مقایسه مدل‌های مداری و مداری-میدانی به منظور مکان‌یابی تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ استاتور ماشین‌های الکتریکی

حمیدرضا خضری [۱] ، حمیدرضا اکبری *[۲] ، سیدمجتبی حسینی بافقی [۳]

۱- گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران، hr.khezri@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، smh1365@iauyazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۹/۵

چکیده: در این مقاله، مکانیابی دقیق تخلیه‌های جزئی[۱] در عایق سیم‌پیچ ماشین‌های ولتاژ بالا بررسی شده است. از آنجا که تخلیه-های جزئی دارای مولفه‌های فرکانسی کیلوهرتز-مگاهرتز[۲] می‌باشند، جهت یافتن مکان تخلیه جزئی لازم است تا از مدل‌های گذاری ماشین استفاده شود. در این مطالعه، پالس جریانی تخلیه جزئی به مدل شبکه نردبانی[۳] هر دور از سیم‌پیچ ماشین‌القایی رتور قفس سنجابی نمونه که به عنوان رابط بین منبع ولتاژ و ناحیه المان محدود است ترزیق می‌شود. در ادامه، نتایج مدل مداری- میدانی با مدل مداری مقایسه می شود. نتایج نشان می‌دهد شبیه‌سازی ماشین‌های الکتریکی به کمک روش اجزاء محدود[۴]، که دارای رابط مداری شبکه نردبانی بین منابع ولتاژ و ناحیه المان محدود است (مدل مداری-میدانی) می‌تواند مکان تخلیه جزئی را با دقت بالاتری تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی تخلیه‌جرئی، عایق ماشین فشار قوی، روش المان محدود، معادلات گذاری مداری و میدانی.

۱- مقدمه

در ساختار عایقی ماشین‌های الکتریکی، خرابی عایق بین دورهای سیم-پیچ شایع‌ترین پدیده می‌باشد. در برخی موارد، سیم‌پیچ‌های استاتور که در معرض ولتاژهای سوئیچینگ قرار می‌گیرند ممکن است تحت تاثیر میدان‌های الکتریکی بسیار قوی واقع شوند. به طور کلی قدرت میدان الکتریکی بین دورهای سیم‌پیچ ممکن است تا به مقدار بحرانی شکست دی‌الکتریک برسد که در نتیجه منجر به از بین رفتن ماده عایقی بین سیم‌پیچ‌ها می‌شود[۱-۳]. ولتاژهای بالا، عایق ماشین‌های فشار قوی را با گذر زمان از بین می‌برد. تجزیه عایق، در نتیجه ترکیبی از فاکتورهای حرارتی، مکانیکی، الکتریکی و فشارهای محیطی می‌باشد که منجر به کاهش طول عمر این تجهیزات می‌شود.

وجود حفره‌های گازی در عایق بسیار مخرب خواهد بود و عملکرد عایق را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این حفره‌ها با توجه به ابعاد، شکل هندسی و محل قرارگیری در عایق می‌توانند از لحاظ شدت میدان الکتریکی، وضعیتهای مختلفی را در عایق ایجاد کنند[۴]. وجود حفره در عایق دی‌الکتریک، سبب ایجاد میدان‌های محلی می‌شود که این میدان‌ها نیز می‌توانند عامل بوجود آمدن تخلیه و شکست عایقی گردند[۵]. تخلیه جزئی به عنوان نشانه‌ای از تخریب عایق می‌تواند یکی از موثرترین روش‌های تشخیص وضعیت عایق در ماشین‌های فشارقوی باشد[۶-۹]. بنابراین بررسی هر یک از روش‌های تشخیص آفلاین و آنلاین تخلیه جزئی، می‌تواند به طراحان سیستم‌های قدرت در افزایش طول عمر تجهیزات الکتریکی کمک نماید[۱۰].

تحقیقات نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات مکانیابی تخلیه جزئی بر روی ترانسفورماتورهای قدرت انجام شده است و مکانیابی تخلیه‌جزئی بر روی ماشین‌های الکتریکی دوار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۶، سانتوش و همکارانش از یک مدل زمانی گذرای سریع ترانسفورماتور، جهت انتشار پالس‌های تخلیه‌جزئی استفاده کردند. در این مدار معادل، از پارامترهای توزیع شده استفاده و نشان دادند پالس‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020

ولتاژ گذرای بسیار سریع و تخلیه‌های جزئی، دارای مولفه های فرکانسی کیلوهرتز-مگاهرتز می‌باشند که در تئوری مداری مورد توجه قرار می-گیرند. سپس روشی را ارائه دادند که در آن، از معادلات ماکسول برای مطالعات ولتاژهای گذرای بسیار سریع و همچنین انتشار پالس‌های تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور استفاده شده است[۱۱].

در سال ۲۰۱۷، حسینی و همکاران یک مدل فرکانس بالای سیم‌پیچ را برای مکانیابی تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت، با استفاده از مدل بهبود یافته خط انتقال چند سیمه[۵] به نام مدل خط انتقال چند سیمه مدور[۶] ارائه دادند. در این مدل اثر دایره‌ای بودن سیم-پیچ‌های ترانسفورماتور نیز در نظر گرفته می‌شد. آنها پارامترهای مدل مدل خط انتقال چند سیمه مدور را به کمک روش اجزاء محدود به دست آوردند و شبیه‌سازی‌های خود را با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل مدار انجام دادند. در این مقاله تمامی روابط ولتاژی و جریانی بر اساس تحلیل مداری بود. در سال‌های اخیر روش اجزاء محدود به منظور مدل‌سازی و تعیین پارامترهای الکتریکی ماشین به طور چشم‌گیر مورد استفاده قرار گرفته است[۱۲-۱۳]. ماندال و همکاران روشی را که در آن، اندازه‌گیری-ها از ترمینال یک مدل شبکه نردبانی انجام می‌شد را ارائه کردند. آنها سیگنال تخلیه جزئی را با استفاده از یک فانکشن ژنراتور و کالیبراتور تخلیه‌جزئی تولید کردند و نشان دادند که پاسخ نتایج شبیه‌سازی شده، می‌تواند به عنوان یک مرجع برای سیگنال‌های پهنای پالس شناخته شده در هر مکان از سیم‌پیچ استفاده شود. همچنین پاسخ ترمینال به سیگنال‌های تخلیه‌جزئی یک سیم‌پیچ را با اندازه‌گیری در نقاط مختلف به دست آوردند و نشان دادند که داده‌های مرجع شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمون در ارتباط هستند و از آن می‌توان برای پیش‌بینی مکان منبع تخلیه‌جزئی استفاده نمود[۱۴]. در ماشین‌های فشارقوی پدیده‌های گذرای سریع مانند تخلیه‌جزئی، به روش‌های مختلفی بررسی می‌شوند. یکی از این روش‌ها آنالیز جریانی با استفاده از مدار معادل الکتریکی گذرای سریع و بسیار سریع این تجهیزات کلیدی است. به طور معمول سیم‌پیچ‌های ماشین الکتریکی، توسط مدل‌های گذرای مناسب شبیه-سازی شده و خطاها، به کمک روش آنالیز جریان خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرند[۱۵-۱۶]. در سال ۲۰۰۸، جعفری و همکاران مکان تخلیه-جزئی را در عایق سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به کمک مدل خط انتقال چند سیمه و با استفاده از روش آنالیز جریانی تخمین زدند و مکان تخلیه‌جزئی به دست آمده را با مکان تخلیه‌جزئی واقعی آن مقایسه کردند[۱۷]. یک سال بعد، جی‌بالان و همکاران به کمک مدل خط انتقال چند سیمه و با استفاده از روش آنالیز جریانی، مکان تخلیه‌جزئی را در عایق سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور تخمین زدند و مکان به دست آمده را با مکان واقعی آن مقایسه کردند[۱۸]. در سال ۲۰۱۶، ماندال و همکارانش از تکنیک کوپلا برای مکانیابی تخلیه‌جزئی استفاده کردند. مبنای این روش آنالیز جریانی بود و به کمک مدل گذرای سیم‌پیچ ترانسفورماتور با عناصر فشرده، به مطالعه مکانیابی پرداختند[۱۹]. از آنجایی که تخلیه‌جزئی دارای مولفه‌های فرکانسی کیلوهرتز-مگاهرتز می‌باشد برای مکانیابی تخلیه جزئی، لازم است از مدل‌هایی استفاده شود که محدوده فرکانسی آن‌ها در محدوده فرکانسی رخداد تخلیه‌جزئی باشد [۲۰]. در سال ۲۰۱۹ با ارتباط دادن مدل شبکه نردبانی و ناحیه المان محدود جهت مدل‌سازی یک ماشین القایی رتور قفس سنجابی، مدلی (FEM-RLC) جهت مطالعه در حالت‌های گذرای سریع ارائه شد[۲۱]. اعتبار فرکانسی این مدل گذرای سریع تایید شده است و می‌تواند برای مطالعات تخلیه‌جزئی در عایق سیم‌پیچ ماشین‌های دوار مورد استفاده قرار گیرد. در سال ۲۰۲۱، کرمی و همکاران به بررسی محلی‌سازی تخلیه‌جزئی با استفاده از زمان برگشت الکترومغناطیسی پرداختند زیرا این محلی‌سازی تخلیه‌جزئی برای بررسی و ارزیابی ترانسفورماتورهای قدرت اهمیت دارد[۲۲]. در همین سال، شناسایی و محلی‌سازی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از روش مبتنی بر انتشار صوتی به همراه الگوریتم و همچنین تشریح مکانیزم و تکنیک‌های مختلف محلی‌سازی، توسط وایرل و همکاران مورد بررسی قرار گرفت[۲۳].

با بررسی و مطالعات اخیر در مدل سازی ماشین‌های الکتریکی به روش المان محدود، مشخص می شود که محققان جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی با آنالیز جریانی به سمت این روش مدل سازی نمی روند، که دلیل آن در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت هر فاز از ماشین می باشد و این موجب می شود که اعتبار فرکانسی این مدل سازی پایین باشد. چون طیف فرکانسی این مدل سازی‌ها در محدوده فرکانس‌های تخلیه جزئی نیست بنابراین در روش آنالیزهای جریانی، جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی به کمک مدل‌های مداری، اولاً مدل سازی‌ها به روش المان محدود نبوده و ثانیاً مدل‌های مداری تنها برای مدل کردن سیم پیچ ماشین‌های الکتریکی می باشد.

در این مطالعه، پالس تخلیه‌جزئی به یکی از کویل‌هایی که مدار معادل الکتریکی آن به عنوان رابط بین منبع ولتاژ و ناحیه المان محدود است ترزیق می‌شود و آنالیز معادلات مداری، میدانی و حرکتی ماشین الکتریکی در محدوده فرکانسی کیلوهرتز-مگاهرتز مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این مدل‌سازی پالس جریان تخلیه‌جزئی با روش گالرکین فرمول‌بندی و سپس در یک بازه زمانی گسسته‌سازی و در نهایت خطی‌سازی می‌شوند و به معادلات ارائه شده در مرجع[۲۱] اضافه می‌گردند. در ادامه این معادلات در یک سیستم نهایی جمع بندی شده و از روش فرکانس‌های رزونانس سری برای تخمین مکان تخلیه‌جزئی تزریق شده، استفاده می‌شود. بنابراین نوآوری-های این مقاله، به شرح زیر است:

۱- تولید پالس جریان تخلیه‌جزئی با مولفه‌های فرکانسی متفاوت به کمک روش اجزاء محدود و در نظر گرفتن اثرات هسته و اندوکتانس های متقابل در مدل.

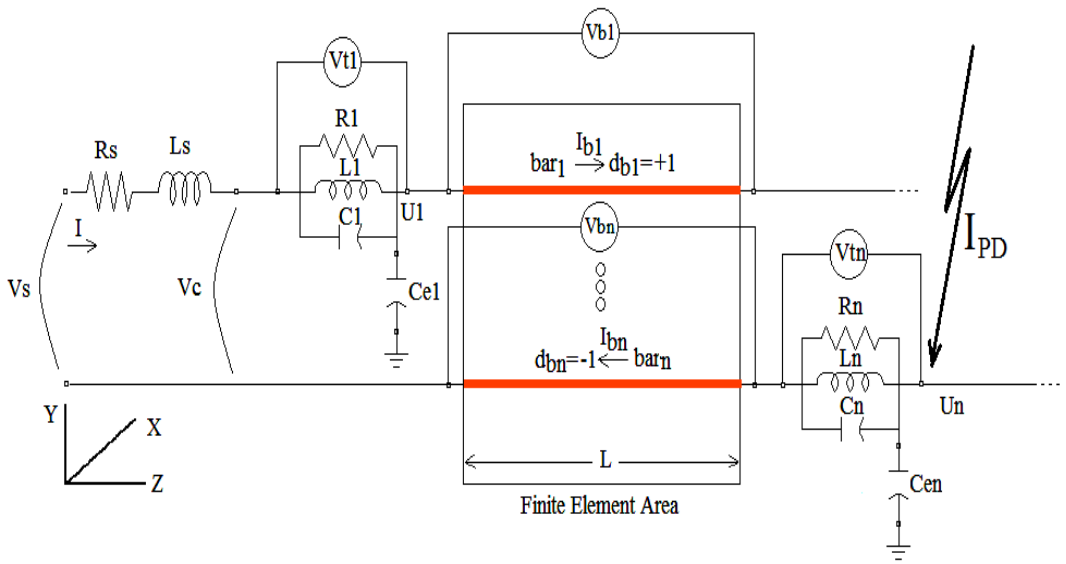
۲- ارزیابی و مقایسه مدل‌های مداری و مداری- میدانی در مکان-یابی پدیده‌ی تخلیه جزیی در عایق استاتور ماشین‌های الکتریکی.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

از آنجایی که مکان تخلیه‌جزئی بر اساس تعداد گره هر سیم‌پیچ مشخص می‌شود می‌توان قبل از اینکه عایق کویل به شکست کامل برسد با استفاده از اطلاعات مکانیابی دقیق، نسبت به ترمیم یا تعویض کویل اقدام شود. لازم به ذکر است که این روش بر مبنای آنالیز جریانی است و می‌توان آن را در ماشین‌های الکتریکی واقعی پیاده‌سازی کرد. نتایج مقایسه مکان‌یابی به کمک دو مدل مداری شبکه نردبانی و مدل مداری-میدانی نشان می‌دهد، تخمین مکان‌ها به روش مداری-میدانی و با آنالیز جریان گرفته شده از مدل به مکان واقعی تخلیه‌جزئی نزدیکتر است.

۲- مدل مداری- میدانی ماشین‌های الکتریکی برای آشکار سازی تخلیه‌جزئی

در تجزیه و تحلیل ما شین‌های القایی با ا ستفاده از روش اجزاء محدود، پارامتر چگالی جریان به عنوان یک ورودی معلوم شـــناخته می‌شـــود. همچنین لازم و ضـروری اسـت که مدل گذرای سـیم‌پیچ را بین منابع ولتاژ، جریان و ناحیه المان محدود قرار داده و مدل‌ســـازی‌ها، به روش اجزاء محدود انجام شـــود. بنابراین معادلات گذرای مداری و حرکتی، می‌بایسـت با معادلات گذرای میدانی ترکیب شـوند. شـکل (۱) ات صال سری هادی‌ها را برای تشکیل یک کویل از ماشین الکتریکی نشان می دهد که پالس I_{PD} به مدل گذرای سریع ماشین الکتریکی تزریق شده و در آن معنی فیزیکی V_b نشان داده شده ا ست. در این مدل سازی، هر دور از کویل به صـــورت یک شـــبکه نردبانی و به عنوان رابط بین منبع ولتاژ و ناحیه المان محدود در نظر گرفته می‌شـــود. در مدل شـــبکه نردبانی، هر کویل می‌تواند به صورت عنا صر ف شرده R، L و C در نظر گرفته شود[۲۴]. در شکل (۱)، R_s و L_s به ترتیب مقاومت و اندوکتانس منبع می‌باشـــند. با مدل‌ســـازی یک ماشـــین القایی در حوزه فرکانس، می‌توان آن را در حوزه زمان نیز پردازش کرد. یعنی پاسخ‌های فرکانسی در حالت دائمی، می‌تواند به عنوان نقطه شروع برای م سائل محا سباتی گذرای ماشین مورد استفاده قرار گیرد زیرا در این نقطه، گذراهای DC حذف خواهند شـد. در این مقاله، از مدل حالت‌گذرای سـریع به منظور مکانیابی تخلیه‌جزئی در عایق سیم‌پیچ ما شین‌های الکتریکی ا ستفاده شده است. ایده روش مداری-میدانی در این مقاله، مکانیابی تخلیه‌جزئی بر مبنای مدل فرکانس بالای ماشـــین الکتریکی ارائه شـــده در مرجع [۲۱] می‌باشـــد با این تفاوت که پالس جریانی تخلیه‌جزئی نیز به نقاط مختلف اتصـــال کویل، متناســـب با اعتبار فرکانســـی ماشـــین تزریق می‌شود. I_{PD} نیز در آنالیز اجزاء محدود به جریان هر میله اضافه شده و در ماتریس نهایی سیستم شناسایی می‌شود.



شکل (۱): تزریق پالس جریانی تخلیه‌جزئی به مدل حالت گذرای سریع ماشین‌های الکتریکی[۲۱]

جهت یافتن منبع تخلیه‌جزئی در مرحله شـــبیه‌ســـازی، پالس جریان تخلیه جزئی باید به یکی از ورودی‌های سیم‌پیچ که به عنوان رابط بین ولتاژ و ناحیه المان محدود اســـت تزریق گردد و پالس I_{PD} نیز به معادلات ا ضافه شود. بار الکتریکی q و طیف فرکان سی $F(\omega)$ تو سط رابطه (۱) می‌تواند محاسبه شود.

$$q = \int_0^{\infty} i(t)dt \quad \text{and} \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j\omega t}dt \qquad (۱)$$

برای مکانیابی تخلیه‌جزئی به کمک مدل گذرای ســـریع ماشـــین‌های الکتریکی، اگر فرض شـود که یک پالس جریان تخلیه‌جزئی در دور i ام از سیم‌پیچ رخ دهد معادلات جریان در این گره‌ها مطابق با روابط (۲) و (۳) تغییر می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020

$$\{I_{bi}\}_{n\times1}=\left[\frac{1}{R_i}\right]_{n\times n}\{Vt_i\}_{n\times1}+\left[\frac{1}{L_i}\right]_{n\times n}\left\{\int Vt_i dt\right\}_{n\times1}+[C_i]_{n\times n}\left\{\frac{dVt_i}{dt}\right\}_{n\times1}-[C_{ei}]_{n\times n}\left\{\frac{dU_i}{dt}\right\}_{n\times1}+\{I_{pdi}\}_{n\times1}$$

$$\xrightarrow[\text{and linearization}]{\text{By discrete}}$$

$$\begin{aligned}&\Delta t\{\Delta I_{pdi}\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}-[C_{ei}]\{\Delta U_i\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}+\left([C_i]+\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]+\beta(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right]\right)\{\Delta Vt_i\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}-\ \Delta t\{\Delta I_{bi}\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}=\\&-\Delta t\{\Delta I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t}+[C_{ei}]\{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t}-\left([C_i]+\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]+\beta(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right]\right)\times\{Vt_i\}_{c,k}^{t+\Delta t}+\Delta t\{I_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t}+\\&[C_{ei}]\{U_i\}^{t-\Delta t}-[C_i]\{Vt_i\}^{t-\Delta t}+\Delta t\{I_{pdi}\}^{t}-2[C_{ei}]\{U_i\}^{t}+(2[C_i]+\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]-(1-\beta)(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right])\{Vt_i\}^{t}-\Delta t\{I_{bi}\}^{t}\\&[D]^{-1}_{n\times n}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]_{n\times n}\{V_{bi}\}_{n\times1}-[D]^{-1}_{n\times n}[\sigma Q]^{T}_{n\times n}\left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\}_{n\times1}=\\&\left[\frac{1}{R_i}\right]_{n\times n}\{Vt_i\}_{n\times1}+\left[\frac{1}{L_i}\right]_{n\times n}\left\{\int Vt_i dt\right\}_{n\times1}+[C_i]_{n\times n}\left\{\frac{dVt_i}{dt}\right\}_{n\times1}-[C_{ei}]_{n\times n}\left\{\frac{dU_i}{dt}\right\}_{n\times1}+\{I_{pdi}\}_{n\times1}\end{aligned}$$

$$\xrightarrow[\text{and linearization}]{\text{By discrete}}$$

$$\begin{aligned}&\Delta t\{\Delta I_{pdi}\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}+\left(\beta(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right]+\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]+[C_i]\right)\{\Delta Vt_i\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}+[D]^{-1}[\sigma Q]_c^{T}\{\Delta A\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}-\\&\Delta t[D]^{-1}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]\{\Delta V_{bi}\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}-[C_{ei}]\{\Delta U_i\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}=\\&-\Delta t\{I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t}-\left(\beta(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right]+\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]+[C_i]\right)\{Vt_i\}_{c,k}^{t+\Delta t}-[D]^{-1}[\sigma Q]_c^{T}\{A\}_{c,k}^{t+\Delta t}+\\&\Delta t[D]^{-1}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]\{V_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t}+[C_{ei}]\{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t}-[D]^{-1}[\sigma Q]_c^{T}\{A\}^{t-\Delta t}-[C_i]\{Vt_i\}^{t-\Delta t}+[C_{ei}]\{U_i\}^{t-\Delta t}-\\&2[C_i]\{U_i\}^{t}+\left(\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right]+2[C_i]-(\Delta t)^2(1\text{-}\beta)\left[\frac{1}{L_i}\right]\right)\{Vt_i\}^{t}-\Delta t[D]^{-1}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]\{V_{bi}\}^{t}-\\&2[D]^{-1}[\sigma Q]_c^{T}\{A\}^{t}+\Delta t\{I_{pdi}\}^{t}\end{aligned}\qquad(۳)$$

در روابط (۲) و (۳) پارامترهای $I_{pdi}=\{0,...,I_{pdi},...,0\}$ و $\left[\frac{1}{R_i}\right]$ ماتریس قطری مقاومت هر واحد کویل، $\left[\frac{1}{L_i}\right]$ ماتریس قطری اندوکتانس هر واحد کویل، $[C_i]$ ماتریس قطری کاپاسیتانس هر واحد کویل و $[C_{ei}]$ ماتریس قطری کاپاسیتانس هر واحد کویل تا زمین می باشند. رابطه (۴) معادله مربوط به جریان تخلیه‌جزئی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}&[k_c]\{\Delta U_i\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}-\beta\Delta t\{\Delta I_{pdi}\}_{c,k+1}^{t+\Delta t}=\\&\beta\Delta t\{I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t}-[k_c]\{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t}+\\&(1-\beta)\Delta t\{I_{pdi}\}^{t}+[k_c]\{U_i\}^{t}\end{aligned}\qquad(۴)$$

در رابطه (۴) مقدار $[k_c]$ و پارامترهای آن برابر است با:

$$[k_c]=\begin{bmatrix}0&0&\dots&0&0\\0&\ddots&\dots&0&0\\\vdots&\vdots&\dfrac{C_c}{1+\frac{1}{\varepsilon_r}(\frac{d}{h}-1)}&\vdots&\vdots\\0&0&\dots&\ddots&0\\0&0&\dots&0&0\end{bmatrix}$$

Cc کاپاسیتانس حفره در عایق، d ضخامت عایق، h ضخامت حفره و ε_r پرمیتیویته دی‌الکتریک است[۲۵]. با فرمول‌بندی گالرکین معادلات فوق و بعد از گسسته سازی و خطی سازی، هشت بردار مجهول به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & M_{13} & M_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} & 0 & M_{25} & 0 & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{37} & 0 \\ M_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{47} & 0 \\ M_{51} & M_{52} & 0 & 0 & 0 & M_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{64} & M_{65} & M_{66} & 0 & M_{68} \\ M_{71} & M_{72} & 0 & M_{74} & M_{75} & 0 & 0 & M_{78} \\ 0 & 0 & 0 & M_{84} & 0 & 0 & 0 & M_{88} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{\Delta A\} \\ \{\Delta V_{bi}\} \\ \{\Delta I\} \\ \{\Delta U_i\} \\ \{\Delta Vt_i\} \\ \{\Delta I_{bi}\} \\ \{\Delta X\} \\ \{\Delta I_{pdi}\} \end{bmatrix}_{k+1}^{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \{N_1\} \\ \{N_2\} \\ \{N_3\} \\ \{N_4\} \\ \{N_5\} \\ \{N_6\} \\ \{N_7\} \\ \{N_8\} \end{bmatrix}$$

$$M_{13} = M_{66} = M_{68} = M_{78} = \Delta t \left| M_{14} = -([C] + \Delta t[G]) \right| M_{22} = -\beta \Delta t \{D\}_c^T$$

$$M_{23} = -(L_s + \beta \Delta t R_s)\{1\}_c^T \left| M_{25} = -\beta \Delta t \{1\}_c^T \right| M_{31} = \left[[Z] + \frac{\sigma[T]}{\beta \Delta t} \right]$$

$$M_{32} = -\frac{\sigma}{L}\{Q\} \left| M_{37} = \nu_k^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial S}{\partial x} \right] \{A\}_k^{t+\Delta t} \right| M_{41} = L\{W\}^T$$

$$M_{47} = \left(\frac{\lambda}{\beta \Delta t} + \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} + P \right) \left| M_{51} = -[\sigma Q]_c^T \right| M_{52} = \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{L} \Delta_{bi} \right]$$

$$M_{56} = \beta \Delta t [D] \left| M_{64} = M_{74} = -[C_{ei}] \right| M_{65} = -\left([C_i] + \Delta t \left[\frac{1}{R_i} \right] + \beta (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{L_i} \right] \right)$$

$$M_{71} = [D]^{-1} [\sigma Q]_c^T \left| M_{72} = -\Delta t [D]^{-1} \left[\frac{\sigma}{L} \Delta_{bi} \right] \right| M_{75} = \beta (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{L_i} \right] + \Delta t \left[\frac{1}{R_i} \right] + [C_i]$$

$$M_{84} = [k_c] \left| M_{88} = -\beta \Delta t [D] \right.$$

$$\{N_1\} = \Delta t \{I\}^t + (\Delta t[G] + (\Delta t)^2 [H] - 2[C])\{U\}^t + [C]\{U\}^{t-\Delta t}$$

$$\{N_2\} = -\beta \Delta t \Delta V s_{c,k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{D\}_c^T \{V_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{1\}_c^T \times \{Vt_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} + (L_s + \beta \Delta t R_s)\{1\}_c^T \{I\}_{c,k}^{t+\Delta t} -$$
$$\beta \Delta t V s_{c,k}^{t+\Delta t} + (1-\beta)\Delta t \{D\}_c^T \{V_{bi}\}_c^t + (1-\beta)\Delta t \{1\}_c^T \{Vt_i\}_c^t - (L_s - (1-\beta)\Delta t R_s)\{1\}_c^T \{I\}^t - (1-\beta)\Delta t V s^t$$

$$\{N_3\} = -\left[\nu_k^{t+\Delta t} [S]_k^{t+\Delta t} + \frac{\sigma[T]}{\beta \Delta t} \right] \times \{A\}_k^{t+\Delta t} + \left[\frac{\sigma[T]}{\beta \Delta t} - \frac{1-\beta}{\beta} \nu^t [S]^t \right] \{A\}^t + \frac{\sigma}{L}\{Q\} \frac{1-\beta}{\beta} \{V_{bi}\}^t$$

$$\{N_4\} = -\frac{1}{2\beta} L\{W\}^T \{A\}_k^{t+\Delta t} + \left(-\frac{\beta \lambda}{\Delta t} - \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} \right) x_k^{t+\Delta t} + \frac{m}{\beta^2 \Delta t} \upsilon^t + \left(\frac{\lambda}{\beta \Delta t} + \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} \right) x^t + \frac{1-\beta}{\beta} F_{em}^t -$$
$$\frac{1-\beta}{\beta} F_{ext}^t - F_{ext}^{t+\Delta t} \qquad (۵)$$

$$\{N_5\} = L\{W\}[\sigma Q]_c^T \{A\}_k^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{L} \Delta_{bi} \right] \{V_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t [D] \{I_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} - [\sigma Q]_c^T \{A\}^t -$$
$$(1-\beta)\Delta t \left[\frac{\sigma}{L} \Delta_{bi} \right] \{V_{bi}\}_c^t +$$
$$(1-\beta)\Delta t [D] \{I_{bi}\}_c^t$$

$$\{N_6\} = -\Delta t \{\Delta I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} + [C_{ei}] \{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} - \left([C_i] + \Delta t \left[\frac{1}{R_i} \right] + \beta (\Delta t)^2 \left[\frac{1}{L_i} \right] \right) \times \{Vt_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} + \Delta t \{I_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} +$$
$$[C_{ei}] \{U_i\}^{t-\Delta t} - [C_i] \{Vt_i\}^{t-\Delta t} + \Delta t \{I_{pdi}\}^t - 2[C_{ei}] \{U_i\}^t + (2[C_i] + \Delta t \left[\frac{1}{R_i} \right] -$$
$$(1-\beta)(\Delta t)^2 \left[\frac{1}{L_i} \right]) \{Vt_i\}^t - \Delta t \{I_{bi}\}^t$$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

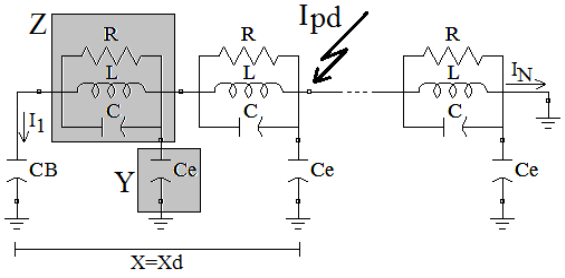
$$\{N_7\} = -\Delta t\{I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} - \left(\beta(\Delta t)^2\left[\frac{1}{L_i}\right] + \Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right] + [C_i]\right) \times \{Vt_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} -$$
$$[D]^{-1}[\sigma Q]_c^T\{A\}_{c,k}^{t+\Delta t} + \Delta t[D]^{-1}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]\{V_{bi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} + [C_{ei}]\{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} - [D]^{-1}[\sigma Q]_c^T\{A\}^{t-\Delta t} - [C_i]\{Vt_i\}^{t-\Delta t} + [C_{ei}]\{U_i\}^{t-\Delta t} -$$
$$2[C_i]\{U_i\}^t + \left(\Delta t\left[\frac{1}{R_i}\right] + 2[C_i] - (\Delta t)^2(1-\beta)\left[\frac{1}{L_i}\right]\right)\{Vt_i\}^t - \Delta t[D]^{-1}\left[\frac{\sigma}{L}\Delta_{bi}\right]\{V_{bi}\}^t - 2[D]^{-1}[\sigma Q]_c^T\{A\}^t + \Delta t\{I_{pdi}\}^t$$
$$\{N_8\} = \beta\Delta t\{I_{pdi}\}_{c,k}^{t+\Delta t} - [k_c]\{U_i\}_{c,k}^{t+\Delta t} + (1-\beta)\Delta t\{I_{pdi}\}^t + [k_c]\{U_i\}^t$$

۳- مکان‌یابی تخلیه‌جزئی

با شناسایی پالس تخلیه‌جزئی می‌توان مکان آن را تخمین زد. چون I_{PD} در جریان خروجی ظاهر می‌شود به همین دلیل این روش بر مبنای آنالیز جریانی است و می‌تواند بر روی ماشین‌های واقعی اعمال شود. معادلات فضای حالت استخراج شده از جریان خروجی نقطه خنثی در مدار شکل (۱)، جهت مکانیابی تخلیه‌جزئی مناسب هستند. در این تجزیه و تحلیل فرض بر این است که منبع جریان تخلیه‌جزئی دارای توزیع منحصر به فرد است[۲۶] و طیف فرکانسی تخلیه‌جزئی آشکار شده، می‌تواند به عنوان پاسخ فرکانسی سیستم در نظر گرفته شود که در آن تنها ماتریس کنترل، با موقعیت منبع جریان تخلیه‌جزئی در ارتباط است. با توجه به اینکه، رخداد تخلیه‌جزئی نمی‌تواند بر روی ساختار سیستم اثرگذار باشد بنابراین فرکانس‌های رزونانس سری می‌تواند برای مکانیابی تخلیه‌جزئی بهره گرفته شود زیرا فرکانس‌های رزونانس سری در جریان انتهای سیم-پیچ، با توجه به موقعیت مکانی تخلیه‌جزئی تغییر می‌کنند. زمانی که یک منبع پالس تخلیه‌جزئی در فاصله X_d از انتهای سیم‌پیچ تزریق می‌شود با توجه به طول کل کویل به عنوان طول واحد (ℓ)، توزیع ولتاژ و جریان ناشی از تزریق پالس تخلیه‌جزئی در دو بخش کویل متفاوت خواهد بود. مطابق با شکل (۲)، در رابطه (۶) خواهیم داشت[۲۷]:

$$\begin{cases} \text{For} \rightarrow 0 \le x \le x_d \\ u_1(x,j\omega) = A_1\cosh(\gamma(x_d - x)) + \\ B_1\sinh(\gamma(x_d - x)) \\ i_1(x,j\omega) = \frac{1}{Z_C}[A_1\sinh(\gamma(x_d - x)) + \\ B_1\cosh(\gamma(x_d - x))] \\ \text{For} \rightarrow x_d \le x \le \ell \\ u_2(x,j\omega) = A_2\cosh(\gamma(x - x_d)) + \\ B_2\sinh(\gamma(x - x_d)) \\ i_2(x,j\omega) = \frac{1}{Z_C}[A_2\sinh(\gamma(x - x_d)) + \\ B_2\cosh(\gamma(x - x_d))] \end{cases} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) $Z_C = \sqrt{Z/Y}$ به عنوان امپدانس موجی و $\gamma = ZY$ معرف ثابت انتشار می‌باشد. A_1، B_1، A_2 و B_2 ضرایب ثابت هستند و با توجه به شرایط مرزی زیر تعیین می‌شوند[۲۷].



شکل (۲): مدل شبکه نردبانی سیم‌پیچ به همراه پالس جریانی تخلیه‌جزئی تزریق شده

با توجه به روابط فوق و با اعمال شرایط مرزی، جریان خروجی توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود[۲۷].

$$I_1(j\omega) = \frac{\frac{C_B}{C}\gamma\sinh(\gamma(\ell - x_d))}{\frac{C_B}{C}\gamma\sinh(\gamma\ell) - \cosh(\gamma\ell)} \times I_{PD}(j\omega) \quad (۷)$$

بنابراین موقعیت مکانی پالس تخلیه‌جزئی به کمک رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$\left(C_B/C\right)\gamma\sinh(\gamma(\ell - x_d)) = 0$$
$$\rightarrow x_d^2 - 2\ell x_d + \ell^2 = -\left(n\pi/\gamma\right)^2 \quad (۸)$$

در رابطه (۸) $n=0,\pm1,\pm2,\pm...$ مطابق با فرکانس رزونانس سری سیگنال گرفته شده از انتهای سیم‌پیچ می‌باشد. و با معلوم بودن مقدار ℓ و با حل این معادله می‌توان از آن به عنوان یک اندازه‌گیر، در جهت پیدا کردن منبع تخلیه‌جزئی استفاده کرد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

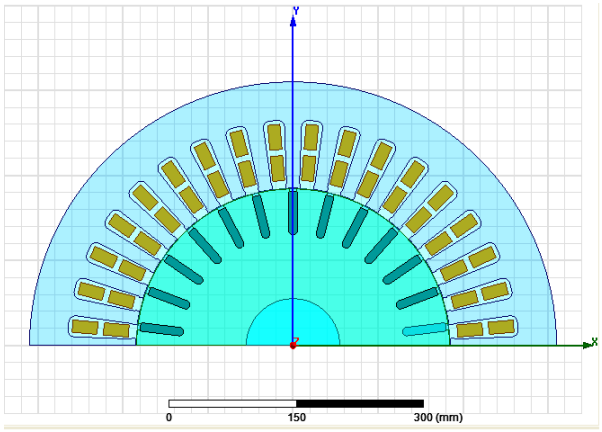
از روش اجزاء محدود می‌توان به عنوان حل کننده مسائل مغناطیسی و برای تعیین پارامترهای ماشین استفاده نمود. برای به دست آوردن پارامترهای الکتریکی ماشین می توان از حل‌کننده‌های الکترومغناطیس، جریان‌گردابی و الکترواستاتیک در نرم افزار انسیس ماکسول[۷] استفاده کرد [۲۸]. نرم‌افزار انسیس[۸] ابعاد هندسی ماشین را به عنوان ورودی می‌گیرد و پارامترهای الکتریکی ماشین را به عنوان خروجی تعیین خواهد کرد. جدول (۱) ابعاد هندسی ماشین القایی و شکل (۳)

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شبیه‌سازی دوبعدی کامل ماشین در نرم‌افزار انسیس ماکسول را نشان می‌دهد.

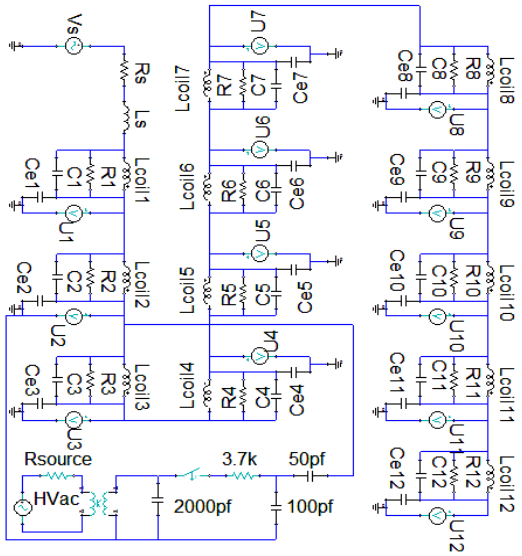
جدول(۱): پارامترهای ماشین القایی سه فاز

مشخصات	مقدار	مشخصات	مقدار
توان	۲۵۰kW	تعداد قطب	۴
ولتاژ	۶kV	فرکانس	۵۰Hz
تعداد شیار	۳۶	تعداد فاز	۳
طول روتور	۴۰۰mm	قطر داخلی استاتور	۳۷۰mm
قطر داخلی روتور	۱۱۰mm	قطر خارجی استاتور	۶۲۰mm
قطر خارجی روتور	۳۶۸mm	طول هسته استاتور	۴۰۰mm



شکل (۳): شبیه‌سازی دوبعدی کامل ماشین در نرم‌افزار انسیس ماکسول

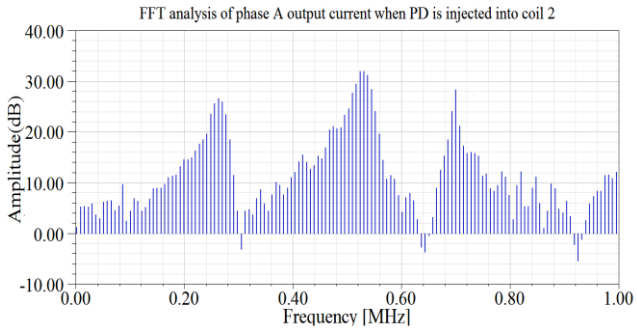
مقاومت و ظرفیت خازنی سیم‌پیچ از طریق شبیه‌سازی ماشین در نرم‌افزار انسیس استخراج و به عنوان یک پارامتر مورد نیاز، برای ورودی نرم‌افزار ماکسول سیرکویت ادیتور[۹] مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اجرای شبیه‌سازی، نرم‌افزارهای انسیس و ماکسول سیرکویت ادیتور با یکدیگر لینک می‌شوند. شکل (۴) تزریق پالس تخلیه‌جزئی به ماشین شبیه‌سازی شده در این نرم‌افزارها را نشان می‌دهد.



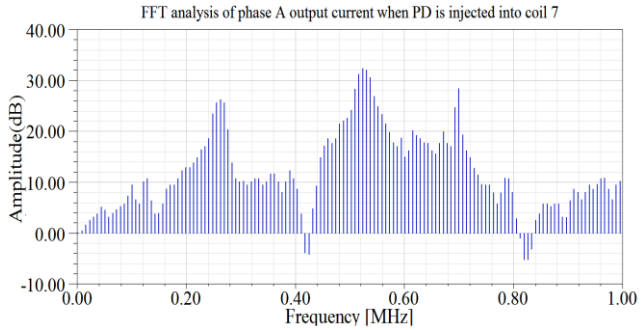
شکل (۴): تزریق تخلیه جزئی به مدل ماشین در انسیس و ماکسول سیرکویت ادیتور

پالس تخلیه‌جزئی شبیه‌سازی شده به کویل‌های دوم، هفتم و یازدهم ماشین تزریق می‌شود و سپس طیف فرکانسی جریان خروجی به کمک آنالیز تبدیل فوریه سریع[۱۰] گرفته می‌شود[۲۹]. در این مکانیابی، مولفه فرکانسی تخلیه‌جزئی در محدوده اعتبار ماشین مدل شده می‌باشد و در مرحله پس پردازش، اثرات هسته نیز در محاسبات روش اجزاء محدود و با هدف مکانیابی لحاظ می‌شود.

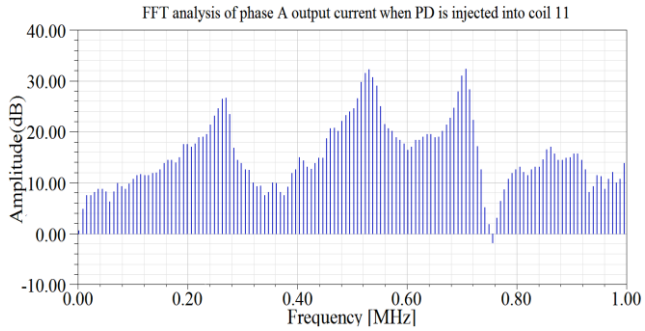
شکل‌های (۵) تا (۷) طیف فرکانسی جریان خروجی را در مرحله شبیه‌سازی و زمانی که تخلیه‌جزئی به کویل‌ها تزریق می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل (۵): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل FEM-RLC با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۲



شکل (۶): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل FEM-RLC با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۷



شکل (۷): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل FEM-RLC با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۱۱

مدل مداری تخلیه‌جزئی به عنوان رابط مداری و ناحیه المان محدود استفاده می‌شود. بنابراین فرکانس‌های رزونانس سری با دقت بالا از طیف فرکانسی ناشی از جریان خروجی به دست می‌آید. در نهایت مطابق با رابطه (۸) مکان تخلیه‌جزئی تخمین زده شده و کویل تعیین می‌گردد. در این تجربه و تحلیل، طیف فرکانسی جریان خروجی از

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

انتهای سیم‌پیچ ماشین مورد نظر گرفته شده و از فرکانس‌های رزونانس سری برای مکانیابی تخلیه‌جزئی استفاده می‌گردد. در عمل، مشکل اصلی در اندازه‌گیری تخلیه‌جزئی، کوچک بودن سیگنال آن است که می‌تواند با نویز ترکیب شده و تشخیص آن دشوار شود. بنابراین می‌توان از الگوریتم‌های کاهش نویز استفاده کرد. جدول (۲) فرکانس‌های رزونانس سری ناشی از رخداد تخلیه‌جزئی را نشان می‌دهد.

جدول(۲): فرکانس‌های رزونانس سری انتهای سیم‌پیچ با مدل FEM-RLC

مکان تخلیه‌جزئی	F_1(kHz)	F_2(kHz)	F_3(kHz)
کویل ۲	۳۰۷	۶۴۷	۹۳۵
کویل ۷	۴۳۱	۸۱۹	-
کویل ۱۱	۷۶۱	-	-

اگر تخلیه‌جزئی با استفاده از فرکانس‌های رزونانس سری، مطابق با n=1 و تعیین شاخص‌ها در رابطه (۸) مکانیابی شود نتایج جدول (۳) حاصل می‌شود.

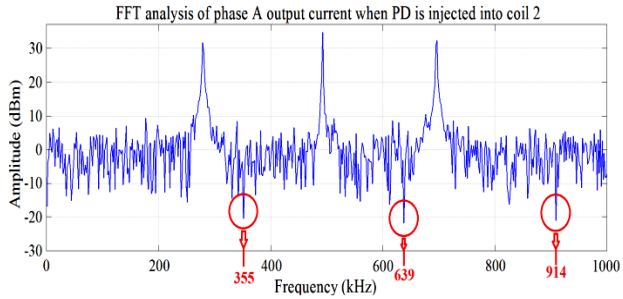
جدول(۳): مقایسه مکان‌های واقعی و تخمین زده شده تخلیه‌جزئی با مدل FEM-RLC

مکان تخمینی (کویل)	مکان واقعی (کویل)	درصد خطا	مکان تخمینی (cm)	مکان واقعی (cm)
کویل ۲	کویل ۲	۵,۰۴	۳۹۵	۴۱۶
کویل ۷	کویل ۷	۲,۶۴	۱۵۸۱	۱۶۲۴
کویل ۱۱	کویل ۱۱	۱,۱	۲۵۱۰	۲۵۴۰

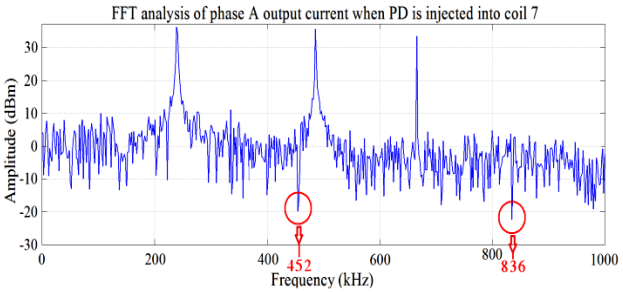
با ارزیابی نتایج به دست آمده از جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت که با کمک مدل مداری-میدانی، محل واقعی تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ ماشین به دست می‌آید. در عمل طیف فرکانسی سیگنال خروجی پس از تزریق پالس تخلیه‌جزئی به کویل‌های ذکر شده، با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال قابل دسترسی خواهد بود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی، صحت بالای روش ارائه شده را تایید می‌کند.

۵- مقایسه نتایج مدل‌های مداری و مداری-میدانی

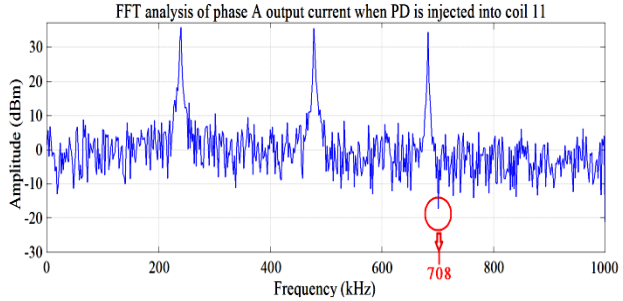
به منظور مقایسه دو روش مداری و مداری-میدانی در مکانیابی تخلیه‌جزئی، سیم‌پیچ ماشین به کمک مدل مداری کلاسیک شبکه نردبانی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد و پالس تخلیه‌جزئی به گره‌های دوم، هفتم و یازدهم از کویل تزریق گردید. شکل‌های (۸) تا (۱۰) طیف‌های فرکانسی گرفته شده از جریان خروجی کوئل‌ها را نشان می‌دهد. طیف‌های فرکانسی موجود در شکل‌های (۸) تا (۱۰) شامل فرکانس‌های رزونانس موازی در دامنه بالای موج‌ها و مستقل از موقعیت تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ است و فرکانس‌های رزونانس سری نیز در دامنه پایین موج‌ها مشخص می‌باشند.



شکل (۸): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک شبکه نردبانی با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۲



شکل (۹): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک شبکه نردبانی با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۷



شکل (۱۰): طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک شبکه نردبانی با تزریق تخلیه‌جزئی به کویل ۱۱

جدول (۴) فرکانس‌های رزونانس سری نا شی از رخداد تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ مدل شده به روش کلاسیک شبکه نردبانی را نشان می دهد. در جدول (۵) نیز نتایج حاصل از تخمین مکان‌یابی تخلیه‌جزئی با استفاده از فرکانس‌های رزونانس سری، مطابق با n=1 و تعیین شاخص‌ها در رابطه (۸) نشان داده شده است.

جدول(۴): فرکانس‌های رزونانس سری انتهای سیم‌پیچ مدل کلاسیک شبکه نردبانی

مکان تخلیه جزئی	F_1(kHz)	F_2(kHz)	F_3(kHz)
کویل ۲	۳۵۵	۶۳۹	۹۱۴
کویل ۷	۴۵۲	۸۳۶	-
کویل ۱۱	۷۰۸	-	-

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول(۵): مقایسه مکان‌های واقعی و تخمین زده شده تخلیه‌جزئی در مدل کلاسیک شبکه نردبانی

مکان تخمینی (کویل)	مکان واقعی (کویل)	درصد خطا	مکان تخمینی (cm)	مکان واقعی (cm)
کویل ۳	کویل ۲	۷,۲۱	۴۴۶	۴۱۶
کویل ۸	کویل ۷	۳,۱۴	۱۶۷۵	۱۶۲۴
کویل ۱۱	کویل ۱۱	۱,۸۵	۲۴۹۳	۲۵۴۰

با ارزیابی نتایج به دست‌آمده از جداول (۳) و (۵) با هدف مکان‌یابی تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ماشین الکتریکی مورد آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که روش مداری-میدانی دقت و عملکرد بهتری را نسبت به روش کلاسیک شبکه نردبانی نشان می‌دهد. زیرا در مدل مداری شبکه نردبانی پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ ثابت در نظر گرفته می‌شوند در حالی‌که در مدل مداری-میدانی، اندوکتانس‌ها در هر لحظه از زمان متغیر هستند. به علاوه، در مدل مداری شبکه نردبانی اثر هسته در هر لحظه از زمان و در طیف فرکانس‌های مختلف نادیده گرفته می‌شود در حالی که اثر هسته در مدل مداری-میدانی در شبیه‌سازی‌ها اعمال می‌شود. همچنین، در مدل مداری شبکه نردبانی مکانیابی‌ها براساس مدل سیم‌پیچ است در صورتیکه مکانیابی‌ها به کمک مدل مداری-میدانی بر اساس مدل ماشین الکتریکی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مکان تخلیه جزئی در عایق سیم‌پیچ یک ماشین القایی ۶kV/۲۵۰kW مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با علم به اینکه تخلیه‌جزئی در محدوده کیلوهرتز-مگاهرتز رخ می‌دهد ماشین برای مطالعه گذرای سریع، با یکپارچه‌سازی مدل شبکه نردبانی سیم‌پیچ به عنوان رابط بین منبع ولتاژ و ناحیه المان محدود مدل‌سازی شد. سپس ماشین القایی شبیه‌سازی و پالس تخلیه‌جزئی به کوئل‌های دوم، هفتم و یازدهم تزریق شد. در ادامه، مکان تخلیه‌های جزئی با کمک آنالیز تبدیل فوریه سریع بر روی سیگنال خروجی سیم‌پیچ و فرکانس‌های رزونانس سری تخمین زده شد. در پایان، سیم‌پیچ ماشین مذکور به کمک مدل مداری شبکه نردبانی نیز در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد و با تزریق پالس تخلیه‌جزئی به نقاط مختلف کویل، مکانهای تخلیه جزیی تخمین زده شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی، دقت بالاتر مکانیابی تخلیه‌جزئی با استفاده از مدل مداری – میدانی پیشنهادی و مبتنی بر روش المان محدود با رابط مداری شبکه نردبانی را برای هر دور از سیم‌پیچ، نسبت به مدل مداری شبکه نردبانی نشان می دهد.

مراجع

[۱] درویش فالحی علی. " آنالیز و تشخیص دقیق تخلیه جزئی خازن های قدرت توسط الگوریتم شبکه عصبی تعمیمی و آشکارسازی سنکرون مبتنی بر تئوری آشوب "، نشریه تحقیقات نوین در برق، سال نهم، شماره دو، تابستان ۱۳۹۹.

[2] Janani H, Kordi B, Jozani MJ. *"Classification of simultaneous multiple partial discharge sources based on probabilistic interpretation using a two-step logistic regression algorithm"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 24(1), 54-65, 2017.

[3] Rostaminia R, Saniei M, Vakilian M, Mortazavi SS, Parvin Darabad V. *"An efficient partial discharge pattern recognition method using texture analysis for transformer defect models"*. International Transactions on Electrical Energy Systems. e2558, 2018.

[۴] همائی محمدجواد، ستایش مهر علیرضا. " بررسی تاثیر اندازه، شکل هندسی و موقعیت قرارگیری حفره های موجود درحجم عایقی کابل های فشارقوی XLPE با استفاده از آنالیز المان محدود"، پنجمین همایش بین المللی افق های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، تهران، ۱۳۹۹.

[۵] تیبا ابراهیم، فقیهی فرامرز. " ارزیابی تخلیه جزیی به ازای خرابی حفره در عایق دی الکتریک"، سومین کنفرانس ملی مهندسی برق و کامپیوتر، تهران، ۱۳۹۸.

[6] Zhang J, Xu W, Gao C, Wang S, Qiu J, Zhu JG, Guo Y. *"Analysis of inter-turn insulation of high voltage electrical machine by using multi-conductor transmission line mode"l*. IEEE Transactions on Magnetics. 49(5), 1905-1908, 2013.

[7] Gülnihar K, Cekli S, Uzunoğlu CP, Uğur M. *"Location estimation of partial discharge-based electromagnetic source using multilateration with time difference of arrival method"*. Electrical Engineering. 1-9, 2018.

[8] Khan Y. *"Partial discharge pattern analysis using PCA and back-propagation artificial neural network for the estimation of size and position of metallic particle adhering to spacer in GIS"*. Electrical Engineering. 98(1), 29-42, 2016.

[9] Hațiegan C, Padureanu I, Jurcu MR, Biriescu M, Răduca M, Dilertea F. *"The evaluation of the insulation performances of the stator coil for the high power vertical synchronous hydro-generators by monitoring the level of partial discharges"*. Electrical Engineering. 99(3), 1013-1020, 2017.

[۱۰] تیبا ابراهیم، فقیهی فرامرز. " مروری بر روش‌های مدل سازی و تشخیص پدیده تخلیه جزیی در تجهیزات سیستم قدرت"، سومین همایش ملی دانش و فناوری مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران، ۱۳۹۸.

[11] Raman, S.J. and Kumar, U. *"Time domain approach for modelling transformer windings for propagation of fast discharge pulses"*. In 2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC) (pp. 1-4). IEEE.2016.

[12] Hosseini, S.H. and Baravati, P.R. *"New high frequency multi-conductor transmission line detailed model of transformer winding for PD study"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24(1), pp.316-323.2017.

[۱۳] خسروی مسعود, حسینی علی آبادی محمود، جوادی شهرام. "بهینه سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه توسط روش اجزای محدود جهت بهبود عملکرد توربین بادی سرعت متغیر"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷.

[14] Mondal, M., Kumbhar, G. B., & Kulkarni, S. V. *"Localization of partial discharges inside a transformer*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

winding using a ladder network constructed from terminal measurements". IEEE Transactions on Power Delivery, 33(3), 1035-1043.2017.

[15] Hosseini SM, Baravati PR. *"Transformer winding modeling based on multi-conductor transmission line model for partial discharge study"*. Journal of Electrical Engineering and Technology. 9(1),154-161, 2014.

[16] SMH Hosseini, M Vakilian, GB Gharehpetian. *"Partial discharge location in transformers through application of MTL model"*. International Conference on Power Systems Transients (IPST). 1-6, 2009.

[17] Jafari, A.M., Akbari, A., Mirzaei, H.R., Kharezi, M. and Allahbakhshi, M. *"Investigating practical experiments of partial discharge localization in transformers using winding modeling"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15(4), 2008.

[18] Jeyabalan, V. and Usa, S. *"Frequency domain correlation technique for PD location in transformer winding"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(4), pp.1160-1167, 2009.

[19] Mondal, M. and Kumbhar, G.B. *"A technique based on an archimedean copula for the localization of partial discharge in a transformer winding"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23(5), pp.2908-2916, 2016.

[20] Werle P, Akbari A, Gockenbach E, Borsi H. *"An enhanced system for partial discharge diagnosis on power transformers"*. InInternational Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam.2003.

[21] Hosseinibafqi S, Akbari H, & Saied S. *"An improved model of cage induction machines for fast transients studies"*. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2019.

[22] Karami, H., Azadifar, M., Rubinstein, M., and Rachidi, F. *"An experimental validation of partial discharge localization using electromagnetic time reversal"*. Scientific reports, 11(1):1-2, 2021.

[23] Rathod, V.B., Kumbhar, G.B. and Bhalja, B.R.*" Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends"*. *IETE Technical Review*, 1-13, 2021.

[۲۴] نصرتیان اهور جعفر، سیدطبایی سعید، قره پتیان گئورگ. **"**به کارگیری مدار معادل مشروح توسعه یافته در ابعاد بزرگ برای مطالعه حالت گذرای ترانسفورماتور**"**، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶.

[25] Suwanasri, C., Suwanasri, T., & Fuangpian, P. *"Investigation on partial discharge of power cable termination defects using high frequency current transformer"*. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, 12(1), 2014.

[26] Hao, L., Lewin, P. L., Hunter, J. A., Swaffield, D. J., Contin, A., Walton, C., & Michel, M. *"Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18(5), 1702-1711,2011.

[27] Wang, Z. D., Crossley, P. A., Cornick, K. J., & Zhu, D. H. *"An algorithm for partial discharge location in distribution power transformers"*. In Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 2217-2222, 2000.

[28] Bacher, J., Waldhart, F., & Muetze, A. *"3-d fem calculation of electromagnetic properties of singl*e-phase *induction machines"*. IEEE transactions on energy conversion, 30(1), 142-149, 2015.

[29] Schlensok, C., & Henneberger, G. *"Calculation of force excitations in induction machines with centric and excentric positioned rotor using 2-D transient FEM"*. IEEE transactions on magnetics, 40(2), 782-785, 2004.

رزومه



حمیدرضا خضری تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرکوه(۱۳۹۰)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق(۱۳۹۲) و دکتری مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد(۱۳۹۹) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مدل‌سازی گذرای ترانسفورماتورها، موتورها و ژنراتورها در سیستم های 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 انرژی های تجدیدپذیر است.



سیدمجتبی حسینی‌بافقی 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.

زیرنویس‌ها

1- Partial Discharge
2- Kilohertz-Megahertz
3- RLC ladder network
4-Finite Element Method
5- Multi-conductor Transmission Line
6- Circular multi-conductor Transmission Line
7-Ansys Maxwell
8-Ansys
9-Circuit editorMaxwel
10-Fast fourier transform

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020

Comparison of circuit and circuit-field models for partial discharge localization in stator winding of electric machins

Hamidreza Khezri[1], Hamidreza Akbari[1*], SeyedMojtaba Hosseini Bafghi [1]

[1]Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
[*]H.Akbari@iauyazd.ac.ir

Abstract : In this paper, the accurate localization of partial discharges (PDs) in winding insulation of high-voltage (HV) machines is investigated. Since partial discharges have frequency components ranging from kilohertz (kHz) to megahertz (MHz), it is necessary to employ transient models of electrical machines to locate PDs. In this study, PD current pulse with KHz frequency range is injected to RLC ladder network model of each coil turn of a cage induction machine (CIM), as interface between voltage sources and the finite element region. Analyses and comparison of experimental results with simulation results show that simulation of electrical machines, which use finite element method (FEM) with RLC interface between voltage sources and FE region (circuit-field model) can estimate the accurate location of PD in stator winding of electric machines.

Keywords: Partial Discharge Localization; High voltage machine insulation; Finite element analysis; Field and circuit transient equations.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.3.5.7]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.3 Autumn 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]