دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق قدرت

شبیه سازی و تشخیص تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانس به کمک شبکه‌های عصبی

نگارش

حامد نفیسی

استاد راهنما

دکتر مهرداد عابدی

استاد مشاور:

دکتر گئورگ قره‌پتیان

دکتر محمدباقر منهاج

آذرماه ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ: ۸۷/۰۷/۱۷
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: حامد نفیسی — دانشجوی آزاد ● — بورسیه ○ — معادل ○
شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۳۱۳۴ — دانشکده: برق — رشته تحصیلی: مهندسی برق — گروه: قدرت

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر مهرداد عابدی — درجه و رتبه: استاد
نام و نام خانوادگی: — درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: دکتر گئورگ قره پتیان — درجه و رتبه: استاد
نام و نام خانوادگی: دکتر محمد باقر منهاج — درجه و رتبه: استاد

عنوان پایان‌نامه به فارسی : شبیه سازی و تشخیص تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانس به کمک شبکه‌های عصبی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Partial discharge detection in transformer winding with neural network

نوع پروژه: کارشناسی○ — ارشد● — دکترا ○ — سال تحصیلی: ۸۷-۸۸
کاربردی ● — بنیادی ○ — توسعه‌ای ● — نظری○

تاریخ شروع : ۸۶/۲ — تاریخ خاتمه : ۸۷/۹ — تعداد واحد : ۶ — سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: سیم‌پیچ ترانسفورماتور، شبکه عصبی Fuzzy ARTmap، شبکه Bayesian، مدل مشروح
واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Transformer winding, Fuzzy ARTmap Neural Network, Baysian Network, Detailed Model

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۰۷	تصویر● جدول● نمودار ○ نقشه ○ واژه‌نامه ○		تعداد مراجع ۶۸	تعداد صفحات ضمائم -
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ●	انگلیسی ●
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ: ۸۷/۰۷/۱۷**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه
۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

چکیده

ترانسفورماتورها تجهیزاتی حیاتی در سطح انتقال و توزیع در شبکه‌های قدرت هستند و سهم بزرگی از سرمایه‌گذاری سیستم‌های قدرت را به خود اختصاص می‌دهند. بروز خطا در این تجهیزات باعث قطع برق و در نتیجه مضرات اقتصادی بسیاری می‌گردد. بسیاری از خطاهای منجر به خروج ترانسفورماتورها مربوط به سیستم عایق‌بندی آن‌ها می‌باشد و تخلیه جزئی که به صورت تدریجی باعث نابودی عایق می‌شود، مهم‌ترین منبع خطا در عایق ترانسفورماتورها می‌باشد. تشخیص محل این خطا قسمت عمده‌ای از هزینه‌های تعمیر را کاهش می‌دهد. با توجه به این موضوع تحقیقات بسیاری در این رابطه انجام شده و یا جاری است.

روش‌های مکان‌یابی منبع تخلیه جزئی دارای اهمیت خاصی برای نگهداری و تعمیر ترانسفورماتورها می‌باشد. این پایان‌نامه روشی نوین برای تشخیص مکان تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتورها به کمک شبکه عصبی Fuzzy ARTmap و Bayesian ارائه می‌کند. در این پایان‌نامه از مدل مشروح برای شبیه‌سازی ترانسفوماتور استفاده شده است. با مدلسازی منبع پالس‌های تخلیه جزئی، این پدیده در مکان‌های مختلف سیم‌پیچ ترانسفورماتور به کمک نرم افزار EMPT شبیه‌سازی شده است. سپس جریان ایجاد شده در سر سیم‌پیچی و نقطه نول اندازه‌گیری شده و جهت آموزش و آزمون شبکه عصبی از آن‌ها استفاده شده است. در ادامه تخلیه جزئی در عایق بین حلقه‌ها بررسی شده است. در این راستا مکانیزم پدیده تخلیه جزئی به کمک نرم‌افزار EMTP مدل‌سازی شده است. سپس سیم‌پیچ تحت تست ضربه قرار گرفته است و جریان نقطه نول سیم‌پیچی ثبت شده است و در نهایت از شبکه‌های عصبی ذکر شده جریان نقطه نول تحلیل و بررسی شده است. با توجه به اینکه در واقعیت موج‌های ثبت شده دارای نویز می‌باشند، به همین دلیل با اعمال نویزهای مختلف بر روی شکل موج‌های شبیه‌سازی شده می‌توان حالت واقعی را تجربه نمود و پاسخ شبکه عصبی مورد استفاده در این پایان‌نامه را جهت تشخیص صحیح مکان تخلیه جزئی را با وجود نویز بدست آورد. شبکه عصبی بکار رفته برای آموزش و آزمون الگوهای تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور Fuzzy ARTmap و Bayesian می‌باشد.

کلمات کلیدی

سیم‌پیچ ترانسفورماتور، شبکه عصبی Fuzzy ARTmap، شبکه Bayesian، مدل مشروح

فهرست مطالب

عنوان | شماره صفحه

مقدم ۱

فصل ۱ تخلیه جزئی ۵

۱-۱- مقدمه ۶

۱-۲- تعریف تخلیه جزئی ۶

۱-۳- بررسی مکانیزم تخلیه جزئی ۷

۱-۴- مدل منبع تخلیه جزئی ۹

۱-۵- بررسی انواع روش‌های تشخیص تخلیه جزئی ۱۱

۱-۵-۱- روش های غیر الکتریکی ۱۱

۱-۵-۱-۱- روش نوری ۱۲

۱-۵-۱-۲- روش صوتی ۱۲

۱-۵-۱-۳- روش شیمیایی ۱۳

۱-۵-۲- روش الکتریکی ۱۳

۱-۵-۲-۱- روش tip-up ۱۳

۱-۵-۲-۲- روش تحلیل تلفات دی الکتریک ۱۳

۱-۵-۲-۳- روش پروب های القایی ۱۴

۱-۵-۲-۴- روش آشکارسازی و تحلیل پالس ۱۴

۱-۵-۲-۵- روش ترانسفورمری ۱۴

۱-۶- مکان‌یابی تخلیه جزئی ۱۴

۱-۷- روش های نوین مکان یابی تخلیه جزئی ۱۵

۱-۷-۱- مکان یابی بر اساس توابع تبدیل جز به جز سیم پیچ ۱۶

۱-۷-۲- مکان‌یابی بر اساس صفر و قطب‌های طیف فرکانسی سیگنال‌ها ۱۷

۱-۷-۳- تبدیل موجک در مکان یابی تخلیه جزئی ۱۸

۱-۷-۴- استفاده از شبکه‌ی عصبی در آشکارسازی و مکان‌یابی تخلیه جزئی ۱۸

فصل ۲ روش‌های مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور ۲۰

۲-۲- دیدگاه جعبه سیاه ۲۲

۲-۲-۱- تحلیل مدال ۲۴

۲-۲-۲- حذف قطب‌ها ۲۵

۲-۳- دیدگاه فیزیکی ۲۶

فهرست اشکال

عنوان | شماره صفحه

۲-۳-۱- مدل خط انتقال چند فازه ۲۷
۲-۳-۲- مدل مشروح ۲۹
۲-۴- انتخاب مناسب‌ترین روش مدل‌سازی ۳۰
فصل ۳ شبکه عصبی Fuzzy ARTmap **۳۲**
۳-۱- مقدمه ۳۳
۳-۲- ویژگی‌های یک شبکه عصبی ۳۴
۳-۳- تقسیم‌بندی شبکه‌های عصبی ۳۵
۳-۳-۱- روش‌های وزن ثابت ۳۵
۳-۳-۲- روش‌های آموزش بدون سرپرستی ۳۵
۳-۳-۳- روش‌های آموزش با سرپرست ۳۶
۳-۳-۴- روش‌های آموزش تقویتی ۳۷
۳-۴- نظریه تشدید تطبیقی و شبکه‌های ART ۳۸
۳-۵- شبکه‌های Fuzzy ART ۴۰
۳-۶- شبکه Fuzzy ARTmap ۴۳
۳-۷- نحوه معمول آزمون شبکه عصبی Fuzzy ARTmap ۴۸
فصل ۴ شبکه Bayesian **۵۱**
۴-۱- مقدمه ۵۲
۴-۲- یادگیری بیزین ۵۳
۴-۲-۱- رویکرد فراوانی نسبی ۵۳
۴-۲-۲- دیدگاه ذهنی نسبت به احتمال ۵۴
۴-۲-۳- استفاده از قضیه بیز ۵۵
۴-۲-۴- بیزین و فراوانی نسبی ۵۷
۴-۳- یادگیری بیزین در شبکه‌های عصبی ۵۸
۴-۳-۱- یادگیری بیزین برای وزن‌های شبکه ۶۱
۴-۳-۱-۱- تابع توزیع پیشین ۶۲
۴-۳-۱-۲- تابع توزیع پسین ۶۴
۴-۳-۱-۳- تقریب گوسی برای توزیع پسین ۶۵

عنوان | شماره صفحه

۴-۳-۲- تابع توزیع خروجی شبکه ۶۷
۴-۳-۳- یافتن مقادیر α و β ۶۸
فصل ۵ شبیه‌سازی تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور **۷۳**
۵-۱- مقدمه ۷۴
۵-۲- مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه ۷۵
۵-۳- انتخاب روش شبیه‌سازی در EMTP ۷۷
۵-۳-۱- TACS ۷۸
۵-۳-۲- Model ۷۹
۵-۳-۳- مقایسه Model و TACS ۷۹
۵-۴- مدل‌سازی منبع تخلیه جزئی ۸۲
۵-۴-۱- عایق بین سیم‌پیچ و بدنه ترانسفورماتور ۸۲
۵-۴-۲- عایق بین حلقه‌ها ۸۲
۵-۵- نتایج شبیه‌سازی ۸۶
۵-۵-۱- مکان‌یابی تخلیه جزئی در عایق بین سیم‌پیچ و بدنه ترانسفورماتور ۸۶
۵-۵-۱-۱- شبکه Fuzzy ARTmap ۸۸
۵-۵-۱-۲- شبکه Bayesian ۹۰
۵-۵-۲- مکان‌یابی تخلیه جزئی در خازن بین حلقه‌ها ۹۱
۵-۵-۲-۱- شبکه Fuzzy ARTmap ۹۴
۵-۵-۲-۲- شبکه Bayesian ۹۶
فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات **۹۸**
۶-۱- نتیجه‌گیری ۹۹
۶-۲- پیشنهادات برای ادامه کار ۱۰۰
مراجع **۱۰۲**

فهرست اشکال

عنوان | شماره صفحه

شکل (۱-۱): عایق و نحوه افت ولتاژ در طول آن ۸
شکل (۱-۲): مدل مداری عایق همراه با حفره آن ۸
شکل (۱-۳): منحنی تخلیه الکتریکی در حفره داخل عایق ۹
شکل (۱-۴): مدار مدل کننده پالس PD- مدل اول ۱۰
شکل (۱-۵): مدار مدل کننده پالس PD- مدل دوم ۱۰
شکل (۱-۶): مدار مدل کننده پالس PD- مدل سوم ۱۰
شکل (۱-۸): توابع تبدیل داخلی سیم‌پیچ از دید نقطه نوترال و از دید بوشینگ ۱۶
شکل (۱-۹): پالس PD و انتشار آن از دو طرف ۱۷
شکل (۱-۱۰): مقایسه زیر سیستم‌ها و مقایسه آن‌ها ۱۷
شکل (۲-۱): سیستم n-فازه خط انتقال برای مطالعات فرکانس بالای سیم‌پیچ ۲۷
شکل (۳-۱): دسته‌بندی شبکه‌های عصبی ۳۷
شکل (۳-۲) دیاگرام شبکه ART ۳۹
شکل (۳-۳): ساختار یک شبکه FAM ٤٤
شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام آزمون شبکه FAM ٤۹
شکل (۳-۵): الگوریتم آزمون معمول شبکه FAM ۵۰
شکل (۴-۱): یادگیری بیزین برای وزن‌های شبکه ٦۵
شکل (۵-۱): نمائی از سیم‌پیچ‌های یک ترانسفورماتور قدرت ۷۵
شکل (۵-۲): ابعاد سیم‌پیچ مورد آزمایش و مدل بدنه ۷٦
شکل (۵-۳): پالس جریانی تخلیه جزئی ۸۲
شکل (۵-۴): مدل سه خازنی تخلیه جزئی ۸۳
شکل (۵-۵): ولتاژ و جریان خازن Cg تحت ولتاژ سینوسی ۸۵
شکل (۵-۶): ولتاژ و جریان خازن Cg تحت ولتاژ ضربه ۸٦
شکل (۵-۷): شکل موج جریان ناشی از تزریق پالس PD در گره دهم مدل مشروح ۸۷
شکل (۵-۸): جریان نقطه نول برای سیم‌پیچ سالم ۹۲
شکل (۵-۹): جریان نقطه نول زمانی که تخلیه جزئی در دیسک ۱ مدل شده است ۹۲
شکل (۵-۱۰): جریان نقطه نول زمانی که تخلیه جزئی در دیسک ۱۰ مدل شده است ۹۳
شکل (۵-۱۱): جریان نقطه نول زمانی که تخلیه جزئی در دیسک ۱۸ مدل شده است ۹۳
شکل (۵-۱۲): جریان نقطه نول زمانی که تخلیه جزئی در دیسک ۲۸ مدل شده است ۹۳

فهرست جداول

عنوان | شماره صفحه

جدول (۵-۱): اطلاعات و ابعاد سیم‌پیچ فشار قوی ۷۷
جدول (۵-۲): نتایج آزمون شبکه عصبی ۸۸
جدول (۵-۳): نتایج آزمون شبکه عصبی با درنظرگیری نویز ۸۹
جدول (۵-۴): نتایج آزمون شبکه Bayesian ۹۰
جدول (۵-۵): نتایج آزمون شبکه عصبی ۹٤
جدول (۵-۶): نتایج آزمون شبکه عصبی ۹٥
جدول (۵-۷): نتایج آزمون شبکه Bayesian ۹٦

مقدمه

در سالیان اخیر مطالعات زیادی در زمینه رفتار سیستم‌های قدرت در فرکانس‌های بالا انجام شده است. از مهم‌ترین دستگاه‌های موجود در شبکه‌های قدرت، ترانسفورماتورهای فشار قوی می‌باشند که بخش مهمی از وظیفه انتقال انرژی از نیروگاه به مصرف‌کننده را بر عهده دارند. ترانسفورماتورهای قدرت یکی از مهم‌ترین تجهیزات در سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی هستند که درصد بالایی از سرمایه‌گذاری در سیستم‌های الکتریکی را به خود اختصاص داده‌اند. افزایش عمر مفید ترانسفورماتورها تا حد ممکن، از لحاظ اقتصادی بسیار با ارزش است زیرا خروج آن‌ها از مدار باعث مضرات اقتصادی و کاهش ایمنی سیستم قدرت می‌شود. بنابراین عملکرد ترانسفورماتورها با قابلیت اطمینان و بازده بالا برای سالیان دراز از اصلی ترین دغدغه‌ها برای شرکت‌های تولید، انتقال و توزیع توان الکتریکی است [۱].

مطالعات و بررسی‌ها بر روی علل خروج از مدار ترانسفورماتورها نشان می‌دهد که علت اصلی خطاهایی که باعث خروج ترانسفورماتورهای قدرت می‌شود، ناشی از خطاهای داخلی هستند که عمدتا حاصل خرابی یا کاهش کیفیت سیستم عایقی ترانسفورماتور می‌باشد [۲]. بسیاری از خطاهای منجر به خروج ترانسفورماتورها مربوط به سیستم عایق‌بندی آن‌ها می‌باشد و تخلیه جزئی که به صورت تدریجی باعث نابودی عایق می‌شود، مهم‌ترین منبع خطا در عایق ترانسفورماتورها می‌باشد [۳].

لذا تشخیص، عیب‌یابی و مکان‌یابی خطاهای عایقی بخصوص در مراحل اولیه خرابی آن‌ها که به عنوان خطاهای جزئی در ترانسفورماتورهای قدرت نامیده می‌شود، در افزایش عمر

ترانسفورماتورها بسیار با اهمیت است. خطاهای جزئی[1] به پیری و کاهش کیفیت عایق نسبت داده می‌شود و شامل خطاهایی نظیر تخلیه جزئی[2]، تخلیهٔ الکتریکی و اتصال کوتاه بین دیسکهای سیم‌پیچ و نظایر آن می‌باشد.

مطالعه حالت‌های گذرا و همچنین بررسی و اندازه‌گیری پالس‌های تخلیه جزئی در ترانسفورماتور، امکان مراقبت و جلوگیری از بروز حوادث مخرب را امکان‌پذیر خواهد کرد. تخلیه جزئی که بصورت تدریجی باعث نابودی عایق می‌شود مهم‌ترین منبع خطا درعایق ترانسفورماتورها است. تشخیص محل این خطا قسمت عمده‌ای از هزینه‌های تعمیر را کاهش می‌دهد.

پالس‌های تخلیه جزئی که در اثر یکنواخت نبودن میدان الکتریکی در داخل عایق بوجود می‌آید، حاصل فیزیکی جرقه‌های داخل عایق می‌باشند. پهنای این پالس‌ها بسیار کوتاه بوده و در نتیجه طیف فرکانسی آن‌ها بازه‌ای وسیع را شامل می‌شود. برای بررسی ترانسفورماتور به صورتی که رفتار سیم‌پیچ در فرکانس‌های بالا را شامل شود، نیازمند مدل‌سازی سیم‌پیچ متناسب با فرکانس‌های بالا هستیم. مکان‌یابی پالس‌های تخلیه جزئی در داخل سیم‌پیچ ترانسفورماتور از موضوعاتی است که در حیطه بررسی و استفاده از این پدیده برای عیب‌یابی قرار دارد. از آن‌جا که آشکارسازی پالس‌های تخلیه جزئی به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد، مکان‌یابی این پالس‌ها نیز بسته به نوع آشکارسازی می‌تواند متفاوت باشد.

وجود خطا در سیم‌پیچ ترانسفورماتورها می‌تواند با تحلیل شکل موج‌های جریان در حالت‌های سالم و معیوب شناسایی شود، زیرا دامنه و شکل موج ورودی سیم‌پیچ تابعی از مشخصات سیم‌پیچ تحت آزمایش بوده و خطاهای عایقی این مشخصات را متأثر می‌سازند.

آشکارسازی تخلیه جزئی عمدتا به سه دسته نوری، صوتی و الکتریکی تقسیم می‌شوند که هر یک خصوصیات و کاربرد خاص خود را دارند. مکان‌یابی تخلیه جزئی در روش نوری محدود به عایق‌های شفاف و بررسی پدیده کرونا می‌شود. در روش صوتی نیز قابلیت مکان‌یابی تخلیه جزئی وجود دارد و در بیشتر موارد این کار با دقت بالایی صورت می‌گیرد. در روش الکتریکی امکان آشکارسازی پالس‌های تخلیه جزئی با شدت و دامنه کمتر نیز میسر می‌باشد. همچنین می‌توان در

[1] Incipient Faults
[2] Partial Discharge

محدوده فرکانسی بسیار متفاوتی این سیگنال‌ها را آشکار کرد که محدوده آن تا فرکانس‌های UHF گسترده است. مکان‌یابی پالس‌های تخـلیه جزئی که یک مرحله بعد از آشکارسازی و اندازه‌گیری این پالس‌ها، در مرحله آنالیز مطرح می‌شود، اهمیتی ویژه در حفاظت، عیب‌یابی، تعمیر و نگهداری دارد. منظور از مکان‌یابی، تعیین محل تقریبی منبع پالس‌های تخلیه جزئی است که توسط سنسورها، اندازه‌گیری می‌شوند. تعیین محل تقریبی، خصوصا در تعمیر و نگهداری بسیار کارساز می‌باشد.

ترانسفورماتورهای قدرت توان بالا، عموما دارای وزن و ابعاد بسیار بزرگ می‌باشد. تعیین محل عیب می‌تواند باعث صرفه‌جوئی قابل توجهی در وقت و هزینه گردد. با تعیین فاز معیوب و مکان تقریبی آن، مابقی ترانسفورماتور، از پروسه بازرسی و بازشدن حذف می‌شوند و در بعضی موارد که مکان عیب در وسط سیم‌پیچ نمی‌باشد و در نقاط ابتدا و انتهایی سیم‌پیچ واقع شده است، کار تعمیر آن در سایت و بدون خارج کردن ترانسفورماتور از پست صورت می‌گیرد.

در این پایان نامه، روندی کامل از بررسی و شناخت عیوب عایقی و شناخت و مدل‌سازی پدیده تخلیه جزئی به عنوان مخرب‌ترین عامل در عایق‌ها و همچنین مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور در فرکانس‌های بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. مروری بر روش‌های مکان یابی در مقالات و تحقیقات قبلی و ارائه روشی جدید در مکان‌یابی پدیده تخلیه جزئی به کمک شبکه عصبی Fuzzy ARTmap و شبکه Bayesian در این تحقیق ارائه خواهد شد.

بعد از مقدمه‌ای که در این قسمت ارائه شد در فصل اول این پایان نامه به بررسی پدیده تخایه جزئی می‌پردازیم. در ادامه در فصل دوم انواع روش‌های مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفته‌است. در فصل سوم به بررسی شبکه عصبی Fuzzy ARTmap می‌پردازیم وردر فصل چهارم نگاهی گذرا به شبکه Bayesian خواهیم داشت. در فصل پنجم با مدل‌سازی مدار مولد پالس تخلیه جزئی و همچنین مدل‌سازی مکانیزم پدیده تخلیه جزئی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور مکان‌یابی این پدیده انجام شده است. در نهایت در فصل ششم جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات آورده شده است.

فصل ۱

تخلیه جزئی

۱-۱- مقدمه

در کنار هادی‌ها که مهمترین عامل هدایت و انتقال انرژی الکتریکی هستند. عایق‌ها[1] به عنوان تکمیل کننده سیستم الکتریکی، جایگاهی ویژه دارند. امروزه استفاده و به کارگیری عایق‌ها، بر پایه دانشی وسیع صورت می‌گیرد که بسته به نوع عایق و اهمیت مورد استفاده به تخصص‌های ویژه نیاز دارد. در سیستم‌های فشار قوی عایق‌ها نقش کلیدی دارند و کیفیت و طول عمر آن‌ها تاثیری مستقیم بر کارکرد صحیح، ضریب اطمینان و هزینه‌ها خواهد داشت. تخلیه جزئی[2] سر منشا خرابی تدریجی عایق‌ها و در نهایت تخریب آن‌هاست. در نتیجه آشکارسازی و بررسی این فرآیند در عایق‌ها در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به خصوص در ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها که هزینه‌ای بسیار بالا را در شبکه‌های قدرت به خود اختصاص می‌دهند، میزان تخلیه جزئی نشان دهنده میزان سلامت عایق خواهد بود.

۱-۲- تعریف تخلیه جزئی

در صورتی که تخلیه الکتریکی در عایق به صورت کامل صورت نگیرد و محدود به قسمتی از ماده عایقی باشد، تخلیه جزئی نامیده می‌شود [۴و۵]. میدان الکتریکی غیر یکنواخت عامل اصلی بروز این نوع تخلیه می‌باشد. نحوه آرایش خطوط میدان الکتریکی و تراکم آن‌ها در نقاط مختلف بین

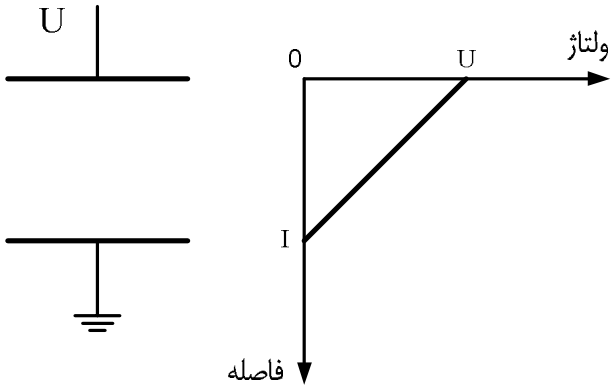
[1] Insulators
[2] Partial Discharge

دو الکترود، تعیین کننده شدت میدان الکتریکی می‌باشد که وابسته به شکل الکترودها و ساختمان مولکولی عایق‌ها می‌باشد. در صورتی که شدت میدان الکتریکی در محدوده‌ای از عایق به حدی زیاد باشد که شرایط تخلیه را در آن منطقه برآورد کند، تخلیه جزئی در آن‌جا اتفاق می‌افتد، در حالی که در بقیه نقاط به دلیل کافی نبودن میدان، تخلیه‌ای صورت نگرفته است. این نوع تخلیه در تمام انواع عایق‌ها اعم از جامدات، مایعات و گازها رخ می‌دهد. حاصل تخلیه جزئی، آزاد شدن انرژی جمع شده در یک محدوده عایق در لحظه‌ای کوتاه و به صورت جرقه می‌باشد و این انرژی تخلیه شده در محیط عایق منتشر می‌شود. در الکترودها می‌توان، پالس‌های جریانی تخلیه جزئی را آشکار کرد. از طرفی جرقه‌های تولید شده از خود امواج الکترومغناطیسی، نور و گرما منتشر می‌کنند که بسته به نوع عایق می‌توان آن‌ها را آشکار کرد.

مکانیزم تخلیه الکتریکی در عایق‌های جامد و مایع هنوز کاملا مشخص نیست. اما آن چه کاملا مسلم است، در عایق‌های جامد تخلیه بیشتر ناشی از عدم یکنواختی در مولکول‌های جسم جامد باعث می‌شود که استقامت الکتریکی جسم جامد ثابت نبوده و به واسطه عوامل جزئی تغییر می‌کند. از طرفی وجود حفره ها و منافذ خود عامل مهمی در غیر یکنواختی عایق‌های جامد می‌باشند که به همین دلیل از مهمترین عوامل به وجود آمدن تخلیه جزئی در داخل عایق می‌باشد. در عایق‌های مایع تخلیه بیشتر در اطراف الکترودهای نوک تیز و در حفره‌ها و حباب‌های گاز موجود در عایق مایع رخ می‌دهد.

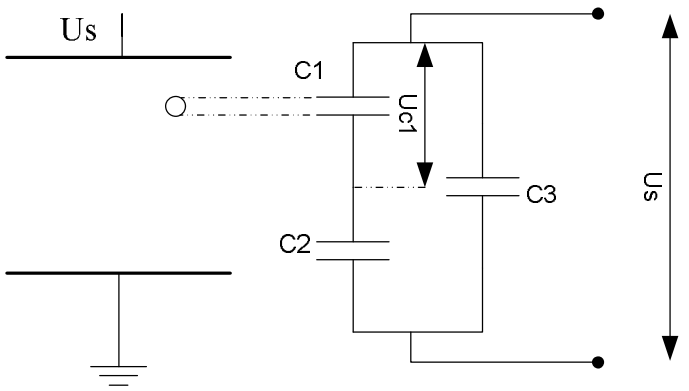
۱-۳- بررسی مکانیزم تخلیه جزئی

برای مدل کردن این پدیده فرض می‌شود که یک عایق، بین دو الکترود قرارگرفته است. با اعمال ولتاژ فشار قوی به الکترودها، میدان الکتریکی بین دو الکترود از شکلی خاص برخوردار خواهد شد. در حالت ساده که دو الکترود دو صفحه نسبتا بزرگ باشند و عایق‌ها کاملا یکنواخت و همگن فرض می‌شوند. میدان الکتریکی بین دو الکترود خطی خواهد بود. توزیع ولتاژ در طول عایق در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. در صورتی که ولتاژ اعمالی به الکترودها از حد تحمل ولتاژ عایق بیشتر باشد، پدیده شکست اتفاق می‌افتد و قوس الکتریکی بین دو الکترود برقرار می‌گردد و عایق را تخریب می‌کند. این پدیده را تخلیه کامل می‌نامند [۴-۶].



شکل (۱-۱): عایق و نحوه افت ولتاژ در طول آن

در عایق های جامد و مایع مهمترین عامل بروز تخلیه‌های جزئی حفره‌های[1] موجود در عایق هستند. در شکل (۱-۲) عایق و حفره داخل آن همراه با مدل ساده شده‌ای برای آن نمایش داده شده است. در این مدل $C3>>C1>C2$ می‌باشد.



شکل (۱-۲): مدل مداری عایق همراه با حفره آن

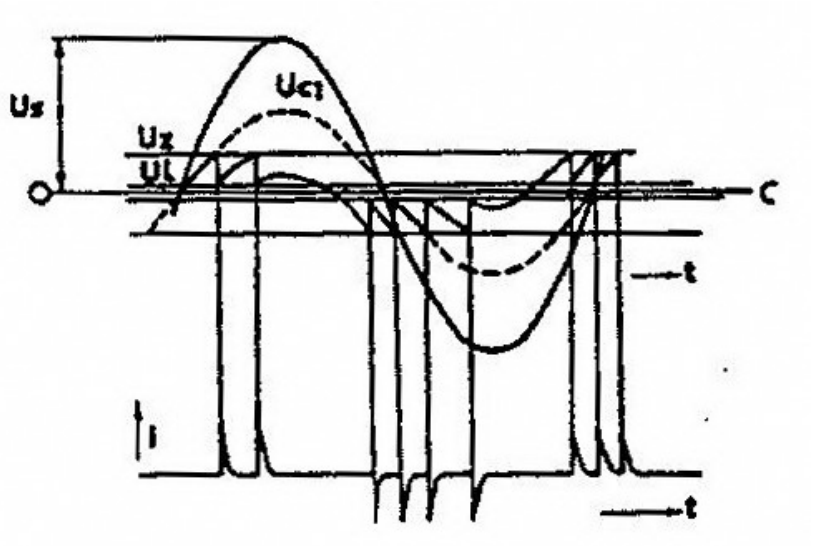
مقدار خازن برای قبل و بعد از تخلیه عبارتند از:

$$C_A = C_3 + \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} \qquad (۱-۱)$$

$$C_B = C_2 + C_3 \qquad (۱-۲)$$

تغییرات ولتاژ خازن و جریان عبوری از الکترودها در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. مطابق با این شکل در صورتی که ولتاژ U به الکترودها اعمال گردد، ولتاژ خازن C_1 عبارت خواهد بود با:

[1] Cavity



شکل (۱-۳): منحنی تخلیه الکتریکی در حفره داخل عایق

$$U_{C1} = U_s \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \qquad (۳-۱)$$

هر بار که مقدار ولتاژ U_{c1} به حد لازم برای شروع تخلیه برسد، تخلیه در داخل حفره که با خازن C_1 مدل شده است، صورت می‌گیرد و به همراه آن U_{c1} تا حد U_L که در آن تخلیه قطع می‌گردد، تنزل می‌یابد. برای محاسبه ولتاژ آغازگر ($PDIV$)[1] در مراجع مختلف روش های متفاوتی ارائه شده است. برای محاسبه $PDIV$ فرمول زیر در [۷] ارائه شده است:

$$U_L = PDIV = 26.5P.t + 0.55 \qquad (۴-۱)$$

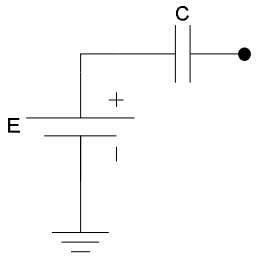
که U_L برحسب کیلوولت موثر، P بیانگر فشار داخل حفره بر حسب اتمسفر و t ضخامت حفره بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. سپس ولتاژ U_{c1} افزایش می یابد و با رسیدن به حد U_L عمل تخلیه مجددا انجام می‌شود. این عمل عینا در پریود منفی نیز تکرار می‌شود. در ضمن مقدار U_L اغلب بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

۱-۴- مدل منبع تخلیه جزئی

تخلیه جزئی همانند یک منبع ضربه عمل می‌کند و بر همین اساس سه روش زیر در استانداردها و مقالات مختلف برای شبیه‌سازی منبع PD استفاده می‌شود [۸]:

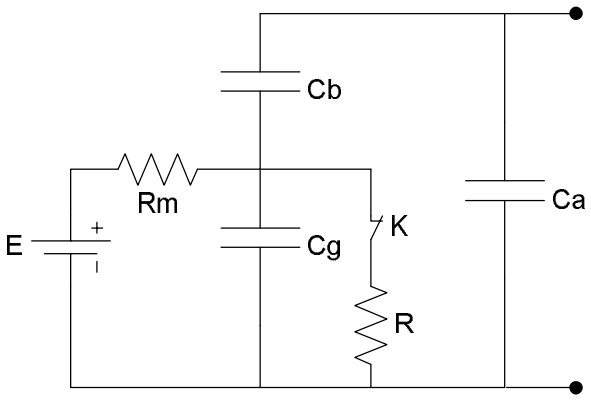
[1] Partial Discharge Inception Voltage

- برای محاسبه تئوری معمولا از یک تابع ضربه (دیراک) استفاده می‌شود.
- از داده‌های به دست آمده از اندازه گیری‌های آزمایشگاهی می‌توان برای شبیه‌سازی استفاده کرد.
- در اغلب تحقیقات انجام شده، از شبیه‌سازی مدارهای تولید کننده پالس‌های ضربه جریانی استفاده می‌شود. به عنوان مثال چند نمونه از این مدارها در شکل‌های (۱-۴) تا (۱-۶) نشان داده شده است.



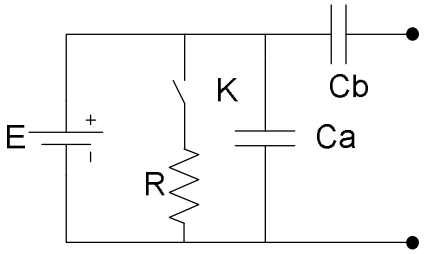
شکل (۱-۴): مدار مدل کننده پالس PD- مدل اول

پارامترهای مدل شکل (۱-۴) می‌بایستی مطابق با استاندارد IEEE C57,113 باشد [۹].



شکل (۱-۵): مدار مدل کننده پالس PD- مدل دوم

پارامترهای مربوط به مدل شکل (۱-۵) در [۶] به صورت کامل آورده شده است.



شکل (۱-۶): مدار مدل کننده پالس PD- مدل سوم

مشخصات مدل شکل (۱-۶) نیز در [۱۰] ارائه شده است و می‌توان به کمک نرم‌افزار EMTP پیاده‌سازی نمود [۱۱]. بجز مدل‌های فوق، از مدارهای الکترونیکی نیز برای تولید پالس‌های جریانی ضربه می‌توان استفاده نمود. در [۱۲] یک نمونه از این مدارها ارائه شده است.

۱-۵- بررسی انواع روش‌های تشخیص تخلیه جزئی

با گذشت زمان عایق‌های ترانسفورماتورهای قدرت در اثر تنش‌های الکتریکی، مکانیکی و حرارتی دچار پیری می‌شوند. مهمترین منبع خرابی عایق‌ها پدیده‌ی تخلیه جزئی می‌باشد بنابراین تشخیص و شناسایی این پدیده مهم می‌باشد. در دهه‌های اخیر چندین روش برای ارزیابی تخلیه‌ی جزئی ترانسفورماتورهای قدرت گسترش یافته است. به طور کلی این روش‌ها را در دو دسته الکتریکی و غیر الکتریکی می‌توان تقسیم بندی کرد و در ادامه به طور مختصر در مورد هر یک از روش‌های ذکرشده توضیحاتی ارائه شده است [۱۳و۱۴].

۱-۵-۱- روش های غیر الکتریکی

روش های غیر الکتریکی را برای نشان دادن وقوع تخلیه‌های الکتریکی می‌توان به کار برد، ولیکن این روش‌ها برای اندازه‌گیری دامنه تخلیه نمی‌توانند به کار گرفته شوند. پدیده‌های غیر الکتریکی که برای آشکار سازی تخلیه‌ها به کار می روند عبارتند از:

- فشار گاز
- گرما
- نور
- صدا
- تغییرات شیمیایی

دو روش اول در حال حاضر کاربرد کمتری دارند و در مورد سایر موارد به اختصار توضیحاتی در ادامه آورده شده است.