

مکانیابی تخلیه جزئی در عایق ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا با آنالیز مدل مداری و میدانی

حمیدرضا خضری^۱، حمیدرضا اکبری^{۲*} و سیدامین سعید^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴	این مقاله آشکارسازی و مکانیابی تخلیه جزئی ^۴ در عایق سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا را توسط مدل مداری و میدانی در آنالیز المان محدود مورد بررسی قرار می‌دهد. استفاده از مدل‌های گذاری سریع ماشین‌های الکتریکی، این مهم را برای مکانیابی تخلیه های جزئی با مولفه‌های فرکانسی کیلوهرتز تا مگاهرتز فراهم می‌سازد. به این منظور، به هر دور از سیم‌پیچ مدل گذرای بسیار سریع ماشین‌القایی قفس سنجایی ۶KV/۲۵۰KW پالس جریانی PD ^۱ با مولفه فرکانسی مگاهرتز تزریق می‌شود. با هدف آشکارسازی پالس PD، تمامی معادلات مداری و میدانی برای به دست آوردن ماتریس نهایی سیستم ارائه شده است. جهت اعتبار بخشیدن به صحت و دقت مکانیابی‌ها، سیم‌پیچ‌های ماشین‌القایی به کمک مدل مداری خط انتقال چند سیمه در نرم‌افزار متلب نیز شبیه‌سازی گردید و پس از تزریق پالس PD، مکان‌های تخلیه به کمک آنالیز جریانی تخمین و این مکانیابی‌ها با مدل پیشنهادی به مقایسه گذاشته شد. بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند مکان تخلیه جزئی با مولفه‌های فرکانسی بالا را با دقت خوبی تخمین بزند.
واژگان کلیدی: مدل خط انتقال چند سیمه، معادلات گذرای مداری و میدانی، روش المان محدود، مکانیابی تخلیه جزئی، عایق ماشین الکتریکی، آنالیز جریانی.	

۱- مقدمه

[۲-۴] و در صورتیکه فرکانس موج ورودی با یکی از فرکانس‌های داخلی سیم‌پیچ برابر شود در این تجهیزات پدیده تشدید رخ خواهد داد و عایق سیم‌پیچ را تحت تنش قرار می‌دهد [۵-۷]. در صورتیکه بین اجزاء سیم‌پیچ، شدت میدان الکتریکی به مقدار بحرانی شکست دی‌الکتریک برسد سبب خرابی ماده عایقی در سیم‌پیچ می‌شود [۸ و ۹]. لذا در ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا موثرترین روش تشخیص وضعیت عایق، بررسی تخلیه جزئی به عنوان نشانه‌ای از تخریب عایق می‌باشد [۱۰-۱۳]. جهت شناسایی و مکانیابی تخلیه‌جزئی در تجهیزات فشارقوی، روش‌های کلی صوتی، نوری، شیمیایی و الکتریکی کاربرد دارند [۱۴]. با توجه محدودیت‌هایی که هر

تجهیزات فشارقوی گران قیمت، بخش عمده‌ای از سرمایه گذاری در تولید و انتقال انرژی الکتریکی را به خود اختصاص داده است و هر اقدامی برای افزایش عمر مفید این تجهیزات، سبب صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه‌های سیستم‌های الکتریکی خواهد شد و مانع از خروج بدون برنامه‌ریزی آنها از شبکه می‌گردد. طراحان ماشین‌های الکتریکی از حدود ۸۰ سال پیش علاقه‌مند به بررسی عوامل انواع خطاها و کاهش آنها بر روی ماشین‌های مورد طراحی خود بوده‌اند [۱]. شایع‌ترین خطا در ساختار عایقی ماشین‌های الکتریکی، خرابی عایق بین دوره‌های سیم‌پیچ است که ناشی از اضافه ولتاژهای فرکانس بالا می‌باشد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.akbari@iauyazd.ac.ir

۱. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

^۴ Partial Discharge

مدل FEM-RLC^۴ را جهت مطالعه در حالت‌های گذرای سریع ارائه کردند.

در ادامه، با توجه به اهمیت کارکرد بدون وقفه ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های قدرت، شناسایی خطاهای این تجهیزات کلیدی از جمله تخلیه جزئی بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفت. زیرا ماشین‌های الکتریکی به عنوان تجهیزات اصلی سیستم‌های قدرت الکتریکی، شدیداً به یکپارچه بودن عایق سیم‌پیچ‌های استاتور وابسته هستند [۲۶-۲۷]. تکنیک‌های عملی اندازه‌گیری تخلیه-جزئی بر روی ماشین‌های دوار ولتاژ بالا از سال ۱۹۷۰ توسط هارولد و همکاران [۲۸]، چرچیل و همکاران [۲۹] و لایلز و همکاران [۳۰] توسعه پیدا کرد. از جمله روش‌های پایه برای اندازه‌گیری و مکانیابی تخلیه جزئی در ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا، استفاده از مدل‌های فرکانس بالای ماشین‌های الکتریکی و تجزیه و تحلیل جریانی آنها است [۳۱-۳۴]. ذابی و همکاران [۳۵] به روش المان محدود، به آنالیز خطاهای رتور و استاتور در ماشین‌های الکتریکی پرداختند. زیرا این روش اطلاعات بیشتری را در مقایسه با مدل‌های تحلیلی کلاسیک در اختیار قرار می‌دهد. آنالیزها با استفاده از تبدیل فوریه سریع و تجزیه و تحلیل جریان استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در موتور انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده، به صحت و دقت این مدل اشاره می‌کند. لی و همکاران [۳۶] بررسی سه نوع از الگوهای تخلیه‌جزئی شامل تخلیه در شیار، تخلیه کرونا و تخلیه میله به میله بر روی سطحی از عایق موتورهای الکتریکی را، مورد مطالعه قرار دادند و آزمایشات خود را بر روی یک موتور ۱۰ کیلوولت انجام و پس از تحقیقات، اطلاعات اساسی از نظارت آنلاین و تشخیص خطا در موتور را ارائه کردند. ژانگ و همکاران [۳۷] در ارتباط با آشکارسازی تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور توربین بادی تحقیقی را ارائه کردند و با تحلیل ولتاژ القاء ضربه در امتداد سیم‌پیچ‌های سری و سیم‌پیچ‌های مجاور، نشان دادند که توسط سنسور فرکانس بالای جریان، می‌توان به تشخیص پدیده تخلیه‌جزئی و خطای عایقی دست پیدا کرد. عایق موتورهای الکتریکی تحت تاثیر شرایط محیطی (فشار هوا، رطوبت و دما) می‌تواند دچار تنش و ایجاد تخلیه‌جزئی در عایق گردد

کدام از این روش‌ها دارند نمی‌توان توسط آنها به مکان دقیق وقوع تخلیه‌جزئی رسید بنابراین این روش‌ها نیازمند به بهبود مدل‌سازی دارند. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی سیم‌پیچ تجهیزات فشار قوی با هدف تحلیل و بررسی چگونگی انتشار سیگنال‌های تخلیه‌جزئی صورت پذیرفته است [۱۵]. با توجه به این بررسی‌ها، می‌توان چهار روش عمده برای مدل‌سازی سیم‌پیچ را به صورت مدل توابع تبدیل داخلی سیم‌پیچ [۱۶]، مدل امواج سیار سیم‌پیچ [۱۷]، مدل خط انتقال چند سیمه سیم‌پیچ [۱۸] و مدل مشروح سیم‌پیچ [۱۹] را نام برد. از بین این مدل‌ها، معمولاً استفاده از مدل مشروح و مدل خط انتقال چند سیمه به دلیل بازه فرکانسی کیلوهرتز تا چند مگاهرتز، کاربرد بیشتری در مکانیابی تخلیه‌جزئی تجهیزات الکتریکی ولتاژ بالا، خصوصاً ترانسفورماتورهای قدرت دارند.

معمولاً سیم‌پیچ‌های تجهیزات فشار قوی، توسط مدل‌های گذرای مناسب شبیه‌سازی می‌گردند. بنابراین با استفاده از مدار معادل الکتریکی گذرای سریع و بسیار سریع در این تجهیزات کلیدی، می‌توان پدیده‌های گذرا، خطاها و تخلیه جزئی را با روش آنالیز جریان خروجی تحلیل کرد [۲۰-۲۱]. لذا جعفری و همکاران [۲۲] مکان تخلیه‌جزئی 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. در ادامه، جی بالان و همکارش [۲۳] 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 تخلیه به دست آمده را با مکان واقعی آن مقایسه و تحلیل کردند. حسینی و همکارش [۲۴] از مدل خط انتقال چند سیمه به عنوان مدلی برتر در مطالعات تخلیه‌جزئی، استفاده کردند و پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور قدرت را به کمک FEM^۱ تعیین نمودند. با محاسبه پارامترهای ترانسفورماتور قدرت به روش FEM و استفاده از روش آنالیز جریانی سیم‌پیچی که به روش MTL^۲ مدل شده بود به نتایج قابل قبولی رسیدند. حسینی بافقی و همکاران [۲۵] با ارتباط دادن مدل مداری RLC^۳ و ناحیه المان محدود جهت مدل‌سازی یک ماشین‌القایی رتور قفس سنجایی،

^۳ RLC Ladder Network

^۴ Finite Element Method- RLC ladder network

^۱ Finite Element Method

^۲ Multi-conductor Transmission Line

تزیق می‌شود سپس معادلات میدانی، مداری و حرکتی ماشین الکتریکی ولتاژ بالا جمع بندی و در محدوده فرکانسی MHz مورد بررسی و آنالیز قرار می‌گیرد. معادلات مداری با عناصر الکتریکی خارج از ناحیه المان محدود و معادلات میدانی با ناحیه المان محدود در ارتباط هستند همچنین معادلات حرکتی نیز با توجه به تغییرات پتانسیل مغناطیسی نقاط تعیین شده در المان محدود، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در تجزیه و تحلیل ماشین های الکتریکی، برخی از مسائل عملی وجود دارند که در آنها معادلات مربوط به روش حساب تغییرات، شناخته شده نیست یا اینکه اصلاً وجود ندارد. بنابراین در این مواقع باید از روش گالرکین که خود حالت خاصی از روش باقی مانده های موزون است و عمومیت بیشتری دارد استفاده نمود. روش گالرکین برای تقریب زدن معادله‌های میدان و جریان در فضای تقسیم شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این روش سبب می‌شود که عمل صفر کردن باقی مانده به صورت نقطه به نقطه انجام گردد تا مربع خطای باقی مانده حداقل شود. بنابراین در این روش سعی گردیده که مقدار خطای باقی مانده وزن دار حداقل گردد تا نتایج از دقت بالایی برخوردار باشد. لازم به ذکر است که در این مدل سازی، پالس جریانی تخلیه جزئی با روش گالرکین فرمول بندی و سپس در یک بازه زمانی گسسته سازی و خطی سازی می‌شود. در ادامه این معادلات در یک سیستم نهایی جمع بندی و از فرکانس های روزنانس سری برای تخمین و تعیین مکان تخلیه جزئی تزیق شده، استفاده می‌شود.

بنابراین نوآوری این مقاله، مکانیابی تخلیه جزئی با در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت هر دور از سیم پیچ در مدل سازی و شبیه سازی است. ضمن اینکه مکانیابی با در نظر گرفتن اثرات هسته، اندوکتانس های متقابل و مؤلفه فرکانسی تخلیه جزئی در محدوده اعتبار مدل انجام شده است تا با قابلیت بخشیدن به روش المان محدود و افزایش اعتبار فرکانسی مدل، در جهت مکانیابی تخلیه جزئی به روش آنالیز جریانی بهبود حاصل گردد. در این تحقیق، محل تخلیه جزئی توسط تعداد گره هر دور از سیم پیچ مشخص می‌شود بنابراین قبل از اینکه عایق سیم پیچ به شکست کامل برسد می‌توان با استفاده از اطلاعات مکانیابی نسبت به شناسایی، تعویض یا ترمیم کوپل اقدام گردد. ضمن اینکه، این روش بر مبنای آنالیز جریانی است و

و این تخلیه های جزئی، به مرور زمان منجر به شکست کامل عایق در تجهیزات می‌گردد لذا ونگ و همکاران [۳۸] برای بررسی این عوامل از روش المان محدود جهت شبیه سازی میدان الکتریکی و توزیع دما در استاتور استفاده کردند تا تأثیر حفره و لایه لایه شدن عایق را بر روی اعوجاج میدان الکتریکی مورد تحلیل قرار دهند.

در سیم پیچ ماشین های الکتریکی ولتاژ بالا به دلیل وجود خازن های الکتریکی نشتی و اندوکتانس سیم پیچ، رفتارهای نوسانی و گذرا بروز می‌کند. این نوسانات گذرا، توسط عوامل مختلف موجود در ماشین های الکتریکی و در شبکه ایجاد می‌گردند. بنابراین به دلیل وجود تنش های شدید و ایجاد حالت های گذرای سریع، بررسی نحوه توزیع ولتاژ گذرا در ماشین های الکتریکی اهمیت دارد. با توجه به اینکه تخلیه جزئی دارای مؤلفه های فرکانسی کیلوهرتز تا مگاهرتز می‌باشد بنابراین برای مکانیابی تخلیه جزئی در سیم پیچ، لازم است از مدل هایی استفاده شود که محدوده فرکانسی آنها در محدوده فرکانسی رخداد تخلیه جزئی باشد [۳۹-۴۰].

بررسی تحقیقات انجام شده اخیر در زمینه مدل سازی ماشین های الکتریکی به روش المان محدود، نشان می‌دهد که اگر از مدل های فرکانس پایین، برای مکانیابی تخلیه های جزئی با مؤلفه فرکانسی بالا استفاده شود نتیجه مکانیابی تخلیه جزئی در سیم پیچ ماشین الکتریکی با درصدی خطا تعیین خواهند شد. زیرا در مکانیابی تخلیه جزئی به روش آنالیز مداری، با این که پارامترهای مدار معادل سیم پیچ، به روش المان محدود محاسبه می‌گردد اما مکانیابی ها، به کمک آنالیز جریانی و طیف فرکانسی در نرم افزارهای تحلیل مدارهای الکتریکی صورت می‌پذیرد و دلیل آن هم پایین بودن بازه فرکانسی در مدل های تحلیل ماشین الکتریکی به روش المان محدود است زیرا واحد محاسباتی در این مدل ها، به صورت هر فاز از ماشین الکتریکی می‌باشد بنابراین طیف فرکانسی این مدل سازی ها در محدوده فرکانس های تخلیه جزئی نیست. این امر نشان می‌دهد که در مدل سازی، اعتبار فرکانسی مدل جهت تعیین مکان صحیح تخلیه جزئی مهم باشد. بنابراین جهت مکانیابی تخلیه جزئی با روش آنالیز جریانی و به کمک مدل های مداری، اولاً مدل سازی ها به روش المان محدود نبوده و ثانیاً مدل های مداری دارای نواقصی از جمله در نظر نگرفتن اثر هسته و اندوکتانس متقابل سیم پیچ می‌باشند.

در این مقاله، پالس تخلیه جزئی به یکی از دوره های سیم پیچ

المان محدود، A پتانسیل مغناطیسی، σ رسانایی الکتریکی، L برای مسائل دو بعدی طول مسئله در جهت Z و t زمان می‌باشد. شکل (۱) اتصال سری هادی‌ها را برای تشکیل یک کوئل نشان می‌دهد که در آن معنای فیزیکی V_b به نمایش گذاشته شده است.

به منظور ارتباط دادن معادلات مداری و میدانی و به دلیل وجود جریان نشتی در شاخه $C_i \Delta x_s$ ، لازم است تا جریان هر هادی در هر مسئله محاسبه شود که این جریان با انتگرال گیری از چگالی جریان بر روی سطح مقطع هر هادی i مطابق با رابطه (۲) به دست می‌آید [۵].

$$I_{bi} = \iint_{conductor} \left(\sigma \frac{V_{bi}}{\ell} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right) dx dy \quad (2)$$

در ماشین الکتریکی تعدادی میله، (b_1, b_2, \dots, b_n) ممکن است به صورت سری به هم وصل شوند تا یک سیم‌پیچ ایجاد شود. دو سر میله‌ها از ناحیه المان محدود خارج می‌شوند و به مدار MTL وصل می‌شوند. جریان همه میله‌ها به دلیل جریان نشتی در $C_i \Delta x_s$ ، که با انتگرال گیری از رابطه چگالی جریان بر سطح مقطع هادی حاصل می‌شود، متفاوت خواهد بود. از روش گالرکین برای تقریب میدان و جریان معادلات در فضای گسسته استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۱)، معادله مدارهای خارجی و ناحیه المان محدود که از طریق جریان مرتبط می‌شوند، در رابطه (۳) بیان شده است.

$$V_s(x_{total}, t) = [R_i \Delta x_i]_{1 \times n} \{I(x_i, t)\}_{n \times 1} + [L_i \Delta x_i]_{1 \times n} \times \left\{ \frac{\partial I(x_i, t)}{\partial t} \right\}_{n \times 1} + [D]_{1 \times n} \{V_{bi}\}_{n \times 1} \quad (3)$$

پس از گسسته‌سازی و خطی‌سازی رابطه (۳) به روش نیوتن افسون [۵] خواهیم داشت:

می‌توان آن را در ماشین‌های الکتریکی واقعی عملیاتی کرد. در مکانیابی تخلیه جزئی، با توجه به اینکه اعتبار فرکانسی مدل کلاسیک، در محدوده طیف فرکانسی تخلیه جزئی نیست لذا تخمین مکانیابی‌ها همواره با درصدی خطا همراه است. اما تخمین مکانیابی‌ها به روش المان محدود و با استفاده از آنالیز جریان گرفته شده از مدل پیشنهادی FEM-MTL^۱، سبب می‌شود که مکانیابی، به محل واقعی تخلیه جزئی بسیار نزدیکتر باشد. در نهایت جهت صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، مکانیابی‌ها به کمک دو مدل، کلاسیک MTL و مدل FEM-MTL به مقایسه گذاشته می‌شود.

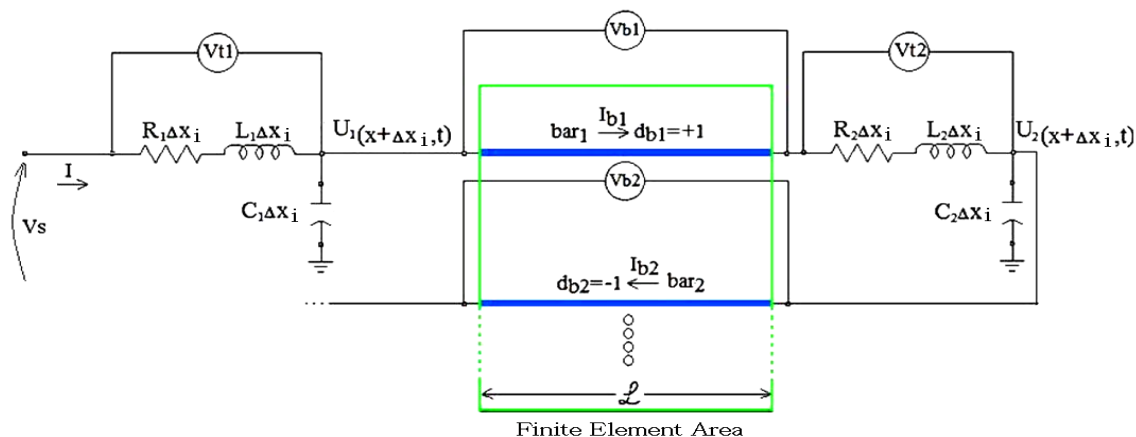
۲- مدل گذرای بسیار سریع ماشین‌های

الکتریکی برای آشکار سازی تخلیه جزئی

وجود مدل‌های مناسب که به کمک آن‌ها بتوان رفتار پدیده‌های فرکانسی بالا و نحوه انتشار و بروز اضافه ولتاژهای گذرا را در تجهیزات فشار قوی بررسی نمود امری ضروری است. لذا در این بخش جهت بررسی مدل گذرای بسیار سریع مناسب جهت مکانیابی تخلیه جزئی، نظریه میدان الکترومغناطیسی، تئوری مدار الکتریکی و نظریه اساسی حرکت مکانیکی ارائه شده است. معادله ساده انتشار مغناطیسی دوبعدی وابسته به زمان توسط رابطه (۱) بیان می‌شود [۵، ۴۱].

$$\begin{cases} \nabla \times \nabla \times A = J \\ J = \sigma \frac{V_b}{L} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \end{cases} \Rightarrow \nabla \times \nabla \times A = \sigma \frac{V_b}{L} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه (۱) J چگالی جریان، v عکس نفوذ پذیری، V_b ولتاژ دو سر هادی‌های مدل شده به صورت میله در ناحیه



شکل ۱- اتصال سری هادی‌ها برای تشکیل یک سیم‌پیچ با مدار معادل الکتریکی برای هر دور

¹ Finite Element Method- Multi-conductor Transmission Line

$$\begin{aligned}
& (-\beta\Delta t [R_i \Delta x_i]_{l \times n} - [L_i \Delta x_i]_{l \times n}) \{ \Delta I(x_i, t) \}_{c, k+1, n \times 1}^{t+\Delta t} - \beta\Delta t [D]_{l \times n} \{ \Delta V_{bi} \}_{c, k+1, n \times 1}^{t+\Delta t} = -\beta\Delta t \Delta V_s(x_{total}, t)_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \\
& (\beta\Delta t [R_i \Delta x_i]_{l \times n} + [L_i \Delta x_i]_{l \times n}) \{ I(x_i, t) \}_{c, k, n \times 1}^{t+\Delta t} + \beta\Delta t [D]_{l \times n} \{ V_{bi} \}_{c, k, n \times 1}^{t+\Delta t} + ((1-\beta)\Delta t [R_i \Delta x_i]_{l \times n} - [L_i \Delta x_i]_{l \times n}) \times \\
& \{ I(x_i, t) \}_{n \times 1}^t + (1-\beta)\Delta t [D]_{l \times n} \{ V_{bi} \}_{n \times 1}^t - (1-\beta)\Delta t V_s(x_{total}, t)^t
\end{aligned} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) پارامتر $V_s^{t+\Delta t}$ یک کمیت معلوم است زیرا ولتاژ منبع خارجی می‌باشد. $\{D\}$ ماتریس بردار ستونی با عناصر +1 یا -1 بوده و جهت قطبیت هر میله b را نشان می‌دهد. $\{1\}$ ماتریس بردار ستونی با عناصر واحد، $\{V_{bi}\}_c = \{V_{b1}, V_{b2}, \dots, V_{bn}\}$ و $\{V_{ti}\}_c = \{V_{t1}, V_{t2}, \dots, V_{tn}\}$ می‌باشد و β مقدار ثابت در گسسته‌سازی زمانی است و از نوع تفاضل جلو رونده ($\beta = 0$)، تفاضل عقب رونده ($\beta = 1$) و یا از نوع میانی است ($0 < \beta < 1$). معادله انتشار میدان مغناطیسی با فرمول‌بندی گالرکین برابر با رابطه (۵) است [۵].

در رابطه (۴) پارامتر $V_s^{t+\Delta t}$ یک کمیت معلوم است زیرا ولتاژ منبع خارجی می‌باشد. $\{D\}$ ماتریس بردار ستونی با عناصر +1 یا -1 بوده و جهت قطبیت هر میله b را نشان می‌دهد. $\{1\}$ ماتریس بردار ستونی با عناصر واحد، $\{V_{bi}\}_c = \{V_{b1}, V_{b2}, \dots, V_{bn}\}$ و $\{V_{ti}\}_c = \{V_{t1}, V_{t2}, \dots, V_{tn}\}$ می‌باشد و β مقدار ثابت در گسسته‌سازی زمانی است و از نوع تفاضل جلو رونده ($\beta = 0$)، تفاضل عقب رونده ($\beta = 1$) و یا از نوع میانی است ($0 < \beta < 1$). معادله انتشار میدان مغناطیسی با فرمول‌بندی گالرکین برابر با رابطه (۵) است [۵].

$$v[S] \{A(t)\} + \sigma[T] \left\{ \frac{\partial A(t)}{\partial t} \right\} - \sigma\{Q\} \frac{V_{bi}}{\ell} = 0 \quad (۵)$$

در تجزیه و تحلیل ماشین‌های الکتریکی، به دلیل وجود مواد فرو مغناطیس اغلب مسائل به فرم غیر خطی خواهند گردند. بنابراین با گسسته‌سازی زمانی و خطی‌سازی رابطه (۵) خواهیم داشت [۵]:

در مدل‌سازی ماشین‌های دوار الکتریکی اجزای متحرک نیز وجود دارد که نیروهای مغناطیسی، موقعیت این عناصر را تقریباً مشخص می‌کنند و این موقعیت‌ها در هر لحظه از زمان بر میدان مغناطیسی داخل دستگاه تأثیر می‌گذارد. در این مدل‌سازی، لازم است که معادلات حرکت با معادلات میدان در FEM ترکیب شود معادله حرکت با استفاده از فرمول‌بندی گالرکین به صورت رابطه (۸) بیان شده است [۵، ۲۵].

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} + \lambda v = F_{em} - F_{ext} \\ v = \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (۸)$$

حاصل گسسته‌سازی و خطی‌سازی رابطه (۸)، می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned}
& \left[[H] + \frac{\sigma[T]}{\beta\Delta t} \right] \{ \Delta A \}_{k+1}^{t+\Delta t} - \frac{\sigma}{\ell} \{ Q \} \{ \Delta V_{bi} \}_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \\
& v_k^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial S}{\partial \theta} \right] \times \{ A \}_k^{t+\Delta t} \{ \Delta \theta \}_{k+1}^{t+\Delta t} = \\
& - \left[v_k^{t+\Delta t} [S]_k^{t+\Delta t} + \frac{\sigma[T]}{\beta\Delta t} \right] \{ A \}_k^{t+\Delta t} + \\
& \left[\frac{\sigma[T]}{\beta\Delta t} - \frac{1-\beta}{\beta} v^t [S]^t \right] \times \{ A \}_k^t + \frac{\sigma}{\ell} \{ Q \} \frac{1-\beta}{\beta} \{ V_{bi} \}_k^t
\end{aligned} \quad (۹)$$

در رابطه‌های (۸) و (۹) m جرم، v سرعت، λ ضریب میرایی، F_{em} نیروی الکترومغناطیسی و F_{ext} نیروی مکانیکی خارجی اعمالی است همچنین متغیرهای W و P نیز با توجه به رابطه (۱۰) به دست می‌آیند [۵].

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_{em}}{\partial \theta} &= -\frac{1}{2} v \ell \{ A \}^T \left[\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} \right] \{ A \} = -P \\
\frac{\partial F_{em}}{\partial A} &= -v \ell \{ A \}^T \left[\frac{\partial S}{\partial \theta} \right] = -\{ W \}^T \ell
\end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned}
& \ell \{ W \}^T \{ \Delta A \}_{k+1}^{t+\Delta t} + \left(\frac{\lambda}{\beta\Delta t} + \frac{m}{(\beta\Delta t)^2} + P \right) \times \\
& \{ \Delta \theta \}_{k+1}^{t+\Delta t} = -\frac{1}{2\beta} \ell \{ W \}^T \{ A \}_k^{t+\Delta t} + \\
& \left(-\frac{\beta\lambda}{\Delta t} - \frac{m}{(\beta\Delta t)^2} \right) \theta_k^{t+\Delta t} + \frac{m}{\beta^2 \Delta t} v^t + \\
& \left(\frac{\lambda}{\beta\Delta t} + \frac{m}{(\beta\Delta t)^2} \right) \theta^t + \frac{1-\beta}{\beta} F_{em}^t - \\
& \frac{1-\beta}{\beta} F_{ext}^t - F_{ext}^{t+\Delta t}
\end{aligned} \quad (۶)$$

همچنین ماتریس $[H]$ برابر است با [۵]:

$$\begin{aligned}
[H] &= v_k^{t+\Delta t} [S]_k^{t+\Delta t} + \frac{2}{\Delta} \left(\frac{\partial v}{\partial B^2} \right) \times \\
& \left([S]_k^{t+\Delta t} \{ A \}_k^{t+\Delta t} \right) \left([S]_k^{t+\Delta t} \{ A \}_k^{t+\Delta t} \right)^T
\end{aligned} \quad (۷)$$

در رابطه‌های (۵)، (۶) و (۷)، برای عنصر مثلثی شکل مرتبه اول در آنالیز المان محدود با فرض به اینکه نامگذاری راس‌ها بر خلاف حرکت عقربه‌های ساعت باشد $[S]$ ماتریس سختی، $[T]$ ماتریس جرم،

رابطه (۹) از طریق پتانسیل برداری مغناطیسی A با ناحیه المان محدود در ارتباط است زیرا A به صورت ضمنی در F_{em} موجود است. بنابراین معادله جریان کل در رابطه‌ی (۱۱) ارائه شده است [۵].

$$[D_{ii}] \{I_{bi}\}_c = \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right] \{ \Delta V_{bi} \}_c - [\sigma Q]_c^T \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}_c \{V_{bi}\}_c + (1-\beta) \times \Delta t [D_{ii}] \{I_{bi}\}_c^t \quad (11)$$

با گسسته سازی زمانی و خطی سازی رابطه (۱۱) خواهیم داشت [۵]:

$$-[\sigma Q]_c^T \{ \Delta A \}_{k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right] \times \{ \Delta V_{bi} \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t [D_{ii}] \{ \Delta I_{bi} \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} = [\sigma Q]_c^T \{ A \}_k^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right] \{ V_{bi} \}_{c,k}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t [D_{ii}] \{ I_{bi} \}_{c,k}^{t+\Delta t} - [\sigma Q]_c^T \{ A \}_c^t - (1-\beta) \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right] \{ V_{bi} \}_c^t + (1-\beta) \times \Delta t [D_{ii}] \{ I_{bi} \}_c^t \quad (12)$$

با توجه به قوانین جریان در هر گره، رابطه‌ی (۱۳) را داریم.

$$\{ I(x_i, t) \}_{n \times 1} - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \times \left\{ \frac{\partial U(x + \Delta x_i, t)}{\partial t} \right\}_{n \times 1} = \{ I(x + \Delta x_i, t) \}_{n \times 1} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) پس از گسسته‌سازی زمانی و خطی‌سازی برابر است با:

$$-\beta \Delta t \{ \Delta I(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{ \Delta I(x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ \Delta U(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} = \beta \Delta t \{ I(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{ I(x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ U(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \Delta t \{ I(x + \Delta x_i, t) \}_{n \times 1}^t - (1-\beta) \Delta t \{ I(x_i, t) \}_{n \times 1}^t - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ U(x + \Delta x_i, t) \}_{n \times 1}^t \quad (14)$$

بنابراین، رابطه (۱۵) را خواهیم داشت.

$$\{ I(x_i, t) \}_{n \times 1} = [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \left\{ \frac{\partial U(x + \Delta x_i, t)}{\partial t} \right\}_{n \times 1} + [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \{ V_{bi} \}_{n \times 1} - [D_{ii}]_{n \times n} \times [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \times \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}_{n \times 1} \quad (15)$$

حاصل گسسته‌سازی و خطی‌سازی رابطه (۱۵) می‌شود:

$$-\beta \Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \{ \Delta V_{bi} \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{ \Delta I(x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ \Delta U(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - [D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \{ \Delta A \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} = \beta \Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \times \{ V_{bi} \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{ I(x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ U(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + [D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \{ A \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \{ V_{bi} \}_{n \times 1}^t - (1-\beta) \Delta t \{ I(x_i, t) \}_{n \times 1}^t - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{ U(x + \Delta x_i, t) \}_{n \times 1}^t - [D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \{ A \}_{n \times 1}^t \quad (16)$$

(۱۷) به عنوان معادله کمکی به سیستم اضافه شود:

$$[1]_{n \times n} \{ \Delta I_{bi} \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} - [1]_{n \times n} \times \{ \Delta I(x + \Delta x_i, t) \}_{c,k+1}^{t+\Delta t} = \{ 0 \} \quad (17)$$

جریان خروجی از هر مدار MTL برابر است با جریان هر میله در ناحیه المان محدود، لذا این امکان وجود دارد که رابطه

با اضافه کردن رابطه (۱۷) به سیستم و در نظر گرفتن معادلات (۴)، (۶)، (۹)، (۱۲)، (۱۴)، (۱۶) و (۱۷)، می‌توان هفت بردار مجهول را توسط ماتریس سیستم نهایی ارائه شده در رابطه‌ی (۱۸) به دست آورد.

جهت تشکیل ماتریس نهایی سیستم به معادله میدان، معادله جریان کل، معادله متشکل از میله‌های سری، معادله شتاب و سرعت مکانیکی، معادله جریان‌های مداری در هر گره، معادله جریان‌های مداری و میدانی و معادله کمکی جهت تشکیل هفت معادله و هفت مجهول نیاز هست. لذا

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} & M_{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & M_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{42} & M_{43} & 0 & M_{45} & 0 & 0 \\ M_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{56} & M_{57} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & 0 & 0 & 0 & M_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{75} & M_{76} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{\Delta I(x_i, t)\} \\ \{\Delta V_{bi}\} \\ \{\Delta A\} \\ \{\Delta \theta\} \\ \{\Delta I_{bi}\} \\ \{\Delta I(x_i + \Delta x_i, t)\} \\ \{\Delta U(x_i + \Delta x_i, t)\}_{k+l} \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \{N_1\} \\ \{N_2\} \\ \{N_3\} \\ \{N_4\} \\ \{N_5\} \\ \{N_6\} \\ \{N_7\} \end{bmatrix} \quad (18)$$

ضرایب ماتریس رابطه (۱۸) به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{cases} M_{11} = (-\beta \Delta t [R_i \Delta x_i]_{I \times n} - [L_i \Delta x_i]_{I \times n}) \\ M_{12} = -\beta \Delta t [D]_{I \times n} \\ M_{22} = -\frac{\sigma}{\ell} \{Q\} \\ M_{23} = \left[[H] + \frac{\sigma [T]}{\beta \Delta t} \right] \end{cases} \quad \begin{cases} M_{24} = v_k^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial S}{\partial \theta} \right] \{A\}_k^{t+\Delta t} \\ M_{33} = L \{W\}^T \\ M_{34} = \left(\frac{\lambda}{\beta \Delta t} + \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} + P \right) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} M_{42} = \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} A_{bi} \right] \\ M_{43} = -[\sigma Q]_c^T \\ M_{45} = -\beta \Delta t [D_{ii}] \\ M_{51} = -M_{56} = M_{61} = \beta \Delta t \end{cases} \quad \begin{cases} M_{57} = M_{67} = -[C_i \Delta x_i]_{n \times n} \\ M_{62} = -\beta \Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \\ M_{63} = -[D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C \times n}^T \\ M_{75} = -M_{76} = [I]_{n \times n} \end{cases} \quad (19)$$

بردارهای N_1 الی N_7 رابطه (۱۸) نیز عبارتند از:

$$\begin{aligned} \{N_1\} &= -\beta \Delta t \Delta V s(x_{total}, t)_{c, k+l}^{t+\Delta t} + (\beta \Delta t [R_i \Delta x_i]_{I \times n} + [L_i \Delta x_i]_{I \times n}) \{I(x_i, t)\}_{c, k+n \times l}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t [D]_{I \times n} \{V_{bi}\}_{c, k+n \times l}^{t+\Delta t} + \\ &((1-\beta) \Delta t \times [R_i \Delta x_i]_{I \times n} - [L_i \Delta x_i]_{I \times n}) \{I(x_i, t)\}_{n \times l}^t + (1-\beta) \Delta t [D]_{I \times n} \{V_{bi}\}_{n \times l}^t - (1-\beta) \Delta t V s(x_{total}, t)^t \\ \{N_2\} &= -\left[v_k^{t+\Delta t} [S]_k^{t+\Delta t} + \frac{\sigma [T]}{\beta \Delta t} \right] \{A\}_k^{t+\Delta t} + \left[\frac{\sigma [T]}{\beta \Delta t} - \frac{1-\beta}{\beta} v^t [S]^t \right] \{A\}_k^t + \frac{\sigma}{\ell} \{Q\} \frac{1-\beta}{\beta} \{V_{bi}\}_k^t \\ \{N_3\} &= -\frac{1}{2\beta} L \{W\}^T \{A\}_k^{t+\Delta t} + \left(-\frac{\beta \lambda}{\Delta t} - \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} \right) \theta_k^{t+\Delta t} + \frac{m}{\beta^2 \Delta t} v^t + \left(\frac{\lambda}{\beta \Delta t} + \frac{m}{(\beta \Delta t)^2} \right) \theta^t + \frac{1-\beta}{\beta} F_{em}^t - \\ &\frac{1-\beta}{\beta} F_{ext}^t - F_{ext}^{t+\Delta t} \\ \{N_4\} &= [\sigma Q]_c^T \{A\}_k^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} A_{bi} \right] \{V_{bi}\}_{c, k}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t [D_{ii}] \{I_{bi}\}_{c, k}^{t+\Delta t} - [\sigma Q]_c^T \{A\}_k^t - (1-\beta) \Delta t \left[\frac{\sigma}{\ell} A_{bi} \right] \{V_{bi}\}_c^t + \\ &(1-\beta) \Delta t [D_{ii}] \{I_{bi}\}_c^t \\ \{N_5\} &= \beta \Delta t \{I(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k+n \times l}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k+n \times l}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k+l \times n \times l}^{t+\Delta t} + \\ &(1-\beta) \Delta t \{I(x + \Delta x_i, t)\}_{n \times l}^t - (1-\beta) \Delta t \{I(x_i, t)\}_{n \times l}^t - [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{n \times l}^t \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \{N_6\} &= \beta\Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \{V_{bi}\}_{c, k \times l}^{t+\Delta t} - \beta\Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k \times l}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k \times l}^{t+\Delta t} + \\ & [D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \{A\}_{c, k \times l}^{t+\Delta t} + (1 - \beta)\Delta t [D_{ii}]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta_{bi} \right]_{n \times n} \{V_{bi}\}_{n \times l}^t - (1 - \beta)\Delta t \{I(x_i, t)\}_{n \times l}^t - \\ & [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{n \times l}^t - [D_{ii}]_{n \times n} [\sigma Q]_{C_{n \times n}}^T \{A\}_{n \times l}^t \\ \{N_7\} &= \{0\} \end{aligned}$$

المان محدود به جریان هر میله اضافه شده و در ماتریس نهایی سیستم شناسایی می‌شود.

شکل (۲) تزریق پالس جریانی PD به مدل FEM-MTL حالت گذرای بسیار سریع ماشین الکتریکی را نشان می‌دهد. در مرحله شبیه‌سازی برای یافتن منبع تخلیه جزئی، پالس جریانی تخلیه باید به نقاط مختلف سیم‌پیچ تزریق گردد و پالس IPD نیز به معادلات اضافه شود. مقدار بار الکتریکی q توسط رابطه‌ی (۲۱) و طیف فرکانسی F(ω) سیگنال تخلیه جزئی، توسط رابطه‌ی (۲۲) می‌تواند محاسبه شود.

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (21)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (22)$$

جهت استفاده از مدل MTL در آنالیز المان محدود و با هدف مکانیابی PD، اگر فرض شود یک پالس PD در دور i ام از سیم‌پیچ رخ داده باشد معادلات جریانی گره‌ها به صورت روابط (۲۵) و (۲۸) تغییر می‌کند. در رابطه (۲۳) معادله پایه تزریق پالس PD به گره، برابر است با:

$$\{I(x_i, t)\}_{n \times l} + \{I_{pdi}\}_{n \times l} = [C_i \Delta x_i]_{n \times n} \times \left\{ \frac{\partial U_i(x + \Delta x_i, t)}{\partial t} \right\} + \{I(x_i + \Delta x_i, t)\}_{n \times l} \quad (23)$$

با گسسته سازی داریم:

$$\begin{aligned} \beta\Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \beta\Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - \beta\Delta t \{I(x_i + \Delta x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i] \{U_i(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} = \\ -(1 - \beta)\Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^t - (1 - \beta)\Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^t + (1 - \beta)\Delta t \{I(x_i + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^t - [C_i \Delta x_i] \{U_i(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^t \end{aligned} \quad (24)$$

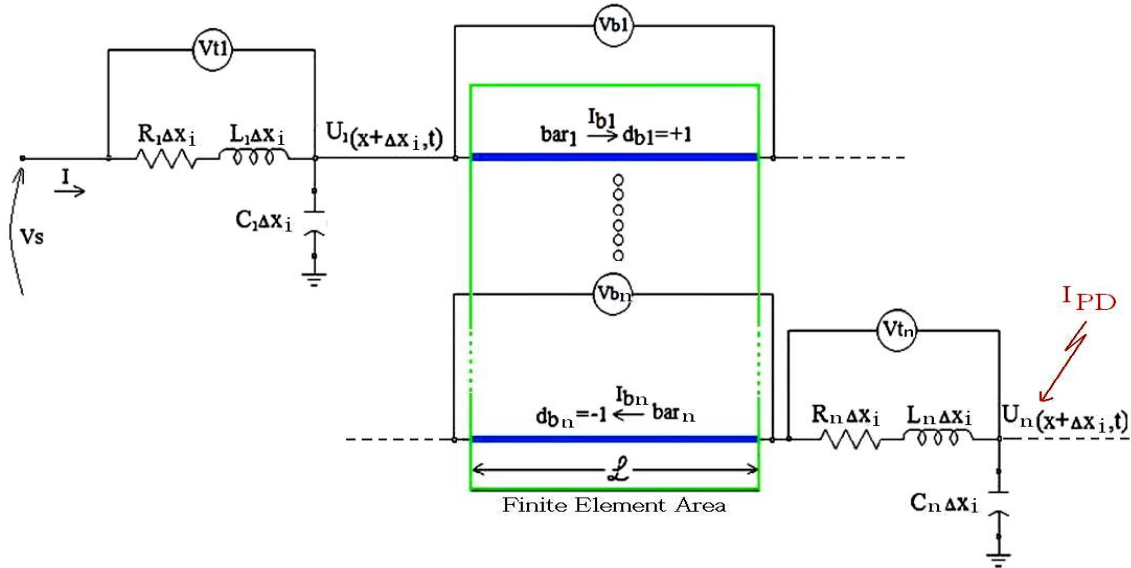
و با خطی سازی داریم:

$$\begin{aligned} \beta\Delta t \{\Delta I(x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \beta\Delta t \{\Delta I_{pdi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - \beta\Delta t \{\Delta I(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i] \{\Delta U(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} = \\ -\beta\Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^{t+\Delta t} - \beta\Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^{t+\Delta t} + \beta\Delta t \{I(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i] \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^{t+\Delta t} - \\ (1 - \beta) \times \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^t - (1 - \beta)\Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^t + (1 - \beta)\Delta t \{I(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^t - [C_i \Delta x_i] \{U(x + \Delta x_i, t)\}_{c, k}^t \end{aligned} \quad (25)$$

استفاده از روش‌های عناصر محدود با هدف محاسبه پارامترهای مدل فرکانس بالای ماشین الکتریکی موجب شده است تا مکانیابی‌ها دقت مطلوب‌تری به خود گیرند. در فرآیند تحلیل ماشین‌های الکتریکی به روش عناصر محدود، به چگالی جریان به عنوان یک ورودی شناخته شده نیاز است و این آنالیزها و مکانیابی‌ها به کمک نرم‌افزارهای تحلیل مداری صورت می‌گیرد [۲۴، ۳۵، ۴۲-۴۴].

۳- آشکارسازی PD

مدل‌سازی ماشین الکتریکی در حوزه فرکانس سبب می‌شود که بتوان آن را در حوزه زمان نیز مورد تحلیل و پردازش قرار داد. زیرا پاسخ فرکانسی در حالت دائمی، می‌تواند به عنوان نقطه آغاز برای مسائل محاسباتی گذرای ماشین الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله، جهت مکانیابی تخلیه جزئی در عایق سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی از مدل حالت گذرای بسیار سریع استفاده شده است. ایده این روش، آشکارسازی و مکانیابی تخلیه جزئی بر اساس مدل فرکانس بسیار بالای FEM-MTL ماشین الکتریکی می‌باشد با این تفاوت که متناسب با اعتبار فرکانسی ماشین الکتریکی، پالس جریانی PD نیز به نقاط مختلف سیم‌پیچ تزریق می‌شود. بنابراین IPD نیز در آنالیز



شکل ۲- تزریق پالس جریانی PD به مدل FEM-MTL حالت گذرای بسیار سریع ماشین الکتریکی

جهت ارتباط معادلات جریان گره‌ها به همراه پالس PD با ناحیه المان محدود، رابطه (۲۶) را خواهیم داشت:

$$\{I(x_i, t)\}_{n \times 1} + \{I_{pdi}\}_{n \times 1} = [C_i \Delta x]_{n \times n} \times \left\{ \frac{\partial U_i(x + \Delta x, t)}{\partial t} \right\} + [D]_{n \times n} \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right]_{n \times n} \{V_{bi}\}_{n \times 1} - [D]_{n \times n} [\sigma Q]_{c, n \times n}^T \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}_{n \times n} \quad (26)$$

با گسسته سازی داریم:

$$\beta \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t [D_{ii}] \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right] \{V_{bi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i] \{U_i(x + \Delta x, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [D][\sigma Q]_c^T \{A\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} = -(1-\beta) \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^t - (1-\beta) \Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^t + (1-\beta) \Delta t [D_{ii}] \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right] \{V_{bi}\}_{c, k}^t - [C_i \Delta x_i] \{U_i(x + \Delta x, t)\}_{c, k}^t - [D][\sigma Q]_c^T \{A\}_{c, k}^t \quad (27)$$

نتیجه خطی سازی رابطه (۲۷) برابر است با:

$$\beta \Delta t \{\Delta I(x_i, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t \{\Delta I_{pdi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t [D_{ii}] \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right] \{\Delta V_{bi}\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [C_i \Delta x_i] \{\Delta U(x + \Delta x, t)\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} - [D][\sigma Q]_c^T \{\Delta A\}_{c, k+1}^{t+\Delta t} = -\beta \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^{t+\Delta t} + \beta \Delta t [D_{ii}] \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right] \{V_{bi}\}_{c, k}^{t+\Delta t} + [C_i \Delta x_i] \{U(x + \Delta x, t)\}_{c, k}^{t+\Delta t} + [D][\sigma Q]_c^T \{A\}_{c, k}^{t+\Delta t} - (1-\beta) \Delta t \{I(x_i, t)\}_{c, k}^t - (1-\beta) \Delta t \{I_{pdi}\}_{c, k}^t + (1-\beta) \Delta t [D_{ii}] \left[\frac{\sigma}{\ell} \Delta b_i \right] \{V_{bi}\}_{c, k}^t - [C_i \Delta x_i] \{U(x + \Delta x, t)\}_{c, k}^t - [D][\sigma Q]_c^T \{A\}_{c, k}^t \quad (28)$$

درون آن را نشان می‌دهد. در این مدار اگر ولتاژ U_i اعمالی طوری افزایش یابد که گرادیان میدان در حفره شدیداً افزایش یابد. به سبب تفاوت موجود در ضرایب دی‌الکتریک عایق و گاز موجود در حفره، می‌تواند باعث بروز تخلیه‌های

در اینجا $I_{pdi} = \{0, \dots, I_{pdi}, \dots, 0\}$ می‌باشد. برای اینکه بتوان تخلیه جزئی را مدل‌سازی کرد باید عایق جامد و حفره موجود در آن را به صورت ترکیبی از خازن‌ها معادل‌سازی کرد. شکل (۳) مدار معادل عایق جامد و حفره

$$[k_c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & C_c & \vdots & \vdots \\ & & 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{h} - 1\right) & & \\ 0 & 0 & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۳۲)$$

معادله جریان تخلیه جزئی با توجه به ضخامت عایق و حفره بعد از گسسته‌سازی برابر با رابطه (۳۳) خواهد بود.

$$[k_c] \{ \Delta U_i \}_{c,k+l}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{ \Delta I_{pdi} \}_{c,k+l}^{t+\Delta t} = \beta \Delta t \{ I_{pdi} \}_{c,k}^{t+\Delta t} - \quad (۳۳)$$

$$[k_c] \{ U_i \}_{c,k}^{t+\Delta t} + (1 - \beta) \Delta t \{ I_{pdi} \}^t + [k_c] \{ U_i \}^t$$

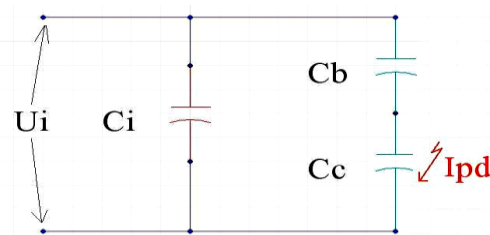
تشکیل معادلات (۱) الی (۱۸) جهت رسیدن به مجهولات ذکر شده در حالت کارکرد عادی ماشین الکتریکی و زمانی که تزریق پالس تخلیه جزئی در مدل صورت نگرفته باشد کاربرد خواهند داشت. اما با تزریق پالس تخلیه جزئی به مدل و با فرمول‌بندی گالرکین معادلات فوق و بعد از گسسته‌سازی و خطی‌سازی، روابط (۲۵) و (۲۸) جایگزین معادلات جریان سیستم در روابط (۱۴) و (۱۶) خواهند شد. زیرا معادلات جریان با حضور پالس تخلیه جزئی تزریقی به مدل، تغییر می‌کنند. در ادامه رابطه (۳۳) به عنوان معادله جریان تخلیه جزئی و به عنوان یکی از مجهولات سیستم شناسایی و به رابطه ماتریسی (۱۸) اضافه می‌شود تا با ۸ معادله و ۸ مجهول بتوان پارامترهای مجهول را به دست آورد و اصطلاحاً می‌گوییم که جریان تخلیه جزئی را در معادلات، آشکارسازی کرده‌ایم.

۴- مکانیابی تخلیه جزئی با تحلیل جریان

خروجی مدل پیشنهادی

بروز تخلیه‌های جزئی در داخل عایق سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا که دارای مؤلفه‌های فرکانسی کیلوهرتز تا مگاهرتز هستند سبب شد تا مهندسان قدرت، توجه خود را به رفتار حالت گذرای بسیار سریع ماشین‌های الکتریکی با هدف مکانیابی تخلیه‌های جزئی در این حوزه فرکانسی معطوف کنند. در مرحله شبیه‌سازی، می‌بایست پالس جریانی تخلیه جزئی را به یکی از دورها که به عنوان رابط بین منابع جریان یا ولتاژ و همچنین ناحیه عناصر محدود تزریق کرد. برای آنالیز ماشین‌های الکتریکی در بازه فرکانسی کیلوهرتز تا مگاهرتز باید معادله جریان کل، معادله‌های مداری، میدانی و حرکتی را مورد تحلیل قرار داد ضمن اینکه پالس جریانی تخلیه جزئی نیز به این

جزئی در سیستم عایقی گردد [۴۵].



شکل ۳- مدار معادل عایق جامد و حفره درون آن

در شکل (۳) ظرفیت خازنی عایق بدون حفره، C_b ظرفیت خازنی بین عایق و حفره و C_c ظرفیت خازنی حفره می‌باشد بنابراین I_{pd} ناشی از حفره موجود در عایق به شرح روابط (۲۹) و (۳۰) می‌باشد.

$$\begin{cases} I_{pd} = \frac{dq}{dt} \\ qc = C_c \times Vc \\ Vc = \frac{U_i}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{h} - 1\right)} \end{cases} \quad (۲۹)$$

$$\rightarrow \begin{cases} qc = \frac{C_c}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{h} - 1\right)} \times U_i \\ I_{pd} = \frac{C_c}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{h} - 1\right)} \times \frac{d}{dt} \times U_i \end{cases} \quad (۳۰)$$

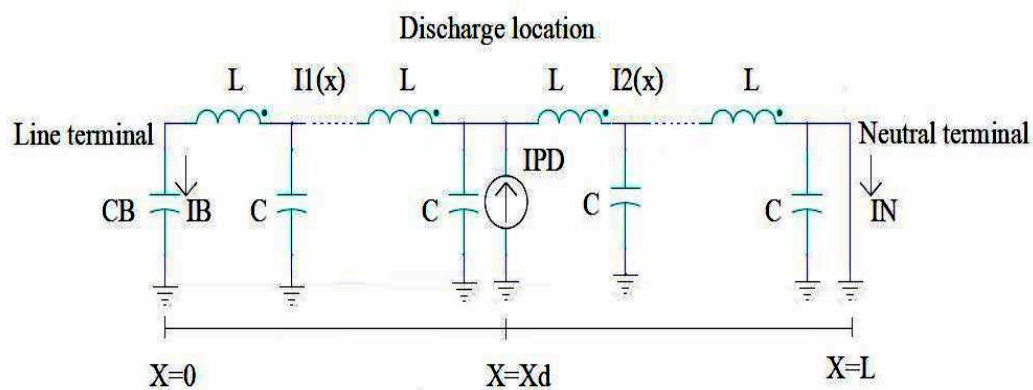
در اینجا d ضخامت عایق، h ضخامت حفره و ϵ_r پرمیٹیویته دی‌الکتریک است [۴۶]. با توجه به ضخامت عایق و حفره، مقدار ماتریس $[k_c]$ بر اساس معادله مربوط به جریان PD به شرح رابطه‌ی (۳۱) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} I_{pdi} &= k_c \frac{d}{dt} U_i \\ \rightarrow \beta k_c \frac{d}{dt} U_i^{t+\Delta t} &= \beta I_{pdi}^{t+\Delta t} \\ \rightarrow (1 - \beta) k_c \frac{d}{dt} U_i^t &= (1 - \beta) I_{pdi}^t \\ \rightarrow \beta I_{pdi}^{t+\Delta t} + (1 - \beta) I_{pdi}^t &= k_c \frac{U_i^{t+\Delta t} - U_i^t}{\Delta t} \\ \rightarrow \Delta t \beta I_{pdi}^{t+\Delta t} - k_c U_i^{t+\Delta t} &= -\Delta t (1 - \beta) I_{pdi}^t - k_c U_i^t \\ \rightarrow \beta \Delta t I_{pdi,k+1}^{t+\Delta t} - k_c \Delta U_{ik+1}^{t+\Delta t} &= -\beta \Delta t I_{pdi,k}^{t+\Delta t} + \\ k_c \Delta U_{ik}^{t+\Delta t} - (1 - \beta) \Delta t I_{pdi}^t - k_c U_i^t \\ \rightarrow [k_c] \{ \Delta U_i \}_{k+1}^{t+\Delta t} - \beta \Delta t \{ \Delta I_{pdi} \}_{k+1}^{t+\Delta t} &= \beta \Delta t \{ I_{pdi} \}_k^{t+\Delta t} - \\ [k_c] \{ U_i \}_k^{t+\Delta t} + (1 - \beta) \Delta t \{ I_{pdi} \}^t &+ [k_c] \{ U_i \}^t \end{aligned} \quad (۳۱)$$

در رابطه (۳۱) مقدار $[k_c]$ و پارامترهای آن برابر است با:

تخلیه جزئی، می‌بایست مکانیابی را انجام داد. چون این روش بر مبنای آنالیز جریانی می‌باشد واضح است که IPD در جریان خروجی ظاهر می‌شود لذا می‌توان این روش را بر روی ماشین‌های واقعی اجرا و در عمل پیاده‌سازی کرد. اگر در فاصله X_d از انتهای سیم‌پیچ یک پالس جریانی تخلیه جزئی ایجاد شود توزیع ولتاژ و جریان در کل سیم‌پیچ به عنوان یک واحد طول، در دو بخش سیم‌پیچ متفاوت خواهد بود. مطابق با شکل (۴) بخش اول ما بین محل وقوع PD تا نقطه خنثی و بخش دوم از انتهای سیم‌پیچ تا محل وقوع PD می‌باشد بنابراین در رابطه‌ی (۳۴) خواهیم داشت [۴۵]:

معادلات اضافه می‌گردد. تمامی معادلات به روش گالرکین فرمول‌بندی و سپس در بازه زمانی گسسته‌سازی و خطی‌سازی می‌گردد. این معادلات در یک سیستم نهایی جمع‌بندی شده و در نهایت با روش فرکانس‌های رزونانس سری، مکان پالس جریانی تزریق شده به کوئل تخمین‌زده شد. یکی از روش‌های آشکارسازی تخلیه جزئی، استفاده از روش‌های الکتریکی پدیده تخلیه جزئی می‌باشد. در این مقاله جهت آشکارسازی و مکانیابی تخلیه جزئی از روش الکتریکی آنالیز جریانی جهت شناسایی و مکانیابی استفاده شده است تا قابلیت اجرا بر روی ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا واقعی را فراهم سازد. بعد از آشکارسازی پالس



شکل ۴- نمایش PD تزریق شده به صورت یک منبع جریان به داخل سیم‌پیچ

بنابراین با استفاده از رابطه (۳۴) و شرایط مرزی تعیین شده در رابطه (۳۶) می‌توان به استخراج راه‌حل تحلیلی جریان در بوشینگ، مطابق با رابطه (۳۷) رسید [۴۵].

$$I_B(j\omega) = \frac{C_B \delta \sinh(\delta(\ell - x_d))}{C_B \delta \sinh(\delta\ell) - \cosh(\delta\ell)} \times I_{PD}(j\omega) \quad (37)$$

سیگنال جریان گرفته شده از انتهای سیم‌پیچ در پاسخ به پالس جریانی PD، نه تنها حاوی اطلاعاتی درباره جریان تخلیه جزئی است بلکه فرکانس‌های رزونانس سری در سیگنال انتهای سیم‌پیچ، حامل اطلاعاتی درباره موقعیت PD نیز می‌باشند و با تغییر موقعیت پالس PD تغییر می‌کند. بنابراین از فرکانس رزونانس سری اندازه‌گیری شده در انتهای سیم‌پیچ می‌توان برای مکانیابی PD استفاده نمود. رابطه (۳۸) می‌تواند به عنوان یک شاخص، برای مکانیابی منبع PD مورد استفاده قرار گیرد [۴۵، ۴۷-۴۹].

$$\begin{cases} \text{For } \rightarrow 0 \leq x \leq x_d \\ u_1(x, j\omega) = A \cosh(\delta(x_d - x)) + B \sinh(\delta(x_d - x)) \\ i_1(x, j\omega) = \frac{1}{Z} [A \sinh(\delta(x_d - x)) + B \cosh(\delta(x_d - x))] \\ \text{For } \rightarrow x_d \leq x \leq \ell \\ u_2(x, j\omega) = C \cosh(\delta(x - x_d)) + D \sinh(\delta(x - x_d)) \\ i_2(x, j\omega) = \frac{1}{Z} [C \sinh(\delta(x - x_d)) + D \cosh(\delta(x - x_d))] \end{cases} \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) پارامترهای δ و Z عبارت هستند از:

$$\begin{cases} \delta = j\omega\sqrt{LC} \\ Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases} \quad (35)$$

همچنین پارامترهای A ، B ، C و D مقادیر ثابت می‌باشند و با شرایط مرزی در نظر گرفته شده در رابطه (۳۶) قابل تعیین هستند [۴۵].

$$\begin{cases} i_1(0, j\omega) = j\omega C_B \times u_1(0, j\omega) \\ i_{PD} = i_1(x_d, j\omega) + i_2(x_d, j\omega) \\ u_1(x_d, j\omega) = u_2(x_d, j\omega) \\ u_2(\ell, j\omega) = 0 \end{cases} \quad (36)$$

از آن جهت پیدا کردن منبع PD استفاده کرد. لذا شکل (۵) فلوجارت مکانیابی PD توسط آنالیز جریانی و مدل ماشین الکتریکی به روش FEM-MTL را نشان می‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

روش اجزاء محدود می‌تواند به عنوان حل‌کننده مسائل مغناطیسی و برای تعیین پارامترهای ماشین الکتریکی استفاده گردد. برای دست آوردن پارامترهای الکتریکی ماشین می‌توان از حل‌کننده‌های جریان‌گردابی، الکترواستاتیک، و الکترومغناطیسی در نرم‌افزار Ansys Maxwell استفاده کرد [۵۰].

Ansys ابتدا ابعاد هندسی ماشین الکتریکی را به عنوان ورودی می‌گیرد و پارامترهای الکتریکی ماشین را به عنوان خروجی تعیین خواهد کرد. شکل (۶) ماشین الکتریکی مورد مطالعه و جدول ۱ ابعاد هندسی و پارامترهای این ماشین الکتریکی را نشان می‌دهد. ماکسول سه بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود به حل مسئله میدان مغناطیسی و شبیه‌سازی در سه بعد می‌پردازد و توانایی ادغام با دیگر نرم‌افزارهای Ansoft جهت حل مسائل پیچیده را دارد. بر اساس اطلاعات جدول ۱ مدل پایه طراحی شده و مرحله بعدی تکمیل شبیه‌سازی است. بنابراین کلیه قسمت‌های طراحی شده در استاتور، رتور و سیم‌پیچ‌های ماشین را بر روی هم مونتاژ کرده تا شبیه‌سازی ماشین مورد مطالعه کامل گردد. شکل (۷) شبیه‌سازی سه‌بعدی کامل ماشین الکتریکی مورد مطالعه در نرم‌افزار Ansys Maxwell را نشان می‌دهد.

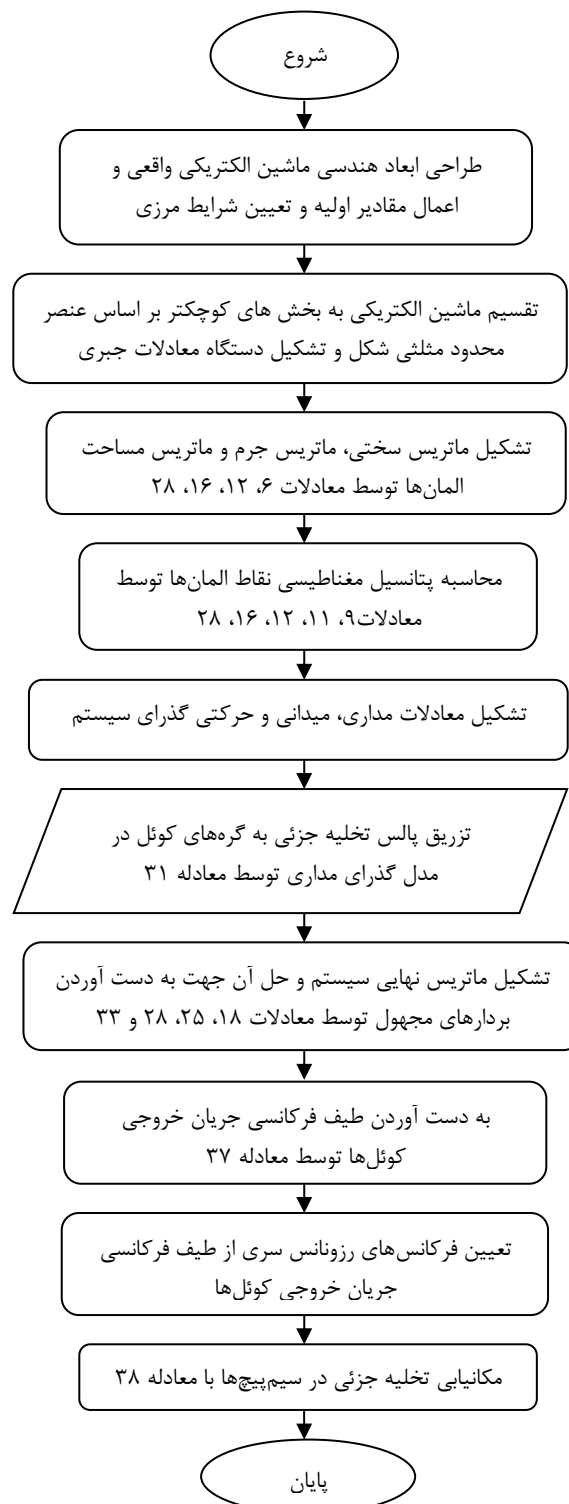


شکل ۶- ماشین الکتریکی مورد مطالعه

توسط ماکسول دوبعدی و ادغام با دیگر نرم‌افزارهای Ansys می‌توان به حل مسائل پیچیده، آنالیز اجزاء محدود، شبیه‌سازی و حل مسائل میدان مغناطیسی دوبعدی پرداخت.

$$\frac{C_B}{C} \gamma \sinh(\gamma(\ell - x_d)) = 0 \rightarrow x_d = \ell + \frac{n}{2f} \sqrt{\frac{I}{LC}} \quad (38)$$

در رابطه (۳۸) $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots$ مطابق با فرکانس



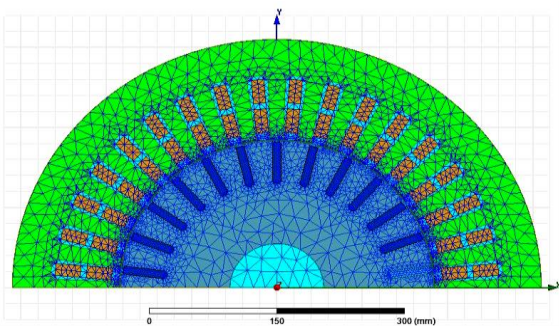
شکل ۵- فلوجارت مکانیابی تخلیه جزئی به روش آنالیز جریانی با مدل‌سازی ماشین الکتریکی به روش FEM-MTL

رزونانس سری سیگنال گرفته شده از انتهای سیم‌پیچ می‌باشد و با معلوم بودن مقدار ℓ و با حل این رابطه می‌توان

شده توسط منابع جریان یا منابع ولتاژ باشد که به صورت اختیاری یا تابعی از زمان بوده و توانایی کوپل شدن با مدارهای بیرونی، حرکات چرخشی یا انتقالی را داشته باشد [۵۱].

ماکسول توسط یک فرآیند تکرار شونده و به صورت اتوماتیک، شروع به طراحی و ایجاد یک مش بندی مناسب از هندسه ماشین الکتریکی می کند. ابتدا با طرح یک راه حل پایه، مش های درشت ایجاد و سپس مش های با سطح تراکم خطای بالا را تصحیح می کند. زمانی که معیارهای همگرایی با بازیابی خطاها رضایت بخش شوند ماکسول راه حل جدیدی ایجاد می نماید. در ادامه وقتی پارامترهای انتخاب شده در مدل در حد مطلوب همگرا شدند ماکسول از حلقه خارج و مش بندی نهایی ایجاد می گردد [۵۱].

شکل (۹) مش بندی ماشین الکتریکی شبیه سازی شده در نرم افزار Ansys Maxwell را نشان می دهد.



شکل ۹- مش بندی عنصر محدود ماشین الکتریکی مدل شده در نرم افزار Ansys Maxwell

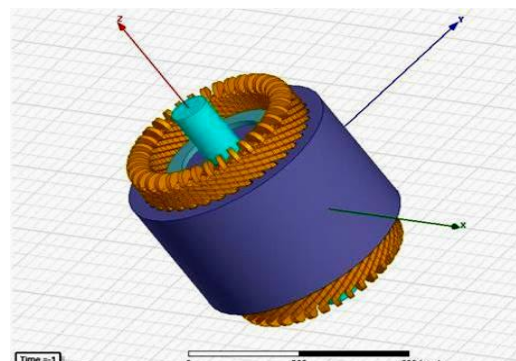
مقاومت و ظرفیت خازنی سیم پیچ از طریق شبیه سازی ماشین الکتریکی در نرم افزار Ansys استخراج و به عنوان یک پارامتر مورد نیاز، برای ورودی نرم افزار Circuit editor Maxwell مورد استفاده قرار می گیرد. شکل (۱۰) تزریق پالس به ماشین الکتریکی شبیه سازی شده در Ansys Maxwell Circuit editor را نشان می دهد.

پالس تخلیه جزئی به کوپل های دوم، هفتم و یازدهم ماشین الکتریکی تزریق و سپس طیف فرکانس جریان خروجی که تحت تأثیر پالس جریان تخلیه جزئی است با استفاده از آنالیز تبدیل فوریه سریع بدست آمد [۵۲].

در این مکانیابی مؤلفه فرکانسی تخلیه جزئی تزریقی، در محدوده اعتبار فرکانسی ماشین الکتریکی تحت بررسی می باشد و در مرحله پس پردازش، اثرات هسته نیز در محاسبات FEM و با هدف مکانیابی تخلیه جزئی لحاظ می شود. شکل های (۱۱) تا (۱۳) طیف فرکانسی جریان

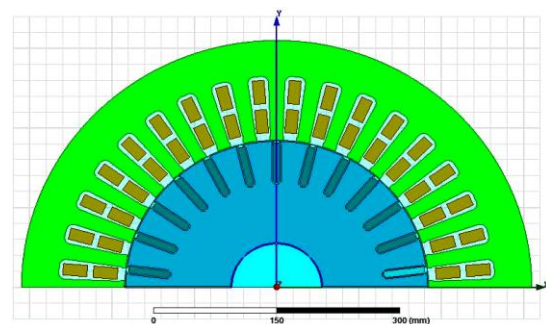
جدول ۱- پارامترهای ماشین القایی سه فاز

توان	۲۵۰ KW	تعداد قطب	۴
ولتاژ	۶KV	فرکانس	۵۰ Hz
تعداد شیار	۳۶	تعداد فاز	۳
طول رتور	۴۰۰ mm	قطر داخلی استاتور	۳۷۰ mm
قطر داخلی رتور	۱۱۰ mm	قطر خارجی استاتور	۶۲۰ mm
قطر خارجی رتور	۳۶۸ mm	طول هسته استاتور	۴۰۰ mm



شکل ۷- شبیه سازی سه بعدی کامل ماشین الکتریکی تحت مطالعه در نرم افزار Ansys Maxwell

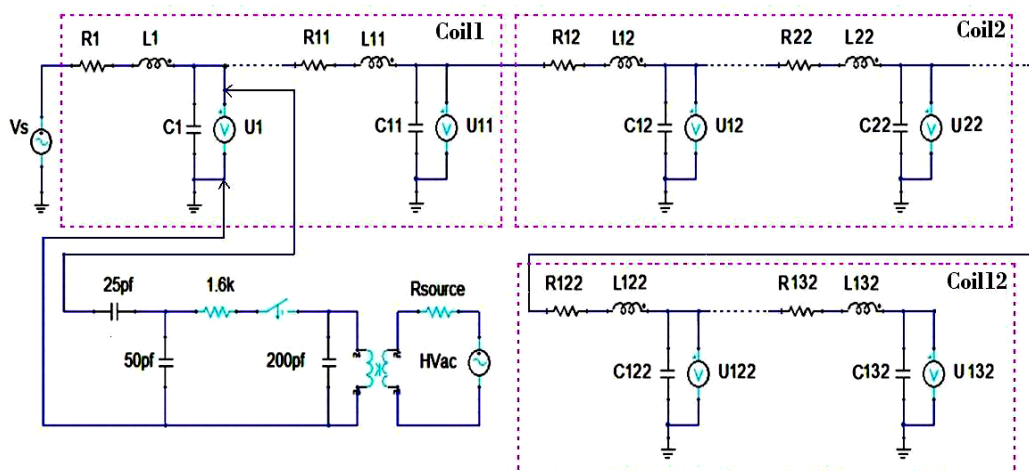
جهت آنالیز میدان های الکتریکی و مغناطیسی توسط ماکسول دوبعدی، باید ساختارهایی با مقطع یکنواخت و متقارن چرخشی استفاده گردد که الگوی میدان در کل وسیله با الگوی میدان در آن سطح مقطع انتخابی قابلیت مدل سازی و آنالیز میدان الکتریکی ساکن، میدان مغناطیسی ساکن، جریان گردابی، شرایط DC، شرایط AC و شرایط گذرا را داشته باشد. شکل (۸) شبیه سازی دوبعدی کامل ماشین الکتریکی در نرم افزار Ansys Maxwell را نشان می دهد.



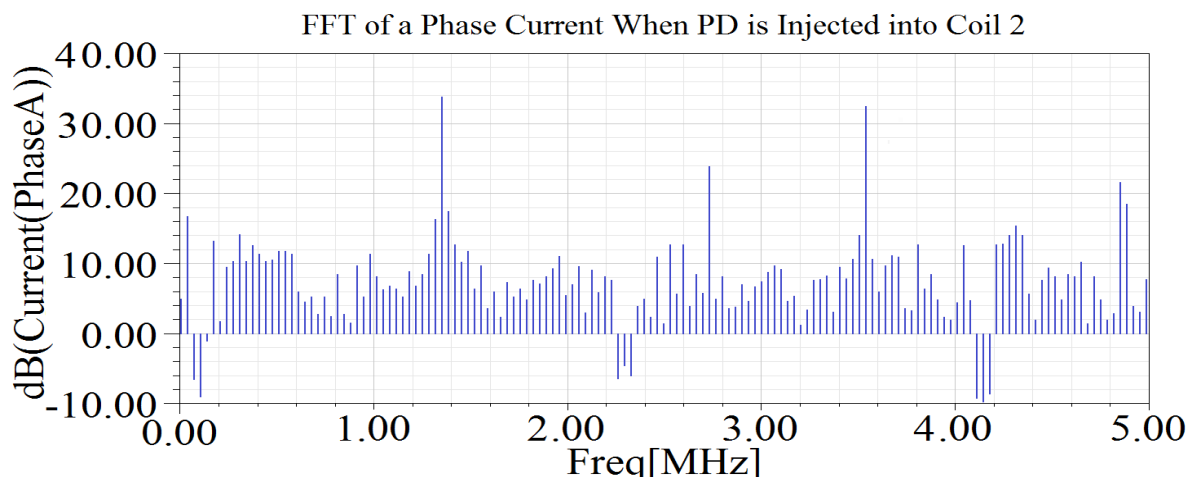
شکل ۸- شبیه سازی دوبعدی کامل ماشین الکتریکی در نرم افزار Ansys Maxwell

این شبیه سازی می تواند شامل محاسبه میدان های مغناطیسی گذرایی که توسط هادی ها، سیم پیچ های تغذیه

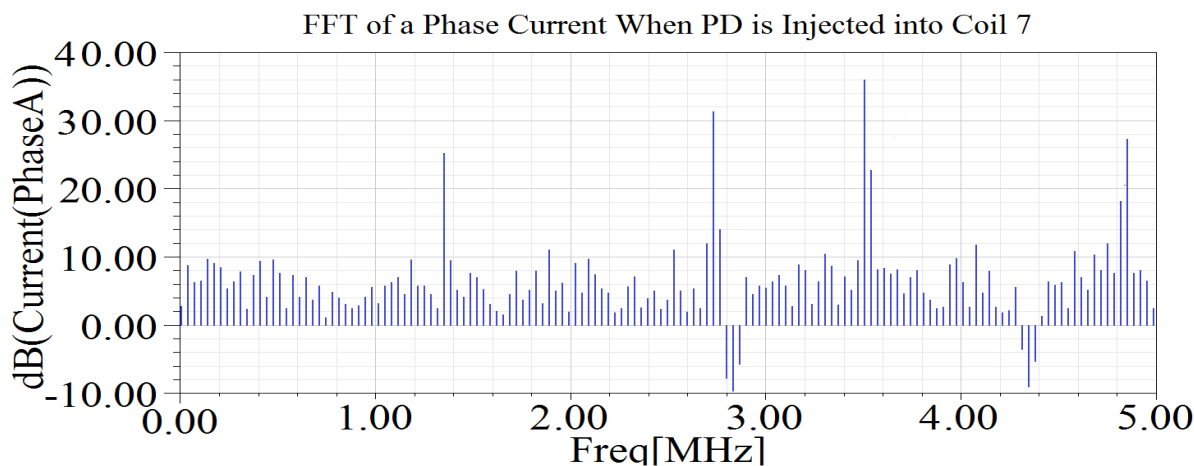
خروجی را در مرحله شبیه‌سازی و زمانی که PD به کوئل های مورد نظر تزریق می‌شود را نشان می‌دهد.



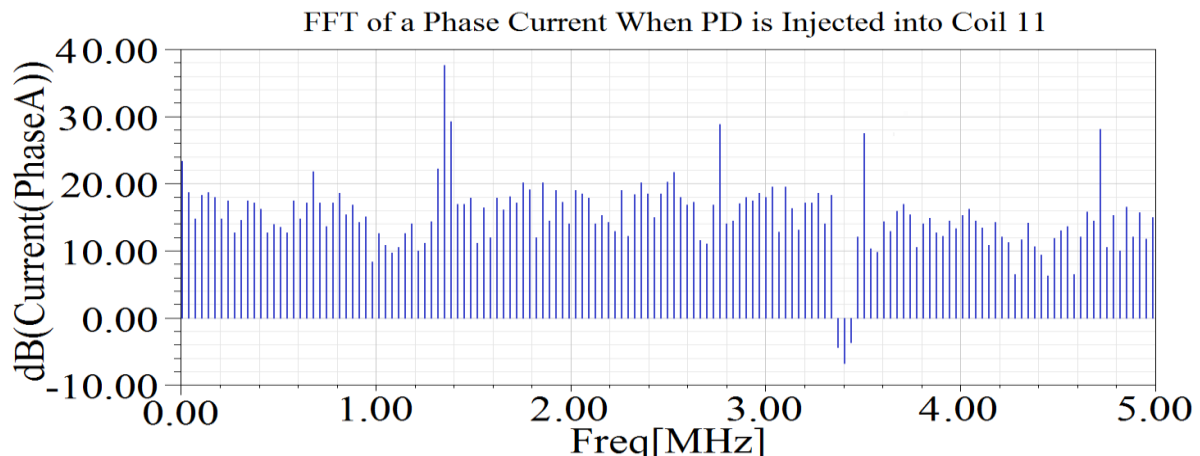
شکل ۱۰- تزریق PD به مدل گذرای بسیار سریع سیم‌پیچ‌های ماشین الکتریکی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزارهای Maxwell و Ansys Circuit editor



شکل ۱۱- طیف فرکانسی جریان خروجی در حالت شبیه‌سازی مدل FEM-MTL، با تزریق PD به کوئل ۲



شکل ۱۲- طیف فرکانسی جریان خروجی در حالت شبیه‌سازی مدل FEM-MTL، با تزریق PD به کوئل ۷



شکل ۱۳- طیف فرکانسی جریان خروجی در حالت شبیه‌سازی مدل FEM-MTL، با تزریق PD به کوئل ۱۱

محدود آنالیز می‌شوند در رنج فرکانسی پایینی قرار دارند و به علت اینکه واحد محاسباتی آن بر مبنای سیم‌پیچ یک فاز است برای مکانیابی تخلیه جزئی مناسب نمی‌باشد. حال اگر تخلیه جزئی در ماشین الکتریکی رخ دهد و مولفه فرکانسی آن بالا باشد این آنالیز جریانی نمی‌تواند در پیدا کردن محل تخلیه جزئی کمکی کند. برای اینکه اعتبار فرکانسی یک مدل به حوزه‌های فرکانسی بالاتر کشانده شود باید واحدهای محاسباتی مدل، کوچکتر شوند یعنی واحدهای محاسباتی مدل از سیم‌پیچ یک فاز به یک جفت کوئل، یک کوئل و نهایتاً هر دور از کوئل تغییر یابد. مدل‌سازی با در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت سیم‌پیچ یک فاز، یعنی فرکانس پایین‌تر در مدل‌سازی و با در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت هر دور از کوئل، یعنی به فرکانس بالاتر در مدل‌سازی خواهیم رسید. بنابراین می‌بایست با تقسیم کردن سیم‌پیچ به واحدهای کوچکتر یعنی به صورت هر دور از سیم‌پیچ، طیف فرکانسی ماشین الکتریکی به محدود بالاتر کشانده شود تا در ادامه با استفاده از روش آنالیز جریانی و گرفتن طیف فرکانسی از جریان خروجی و همچنین استفاده از فرکانس‌های رزونانس سری، مکان تخلیه جزئی را به روش پیشنهادی FEM-MTL، یعنی روش المان محدود که در آن واحد محاسباتی دور به دور هر سیم‌پیچ در نظر گرفته شده است را به دست آورد.

با توجه به شکل‌های (۱۱) تا (۱۳)، اطلاعات جدول ۲ مقادیر فرکانس‌های رزونانس سری در سیگنال جریان انتهای سیم‌پیچ ناشی از وقوع تخلیه جزئی در کوئل‌های ماشین الکتریکی را نشان می‌دهد.

پس از تعیین طیف فرکانسی جریان خروجی از آنالیز تبدیل فوریه سریع، می‌توان فرکانس‌های رزونانس را از این طیف‌ها به دست آورد. طیف‌های فرکانسی موجود در این شکل‌ها، شامل دو ناحیه است. ناحیه اول فرکانس‌های رزونانس موازی در دامنه بالای موج‌ها، و ناحیه دوم فرکانس‌های رزونانس سری در دامنه پایین موج‌ها می‌باشد.

در این شبیه‌سازی مدل مداری PD به عنوان رابط مداری با ناحیه المان محدود استفاده می‌شود و همانطور که از شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مشخص است فرکانس‌های رزونانس موازی که متناظر با طیف فرکانسی سیگنال جریان در انتهای سیم‌پیچ است مستقل از موقعیت تخلیه جزئی در سیم‌پیچ می‌باشند. فرکانس‌های رزونانس سری نیز با دقت بالا، از طیف فرکانسی ناشی از جریان خروجی به دست آمده و بر اساس موقعیت پالس جریانی تخلیه جزئی تغییر می‌کنند. بنابراین می‌توانند برای تخمین محل تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی به کار روند [۴۵]. فرکانس‌های رزونانس سری شکل (۱۱) در فرکانس‌های ۱۱۴ kHz، ۲۲۶۸ kHz، ۴۳۵۱ kHz، شکل (۱۲) در فرکانس‌های ۲۸۳۹ kHz و ۴۲۶۴ kHz و شکل (۱۳) در فرکانس ۳۴۱۴ kHz رخ داده است.

۵-۱- مکانیابی تخلیه جزئی

در این آنالیز برای مکانیابی تخلیه جزئی از فرکانس‌های رزونانس سری استفاده می‌گردد بنابراین از انتهای سیم‌پیچ ماشین الکتریکی مورد مطالعه طیف فرکانسی جریان خروجی گرفته شده و از این فرکانس‌ها برای مکانیابی تخلیه جزئی استفاده می‌گردد. طیف فرکانسی جریان خروجی ماشین‌های الکتریکی که به روش کلاسیک المان

جدول ۲- فرکانس‌های رزونانس سری جریان انتهایی سیم‌پیچ

مدل FEM-MTL

مکان PD	F ₁ (KHz)	F ₂ (KHz)	F ₃ (KHz)
کوئل ۲	۱۱۴	۲۲۶۸	۴۳۵۱
کوئل ۷	۲۸۳۹	۴۲۶۴	-
کوئل ۱۱	۳۴۱۴	-	-

اکنون اگر با استفاده از فرکانس‌های رزونانس سری F₁ متناظر با n=1 و به کمک شاخص مکانیابی ارائه شده در رابطه (۳۸)، به مکانیابی تخلیه جزئی پردازیم نتایج حاصل به صورت اطلاعات ارائه شده در جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه مکان‌های واقعی و تخمین‌زده شده PD مدل

FEM-MTL

مکان تخمینی PD (coil)	مکان واقعی PD (coil)	درصد خطا (%)	مکان تخمینی PD (cm)	مکان واقعی PD (cm)
کوئل ۲	کوئل ۲	۸,۱۷	۳۸۲	۴۱۶
کوئل ۷	کوئل ۷	۱,۱۸	۱۶۰۵	۱۶۲۴
کوئل ۱۱	کوئل ۱۱	۰,۸۶۶	۲۵۱۸	۲۵۴۰

ارزیابی نتایج بدست آمده از جدول ۳ نشان می‌دهد که مکانیابی تخلیه جزئی با استفاده از روش پیشنهادی و با دقت کامل، مکان واقعی تخلیه جزئی را در طول سیم‌پیچ تعیین می‌کند و سپس می‌توان به کوئل مورد نظری که در آن PD رخ داده است رسید. در عمل، بعد از تزریق پالس PD به کوئل‌های اشاره شده، طیف فرکانسی توسط اسیلوسکوپ از سیگنال جریان خروجی گرفته شد. مقایسه

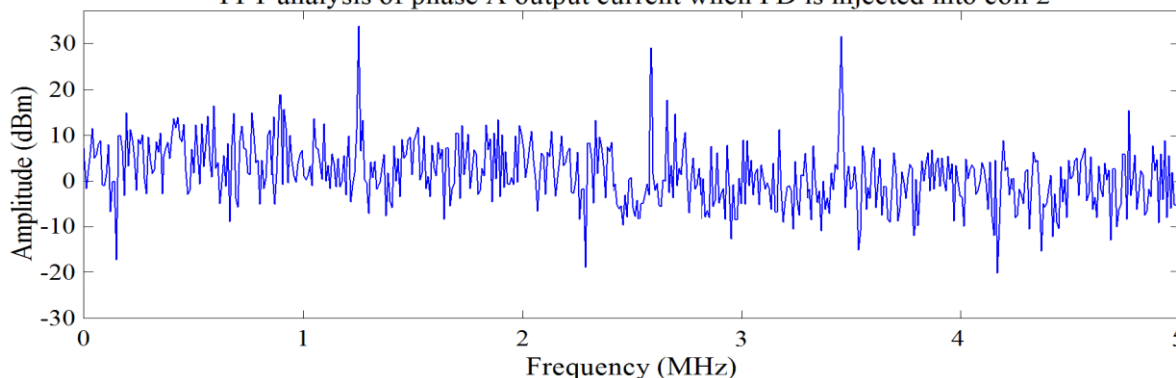
نتایج شبیه‌سازی نشان از دقت خوب روش پیشنهادی دارد. چون این روش بر مبنای آنالیز جریانی است پس می‌توان با تقسیم کردن کوئل ماشین الکتریکی به صورت هر دور از کوئل در مدل گذرای مداری، سبب افزایش اعتبار فرکانسی مدل گردید تا با قابلیت بخشیدن به روش المان محدود و افزایش اعتبار فرکانسی مدل در جهت مکانیابی تخلیه جزئی به روش آنالیز جریانی بهبود حاصل گردد. ضمن اینکه استفاده از روش آنالیز جریانی و گرفتن طیف فرکانسی از جریان خروجی توسط اسیلوسکوپ فرکانس بالا، زمینه را برای بررسی ماشین‌های الکتریکی به صورت آنالیز فراهم می‌کند تا در صنعت به صورت آنالیز به بررسی خطا و تشخیص مکان تخلیه جزئی در ماشین‌های الکتریکی پی برد و از خروج مدار این تجهیزات کلیدی جلوگیری کرد.

۲-۵- مقایسه مکانیابی تخلیه جزئی به کمک مدل

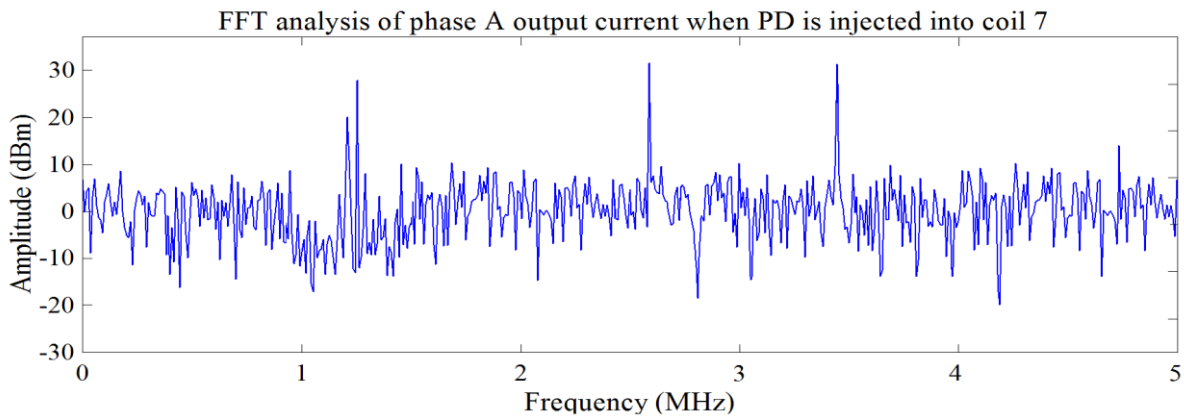
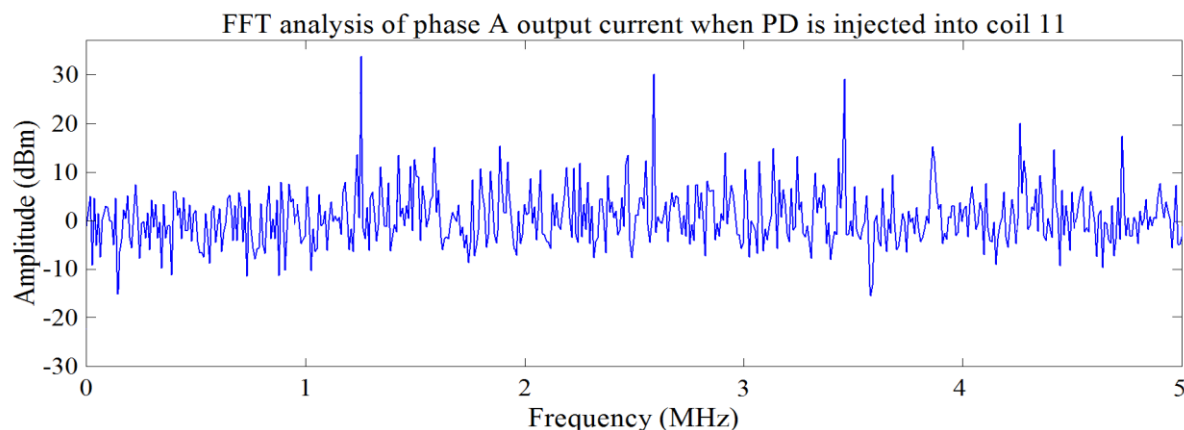
کلاسیک MTL و مدل پیشنهادی

با توجه به اینکه مدل MTL به عنوان یک مدل مداری سیم‌پیچ شناخته می‌شود، با مدل کردن سیم‌پیچ به صورت خط انتقال سری شده با پارامترهای گسترده، می‌توان آنالیز مداری انجام داد. جهت بررسی اعتبار مکانیابی مدل-FEM MTL پیشنهادی، سیم‌پیچ ماشین الکتریکی مورد مطالعه در نرم‌افزار متلب و به صورت مدل کلاسیک MTL شبیه‌سازی شد. پالس تخلیه جزئی با مؤلفه فرکانسی مورد نظر به کوئل‌های دوم، هفتم و یازدهم تزریق گردید. طیف‌های فرکانسی اخذ شده از جریان خروجی کوئل‌ها در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان داده شده است.

FFT analysis of phase A output current when PD is injected into coil 2



شکل ۱۴- طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک MTL با تزریق PD به کوئل ۲

شکل ۱۵- طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک *MTL* با تزریق *PD* به کوئل ۷شکل ۱۶- طیف فرکانسی جریان خروجی مدل کلاسیک *MTL* با تزریق *PD* به کوئل ۱۱

با استفاده از فرکانس‌های رزونانس سری و مطابق با $n=1$ و تعیین شاخص‌های رابطه (۳۸)، مکان‌های *PD* تخمین زده شد. جدول ۵ نتایج حاصل از تخمین مکانیابی *PD* را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه مکان‌های واقعی و تخمین‌زده شده *PD* مدل کلاسیک *MTL*

مکان تخمینی PD (coil)	مکان واقعی PD (coil)	درصد خطا (%)	مکان تخمینی PD (cm)	مکان واقعی PD (cm)
کوئل ۲	کوئل ۲	۱۰,۵۷	۳۷۲	۴۱۶
کوئل ۸	کوئل ۷	۲,۱۵	۱۶۵۹	۱۶۲۴
کوئل ۱۲	کوئل ۱۱	۵,۱۹	۲۶۷۲	۲۵۴۰

جهت ارزیابی تخمین مکانیابی تخلیه‌جزئی مدل پیشنهادی و مدل کلاسیک *MTL* در سیم‌پیچ ماشین الکتریکی، اطلاعات به دست آمده در جداول (۳) و (۵) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها،

با بررسی شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) مشخص می‌شود که فرکانس‌های رزونانس موازی، مستقل از موقعیت تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ است. فرکانس‌های رزونانس سری شکل (۱۴) در فرکانس‌های ۱۱۷kHz، ۲۲۴۲kHz، ۴۲۶۳kHz فرکانس‌های رزونانس سری شکل (۱۵) در فرکانس‌های ۲۸۰۱kHz و ۴۲۶۱kHz و فرکانس‌های رزونانس سری شکل (۱۶) نیز در فرکانس ۳۶۲۰kHz رخ داده است.

تمامی فرکانس‌های رزونانس سری ناشی از رخداد تخلیه‌جزئی در سیم‌پیچ مدل شده به روش کلاسیک *MTL* در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- فرکانس‌های رزونانس سری جریان انتهای سیم‌پیچ مدل کلاسیک *MTL*

مکان PD	F ₁ (KHz)	F ₂ (KHz)	F ₃ (KHz)
کوئل ۲	۱۱۷	۲۲۴۲	۴۲۶۳
کوئل ۷	۲۸۰۱	۴۲۶۱	-
کوئل ۱۱	۳۶۲۰	-	-

یازدهم تزریق شد. در ادامه با آنالیز تبدیل فوریه سریع و گرفتن طیف فرکانسی از جریان خروجی انتهای سیم‌پیچ و به کمک فرکانس‌های رزونانس سری به مکانیابی تخلیه جزئی پرداخته شد و به کوئلی که در آن PD رخ داده بود رسیدیم. با توجه به اینکه در این مکانیابی‌ها، مؤلفه فرکانسی تخلیه جزئی در محدوده اعتبار مدل هست و اثرات هسته و القاء متقابل نیز در محاسبات عناصر محدود و در مرحله پس‌پردازش تقریب زده می‌شود و نیز با در نظر گرفتن واحد محاسباتی به صورت هر دور از سیم‌پیچ می‌توان از مدل مداری متناسب با حوزه فرکانسی ایجاد تخلیه به عنوان رابط مداری با ناحیه عناصر محدود استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی با استفاده از مدل پیشنهادی و مبتنی بر روش المان محدود با رابط مداری MTL و به کار بردن فرکانس‌های رزونانس سری با هدف مکانیابی تخلیه‌های جزئی در سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی، از دقت بالایی برخوردار است. بنابراین می‌توان با افزایش دقت در مدل‌سازی و مکانیابی تخلیه جزئی در عایق سیم‌پیچ ماشین‌های الکتریکی، نسبت به شناسایی خطاهای تخلیه جزئی قبل از بروز اتفاقات فاجعه بار، تعویض سیم‌پیچ معیوب و جلوگیری از خروج مدار ماشین‌های الکتریکی ولتاژ بالا اقدام نمود.

صحت و عملکرد بهتر روش پیشنهادی $FEM-MTL$ را نسبت به روش کلاسیک MTL نشان می‌دهد. زیرا در مدل کلاسیک MTL پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ ثابت هستند. اثر هسته در هر لحظه از زمان و در طیف‌های فرکانسی مختلف وارد نشده است و همچنین مکانیابی‌ها بر اساس مدل سیم‌پیچ است. ولی در مدل $FEM-MTL$ پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچ ثابت نیستند و در هر لحظه از زمان اندوکتانس‌ها در حال تغییر هستند. اثر هسته در شبیه‌سازی‌ها وارد شده و مکانیابی‌ها بر اساس مدل ماشین الکتریکی است. همچنین ماشین الکتریکی به روش FEM مدل‌سازی و از آنالیزهای جریانی برای مکانیابی PD استفاده شده است. بنابراین روش $FEM-MTL$ دارای دقت و صحت بالاتری نسبت به روش کلاسیک MTL دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور مکانیابی PD ، در ابتدا با توجه به اینکه PD در محدوده کیلوهرتز تا مگاهرتز رخ می‌دهد مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی در حالت گذرای بسیار سریع با ادغام مدل خط انتقال سیم‌پیچ به عنوان رابط بین منابع ولتاژ یا جریان و ناحیه المان محدود انجام شد. ماشین الکتریکی مورد مطالعه که یک ماشین القایی $6KV/250KW$ است به روشی که شرح داده شد شبیه‌سازی و پالس تخلیه جزئی به کوئل‌های دوم، هفتم و

مراجع

- [۱] محمدرضا بقایی پور، احمد دارابی و علی دستفان، "ارائه یک مدل مبتنی بر آزمایش جهت استخراج فرکانسهای طبیعی موثر بر نویز صوتی در موتور سنکرون"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۳۱-۲۲۴.
- [۲] فریدالدین صفایی، نبی اله رضانی و میلاد نیازآذری، "ارزیابی و پیش‌بینی اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر روی شبکه‌های توزیع پیچیده با مدل‌سازی فرکانس بالا اجزای آن"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۴۳-۲۵۸.
- [۳] حسین پرهیزکار و حسین شایقی، "مدلسازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۳۷-۲۴۴.
- [۴] جلیل غیورصفار و رضا شریعتی نسب، "مدلسازی جامع سیستم زمین جهت تحلیل رفتار گذرای آن در مقابل ضربات صاعقه"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۶۵-۱۷۷.
- [5] S. J. Salon, "Finite element analysis of electrical machines", Boston, Kluwer academic publishers, Vol. 101, 1995.
- [6] M. A. Elborki, P.A. Crossley, Z.D Wang, A. Darwin, and G Edwards, "Detection and characterisation of partial discharges in transformer defect models", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, 2002, pp. 405-410
- [7] S. M. H. Hosseini, and S. M. H. Bafghi, "Comparison of high frequency detailed generator models for partial discharge localization", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 10, No. 4, 2015, pp. 1752-1758.

- [8] H. Janani , B. Kordi , and M.J. Jozani, "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, Vol. 24, No. 1, 2017, pp. 54-65.
- [9] R. Rostaminia, M. Saniei , M. Vakilian, S.S. Mortazavi , and V. Parvin Darabad, "An efficient partial discharge pattern recognition method using texture analysis for transformer defect models", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 28, No.7, 2018, pp. 2558.
- [10] J. Zhang , W. Xu, C. Gao, S. Wang, J. Qiu, J. G. Zhu, and Y. Guo, " Analysis of inter-turn insulation of high voltage electrical machine by using multi-conductor transmission line model", IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 49, No. 5, 2013, pp. 1905-1908.
- [11] K. Gülnihar, S. Cekli, C. P. Uzunoğlu, and M. Uğur, "Location estimation of partial discharge-based electromagnetic source using multilateration with time difference of arrival method", Electrical Engineering, Vol. 100, No. 2, 2018, pp. 839-847.
- [12] Y. Khan, "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, Vol. 98, No. 1, 2016, pp. 29-42.
- [13] C. Hațiegan, I. Padureanu, M.R. Jurcu, M. Biriescu, M. Răduca, and F. Dilerte, "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, Vol. 99, No. 3, 2017, pp. 1013-1020.
- [14] H. Karami, M. Azadifar, A. Mostajabi, M. Rubinstein, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and F. Rachidi, "Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers", Sensors, Vol. 20, No. 5, 2020, pp. 1419.
- [15] M. Gopalakrishnan, M. A. Paneerselvarn, R.B. Shreeshankar, S. Jayalalitha, and V. Jayashankar, "Location of partial discharges in transformers", 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation And Dielectric Phenomena, 2003, pp. 620-623.
- [16] P. Werle, E. Gockenbach, and H. Borsi, "Partial discharge measurements on power transformers using transfer function for detection and localisation", Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 03CH37417), Vol. 3, 2003, pp. 1154-1157.
- [17] C. Zhou, and I. J. Kemp, "On the use of the travelling wave for partial discharge location in rotating machine stator windings", 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 98CH36257), Vol. 2, 1998, pp. 379-382.
- [18] J. Shakeri, A. H. Abbasi, A. A. Shayegani, and H. Mohseni, "A New Method for Partial Discharge Localization Using Multi-Conductor Transmission Line Model in Transformer Winding". International Review of Electrical Engineering, Vol. 4, No. 3, 2009, pp. 470-476.
- [19] S. M. H. Hosseini, and P. R. Baravati, "Partial discharge localization based on detailed models of transformer and wavelet transform techniques", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 10, No. 3, 2015, pp. 1093-1101.
- [20] S. M. H. Hosseini, and P. R. Baravati, "Transformer winding modeling based on multi-conductor transmission line model for partial discharge study", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 9, No. 1, 2014, pp. 154-161.
- [21] S. M. H. Hosseini, M. Vakilian, and G.B. Gharehpetian, "Partial discharge location in transformers through application of MTL model", International of Conference Power Systems Transients, 2009, pp. 1-6.
- [22] A. M. Jafari, A. Akbari, H. R. Mirzaei, M. Kharezi, and M. Allahbakhshi, "Investigating practical experiments of partial discharge localization in transformers using winding modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, 2008, pp. 1174-1182.
- [23] V. Jeyabalan, and S. Usa, "Frequency domain correlation technique for PD location in transformer winding", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 4, 2009, pp. 1160-1167.
- [24] S. M. H. Hosseini, and P. R. Baravati, "New high frequency multi-conductor transmission line detailed model of transformer winding for PD study", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, 2017, pp. 316-323.
- [25] S. M. Hosseinibafqi, H. R. Akbari, and S. A. Saied, "An improved model of cage induction machines for fast transients studies", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 4, 2020, p.p. 12273.

- [26] C. P. Malliou, A. Karlis, and M. G. Danikas, "Electrical machine insulation: Partial discharges, consequences and diagnostic technique", 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, 2017, pp. 468-474.
- [27] Y. Luo, Z. Li, and T. Chen, "Experimental study of partial discharge pulses propagation in stator winding of hydro generator", 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 2017, pp. 773-777.
- [28] R. T. Harrold, F. T. Emery, F. J. Murphy, and S. A. Drinkut, "Radio frequency sensing of incipient arcing faults within large turbine generators", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 4, 1979, pp. 1167-1173.
- [29] T. L. Churchill, and J. S. Edmonds, "Rotor-mounted scanning of distressed armatures in hydrogenerators", In Proceedings of the 18th Electrical/Electronics Insulation Conference, 1987, pp. 76-81.
- [30] J. F. Lyles, G. C. Stone, and M. Kurtz, "Experience with PDA diagnostic testing on hydraulic generators", IEEE transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 824-832.
- [31] M. Mondal, G. B. Kumbhar, and S. V. Kulkarni, "Localization of partial discharges inside a transformer winding using a ladder network constructed from terminal measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 3, 2017, pp. 1035-1043.
- [32] T. Y. Ji, W. H. Tang, and Q. H. Wu, "Partial discharge location using a hybrid transformer winding model with morphology-based noise removal", Electric power systems research, Vol. 101, 2013, pp. 9-16.
- [33] S. N. Hettiwatte, P. A. Crossley, Z. D. Wang, A. Darwin, and G. Edwards, "Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation studies", 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 2, 2002, pp. 1394-1399.
- [34] D. Guillen, G. Idarraga-Ospina, and E. Mombello, "Partial discharge location in power transformer windings using the wavelet Laplace function", Electric Power Systems Research, Vol. 111, 2014, pp. 71-77.
- [35] W. Zaabi, Y. Bensalem, and H. Trabelsi, "Fault analysis of induction machine using Finite Element Method (FEM)", 2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, 2014, pp. 388-393.
- [36] C. Li, J. Song, A. Kang, L. Lin, W. Su, and Z. Lei, "PD patterns of stator windings by in-factory experiment on a 10kV motor", Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2014, pp. 168-171.
- [37] T. Zhang, X. Liu, G. Liu, and P. Lei, "Research on PD detection method under induced impulse voltage for stator winding of wind turbine generator", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, Vol. 1, 2016, pp. 520-523.
- [38] Y. Wang, X. Yi, Y. Wang, X. Zhang, Y. Yin, T. Han, and K. S. Haran, "Partial-Discharge-Free Insulation Design of Air-Core Permanent Magnet Synchronous Machine for Aircraft Propulsion", IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020.
- [39] M. Borghei, and M. Ghassemi, "Partial discharge finite element analysis under fast, repetitive voltage pulses", 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2019, pp. 324-328.
- [40] P. Werle, A. Akbari, E. Gockenbach, and H. Borsi, "An enhanced system for partial discharge diagnosis on power transformers", International Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [41] B. F. Istfan, "Extensions to the finite element method for nonlinear magnetic field problems", 1989.
- [42] C. Zachariades, R. Shuttleworth, R. Giussani, and R. MacKinlay, "Optimization of a high-frequency current transformer sensor for partial discharge detection using finite-element analysis", IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 20, 2016, pp. 7526-7533.
- [43] A. M. Jafari, and A. Akbari, "Partial discharge localization in transformer windings using multi-conductor transmission line model", Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 6, 2008, pp. 1028-1037.
- [44] W. M. Arshad, H. Lendenmann, and H. Persson, "End-winding inductances of MVA machines through FEM computations and IEC-specified measurements", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 6, 2008, pp. 1693-1700.

- [۴۵] نریمان روشندل توانا، احمد غلامی و عباس شولایی، "مکان‌یابی تخلیه‌جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت با سیم پیچی دیسکی ساده"، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۷.
- [46] C. Suwanasi, T. Suwanasri, P. Fuangpian, and S. Ruankon, "Investigation on partial discharge of power cable termination defects using high frequency current transformer", 2013 10th international conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology , 2013, pp. 1-4.
- [47] Z. D Wang, P. A. Crossley, K. J. Cornick, and D. H. Zhu, "Partial discharge location in power transformers", IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, Vol. 147, No. 5, 2000, 249-255.
- [48] S. N. Hettiwatte, Z. D. Wang, and P. A. Crossley, "Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge", IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, Vol. 152, No. 1, 2005, pp. 25-30.
- [49] Z. D. Wang, P. A. Crossley, K. J. Cornick, and D. H. Zhu, "An algorithm for partial discharge location in distribution power transformers", 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 3, 2000, pp. 2217-2222.
- [50] J. Bacher, F. Waldhart, and A. Muetze, "3-D FEM calculation of electromagnetic properties of single-phase induction machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 1, 2014, pp. 142-149.
- [۵۱] حمیدرضا خضری و سیدمجتبی حسینی بافقی، "تحلیل دو بعدی و سه بعدی به روش اجزاء محدود در نرم افزار Maxwell"، نشر راشدین، ۳۰۰ صفحه، ۱۳۹۳.
- [52] C. Schlensok, and G. Henneberger, "Calculation of force excitations in induction machines with centric and excentric positioned rotor using 2-D transient FEM", IEEE transactions on magnetics, Vol. 40, No. 2, 2004, pp. 782-785.