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

سیدمجتبی حسینی بافقی ، حمیدرضا اکبری ۲*، سیدامین سعید

Smh1365@iauyazd.ac.ir ا- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران H.Akbari@iauyazd.ac.ir *۲- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Saied1696@iauyazd.ac.ir تاریخ مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران ۱۴۰۲/۱۷۶۰ همندسی تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱/۷

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 سیم ییچ 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 می تواند به صورت یک ابزار مناسبی جهت رسیدن به پاسخهای دقیق تر پدیدههای گذرای سریع مود استفاده قرار گیره.

واژەھاي كليدى: سيمپيچھاى قدرت، ضريب تلفات عايقى، گذراى سريع، مدل عايقى.

۱- مقدمه

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 عایق،بندی ماشین را در معرض تنشهای شدید الکتریکی قرار میدهد. شیناخت بهتر از این امر با رایانههای دیجیتال امروزی امکان پذیر است. با استفاده از این اطلاعات، مهندسان طراحی میتوانند ساختار عایق بندی مطمئن تر و احتمالاً اقتصادی تر 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 عایق,بندی ماشین را در نقاط مختلف آن تحت تاثیر قرار میدهد و به همین دلیل شیناخت

در صد و دامنه ا ضافه ولتاژها در ما شین حائز اهمیت فراوان می ا 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 سیم پیچ نمایان سازد. با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده، دو دیدگاه فیزیکی و جعبه سیاه جهت مدلسازی سیم پیچ 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 عایق،ندی سیم پیچها میبایست رفتار نوسانی ماشین و تنشهای الکتریکی بوجود آمده در حالات گذرا در داخل سیم پیچ

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 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 عايق است. در محدوده فركانس مرتبط با PD، رفتار سيمييچ ماشين به صورت یک شبکه RLC عمل میکند. برای ارزیابی PD، مدلی لازم است که ابعاد فیزیکی سیم پیچها را دقیقاً در محدوده فرکانس قابل قبول توصيف كند. بنابراين هر بخش از سيم پيچ به عنوان يك واحد RLC در نظر گرفته می شود [۱۳]. در سال های ۲۰۱۵، روش عددی برای محاسبه ماتریسهای مقاومت، اندوکتانس و کاپاسیتانس سیم پیچ 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 دستيابی به شکل موج دقيقتر توزيع ولتاژ در سیم پیچها نشان داده شد. در مدلسازی و تجزیه و تحلیل ماشینهای الكتريكي برخي مسائل عملي وجود دارد كه معادلات مربوط به در أنها 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 پارامتراهای 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 سیمییچ 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 ilم سیم پیچ است که شار پراکندگی دورهای واحد ilم را نمایش میدهد.

: القای متقابل بین واحد i و j است.

نظرفیت طولی معادل برای واحد iام میباشد. C_{i}

Ce_i: ظرفیت خازنی بین واحد ilم و پتانسیل زمین است. R_i: معرف مقاومت الکتریکی واحد ilم است.



٣- مدل الكتريكي عايق

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)



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

رو های اندازه گیری ضریب تلفات عایقی بستگی به فرکانس انداز گیری دارد. در فرکانسهای کم از روش پل استفاده می شود. برای فرکانسهای بالاتر از روش جایگزینی در مدار تشدید و برای فرکانسهای خیلی بالاتر از روش انعکاس موج استفاده می شود. در روش جایگزینی در مدار تشدید، نمونه عایق صفحه ای در یک خازن میکرو متری قرار داده می-شود. پس از قرار دادن نمونه عایق در این خازن، ضخامت عایق اندازه گیری می شود. این خازن در یک مدار تشدید مانند شکل زیر قرار می گیرد.



شکل (۳): مدار تشدید جهت اندازه گیری 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 اندازه گیری به این صورت است که ابتدا نمونه عایق را داخل خازن میکرومتری قرار میدهند و ضمن اندازه گیری 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 $\sqrt{2}/1$ برابر جریان در حالت تشدید میرسانند و بدین ترتیب با در اختیار داشتن پهنای باند، ضریب کیفیت مدار تشدید یعنی Q، میزان XC را تعیین مینمایند زیرا پهنای باند در مدار RLC موازی فوق به محدودهای از فرکانسها گفته میشود که امپدانش مدار برابر یا بزرگتر از $\sqrt{2}/2$ باشد. در آزمایش دیگر ماده عایقی را از بین دو الکترود برداشته میشود و مدار به حالت تشدید درآورده میشود و میزان ظرفیت خازنی VC با دی الکتریک هوا اندازه گیری میشود تا به کمک رابطه $\sqrt{2}/2$ با دی الکتریک هوا ماده عایق نیز حاصل گردد. میزان مقاومت عایقی نیز از طریق ضریب کیفت مدار به دست خواهد آمد یعنی:

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

که در آن fr 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، می بایست هر شاخه را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد و نهایتا با استفاده از قضیه جمع آثار نتیجه نهایی را گرفت، بنابراین شاخههای سلفی، خازنی و مقاومتی به طور جداگانه بررسی می گرند.



شکل (۴) : مدار RLC به همراه مدل عایقی سیمپیچ برای شاخه سلفی داریم:

I_{L1} $M_{1,n-1}$ M_{1,n} U_{L1} L₁ M_{1,2} ••• M_{2.1} L_2 ••• $M_{2,n-1}$ $M_{2,n}$ U_{L2} I_{L2} (٣) $M_{n-1,1}$ $M_{n-1,2}$... $M_{n-1,n-1}$ $\boldsymbol{M}_{n-1,n}$ ÷ ÷ U_{Ln} M_{n,1} $M_{n,2}$... M_{n.n-1} M_{n,n} I_{Ln}

 $\rightarrow U_L = M I_L$

در ادامه به تشریح جریان تزریقی در گرهها می پردازیم. 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 می آوریم لذا داریم:

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

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

$$A^{T}U = M \stackrel{\circ}{I_{L}} \rightarrow M^{-1}A^{T}U = I_{L}^{\circ}$$
 (۵) (م) را در ماتریس A ضرب میکنیم بنابراین داریم:

$$\underbrace{AM^{-1}A^{T}}_{H}U = AI_{L}^{\circ} \rightarrow HU = I_{L}^{\circ}$$
(7)

$$\begin{split} I_{ij} = \underbrace{U_{i} \cup U_{i}}_{U_{i}} (u) + \underbrace{U_{i} \cup U_{i}}_{U_{i}} (u) + \underbrace{U_{i} \cup U_{i}}_{U_{i}} (u) + \underbrace{U_{i} \cup U_{i}}_{U_{i}} (u) \\ I_{ij} = \underbrace{U_{i} - U_{j}}_{L_{i0}} \\ I_{i0}^{\circ} = \frac{U_{i} - U_{j}}{L_{ij}} \underbrace{I_{Li} = I_{i0} + I_{ij} + \dots + I_{in}}_{L_{in}} \\ I_{in}^{\circ} = \frac{U_{i} - U_{j}}{L_{in}} \underbrace{I_{Li} = I_{i0} + I_{ij} + \dots + I_{in}}_{L_{in}} (V) \\ I_{Li}^{\circ} = \frac{U_{i} - U_{n}}{L_{in}} \\ I_{Li}^{\circ} = \frac{U_{i} - U_{n}}{L_{in}} (V) \\ I_{Li}^{\circ} = \frac{1}{L_{i0}} U_{0} - \frac{1}{L_{i1}} U_{1} + \dots + (\sum_{\substack{j=0\\i\neq j}}^{n} \frac{1}{L_{ij}}) U_{i} + \dots + \frac{1}{L_{in}} U_{n} \\ I_{i} = 0, 1, \dots, n \end{split}$$

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.



$$\begin{bmatrix} I_{L1}^{\circ} \\ I_{L2}^{\circ} \\ \vdots \\ I_{Ln}^{\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{n} \frac{1}{L_{1j}} & -\frac{1}{L_{12}} & \cdots & -\frac{1}{L_{1n}} \\ -\frac{1}{L_{21}} & \sum_{j=0}^{n} \frac{1}{L_{2j}} & \cdots & -\frac{1}{L_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{L_{n1}} & -\frac{1}{L_{n2}} & \cdots & \sum_{\substack{j=0\\j\neq n}}^{n} \frac{1}{L_{nj}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ \vdots \\ U_{n} \end{bmatrix} \quad (A)$$

 \rightarrow I_L^o = HU

$$\begin{cases} q_{i} = C_{i0}(U_{i} - U_{0}) + \dots \\ + C_{ij}(U_{i} - U_{j}) + \dots \\ + C_{in}(U_{i} - U_{n}) \\ i = 0, 1, \dots, n \\ U_{0} = 0 \end{cases} \qquad (9)$$

$$\rightarrow q_{i} = -C_{i0}U_{0} - C_{i1}U_{1} - \dots \\ + (\sum_{i=1}^{n} C_{ij})U_{i} + \dots - C_{in}U_{n}$$

$$\sum_{\substack{j=0 \ j
eq i}} C_{ij} U_i + ... - C_{in} U_n$$
ورتیکه q=CU در رابطه (۱۰) داریم:

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

بنابراین برای جریان تزریقی خازنی داریم: $\overset{\circ}{\mathbf{Q}} = \mathbf{I}_{\mathbf{C}} = \overset{\circ}{\mathbf{C}}\overset{\circ}{\mathbf{U}} \rightarrow \overset{\circ\circ}{\mathbf{Q}} = \overset{\circ}{\mathbf{I}}_{\mathbf{C}} = \overset{\circ\circ}{\mathbf{C}}\overset{\circ\circ}{\mathbf{U}}$ (11)

$$\begin{bmatrix} I_{Cl}^{\circ} \\ I_{C2}^{\circ} \\ \vdots \\ I_{Cn}^{\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{el} + C_{pl} + C_{l} + C_{2} & -C_{2} & \cdots & 0 & 0 \\ -C_{2} & C_{e2} + C_{p2} + C_{2} + C_{3} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_{en-l} + C_{pn-l} + C_{n-l} + C_{n} & -C_{n} \\ 0 & 0 & \cdots & -C_{n} & C_{en} + C_{pn} + C_{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ \vdots \\ U_{n} \end{bmatrix}$$
(17)
$$\begin{bmatrix} I_{C1}^{\circ} \\ 0 & 0 & \cdots & -C_{n} & C_{en} + C_{pn} + C_{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ \vdots \\ U_{n} \end{bmatrix}$$
(17)
$$\begin{bmatrix} I_{C1}^{\circ} \\ 1_{C2} \\ \vdots \\ 1_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{2}} & -\frac{1}{R_{2}} & \cdots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{2}} & \frac{1}{R_{2}} + \frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{3}} & \cdots & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{2}} & \frac{1}{R_{2}} + \frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{3}} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_{n}} & -\frac{1}{R_{n}} \\ 0 & 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{n}} & \frac{1}{R_{n}} + \frac{1}{R_{pn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1}^{\circ} \\ U_{2}^{\circ} \\ \vdots \\ U_{n}^{\circ} \end{bmatrix}$$
(17)

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.

$$I = I_{C}^{\circ} + I_{G}^{\circ} + I_{L}^{\circ} = CU^{\circ\circ} + GU^{\circ} + HU$$
 (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

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 اندازه گیری می کنند. جهت رسیدن به این هدف، محیط آزمایشگاهی نرمافزار انسیس ماکسول انتخاب شد. بدین منظور ابعاد هندسی تمامی کویل ها به همراه ضخامت عایق مربوطه از ماشین در نرمافزار شبیهسازی و سپس در نرمافزار انسیس سیمپولار⁴ فراخوانی شد. در شکل (۲) 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 می دهد. 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 می دهد. در این حالت با کویلها، ضریب کیفیت مدار یا ضریب Q و مقدار مقاومت عایق کویلها مطابق با جدول (۱) می باشد. این روند برای تای یایق کویلها مطابق با جدول (۱) می باشد. این روند برای تمامی کویل ها

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



جدول (۱) : پارامترهای الکتریکی کویلهای ماشین

مقاومت (مگااهم)	كويل	کاپاسیتانس(پیکوفاراد)
۵۳۶,۷۵۶	١	1.4,874
۵۳۶,۷۴۳	٢	1.4,585
۵۳۶,۷۶۱	٣	1.4,581
۵۳۶,۷۶۵	۴	104,878
۵۳۶,۷۴۸	۵	1.4,871
۵۳۶,۷۵۲	۶	1.4,878
۵۳۶,۷۶۳	۷	1.4,587
۵۳۶,۷۴۴	٨	1.4,879
۵۳۶,۷۴۶	٩	1.4,589
۵۳۶,۷۵۵	۱.	104,811
۵۳۶,۷۶۰	11	1.4,870
۵۳۶,۷۴۹	١٢	1.4,871



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) 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.

مقدار	پارامترها
۲۵۰KW	توان خروجي
۶KV	ولتاژ
۳۶	تعداد شيار
۴	تعداد قطب
۵·Hz	فركانس
۴۰۰mm	طول هسته استاتور
۳۲۰mm	قطر داخلي هسته استاتور
۶۲۰mm	قطر خارجي هسته استاتور
۴۰۰mm	طول هسته روتور
۱۱۰ . mm	قطر داخلي هسته روتور
۳۶۸mm	قطر خارجي هسته روتور

جدول (۲) : ابعاد ماشین تحت آزمایش

ماکسول دوبعدی شامل ماژولهای حل کننده میدان الکتریکی ساکن برای محاسبه ماتریس کاپاسیتانس، نیرو، گشتاور و شار پیوندی که میتواند از میدان الکتریکی محاسبه گردد. حل کننده میدان مغناطیسی ساکن جهت محاسبه ماتریس اندوکتانس، نیرو و گشتاور میباشد. 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 مریان 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 میشوند توانایی کوپل شدن با مدارهای بیرونی نیز دارند و همچنین اثرات حرکات چرخشی یا انتقالی را میتواند شبیهسازی کند [۲۷] [۲۸].

بر می یا یا یا را بی را اسیس ماکسول پیادهسازی شد و 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

در شرایط کار عادی، اندوکتانسها تعیینکننده وضعیت تقسیم ولتاژ در طول سیم پیچ 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 امکان پذیر 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 سیمییچ همگن مشابه یک خط انتقال است یعنی دارای فرکانسهای طبیعی خاص است و اگر موج تحریک، یکی از آنها را برانگیزد میتواند 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 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 (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 ۶–۷، مشکی: بین کویل ۱۱–۱۰)



شکل (۱۲): ضریب تلفات عایقی برای عایق کویل های دوم، ششم و دهم از یک فاز از ماشین به کمک مدل پیشنهادی (آبی: بین کویل –۳ ۲، قرمز: بین کویل ۲–۶، 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 پیشنهادی به مقایسه گذاشته شد. شکل (۱۴) تا (۱۶) مقایسه شکل 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.

Comparison of voltage distribution waveform between coils 2-3



۸- نتیجه گیری

در این مقاله به اصلاح مدل شبکه نردبانی به منظور دستیابی به تلفات عایقی سیم پیچ در گذراهای سریع پرداخته شد. سیم پیچ یک فاز از ماشین القایی به کمک مدل پیشنهادی مدل سازی و با شبیه سازی، شکل موج توزیع ولتاژ، ضریب تلفات عایقی و همچنین تلفات عایقی در نقاط محتلف سیم پیچ نشان داده شد. در این مطالعه، مدل عایق سیم پیچ 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 کویل ها، ولتاژ روی کویل ها و تلفات توان توسط دو مدل کلاسیک RLC



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 RLC 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., 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.

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 ۳۳۱ 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).



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.

زيرنويسها

- 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 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.

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.