

بررسی رفتار عایقی روغن معدنی در ولتاژ فرکانس قدرت با حضور نانولوله‌های کربنی

پژمان پورمحمدیان^۱، استادیار، محمدکاظم عدالتیان دوم^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد - ایران - pourmohamadian@um.ac.ir

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - edalat02@gmail.com

چکیده: با توجه به کاربرد فراوان و عملیاتی روغن به‌عنوان عایق الکتریکی در صنعت، توجه ویژه در تمامی مسائل مربوط به آن از جمله طراحی، ساخت و نحوه بهره‌برداری ضروری است. از این رو مطالعه روی مواد افزودنی به روغن‌های عایق برای رسیدن به ویژگی‌های فنی و اقتصادی بهتر رویکرد روزافزونی پیدا کرده است. در این مقاله با انجام آزمایش بر روی روغن عایق در ولتاژ فرکانس قدرت، رفتار عایقی روغن در حضور ذرات نانولوله کربنی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. ولتاژ شکست در ولتاژ فرکانس قدرت و سرعت بازیابی عایقی دو پارامتر اصلی عایق‌های مایع از نقطه نظر استقامت الکتریکی می‌باشد. هدف از آزمایش‌های انجام شده مقایسه این دو پارامتر برای روغن مورد استفاده در دو حالت روغن خالص و روغن به همراه نانولوله‌های کربنی می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش در آزمایشگاه فشارقوی، تغییرات به‌دست آمده در تمام مراحل با هم مقایسه و ارتباط آن‌ها با رفتار عایقی روغن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی علی‌رغم تضعیف برخی خواص عایق روغن مانند ولتاژ شکست، موجب بهبود برخی خواص دیگر مانند سرعت بازیابی عایقی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روغن عایق، نانولوله کربنی، سرعت بازیابی عایقی، ثابت زمانی جذب بارهای آزاد

Evaluation of Mineral Oil Insulating Characteristics at Power Frequency Voltage in Presence of Carbon Nano Tubes

P. Pourmohamadian¹, M. K. Edalatian²

1-Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran,

2-Science and Research Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran,

Abstract: Insulation properties of oil have very important role in power system operation. Intensive care should therefore be taken in all aspects of its production and service. In recent researches, the effect of various additives on the transformer oil has been studied to achieve better technical and economical characteristics. In this paper, the effect of Carbon Nano Tubes on the transformer oil in power frequency test voltage is analyzed. The breakdown voltage and rate of rise of recovery voltage are two main quality measures of liquid insulation. Therefore, it is tried to compare these two parameters for pure oil and oil containing carbon Nano Tubes. Accordingly, the variations are analyzed and based on the physical properties of the test materials, it is tried to explain the phenomenon behind the changes. The results show, adding Carbon Nano Tubes despite the weakening of breakdown voltage at power frequency rate of insulation recovery is improved.

Keywords: transformer oil, Carbon Nano Tubes, rate of rise of recovery voltage, charge relaxation time constant

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۶/۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴

نویسنده مسئول: پژمان پورمحمدیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خراسان رضوی - مشهد - میدان آزادی - پردیس دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه برق

۱- مقدمه

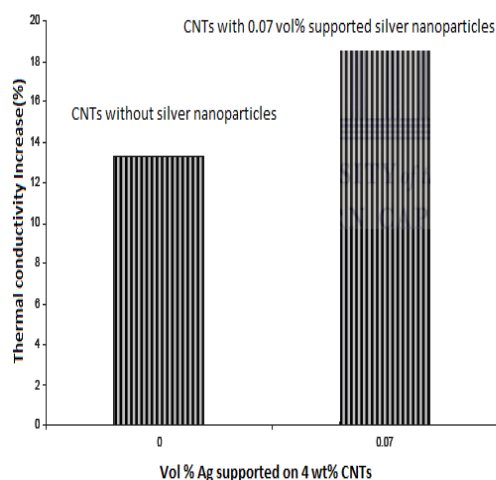
جدول (۱): مقایسه استقامت الکتریکی، میزان آب و اسیدیته روغن عایق در حالت خام و در حالت حضور نانوذرات نقره و نانولوله‌های کربنی [۳]

نمونه	استقامت دی‌الکتریک (kV)	آب (PPM)	اسیدیته (mg/KOH/g oil)
روغن ترانسفورماتور	56	30	0.01
روغن با نانوذرات نقره	28	69	0.09
روغن با نانولوله کربنی	2	-	-

روغن عایق سیالی است که بیش‌ترین حجم یک ترانسفورماتور را تشکیل می‌دهد و دارای خواص و شاخص‌های متعددی از قبیل مقاومت مخصوص، رسانایی حرارتی، رسانایی عایقی و از همه مهم‌تر استقامت الکتریکی می‌باشد. استقامت الکتریکی عایق مایع، حداکثر شدت میدان الکتریکی است که آن عایق در شرایط خاص تحمل می‌کند. این در حالی است که اگر به هر دلیلی شدت میدان الکتریکی از این حد تجاوز نماید، مقدمات شکست فراهم خواهد شد و خواص عایقی از دست خواهد رفت.

استقامت الکتریکی روغن عایق به عوامل دیگری مانند درجه حرارت روغن، مدت زمان اعمال ولتاژ و ناخالصی‌های درون روغن نیز بستگی دارد [۱]. آزمایش‌های مختلفی بر روی روغن عایق (مانند روغن تازه، روغنی که در آن شکست رخ داده، روغن بدون رطوبت و گاززدایی شده) در شرایط مختلف انجام شده و پارامترهای مختلف آن مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. از جمله این پارامترها رسانایی و ضریب اتلاف دی‌الکتریک^۱ است. همچنین نشان داده شده است که با افزایش عمر روغن میزان گرانبوی^۲ آن افزایش می‌یابد و این به معنای کاهش رسانایی حرارتی در ترانسفورماتور است [۲].

تاکنون مطالعه و پژوهش‌های مختلفی در زمینه بهبود کیفیت روغن ترانسفورماتور در حضور نانوذرات انجام پذیرفته است. خانواده نانوذرات دارای اعضای متنوعی از جمله نانولوله‌های کربنی، نانوذرات نقره و غیره می‌باشد. این مطالعات نشان می‌دهد که اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به روغن عایق ترانسفورماتور به‌عنوان انتخابی از خانواده نانوذرات، می‌تواند نتایج متفاوت و از جهاتی مطلوب‌تر نسبت به روغن خام از خود نشان دهد. در مطالعه‌ای استقامت الکتریکی روغن ترانسفورماتور در حضور نانولوله‌های کربنی و همچنین نانوذرات نقره مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است که نتایج مربوطه در جدول (۱) نشان داده شده است [۳]. طبق جدول (۱) استقامت الکتریکی در ولتاژ فرکانس قدرت با افزودن نانو ذرات کاهش می‌یابد. اما در حضور نانولوله‌های کربنی میزان آب و اسید تولیدی روغن کاهش یافته است که می‌تواند سبب بهبود برخی خواص عایقی گردد. در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات نقره بر هدایت حرارتی نانوفلوئیدهای شامل نانولوله‌های کربنی به مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. بر اساس مطالعه فوق که نتایج آن در شکل (۱) آورده شده است، افزودن نانوذرات نقره موجب رسانایی حرارتی بیش‌تر می‌گردد.



شکل (۱): اثر افزودن ۰.۰۷٪ نانوذرات نقره روی هدایت حرارتی نانوفلوئیدهای شامل نانولوله‌های کربنی [۳]

آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه بر روی روغن خالص و روغن حاوی نانوذرات هادی (مانند CNTها^۳) نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ شکست در ولتاژ ضربه صاعقه مثبت برای روغن دارای نانوذرات هادی تقریباً دو برابر روغن خالص است. همچنین در ولتاژ ضربه صاعقه مثبت زمان شکل‌گیری استریم^۴، برای حالت روغن حاوی نانوذرات، تقریباً دو برابر است. همچنین برای این حالت میانگین سرعت پیشروی استریم تقریباً نصف حالت روغن خالص است. در جدول (۲) این مقایسه به صورت دقیق مشاهده می‌شود [۴].

همچنین برای بهبود رسانایی حرارتی روغن ترانسفورماتور تلاش‌هایی صورت پذیرفته است. در مرجع [۵] با افزودن محلولی از نانوذرات مغناطیسی به روغن ترانسفورماتور نشان داده شده است که میزان رسانایی حرارتی عایق مایع افزایش می‌یابد.

جدول (۲): نتایج تحمل عایقی روغن خالص و روغن حاوی نانوذرات هادی در

ولتاژ ضربه صاعقه [۴]

نمونه	استقامت دی ولتاژ		زمان تا وقوع شکست		سرعت متوسط پیشروی استریمر (km/s)	
	شکست ضربه صاعقه (kV)	شکست ضربه صاعقه (kV)	-	+	-	+
روغن خالص	86	170	27	12	2.12	0.94
روغن با نانوذرات هادی	157	154	15	26	0.98	1.69

در [۶] آنالیز الکتروپدینامیک جامعی از فرآیندهایی که در آنها نانوسیال‌های پایه روغن ترانسفورماتور، تحت میدان الکتریکی قرار دارند، انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نانوذرات فلزی با جذب الکترون، بارهای سریع و پرانرژی (الکترون) را به ذرات سنگین باردار (ذرات نانو) تبدیل می‌کنند. در نتیجه سرعت پیشروی استریمر مثبت کاهش می‌یابد. همچنین در [۷] تحلیل رفتار عایقی روغن ترانسفورماتور بعد از افزودن نانوذرات بررسی شده است. این تحلیل بر پایه سازوکار شکل‌گیری استریمر در روغن ترانسفورماتور و اثر نانوذرات بر آن قرار دارد. شواهد آزمایشگاهی مبین این است که استریمر مثبت از سطح الکترون مثبت ساطع و به الکترون منفی ختم می‌شود. به علاوه استریمر مثبت سریع‌تر و به میزان بیش‌تر نسبت به استریمر منفی گسترش می‌یابد. در نتیجه استریمر مثبت خطر بزرگ‌تری برای تجهیزات عایق‌بندی شده دارد [۸]. در [۹] نقش سیالات مغناطیسی به عنوان عایق مایع در ترانسفورماتورهای فشارقوی مورد بررسی قرار گرفته است و توسعه و پیشرفت شکست الکتریکی در سیالات مغناطیسی تحلیل شده است. در نهایت پروسه‌های الکتروفیزیکی که در عملکرد میدان الکتریکی DC و همچنین روی شکست الکتریکی سیال تاثیرگذار بوده‌اند مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر با طراحی و فراهم ساختن تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش، به دنبال رسیدن به یک تحلیل جامع از استقامت الکتریکی روغن عایق در حضور نانولوله‌های کربنی هستیم. به عبارت دیگر هدف اصلی مقاله انجام مقایسه‌ای میان استقامت الکتریکی و سرعت بازیابی عایقی روغن دارای نانوذرات کربنی است. این مقایسه مبتنی بر تجربه عملی و تحلیل تئوریک خواهد بود. در بیش‌تر تحقیقات اخیر، مساله استقامت الکتریکی عایق‌های مایع به‌طور کلی به دو زیر بخش تفکیک‌پذیر است:

- استقامت الکتریکی در مقابل ولتاژ فرکانس قدرت
- استقامت الکتریکی در مقابل ولتاژ ضربه

۲- مبانی نظری و فرضیه آزمایش

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد در پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون به روش‌های مختلف، ولتاژ شکست روغن عایق ترکیب‌شده با ذرات نانو مورد ارزیابی واقع شده است. اما تاکنون توجه خاصی به سرعت بازیابی روغن عایق پس از شکست نشده است. با توجه به آنچه که در [۷] به عنوان دلایل شکست الکتریکی روغن ترکیب‌شده با ذرات نانو گفته شده است می‌توان انتظار داشت که سرعت بازیابی پس از شکست عایق در فرکانس قدرت تغییر قابل توجهی نماید. چنین پیش‌بینی می‌شود که تغییر ولتاژ شکست در حضور ذرات نانو عمدتاً به دلیل جذب الکترون‌ها توسط ذرات هادی و یا تشکیل پل‌های کوچک رسانا توسط ذرات نانو صورت می‌گیرد. با توجه به سرعت امواج ضربه، مسئله تشکیل پل‌های به هم پیوسته ذرات نانو در بازه زمانی کوتاه اعمال ولتاژ چندان محتمل به نظر نمی‌رسد و از این رو عامل اول (جذب الکترون توسط ذرات نانوهادی) موثر واقع می‌شود. اما در فرکانس قدرت این پل‌ها فرصت تشکیل و تاثیر در شکست عایق را می‌یابند. اگر این فرضیه در مورد شکست روغن عایق ترکیب‌شده با ذرات نانو صحیح باشد، می‌توان انتظار داشت سرعت بازیابی عایق پس از شکست نیز به شکل قابل توجهی در ولتاژهای فرکانس قدرت تغییر یابد. سنجش این فرضیه با توجه به ابعاد کوچک ذرات نانو و پدیده‌های مداخله‌گر متعدد، از راه تحلیل و یا شبیه‌سازی بسیار دشوار می‌نماید.

در این مقاله با طراحی آزمایش‌هایی جدید، پارامتر عایقی برای روغن خالص و روغن حاوی نانولوله‌های کربنی مورد سنجش قرار گرفته است. برای سنجش پارامتر اول یعنی استقامت الکتریکی در مقابل ولتاژ فرکانس قدرت از مفهوم ولتاژ تخلیه کامل $50\% (V_{50})$ مطابق با استاندارد IEEE Std 4-1995 استفاده می‌شود. بدین ترتیب که به عایق تحت شرایط خاص، ولتاژ فرکانس قدرت اعمال می‌شود و به‌آهستگی ولتاژ را افزایش می‌یابد تا شکست کامل رخ دهد. این کار چندین بار در شرایط محیطی و تجهیزات یکسان انجام می‌شود. مقدار ولتاژی که به‌ازای آن و مقادیر بیش‌تر از آن در 50% مواقع منجر به شکست کامل عایقی می‌شود، به عنوان ولتاژ تخلیه کامل 50% در نظر گرفته می‌شود. همچنین با انجام آزمایشی ساده، سرعت بازیابی روغن خالص، با روغن حاوی نانولوله‌های کربنی مقایسه می‌شود.

۳- مجموعه تست آزمایشگاهی

به منظور بررسی تاثیر اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به روغن عایق از دیدگاه استقامت الکتریکی، مواد و تجهیزات آزمایشگاهی به شرح زیر در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۱- روغن عایق و ذرات نانولوله کربنی

روغن مورد استفاده در تست‌ها، از نوع نیترو ۱۰ ایکس^۶ و سازنده آن شرکت نیناس سوئد می‌باشد. ضمناً این عایق مایع در فرآیند تصفیه، تقریباً خشک و بدون گاز شده و شرایط اضافه شدن به عایق را دارا

۳-۴- سایر تجهیزات مورد نیاز

علاوه بر موارد فوق، از یک میله همزن از جنس پلاستیک برای هم زدن روغن داخل محفظه تست بعد از هر بار شکست روغن استفاده شد.

۴- روش انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصله

آزمایش در دو مرحله انجام شده است:

۴-۱- مرحله اول

در این مرحله به ظرف حاوی روغن خالص، ولتاژ اعمال کرده و سطح ولتاژ به آرامی افزایش می‌یابد تا شکست رخ دهد. ولتاژ شکست یادداشت می‌شود و به روغن به اندازه دو دقیقه استراحت داده می‌شود. در فاصله استراحت هر دو تست محیط روغن به کمک میله پلاستیکی هم‌زده می‌شود و مجدداً آزمایش تکرار می‌شود. این روند به تعداد ۱۰ بار تکرار می‌شود. مقدار ولتاژی که به آن در ۵۰٪ از مواقع منجر به شکست شده است، به‌عنوان V_{50} ثبت می‌گردد. سپس به روغن جدید ریخته شده در سلول به‌میزان یک میلی‌گرم در لیتر نانولوله کربنی اضافه نموده و پس از هم زدن آن مشابه عملیات قبل آزمایش تکرار می‌شود و V_{50} برای حالت جدید مشخص می‌گردد. در جدول (۳) اعداد به‌دست آمده از نتایج آزمایش آورده شده است.

جدول (۳): نتایج مرحله اول آزمایش - یافتن ولتاژ تخلیه کامل ۵۰٪

نمونه	مقدار $V(50)$ kV
روغن عایق	۲۱
روغن با نانولوله کربنی	۸/۵

براساس نتایج فوق مشاهده می‌شود که با افزودن نانولوله‌های کربنی به روغن، ولتاژ شکست فرکانس قدرت کاهش ۵۹٪ را نشان می‌دهد. در سری دوم آزمایش‌ها، پارامتر دیگر مربوط به استقامت الکتریکی یعنی نرخ (سرعت) بازیابی عایقی نیز مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۴-۲- مرحله دوم آزمایش‌ها

در این مرحله دو مجموعه آزمایش با ولتاژ ۲۱ کیلوولت برای روغن خالص و دیگری با ولتاژ ۸/۵ کیلو ولت برای روغن با اضافه کردن یک میلی‌گرم در لیتر از ذرات نانولوله‌های کربنی انجام می‌شود. در هر مجموعه آزمایش، شش جفت تست با فاصله زمانی ۲ دقیقه (زمان در نظر گرفته‌شده برای استراحت روغن) انجام می‌شود. هر جفت تست نیز با قطع و وصل کلید با وقفه یک ثانیه‌ای صورت می‌پذیرد. در صورت وقوع شکست در هر جفت تست در فاصله ۲ دقیقه، روغن با میله پلاستیکی هم زده می‌شود. نتایج این قسمت از آزمایش در جدول‌های (۴) و (۵) به تفکیک نشان داده شده است.

است. هم‌چنین میزان رطوبت و نیز گازهای محلول در روغن در هر دو آزمایش تقریباً شرایط یکسانی دارد. به علاوه، ۱۶۰ گرم نانولوله کربنی فراهم می‌گردد تا در سری دوم آزمایش‌ها به روغن عایق اضافه شود.

۳-۲- منبع اعمال ولتاژ فشارقوی

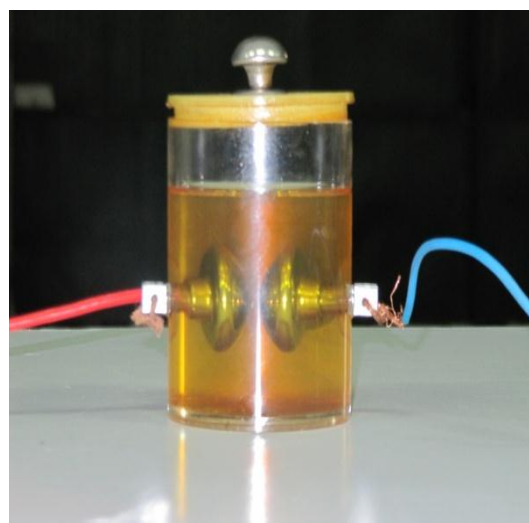
به منظور اعمال ولتاژ فرکانس قدرت، یک مولد ولتاژ بالای متناوب مورد استفاده قرار گرفته به طوری که ولتاژ خروجی آن توسط اتوترانسفورماتور ورودی می‌تواند تا ۱۲۰ کیلوولت افزایش یابد. ولتاژ ورودی ترانسفورماتور فشارقوی به وسیله یک ولت‌متر اندازه‌گیری شد. در شکل (۲) نمایشگرهای دستگاه اعمال ولتاژ نشان داده شده است.



شکل (۲): نمایشگر دستگاه اعمال ولتاژ فشارقوی

۳-۳- سلول تست روغن عایق

جنس این سلول از شیشه پیرکس و متناسب با محفظه آزمایش از دو الکتروود نیمه کروی با قطر ۳۶ میلی‌متر ساخته شده است. جنس الکتروودها از مس و فاصله آن‌ها از سطح روغن ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. فاصله بین دو الکتروود توسط دو فک متحرک تنظیم می‌شود. در این آزمایش جهت بررسی روند تغییرات ولتاژ شکست روغن در حضور نانولوله‌های کربنی، این فاصله در ۲/۵ میلی‌متر تنظیم شده است. تصویر سلول تست روغن عایق در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمایی از سلول تست روغن عایق

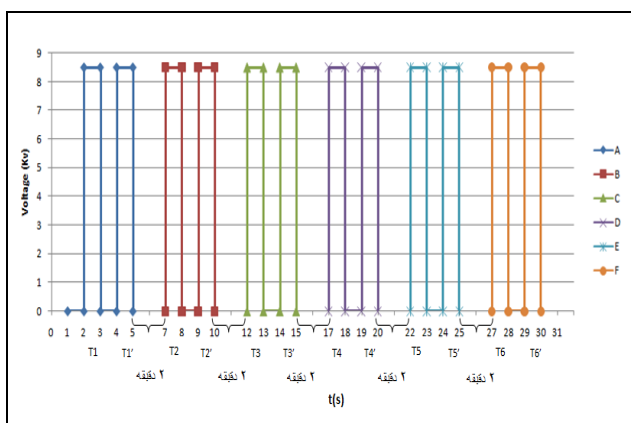
جدول (۵): رخدادهای شکست در روغن عایق با نانولوله‌های کربنی

OK	T_1
OK	$T_1^* = T_1 + 1\text{sec}$
OK	T_2
Breakdown	T_2^*
Breakdown	T_3
Breakdown	T_3^*
OK	T_4
OK	T_4^*
Breakdown	T_5
OK	T_5^*
Breakdown	T_6
Breakdown	T_6^*

جدول (۴): رخداد های شکست در روغن عایق بدون نانولوله‌های کربنی

OK	T_1
OK	$T_1^* = T_1 + 1\text{sec}$
Breakdown	T_2
Breakdown	T_2^*
OK	T_3
Breakdown	T_3^*
Breakdown	T_4
Breakdown	T_4^*
Breakdown	T_5
Breakdown	T_5^*
Breakdown	T_6
Breakdown	T_6^*

شکل (۵) نیز نحوه اعمال ولتاژ به الکترودهای سلول روغن حاوی نانولوله‌های کربنی نشان می‌دهد. در این جا نیز مشاهده می‌شود که دو قسمت هر جفت تست با وقفه یک ثانیه‌ای انجام می‌شود و در هر قسمت ولتاژ به اندازه یک ثانیه در مدار برقرار است. همچنین فاصله بین هر جفت تست دو دقیقه می‌باشد.



شکل (۵): نحوه اعمال ولتاژ ۸/۵ کیلوولت به الکترودها در حالت روغن با نانولوله‌های کربنی (V-t)

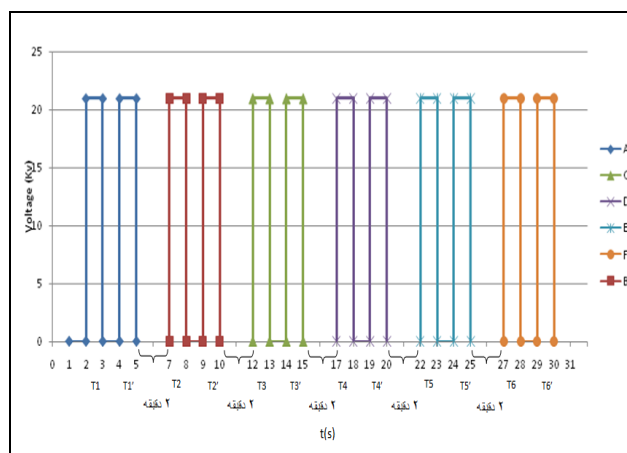
لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌ها سلول تست در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و از این لحاظ تفاوتی موثر بین هر آزمایش وجود ندارد و شرایط یکسان است. در ادامه مقاله نتایج گزارش شده در بالا تحلیل و مقایسه شده است.

۵ - تحلیل نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که شرح داده شد برای رسیدن به یک تحلیل جامع در استقامت الکتریکی عایق‌های مایع، علاوه بر تحمل الکتریکی در ولتاژ فرکانس قدرت، می‌بایست سرعت بازیابی عایقی را نیز در نظر گرفت. اگر چه جدول (۳) موبد این مطلب است که تحمل الکتریکی روغن با نانولوله‌های کربنی نسبت به روغن خالص کم‌تر است، اما نتایج

طبق جدول (۴) مشاهده می‌شود که از ۱۲ مرتبه آزمایش، ۹ مرتبه منجر به شکست شده است. در ۴ مرتبه‌ای هم که در قسمت اول شکست رخ داده است (یعنی T_2, T_4, T_5 و T_6) قسمت‌های دوم بدون استثنا دچار شکست شده است (یعنی T_1^*, T_2^*, T_3^* و T_4^*).

در شکل (۴) نحوه اعمال ولتاژ به الکترودهای سلول روغن خالص نشان داده شده است.



شکل (۴): نحوه اعمال ولتاژ ۲۱ کیلوولت به الکترودها در حالت روغن خالص (V-t)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر جفت تست با وقفه یک ثانیه‌ای انجام شده است و در هر قسمت ولتاژ به اندازه یک ثانیه در مدار برقرار است. همچنین فاصله بین هر جفت تست دو دقیقه است.

در جدول (۵) نتایج مربوط به آزمایش بر روی روغن حاوی نانولوله‌های کربنی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از ۱۲ مرتبه آزمایش، ۶ مرتبه با شکست مواجه شده است و از ۳ مرتبه‌ای که قسمت‌های اول دچار شکست شده‌اند (یعنی T_3, T_5 و T_6) در T_5^* شکستی رخ نداده است.

سرعت روند جذب الکترون در محیط عایق مایع در شکل‌گیری استریمر بسیار تاثیرگذار است. اگر ثابت زمانی جذب بار آزاد^۷ در مقایسه با زمان لازم برای گسترش و شکل‌گیری استریمر کوچک‌تر باشد، استریمر فرصت شکل‌گرفتن نخواهد داشت. در مقابل اگر ثابت زمانی جذب بار آزاد در مقایسه با زمان لازم برای شکل‌گیری استریمر بزرگ‌تر باشد استریمر تشکیل می‌شود [۷]. مطالب بیان شده مربوط به نانوذر رسانای کروی شکل است. اما ذرات نانوی به کار رفته در این آزمایش دارای نسبت بزرگ طول به قطر^۸ هستند و از فرض کروی بودن خارج است. لذا برای محاسبه ثابت زمانی جذب بار آزاد نمی‌توان از فرمول عنوان‌شده در مرجع [۷] استفاده کرد. اما اصل پدیده و جذب بارهای آزاد توسط نانولوله‌های کربنی و هر ذره رسانای دیگر (با هر شکلی) همواره برقرار است.

ثابت زمانی جذب بارهای آزاد برای نانولوله‌های کربنی تقریباً 10^{-11} s است [۱۰]. این عدد در مقایسه با ثابت زمانی شکل‌گیری و گسترش استریمر که در حدود 10^{-9} - 10^{-6} s است، بسیار کوچک‌تر است. یعنی در ولتاژهای ضربه که مدت زمان شکل موج بسیار کوتاه است، نانولوله‌های کربنی با جذب بارهای آزاد (عموماً الکترون‌ها) قبل از شکل‌گیری استریمر، بستر مناسب برای شکل‌گیری استریمر را از بین برده و شکست رخ نمی‌دهد. به همین دلیل احتمال شکست مجدد در روغن حاوی نانولوله‌های کربنی کم‌تر از روغن خالص است.

بنابراین اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به روغن عایق، اگرچه استقامت الکتریکی عایق را در فرکانس قدرت کاهش می‌دهد، اما موجب افزایش استقامت الکتریکی به هنگام اعمال مجدد ولتاژ با فاصله زمانی کوتاه خواهد شد. بسته به کاربرد، می‌بایست برای انتخاب و مقدار این ماده افزودنی به روغن عایق مصالحه‌ای بین این دو پارامتر صورت پذیرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله استقامت الکتریکی روغن عایق در حالت خالص و همچنین در حضور نانولوله‌های کربنی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. برای سنجش استقامت الکتریکی باید چند پارامتر را در نظر گرفت. استقامت الکتریکی در مقابل ولتاژهای فرکانس قدرت و ضربه و در نهایت نرخ بازیابی عایقی از جمله مهم‌ترین پارامترهای بازیابی روغن می‌باشند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده و تحلیل نتایج به نظر می‌رسد که بعد از افزودن نانولوله‌های کربنی، استقامت الکتریکی در مقابل ولتاژ فرکانس قدرت تضعیف و نرخ بازیابی عایقی بهبود می‌یابد. لذا روغن حاوی نانولوله‌های کربنی دارای رفتار بهتری در مقابل اعمال ولتاژ مجدد بلافاصله پس از شکست است. به عنوان مهم‌ترین دستاورد این پژوهش می‌توان به تاثیر قابل توجه نانولوله‌های کربنی در سرعت بازیابی روغن عایق اشاره کرد. بنابراین برای انتخاب نوع و میزان استفاده از نانولوله کربنی باید دو معیار ولتاژ شکست و سرعت بازیابی عایقی را به طور هم‌زمان در نظر گرفت.

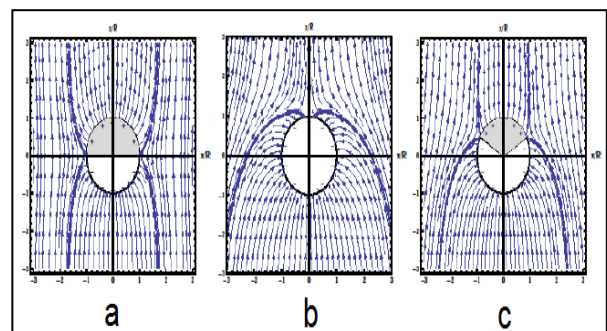
جدول‌های (۴) و (۵) بیانگر بهتر بودن سرعت بازیابی روغن حاوی نانولوله‌های کربنی نسبت به روغن خالص است. زیرا تعداد کم‌تری شکست در آزمایش مطرح شده به وقوع می‌پیوندد. همچنین در یک مورد، عایق بعد از اینکه دچار شکست شد، در یک ثانیه بعدی خود را باز می‌یابد و نمی‌شکند. این سرعت بازیابی بهتر خاصیتی است که می‌تواند در کاربردها و شرایط خاصی به کار آید. اکنون به دنبال پاسخ تحلیلی به رفتار روغن حاوی نانولوله‌های کربنی هستیم.

۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش مرحله اول

با اضافه کردن ذرات رسانا در محیط عایق مایع، پلاریزاسیون الکتریکی در ذره رسانا ایجاد می‌شود و الکترون‌ها به سمت آند و بارهای مثبت به طرف کاتد متمایل می‌شوند. این امر سبب برهم خوردن یکنواختی میدان شده و موجب تجمع بارهای مثبت و منفی به‌طور غیریکنواخت در محیط عایق می‌شود. به علاوه با جذب ذرات باردار توسط الکترون دارای پتانسیل بالاتر (در اینجا آند) نقاط تیز روی الکترون پتانسیل بالا پدید می‌آید. این عوامل به کاهش تحمل عایقی منجر خواهد شد. اما بحث‌های مطرح شده در حالت دائمی صادق است. یعنی اینکه یک ولتاژ فرکانس پایین (۵۰ Hz) به سیستم اعمال شده است و اثر حالات گذرا از بین رفته است و عایق فرصت کافی جهت عبور از پدیده‌های گذرای اولیه‌ای که رخ می‌دهد را دارا است. در بخش بعدی به توضیح رفتار گذرای روغن دارای ذرات رسانا پرداخته می‌شود.

۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش مرحله دوم

بعد از اینکه یک نانوذر رسانا در محیط عایق مایع قرار می‌گیرد بلافاصله بعد از اعمال میدان الکتریکی، بارهای مثبت و منفی به صورت متقارن از هم جدا می‌شوند (شکل ۶- a). سپس به مرور زمان بارهای آزاد درون فضای عایق (که عموماً الکترون هستند) جذب نانوذر رسانا شده و ناحیه مثبت تنگ‌تر می‌شود (شکل ۶- b). تا اینکه ذره از بار الکتریکی منفی اشباع می‌شود. از اینجا به بعد (شکل ۶- c) دیگر هیچ جذب الکترونی از سوی نانو ذرات رخ نخواهد داد [۷].



شکل (۶): روند جذب الکترون در محیط توسط نانوذر رسانا [۷]

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل تحقیقات انجام شده در طرح پژوهشی شماره ۲۶۲۲۴ مصوب معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. بدین وسیله از حمایت های به عمل آمده از سوی دانشگاه فردوسی مشهد قدردانی می گردد.

زیر نویس ها

- 1 Dielectric dissipation factor (DDF)
- 2 Viscosity
- 3 Carbon Nano Tubes
- 4 Streamer
- 5 Fifty percent disruptive discharge voltage
- 6 Nytro 10X oil
- 7 Charge relaxation time constant
- 8 Aspect ratio

۷- مراجع

- [1] M. J. Heathcote, *The J & P Transformer Book*, Twelfth edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1998.
- [2] J. S. N'Cho, L. Loisel and I. Fofana, A. Beroual and T. Aka-Ngnui, "Parameters affecting the electrical and thermal properties of transformer oils," IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 1-4, West Lafayette, Oct 2010.
- [3] S. S Botha, *Synthesis and Characterization of Nanofluids for Cooling Applications*, PhD Thesis, Department of Chemistry, University of the Western Cape, pp. 1-182, 2007.
- [4] V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj and A. Nunes, "Experimental study of magnetic colloidal fluids behavior in power transformers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 215, pp. 513-515, 2000.
- [5] T. Cader, S. Bernstein, and S. Crowe, "Magnetic fluid cooler transformer," US Patent No. 5,898,353, 27 April 1999.
- [6] F. O'Sullivan, J. G. Hwang, M. Zahn, O. Hjortstam, L. Pettersson, L. Rongsheng and P. Biller. "A model for the initiation and propagation of positive streamers in transformer oil," *Electrical Insulation, ISEI*, pages 210-214, 2008.
- [7] G. Hwang, J. Jadidian, and M. Zahn, "effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, No. 1, pp. 014310 - 17, 2010.
- [8] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W.G. Chadband and Y. Torshin, "Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 14, No. 2, 1998.
- [9] M. Timko, P. Kopcansky, K. Marton, L. Tomco, S. Holotescu, F. Stoian and L. Vekas, "Magnetic fluid as cooling and insulation medium for high power transformers," In: *Selected Topics in Energy, Environment, Sustainable Development and Landscaping*, Timisoara, Politehnica University of Timisoara, Romania, pp. 321-326. ISBN 978-960-474-237-0.3, 2010.
- [10] J. Seetharamappa, S. Yellappa and F. D'Souza, "Carbon nanotubes, next generation of electronic materials," *Electrochemical Society Interface*, Vol. 15, pp.23-25, 2006.