

آزمایش و ارائه مدل‌های ریاضی جدید برای پیش‌بینی مشخصات عایقی روغن ترانسفورماتور تحت تأثیر تنش فشار محیط

محمد میرزایی، احمد غلامی و حمیدرضا طیبی

تحت تأثیر تنش‌های مختلفی از جمله تنش حرارتی، الکتریکی و محیطی و ... قرار دارد. به عنوان مثال، تنش الکتریکی می‌تواند ناشی از عوامل داخلی (همچون عدم دقت کافی در میزان خمیدگی هادی‌ها مطابق طراحی، اتصال کوتاه یک فاز سیم‌پیچ به بدنه و یا طراحی نامناسب سیستم عایق روغن/کاغذ و ...) و یا عوامل خارجی (نظیر اتصال کوتاه‌های یک فاز به زمین، برخورد صاعقه و عدم عملکرد برق‌گیر و ...) باشد بطوریکه افزایش گرادیان پتانسیل را ایجاد نموده و در نتیجه منجر به شروع تخلیه الکتریکی در عایق ترانسفورماتور می‌گردد. از طرفی با توجه به تلفات ناشی از بار الکتریکی (تلفات مسی)، تلفات هسته و همچنین درجه حرارت محیط، دمای عایق ترانسفورماتور افزایش یافته و این عوامل تنش‌های حرارتی را ایجاد می‌نمایند. با توجه به تنش‌های حرارتی، تأثیر افزایش میدان الکتریکی تقویت شده و تخلیه‌های الکتریکی نیز افزایش می‌یابند که در نتیجه، این عوامل می‌توانند خاصیت عایقی ترانسفورماتور را تضعیف نمایند. تحقیقات متعددی در زمینه تأثیرات تنش‌های وارده بر عایق ترانسفورماتور به خصوص تنش حرارتی انجام شده است. در [۱] روش‌های مختلف آزمایشگاهی جهت بررسی اثرات پیری (در مدت بهره‌برداری ترانسفورماتور) و تغییر مشخصات روغن معدنی از جمله ضریب تلفات و همچنین مقادیر گازهای تولیدی در طی زمان کارکرد انجام گردیده است. در [۲] خواص الکتریکی، شیمیایی و فیزیکی روغن بر روی ترانسفورماتورهای در حال بهره‌برداری و بر حسب مدت زمان در سرویس بودن آنها اندازه‌گیری و سپس مدل‌های ریاضی تقریبی برای تخمین شاخص‌های عایقی، با توجه به زمان کار ترانسفورماتور و برخی از پارامترهای شیمیایی آن ارائه شده است. همچنین در [۳] تنزل و زوال انواع روغن‌های معدنی و عوامل مؤثر بر پیری آنها و همچنین محصولات تولید شده از آنها تحت تنش‌های حرارتی، الکتریکی و شیمیایی آزمایش و بررسی شده است. در [۴] نویسندگان با انجام آزمایش‌های پیرسازی عایق ترانسفورماتور (روغن/کاغذ) تحت تأثیر حرارت، شاخص‌هایی همچون ظرفیت الکتریکی، استقامت الکتریکی، ضریب تلفات دی‌الکتریک، جرم مولکولی و ... را در مدت زمان پیرسازی اندازه‌گیری نموده‌اند. در [۵] نیز تغییرات شاخص‌های سیستم عایقی به روش‌های مختلف برای ترانسفورماتورهای در حال سرویس و همچنین ترانسفورماتورهای نو اندازه‌گیری و تحلیل شده است. در [۶] ضمن بررسی همبستگی بین گازهای اکسید کربنی محلول در روغن و استقامت کششی کاغذ، مدل ریاضی برای عمر کاغذ پیشنهاد شده است.

تاکنون بیشترین مطالعات بر روی عایق‌های ترکیبی کاغذ/روغن ترانسفورماتور تحت تأثیر تنش‌های حرارتی بوده است. اما یکی از مسائل پیچیده و بسیار مهم دیگر برای عایق روغن معدنی، بررسی خواص الکتریکی به ویژه قابلیت هدایت الکتریکی/جریان نشتی و ولتاژ شکست آن تحت تأثیر شرایط محیطی می‌باشد. یکی از تنش‌های محیطی، تأثیر فشار هوای محیط محل نصب ترانسفورماتور می‌باشد. تاکنون کار خاص و

چکیده: روغن معدنی به عنوان یک مایع واسط جهت ایجاد خاصیت عایقی و انتقال حرارت به محیط خارج در ترانسفورماتورها به کار گرفته می‌شود. روغن داخل تانک ترانسفورماتورها، به علت ارتباط با محیط خارج، از طریق لوله رابط به محفظه سیلیکازل و در نتیجه تنفس آن، تحت تأثیر تغییرات فشار هوا قرار می‌گیرد. از طرفی فشار هوا نیز به ارتفاع از سطح دریای آزاد بستگی دارد. بنابراین تغییر فشار هوا و در نتیجه تغییر فشار بالای روغن می‌تواند باعث تغییر ویسکوزیته روغن شده و خاصیت عایقی آن را تحت تأثیر قرار دهد. لذا فشار هوا به عنوان یک تنش محیطی می‌تواند بر پارامترهای عایق، مؤثر و باعث تضعیف و زوال سریع‌تر و در نتیجه پیری آن گردد.

در این مقاله با انجام تست‌های آزمایشگاهی تجربی در مورد تأثیر فشار هوای محیطی/ارتفاع محل نصب ترانسفورماتور بر روی برخی از خواص روغن و زوال آن ارائه شده است. بدین منظور فشار هوا را در سلول روغن (صرفاً جهت بررسی تغییرات در شاخص‌های عایقی) به وسیله پمپ از ۶۰ میلی‌متر جیوه تا ۱۲۵۰ میلی‌متر جیوه تغییر داده و قابلیت هدایت/جریان نشتی روغن در ولتاژهای مختلف و همچنین میزان ولتاژ شکست آن اندازه‌گیری و آنالیزهای مختلف انجام شده است. سپس به کمک روش‌های ریاضی و آنالیز حداقل مربعات خطا، مدل‌های ریاضی تخمین برخی از شاخص‌های عایقی فوق، ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در نهایت یک مدل جدید و ساده که دقت مناسب داشته و در قیاس با نتایج آزمایشگاهی صحت خوبی را از خود نشان داده، پیشنهاد گردیده است.

کلید واژه: روغن معدنی، فشار هوا، خواص عایقی، مدل‌سازی ریاضی.

۱- مقدمه

در ترانسفورماتورها، عایق روغن معدنی و سلولزی (کاغذ، پرس بورد و چوب) به عنوان عایق ترکیبی، استقامت عایقی را میان حلقه‌ها، لایه‌ها و سیم‌پیچ‌های مختلف یک فاز و یا با دیگر فازها مهیا می‌نمایند. در این میان روغن، به عنوان عاملی برای انتقال حرارت ناشی از سیم‌پیچ‌ها و هسته به محیط خارج و همچنین جهت مصونیت عایق‌های جامد در برابر افزایش بیش از حد حرارت مجاز آن، به کار گرفته می‌شود. عایق‌های جامد نیز علاوه بر استقامت الکتریکی، استقامت مکانیکی لازم را در برابر نیروهای الکترومکانیکی عهده‌دار می‌باشند.

در یک ترانسفورماتور، بیشترین حجم را روغن تشکیل داده و این عایق

این مقاله در تاریخ ۲۸ شهریور ماه ۱۳۸۴ دریافت و در تاریخ ۱۰ مهر ماه ۱۳۸۵ بازنگری شد.

محمد میرزایی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، کد پستی ۱۶۸۴۴، ایران (email: m_mirzai@iust.ac.ir).

احمد غلامی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، کد پستی ۱۶۸۴۴، ایران (email: gholami@iust.ac.ir).

حمیدرضا طیبی، جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت، تهران، صندوق پستی ۳۱۱-۱۶۸۴۵، ایران (email: hrtayebi@jdevs.com).

می‌گردند. فرمول کلی آنها به صورت C_nH_{2n} می‌باشد. از جمله این نوع هیدروکربن‌ها می‌توان به سیکلوپنتان و سیکلوهگزان اشاره نمود. دسته سوم، روغن‌های با پایه آروماتیک^۳ می‌باشند که از نفت خام با هیدروکربن‌های اشباع‌نشده حلقوی حاصل گردیده که تمایل شدید به جذب هیدروژن دارند. از جمله این هیدروکربن‌ها می‌توان به بنزن اشاره نمود. حال با توجه به انواع متفاوت روغن‌های معدنی، در سال‌های نخست، استفاده از روغن‌های با پایه پارافینیک بیشترین کاربرد را در ترانسفورماتورها داشته‌اند. در این نوع روغن‌ها به علت واکنش شیمیایی اکسیداسیون، لجن غیرمحلول در روغن ایجاد شده و ویسکوزیته افزایش می‌یابد. در نتیجه قابلیت انتقال حرارت این نوع روغن کاهش و باعث می‌شود تا ترانسفورماتور داغ و در نتیجه عمر آن کاهش یابد. لذا اکنون استفاده از روغن‌های با پایه نفتنیک افزایش یافته است. بررسی‌ها نشان داده است که پایداری این روغن‌ها در مقایسه با روغن پارافینیک بهتر است. همچنین در طول مدت بهره‌برداری، عدد اسیدیته آن و همچنین میزان لجن و رسوب تولیدی آن به مراتب کمتر و همچنین محصولات اکسیدی آن در روغن حل می‌شوند. این نوع روغن دارای مقاومت عایقی، ولتاژ شکست و نقطه ریزش بالاتری می‌باشد [۱].

همان‌طور که می‌دانیم قسمت اعظم حجم یک ترانسفورماتور را عایق روغن تشکیل داده به طوری که در یک ترانسفورماتور نوعی، حجم روغن به ۴۰ تن نیز می‌رسد. از طرفی قیمت تمام‌شده این تجهیز در مقایسه با دیگر تجهیزات سیستم قدرت بسیار گران است. لذا انتظار بر آن است که طول عمر آنها در شرایط نرمال بیش از ۳۰ سال باشد. میزان عمر یک ترانسفورماتور همان عمر عایق‌های آن بوده طوری که شرایط کارکرد، دمای محیطی، افزایش دمای ناشی از تلفات، میزان تنش‌های الکتریکی، ارتفاع محل نصب ترانسفورماتور/فشار محیطی، و ... در آن مؤثر است. آمارها و بررسی‌ها نشان داده است که بیشترین موارد خروج ترانسفورماتورها از سرویس، به علت مشکلات در مواد عایقی و خطاهای آن می‌باشد.

حال با توجه به وجود تنش‌های فوق‌الذکر در ترانسفورماتورها، خواص عایقی روغن تنزل و تضعیف شده و در نتیجه عمر مفید آن کاهش می‌یابد این عوامل می‌توانند باعث تنزل و تضعیف خاصیت عایقی روغن و در نتیجه کاهش عمر مفید آن کاهش می‌یابد و یا مشخصه کاری آن تغییر می‌کند. مشخصات کیفی روغن ترانسفورماتور، نقش مهم و بسزایی را در ارزیابی عملکرد و کارایی آن دارد. برجسته‌ترین عامل برای ایجاد تضعیف و تنزل روغن ترانسفورماتور و در پی آن وقوع خطاها در ترانسفورماتورها می‌توان تغییرات فشار بالای تانک ترانسفورماتور، افزایش دما در طول شرایط کاری ترانسفورماتور، تغییر مداوم در سطوح ولتاژ کاری، تنزل و همچنین تضعیف الکتریکی و مکانیکی سریع عایق‌های جامد آن قلمداد نمود. هر یک از موارد فوق، ضمن تنزل و تضعیف خواص عایقی روغن، می‌تواند به طور مستقیم و یا غیر مستقیم تحت تأثیر شرایط عملکرد و میدان الکتریکی قرار گیرد. به عنوان مثال افزایش فشار بالای روغن می‌تواند ویسکوزیته آن را افزایش داده و در نتیجه منجر به ایجاد مقاومت بالایی برای روغن و همچنین تلفات انرژی شود. از طرفی افزایش دمای روغن، می‌تواند ویسکوزیته آن را کاهش داده و در نتیجه منجر به کاهش چگالی روغن، افزایش تلفات دی‌الکتریک و شکست سریع‌تر آن شود. همچنین تغییر در سطوح ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور باعث می‌شود تا

هدفمندی در زمینه این نوع تنش بر روی عایق ترانسفورماتورها انجام نشده است. چرا که تئوری‌ها و تجارب نشان داده است که افزایش ارتفاع به ازای هر کیلومتر از سطح دریای آزاد منجر به کاهش ۱۰ درصدی در فشار هوا می‌شود. از طرفی ترانسفورماتورها به سیلیکاژل مجهز بوده و از این طریق با هوای محیط که رطوبت‌گیری می‌شود در ارتباط هستند. در نتیجه هوای بالای کنسرواتور ترانسفورماتورها به ویژه ترانسفورماتورهای توزیع همواره تحت تأثیر تنش فشار محیطی می‌باشد. این مسئله می‌تواند ویسکوزیته روغن را تحت‌الشعاع قرار داده و خواص عایق آنها را تغییر دهد. به طوری که روند پیرشدگی روغن معدنی تحت تنش فشار محیطی می‌تواند با میزان جریان ناشی روغن مرتبط باشد. لذا آنالیز تغییرات خواص الکتریکی مهم روغن از قبیل میزان جریان ناشی/قابلیت هدایت الکتریکی و ولتاژ شکست، تحت تأثیر تنش فشار محیطی می‌تواند با انجام آزمایشها و اندازه‌گیری‌ها حاصل و بدین وسیله تغییر خواص عایقی که در نهایت به مرور می‌تواند در روند پیرشدگی مؤثر باشد، تحلیل گردد.

در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر فشار هوا بر روی روغن ترانسفورماتورهای در حین سرویس، تست‌های آزمایشگاهی بر روی عایق روغن معدنی انجام گرفته است. لذا روغن معدنی در سلول‌های مربوطه با تغییر فشار فضای محفظه روغن و همچنین تغییرات میدان الکتریکی، در چندین مرحله مورد تست جریان ناشی و ولتاژ شکست قرار گرفته و نتایج اندازه‌گیری‌شده، ارائه و مورد آنالیز قرار گرفته است. سپس مدل‌های ریاضی مختلف برای جریان هدایت روغن و همچنین ولتاژ شکست روغن به صورت تابعی از فشار محیطی و به کمک روش حداقل مربعات ارائه شده است. در نهایت صحت و دقت این نوع از مدل‌ها با یکدیگر و همچنین با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه و دقت هر یک از مدل‌ها ارائه گردیده است. سپس یک مدل جدید و ساده با توجه به فشار هوا ارائه می‌گردد.

۲- روغن معدنی

یکی از محصولات پالایش نفت خام، روغن معدنی بوده و آن یکی از رایج‌ترین سیال عایقی محسوب می‌شود به طوری که استفاده آن در ترانسفورماتورها به سال‌های ۱۸۸۷ میلادی برمی‌گردد. این امر به قیمت پایین و قابلیت دسترسی بالای آن مربوط می‌شود. در صورتی که خواص ویژه‌های همچون مقاومت حرارتی، ضریب ثابت دی‌الکتریک بالا و توانایی جذب مد نظر باشد، بسته به نیاز از روغن‌های ترکیبی مصنوعی استفاده می‌شود. با توجه به ساختار هیدروکربنی این نوع مواد، برای روغن‌های معدنی، واژه پایه روغنی یا نفتی مصطلح گردیده است. انواع روغن‌های معدنی با ترکیبات هیدروکربنی همچون پارافینیک، نفتنیک و آروماتیک به عنوان مواد عایقی، در ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک از آنها دارای ساختار شیمیایی و ویژگی خاص می‌باشند. روغن‌های با پایه پارافینیک^۱ از نفت خام با هیدروکربن‌های پارافینیک به دست می‌آیند. این نوع هیدروکربن‌ها دارای زنجیره مستقیم و یا شاخه‌دار اشباع‌شده با فرمول کلی C_nH_{2n+2} هستند و با توجه به اشباع‌بودن، تمایل به جذب هیدروژن اضافی ندارند. این نوع هیدروکربن‌ها به صورت طبیعی، حاوی پارافین‌ها یا موم می‌باشند. از این نوع مواد هیدروکربنی می‌توان به پنتان و ایزوپنتان اشاره نمود. دسته دوم روغن‌های با پایه نفتنیک یا سیکلو پارافین‌ها^۲ بوده که از نفت خام با هیدروکربن‌های نفتنیک حاصل

1. Paraphinic Oil

2. Naphtenic Oil

3. Aromatic Oil

جدول ۱: شرایط انجام آزمایش.

پارامتر	مقدار
دمای متوسط محیط	۲۹ درجه سانتی‌گراد
فشار محیط	۶۴۳ میلی‌متر جیوه
فشار داخلی سلول	۱۲۵۰-۴۰ میلی‌متر جیوه
ولتاژ مورد نیاز در حالت مستقیم	۱۳-۰ کیلوولت
ولتاژ مورد نیاز در حالت متناوب	۵۰-۰ کیلوولت

۳-۳ روش انجام آزمایش

در انجام آزمایشها، روغن معدنی خشک و صاف بوده و سپس در مراحل مختلف جهت بررسی‌های لازم در سلول تست روغن ریخته می‌شود. فاصله بین این الکترودها صرفاً جهت تحلیل و مقایسه تغییرات، در ۱ میلی‌متر تنظیم گردیده و در تمامی مراحل آزمایش ثابت نگه داشته شده است. همچنین دمای روغن در تمامی مراحل آزمایش ثابت و همان دمای محیط بوده است. در طی انجام آزمایشها، هوای بالای محفظه روغن به کمک دستگاه افزایشنده و کاهشنده فشار و صرفاً جهت تأثیر تغییرات آن بر شاخص‌ها، از ۴۰ تا ۱۲۵۰ میلی‌متر جیوه و ولتاژ دو سر الکترودهای آن، در سطوح مختلف تغییر و کنترل می‌شود. نحوه انجام این آزمایشها در ذیل آمده است.

در انجام این تحقیق، تمامی تست‌ها تحت شرایط مندرج در جدول ۱ انجام شده است.

۳-۳-۱ جریان نشستی

برای انجام این آزمایش، با اعمال ولتاژهای مختلف ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ کیلوولت مستقیم به نمونه روغن و تغییر فشار داخلی مخزن، در هر حالت جریان گذرنده از نمونه روغن اندازه‌گیری می‌شود. بدین وسیله تحت ولتاژ ثابت و تغییر فشار هوای مخزن، جریان نشستی عایق روغن اندازه‌گیری شده است. همچنین تأثیر تغییرات ولتاژ بر میزان جریان نشستی تحت فشار ثابت نیز آزمایش و بررسی گردیده است.

۳-۳-۲ ولتاژ شکست

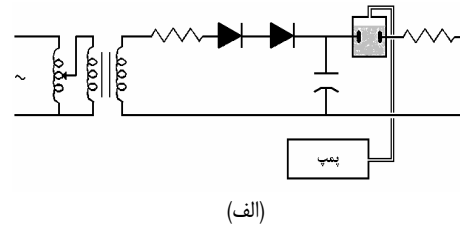
برای تعیین ولتاژ شکست روغن تحت تأثیر تغییرات فشار بالای روغن و یا همان محفظه خلأ، آزمایش بر روی هر نمونه روغن و در هر حالت آزمایش، انجام گردیده است. نمودار مدار انجام این آزمایشها در شکل ۱-ب نشان داده شده است. مطابق این تست، شش بار آزمایش بر روی روغن و تحت فشار معین انجام می‌گردد. در این آزمایش، نرخ افزایش ولتاژ ۲ کیلوولت بر ثانیه تنظیم می‌شود. پس از هر بار شکست در روغن، روغن توسط میله شیشه‌ای بهم زده شده و پس از ۳ دقیقه، مجدداً تست انجام می‌گردد و سپس متوسط ولتاژ شکست در آن فشار (به غیر از اولین ولتاژ شکست) به دست می‌آید [۷].

۴- آنالیز نتایج آزمایشگاهی

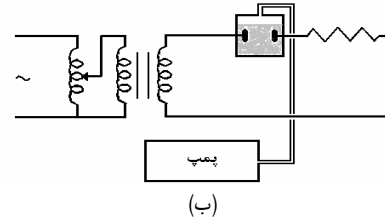
حال آزمایشهای مختلف بر روی روغن مورد آزمایش، مطابق روش انجام آزمایش که در بالا اشاره گردید، انجام می‌گردد. در ذیل نتایج آزمایشها و تحلیل‌های مربوطه ارائه شده است.

۴-۱ میزان جریان نشستی روغن در فشارهای مختلف

در این قسمت و برای بررسی قابلیت هدایت یا جریان نشستی روغن



(الف)



(ب)

شکل ۱: نمای کلی برپایی انجام تست (الف) اندازه‌گیری جریان نشستی و (ب) اندازه‌گیری ولتاژ شکست.

روغن با توجه به تولید لجن با وزن بیشتر، غلیظ‌تر شود و در نتیجه ویسکوزیته آن افزایش یابد.

۳- آزمایشها

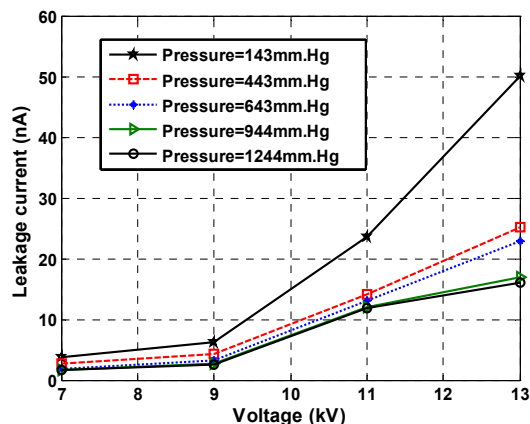
۳-۱ عایق مورد آزمایش

برای انجام این آزمایشها از عایق روغن معدنی که در ساخت ترانسفورماتورها به کار گرفته می‌شود، استفاده شده است. این نوع روغن، نو بوده و تمامی شرایط مورد استفاده در ترانسفورماتور را دارا می‌باشد.

۳-۲ تجهیزات آزمایش

برای انجام این آزمایشها، نمای کلی مدار، مطابق شکل ۱ در آزمایشگاه فشار قوی ترتیب داده شده است. همانطور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود سطح ولتاژ مستقیم به کمک اتوترانسفورماتور ورودی می‌تواند تغییر یابد. دو دیود فشار قوی سری هر یک با مقاومت ۵۰۰ کیلوهم با ولتاژ شکست ۱۴۰ کیلوولت با یک مقاومت ۱۰ مگا هم سری شده است. در این مدار خازن دارای ظرفیت ۱۰ نانوفاراد با ولتاژ نامی ۱۴۰ کیلوولت برای ایجاد ولتاژ مستقیم می‌باشد. یک سلول روغن و همچنین یک محفظه خلأ نیز وجود دارد. سلول تست روغن از دو الکتروود نیم‌کروی برنجی با فاصله ۱ میلی‌متر تشکیل شده به طوری که قطر هر الکتروود نیم‌کروی آن ۳۶ میلی‌متر می‌باشد. این سلول در یک محفظه خلأ (با قابلیت تحمل فشارهای مختلف) قرار گرفته به طوری که فشار بالای روغن می‌تواند به کمک پمپ‌های متصل به آن تغییر نماید. دو الکتروود در سلول روغن، با تمهیدات لازم تحت اختلاف پتانسیل مستقیم قرار گرفته و ولتاژ آن توسط اتوترانسفورماتور تغذیه ورودی تغییر می‌نماید. جریان نشستی گذرنده از عایق روغن با تغییرات فشار هوا و یا با تغییر ولتاژ دو سر گوی‌ها، اندازه‌گیری می‌شوند. در شکل ۱-الف نمای کلی از مدار انجام این تست نشان داده شده است.

در شکل ۱-ب مدار تست ولتاژ شکست روغن نشان داده شده است. در این مدار نیز مشابه حالت قبل، ولتاژ ورودی متناوب توسط اتوترانسفورماتور افزایش می‌یابد و سپس با تغییر فشار هوا، ولتاژ شکست روغن اندازه‌گیری می‌شود. در این مدار یک مقاومت ۱۰ مگا هم به صورت سری با ظرف روغن قرار گرفته است.



شکل ۳: مشخصه ولتاژ-جریان نشتی روغن در فشارهای مختلف.

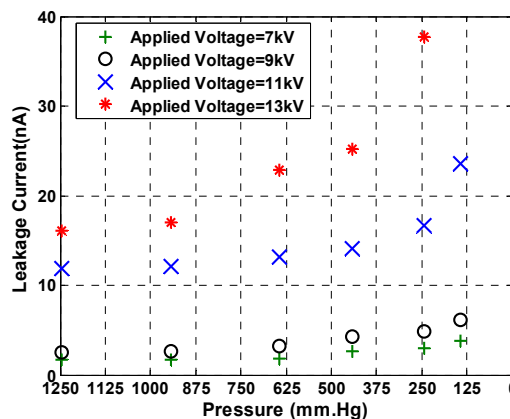
حباب‌های گازی بیشتر و کاهش هرگونه ناخالصی در روغن، باعث می‌شود تا تعداد حامل‌های بارهای تزریقی افزایش یابد به طوری که در حدود فشار بحرانی تعداد آنها به چندین برابر افزایش می‌یابد. حال اگر فشار خیلی خیلی کم شود (در حد فشار بحرانی و کمتر از آن) افزایش چندین برابر جریان نشتی یا هدایت الکتریکی، باعث شکست الکتریکی روغن خواهد شد. بنابراین افزایش میزان جریان نشتی، بسته به شرایط محیطی ترانسفورماتور و عدم دقت در طراحی مناسب سیستم عایقی، می‌تواند باعث تضعیف خواص عایقی روغن شود. چرا که این جریان می‌تواند باعث افزایش تلفات عایقی و افزایش گرم‌شدگی روغن (ناشی از تلفات و دمای محیط) گردد به طوری که در طولانی‌مدت و با توجه به تنش‌های مختلف، به عنوان یک عامل تشدیدکننده زوال و تضعیف عایق روغن باشد (به علت ایجاد تدریجی کربن آزاد در روغن).

۴-۲- مشخصه ولتاژ-جریان روغن معدنی در فشارهای مختلف

با توجه به آزمایش‌های انجام شده فوق، مشخصه ولتاژ-جریان روغن مورد آزمایش، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این مشخصه یک منحنی مشخصه غیرخطی است. به عبارتی مقاومت عایقی یک عایق در هر سطح ولتاژ و همچنین در هر شرایط محیطی متفاوت است. مطابق این شکل، مقاومت عایقی تقریبی، هم به سطح ولتاژ اعمالی و هم به فشار روغن بستگی دارد به طوری که در فشارهای پایین و افزایش ولتاژ، کاهش مقاومت عایقی مشاهده می‌شود. به عبارتی دیگر هر چه فشار محیط کمتر باشد، با افزایش تنش الکتریکی بر روی روغن، مقاومت عایقی روغن کاهش یافته و در نتیجه شرایط برای شکست عایقی مهیاتر می‌شود. لذا عایق روغن در فشارهای بالا دارای مقاومت بالاتری می‌باشد که این موضوع به ویسکوزیته روغن و میزان حباب‌های گاز درون روغن بستگی دارد.

۴-۳- میزان ولتاژ شکست روغن در فشارهای مختلف

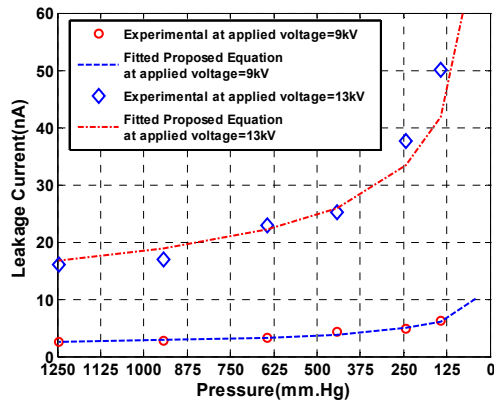
شکل ۴ میزان ولتاژ شکست روغن را در فشارهای مختلف، با توجه به شرایط تست مربوطه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، کاهش فشار روغن و محفظه نشان داده است که ولتاژ شکست روغن، نیز شدیداً کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در فشار روغن ۶۴۳ و ۱۴۳ میلی‌متر جیوه، ولتاژ شکست به ترتیب در حدود ۳۳ و ۱۶/۶ کیلوولت می‌باشد. لذا نتایج این آزمایش، نتایج حاصله از اندازه‌گیری جریان نشتی را تصدیق نموده است به طوری که در فشارهای فوق، میزان جریان نشتی (در ولتاژ اعمالی ۹ کیلوولت) به ترتیب در حدود ۳/۲ و ۶/۲ نانوآمپر می‌باشد.



شکل ۴: میزان جریان نشتی روغن عایق بر حسب تغییر فشار تحت ولتاژهای مختلف.

معدنی و تأثیر تنش فشار محیطی بر آن، آزمایش‌های مختلف انجام گردیده است. در شکل ۲ میزان جریان نشتی روغن تحت ولتاژهای مختلف در فشار محیطی (۶۴۳ میلی‌متر جیوه)، فشارهای کمتر از فشار محیط و همچنین فشارهای بیشتر از فشار محیط نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان جریان نشتی روغن، در فشارهای روغن کمتر از فشار محیط و از حد معینی به پائین‌تر، دارای نرخ افزایشی شدید بوده و به عبارتی در این محدوده روغن بسیار حساس می‌باشد که این موضوع می‌تواند به عنوان یک محدودیت در شرایط کاربرد عایق روغن تلقی گردد. مطابق این شکل، جریان نشتی در فشارهای روغن بیشتر از فشار محیط و تا حدودی نیز کمتر از فشار محیط، تقریباً ثابت و غیرممتد باقی می‌ماند. اما از یک فشار معین کمتر از فشار محیط، دیگر جریان رفتار قبل را نداشته، به طوری که افزایش سریع در جریان مشاهده گردیده است. بنابراین اگر فشارهای روغن کمتر از فشار مشخصی که فشار بحرانی نامیده می‌شود باشد، باعث افزایش سریع و شدید جریان و در نتیجه موجب می‌شود که در مدت خیلی کوتاهی قوس الکتریکی بین دو الکترود رخ دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است میزان این فشار بحرانی با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. به عبارتی هرچه ولتاژ اعمالی کمتر باشد، میزان این فشار بحرانی به طرف فشار خلاً نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به این موضوع، میزان ولتاژ و یا شدت میدان الکتریکی و همچنین فشار هوا به عنوان دو عامل می‌تواند در میزان جریان نشتی روغن مؤثر باشد به طوری که در یک فشار مشخص، افزایش میدان الکتریکی، باعث افزایش جریان نشتی خواهد شد. مقدار فشار بحرانی در ولتاژهای ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ کیلوولت به ترتیب در حدود ۱۴۳، ۱۹۰، ۲۴۳ و ۴۴۳ میلی‌متر جیوه می‌باشد. لذا می‌توان اینطور استدلال نمود که میزان این جریان نشتی تحت تأثیر تغییر فشار، به عواملی همچون ویسکوزیته روغن (که خود تابع دما و فشار است) و یا خروج میدان مولکول‌های روغن (حرکت بارهای الکتریکی تحت تأثیر میدان الکتریکی) بستگی دارد. همچنین، در حین انجام این آزمایش مشاهده گردید که کاهش فشار، امکان شروع ایجاد حباب‌های گاز موجود در روغن را افزایش داده است.

حال مطابق موارد مذکور و همچنین نظریه‌های علم شیمی، کاهش فشار باعث کاهش ویسکوزیته روغن و کاهش چگالی آن می‌شود و در نتیجه سیالیت روغن افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود تا جریان نشتی افزایش یابد به طوری که در فشارهای پایین‌تر، افزایش این جریان، بیشتر نمایان می‌شود. از طرفی در این مورد می‌توان چنین اظهار نمود که ایجاد حباب‌های زیاد گاز در فشارهای زیر فشار محیط و در حد فشار بحرانی و کمتر از آن، می‌تواند به عنوان عامل برجسته و غالب در افزایش جریان نشتی قلمداد گردد. لذا در یک ولتاژ معین و با کاهش فشار، ایجاد



شکل ۵: جریان نشتی روغن در فشارهای مختلف و منحنی برازش شده با توجه به رابطه PMLCP (در ولتاژهای اعمالی ۹ و ۱۳ کیلوولت).

جدول ۳: ضرایب بدست آمده برای مدل چندجمله‌ای لگاریتمی.

ضرایب	در ولتاژ ۹ کیلوولت	در ولتاژ ۱۳ کیلوولت
A_1	۲۷,۸۴۹	۱۰۰,۴
A_2	-۶,۱۹۲۸	-۸,۶۱۶۴
A_3	۰,۳۷۰۳۲	-۰,۵۰۲۳۲

بسیار ساده برای تخمین جریان نشتی روغن بر حسب فشار روغن تحت عنوان مدل توانی (PMLCP^۱) ارائه شده است. این رابطه یک تک‌جمله‌ای ریاضی ساده بوده و جواب نسبتاً مناسب و دقیقی می‌دهد. رابطه کلی PMLCP به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$y(x) = kx^n \quad (۴)$$

در این رابطه k و n ضرایب ثابت بوده و به سطح ولتاژ اعمالی بستگی دارند. متغیر x فشار هوای روغن و $y(x)$ جریان نشتی روغن می‌باشد. ضرایب ثابت رابطه فوق با لگاریتم طبیعی گرفتن از طرفین رابطه PMLCP قابل محاسبه است.

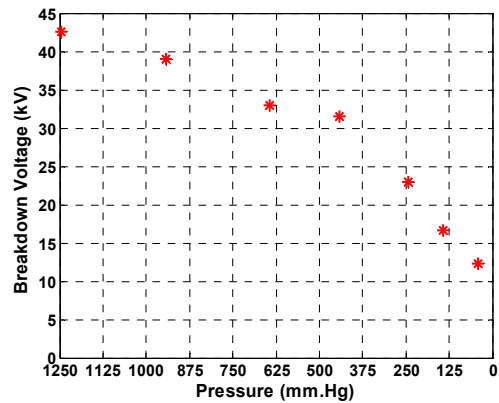
$$\ln(y(x)) = \ln(k) + n \cdot \ln(x) \quad (۵)$$

حال با رسم منحنی لگاریتم طبیعی جریان نشتی بر حسب لگاریتم طبیعی فشار روغن که تقریباً یک رابطه خطی خواهد بود، ضرایب ثابت معادله فوق به روش حداقل مربعات خطا به دست می‌آیند. در جدول ۴ ضرایب ثابت مدل پیشنهادی در دو ولتاژ ۹ و ۱۳ کیلوولت محاسبه شده است. در شکل ۵ مدل برازش پیشنهادی و نتایج اندازه‌گیری شده در سطوح ولتاژ فوق، نشان داده شده است. با توجه به ضرایب رابطه PMLCP و در سطح ولتاژ اعمالی ۹ کیلوولت رابطه زیر را می‌توان نوشت

$$I = I_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{-۰,۴۰۹} \quad (۶)$$

در رابطه فوق I و I_0 به ترتیب میزان جریان نشتی روغن در فشار هوای P و P_0 و در سطح ولتاژ مذکور است. از طرفی در مورد تغییر فشار هوا بر حسب تغییر ارتفاع از سطح آزاد دریا رابطه تقریبی (۷) برقرار می‌باشد. در این رابطه P_0 فشار در سطح آزاد دریا و P فشار در اختلاف ارتفاع H بر حسب کیلومتر از سطح دریای آزاد می‌باشد.

$$\frac{P}{P_0} = ۱ - ۰,۱H \quad (۷)$$



شکل ۴: ولتاژ شکست روغن بر حسب تغییر فشار.

جدول ۲: ضرایب بدست آمده برای مدل چندجمله‌ای درجه سوم.

ضرایب	در ولتاژ ۹ کیلوولت	در ولتاژ ۱۳ کیلوولت
A_1	۱۰,۳۰۶	۶۵,۸۴
A_2	-۰,۰۲۸۰۶۳	-۰,۱۴۳۲۶
A_3	۰,۰۰۰۰۳۴۹۵۸	۰,۰۰۰۱۴۶۲۱
A_4	-۰,۰۰۰۰۰۰۱۴۰۶۴	-۰,۰۰۰۰۰۰۰۵۰۹۱۴

۵- مدل‌های تخمین شاخص‌های عایقی

در این قسمت، مدل‌سازی ریاضی نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده به صورت جریان نشتی-فشار روغن و ولتاژ شکست-فشار روغن انجام شده است. بدین منظور از روش‌ها و توابع مختلف ریاضی برای برازش شاخص‌های اندازه‌گیری شده، به کمک آنالیز حداقل مربعات خطا استفاده شده است. بدین ترتیب با امتحان توابع مختلف و چگونگی دقت برازش آنها، توابع درجه دوم، سوم و لگاریتمی به صورت زیر انتخاب و در نظر گرفته می‌شود.

$$y(x) = A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3 \quad (۱)$$

$$y(x) = A_1 + A_2x + A_3x^2 \quad (۲)$$

$$y(x) = A_1 + A_2 \log(x) + A_3 (\log(x))^2 \quad (۳)$$

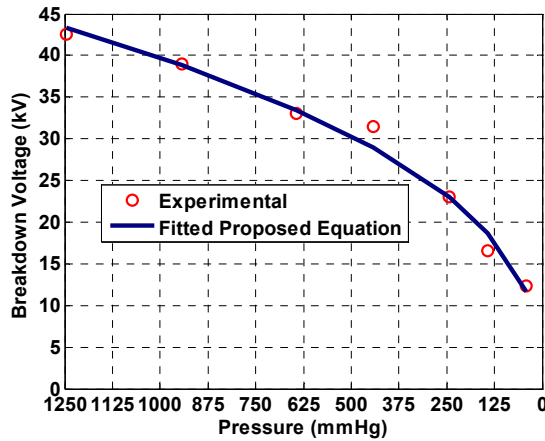
در روابط فوق A_1, A_2, A_3 و A_4 ضرایب ثابت، x متغیر مربوط به فشار روغن (بر حسب میلی‌متر جیوه) و $y(x)$ میزان جریان نشتی (بر حسب نانوامپر) و یا ولتاژ شکست روغن (بر حسب کیلوولت) می‌باشد. ضرایب ثابت با برازش منحنی و به روش حداقل مربعات خطا به دست می‌آیند. نکته آنکه در مدل‌های تخمین جریان نشتی، ضرایب ثابت مدل به میزان ولتاژ اعمالی بستگی دارد.

۱-۵ مدل‌سازی ریاضی جریان نشتی-فشار روغن

در این قسمت به کمک روابط (۱) و (۳) که جواب نسبتاً مناسب داده‌اند برازش منحنی با استفاده از روش‌های ریاضی انجام شده است. لذا جریان نشتی روغن، $y(x)$ ، با توجه به تغییرات فشار روغن (x) به صورت چندجمله‌ای‌هایی که در بالا بدان اشاره شده است، می‌تواند نوشته شود. ضرایب این مدل‌ها در ولتاژهای اعمالی ۹ و ۱۳ کیلوولت مطابق جداول ۲ و ۳ به دست آمده است.

۱-۱-۵ مدل پیشنهادی جدید

علاوه بر مدل‌های استخراجی فوق، در این قسمت یک مدل جدید و



شکل ۶: ولتاژ شکست روغن در فشارهای مختلف و منحنی برازش شده با توجه به رابطه PMBDP.

جدول ۸: ضرایب بدست آمده برای مدل چندجمله‌ای لگاریتمی.

A_1	A_2	A_3
۲۴,۲۶۳	-۹,۹۶۳۹	۱,۷۶۸۱

جدول ۹: مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی.

مقادیر از: (بر حسب کیلوولت)	فشار روغن بر حسب میلی‌متر جیوه				
	۱۲۴۳	۶۴۳	۲۴۳	۱۴۳	۴۳
رابطه (۱)	۴۲,۶۹	۳۴,۴۶	۲۲,۸۲	۱۷,۸۳	۱۱,۷۴
رابطه (۲)	۴۱,۸۵	۳۴,۷۰	۲۱,۸۱	۱۷,۵۶	۱۲,۹۲
رابطه (۳)	۴۳,۰۵	۳۳,۷۶	۲۲,۸۸	۱۸,۳۶	۱۱,۸۰
PMBDP	۴۳,۲۸	۳۳,۵۰	۲۲,۹۷	۱۸,۷۰	۱۱,۷۳
اندازه‌گیری شده	۴۲,۶۰	۳۳,۰۰	۲۳,۰۰	۱۶,۶۰	۱۲,۳۰

در این رابطه k و n ضرایب ثابت، x فشار هوای روغن و $y(x)$ ولتاژ شکست روغن می‌باشند. با برازش نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده مقادیر ثابت k و n به ترتیب ۲/۷۲۶ و ۰/۳۸۸ به دست می‌آیند. در شکل ۶ PMBDP برازش شده و نتایج اندازه‌گیری شده، مشخص شده است. با توجه به این مدل، اگر V_b و V_0 ولتاژهای شکست این نوع روغن، به ترتیب در فشارهای هوای P_0 و P باشد، در نتیجه می‌توان رابطه زیر را نوشت.

$$V_b = V_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/n} \quad (9)$$

با توجه به (۷) و همچنین رابطه فوق، مشخص است که افزایش ارتفاع یک و دو کیلومتری از سطح دریای آزاد باعث می‌شود تا میزان ولتاژ شکست این روغن به ترتیب به حدود ۰/۹۶۰ و ۰/۹۱۷ برابر میزان ولتاژ شکست روغن در سطح دریای آزاد کاهش یابد.

در جدول ۹ نتایج مقایسه مدل‌ها ارائه گردیده با یکدیگر و همچنین با مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داده شده است. با توجه به این جدول و همچنین شکل ۶ مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی اخیر نیز هم دقت مناسب داشته و هم یک رابطه بسیار ساده از لحاظ محاسبات می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با انجام آزمایش‌های مختلف، تأثیر فشار محیط/ارتفاع محل نصب ترانسفورماتور بر روی میزان جریان ناشی و همچنین ولتاژ شکست روغن معدنی مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار گرفت. به طوری که

جدول ۴: ضرایب ثابت بدست آمده برای PMLCP.

ضرایب	در ولتاژ ۹ کیلوولت	در ولتاژ ۱۳ کیلوولت
k	۴۶,۵۳۴۸	۳۴۴,۲۹۵۴
n	-۰,۴۰۹	-۰,۴۲۴۴۵

جدول ۵: مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی.

مقادیر از: (بر حسب نانوامپر)	فشار روغن بر حسب میلی‌متر جیوه					
	۱۲۴۴	۶۴۳	۲۴۳	۱۲۴۴	۶۴۳	۲۴۳
رابطه (۱)	با اعمال ولتاژ ۹ کیلوولت			با اعمال ولتاژ ۱۳ کیلوولت		
	۲,۴۲	۲,۹۷	۵,۲۵	۱۵,۸۵	۲۰,۶۴	۳۸,۹۳
رابطه (۳)	با اعمال ولتاژ ۹ کیلوولت			با اعمال ولتاژ ۱۳ کیلوولت		
	۲,۵۲	۳,۲۹	۵,۰۰	۱۳,۴۹	۲۳,۶۸	۳۷,۹۱
PMLCP	با اعمال ولتاژ ۹ کیلوولت			با اعمال ولتاژ ۱۳ کیلوولت		
	۲,۵۲	۳,۳۰	۴,۹۲	۱۶,۷۲	۲۲,۱۳	۳۳,۴۵
اندازه‌گیری شده	با اعمال ولتاژ ۹ کیلوولت			با اعمال ولتاژ ۱۳ کیلوولت		
	۲,۶۰	۳,۲۰	۴,۸۰	۱۶,۱۰	۲۲,۸۰	۳۷,۷۰

جدول ۶: ضرایب بدست آمده برای مدل چندجمله‌ای درجه دوم.

A_1	A_2	A_3
۱۰,۷۹۴	۰,۰۵۰۲۵۶	-۰,۰۰۰۰۲۰۳۳۳

جدول ۷: ضرایب بدست آمده برای مدل چندجمله‌ای درجه سوم.

A_1	A_2	A_3	A_4
۸,۷۴۱	۰,۰۷۲۵۰۶	-۰,۰۰۰۰۶۵۷۷۴	۰,۰۰۰۰۰۰۰۲۳۶۵۶

با توجه به (۶) و (۷)، افزایش ارتفاع یک و دو کیلومتری از سطح دریای آزاد باعث می‌شود تا میزان جریان ناشی در حالت فوق به ترتیب به حدود ۱/۰۴۴ و ۱/۰۹۶ برابر میزان جریان ناشی روغن در سطح دریای آزاد افزایش یابد. حال با توجه به مدل‌های فوق، در این قسمت جهت تعیین میزان صحت مدل‌ها، مقایسه‌ای انجام شده است. در جدول ۵ نتایج مقایسه این مدل‌ها با یکدیگر و همچنین با مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۵ و مقایسه مدل‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی دقت نسبتاً مناسب داشته و هم یک رابطه بسیار ساده از لحاظ محاسبات می‌باشد.

۲-۵ مدل‌سازی ریاضی ولتاژ شکست-فشار روغن

در این قسمت به کمک روابط (۱) الی (۳) که جواب نسبتاً مناسب داده‌اند برازش منحنی با استفاده از روش‌های ریاضی انجام شده است. در روابط فوق، $y(x)$ ولتاژ شکست روغن و x فشار روغن می‌باشد. ضرایب این مدل‌ها در جدول‌های ۶ الی ۸ آمده است.

۱-۲-۵ مدل پیشنهادی جدید و ساده

حال علاوه بر روابط فوق، در این قسمت همانند مدل برای جریان ناشی، یک مدل جدید و بسیار ساده برای تخمین ولتاژ شکست روغن بر حسب فشار روغن و به صورت مدل توانی (PMBDP¹) ارائه شده است. این رابطه بسیار ساده بوده و جواب مناسب و دقیقی می‌دهد. رابطه کلی این مدل همانند تخمین جریان ناشی به صورت زیر است.

$$y(x) = kx^n \quad (8)$$

[7] International Electrotechnical Commission, *IEC60156, Method for the Determination of the Electric Strength of Insulation Oils*, 1963.

محمد میرزایی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت بترتیب در سالهای ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ از دانشگاه شهید چمران اهواز و دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. نامبرده پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق قدرت در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های تحقیقاتی و علمی مورد علاقه نامبرده شامل موضوعاتی همچون پیر شدگی عایق‌های الکتریکی در تجهیزات فشارقوی، تشخیص شرایط سیستم عایقی و مدیریت عمر در تجهیزات فشارقوی، مهندسی عایق‌ها و فشارقوی، بکارگیری شبکه‌های هوشمند در تعیین و آشکارسازی عیوب داخلی تجهیزات فشارقوی و بطور کلی مسائل عایقی مربوط به تجهیزات فشارقوی مانند ترانسفورماتورها، کابل‌ها، ژنراتورها، بریکرها، موتورهای الکتریکی، مقرها و همچنین مسائل عایقی و مکانیکی مربوط به خطوط هوایی می‌باشد.

احمد غلامی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سالهای ۱۳۵۳ و ۱۳۶۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران و دانشگاه یومیسیت انگلستان به پایان رسانده است. نامبرده همچنین در سال ۱۳۶۸ مدرک دکترای مهندسی برق خود را از دانشگاه یومیسیت انگلستان دریافت نمود و هم‌اکنون عضو هیأت علمی و دانشیار دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند مهندسی فشارقوی، عایق‌های الکتریکی، هماهنگی عایقی و طراحی خطوط هوایی انتقال انرژی می‌باشد. ایشان تاکنون بیش از ۱۰۰ مقاله در کنفرانس‌ها و ژورنال‌های علمی و معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسانده است.

حمیدرضا طیبی در سال ۱۳۶۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه دهلی هند دریافت نمود. نامبرده در سال ۱۳۷۶ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه برادفورد انگلستان گردید. او فعالیت علمی خود را از سال ۱۳۵۹ و با تشکیل جهاد دانشگاهی در جهاد دانشگاهی علم و صنعت آغاز کرد و اینک نیز عضو هیئت علمی این نهاد می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان فشارقوی، الکترونیک صنعتی و توسعه تکنولوژی است.

آزمایشها نشان داده است کاهش فشار روغن در ترانسفورماتور می‌تواند ضمن افزایش جریان نشتی در روغن باعث کاهش شدید ولتاژ شکست آن شود. در نتیجه عمر قابل انتظار روغن به مرور زمان تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد.

از طرفی یک مدل ریاضی جدید و ساده نیز برای تخمین ولتاژ شکست و همچنین میزان جریان نشتی روغن معدنی با توجه به تغییرات فشار و بر اساس آزمایشهای متعدد ارائه و پیشنهاد گردید. به طوری که مدل اخیر هم دارای دقت نسبتاً مناسب و هم یک مدل ریاضی بسیار ساده می‌باشد. این مدل پیشنهادی نشان داده است که افزایش ارتفاع یک و دو کیلومتری از سطح دریای آزاد باعث می‌شود تا میزان ولتاژ شکست نمونه روغن به ترتیب به حدود ۰/۹۶۰ و ۰/۹۱۷ برابر میزان ولتاژ شکست روغن در سطح دریای آزاد کاهش یابد. همچنین این مقدار افزایش ارتفاع، باعث می‌شود تا میزان جریان نشتی روغن در یک سطح ولتاژ اعمالی ثابت به ترتیب به حدود ۱/۰۴۴ و ۱/۰۹۶ برابر میزان جریان نشتی روغن در سطح دریای آزاد افزایش یابد.

مراجع

- [1] A. Nosseir, N. Higgi, H. Said, and M. Awad, "Effect of ageing on the characteristics of mineral oil," in *Proc. IEEE 11th Int. Conf. ICDEL*, pp. 451-455, Switzerland, Jul. 1993.
- [2] M. A. A. Wahab, M. M. Hamada, A. G. Zeitoun, and G. Ismail, *Novel Modeling for the Prediction of Aged Transformer Oil Characteristics*, Elsevier, Electric Power Systems Research 51, pp. 61-70, 1999.
- [3] P. R. Krishnamoorthy, K. R. Krishnaswamy, S. Vijayakumari, and K. Kumar, "Ageing of mineral oils-a diagnostic study," in *Proc. the 3th Int. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 1, pp. 59-62, Tokyo, Japan, Jul. 1991.
- [4] T. K. Saha, M. Darveniza, D. J. T. Hill, and T. T. Le, "Electrical and chemical diagnostics of transformers insulation-part B: accelerated aged insulation samples," *IEEE Tran. on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1555-1561, Oct. 1997.
- [5] J. J. Kelly and D. P. Mayers, "Transformer life extension through proper reinhibiting and preservation of the oil insulation," *IEEE Tran. on Industrial Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 185-193, Jan./Feb. 1995.
- [6] M. Mirzaie, A. Gholami, and H. R. Tayebi, "Thermal degradation of cellulose insulation in power transformers," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Solid and Dielectric Industrial Applications*, pp. 673-676, Winchester, UK, Jul. 2006.