

تأثیر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت بر وقوع تخلیه جزئی در عایق ماشین‌های الکتریکی با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود

رضا رستمی‌نیا^۱، دانشجوی دکتری برق-قدرت، محسن صنیعی^۲، استادیار، اصغر اکبری^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - r-rostaminia@phdstu.scu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - mohsen.Saniei@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - akbari@kntu.ac.ir

چکیده: یکی از عوامل اساسی در پیری زودرس عایق ماشین‌های الکتریکی، تخلیه جزئی ناشی از درایو ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. از این رو ارائه روش مناسب جهت مدل‌سازی این پدیده، می‌تواند به شناخت میزان تأثیر عوامل مختلف بر آن، کمک شایانی داشته باشد. در ارتباط با مدل‌سازی فرآیند تخلیه جزئی تاکنون روش‌های گوناگونی معرفی شده است، اما هیچ یک به مدل‌سازی این فرآیند در اثر پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت نپرداخته‌اند. در این مقاله مدل‌سازی تخلیه جزئی با استفاده از روش اجزاء محدود جهت محاسبه شدت میدان الکتریکی تحت پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت ارائه شده است. برای این منظور از نرم‌افزار COMSOL MultiphysicsTM 3.5a جهت محاسبات شدت میدان الکتریکی به روش اجزاء محدود^۱ (FEM) و اتصال هم‌زمان آن با نرم افزار MATLAB جهت پیاده‌سازی الگوریتم فرآیند تخلیه جزئی استفاده شده است. میزان تأثیر عواملی چون زمان خیز پالس‌های ولتاژی، فراجش ولتاژی ایجادشده در هر پالس و نرخ بالای تکرار پالس‌های تولیدی مدولاسیون عرض پالس، بر پدیده تخلیه جزئی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تخلیه جزئی- روش اجزاء محدود- پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت- شدت میدان الکتریکی - ماشین‌های الکتریکی- پیری زودرس عایق

The Effect of Pulses of Power Electronic Devices on the Partial Discharge Occurrence in Electrical Machines using Finite Element Method Modeling

R. Rostaminia¹, M. Saniei², A. Akbari³

1, 2- Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz- Iran

3- Department of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran- Iran

Abstract: Partial Discharge is one of the main causes of premature aging of electrical machines insulations, which are using power electronic drives. An appropriate model can prepare a better recognition of influences of different parameters on partial discharge behavior. Partial discharge has been modeled with different kind of methods, but no one modeled this phenomena under pulses of power electronic devices. In this paper, modeling of partial discharge using Finite Element Method (FEM) in order to calculate electric field is presented. Accordingly, COMSOL MultiphysicsTM 3.5a software is used to calculate electric field with FEM which is connected simultaneously to MATLAB software to implement the proposed algorithm. The influence of different parameters such as, rise time of each surges, the high repetition rate of PWM pulses and the amount of overshoots of each pulses on behavior of partial discharge is examined.

Keywords: Partial Discharge, Finite Element Method, Pulses of Power Electronic Devices, Electric field, Electrical Machines, Premature Aging.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۳/۲۰

نام نویسنده مسئول: رضا رستمی‌نیا

نشانی نویسنده مسئول: اهواز - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از ادوات الکترونیک قدرت به عنوان درایو ماشین‌های الکتریکی، افزایش چشمگیری داشته است. مزایای استفاده از این ادوات به منظور درایو ماشین‌های الکتریکی از جمله کنترل بهتر سرعت و راندمان بالاتر آن‌ها، بر کسی پوشیده نیست. با این حال، مطالعات و بررسی‌ها در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که ماشین‌های الکتریکی که در آن‌ها از ادوات الکترونیک قدرت استفاده شده است، دارای طول عمر کم‌تری نسبت به دیگر ماشین‌ها می‌باشند [۵-۱].

علت پیری زودرس ماشین‌های الکتریکی تحت درایو ادوات الکترونیک قدرت، مرتبط با ویژگی پالس‌های تولیدشده در این ادوات می‌باشد. این ویژگی‌ها به صورت زمان خیز بسیار سریع پالس‌ها، نرخ بالای تکرار پالس‌های ولتاژی مدولاسیون عرض پالس (PWM) و در نهایت میزان فراجش ولتاژی تولیدشده در هر پالس PWM خلاصه می‌گردند [۶]. به طور کل هر چه زمان خیز پالس‌های ولتاژی کوتاه‌تر باشد، در طیف فرکانسی شکل موج آن‌ها، مولفه‌های فرکانس بالای بیش‌تری حضور خواهد داشت. مولفه‌های فرکانس بالای ولتاژی، رفتار متفاوت اجزاء سیم‌پیچی را در پی خواهد داشت. زمان خیز بسیار سریع پالس‌ها، منجر به توزیع غیرخطی ولتاژ در سیم‌پیچی ماشین می‌گردد. در این حالت، توزیع ولتاژ به گونه‌ای خواهد بود که قسمت اعظم آن (در حدود ۹۰٪)، بر روی دور اول از سیم‌پیچی ماشین قرار می‌گیرد و در این صورت تنش بیش‌تری به دور اول سیم‌پیچی وارد می‌شود [۶]. فراجش ولتاژی در اثر انعکاس امواج گذرا ناشی از تفاوت امپدانس بین کابل اتصال اینورتر با موتور و امپدانس مشخصه سیم‌پیچی موتور می‌باشد.

هر یک از ویژگی‌های نام برده شده از پالس‌ها، به نوعی می‌توانند در تسریع فرآیند پیری عایق ماشین‌های الکتریکی نقش داشته باشند. به طور کلی محققین، تسریع پیری الکتریکی در عایق ماشین را ناشی از دو پدیده فیزیکی، تشکیل بارهای فضایی و وقوع تخلیه جزئی (PD)^۳ در درون عایق می‌دانند. در ارتباط با چگونگی انباشتگی بارهای فضایی در درون عایق کارهای قابل توجهی انجام شده است [۷ و ۸]. انباشتگی بارهای فضایی و تراکم آن‌ها در درون عایق می‌تواند باعث تغییر یکنواختی شدت میدان الکتریکی اعمال شده به نقاط مختلف عایق گردد و در نهایت افزایش تنش اعمال شده می‌تواند باعث شکستگی پیوند بین مولکول‌ها شده و پیری زودرس عایق را به همراه داشته باشد [۹-۱۱]. از طرف دیگر وقوع تخلیه‌های جزئی در درون عایق می‌تواند باعث شکسته شدن زنجیره‌های مولکولی ماده عایق شده و به مرور تضعیف خواص عایقی را در پی داشته باشد. در سال‌های اخیر، در زمینه اندازه‌گیری تخلیه جزئی تحت پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت، کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است [۱۲ و ۱۳]. حتی در این زمینه استانداردهایی نیز به ثبت رسیده است که از آن‌ها می‌توان به [۱۴ و ۱۵] اشاره داشت. نکته‌ای که می‌بایست مورد توجه قرار

گیرد، میزان تاثیر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت در پیری عایقی است. اگر عامل پیری زودرس در عایق ماشین در اثر درایو، دو پدیده بار فضایی و تخلیه جزئی در نظر گرفته شود، از این‌رو میزان تاثیر پارامترهای مختلف شکل موج این پالس‌ها بر تخلیه جزئی، می‌تواند بیانگر تاثیر آن‌ها بر میزان پیری عایقی باشد. تاکنون در هیچ مقاله‌ای، فعالیتی در ارتباط با شبیه‌سازی تخلیه جزئی، متاثر از پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت صورت نگرفته است. مدل‌سازی این پدیده، می‌تواند کمک شایانی به شناخت هر چه بیش‌تر تاثیر پارامترهای مختلف پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت، بر روی پدیده تخلیه جزئی داشته باشد. از این رو، در این مقاله سعی بر آن شده است تا با ارائه مدلی ریاضی مبتنی بر فیزیک تخلیه جزئی، نقش پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت در وقوع تخلیه‌های جزئی در درون عایق ماشین‌های الکتریکی مورد مطالعه قرار گیرد.

برای این منظور، از مدل دو الکتروود موازی با صفحه تخت و عایقی در بین آن استفاده شده است. در مدل ارائه شده، بررسی وقوع تخلیه جزئی ناشی از پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت، مبتنی بر محاسبات شدت میدان الکتریکی با استفاده از روش اجزاء محدود، می‌باشد. برای اساس از نرم افزار COMSOL MultiphysicsTM 3.5a جهت محاسبات شدت میدان الکتریکی در هر مکان از عایق، که هم‌زمان در اتصال با نرم‌افزار MATLAB جهت پیاده‌سازی الگوریتم وقوع تخلیه جزئی می‌باشد، استفاده شده است. در نهایت با توجه به روش پیشنهادی، تاثیر هر یک از ویژگی‌های پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت، بر رفتار پدیده تخلیه جزئی مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه، در بخش ۲، مقدماتی از مفهوم تخلیه جزئی در عایق‌ها و اصول مدل‌سازی آن اشاره شده است. الگوریتم پیشنهادی جهت مدل‌سازی پدیده تخلیه جزئی و روش محاسبات تخلیه جزئی، در بخش ۳ معرفی می‌شود. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی به همراه تحلیل پیرامون این نتایج ارائه شده و در نهایت در بخش ۵، نتایج کلی از انجام این کار تحقیقاتی ارائه می‌گردد.

۲- تخلیه جزئی و اصول مدل‌سازی آن

تخلیه جزئی، تخلیه‌های موضعی کوچکی می‌باشند که در اثر افزایش شدت میدان الکتریکی از حد آستانه استقامت عایقی ماده، در بعضی از نقاط آن ایجاد شده و به سرعت از بین می‌روند. تخلیه جزئی به هیچ وجه شکست کامل به حساب نمی‌آید اما این تخلیه در اثر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت می‌تواند به مرور باعث تضعیف خواص عایقی ماده شده و در نهایت تخلیه کامل را به همراه داشته باشد. تاکنون کارهای قابل توجهی در زمینه اندازه‌گیری تخلیه جزئی در اثر پالس‌های PWM ارائه شده است [۲۰-۱۶]. اندازه‌گیری پالس‌های تخلیه جزئی در اثر پالس‌های PWM مشکلات خاص خود را به همراه دارد. از این مشکلات می‌توان به تشابه محدوده فرکانسی

۳- روش پیشنهادی محاسبه تخلیه جزئی

به‌منظور شبیه‌سازی تخلیه جزئی، از مدل دو الکتروود صفحه‌ای تخت موازی با عایقی از جنس پلی‌اتیلن که در میان آن حفره‌ای از هوا جای دارد، استفاده شده است. این مدل در شکل شماره (۱) به تصویر کشیده شده است. مشخصات و پارامترهای مدل در ضمیمه آورده شده است. مدل دو الکتروود موازی با صفحه تخت، ساده‌ترین مدل جهت بررسی وضعیت عایقی در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. در این مدل، شدت میدان الکتریکی در قسمت الکتروودها به‌صورت یکنواخت است و در قسمت حفره و مرز میان عایق جامد و حفره، عدم یکنواختی شدت میدان الکتریکی وجود خواهد داشت. علت استفاده از این مدل، کاهش حجم و ساده‌تر شدن محاسبات می‌باشد. گرچه این مدل با ساختار واقعی وضعیت عایقی سیم‌پیچ‌های ماشین الکتریکی، خصوصاً در نواحی انتهایی سیم‌پیچی دارای تفاوت‌هایی است، اما به هر حال بیانگر رفتار عایق سیم‌پیچی ماشین الکتریکی، خصوصاً در نواحی با شدت میدان الکتریکی یکنواخت می‌باشد.

در روش پیشنهاد شده، پنج مرحله برای مدل کردن وقوع تخلیه جزئی ارائه شده است. مرحله اول جمع‌آوری اطلاعات و پارامترهای مدل، مرحله دوم محاسبه پتانسیل الکتریکی در درون حفره و عایق، مرحله سوم تولید الکترون‌های آزاد، مرحله چهارم پروسه تخلیه جزئی و در نهایت مرحله پنجم محاسبه بار و دامنه تخلیه جزئی می‌باشد که در ادامه هر یک از این مراحل شرح داده خواهد شد.

شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، با استفاده از رایانه‌ای با مشخصات ۶ گیگابایت RAM، ظرفیت حافظه ۵۰۰ گیگابایت و CPU چهار هسته‌ای ۲/۸ گیگاهرتز به انجام رسیده است. هم‌چنین طول مدت زمان انجام شبیه‌سازی و جمع‌آوری داده، برای اعمال ۲۰ دقیقه پالس ولتاژ درایو، حدود ۲۴ ساعت می‌باشد. بدیهی است در صورت استفاده از ساختارهای مدلی پیچیده‌تر از وضعیت الکتروود و عایق، محدودیت‌های ذخیره‌سازی اطلاعات و RAM به وجود خواهد آمد.

۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات و پارامترهای مدل

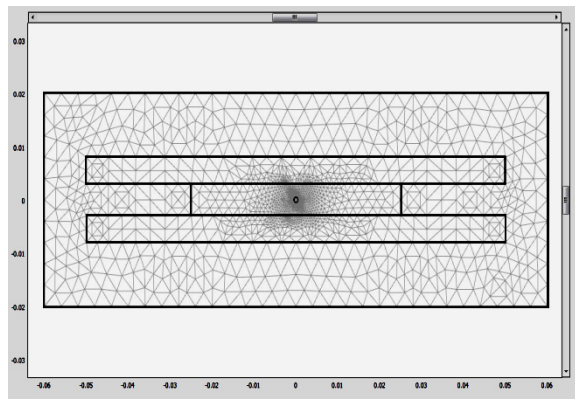
در این مرحله ابتدا ویژگی‌های حفره، عایق در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، مدل موردنظر به‌صورت دو الکتروود صفحه‌ای تخت موازی می‌باشد، که عایق پلی‌اتیلن با حفره‌ای از هوا در درون آن، بین این دو الکتروود قرار گرفته است. در این حالت، به الکتروود بالایی شکل موجی از پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت اعمال می‌گردد. نمونه‌ای از شکل موج ولتاژ اعمالی به الکتروود بالایی در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است. وجود این شکل موج ولتاژ از پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت در ماشین‌های الکتریکی، در [۱۳ و ۱۴] به ثبت رسیده است. این شکل موج در نرم‌افزار MATLAB تولید شده و در آن قابلیت تغییر در پارامترهای مختلف، از جمله زمان خیز پالس‌ها، نرخ تکرار پالس‌ها و میزان فراجش ولتاژی وجود دارد.

هارمونیک‌های ولتاژی با فرکانس پالس‌های وقوع تخلیه جزئی نام برد و از آن جهت که پالس‌های ولتاژی دارای دامنه بسیار بزرگ‌تری در مقایسه با پالس‌های تخلیه جزئی می‌باشند، فیلترکردن و تفکیک آن‌ها نیازمند روش‌های اندازه‌گیری و فیلترینگ پیشرفته می‌باشد. از این رو با دستگاه‌های اندازه‌گیری تخلیه جزئی متعارف، نمی‌توان این پدیده را در اثر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت اندازه‌گیری نمود. با توجه به این مسئله، می‌توان با استفاده از مدل‌سازی مناسب تخلیه جزئی، به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی این پدیده پرداخت.

پیش از پرداختن به بحث مدل‌سازی تخلیه جزئی، لازم است ابتدا شرایط وقوع تخلیه جزئی مورد بررسی قرار گیرد. وقوع تخلیه جزئی در درون عایق مستلزم برقراری دو شرط زیر می‌باشد که عدم برقراری هر یک از آن‌ها، می‌تواند باعث عدم برقراری تخلیه جزئی گردد. این دو شرط عبارتند از:

- ۱- وجود بارهای الکتریکی و الکترون‌های آزاد در درون عایق
- ۲- بالاتر بودن شدت میدان الکتریکی از حد آستانه وقوع تخلیه جزئی در ماده عایقی

تاکنون روش‌های زیادی به منظور مدل‌سازی پدیده تخلیه جزئی معرفی شده است. بعضی از این روش‌ها مبتنی بر روابط فیزیکی و شیمیایی تولید الکترون [۲۴-۲۱] و بعضی دیگر، براساس روابط ریاضی ساده‌شده از تولید الکترون در درون ماده، می‌باشند [۲۵]. به‌طور کلی، در هر نوع مدل‌سازی تخلیه جزئی برقراری دو شرط نام برده شده ضروری می‌باشد. از این‌رو فرآیند مدل‌سازی تخلیه جزئی نیازمند محاسبه شدت میدان الکتریکی و تخمین بارهای آزاد در درون ماده می‌باشد. از نقطه نظر تئوری، روش‌های عددی مختلفی جهت محاسبه پتانسیل الکتریکی و شدت میدان الکتریکی در درون عایق وجود دارد، که از جمله آن‌ها می‌توان به روش تفاضل محدود (FDM)، روش اجزای محدود و روش بارهای فرضی جهت حل معادلات پواسون اشاره داشت [۲۶]. از نقطه نظر ایجاد بارهای آزاد، همان‌طور که پیش از این اشاره شد، روابط گوناگونی پیشنهاد شده است. به‌طور کلی، ایجاد بارهای آزاد در درون حفره به عوامل متعددی از جمله فشار گاز در درون حفره، دمای گاز در درون حفره، میزان ولتاژ اعمال‌شده به حفره و شدت میدان الکتریکی در درون آن، ضرایب یونیزاسیون اولیه و ثانویه و دیگر عوامل بستگی دارد [۲۱ و ۲۲]. از طرفی استفاده از روابط پیچیده می‌تواند باعث افزایش قابل توجه حجم محاسبات گردد. در صورت استفاده از روابط ساده‌تر و دست‌یابی به نتایج قابل قبول و انحراف ناچیز نسبت به نتایج با روابط پیچیده‌تر، می‌توان به‌طور قابل ملاحظه‌ای از حجم محاسبات کاست. از این رو با در نظر گرفتن شرایط نرم‌افزاری موجود، می‌توان مصالحه‌ای بین این شرایط ایجاد کرد.



شکل (۳): مش‌بندی مدل پیشنهاد شده در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

۳-۳- تولید الکترون‌های آزاد

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، وقوع تخلیه جزئی زمانی صورت می‌گیرد که الکترون‌های آزاد در محل حضور داشته باشند. روش‌های متفاوتی برای تولید الکترون در نظر گرفته می‌شود. بعضی از این روابط پیچیده و دارای حجم محاسباتی بالا هستند و بعضی دیگر به‌صورت مختصر شده می‌باشند. در این پژوهش از رابطه (۲) به عنوان رابطه تولید الکترون‌های اولیه در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$N_e(t) = N_{e0} \exp\left(\left| \frac{V_{cav}(t)}{V_{PDIV}} \right| \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲) نرخ تولید الکترون $N_e(t)$ به صورت تابعی نمایی از ولتاژ دو سر حفره تعریف می‌شود. ولتاژ $V_{cav}(t)$ و ولتاژ محاسبه شده در دو سر حفره بر حسب زمان و ولتاژ آستانه وقوع تخلیه جزئی و N_{e0} ضریب ثابت نرخ تولید الکترون می‌باشد.

پدیده تخلیه جزئی، پدیده‌ای تصادفی می‌باشد و حتی با برقراری شرایط شامل وجود الکترون‌های آزاد کافی و افزایش پتانسیل الکتریکی از حد پتانسیل الکتریکی آستانه وقوع تخلیه جزئی، نیز ممکن است تخلیه جزئی اتفاق نیافتد. از این رو برای تشخیص وقوع تخلیه جزئی می‌بایست از توابع احتمال برای تشخیص وقوع تخلیه جزئی استفاده کرد. برای این منظور از تابع چگالی احتمال وقوع تخلیه جزئی $F(t)$ استفاده می‌شود. این رابطه به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t N_e(t') dt'\right) \quad (3)$$

پس از حصول شرایط لازم جهت وقوع تخلیه جزئی و محاسبه این تابع، مقدار $F(t)$ با عدد تصادفی R که بین $[0,1]$ در هر مرحله تولید می‌شود، مقایسه خواهد شد. اگر مقدار تابع $F(t)$ بزرگ‌تر از R باشد، به معنی وقوع تخلیه جزئی خواهد بود. در واقع این عمل تصادفی بودن وقوع تخلیه جزئی را نشان خواهد داد.

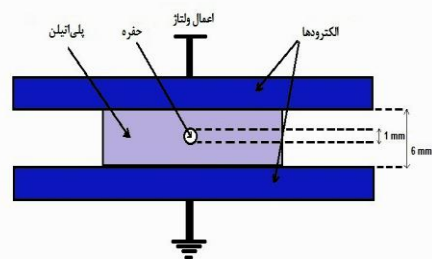
۲-۳- محاسبه پتانسیل الکتریکی در درون حفره و عایق

در این مرحله پتانسیل الکتریکی در درون حفره و عایق توسط رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

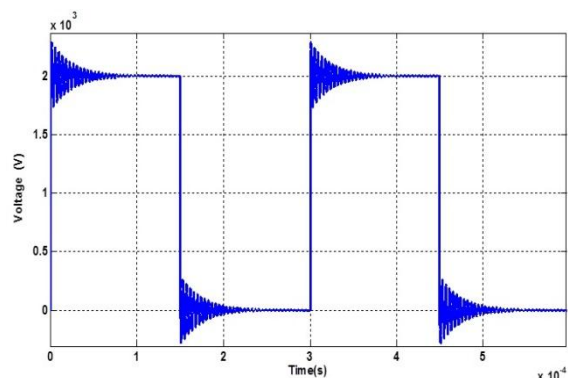
$$\nabla \cdot \left(-\sigma \nabla V - \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) \right) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V بیانگر پتانسیل الکتریکی، σ ضریب رسانایی ماده و ϵ_0 و ϵ_r به ترتیب ضریب دی‌الکتریک هوا و ماده عایقی می‌باشد. به‌منظور حل رابطه (۱) و محاسبه پتانسیل الکتریکی، از نرم‌افزار COMSOL MultiphysicsTM 3.5a و روش FEM استفاده شده است. برای این منظور مش‌بندی مدل با ساختاری مثلثی به‌صورت شکل (۳) اعمال می‌گردد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است در نزدیکی حفره که وقوع PD در این نواحی مدنظر می‌باشد، مش‌بندی بسیار ریزتر و با تعداد بیش‌تری در نظر گرفته شده است. تعداد کل مش‌های در نظر گرفته‌شده در مش‌بندی ۴۸۲۴۳ مش می‌باشد.

برای به‌دست آوردن شرایط مرزی در حل رابطه (۱)، ابتدا معادله با فرض شرایط مرزی صفر، یک بار حل شده و سپس مقادیر حاصله به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ اعمالی به الکتروده بالایی به صورت شکل (۲) خواهد بود و الکتروده پایینی زمین می‌باشد. با اجرای همزمان نرم‌افزار COMSOL و MATLAB، این شکل موج به مدل در نظر گرفته‌شده در محیط COMSOL اعمال می‌گردد. شرط وقوع تخلیه جزئی در مرحله اول، بزرگ‌تر بودن پتانسیل الکتریکی در درون حفره از مقدار ولتاژ آستانه وقوع تخلیه جزئی در درون حفره می‌باشد.



شکل (۱): ساختار مدل مورد مطالعه



شکل (۲): شکل موج پالس‌های ولتاژی اعمال شده به الکتروده بالایی

۳-۴- پروسه تخلیه جزئی

هنگام وقوع تخلیه جزئی در درون ماده، تغییراتی از لحاظ ویژگی‌های ماده در آن به وقوع می‌پیوندد. در این مرحله برای نشان دادن وقوع تخلیه جزئی، از افزایش ضریب رسانایی استفاده شده است. جهت نشان دادن این مسئله، از افزایش ضریب رسانایی ماده در هنگام وقوع تخلیه جزئی استفاده شده است. به این معنی که هر زمان تشخیص داده شد فرآیند تخلیه جزئی در حال وقوع است (بزرگ‌تر بودن پتانسیل الکتریکی در درون حفره از ولتاژ آستانه وقوع تخلیه جزئی و بزرگ‌تر بودن $F(t)$ از عدد R)، ضریب رسانایی افزایش یافته و پس از متوقف شدن وقوع تخلیه جزئی، این ضریب مجدداً کاهش می‌یابد.

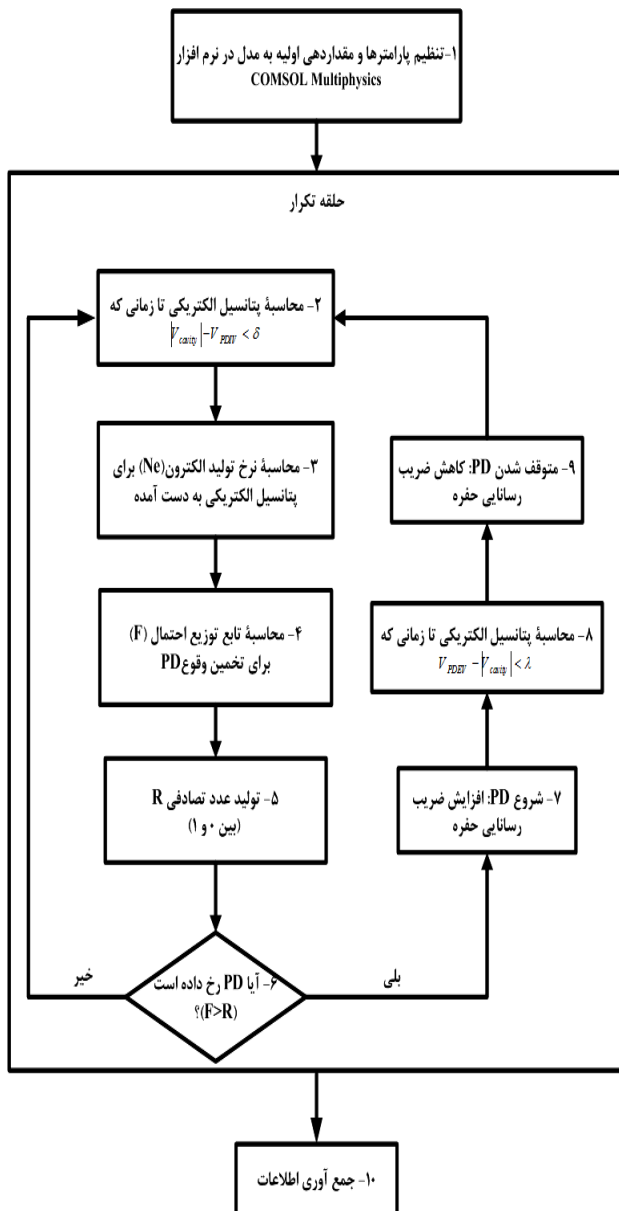
۳-۵- محاسبه بار و دامنه تخلیه جزئی

با وقوع تخلیه جزئی در درون حفره، جریان الکتریکی برقرار خواهد شد. برای محاسبه دامنه بار تخلیه جزئی رخ داده، کافی است از جریان عبوری از حفره، در بازه زمانی وقوع آن انتگرال‌گیری شود. برای این منظور، می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد که در آن q مقدار دامنه تخلیه جزئی رخ داده خواهد بود.

$$q = \int_{t_{start}}^{t_{stop}} i(t) dt \quad (4)$$

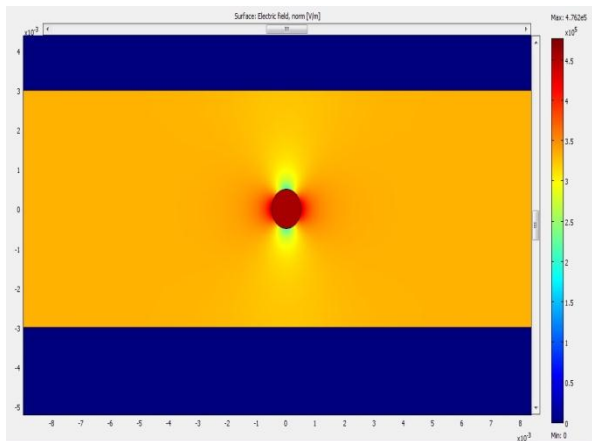
این پنج مرحله از فرآیند وقوع تخلیه جزئی، به صورت الگوریتم شکل (۴) خلاصه می‌گردد. برای پیاده‌سازی این الگوریتم از اتصال هم‌زمان نرم‌افزار COMSOL با MATLAB استفاده شده است، که در آن محاسبات پتانسیل الکتریکی توسط نرم‌افزار COMSOL محاسبه شده و اجرای الگوریتم به وسیله نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، در گام اول از پروسه مدل‌سازی، دریافت اطلاعات لازم در خصوص ویژگی مواد و شرایط مرزی حفره و اعمال پالس‌های ولتاژی به الکترود بالایی در نظر گرفته می‌شود. در گام دوم، محاسبه اختلاف پتانسیل الکتریکی صورت می‌گیرد. در هر پله زمانی از پروسه شبیه‌سازی، این محاسبه توسط حل رابطه (۱) و با استفاده از روش FEM صورت گرفته و مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار V_{PDIV} ، که بیانگر میزان پتانسیل الکتریکی آستانه وقوع تخلیه جزئی است، مقایسه می‌گردد. این مقایسه تا زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر حفره از میزان V_{PDIV} به اندازه δ بیشتر نباشد، ادامه می‌یابد. با حصول شرط $|V_{cavity} - V_{PDIV}| < \delta$ محاسبه پتانسیل الکتریکی در درون حفره متوقف شده و پروسه شبیه‌سازی وارد گام سوم خواهد شد. در این حالت، شرایط لازم یعنی بیش‌تر بودن شدت میدان الکتریکی از حد آستانه استقامت الکتریکی حفره جهت وقوع تخلیه جزئی، ایجاد می‌شود که باید توجه داشت این شرط کافی نیست. جهت وقوع تخلیه جزئی علاوه بر افزایش شدت میدان الکتریکی از حد آستانه تحمل استقامت عایقی، میزان بار مورد نیاز در درون حفره نیز باید به نوعی تامین گردد.

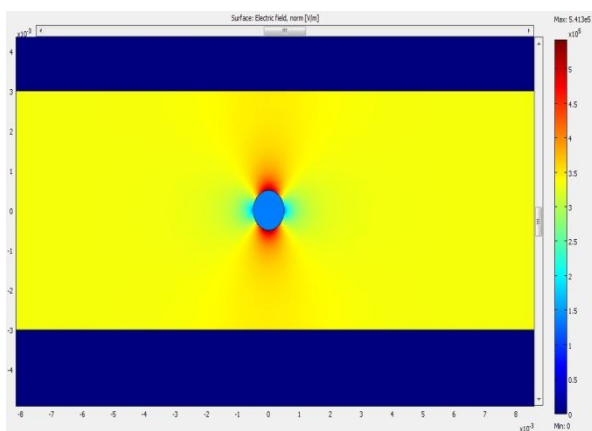


شکل (۴): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه تخلیه جزئی

از این رو در گام سوم، با توجه به رابطه (۲) نرخ تولید الکترون‌های آزاد محاسبه می‌گردد. در گام چهارم تابع چگالی احتمال وقوع تخلیه جزئی محاسبه و در گام پنجم عدد تصادفی R تولید می‌گردد. در گام ششم، تصادفی بودن پروسه PD، با مقایسه تابع چگالی احتمال وقوع PD با عدد تصادفی R حاصل شده و بیش‌تر بودن F نسبت به R ، به معنای وقوع PD تلقی خواهد شد. در حین وقوع PD، با افزایش میزان ضریب رسانایی درون حفره، شدت میدان الکتریکی مجدداً توسط رابطه (۱) محاسبه شده و این عمل تا برقراری شرط $|V_{PDEV} - V_{cavity}| < \lambda$ به معنی کم‌تر شدن اختلاف پتانسیل الکتریکی در درون حفره از حد خاموشی PD ادامه خواهد داشت. V_{PDEV} اختلاف پتانسیل الکتریکی خاموشی PD خواهد بود. برقراری این شرط در گام هشتم، به معنای متوقف شدن فرآیند وقوع PD می‌باشد. در



شکل (۶): نمایش گرافیکی شدت میدان الکتریکی در درون حفره پیش از وقوع تخلیه جزئی



شکل (۷): نمایش گرافیکی شدت میدان الکتریکی در درون حفره هنگام وقوع تخلیه جزئی

جدول (۱): تاثیر نرخ تکرار پالس‌های ولتاژی در رفتار تخلیه جزئی در درون حفره

پالس‌های PWM ۱/۵ kHz	پالس‌های PWM ۱ kHz	پالس‌های PWM ۰/۵ kHz	ولتاژ سینوسی ۵۰ Hz	فرکانس ولتاژ اعمال شده
۳/۱	۲/۲	۱/۵	۰/۵	تعداد متوسط تخلیه‌های جزئی در هر سیکل
۱/۸	۲	۲/۱	۰/۷۵	دامنه متوسط پالس‌های PD (nC)

جدول (۲): رابطه بین زمان خیز پالس‌های ولتاژی اعمال شده با وقوع تخلیه‌های جزئی

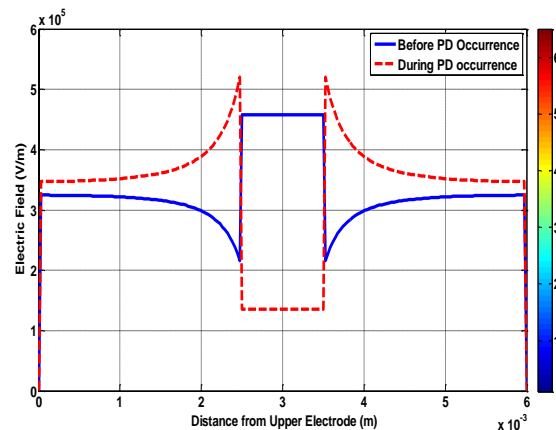
زمان خیز پالس‌های PWM (ns)	۱۵۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۵۰
تعداد متوسط تخلیه‌های جزئی در هر سیکل	۴	۳/۱	۲/۲	۱/۵
دامنه متوسط پالس‌های PD (nC)	۲	۱/۸	۱/۹	۱/۸

نتیجه با حصول این شرط، میزان ضریب رسانایی حفره به مقدار اولیه پیش از وقوع تخلیه کاهش می‌یابد. با کاهش ضریب رسانایی حفره در گام نهم، مجدداً فرآیند محاسبه پتانسیل الکتریکی توسط رابطه (۱) هم چنان ادامه می‌یابد. پس از پایان مدت زمان اعمال ولتاژ به الکتروود بالایی، نتایج حاصل از وقوع پالس‌های تخلیه جزئی جمع‌آوری می‌شوند.

۴- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، تخلیه جزئی زمانی اتفاق می‌افتد که شدت میدان الکتریکی در درون حفره از حد استقامت عایقی حفره بیش‌تر گردد. در شکل (۵) شدت میدان الکتریکی در درون حفره پیش از وقوع تخلیه جزئی و در هنگام وقوع تخلیه جزئی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل (۶) نمایش گرافیکی شدت میدان الکتریکی در درون حفره پیش از وقوع تخلیه جزئی به‌تصویر کشیده شده است. در شکل (۷)، نمایش گرافیکی شدت میدان الکتریکی در درون حفره و در هنگام وقوع تخلیه جزئی نمایش داده شده است.

جدول شماره (۱)، تاثیر نرخ تکرار پالس‌های ولتاژی را در وقوع تخلیه جزئی نشان می‌دهد. برای مشاهده بهتر تاثیر نرخ تکرار پالس‌ها در رفتار PD، چهار نوع ولتاژ در نظر گرفته شده است، که این چهار نوع به ترتیب، ولتاژ با شکل موج سینوسی استاندارد با فرکانس ۵۰ هرتز و سه نوع دیگر مشابه با شکل (۲) و با فرکانس‌های تکرار ۱، ۰/۵ و ۱/۵ کیلوهرتز با حداکثر دامنه ۱ p.u در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از نتایج جدول (۱) مشخص است، افزایش فرکانس تکرار پالس‌ها، تاثیر قابل توجهی در تعداد و هم‌چنین دامنه پالس‌های PD داشته است. به این صورت قابل توجه است که با افزایش فرکانس نرخ تکرار پالس‌ها از ۵۰ هرتز به مقادیر نظیر ۱ کیلوهرتز، مدت زمان لازم برای عکس‌العمل ماده و پلاریزاسیون هم‌زمان آن با تغییر پلاریته ولتاژ اعمالی، وجود ندارد. از این رو درصدی از بار فضایی ایجاد شده در درون ماده، به‌صورت انباشته در درون ماده باقی می‌ماند. این بار می‌تواند تعداد PD رخ داده و هم‌چنین دامنه آن در هر سیکل را افزایش دهد.



شکل (۵): مقایسه توزیع میدان الکتریکی در درون حفره قبل و در حین وقوع تخلیه جزئی

جدول (۳): رابطه بین میزان فراجش پالس‌های ولتاژی و فعالیت PD در درون حفره

دامنه مقدار فراجش در هر پالس (p.u)	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۷۵
تعداد متوسط تخلیه‌های جزئی در هر سیکل	۱/۵	۲/۲	۳/۱	۴
دامنه متوسط پالس‌های PD (nc)	۱/۵	۱/۵	۱/۸	۱/۹

در جدول شماره (۲)، تاثیر زمان خیز پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت، در تعداد و دامنه پالس‌های تخلیه جزئی نشان داده شده است. در این حالت، فرکانس نرخ تکرار پالس‌ها ۱/۵ کیلوهرتز با فراجش ولتاژی ۱/۵ p.u و زمان خیزهای ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است، با افزایش میزان زمان خیز پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت، تعداد پالس‌های تخلیه جزئی رخ داده کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش در زمان خیز، تاثیر چندانی در دامنه پالس‌های تخلیه جزئی ندارد. علت این مسئله را می‌توان به کاهش مقدار ولتاژ آستانه وقوع تخلیه جزئی، بر اساس کاهش زمان خیز پالس ولتاژ اعمال شده به عایق نسبت داد.

در جدول (۳)، رابطه میان فراجش ولتاژی با PD رخ داده نشان داده شده است. از این رو شکل موج ولتاژی با مقادیر فراجش ۱، ۱/۲۵، ۱/۵ و ۱/۷۵ پریونیت، با فرکانس نرخ تکرار ۱/۵ کیلوهرتز و زمان خیز ۲۵۰ نانوثانیه اعمال شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش میزان فراجش ولتاژی (ناشی از اختلاف امپدانس بین کابل اتصال اینورتر با موتور و امپدانس مشخصه سیم‌پیچی موتور)، تعداد میانگین و دامنه وقوع تخلیه جزئی در هر سیکل، افزایش قابل توجهی می‌یابد. علت این امر افزایش هر چه بیشتر شدت میدان از حد استقامت الکتریکی حفره، در اثر اعمال بیشتر ولتاژ می‌باشد. همچنین تعداد الکترون ایجاد شده در درون حفره نیز، به صورت نمایی با پتانسیل الکتریکی دو سر حفره رابطه خواهد داشت. از این رو توزیع هر چه بیشتر پتانسیل الکتریکی در دو سر حفره می‌تواند احتمال وقوع PD را نیز افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

تخلیه جزئی یکی از عوامل پیری زودرس در عایق ماشین‌های الکتریکی تحت پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت است. برای مشاهده اثر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت، تخلیه جزئی در درون حفره با استفاده از روش اجزاء محدود مدل شده است. برای این منظور از اتصال نرم‌افزار COMSOL Multiphysics™ 3.5a با نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مدل‌سازی ارائه شده مبتنی بر محاسبات شدت میدان الکتریکی در درون حفره و تولید الکترون می‌باشد. بر این اساس، نشان داده شده است که با افزایش نرخ تکرار

پالس‌های ولتاژی، میزان وقوع تخلیه جزئی افزایش می‌یابد. دامنه پالس‌های تخلیه، در حالت اعمال شکل موج سینوسی ۵۰ هرتز به میزان قابل توجهی کم‌تر از دامنه پالس‌های PD در اثر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش زمان خیز پالس‌های ولتاژی، تعداد تخلیه‌های جزئی رخ داده در درون حفره کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد میزان دامنه پالس‌های تخلیه جزئی، به ازای تغییرات زمان خیز پالس‌ها تفاوت محسوسی نداشته است. علت این پدیده را می‌توان وابستگی آستانه پتانسیل الکتریکی وقوع تخلیه جزئی به زمان خیز پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت نسبت داد. همچنین با افزایش میزان فراجش ولتاژی در هر پالس از ولتاژ اعمال شده، تعداد و میزان دامنه تخلیه‌های جزئی در هر سیکل به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به صورت افزایش بیشتر شدت میدان الکتریکی در درون حفره و همچنین افزایش نرخ تولید الکترون در درون حفره توجیه نمود.

نکته‌ای که می‌تواند در ادامه این کار تحقیقاتی پیشنهاد گردد، انجام آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری تخلیه جزئی در اثر پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. برای این منظور، دو نکته باید مورد توجه قرار گیرد. نکته اول بحث تولید پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت با قابلیت کنترل زمان خیز و میزان فراجش ولتاژ، و نکته دوم بحث اندازه‌گیری پالس‌های تخلیه جزئی در کنار پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد؛ که متفاوت با شیوه اندازه‌گیری متعارف تخلیه جزئی ناشی از ولتاژ AC است. در حال حاضر، در کشور دستگاه مولد پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت و همچنین دستگاه اندازه‌گیری تخلیه جزئی تحت پالس‌های ادوات الکترونیک موجود نمی‌باشد و ساخت این دستگاه‌ها می‌تواند به عنوان موضوع تحقیقاتی پیشنهاد گردد.

ضمیمه

مشخصات مواد و ویژگی پالس اعمال شده در مدل مورد شبیه‌سازی به صورت جدول زیر می‌باشد.

نام	مقدار
دامنه ولتاژ اعمال شده (kV)	۲
میزان فراجش ولتاژ هر پالس (pu)	۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵
پله‌های زمانی شبیه‌سازی (ms)	۱
$(s^{-1}) N_{e0}$	۱۰
ضریب دی‌الکتریک پلی‌اتیلن	۲/۲۵
ضریب رسانایی پلی‌اتیلن (S/m)	10^{-15}
ضریب دی‌الکتریک حفره	۱
ضریب رسانایی حفره پیش از وقوع PD (S/m)	۰
ضریب رسانایی حفره هنگام وقوع PD (S/m)	10^{-4}
λ, δ	٪۱

مراجع

- [15] "IEC TS 60034-18-42: Rotating electrical machines - Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from Voltage converters," ed, 2008.
- [16] D. Fabiani and G. C. Montanari, "the effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation systems under partial discharge activity," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 3, May/June 2001.
- [17] M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck and M. Eberhardt, "Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed LV-motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 2, pp. 396-402, 2000.
- [18] M. Tozzi, A. Cavallini and G. C. Montanari, "Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors - part 1: standard procedure," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, No. 4, July/August 2010.
- [19] M. Tozzi, A. Cavallini and G. C. Montanari, "Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors - part 2: testing," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 27, No. 1, Jan/Feb 2011.
- [20] M. Tozzi, A. Cavallini and G. C. Montanari, "Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors - part 3: criticality," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 27, No. 4, July/August 2011.
- [21] L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modeling," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, pp. 510-528, 1995.
- [22] C. Heitz, "A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 32, No. 9, pp. 1012-1023, 1999.
- [23] M. Hoof and R. Patsch, "A physical model, describing the nature of partial discharge pulse sequences," In Proceedings of Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 283-286, 1997.
- [24] R. Patsch and F. Berton, "Pulse sequence analysis - a diagnostic tool based on the physics behind partial discharges," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 35, No. 1, pp. 25-32, 2002.
- [25] H. A. Illias, G. Chen and P. L. Lewin, "Modelling of cycle to cycle behaviour for partial discharge events within a spherical cavity in a solid dielectric material by using finite element analysis," International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
- [۲۶] حسین محسنی، مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی، تهران، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۱۳۸۹.
- [1] G. C. Stone, K. Boulter, I. Culber and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, Wiley-IEEE Press, pp. 157-161, 2004.
- [2] B. K. Gupta, B. A. Lloyd and D. K. Sharma, "Degradation of turn insulation in motor coils under repetitive surges," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 2, June 1990.
- [3] D. Fabiani, A. Cavallini and G.C. Montanari, "Aging investigation of motor winding insulation subjected to PWM-supply through PD measurements," 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [4] M. Kaufhold, G. Borner, M. Eberhardt and J. Speck, "Failure mechanism of low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No. 5, pp. 9-15, September 1996.
- [5] N. Weijuyni, "failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 6, Nov.-Dec. 1997.
- [6] J. C. G. Wheeler, "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium Voltage motors," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, pp. 22-29, 2005.
- [7] M. Fu, L. A. Dissado, G. Chen and J. C. Fothergill, "Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 3, June 2008.
- [8] S. U. Haq, S. H. Jayaram and E. A. Cherney, "Evaluation of medium voltage enameled wire exposed to fast repetitive voltage pulses," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1, February 2007.
- [۹] رستمی‌نیا رضا، اکبری اصغر، شکری شکرالله و شادمند مهدی، «نقش بارهای فضایی ایجاد شده ناشی از پالس‌های ادوات الکترونیک قدرت در پیری عایق ماشین‌های الکتریکی»، نوزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران ۱۳۹۰، صفحه ۱۰۵۵-۱۰۶۰.
- [۱۰] رستمی‌نیا رضا، اکبری اصغر، شکری شکرالله و قلی‌زاده امیر، «مقایسه میزان تاثیر بارهای فضایی انباشته شده در عایق به ازای ولتاژ اعمالی DC و پالس‌های ولتاژی ادوات الکترونیک قدرت در پیری عایق ماشین‌های الکتریکی»، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق ۱۳۹۰.
- [11] R. Rostaminia, A. Akbari, S. Shokri and M. Shadmand, "Space charges accumulated within the insulation and adjustable speed drives pulses," XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, ISH 2011.
- [12] T. J. Kang, J. Hong, S. B. Lee and Y. W. Yoon, "The influence of the rotor on surge pd testing of low voltage AC motor stator windings," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 3, pp. 762-769, 2013.
- [13] B. Florkowska, J. Roehrich, P. Zydron and M. Florkowski, "Measurement and analysis of surface partial discharges at semi-square voltage waveforms," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 4, pp. 990-996, 2011.
- [14] "IEC 60034-18-41: Rotating electrical machines - Part 18-41: Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from Voltage converters," ed, 2006.

زیر نویس‌ها

¹ Finite Element Method

² Pulsed Width Modulation

³ Partial Discharge

⁴ Finite Difference Method