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 گذراهای 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

امروزه با توجه به گسترش روزافزون کاربرد ماشین‌های الکتریکی در بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی، تعمیر و نگهداری و حفاظت از این عنا صر بیش از پیش مورد توجه زیادی قرار گرفته ا ست[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 عایق بندی 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 در صد و دامنه ا ضافه ولتاژها در ما شین حائز اهمیت فراوان می‌با شد [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 مهندسین طراح ماشین‌های الکتریکی می‌باشد زیرا جهت طراحی عایق‌بندی سیم‌پیچ‌ها می‌بایست رفتار نوسانی ماشین و تنش‌های الکتریکی بوجود آمده در حالات گذرا در داخل سیم‌پیچ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

برآورد نماید. مدل RLC از مدل‌های مطرح شده از دیدگاه فیزیکی می‌باشد[۶] [۷]. مدلی که اجزای آن در رابطه مستقیم با واقعیت‌های فیزیکی می‌باشند یعنی سیم‌پیچ‌های فشارقوی در مدل به اجزائی تقسیم می‌شوند که هر جزء آن دارای مفهوم فیزیکی است و این اجزاء را واحد سیم‌پیچ می‌نامند و وابسته به فرکانس هستند [۸-۱۰]. مدل‌های 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 سیم‌پیچ 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]. جدی‌ترین صدمات در ماشین‌های فشارقوی به دلیل خرابی عایق است. تخلیه جزئی[۳] منبع اصلی خرابی عایق است. در محدوده فرکانس مرتبط با PD، رفتار سیم‌پیچ ماشین به صورت یک شبکه RLC عمل می‌کند. برای ارزیابی PD، مدلی لازم است که ابعاد فیزیکی سیم‌پیچ‌ها را دقیقاً در محدوده فرکانس قابل قبول توصیف کند. بنابراین هر بخش از سیم‌پیچ به عنوان یک واحد RLC در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. در سال‌های ۲۰۱۵، روش عددی برای محاسبه ماتریس‌های مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس سیم‌پیچ ترانسفورماتور و در سال ۲۰۱۷، محاسبه پارامترهای فشرده وابسته به فرکانس براساس پاسخ فرکانسی امپدانس و همچنین به روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. اهمیت محاسبه دقیق پارامترهای سیم‌پیچ شبیه‌سازی شده به روش RLC به منظور دست‌یابی به شکل موج دقیق‌تر توزیع ولتاژ در سیم‌پیچ‌ها نشان داده شد. در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل ماشین‌های الکتریکی برخی مسائل عملی وجود دارد که معادلات مربوط به در آن‌ها یا شناخته شده نیست و یا اصلاً وجود ندارد با این وجود در این سال‌ها محققان با مشروح‌تر کردن مدل RLC و با بالا بردن دقت محاسبات پارامترهای مدل به روش‌های متعدد به بهبود مدل‌سازی سیم‌پیچ ماشین به روش RLC پرداختند تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر کنند [۱۴-۱۸].

ضریب تلفات عایقی از جمله پارامترهای وابسته به فرکانس است که با آن رابطه مستقیم دارد. ضریبی که گاهاً در مدل‌سازی‌های سیم‌پیچ به روش RLC نادیده گرفته می‌شود. اگر ضریب تلفات دی‌الکتریک به طور مرتب بررسی و مقایسه شود، می‌توان با پیش‌بینی‌های لازم از خرابی تجهیزات الکتریکی جلوگیری کرد [۱۹].

در این مطالعه فرایند بررسی، محاسبه و به دست آوردن پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ با هدف مقایسه نتایج شبیه‌سازی به شرح زیر انجام گرفت:

۱- تفکیک مدل عایقی سیم‌پیچ از مدل کلاسیک شبکه نردبانی

۲-بازنویسی تمامی معادلات مداری مدل‌سازی سیم پیچ

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

۴-بازنویسی پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ به روش المان محدود و اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس ماکسول.

در نهایت با مدل‌سازی و شبیه‌سازی، شکل موج توزیع ولتاژ، ضریب تلفات عایقی و همچنین تلفات عایقی در نقاط مختلف سیم‌پیچ نشان داده می‌شود و شکل موج توزیع ولتاژ گره‌ها، جریان عبوری از کویل‌ها، ولتاژ روی کویل‌ها و تلفات توان توسط دو مدل کلاسیک RLC و مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته می‌شود.

۲- مدل شبکه نردبانی

مدار معادل یک واحد سیم‌پیچ فشارقوی در شکل (۱) نشان داده شده است. همه المان‌ها با عناصر متمرکز مدل شده و با واحدهای دیگر نیز در ارتباط است. پارامترهای مدل برای واحد سیم‌پیچ به شرح ذیل تعریف می‌شود [۲۰].

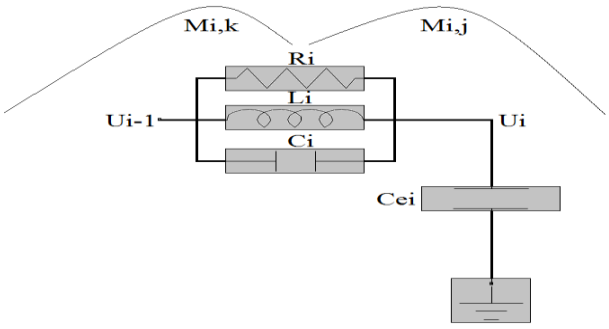
L_i: اندوکتانس معادل واحد iام سیم‌پیچ است که شار پراکندگی دورهای واحد iام را نمایش می‌دهد.

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

C_i: ظرفیت طولی معادل برای واحد iام می‌باشد.

Ce_i: ظرفیت خازنی بین واحد iام و پتانسیل زمین است.

R_i: معرف مقاومت الکتریکی واحد iام است.

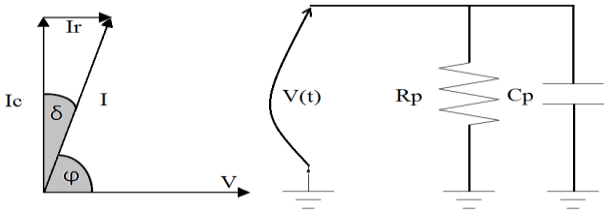


شکل (۱) : مدارمعادل یک واحد سیم‌پیچ فشارقوی

۳- مدل الکتریکی عایق

وقتی عایق در یک میدان الکترواستاتیکی قرار می‌گیرد در مقابل عبور جریان مقاومت می‌کند. عایق‌های جامد به صورت یک مقاومت و خازن موازی می‌توانند 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 می‌دهند 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 می‌آید [۲۱-۲۶]. تانژانت دلتا برحسب شریط دمای هوا، رطوبت و فرکانس متفاوت است. مطابق با شکل (۲) این ضریب از رابطه (۱) به دست می‌آید.

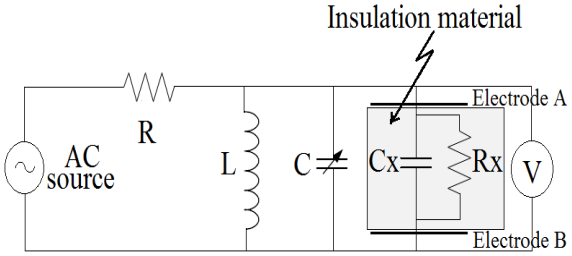
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



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

$$\tan\delta = \frac{I_{Rp}}{I_{Cp}} = \frac{1}{(2\pi f)\times R_p \times C_p} \qquad (۱)$$

رو های اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی بستگی به فرکانس انداز گیری 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 میکرو متری قرار داده می‌شود. پس از قرار دادن نمونه عایق در این خازن، ضخامت عایق اندازه گیری می‌شود. این خازن در یک مدار تشدید مانند شکل زیر قرار می‌گیرد.



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

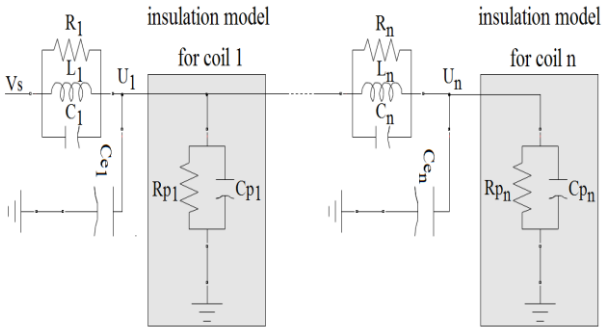
در شکل (۳)، R یک مقاومت سری بالاست و برای ثابت نگه داشتن جریان کل در مدار استفاده می‌شود. روش اندازه‌گیری به این صورت است که ابتدا نمونه عایق را داخل خازن میکرومتری قرار می‌دهند و ضمن اندازه‌گیری ضخامت آن با تغییر اجزا مدار یا با تغییر فرکانس، مدار را به حالت تشدید در می‌آورند. همچنین با تغییر فرکانس،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

$$\begin{cases} Q = \dfrac{Rx}{Xc} \\ Xc = \dfrac{1}{2\pi f_r (C+Cx)} \end{cases} \rightarrow Rx = \frac{Q}{2\pi f_r (C+Cx)} \qquad (۲)$$

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 کویل

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 کویل در مدار تشدید محاسبه شود و سپس این مقدار از میزان ظرفیت خازنی و مقاومتی کویل 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 می‌گرند.



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

برای شاخه سلفی داریم:

$$\begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ \vdots \\ U_{Ln} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ M_{2,1} & L_2 & \cdots & M_{2,n-1} & M_{2,n} \\ M_{n-1,1} & M_{n-1,2} & \cdots & M_{n-1,n-1} & M_{n-1,n} \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \cdots & M_{n,n-1} & M_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{L1} \\ \dot{I}_{L2} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Ln} \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

$$\rightarrow U_L = M\dot{I}_L$$

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:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$$U_L = A^T U \rightarrow [U_L] = \begin{bmatrix} +1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & +1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & +1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & +1 \end{bmatrix}^T [U] \qquad (۴)$$

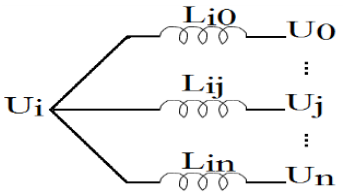
که در آن A عبارتست از ماتریس تلاقی شبکه القایی و U بردار ولتاژ گره‌هاست، بنابراین داریم:

$$A^T U = M \overset{\circ}{I_L} \rightarrow M^{-1} A^T U = \overset{\circ}{I_L} \qquad (۵)$$

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

$$\underbrace{AM^{-1}A^T}_{H} U = A \overset{\circ}{I_L} \rightarrow HU = \overset{\circ}{I_L} \qquad (۶)$$

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:



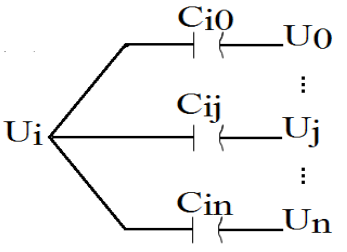
شکل (۵) : شبکه جانشین بدون القاء متقابل

$$\begin{cases} \overset{\circ}{I_{i0}} = \dfrac{U_i - U_0}{L_{i0}} \\ \overset{\circ}{I_{ij}} = \dfrac{U_i - U_j}{L_{ij}} \xrightarrow{I_{Li}=I_{i0}+I_{ij}+\cdots+I_{in}} \\ \overset{\circ}{I_{in}} = \dfrac{U_i - U_n}{L_{in}} \end{cases} \qquad (۷)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} \overset{\circ}{I_{L1}} \\ \overset{\circ}{I_{L2}} \\ \vdots \\ \overset{\circ}{I_{Ln}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq 1}}^{n} \frac{1}{L_{1j}} & -\frac{1}{L_{12}} & \dots & -\frac{1}{L_{1n}} \\ -\frac{1}{L_{21}} & \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq 2}}^{n} \frac{1}{L_{2j}} & \dots & -\frac{1}{L_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{L_{n1}} & -\frac{1}{L_{n2}} & \dots & \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq n}}^{n} \frac{1}{L_{nj}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

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

$$\begin{cases} q_i = C_{i0}(U_i - U_0) + \dots \\ +C_{ij}(U_i - U_j) + \dots \\ +C_{in}(U_i - U_n) \\ i = 0,1,\dots,n \\ U_0 = 0 \end{cases} \qquad (۹)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq 1}}^{n} C_{ij} & -C_{12} & \cdots & -C_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \cdots & \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq n}}^{n} C_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

بنابراین برای جریان تزریقی خازنی داریم:

$$\overset{\circ}{Q} = I_C = C\overset{\circ}{U} \rightarrow \overset{\circ\circ}{Q} = \overset{\circ}{I_C} = C\overset{\circ\circ}{U} \qquad (۱۱)$$

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:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

$$\begin{bmatrix} I^{\circ}_{C1} \\ I^{\circ}_{C2} \\ \vdots \\ I^{\circ}_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{e1}+C_{p1}+C_1+C_2 & -C_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -C_2 & C_{e2}+C_{p2}+C_2+C_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_{en-1}+C_{pn-1}+C_{n-1}+C_n & -C_n \\ 0 & 0 & \cdots & -C_n & C_{en}+C_{pn}+C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$

$$\begin{bmatrix} I^{\circ}_{G1} \\ I^{\circ}_{C2} \\ \vdots \\ I^{\circ}_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_{p1}}+\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & \cdots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{p2}}+\frac{1}{R_3} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{R_{n-1}}+\frac{1}{R_{pn-1}}+\frac{1}{R_n} & -\frac{1}{R_n} \\ 0 & 0 & \cdots & -\frac{1}{R_n} & \frac{1}{R_n}+\frac{1}{R_{pn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^{\circ}_1 \\ U^{\circ}_2 \\ \vdots \\ U^{\circ}_n \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

$$\rightarrow I^{\circ}_G = GU^{\circ}$$

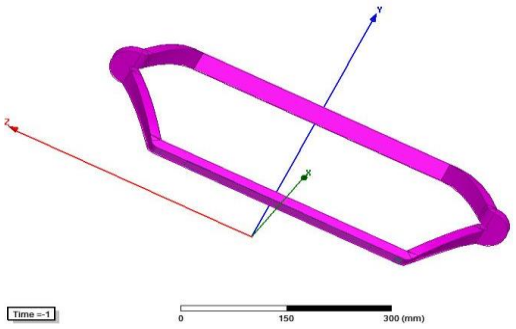
با توجه به روابط به دست آمده برای شاخه‌های سلفی، خازنی و اهمی، می‌توان به دستگاه معادلات دیفرانسیلی خطی معمولی مرتبه دو رابطه (۱۴) رسید که دارای n معادله است.

$$I = I^{\circ}_C + I^{\circ}_G + I^{\circ}_L = CU^{\circ\circ} + GU^{\circ} + HU \qquad (۱۴)$$

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 H، C 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 می یابد. 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 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 دستابی به پارامترهای الکتریکی عایق کویل‌ها انجام شد.

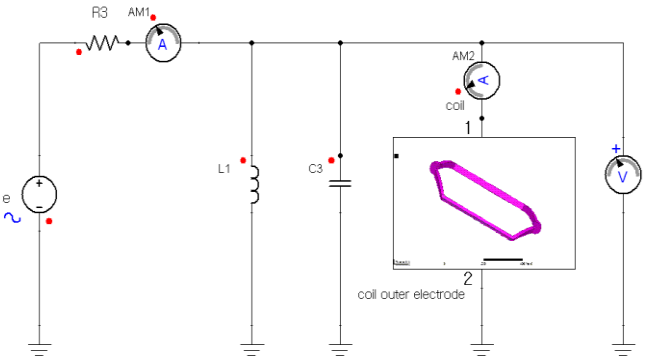


شکل (۷) : کویل طراحی شده در نرم‌افزار انسیس ماکسول

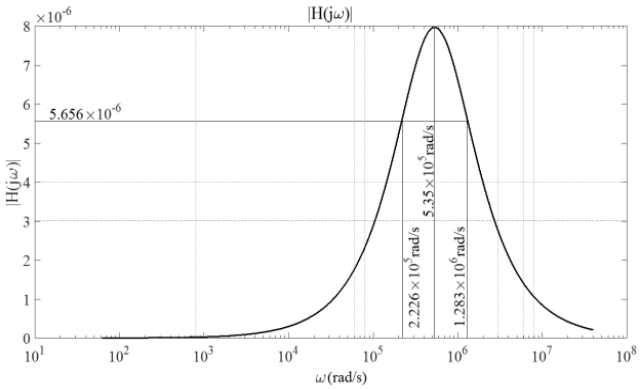
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

جدول (۱) : پارامترهای الکتریکی کویل‌های ماشین

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



شکل (۸): مدار تشدید موازی طراحی شده در سیمپولار جهت اتصال مدار خارجی به عایق کویل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار 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 دست‌یابی به شکل موج توزیع ولتاژ در دورهای سیم‌پیچ، شبیه‌سازی‌ها بر روی سیم‌پیچ ماشین القایی با پارامترهای انجام شد. پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ ماشین به روش المان محدود به دست آمد و به مدل اعمال شد.

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

جدول (۲) : ابعاد ماشین تحت آزمایش

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

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

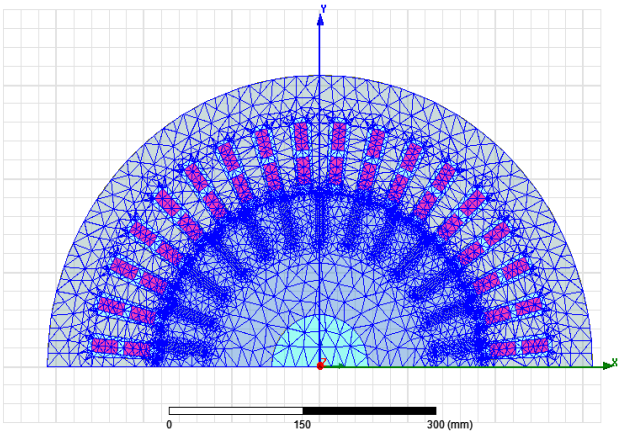
مدل پیشنهادی در نرم‌افزار انسیس ماکسول پیاده‌سازی شد و پارامترهای الکتریکی به دست آمده از پل شرینگ و آنالیز المان محدود به مدل اضافه شد. از آنجایی که مدل RLC جهت مطالعه گذراهای سریع می‌باشد زمان شبیه‌سازی تا ۵۰ میکروثانیه در نظر گرفته شد. شکل (۱۱) شکل موج توزیع ولتاژ بین کویل‌های ۳-۲ ، ۷-۶ و ۱۱-۱۰ از یک فاز از ماشین را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است در لحظه صفر یعنی لحظه برخورد موج به ابتدای سیم‌پیچ ظرفیت‌های الکتریکی تعیین‌کننده توزیع ولتاژ در بر روی سیم‌پیچ‌ها هستند. به این توزیع ولتاژ، توزیع ولتاژ اولیه می‌گویند که در آن اثر سلف‌ها در مقابل خازن‌ها صرف‌نظر می‌شود. در توزیع ولتاژ نهایی و یا

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

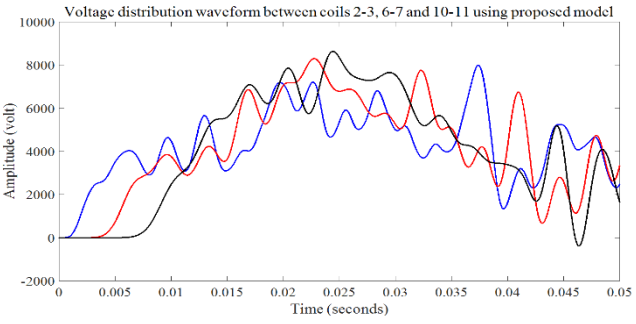
در شرایط کار عادی، اندوکتانس‌ها تعیین‌کننده وضعیت تقسیم ولتاژ در طول سیم‌پیچ هستند و در یک بازه زمانی گذرای سریع توزیع ولتاژ اولیه توسط خازن‌های مدار و توزیع ولتاژ نهایی توسط سلف‌ها و مقاومت‌ها تعیین می‌شود.

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.

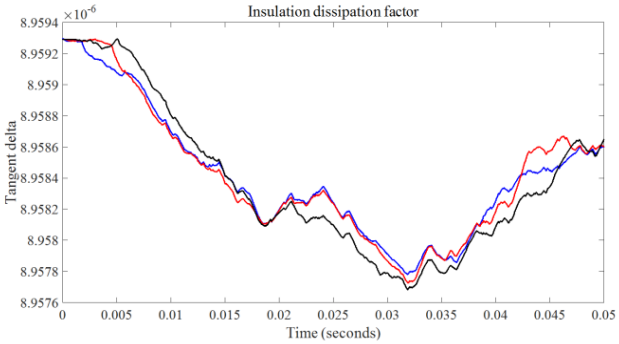
با توجه به نتایج به دست آمده به طور خلاصه می‌توان گفت که رفتار سیم‌پیچ همگن مشابه یک خط انتقال است یعنی دارای فرکانس‌های طبیعی خاص است و اگر موج تحریک، یکی از آن‌ها را برانگیزد می‌تواند سیم‌پیچ را به نوسان درآورد. در پایین‌ترین به صورت کیفی انتظار می‌رود که وسط سیم‌پیچ حداکثر اضافه ولتاژ را داشته باشیم. 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 میرائی‌ها وابسته است.



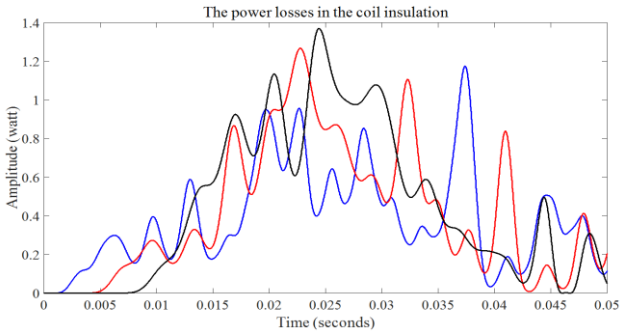
شکل (۱۰): شبیه‌سازی و مش‌بندی ماشین تحت آزمایش در انسیس ماکسول



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



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 ۷-۶، مشکی: بین کویل ۱۱-۱۰)

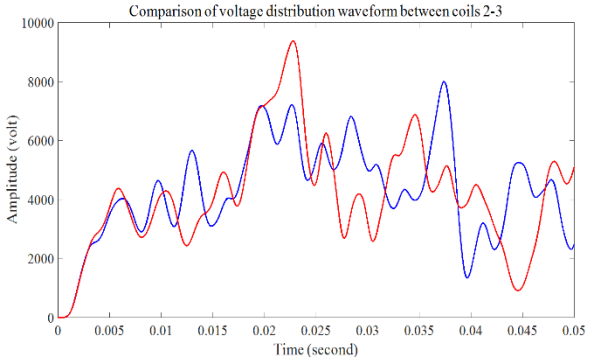


شکل (۱۳): تلفات عایقی برای عایق کویل‌های دوم، ششم و دهم از یک فاز از ماشین به کمک مدل پیشنهادی (آبی: بین کویل ۳-۲، قرمز: بین کویل ۶-۷، مشکی: بین کویل ۱۱-۱۰)

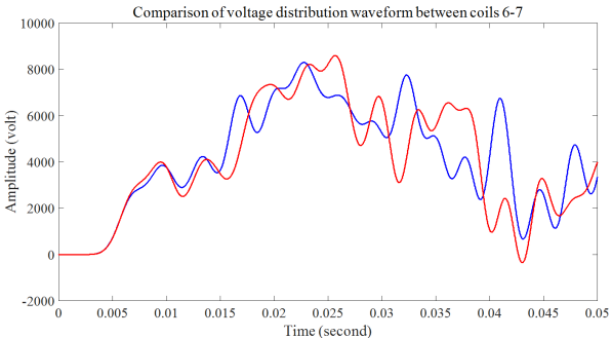
۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک شبکه نردبانی کویل

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.

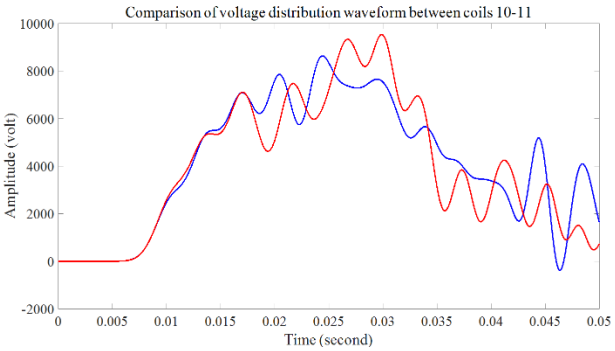
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



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

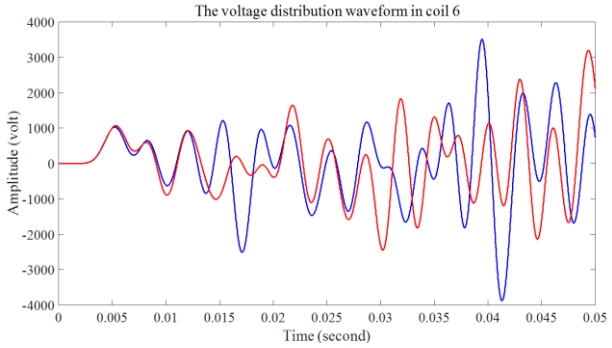


شکل (۱۵): مقایسه شکل موج‌های توزیع ولتاژ بین کویل ۷-۶ به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)

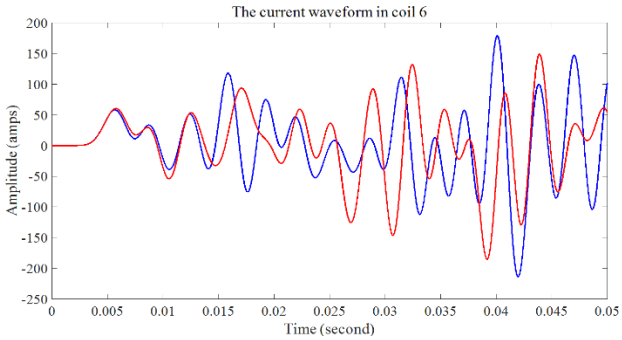


شکل (۱۶): مقایسه شکل موج‌های توزیع ولتاژ بین کویل ۱۱-۱۰ به کمک مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک RLC (آبی: مدل پیشنهادی، قرمز: مدل کلاسیک RLC)

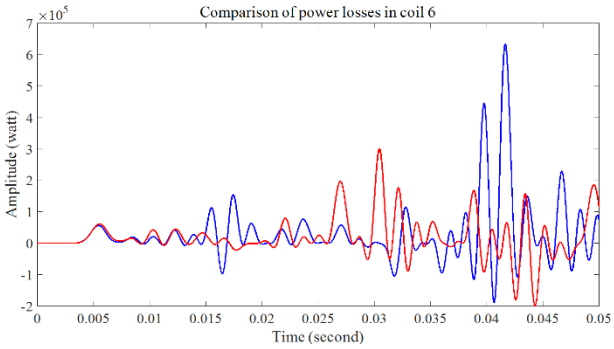
با توجه به اینکه در مدل‌ها، شاخه RC جریان نشتی وجود دارد و این جریان نشتی برای مدل پیشنهادی نیز بیشتر می‌باشد لازم است تا از جریان‌های هر کویل به طور جداگانه نمونه‌برداری شود و با در اختیار داشتن ولتاژ هر کویل، توان تلفاتی در هر کویل محاسبه شود. برای نمونه، شکل (۱۷) تا (۱۹) شکل موج توزیع ولتاژ، شکل موج 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.



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 (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 (۱۹): مقایسه تلفات توان در کویل ششم 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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

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

[۱] 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، رمضانی، 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., Seyedtabaii, 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).

[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., Seyedtabaii, 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 δ 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 δ) 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.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[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 حسینی‌بافقی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهریز (۱۳۸۹)، کارشناسی‌ارشد 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.



سیدامین سعید تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی‌ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت از دانشگاه خواجه نصیر الدین 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.

زیرنویس‌ها

[1] RLC Ladder Network (RLC)

[2] Ansys Maxwell

[3] Partial Discharge (PD)

[4] Ansys simplorer

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

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

Syyed Mojtaba Hosseini Bafqi[1], HamidReza Akbari*[2], Syyed Amin Saeid[3]

[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.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.5.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]