک مقاومت و یک خازن موازی شده

$$\tan \delta = \frac{I_{Rp}}{I_{Cp}} = \frac{1}{(2\pi f) \times R_p \times C_p} \quad (1)$$

روهای اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی بستگی به فرکانس اندازه‌گیری دارد. در فرکانس‌های کم از روش پل استفاده می‌شود. برای فرکانس‌های بالاتر از روش جایگزینی در مدار تشدید و برای فرکانس‌های خیلی بالاتر از روش انعکاس موج استفاده می‌شود. در روش جایگزینی در مدار تشدید، نمونه عایق صفحه‌ای در یک خازن میکرومتری قرار داده می‌شود. پس از قرار دادن نمونه عایق در این خازن، ضخامت عایق اندازه‌گیری می‌شود. این خازن در یک مدار تشدید مانند شکل زیر قرار می‌گیرد.



شکل (۳): مدار تشدید جهت اندازه‌گیری ظرفیت و مقاومت ماده عایقی

در شکل (۳)، R یک مقاومت سری بالاست و برای ثابت نگه داشتن جریان کل در مدار استفاده می‌شود. روش اندازه‌گیری به این صورت است که ابتدا نمونه عایق را داخل خازن میکرومتری قرار می‌دهند و ضمن اندازه‌گیری ضخامت آن با تغییر اجزا مدار یا با تغییر فرکانس، مدار را به حالت تشدید در می‌آورند. همچنین با تغییر فرکانس، یا با تغییر ظرفیت C ، دامنه جریان را به مقدار $1/\sqrt{2}$ برابر جریان در حالت تشدید می‌رسانند و بدین ترتیب با در اختیار داشتن پهنای باند، ضریب کیفیت مدار تشدید یعنی Q ، میزان C_x را تعیین می‌نمایند زیرا پهنای باند در مدار RLC موازی فوق به محدوده‌ای از فرکانس‌ها گفته می‌شود که امپدانش مدار برابر یا بزرگتر از $R_x/\sqrt{2}$ باشد. در آزمایش دیگر ماده عایقی را از بین دو الکتروود برداشته می‌شود و مدار به حالت تشدید درآورده می‌شود و میزان ظرفیت خازنی C_v با دی الکتریک هوا اندازه‌گیری می‌شود تا به کمک رابطه $\epsilon_r = C_x/C_v$ عدد دی الکتریک ماده عایق نیز حاصل گردد. میزان مقاومت عایقی نیز از طریق ضریب کیفیت مدار به دست خواهد آمد یعنی:

$$\begin{bmatrix} I_{L1}^{\circ} \\ I_{L2}^{\circ} \\ \vdots \\ I_{Ln}^{\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \frac{1}{L_{1j}} & -\frac{1}{L_{12}} & \dots & -\frac{1}{L_{1n}} \\ -\frac{1}{L_{21}} & \sum_{j=2}^n \frac{1}{L_{2j}} & \dots & -\frac{1}{L_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{L_{n1}} & -\frac{1}{L_{n2}} & \dots & \sum_{j=n}^n \frac{1}{L_{nj}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\rightarrow I_L^{\circ} = HU$$

$$\begin{cases} q_i = C_{i0}(U_i - U_0) + \dots \\ + C_{ij}(U_i - U_j) + \dots \\ + C_{in}(U_i - U_n) \\ i = 0, 1, \dots, n \\ U_0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\rightarrow q_i = -C_{i0}U_0 - C_{i1}U_1 - \dots + (\sum_{j=0}^n C_{ij})U_i + \dots - C_{in}U_n$$

در صورتیکه $q=CU$ در رابطه (۱۰) داریم:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n C_{1j} & -C_{12} & \dots & -C_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \dots & \sum_{j=n}^n C_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

بنابراین برای جریان تزریقی خازنی داریم:

$$\dot{Q} = I_C = CU \rightarrow \ddot{Q} = \dot{I}_C = C\dot{U} \quad (11)$$

که به صورت ماتریسی رابطه (۱۲) می‌باشد که در آن شکل خاص ماتریس C به عنوان ماتریس خازنی گره‌ها نشان داده شده است. در این مورد برای شاخه اهمی نیز به طور مستقیم می‌توانیم به صورت ماتریسی رابطه (۱۳) را نشان دهیم که:

$$U_L = A^T U \rightarrow [U_L] = \begin{bmatrix} +1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & +1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & +1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & +1 \end{bmatrix}^T [U] \quad (4)$$

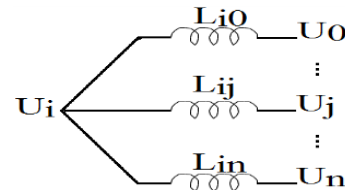
که در آن A عبارتست از ماتریس تلاقی شبکه القایی و U بردار ولتاژ گره‌هاست، بنابراین داریم:

$$A^T U = M \dot{I}_L \rightarrow M^{-1} A^T U = \dot{I}_L \quad (5)$$

رابطه (۵) را در ماتریس A ضرب می‌کنیم بنابراین داریم:

$$\underbrace{AM^{-1}A^T}_H U = A \underbrace{\dot{I}_L}_I \rightarrow HU = \dot{I}_L \quad (6)$$

که H یک ماتریس متقارن است. حال می‌خواهیم شبکه را که القاء متقابل ندارد تعریف کنیم که جانشین این شبکه که دارای القاء متقابل است باشد این شبکه می‌تواند مطابق با شکل (۵) تعریف شود:



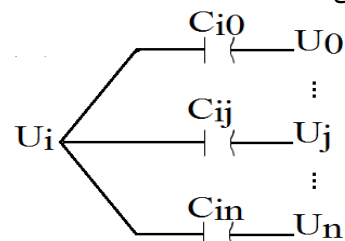
شکل (۵): شبکه جانشین بدون القاء متقابل

$$\begin{cases} I_{i0}^{\circ} = \frac{U_i - U_0}{L_{i0}} \\ I_{ij}^{\circ} = \frac{U_i - U_j}{L_{ij}} \quad \rightarrow \quad L_{ij} = L_{i0} + L_{ij} + \dots + L_{in} \\ I_{in}^{\circ} = \frac{U_i - U_n}{L_{in}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{Li}^{\circ} = \frac{1}{L_{i0}}U_0 - \frac{1}{L_{i1}}U_1 + \dots + (\sum_{j=0}^n \frac{1}{L_{ij}})U_i + \dots + \frac{1}{L_{in}}U_n \\ i = 0, 1, \dots, n \end{cases}$$

و به صورت بردار رابطه (۸) حاصل می‌شود و با فرض $U_0=0$ (گره مبنا) استقلال خطی گره‌ها حفظ می‌شود.

مشابه شاخه سلفی می‌توان جریان تزریقی برای شبکه خازنی را نیز به صورت زیر محاسبه کرد. شکل (۶) شبکه جایگزینی برای شاخه‌های خازنی را نشان می‌دهد.



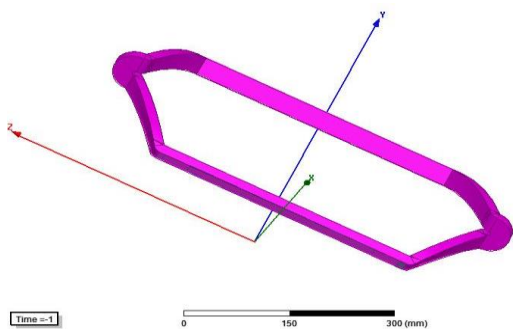
شکل (۶): شبکه جایگزین شاخه خازنی

$$\begin{bmatrix} I_{C1}^{\circ} \\ I_{C2}^{\circ} \\ \vdots \\ I_{Cn}^{\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{e1} + C_{p1} + C_1 + C_2 & -C_2 & \dots & 0 & 0 \\ -C_2 & C_{e2} + C_{p2} + C_2 + C_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{en-1} + C_{pn-1} + C_{n-1} + C_n & -C_n \\ 0 & 0 & \dots & -C_n & C_{en} + C_{pn} + C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} I_{G1}^{\circ} \\ I_{G2}^{\circ} \\ \vdots \\ I_{Gn}^{\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & \dots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_{pn-1}} + \frac{1}{R_n} & -\frac{1}{R_n} \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{R_n} & \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{pn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^{\circ} \\ U_2^{\circ} \\ \vdots \\ U_n^{\circ} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\rightarrow I_G^{\circ} = GU^{\circ}$$

مدار تشدید محاسبه شود مدار شکل (۳) در انسیس سیمپولار در حضور یک ولتاژ متناوب طراحی شد. شکل (۸) مدار تشدید طراحی شده در سیمپولار به عنوان نرم‌افزاری جهت اتصال یک مدار خارجی به کویل را نشان می‌دهد. با تغییرات فرکانس منبع، میزان ولتاژ و جریان خروجی از طریق اسیلوسکوپ ثبت شد تا دامنه و فاز جریان مشخص شود. میزان جریان مقاومت عایقی یعنی قسمت حقیقی و میزان جریان کاپاسیتانس عایق یعنی قسمت موهومی این جریان مشخص شد. با رسم نقاط به دست آمده از جریان مقاومت عایقی نسبت به جریان ورودی، پاسخ امپدانس مدار بر حسب فرکانس‌های اعمالی بدست آمد. شکل (۹) نمونه پاسخ امپدانس مدار برای کویل ۶ را نمایش می‌دهد. در این حالت با توجه به رابطه $L(C + Cx)\omega^2 = 1$ میزان ظرفیت خازنی عایق کویل‌ها، ضریب کیفیت مدار یا ضریب Q و مقدار مقاومت عایقی کویل‌ها به دست آمد. این میزان مقاومت و ظرفیت خازنی برای عایق کویل‌ها مطابق با جدول (۱) می‌باشد. این روند برای تمامی کویل‌ها جهت دستیابی به پارامترهای الکتریکی عایق کویل‌ها انجام شد.



شکل (۷): کویل طراحی شده در نرم‌افزار انسیس ماکسول

با توجه به روابط به دست آمده برای شاخه‌های سلفی، خازنی و اهمی، می‌توان به دستگاه معادلات دیفرانسیلی خطی معمولی مرتبه دو رابطه (۱۴) رسید که دارای n معادله است.

$$I = I_C^{\circ} + I_G^{\circ} + I_L^{\circ} = CU^{\circ\circ} + GU^{\circ} + HU \quad (14)$$

این معادله در تئوری ارتعاشات مطرح است، سیستم‌های فیزیکی که دارای این مدل ریاضی هستند، سیستم‌های نوسانی میرا و در حالت $G=0$ سیستم نوسانی نامیرا نامیده می‌شود. ثابت شده است که ماتریس‌های C ، H و G حقیقی و مثبت موکد هستند، بنابراین می‌توان ثابت کرد که فرکانس‌های تشدید با کوچک شدن مقدار ظرفیت‌ها، اندوکتانس‌ها و یا هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. میرائی‌ها با افزایش هدایت‌های الکتریکی افزایش و با افزایش ظرفیت‌های الکتریکی کاهش می‌یابد. این مسئله با رفتار یک مدار تشدید موازی مطابقت کامل دارد.

۵- روش جایگزینی در مدار تشدید

در این روش از یک مدار RLC موازی و با رساندن مدار به حالت رزونانس پارامترهای الکتریکی ماده عایقی را اندازه‌گیری می‌کنند. جهت رسیدن به این هدف، محیط آزمایشگاهی نرم‌افزار انسیس ماکسول انتخاب شد. بدین منظور ابعاد هندسی تمامی کویل‌ها به همراه ضخامت عایق مربوطه از ماشین در نرم‌افزار شبیه‌سازی و سپس در نرم‌افزار انسیس سیمپولار^۴ فراخوانی شد. در شکل (۷) کویل شبیه‌سازی شده در انسیس ماکسول آورده شده است. از آنجایی که در فرکانس‌های بالا لازم است تا پارامترهای الکتریکی ماده عایقی کویل به روش جایگزینی در

جدول (۱): پارامترهای الکتریکی کویل‌های ماشین

مقاومت (مگا اهم)	کویل	کاپاسیتانس (پیکوفاراد)
۵۳۶,۷۵۶	۱	۱۰۴,۶۲۴
۵۳۶,۷۴۳	۲	۱۰۴,۶۳۶
۵۳۶,۷۶۱	۳	۱۰۴,۶۳۱
۵۳۶,۷۶۵	۴	۱۰۴,۶۲۸
۵۳۶,۷۴۸	۵	۱۰۴,۶۲۱
۵۳۶,۷۵۲	۶	۱۰۴,۶۲۶
۵۳۶,۷۶۳	۷	۱۰۴,۶۳۳
۵۳۶,۷۴۴	۸	۱۰۴,۶۲۹
۵۳۶,۷۴۶	۹	۱۰۴,۶۳۹
۵۳۶,۷۵۵	۱۰	۱۰۴,۶۱۸
۵۳۶,۷۶۰	۱۱	۱۰۴,۶۲۵
۵۳۶,۷۴۹	۱۲	۱۰۴,۶۳۸

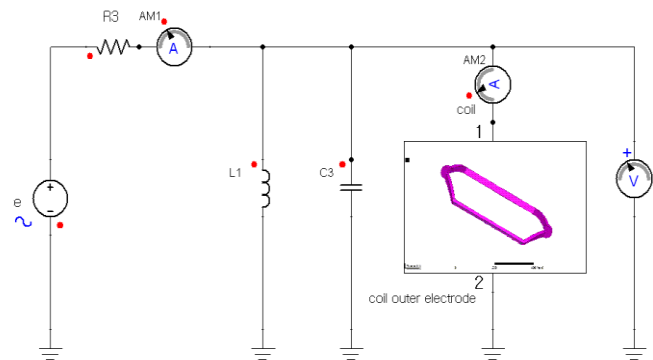
جدول (۲) ابعاد و شکل (۱۰) مش بندی این ماشین جهت تبدیل دامنه محاسباتی به زیر دامنه های کوچکتر، محدود و منظم برای حل معادلات ماکسول را به تصویر می کشد. با حل یک مسئله مغناطیسی توسط عناصر محدود، مقادیر پتانسیل در کلیه گره‌ها مشخص می گردد و از آن‌ها جهت محاسبه پارامترهای مفید ماشین مانند چگالی فوران استفاده می شود که به آن عمل پس پردازش گفته می شود.

جدول (۲): ابعاد ماشین تحت آزمایش

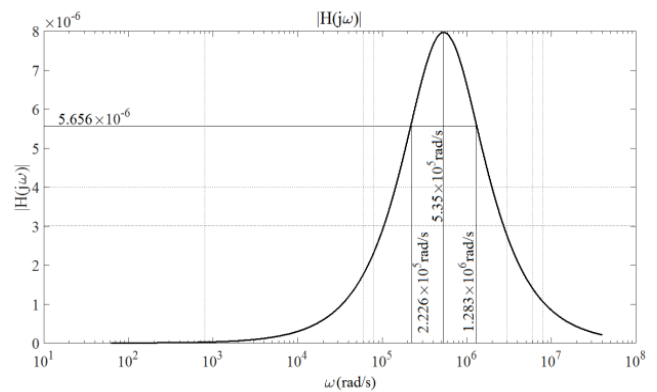
پارامترها	مقدار
توان خروجی	۲۵۰ KW
ولتاژ	۶ KV
تعداد شیار	۳۶
تعداد قطب	۴
فرکانس	۵۰ Hz
طول هسته استاتور	۴۰۰ mm
قطر داخلی هسته استاتور	۳۷۰ mm
قطر خارجی هسته استاتور	۶۲۰ mm
طول هسته روتور	۴۰۰ mm
قطر داخلی هسته روتور	۱۱۰ mm
قطر خارجی هسته روتور	۳۶۸ mm

ماکسول دوبعدی شامل ماژول‌های حل کننده میدان الکتریکی ساکن برای محاسبه ماتریس کاپاسیتانس، نیرو، گشتاور و شار پیوندی که می تواند از میدان الکتریکی محاسبه گردد. حل کننده میدان مغناطیسی ساکن جهت محاسبه ماتریس اندوکتانس، نیرو و گشتاور می باشد. حل کننده میدان شرایط AC جهت بدست آوردن ماتریس ادمیتانس، حل کننده میدان شرایط DC جهت محاسبه کندوکتانس، حل کننده میدان جریان گردابی جهت محاسبه چگالی جریان که شامل همه اثرات جریان گردابی (اثر پوستی) همچنین محاسبه ماتریس امپدانس، نیرو، گشتاور، تلفات هسته، حل کننده مغناطیسی گذرا از طریق منابع ولتاژ یا جریان با تغییرات اختیاری که به صورت تابعی از زمان ایجاد می شوند توانایی کویل شدن با مدارهای بیرونی نیز دارند و همچنین اثرات حرکات چرخشی یا انتقالی را می تواند شبیه سازی کند [۲۷] [۲۸].

مدل پیشنهادی در نرم افزار انسیس ماکسول پیاده سازی شد و پارامترهای الکتریکی به دست آمده از پل شرینگ و آنالیز المان محدود به مدل اضافه شد. از آنجایی که مدل RLC جهت مطالعه گذراهای سریع می باشد زمان شبیه سازی تا ۵۰ میکروثانیه در نظر گرفته شد. شکل (۱۱) شکل موج توزیع ولتاژ بین کویل‌های ۳-۲، ۷-۶ و ۱۱-۱۰ است در لحظه صفر یعنی لحظه برخورد موج به ابتدای سیم پیچ ظرفیت‌های الکتریکی تعیین کننده توزیع ولتاژ در بر روی سیم پیچ‌ها هستند. به این توزیع ولتاژ، توزیع ولتاژ اولیه می گویند که در آن اثر سلف‌ها در مقابل خازن‌ها صرف نظر می شود. در توزیع ولتاژ نهایی و یا



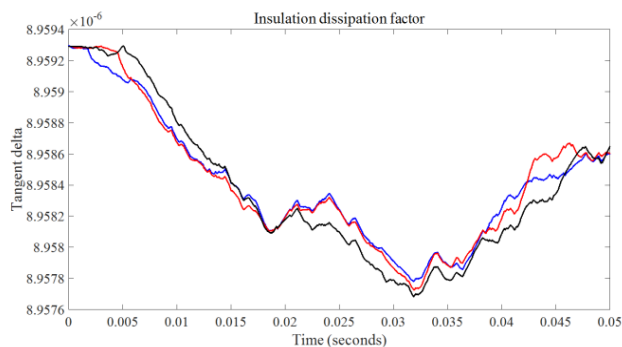
شکل (۸): مدار تشدید موازی طراحی شده در سیمپولار جهت اتصال مدار خارجی به عایق کویل شبیه سازی شده در نرم افزار انسیس ماکسول



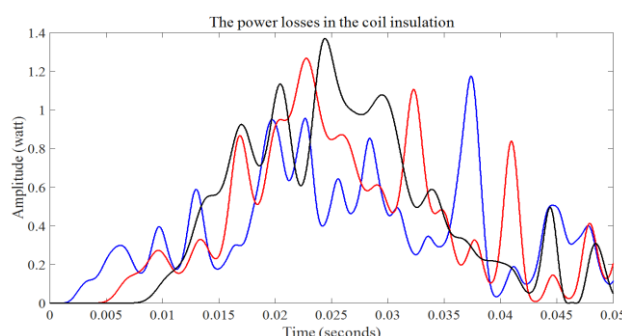
شکل (۹): پهنای باند در مدار رزونانس موازی برای عایق کویل ۶

۶- نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی و مقایسه و تفکیک تلفات عایقی و همچنین دست یابی به شکل موج توزیع ولتاژ در دوره‌های سیم پیچ، شبیه سازی‌ها بر روی سیم پیچ ماشین القایی با پارامترهای انجام شد. پارامترهای الکتریکی سیم پیچ ماشین به روش المان محدود به دست آمد و به مدل اعمال شد.



شکل (۱۲): ضریب تلفات عایقی برای عایق کویل‌های دوم، ششم و دهم از یک فاز از ماشین به کمک مدل پیشنهادی (آبی: بین کویل ۳-۲، قرمز: بین کویل ۶-۷، مشکی: بین کویل ۱۱-۱۰)



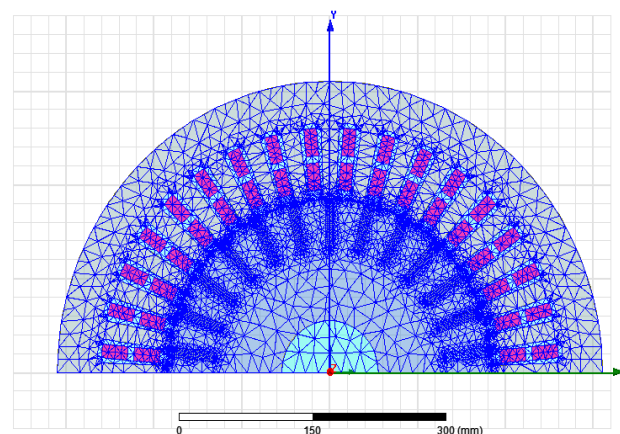
شکل (۱۳): تلفات عایقی برای عایق کویل‌های دوم، ششم و دهم از یک فاز از ماشین به کمک مدل پیشنهادی (آبی: بین کویل ۳-۲، قرمز: بین کویل ۶-۷، مشکی: بین کویل ۱۱-۱۰)

۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک شبکه نردبانی کویل

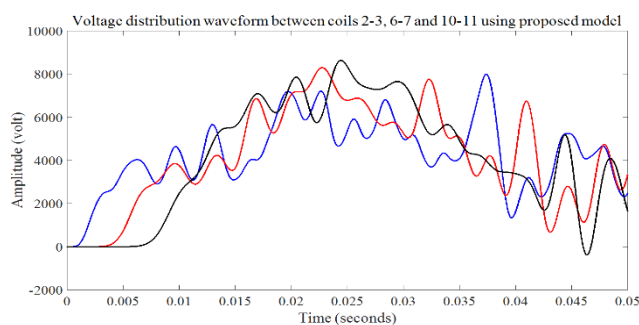
مسئله عمده در مدل‌سازی سیم‌پیچ ماشین‌ها به کمک مدل کلاسیک شبکه نردبانی، اعتبار مدل می‌باشد و می‌بایست پریود فرکانس در حالت گذرا حداقل ۱۰ برابر بزرگتر از پریود سیر بزرگترین جزء مدل باشد تا شرط مشروح بودن برقرار باشد و برای اینکه مدل به حوزه‌های فرکانسی بالاتر کشانده شود باید واحد محاسباتی را از جفت کویل به کویل و در نهایت دور در نظر گرفت. در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت کویل و محاسبه پریود فرکانسی مربوطه، شرط مشروح بودن برقرار شد. به منظور مقایسه بهتر نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل پیشنهادی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌ها نیز به کمک مدل کلاسیک شبکه نردبانی انجام شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته شد. شکل (۱۴) تا (۱۶) مقایسه شکل موج توزیع ولتاژ را به کمک مدل کلاسیک شبکه نردبانی و مدل پیشنهادی را نمایش می‌دهد. به نظر می‌رسد که مقاومت و ظرفیت خازنی عایق اثر فاحشی بر روی دقت شکل موج توزیع ولتاژ در نقاط مختلف سیم‌پیچ‌ها خواهد گذاشت.

در شرایط کار عادی، اندوکتانس‌ها تعیین‌کننده وضعیت تقسیم ولتاژ در طول سیم‌پیچ هستند و در یک بازه زمانی گذرای سریع توزیع ولتاژ اولیه توسط خازن‌های مدار و توزیع ولتاژ نهایی توسط سلف‌ها و مقاومت‌ها تعیین می‌شود.

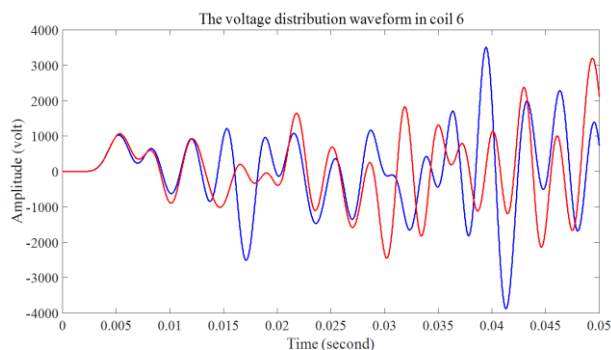
از ولتاژ و فرکانس مدل RC مربوط به عایق کویل‌های دوم، ششم و دهم در هر لحظه از زمان شبیه‌سازی، نمونه‌برداری شد و میزان تانژانت دلتا تا پایان زمان شبیه‌سازی بدست آمد. شکل (۱۲) دامنه تغییرات ضریب تلفات عایقی را برای این کویل‌ها نشان می‌دهد. با محاسبه میزان تانژانت دلتا دسترسی به میزان تلفات عایقی امکان‌پذیر خواهد بود. شکل (۱۳) این میزان تلفات عایقی را برای کویل‌های نام برده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده به طور خلاصه می‌توان گفت که رفتار سیم‌پیچ همگن مشابه یک خط انتقال است یعنی دارای فرکانس‌های طبیعی خاص است و اگر موج تحریک، یکی از آن‌ها را برانگیزد می‌تواند سیم‌پیچ را به نوسان درآورد. در پایین‌ترین به صورت کیفی انتظار می‌رود که وسط سیم‌پیچ حداکثر اضافه ولتاژ را داشته باشیم. در اولین فرکانس تشدید، نقاطی که به فاصله یک چهارم از اول و آخر سیم‌پیچ قرار دارند در معرض خطر هستند و به همین ترتیب الی آخر. در حالت کلی می‌توان گفت توزیع ولتاژ در طول سیم‌پیچ به رتبه فرکانس ویژه، شرایط مرزی مثل زمین بودن یا باز بودن انتهای سیم‌پیچ و پارامترهای مداری سیستم بخصوص میرایی‌ها وابسته است.



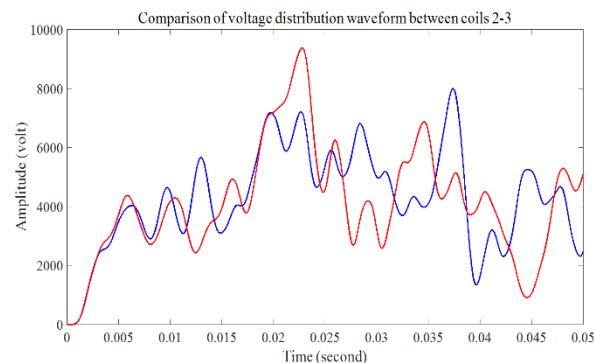
شکل (۱۰): شبیه‌سازی و مش‌بندی ماشین تحت آزمایش در انسیس ماکسول



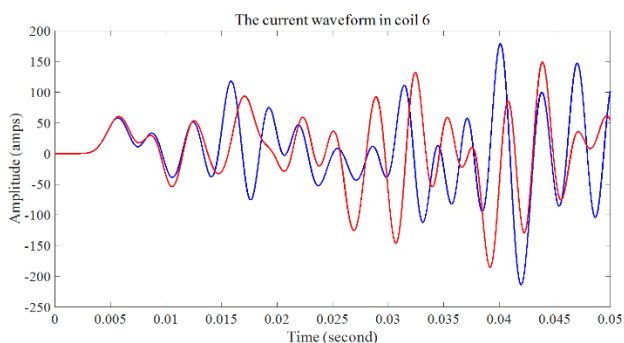
شکل (۱۱): شکل موج توزیع ولتاژ بین کویل‌های ۲-۳، ۶-۷، ۱۰-۱۱ از یک فاز از ماشین به کمک مدل پیشنهادی (آبی: بین کویل ۳-۲، قرمز: بین کویل ۶-۷، مشکی: بین کویل ۱۱-۱۰)



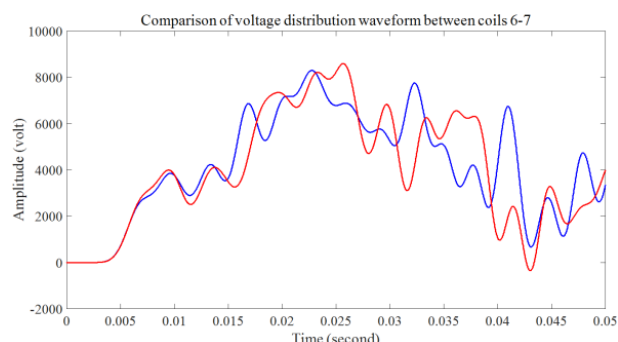
شکل (۱۷): مقایسه شکل موج توزیع ولتاژ ثبت شده از دو سر کویل ششم به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)



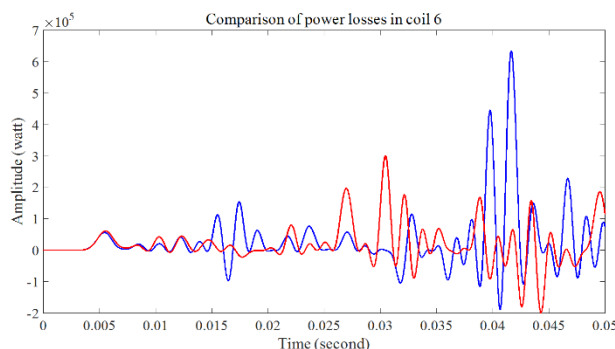
شکل (۱۴): مقایسه شکل موج‌های توزیع ولتاژ بین کویل ۲-۳ به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)



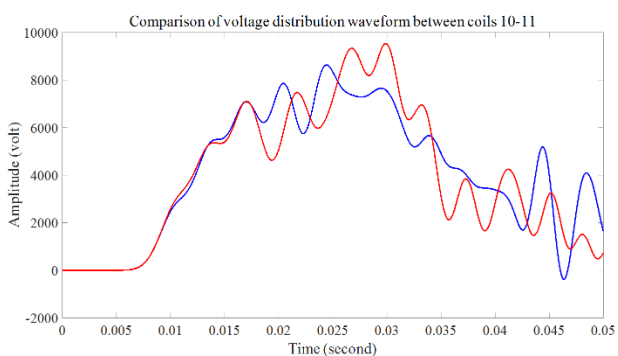
شکل (۱۸): مقایسه شکل موج جریان عبوری از کویل ششم به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)



شکل (۱۵): مقایسه شکل موج‌های توزیع ولتاژ بین کویل ۶-۷ به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)



شکل (۱۹): مقایسه تلفات توان در کویل ششم به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)



شکل (۱۶): مقایسه شکل موج‌های توزیع ولتاژ بین کویل ۱۰-۱۱ به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به اصلاح مدل شبکه نردبانی به منظور دست‌یابی به تلفات عایقی سیم‌پیچ در گذراهای سریع پرداخته شد. سیم‌پیچ یک فاز از ماشین القایی به کمک مدل پیشنهادی مدل‌سازی و با شبیه‌سازی، شکل موج توزیع ولتاژ، ضریب تلفات عایقی و همچنین تلفات عایقی در نقاط مختلف سیم‌پیچ نشان داده شد. در این مطالعه، مدل عایق سیم‌پیچ از مدل RLC تفکیک و تمامی روابط مداری مربوط به این مدل بازنویسی شد. در ادامه برای نمونه، شکل موج توزیع ولتاژ گره‌ها، جریان عبوری از کویل‌ها، ولتاژ روی کویل‌ها و تلفات توان توسط دو مدل کلاسیک RLC

با توجه به اینکه در مدل‌ها، شاخه RC جریان ناشی وجود دارد و این جریان ناشی برای مدل پیشنهادی نیز بیشتر می‌باشد لازم است تا از جریان‌های هر کویل به طور جداگانه نمونه‌برداری شود و با در اختیار داشتن ولتاژ هر کویل، توان تلفاتی در هر کویل محاسبه شود. برای نمونه، شکل (۱۷) تا (۱۹) شکل موج توزیع ولتاژ، شکل موج جریان عبوری و تلفات توان را برای کویل ششم نشان می‌دهد. مشخص است که این تلفات توان برای هر کویل در مدل پیشنهادی به دلیل تفکیک شاخه RC عایق از کویل با مدل کلاسیک RLC متفاوت خواهد بود.

[12] Mousavi, A., & Rahimpour, E. (2009, October). Determining the traveling wave coefficients in power transformers using detailed model. In 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (Vol. 1, pp. 349-354). IEEE.

[13] Nafar, M., Niknam, T., & Gheisari, A. (2011). Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(3), 493-499.

[14] Župan, T., Trkulja, B., Obrist, R., Franz, T., Cranganu-Cretu, B., & Smajic, J. (2015). Transformer windings' RLC parameters calculation and lightning impulse voltage distribution simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 1-4.

[15] Ahour, J. N., Seyedtabaie, S., & Gharehpetian, G. B. (2017). Modified transformer winding ladder network model to assess non-dominant frequencies. *IET Electric Power Applications*, 11(4), 578-585.

[16] Chaouche, M. S., Houassine, H., Moulahoum, S., & Colak, I. (2017, November). Finite element method to construct a lumped parameter ladder network of the transformer winding. In 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 1092-1096). IEEE.

[17] Ren, F., Xiao, Y., Zhan, C., Liu, Y., Yang, F., Ji, S., & Zhu, L. (2018). Ladder network parameters identification of an isolated winding by combining the intelligent optimisation algorithm and GNIA. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(2), 296-304.

[18] Ren, F., Ji, S., Zhu, L., Zhang, F., & Liu, Y. (2019). Generic algorithm to calculate Jacobian matrix used for ladder network parameters identification and winding fault diagnosis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(15), 3370-3377.

[19] Yalentić, V., Gržinić, S., & Dobrec, D. (2017, July). Testing the electrical insulation system of power transformer based on mesuring factor of dielectric losses. In *IEEE EUROCON 2017-17th International Conference on Smart Technologies* (pp. 423-427). IEEE.

[20] Ahour, J. N., Seyedtabaie, S., & Gharehpetian, G. B. (2016, May). Valuable tips for transformer ladder network parameters estimation. In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 632-637). IEEE.

[21] Gamage, C. M., Nupehewa, J. M., Kodikara, K. K. C. S., Chathuranga, S. A. D., Samarasinghe, R., & Lucas, J. R. (2016, April). Capacitance and $\tan \delta$ measuring equipment for high voltage insulation modelling and simulation. In 2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon) (pp. 248-253). IEEE.

[22] Phloymuk, N., Nimsanong, P., Phumipunepon, N., Potivejkul, S., Wiangtong, T., & Pattanadech, N. (2018, September). The Dissipation Factor ($\tan \delta$) Monitoring of A Stator Winding Insulation of A Synchronous Machine. In 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) (pp. 1-4). IEEE.

[23] Morsalin, S., & Phung, B. T. (2019). Modeling of dielectric dissipation factor measurement for XLPE cable based on Davidson-Cole model. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(3), 1018-1026.

و مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته شد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و با توجه به تفکیک تلفات عایقی از تلفات سیم‌پیچ در گذراهای سریع و در فرکانس‌های بالا، مدل پیشنهادی می‌تواند به منظور رسیدن به پاسخ‌های دقیق‌تر پدیده‌های گذرای سریع مثل تخلیه‌های جزئی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] بقایی پور، دارابی، احمد، دستفان، علی. (۲۰۱۸). ارائه یک مدل مبتنی بر آزمایش جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی موثر بر نویز صوتی در موتور سنکرون، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۵۳، شماره ۱۶، صفحه ۲۳۱ الی ۲۴۲.

[2] Ferreira, R. S., & Ferreira, A. C. (2019, May). End-Windings Influence in the Transient Voltage Distribution in Electrical Machine Windings Using Finite Elements Method. In 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 468-475). IEEE.

[3] Gupta, A. D., & Faiyaz, A. F. (2019, March). Study and Analysis of Switching Transients in High Voltage Transmission Line from Barapukuria to Bibiyana of Bangladesh. In 2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE) (pp. 1-5). IEEE.

[۴] صفایی، فریدالدین، رضانی، نبی اله، نیاز آذری، میلاد. (۲۰۱۸). ارزیابی و پیش‌بینی اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی شبکه‌های توزیع پیچیده با مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۵۳، شماره ۱۶، صفحه ۲۴۳ الی ۲۵۸.

[5] Zhu, L., Mo, W., Wang, Y., Fan, W., Li, G., & Huang, B. (2019, November). Investigation of Wide Band Voltage Measurement Technology for Switching Transient Overvoltage Induced by the Operation of the Vacuum Circuit Breaker. In 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) (pp. 2793-2796). IEEE.

[6] Bizzarri, F., Ghezzi, L., Maglio, M., Rigamonti, F., & Brambilla, A. (2019). Simulations of Three-Phase Current Interruptions Through a Black-Box Model of Miniature Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(2), 937-945.

[7] Hosseini, S. H., Vakilian, M., & Gharehpetian, G. B. (2008). Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 733-741.

[8] Shabestary, M. M., Ghanizadeh, A. J., Gharehpetian, G. B., & Agha-Mirsalim, M. (2013). Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding. *IEEE transactions on power delivery*, 29(1), 108-117.

[9] Ahour, J. N., Seyedtabaie, S., & Gharehpetian, G. B. (2016, May). Valuable tips for transformer ladder network parameters estimation. In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 632-637). IEEE.

[10] Hosseinibafqi, S., Akbari, H., & Saied, S. (2020). An improved model of cage induction machines for fast transients studies. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(4), e12273.

[11] Shibuya, Y., Matsumoto, T., & Teranishi, T. (2005, June). Modelling and analysis of transformer winding at high frequencies. In International Conference on Power Systems Transients (IPST'05).



سیدامین سعید تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی در سال‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۹۱ اخذ کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه طراحی، مدل سازی و تخمین پارامترهای ماشین‌های الکتریکی است. وی هم اکنون استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد است.

زیر نویس‌ها

- ¹ RLC Ladder Network (RLC)
- ² Ansys Maxwell
- ³ Partial Discharge (PD)
- ⁴ Ansys simplorer

- [24] Morsalin, S., Phung, B. T., & Danikas, M. G. (2018, September). Influence of partial discharge on dissipation factor measurement at very low frequency. In 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) (pp. 1-5). IEEE.
- [25] Madonna, V., Giangrande, P., & Galea, M. (2019). Evaluation of strand-to-strand capacitance and dissipation factor in thermally aged enamelled coils for low-voltage electrical machines. IET Science, Measurement & Technology, 13(8), 1170-1177.
- [26] Faria, G., Pereira, M., Lopes, G., Villibor, J., Tavares, P., & Faria, I. (2018, June). Evaluation of capacitance and dielectric dissipation factor of distribution Transformers- Experimental Results. In 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) (pp. 336-339). IEEE.
- [27] Silva, V. C., Meunier, G., & Foggia, A. (1996). A 3D finite-element computation of eddy currents and losses in the stator end laminations of large synchronous machines. IEEE Transactions on Magnetics, 32(3), 1569-1572.
- [28] Arshad, W. M., Lendenmann, H., & Persson, H. (2008). End-winding inductances of MVA machines through FEM computations and IEC-specified measurements. IEEE Transactions on Industry Applications, 44(6), 1693-1700

رزومه

سیدمجتبی حسینی بافقی تحصیلات



دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهریز (۱۳۸۹)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب (۱۳۹۱) و دکتری مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد (۱۳۹۸) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مدل‌سازی گذرای ترانسفورماتورها، موتورها و ژنراتورها در سیستم‌های قدرت الکتریکی می‌باشد.

حمیدرضا اکبری تحصیلات دانشگاهی



خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکتری مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران سپری کرده است. وی هم اکنون استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ماشین‌های الکتریکی و انرژی‌های تجدیدپذیر است.

Modification of RLC Ladder Network Model For Winding In Order To Separate Insulation Losses In Fast Transient

Syyed Mojtaba Hosseini Bafqi¹, HamidReza Akbari^{*2}, Syyed Amin Saeid³

¹ Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
Smh1365@iauyazd.ac.ir

^{*2} Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
H.Akbari @iauyazd.ac.ir

³ Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
Saied1696@iauyazd.ac.ir

Abstract: This deals with the separation of the insulation model from the coil ladder network model in order to obtain the insulation losses of the coil in fast transients. Ladder network model or RLC Ladder Network (RLC) is introduced as a coil fast transient model for studying fast transient phenomena at high frequencies. In this study, the coil insulation model is separated from the RLC model and all circuit relationships related to this model are rewritten. The electrical parameters of the insulation are calculated by the substitution method in the resonant circuit. The single-phase windings of the 6KV induction machine are modeled with the help of the proposed model and by simulation in the Ansys Maxwell software; the voltage distribution waveform, the insulation loss coefficient, and the insulation loss at different points of the wire are shown. In the following, the voltage distribution waveform of the nodes, the current passing through the coils, the voltage on the coils and the power losses in the coils are compared by two classical RLC models and the proposed model. In this study, according to the separation of insulation losses from winding losses in fast transients and at high frequencies, the proposed model can be used as a suitable tool to achieve more accurate responses of fast transient phenomena.

Keywords: power coils, insulation loss coefficient, fast transient, insulation model.