

جهت خرید فایل word به سایت www.kandooon.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

عایق های مایع در برق قدرت

چکیده:

این پروژه که تحت عنوان عایق مایع در برق قدرت می باشد از سه فصل تشکیل یافته است که در طول این فصل ضمن آشنایی شما با عایق های مایع و انواع آنها شما را با چگونگی کاربرد و خصوصیات فیزیکی این عایق ها آشنا می سازیم.

در فصل اول تحت عنوان گروه بندی عایق های مایع شما را با انواع عایق های مایع و گروه بندی این عایق ها آشنا کرده و ضمن آشنایی هر چه بیشتر با این گونه عایق ها شما را با خواص فیزیکی و شیمیایی این عایق ها آشنا می کنیم.

در فصل دوم که تحت عنوان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عایق های مایع می باشد ضمن آشنایی شما با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این عایق ها و ضمن آشنایی هر چه بیشتر با این گونه عایق ها با روغن های این عایق و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و خواص الکتریکی این عایق آشنا می شوید.

در فصل سوم که تحت عنوان شکست در عایق های مایع ضمن آشنایی با شکست در این گونه عایق و نظریه های مربوط به این شکست در این عایق ها با نظریه های شکست و همچنین با توجه به نظریه های شکست به ترکیب عایق مایع و جامد پرداخته و شما را هر چه بیشتر با شکست عایق های مایع آشنا می سازد و در انتها به نتیجه گیری مباحث مربوطه در این سه فصل پرداخته می شود.

مقدمه:

با توجه به افزایش روز افزون میزان تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه ها، اهمیت انتقال انرژی از طریق خطوط انتقال با ولتاژهای بسیار بالا روز به روز افزایش می یابد؛ به گونه ای که ولتاژ خطوط فشار قوی از مرز هزار کیلوولت گذشته است و روند این افزایش با سرعت زیادی انجام می گردد. بدین منظور برای دانشجویان مهندسی برق مناسب و ضروری است تا با مسائل مربوط به ولتاژهای فشار قوی آشنا شده، پشتوانه مناسبی در زمینه مهندسی فشار قوی داشته باشند. البته همیشه علم مهندسی فشار قوی درگیر با مسایل عایق کاری بوده است؛ زیرا با افزایش سطح ولتاژ، مسائل عایق کاری تجهیزات فشار قوی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار خواهد بود. بالطبع با افزایش سطح ولتاژ، خصوصیات انواع عایقهای بکار رفته، مسائل میدانهای الکتریکی، شکست الکتریکی عایقها و دیگر موارد مرتبط با آن ها، جایگاه خاص و مهمی را بخود اختصاص می دهد.

همچنین مباحث فیزیک و تکنولوژی عایق های الکتریکی بر روی اصول متعددی استوار شده است. این اصول مربوط به علوم فیزیک، مکانیک، شیمی و ریاضی است، بنابراین آسان می توان پذیرفت که این رشته از مهندسی برق از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

پیدایش و تکامل انواع عایقهای الکتریکی، چه برای مهندسی الکترونیک و چه برای مهندسی الکتروتکنیک پس از جنگ جهانی دوم از چنان سرعتی برخوردار بوده است که شناسایی و کاربرد صحیح آنها برای مهندسین متخصص نیز خالی از دشواری نبوده است. به ویژه ساخت و تهیه عایقهای ترکیبات کربنی از راه مصنوعی که در بیست سال اخیر سیلی از انواع عایقها با خواص ممتاز و کاربردی وسیع را برای ساختمان دستگاه ها و ماشین های الکتریکی عرضه داشته است که طبیعی است بالا بردن بیشتر سطح آگاهی مهندسین برق را در این زمینه الزام آور می سازد.

بدون شک، تکامل صنعت عایقسازی، بویژه پس از جنگ جهانی دوم، سهم بسزایی در تحقق یافتن پیشرفتهای الکترونیک در سال های اخیر داشته است. تنها موفقیتهای چند ساله اخیر، در زمینه

ساختن عایقهای مصنوعی، نشانه بارزی از کوشش های همه جانبه ای است که همه دانشمندان علوم مهندسی برای امکان دادن به استفاده بیشتر از نیروی برق، در زمینه های مختلف، آغاز کرده اند. وظیفه اصلی عایقهای الکتریکی عبارتست از عایق کردن دو یا چند هادی که تحت فشارهای الکتریکی مختلفی قرار گرفته باشند، نسبت به یکدیگر و یا نسبت به زمین.

از عایقهای الکتریکی، خصوصیات دیگری نیز، از قبیل مقاومت در برابر مواد شیمیایی و مقاومت در مقابل حرارت، مورد انتظار است تا آنکه تلفات ناشی از حرارت در آنها در حداقل باقی بماند. در کنار این خصوصیات، عایقها باید دارای خواص الکتریکی متعدد دیگری نیز باشند. این خواص در درجه اول عبارتند از:

۱- قابلیت هدایت الکتریکی در حداقل ممکن

۲- تلفات محدود انرژی، آنگاه که عایق در یک میدان الکتریکی واقع می گردد.

۳- دارا بودن عدد عایقی بزرگ

۴- استقامت الکتریکی قابل توجه

پیشرفت و تکامل عایقهای الکتریکی در سی سال اخیر، با تهیه و ساختن عایقهای جدید و با بهتر کردن خواص عایقهای موجود، بسیار جالب توجه بوده است.

در شرایطی که از ولتاژ فشار قوی استفاده می شود، طراحی دقیق سیستم عایقی از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین منظور از عایق های مختلفی از قبیل گازها، جامدات و مایعات و ایجاد خلاء و یا ترکیبی از آنها استفاده می شود. برای صرفه جویی و اطمینان از انجام موفق کارها باید دانش مربوط به عوامل فساد عایق و نیز عواملی را که باعث کاهش ولتاژ شکست و از بین رفتن عایق می شوند، در طراحی مورد توجه قرار داد. وظیفه عایق ها، ایزولاسیون (جداسازی الکتریکی) ولتاژهای فشار قوی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به زمین می باشد، تا هم ولتاژ و هم جریان فشار قوی در مسیر مربوط به خود قرار گیرند و هم از بروز خسارت و ضرر و زیان به افراد و تجهیزات جلوگیری شود. عایق

ایده آل (طبق تعریف) یک نارسانای جریان الکتریسیته است که هیچ جریان الکتریکی را از خود عبور نمی دهد؛ ولی عملاً هیچ ماده ای را در طبیعت نمی توان یافت که ویژگی یک عایق ایده آل را داشته باشد. اما برای استفاده های کاربردی، یک عایق، ماده ای است که عبور جریان از خود را در حد بسیار کم و مطلوبی محدود نماید؛ به حدی که بتوان از آن صرفنظر کرد. به عبارت دیگر، در ولتاژهای عادی، مقاومت الکتریکی عایق خیلی زیاد است. اگر ولتاژهای بسیار بالا از عایق، جریان قابل ملاحظه ای عبور کند. در حقیقت، عایق دیگر خاصیت عایقی خود را از دست داده، دچار شکست الکتریکی می شود؛ به عبارت دیگر، عایق تبدیل به هادی می شود. قبل از بروز شکست در عایق ها، عایق شبیه به یک خازن است که دو الکتروود در دو طرف آن، صفحات خازن هستند و با اعمال ولتاژ به این خازن، شارژ می شود. پس از شکست الکتریکی عایق، این خازن در واقع دشارژ و تخلیه می گردد. به همین دلیل پدیده شکست الکتریکی عایق ها را، تخلیه الکتریکی نیز می گویند. استقامت الکتریکی عایق ها را برحسب بالاترین شدت میدان الکتریکی قابل تحمل، قبل از تخلیه الکتریکی می سنجند و معمولاً آن برحسب KV/cm یا KV/mm بیان می شود. بررسی عملکرد عایق ها، نیاز به بررسی های عملی (با استفاده از نظریه فیزیکی و روابط ریاضی) و همچنین بررسی های تجربی (از طریق آزمایش ها و اندازه گیری های لازم)، روی عایق ها دارد و پیشرفت های حاصل در زمینه مکانیزم تخلیه الکتریکی عایق ها همواره با این دو مورد همگام بوده است.

فصل اول:

گروه بندی عایق های مایع

۱-۱- مقدمه:

تقسیم و دسته بندی عایقها منطقاً از دیدگاه های مختلفی امکان پذیر است؛ مثلاً ساختار مولکولی عایق و یا خواص شیمیایی و فیزیکی آنها - که گروه بندی عایقها، از این دو نقطه نظر، ما را بیشتر به واکنش عایق در قبال تغییرات حرارت و فشار، شدت میدان الکتریکی و نحوه فروپاشیهای عایقی و همچنین موارد کاربرد عایق آشنا می سازد. بنابراین، خواص عایقها را با گروه بندی آنها از نقطه نظر خواص شیمیایی و فیزیکی و ساختار مولکولی آنها بررسی می کنیم:

عایقهای الکتریکی به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: عایقهای معدنی، عایقهای ترکیبات کربنی.

از جانبی دیگر، عایقها در سه شکل ظاهر می شوند، جامد، مایع و گاز

۱- عایقهای معدنی: عایقهای معدنی خود به دو دسته زیر تقسیم شده اند:

الف) عایقهای معدنی که به شکل طبیعی خود به کار گرفته می شوند، مانند سنگ مرمر و سنگ شیفر

- میکا - پنبه نسوز - هوا و ازت

ب) عایقهای معدنی که برای استفاده و به کار گرفتن باید قبلاً آماده شوند. مانند عایقهایی که از خاک

چینی و یا گل رس تهیه می شوند و همچنین شیشه و کوارتس

۲- عایقهای ترکیبات کربنی: این عایقها نیز خود به دو دسته زیر تقسیم شده اند:

الف) عایقهای ترکیبات کربنی که به شکل طبیعی خود به کار گرفته می شوند، مانند چوب، کائوچوک

طبیعی و گوتا پرشا.

ب) عایقهای ترکیبات کربنی که پس از آماده شدن و تغییراتی در آنها بکار گرفته می شود، مانند پنبه،

ابریشم، کاغذ، سلولز، ابریشم مصنوعی، سلولز استر.

عایقهای مصنوعی ترکیبات کربنی نیز متعلق به این گروه و برحسب فرآیند شیمیایی که در ساخت آنها به کار گرفته می شود، به سه دسته تقسیم می شوند:

- عایقهای گروه پلی مریزاسیون

- عایقهای گروه پلی کندانساسیون

عایقهای گروه پلی آدیسیون

همچنین عایقهای که از مواد مختلف ساخته می شوند:

- صفحات عایقی پرس شده

- نخها و رشته های شیشه ای

- ضمغها و لاکها

۳- عایقهای مایع: روغن های عایق، کلوفن

۴- گازهای عایق: هوا و گازهای الکترونکاتیف

عایقهای معدنی طبیعی

سنگهای مرمر و سنگهای شیفر، که در گذشته به منظور ساختن تابلوهای الکتریکی کاربردی داشته است، امروزه در الکتروتکنیک به ندرت مورد استفاده ای می یابند.

۱) میکا: این عایق در ماشینهای الکتریکی، خازنها و بسیاری دستگاه های الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد، از خواص ویژه آن قابلیت تورق آن است که امکان می دهد لایه های به ضخامت لایه یک هزارم میلیمتر از آن ساخته شود. به علاوه، قابلیت کشش و خمش این عایق نیز بسیار خوب است.

دو نوع از این عایق کاربرد بیشتری یافته است.

موسکویت (پتاسیم میکا) با رابطه شیمیایی:



که رنگ آن متمایل به قرمز، زرد و یا قهوه ای و سبز می باشد؛

ملوگوپیت (ماگنیزیم میکا) با رابطه شیمیایی :



با رنگ زرد، قهوه ای.

عامل تعیین کننده در کیفیت میکا اندازه و رنگ قطعات میکا است، همچنین درجه خلوص و کامل بودن بلورهای آن است. بهترین میکا دارای ضخامتی برابر ۰/۱ میلیمتر و رنگ صورتی دارد و ترک خوردگی در آن مشاهده نمی شود. بهترین خواص میکا استقامت الکتریکی بسیار خوب آن است. صفحاتی در آن با ضخامت ۱.... ۰/۰۵۵ میلیمتر دارای استقامتی برابر KV/Cm ۹۰۰-۱۳۵ می باشد.

عدد عایقی میکا $\epsilon = 6/5 - 8$ است. جذب رطوبت و آب آن در حداقل و تقریباً صفر است. استقامت آن در برابر حرارت بسیار خوب و در حرارتی برابر ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه تغییر رنگ داده و شکننده می شود. قطعات کوچک میکا را با لاک آمیخته و به نام میکانیت در بازار عرضه می گردد. معمولاً قطعات کوچک را با لاک آمیخته و بر روی کاغذ یا پارچه می چسبانند، بنابراین، میکا در شکل اخیر قابل انعطاف بوده و آن را میکا فولیوم می نامند، اخیراً از میکای طبیعی به کمک مواد چسبنده لایه هایی با ضخامت ۰/۱-۰/۴ میلیمتر به شکل نوار تهیه می شود که برحسب کاربرد دارای ابعاد مختلفی است و به نام سامیکافولیوم معروف می باشد.

(۲) آسبست (سیلیکات ماگنیزیم):

آسبست عایقی است که از الیاف کریستالی تشکیل شده است این الیاف قابلیت خمش قابل ملاحظه ای دارند. آسبست های معادن مختلف دنیا دارای خواص عایقی و فیزیکی مختلفی هستند.

مهمترین آسبست های موجود عبارتند از:

(۲-۱) آسبست موسوم به سرپن تین با رابطه شیمیایی:



این نوع از آسبست دارای مقاومت حرارتی تا $600^{\circ}C$ درجه سانتی گراد می باشد در بالای این درجه از حرارت، آب متبلور شده این آسبست از پیوند خود جدا می گردد. این نوع آسبست در کانادا و آفریقای جنوبی یافت می شود.

۲-۲) آسبست موسوم به هورن بلند

این نوع از آسبست از نوع بالا سخت تر است و در کشور شوروی استخراج می گردد کاربرد این نوع آسبست در صنایع ایجاد حرارت از راه عبور جریان است که در سالهای اخیر به میزان نسبتاً زیادی جای خود را به الیاف شیشه داده است.

۳) عایقهای معدنی که برای استفاده در الکتروتکنیک باید قبلاً آماده شوند.

۳-۱) عایقهای از خاک چینی و گل رس - سرامیک

۳-۲) کائولن یا خاک چینی - قسمت اصلی این عایق معدنی از کائولینیت است.

۲-۱- طبقه بندی مواد براساس دمای کار:

مواد عایقی همیشه براساس دمای کار نامی آنها طبقه بندی می شوند. با ظهور بسیاری از مواد جدید عایقی، طبقه بندی جدید مواد نیز مانند جدول (۱-۱) به وجود آمده است این دسته بندی براساس دمای نامی عایق هاست. البته طول عمر نامی عایقها وقتی معتبر است که دمای کار عایق در شرایط بهره برداری، همواره از دمای نامی آن بیشتر نشود.

نمونه ای از مواد عایقی در هر یک از طبقات جدول (۱-۱) عبارتند از:

طبقه *Y*: کاغذ، پنبه، ابریشم، *PVC*، و لاستیک طبیعی؛

طبقه *A*: پنبه و ابریشم یا کاغذی که به طور کامل در یک دی الکتریک مایع غوطه ور، آغشته و یا کاملاً پوشیده شده باشد؛

طبقه *E*: پلی اتیلن، سلولز؛

طبقه *B*: میکا، پشم شیشه، پنبه نسوز، پلی استر، باکلیت، آسبست و غیره همراه با مواد چسب دار

مناسب؛

طبقه F : اپوکسی رزین، و مواد طبقه B اصلاح یافته و قابل کاربرد در دماهای بالاتر؛

طبقه H : لاستیک سیلیکون دار

طبقه C : تفلون و عایق های گروه B که آغشته به چسبنده های غیر آلی شده باشند.

تجهیزات الکتریکی با طبقه عایقی مخصوص می توانند در دمای بالاتری هم کار کنند،

جدول (۱-۱): طبقه بندی مواد عایقی بر حسب دما

دما ($^{\circ}C$)	طبقه
۹۰	Y
۱۰۵	A
۱۲۰	E
۱۳۰	B
۱۵۵	F
۱۸۰	H
بالای ۱۸۰	C

اما عمر مفید آن ها کاهش می یابد. عمر تجهیزات، تابعی از دما و زمان است و در کل عملکرد اجزاء، به

عمل آن ها در سیستم بستگی دارد. رابطه تقریبی برای تخمین عمر عایق ها را می توان به صورت زیر

ارائه کرد:

$$L = L_0 \times 2^{\frac{-(\theta - \theta_0)}{\Delta\theta}} \quad (1-1)$$

که در این رابطه:

L = طول عمر عایق در شرایط کارکرد با دمای θ ،

L_0 = طول عمر نامی عایق در دمای نامی θ_0 مربوط به کلاس عایقی

$\Delta\theta$ = پله دمایی است که عمر عایق نصف می شود. (برای عایق های مختلف بین ۶ تا ۸ درجه سانتی گراد است)

۱-۳- عایقهای مایع - روغن:

مهمترین عایق های مایع عبارتند از روغنهای معدنی که از ترکیبات کربنی تشکیل شده اند. این روغنها از پالایش نفت خام به دست می آیند.

با بالا بردن حرارت پالایش، مشتقات زیر به دست می آیند: بنزین، نفت، روغن معدنی، گریس، وازلین و قیر از روغنهای به دست آمده تنها تعدادی از آنها برای عایقهای الکتروتکنیک مناسب می باشند. روغنهای عایق در الکتروتکنیک باید دارای خواص زیر باشند:

- خواص خوب الکتریکی

- انتقال حرارت از راه جابجایی

- استقامت زیاد الکتریکی در مقابل فشار ضربه ای

- حفاظت و پوشش عایقهای جامد در مقابل شرایط نامساعد خارج

- خاموش کردن جرقه الکتریکی - جرقه الکتریکی روغن را به کربن و هیدروژن تجزیه می کند که از این راه اتمسفری از هیدروژن تشکیل می گردد و حرارتی زیاد پدید می آید این حرارت به وسیله روغن هدایت می گردد.

خود هیدروژن باعث خنک شدن محل جرقه الکتریکی خواهد گردید.

جنبه ضعف روغنهای الکتریکی عایق قابل اشتعال بودن آنهاست که در صورت استعمال کلوفن این جنبه منفی نیز برطرف می گردد.

روغنهای معدنی از لحاظ خواص شیمیایی به سه دسته اصلی تقسیم می گردند:

- روغنهای نفتی که بیش از دوسوم آنها از پارافین است و پیوند مولکولی آن زنجیری است.

- روغنهای متانی که بیش از دوسوم آنها از نفت است و پیوند مولکولی آن حلقوی است.

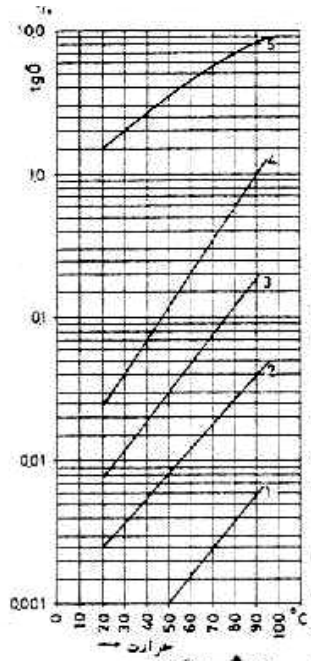
- روغنهای متانی - نفتی که در آنها نسبت نفت و متان هیچ کدام به حد قابل توجهی زیاد نیستند.

نقطه انجماد روغنهای متانی بالا بوده و از این جهت در دستگاه های نصب شده در محوطه آزاد نباید مورد استفاده قرار گیرد. در روغنهای نوع دوم و سوم، بالعکس، نقطه انجماد پایین قرار گرفته است. روغنهای معدنی مورد استفاده در فشار قوی اجازه ندارند مقادیر زیادی از ترکیبات کربنی سیر نشده به همراه داشته باشند؛ و بدین لحاظ، اغلب ترکیبات کربنی و پارافینی و نفتی با رابطه CH_3 $(CH_2)_{20}CH_3$ مورد استفاده قرار می گیرند.

روغنهای معدنی در ارتباط با اکسیژن و حرارت، مواد اکسید شده ای می دهند که به شکل اسید و مواد غیر محلول ته نشین می شود. این مواد ته نشین شده، بویژه به علت عدم هدایت حرارت بسیار زیان بخش است. تشکیل مواد ته نشین شده در روغن به «کهنه شدن» روغن منتهی می شود. عمل کهنه شدن روغن بیشتر و سریعتر در مجاورت فلزات مثل آهن و مس، انجام می گیرد، در حالیکه مجاورت آلومینیوم و نقره در این مورد بی تأثیر است.

عدد عایقی روغن بین ۲/۲ تا ۲/۴۵ قرار می گیرد که با افزایش حرارت به میزان بسیار کمی تغییر می یابد. روغن کهنه شده، بالعکس، با افزایش حرارت، عدد عایقی خود را تغییر می دهد؛ و این به علت تشکیل مواد ته نشین شده است. در جدول زیر، تغییر عدد عایقی در تابعیت از حرارت برای یک روغن کهنه، که در آن رطوبت نیز تأثیر گذارده است، داده می شود.

$T(^{\circ}C)$	20	60	90
ϵ	2.2	5.8	21



شکل ۱-۱- ضریب تلفات ۵ نوع روغن معدنی در تابعیت از حرارت

به دلیل کوچک بودن عدد عایقی روغن، آنجا که عایقی جامد با روغن، تحت فشاری الکتریکی به سری بسته شده باشد، فشار الکتریکی بزرگی بر روی روغن قرار می گیرد و عایق به سری بسته شده با روغن تحت ولتاژ نسبتاً کوچکی واقع می شود. ضریب تلفات $tg\delta$ در روغن، مادامی که حرارت ایجاد شده در مایع به خارج هدایت شود، رل مهمی را در پدید آوردن فروپاشی حرارتی بازی نمی کند.

بالعکس، کاغذ غوطه خورده در روغن، از لحاظ ضریب تلفات، حساسیت قابل توجهی را نشان می دهد؛ و بنابراین در عایق «کاغذ - روغن» باید سعی کرد که ضریب تلفات پایین قرار گیرد؛ و به همین دلیل در ساختمان خازنها و ترانسفورماتورهای روغنی تعداد قابل ملاحظه ای از روغنهای معدنی، به علت بالا بودن ضریب تلفات خود، کاربردی ندارند.

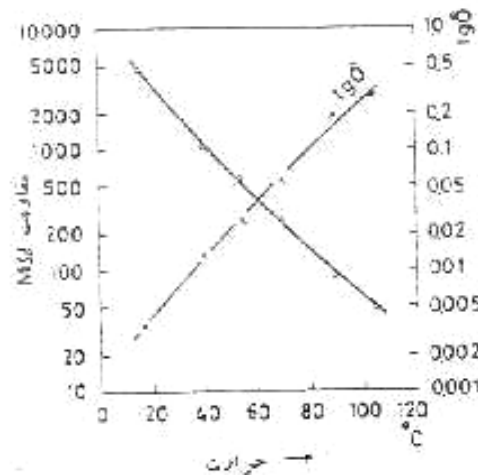
در شکل ۱-۱- ضریب تلفات $tg\delta$ برای چندین نوع روغن با کیفیتهای متفاوت را در تابعیت از حرارت نشان می دهیم:

۱- روغن معدنی با کیفیت خوب

۲- روغن معدنی با کیفیت متوسط

۳ و ۴- روغن معدنی با کیفیت نامطلوب

۵- مایع عایق، ساخته شده بر مبنای بنزول.



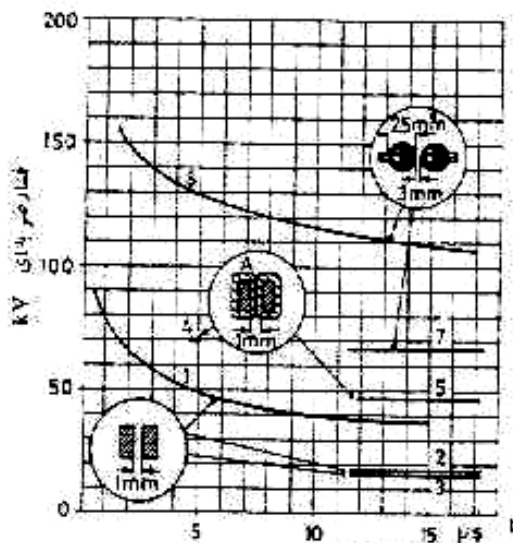
شکل ۱-۲- ضریب تلفات و مقاومت الکتریکی روغن در تابعیت از حرارت

در این زمینه، سنجش مقاومت الکتریکی روغن نیز مانند اندازه گیری ضریب تلفات مبین کیفیت روغن است به همین علت، در شکل ۱-۲ مسیر منحنی ضریب تلفات و مقاومت روغن به عنوان تابعی از حرارت نشان داده شده است.

۱-۳-۱- استقامت الکتریکی روغن عایق:

روغنی که از صافی عبور داده شده باشد و از ذرات گاز و مواد بیگانه به میزان قابل توجهی پاک شده باشد، دارای استقامت الکتریکی بزرگی است. اندازه گیری های متعددی، در این زمینه، شدت میدان فروپاشی الکتریکی را بیش از ۲۰۰ کیلوولت بر سانتی متر اندازه گیری کرده است. استقامت الکتریکی روغنها، تا حد نسبتاً زیادی، از شکل و فاصله قطبها تبعیت می کند. به همین علت، شکل قطبها و فاصله آنها استاندارد شده است. در میدان الکتریکی همگنی با فاصله ۱۵ تا ۴۰ سانتی متر بین قطبهای گوی شکل با قطر ۵۰ سانتی متر شدت میدان فروپاشی الکتریکی ۴۵ کیلوولت بر سانتی متر اندازه گیری

شده است. همین مقدار برای دو قطب صفحه - صفحه با فاصله سه سانتی متر بدست آمده است. سرعت افزایش فشار الکتریکی نیز بر روی استقامت الکتریکی روغن موثر است. برای مثال، بین دو قطب صفحه ای شکل با قطر ۱۰ سانتی متر و لبه های گرد شده و فاصله ۹۵ میلیمتر، شدت میدان فروپاشی الکتریکی، پس از ۷ دقیقه از گذراندن فشار الکتریکی روی قطبها، ۱۱/۵ کیلوولت بر سانتی متر بوده است پس از یک دقیقه ۱۲/۵ و یک ثانیه ۱۶ کیلوولت بر سانتی متر. بدیهی است که این مقدار برای فشار الکتریکی ضربه ای افزایش می یابد. بنابراین، فشار الکتریکی فروپاشی برای روغن و کاغذ و روغن را در شکل ۳-۱ نشان داده ایم. تخلیه الکتریکی در روغن از جهات مختلف نظیر تخلیه الکتریکی نزد گازهاست تخلیه ناقص الکتریکی در روغن نیز مانند گازها مشاهده می گردد. وجود حبابهای گاز و یا هوا باعث یونیزاسیون در روغنها می گردد، چنانچه در گازها نیز می توان مشاهده کرد. فروپاشی الکتریکی در روغنها به وسیله نظریه های مختلفی بیان شده که مبنای آن بر شروع تخلیه الکتریکی در گاز موجود در روغن، گذارده شده است. این گاز بر اثر حرارت در روغن ایجاد می شود، و یا قبلاً در روغن موجود بوده است. این نظریه ها هر کدام به تنهایی، قادر به بیان مکانیزم فروپاشی الکتریکی در روغن نیستند.



شکل ۳-۱- فشار الکتریکی فروپاشی روغن خالص و کاغذ روغن تحت فشار الکتریکی متفاوت ۴ و ۳ و

۱- فشار الکتریکی ضربه ای

۲- فشار الکتریکی مستقیم

۷ و ۵ و ۳- فشار الکتریکی متناوب

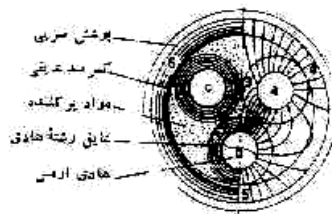
۴- کاغذ عایق ترانسفورماتور

به منظور به تأخیر انداختن عمل اکسیداسیون و لرت بندی در آن موادی به آن اضافه می کنند. تجربه نشان داده است که با اضافه کردن چنین موادی به روغن، زمان کار آنها را می توان تا سه برابر اضافه کرد. روغن عایق تحت حرارت در کنار مس و فولاد تشکیل مواد ته نشین شده ای را می دهد که استقامت الکتریکی روغن را به شدت پایین می آورد.

در این میان، وجود اکسیژن عمل لرت بندی و اکسیداسیون را تسریع می کند. لذا، کوشش شده است که در مواردی روغن ترانسفورماتور و یا خازن را تحت پوشش ازت قرار دهند. اما در کلیه ترانسفورماتورها و یا کلیدهای روغنی قدرت این عمل میسر نیست و در بسیاری از موارد اضافه کردن مواد ضد لرت بندی بهترین وسیله است. بدیهی است که در این زمینه نیز هنوز نمی دانیم که تا چه حد این مواد بر روی استقامت الکتریکی روغن تأثیر سوء خواهد داشت، و یا صاف کردن روغن و جدانمودن مواد ته نشین شده از آن به وسیله صافیها چه مقدار از این مواد ضد لرت بندی را از روغن جدا می سازد. همچنین، آیا بکار بردن این مواد در کلیدهای روغنی قدرت چه تأثیری بر روی مدت پایداری و طول قوس الکتریکی در زمان قطع کلید خواهد داشت. آزمایشهای تکاملی به این پرسشها به طور قطع پاسخ خواهد داد امروزه قادریم که روغن دستگاه های الکتریکی را در زیر بار تصفیه کرده و از مواد بیگانه جداسازیم.

۲-۳-۱- کاغذ غوطه خورده در روغن:

در ترانسفورماتورها، خازنها و خازنهای عبوری پیچکهایی از کاغذ تهیه می شود که، علی رغم انتخاب کاغذ با خواص خوب الکتریکی، استقامت الکتریکی مطلوب را ندارد. اما اگر این پیچک را از گاز و هوا تخلیه کنیم و در حال خلاء آن را در روغن غوطه دهیم، عایقی با مشخصات بسیار خوب الکتریکی به دست می آوریم که در طی بیش از ۶۰ سال اخیر، علی رغم وجود عایقهای مصنوعی کاربرد وسیعی در ترانسفورماتور و خازنسازی یافته است. عایق «کاغذ - روغن»، در صورت انتخاب کاغذهای نازک و روغن با ضریب هدایت تلفات ($tg\delta$) کم دارای استقامت الکتریکی کاملاً خوب در حدود 400 kV/cm خواهد شد. همین استقامت الکتریکی در قبال فشار ضربه ای $1/50\ \mu S$ برای ضخامت‌های نسبتاً بزرگ (دسته ای از اوراق نازک کاغذ) در حدود 850 kV/cm است.



شکل ۴-۱

ضریب تلفات $tg\delta$ برای کاغذهای نازک و پیچکهای تهیه شده از این کاغذها بین $0/012$ تا $0/04$ تحت فرکانس ۵۰ هرتس می باشد. عدد عایقی پیچک «کاغذ - روغن» برحسب حجم آن و درجه حرارت ۲۰ سانتی گراد بین $3/5$ تا $4/3$ می باشد، و با افزایش حرارت تا حدود ۱۰۰ درجه ۶ تا ۸ درصد بر مقدار عدد عایقی افزوده می شود.

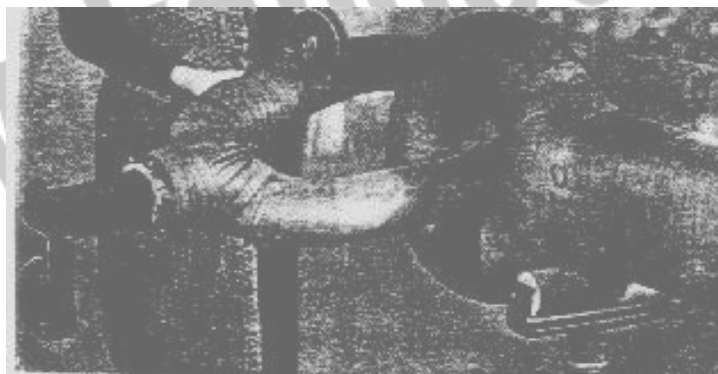
از نقطه نظر استقامت الکتریکی عایق «کاغذ - روغن» در فشار قوی، هر چه ضخامت کاغذ کمتر باشد، استقامت الکتریکی بزرگتر خواهد بود. مثلاً در کابل‌های «کاغذ - روغن» شدت میدان تحت فشار روغن برابر 15kg/cm^2 در حدود 95kv/mm و اگر ضخامت کاغذ از 0.01 به 0.012 میلیمتر ارتقا یابد،

شدت میدان $65kV/mm$ ، و در ضخامت 0.15 میلیمتر به $58kV/mm$ تنزل خواهد یافت- فشار روغن ثابت نگاه داشته شده است. در شکل ۴-۱، مقطع یکی از کابل‌های کاغذ - روغن نشان داده شده است.

علی رغم خلاء تا حدود 10^{-3} میلیمتر جیوه، معذالک، ذرات گاز - رطوبت و حفره های مجوف در بین لایه های کاغذ باقی می ماند که خود در محدود نگاهداشتن استقامت الکتریکی کابل و بالا بردن تلفات الکتریکی موثر است.

همچنین، در صنعت ترانسفورماتورسازی، پیچکهای فشار قوی و ضعیف و لایه های هر کدام از این پیچکها با نوار کاغذ عایق بندی شده و در روغن غوطه می خورد. در ترانسفورماتورهای فشار و جریان الکتریکی نیز باید با نوار عایق قسمتهای مختلف آن نوار کاغذ قسمتهای مختلف آن نوار پیچ شود تا پتانسیل از مقادیر زیاد تا صفر هدایت شود. شکل‌های ۵-۱ و ۶-۱ به ترتیب ترانسفورماتور جریان و فشار را نشان می دهد. پیچکهای کاغذ هر دو با دست تهیه شده است.

در ترانسفورماتورهای قدرت، علاوه بر پیچک کاغذ، در فواصل و نقاط معینی از چوب و مقوای سخت نیز استفاده می شود.



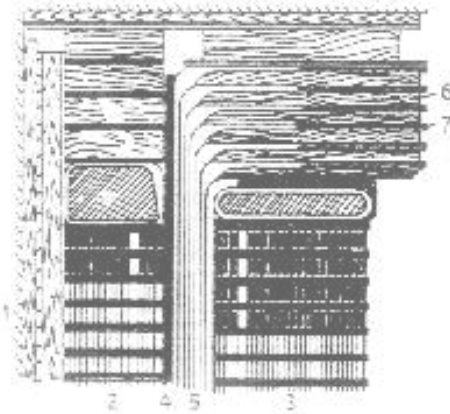
شکل ۵-۱- کاربرد نوار کاغذی در ساختمان ترانسفورماتور جریان نوع صلیب حلقه ای

پس از تهیه پیچک و اختتام ساختمان ترانسفورماتور، تمامی دستگاه را در دیگهای بزرگ تحت خلاء 10^{-2} تا 10^{-4} میلیمتر جیوه (به ترتیب از ترانسفورماتور قدرت تا ترانسفورماتور جریان و ولتاژ) در روغن

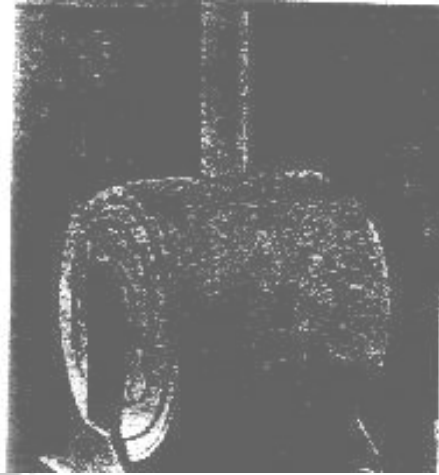
غوطه می دهند.

شکل ۷-۱- ساختمان پیچکهای الکتریکی و نوارهای کاغذ و، همچنین، نقاطی که از چوب و مقوای سخت برای عایق بندی در آنها استفاده شده است را نشان می دهد.

در خازنهای عبوری برای تنظیم و هدایت پتانسیل نیز از کاغذ غوطه خورده در روغن استفاده می شود. با اینکه در سالهای اخیر تعدادی از خازنهای عبوری فشار قوی را از صمغ مصنوعی ساخته اند. معذالک، کاربرد عایق کاغذ - روغن در ساختمان خازنهای عبوری به حدی گسترش یافته است که جانشین شدن آنها به وسیله صمغهای مصنوعی، آزمایشهای تکاملی متعددی را نیازمند است.



شکل ۷-۱- برش عرضی در یک ترانسفورماتور



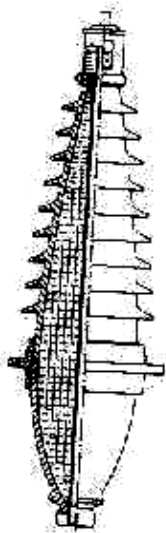
شکل ۶-۱- پیچک عایق بندی شده بوسیله کاغذ در ترانسفورماتور ولتاژ (فشار)

قدرت «کاغذ - روغن» ۱- آهن ۲- پیچک ثانویه

۳- پیچک اولیه ۴- لایه عایقی از مقوای سخت

۵- لایه عایقی از کاغذ ۶- لایه عایقی چوب

و یا صمغ مصنوعی



شکل ۸-۱- خازن عبوری ۱۱۰ کیلوولتی کاغذ - روغن

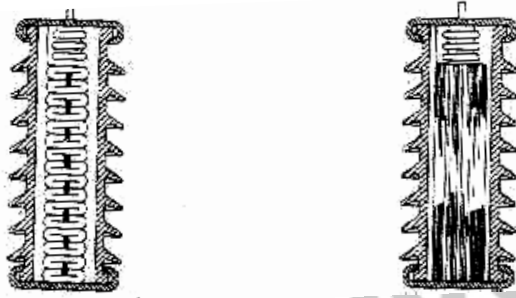
در شکل ۸-۱ برشی طولی از یک خازن عبوری کاغذ - روغن نشان داده شده است. کاغذ انتخاب شده برای پیچیدن نوار حول استوانه از کاغذ ضخیم استفاده شده است. این خازن عبوری ۱۱۰ کیلوولتی است.

در خازنهای قدرت «کاغذ - روغن» - MP - که کاربرد وسیع در جریان و فشار قوی دارد، از کاغذ بسیار نازک مسطح و یا لوله شده استفاده می شود که خازنهای مسطح یا استوانه شکل را تشکیل می دهد.

به منظور روشنی بیشتر نسبت به

ساختمان این نوع خازنهای، دو برش از خازن

مسطح (a) و خازن استوانه شکل (b) را در شکل های ۹-۱ و ۱۰-۱ نشان می دهیم.



a b

شکل ۹-۱- خازن استوانه شکل، کاغذ - روغن شکل ۱۰-۱- خازن مسطح کاغذ - روغن

پیچکهای کاغذی برای خازنهای، معمولاً، دارای ضخامتی در هر برگ کاغذ برابر ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۲۵ میلیمتر است؛ و پهنای نوار بین ۲۰ تا ۲۵۰ میلیمتر. تمامی پیچکها به وسیله ماشینهای ویژه ای تهیه می شود. بدیهی است پس از تهیه پیچکها و لایه هادی و خشک کردن آن از طریق خلاء، آنها را در روغن (در حالت خلاء) غوطه داده، و بدین طریق، عایق با ارزش روغن کاغذ را بدست می آورند. استفاده از عایق کاغذ - روغن در مهندسی - تکنولوژی فشار قوی - جریان قوی طیف وسیعی را شامل می شود: از ترانسفورماتورهای قدرت تا کابلهای فشارقوی و از ترانسفورماتورهای اندازه گیری، خازن های عبوری تا خازنهای قدرت.

در این طیف وسیع از موارد استعمال «کاغذ - روغن» بخش صنایع خازنسازی از اهمیت و ظرافت فنی ویژه ای برخوردار است. امروزه، متعادل کردن ضریب قدرت $\cos\phi$ کلیه مصرف کننده ها و خطوط انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به وسیله خازنهای MP ، یعنی خازنهای کاغذ - روغن، انجام می گیرد. لازم به ذکر است که در پاره ای از موارد، در تهیه عایق «کاغذ - روغن» از ترکیبات کلر کربنی، مثل کلوفن، استفاده می شود و کاغذ در محیطی خلاء در کلوفن غوطه داده می شود. بدیهی است که عدد عایقی کلوفن که بین ۴ تا ۵ است آن را در این مورد متمایز ساخته است.

۴-۱- کلوفن:

استفاده از روغنهای معدنی در دستگاه های الکتریکی پیوسته این خطر را با خود به همراه دارد که بر اثر جرقه و یا ایجاد حرارت زیاد روغن آتش بگیرد. به این دلیل، از چندین ده سال تاکنون، پیوسته دنیای تحقیق و تتبع در این راه گام برداشته است که مایعی با کلیه مشخصات خوب الکتریکی روغن بیابد و، در عین حال، دچار حریق و آتش سوزی نگردد. این مشخصات در ترکیبات کربنی با کلر یافته می شود. نوعی از این ترکیب را نام بازرگانی و صنعتی کلوفن داده اند.

در عایقهای الکتریکی انواعی از این ترکیبات مورد استعمال دارند:

- ترکیب پارافین و کلر

- ترکیب بنزول و کلر $C_6H_3Cl_3$ (تری کلرو بنزول)

- ترکیب دی فنیل و کلر

پایه و مبنای ترکیبات دیفنیل و کلر، چنانچه در بالا ذکر شد، تحت نام کلوفن به بازار می آید. دیفنیل با رابطه شیمیایی زیر است:

برحسب تعداد اتم هیدروژنی که به وسیله کلر جانشین می گردد، انواع زیر از ترکیبات کلرودیفنیل را می شناسیم:

- تری کلر دی فنیل $A - 30$

- تترا کلر دی فنیل $A-40$

- پنتا کلر دی فنیل $A - 50$

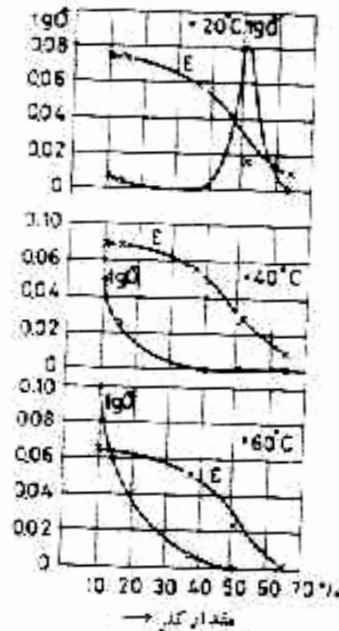
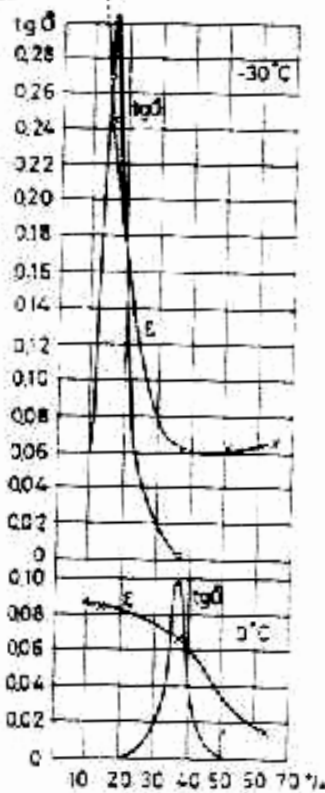
- هگزا کلر دی فنیل $A - 60$ کلوفن

ممزوجی از $A-60$ و $C_6H_3Cl_3$ برای ترانسفورماتورها بسیار مناسب است و تحت نام $T - 64$ به فروش می رسد. تأثیر ترکیب شیمیایی کلر آن است که بدین وسیله مولکول جسم تازه غیر متقارن شده

و تشکیل دو قطبی ای را با تمام مشخصات عایقهای دو قطبی می دهد بدیهی است که اضافه کردن کلر برای بدست آوردن خاصیت عدم اشتعال عایق است.

شکل ۱-۱۱ ضریب تلفات و عدد عایقی ترکیبات دیفنیل کلر را برحسب مقدار کلر و تغییر درجه حرارت نشان می دهد.

در شکل ۱-۱۲ نیز برای ترکیبات مختلفی از دیفنیل کلر تابعیت ضریب تلفات $tg\delta$ و عدد عایقی ϵ را با تغییر درجه حرارت نشان داده ایم.



شکل ۱-۱۲ - $tg\delta$ و ϵ در تابعیت از مقدار کلر برای درجه حرارت های مختلف

شکل ۱-۱۱ - ضریب تلفات $tg\delta$ و ϵ در تابعیت از مقدار کلر

در دو شکل مزبور، تأثیر درجه حرارت بر روی ضریب تلفات به خوبی متشهود است به همین قسم، عدد عایقی نیز در تحت تأثیر حرارت کوچک شده است (تا ۶۰ درجه)، و از جانبی دیگر، مقدار کلر در ترکیب

نیز بر تغییرات آن تأثیر کرده و با بالا رفتن درصد مقدار کلر در ترکیب عدد عایقی کوچک شده است. با توجه به پستیهای تبدیل ولتاژ در مناطق سرد و گرم، درجه حرارت را از ۳۰- درجه تا ۶۰+ درجه سانتی گراد تغییر داده ایم. بدیهی است که درجه حرارت مربوطه مجموع درجه حرارت محیطی و حرارت ناشی از جریان الکتریسیته می باشد.

کار با کلوفن برای پوست بدن مضر و خطرناک است.

همچنین، اقامت چندین ساعته در محیطی که با گاز کلر دیفنیل آلوده است برای دستگاه تنفسی خالی از خطر نیست. برای پوست و چشم که در ارتباط با گاز دیفنیل - کلر درآمده است، روغن کرچک مفید است. همچنین، می توان دست را ابتدا با نفت و سپس با صابون پاکیزه شست تا پوست دست محفوظ باقی بماند.

عدد عایقی کلوفن بزرگتر از عدد عایقی روغن و تقریباً دو برابر آن است. استعمال کلوفن در خازن، علاوه بر آنکه خاصیت عایق خازن را بهتر می سازد؛ تقریباً ۴۰ درصد از حجم آن را نیز می کاهد. بدین علت است که امروزه خازنهای فشار قوی را با کلوفن پر می کنند.

استقامت الکتریکی کلوفن در انواع اولیه آن کافی نبود. در آزمایشگاه های تکاملی، بر اثر ممزوج کردن چندین نوع از آن، استقامت الکتریکی جسم به دست آمده را بالا بردند.

از آنجا که در کلوفن واکسهای X (که بسیار مضر است) تشکیل نمی شود، مدت عمر آن را بسیار طولانی می توان دانست.

۵-۱- فلورکربن مایع:

در ۲۰ سال اخیر، صنعت عایقسازی توفیق یافته است با استخلاف فلور به جای هیدروژن در پیوند کربنی تعدادی عایق خوب به دست آورد. از بین چنین عایقهایی، به آن تعداد که در حرارت مورد نیاز به شکل مایع هستند اشاره می شود. اگر پیوندهای کربن - فلور را با پیوندهای کربن - کلر مقایسه کنیم، در پاره ای از موارد، پیشرفتهای قابل توجهی را، بویژه در زمینه مشخصات الکتریکی، مشاهده می کنیم.

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoo.cn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

عایق های مایع

در جدول زیر سعی شده است که خواص الکتریکی چند نوع از پیوندهای کربنی فلور یا نام اختصاری آنها «فلور کربن» جمع آوری شود.

جدول ۱-۲- خواص الکتریکی چند نوع از پیوندهای کربن - فلور

علامت اختصاری و بازگانی	رابطه شیمیایی	ضریب تلفات $tg\delta$	عددعایقی ϵ	مقاومت عایق به اهم بر سانتی متر تحت ۲ کیلوولت	فشار الکتریکی فروپاشی به KV
-	$(C_2F_5)_3N$	<0.0005	1.89	$10^{15} - 10^{17}$	39
-	$(C_3F_7)_3N$	<0.0005	1.85	$10^{15} - 10^{17}$	44
N-43	$(C_4F_9)_3N$	<0.0005	1.86	$10^{14} - 10^{16}$	45
-	$(C_4F_9)_2O$	<0.0005	1.77	$10^{15} - 10^{17}$	43
-	$(C_6F_{13})_2O$	<0.0005	1.85	$10^{16} - 10^{17}$	45
-	$c-C_6F_{12}O$	<0.0005	1.85	$10^{15} - 10^{17}$	41
O - 75	$c-C_8F_{16}O$	<0.0005	1.85	$10^{15} - 10^{17}$	43

به این مایعات معمولاً برای تأکید بر جانمایی کامل هیدروژن توسط فلئور، فلور کربن یا پرفلور کربن گفته می شود، ولی با این وصف شبیه هیدروکربورها نیستند چون هیدروکربورها فرار نبوده ولی آنها بسیار فرار می باشند. دیگر موادی که معمولاً در این دسته بندی قرار می گیرند، اترها یل پلی اترها یا آمین های نوع سوم مانند $(C_4F_9)_3N$ می باشند. (نام آمین از ساختمان شیمیایی این ترکیب مشتق شده و اشاره ای به فعالیت شیمیایی که معمولاً از خواص آمین ها می باشد، ندارد). همه آنها غیر قابل اشتعال بوده و در دماهای بالاتر از نقطه جوششان، پایدار می باشند. نفوذپذیری نسبی آنها بین ۱/۷۵ تا ۲/۱ بوده و دارای تلفات کم و مقاومت دی الکتریک خوب می باشند. به نظر می رسد فلئور، نظیر کلر وقتی به جای هیدروژن قرار می گیرد مقاومت ac بالا برده ولی مقاومت ضربه ای ($Impulse$) را کمتر می کند. مایعات با نقطه جوش پایین تر و همچنین فلورو - کلرو - اتان ها. ممکن است برای سرد کردن و طریقه تبخیر نیز مورد استفاده قرار بگیرند.

لازم به ذکر است که بسادگی نمی توان فلور کربن را جانشین روغن و یا کلوفن کرد، زیرا این ترکیبات فلور کربنی فرار بوده و می بایست در محفظه های سربسته و کاملاً آب بندی به کار گرفته شوند. در جدول زیر فشار گاز را در تابعیت از حرارت می بینیم:

مهمترین خواص الکتریکی این عایق استقامت الکتریکی بزرگ، عدد عایقی کوچک، ضریب تلفات tgδ کوچک و مقاومت بزرگ عایقی است. بویژه غیر قابل اشتعال بودن این عایق مایع آن را عایقی مناسب برای جریان قوی - فشار قوی ساخته است.

جدول (۱-۳)

حرارت سانتی گراد	فشار به میلیمتر جیوه (Torr)	
	N-43	O-75
-20	0	0
0	0	5
+20	0	25
40	1	62
60	7	168
80	19	388
100	47.5	725
120	110	1240
150	335	-
180	830	-

۶-۱- هیدروکربورهای آروماتیک کلردار:

در این رابطه دو نوع ماده شیمیایی معمولاً مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از آنها با کلرینه کردن دی فنیل بمیزان ۴۰-۶۰ درصد وزنی بدست می آید که هر مولکول ماده تولید شده، حاوی ۳ تا ۶ اتم کلر می باشد.

فرآیند صنعتی، محصولات یکنواختی را ببار نمی آورد: برای مثال ماده ای با ۴۲ درصد کلر، معمولاً تری کلرودی فنیل نامیده می شود. ولی دیده می شود که فقط حدود نیمی از این ماده تری کلرو دی فنیل بوده، و از نیمه دیگر آن قسمتی دی کلرودی فنیل و قسمتی تتراکلرودی فنیل می باشد. فرمول ساختمانی واحدی برای هر یک از این ترکیبات نمی توان ارائه داد، چون بصورت مخلوطی از ایزومرها بدست می آید.

ماده شیمیایی دیگر، شامل دو نوع بنزن کلر دار بوده، که یکی از آنها مخلوطی از ایزومرهای تری کلرو بنزن $C_6H_3Cl_3$ و دیگری ۱ و ۲ و ۳ و ۴ تتراکلروبنزن می باشند.

در آمریکا واژه *askarels* بعنوان عایقی مایع و غیر قابل اشتعال شناخته شده و بنظر می رسد که مشابه آروماتیکهای کلردار باشد.

سیالاتی که در مولکول آنها کلر وجود دارد، برای کلیدها و تابلوها (*Switchgear*) مناسب نیستند، چون زمانیکه سیال تحت اثر یک قوس الکتریکی قرار می گیرد. بعلت حضور هیدروژن و کلر در آن، اسید کلریدریک تولید می شود. سیالات مذکور همچنین در کابلها مورد استفاده قرار نمی گیرند، زیرا نفوذ پذیری بالا و تلفات شدید در آنها، باعث بوجود آمدن ضایعات و ناهنجاریها می شوند که در این رابطه، اولی باعث افزایش توان راکتیو (*KVAR*) گرفته شده بوسیله کابل شده و دومی باعث اتلاف توان الکتریکی می شود. از این رو، این سیالات برای دو هدف اساسی در نظر گرفته شده اند، یکی بعنوان مایع خنک کن ترانسفورماتور، بعلت اینکه اصلی ترین مزیت آن، غیر قابل اشتعال بودن آن بوده و دیگر بعنوان اشباع کننده (*impregnant*) خازنها، برای اینکه اولین مزیت آن نفوذ پذیری زیاد می

باشد. دیگر خصوصیات مهم آنها عبارتند از: دانسیته (که از ۱/۴ تا ۱/۶ گرم بر میلی متر تغییر می کند)، نقطه ریزش، منحنی دما - ویسکوزیته، و فراریت، که تمام این خواص در رابطه با درجه کلریناسیون تغییر می کند. موادی که بشدت کلرینه شده اند، در دمای معمولی بصورت شیره های (*Syrups*) غلیظ بوده و در دمای بالاتر از صفر درجه سانتی گراد بصورت جامد در می آیند. آن دسته از این مواد که حدود ۴۲ درصد کلر دارند، در میزان ویسکوزیته، قابل مقایسه با روغن ترانسفورماتور بوده و در دماهای بین ۱۵- تا ۲۰- درجه (نسبتاً بیشتر از مقدار لازم در رابطه با روغن ترانسفورماتور) بحالت جامد در می آیند.

خوردن یا تنفس بخارات هیدروکربورهای کلردار، صدمات شدیدی برای سلامتی ایجاد می کند. که در کاربردهای الکتریکی، باسانی می توان از بروز این صدمات جلوگیری کرد، ولی مقاومت قابل توجه این مواد و مواد مشابه با آن، در مقابل فرآیندهای شکست بیولوژیکی، موارد استفاده آنها را، در آینده خیلی محدود خواهد ساخت.

۷-۱- سیالات بکار رفته در ترانسفورماتور:

این سیالات طوری انتخاب شده اند که میزان ویسکوزیته و نقطه ریزش آنها، مشابه یا اندکی کمتر از روغنهای ترانسفورماتور نوع *BS 148* باشد. مطابق با استاندارد *ASTM specification D 2283* پنج نوع از این سیالات بصورت زیر تعریف شده اند. سه نوع از آنها مخلوط هایی از دی فنیل های بشدت کلرینه شده و بنزن کلرینه شده بوده و دو نوع دیگر، دی فنیل ۴۲ درصد کلرینه شده، با یا بدون افزودن بنزن کلرینه شده، می باشند.

این سیالات بعلت تشکیل کلرید هیدروژن در آنها، که معمولاً توسط تخلیه الکتریکی خود بخودی صورت می گیرد، حاوی یک (*Scavenger*) می باشند. این ماده شامل تترافنیل قلع. فنوکسی پروپین اکسید و اپوکسیدهای کمپلکس بوده و بمیزان ۰/۱ تا ۰/۲ درصد، در سیال وجود دارد.

دی فنیل های کلرینه شده، علاوه بر اینکه غیر قابل اشتعال هستند، در مقایسه با روغن ترانسفورماتور،

از پایداری حرارتی بالایی برخوردار بوده و در آنها لجن تشکیل نمی شود. کاربرد سیالات بقدر کافی غیر فرار، در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد (که احتمالاً نقاط ریزش بالایی دارند) امکان پذیر است. مشروط بر آنکه؛ استفاده از مواد جامد مصرفی مقاوم در این دماها مقرون بصرفه باشد. ملاحظه شده است که معمولاً تحت شرایط عادی، هیدروکربورهای کلرینه شده، در فرکانسهای قدرت و در میدانهای یکنواخت. نسبت به روغنهای معدنی استقامت بیشتری در مقابل شکست الکتریکی از خود نشان داده، ولی مقاومت آنها در ولتاژهای ضربه ای و میدانهای غیر یکنواخت از روغن های معدنی کمتر است.

متأسفانه تمایل این سیالات برای جذب رطوبت، از روغن های معدنی بیشتر بوده و حلالیت آب در آنها گاهی بیشتر است. آب حل شده در آنها باعث کاهش استقامتشان در مقابل شکست الکتریکی می گردد. این سیالات حلالهایی قوی بوده و بر اکثر لاستیک ها، پلاستیک ها و پوشش ها اثر می کند. برای جلوگیری از اثرات این حلالها پوشش های سخت شده بروش حرارتی و کاملاً بعمل آمده (*fully cured*) نظیر پوشش های فنولیک یا اپوکسی یا سلولز - استر و پلی اورتان یا مواد درزگیر (*gasket*) سیلیکونی، بکار می روند.

در مقایسه با روغنهای هیدروکربوری بکار رفته در ترانسفورماتور، پایداری حرارتی این سیالات مزیت چندانی مهمی نیست، در حالیکه قیمت و وزن زیاد آنها در مقابل غیر قابل اشتعال بودنشان (و تا حدودی کاهش صدای ترانسفورماتور در اثر استفاده از آنها) از معایب آنها محسوب می شوند. بیشترین موارد استفاده سیالات کلرینه شده در پست های توزیع مناطق شهری، (بخصوص در محلهایی که ترانسفورماتورها در داخل ساختمان قرار گرفته اند) می باشد. در نهایت موازنه مزایا به ویژگیهای محلی، از قبیل سنتهای موجود در طراحی ساختمانها، سیستم شهرسازی و شرایط دیگر بستگی دارد.

۸-۱- سیالات مورد استفاده در خازن:

در استاندارد *ASTM specification D 2233* سه نوع اشباع کننده خازن تعریف شده است: نوع

A دی فنیل ۴۲ درصد کلرینه شده با نفوذ پذیری ۴/۹-۴/۷ (در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد و فرکانس یک کیلوهرتز) و نقطه ریزش حدود ۱۴- درجه سانتی گراد می باشد. نوع *B* از کلریناسیون دی فنیل بمیزان ۵۴ درصد بدست آمده، که نفوذ پذیری آن ۴/۳۵-۴/۱۵ بوده و دارای نقطه ریزش برابر با ۷-۱۲ درجه سانتی گراد می باشد. نوع *C* مخلوطی از ۷۵ درصد نوع *B* و ۲۵ درصد تری کلروبنزن بوده که در مقایسه با نوع *A* دارای ویسکوزیته کمی کمتر، و نقطه ریزش مشابه با آن، و نفوذپذیری کمی بیشتر از آن، می باشد.

این سیالات برای اشباع کردن خازنهای کاغذی و پروپیلنی بکار می روند و بشرط مجاز بودن تلفات بالاتر و عدم وجود مشکلات خاصی در رابطه با دفع گرما از این خازنها، می توانند باعث کم شدن حجم خازنها بشوند.

تمام مواد مورد استفاده، که در تماس با این سیالات می باشند، بایستی فوق العاده خالص بوده، زیرا ناخالصی های حل شده در سیال و ذرات خیلی کوچک، به مقدار قابل ملاحظه ای باعث بالا رفتن ضریب تلفات در فرکانس 50 Hz می شوند.

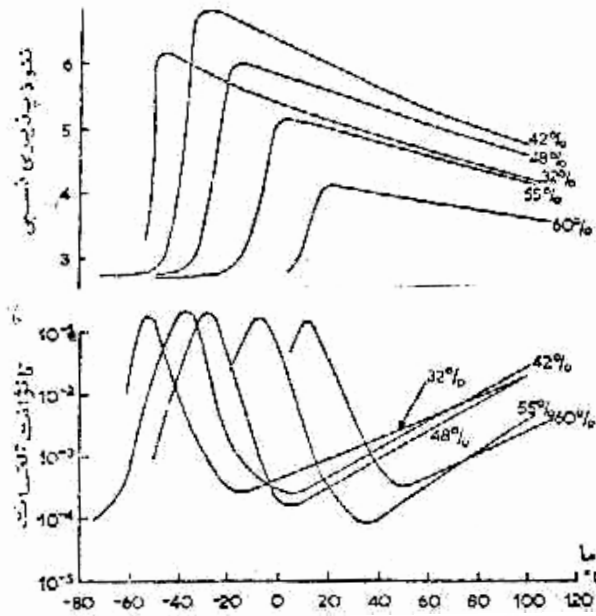
در خازنهای بشدت متراکم، این مسئله مهم است که، نقطه ریزش نیابستی بیش از چند درجه، بالاتر از کمترین دمای باشد که خازن در جریان کار با آن مواجه می شود. در دماهای پایین تر، دی فنیل های کلرینه شده، بصورت جسم سختی درآمده و شکافها یا فضاهای خالی در آن بوجود می آید. اگر در این شرایط از خازن انرژی گرفته شود. وجود این شکافها و فضاهای خالی باعث خرابی آن می شود.

برای اشباع کردن خازن، معمولاً موادی با ۴۲ تا ۴۷ درصد کلریناسیون را بکار می برند و بنظر می رسد استفاده از مواد با درجات کمتری از کلریناسیون یعنی حدود ۴۲ درصد (تری کلرودی فنیل)، بیشتر موسوم باشد.

(شکل ۱۳-۱) طرحهایی از تغییرات نفوذ پذیری و ضریب تلفات را در *(coloman 1964)50Hz*

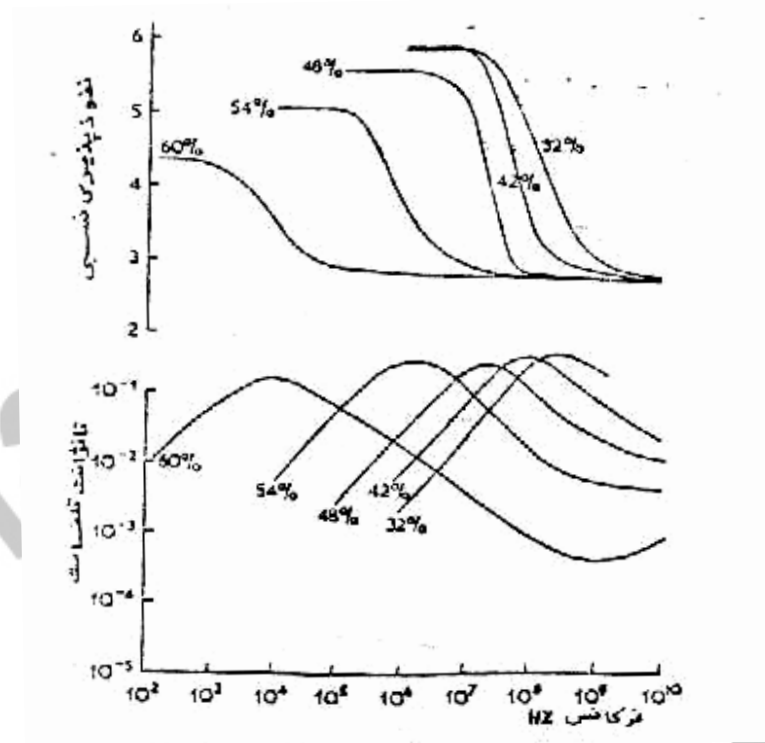
برحسب دما و برای درجات متفاوتی از کلریناسیون، نشان داده و شکل (۱۴-۱) طرحهای مشابهی را

برحسب فرکانس در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (*VonHippel, 1954*) نمایش می دهد. این دو طرح بر دقت زیادی بنا نشده اند. چون اطلاعات مربوط به آنها از منابع مختلفی بدست آمده است.



شکل (۱-۱۳) تغییرات نفوذ پذیری نسبی و ضریب تلفات دی فنیل های کلرینه شده نسبت به دما

در منحنی های نفوذ پذیری شکل (۱-۱۴) یک ماکزیمم برای ۴۲ درصد کلریناسیون، و ماکزیممی مشابه در شکل (۱-۱۳) مشاهده می شود. همانطور که قبلاً اشاره شد. جسمی با این مقدار کلریناسیون، مخلوطی از دی، تری و تتراکلرودی فنیل می باشد، و چون دکا کلرودی فنیل کاملاً کلرینه شده مانند دی فنیل کلرینه نشده، غیر دو قطبی می باشد. گاهی بایستی انتظار چندین ماکزیمم هایی را داشت. افت نفوذ پذیری در دماهای بالا، قسمتی مربوط به اثر دما در خلاف جهت میدان الکتریکی برای تنظیم دوقطبی ها و قسمتی دیگر مربوط به کاهش دانسیته می باشد.



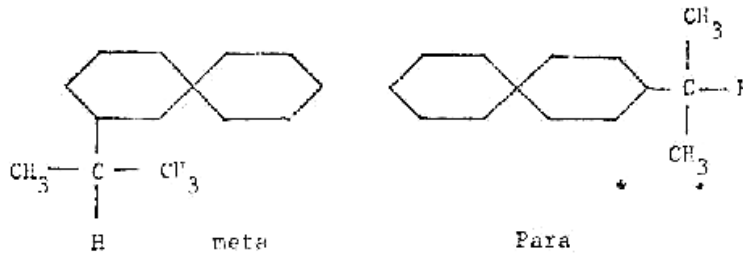
شکل (۱-۱۴) تغییرات نفوذ پذیری نسبی و ضریب تلفات دی فنیل های کلرینه شده بر حسب فرکانس نفوذ پذیری در فرکانسهای بالا، تقریباً برابر با مجذور اندیس انکسار (۱/۶-۱/۶۳) بوده و نشان می دهد که در بالاتر از فرکانس های نوری هیچ پلاریزاسیون دی الکتریکی دیگری انجام نمی شود. چون شکل های (۱-۱۳) و (۱-۱۴) در رابطه با مخلوط نمونه های مولکولی، که بطریقه صنعتی تولید شده است. تهیه شده، هیچ یک از منحنی ها، رفتار دی فنیل استخلاف شده خاص را نشان نمی دهد. بعضی مواد مصرفی در ایزولاسیون، نفوذ پذیری بیشتری از مواد ارائه شده در این جا دارند، همچنین محصولات صنعتی بدست آمده از منابع مختلف دارای خواص متفاوتی می باشند.

۹-۱- مایعات دی الکتریک جدید مورد استفاده در خازنها:

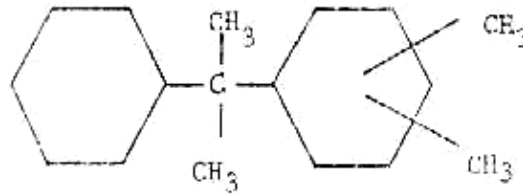
تلاشهای گسترده ای جهت دستیابی به مواد جایگزین، برای سیالات دی الکتریک سنتی مورد استفاده در خازنها (*Askarels*) و روغنهای معدنی سیلیکونها) انجام شده است. ثابت شده است که سیالات حاوی مقادیر زیاد آروماتیک. بهترین نتایج را در رابطه با ولتاژ بالا، ببار می آورند. دو نوع از مناسبترین

این ترکیبات عبارتند از:

۱- ایزوپروپیل بی فنیل (*wemcol*)



۲- فنیل اگزیدیل اتان (مخلوط ایزومر)



گروه های آلیفاتیک موجود در این ترکیبات، باعث می شوند که آنها در دمای کم، سیال بوده و فشار بخار کمی داشته باشند. بهر حال از آنجا که گروه های آلیفاتیک، مستعد پذیرش اثرات ولتاژ بالا می باشند. بنظر می رسد که درصد اپتیمم کربن های آلیفاتیک بین ۱۵ تا ۲۵ درصد باشد. خواص کلیدی *wemcol* و *PXE* در جداول (۱-۳) و (۱-۴) نشان داده شده است.

جدول (۴-۱) خواص فیزیکی دو نوع سیال جدید مورد استفاده در خازنها

	دانسیته	ویسکوزیته (سانتی استوک)			نقطه ریزش
		$-50^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$100^{\circ}C$	
Wemcol	٪۹۹	۱۱۰۰۰	۷	۱/۴	$-5^{\circ}C$
PXE	۲۳۰۰۰	۶/۵	۶/۵	۱/۶	$-۴۵^{\circ}C$

جدول (۵-۱) خواص دی الکتریک دو نوع سیال جدید مورد استفاده در خازنها

Wemcol	ثابت دی الکتریک		فاکتور پراکندگی		ولتاژ شکست (Kv) (ASTM D877)
	$25^{\circ}C$	$100^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$100^{\circ}C$	
Wemcol	۲/۶	۲/۵	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	۶۰
PXE	۲/۶	۲/۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۶۰

۱-۱۰- روغنهای نباتی و استرهای دیگر:

بسیاری از روغنهای نباتی، در معرض هوا بصورت ژله درآمده و هیچکدام، پایداری روغنهای معدنی را ندارند. بعلت وجود استرها و در نتیجه حالت دو قطبی در آنها نفوذ پذیری بیشتری نسبت به روغن های معدنی داشته است و همچنین در قسمت هایی از حوزه فرکانس - دما دارای تلفات بالایی می باشند. استفاده از روغن کرچک (**Castor**) در کاغذ اشباع شده خازن های **d.c** نسبتاً محدود است این روغن در دمای اتاق و فرکانسهای پایین، ضریب تلفات بالایی داشته، ولی به داشتن پایداری زیاد در مقابل تخلیه الکتریکی، معروف است.

تعدادی از استرهای ترکیبی (که بسیاری از آنها بعنوان نرم کننده تولید می شوند) به طریقی مشابه و در مقیاس پائین مورد استفاده قرار می گیرند.

۱۱-۱- هیدروکربورهای ترکیبی (Synthetic):

مشهورترین این نوع ترکیبات عبارتند از: پلی بوتیلن ها (یا پلی بوتن ها) و آلکیل بنزن ها مایعات پلی بوتیلن، پلیمرهای افزایشی (addition) مخلوط ایزومرهای بوتیلن $(CH_3)_2 C = CH, CH_3 - CH$ $(CH_3)_2 C = CH, CH_2 = CH - CH_2 - CH_3$ می باشند، که وزن مولکولی آنها خیلی کمتر از لاستیک پلی ایزوبوتیلن می باشد (این لاستیک از آخرین ایزومر ذکر شده در بالا یعنی ایزوبوتیلن ساخته می شود). آنها با وزن مولکولی از حدود ۳۰۰ و ویسکوزیته کمی بیشتر از ویسکوزیته روغن ترانسفورماتور، تا وزن مولکولی حدود ۱۵۰۰ و ویسکوزیته ای برابر با 2000cs، در دمای ۳۷/۷ درجه سانتی گراد (نقطه ریزش ۴ درجه سانتی گراد) موجود می باشند. مواد با وزن مولکولی بالا، تا اندازه ای شبیه به لاستیک مایع غلیظ (Treacly rubber) می باشند. مزیت آنها، عاری بودن از ناخالصی هایی است که بطور طبیعی در روغنهای معدنی وجود دارد. در عین حال در مورد وجود یا عدم وجود پایداری بالای آنها، در مقابل اکسیداسیون، نظرات متفاوتی بیان شده است. بهر حال استفاده از آنها تلفات کمی را در برداشته و خواص الکتریکی آنها شبیه به دیگر هیدروکربورهای خالص می باشد.

این هیدروکربورها، اگر چه گرانتز از روغنهای معدنی می باشند. بعنوان اشباع کننده (Impregnants) در کابل و خازن مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین مواد با وزن مولکولی بالاتر، بعنوان غلیظ کننده (thickener) روغن کابل (و بعنوان جانشینی برای کلوفون یا موم) در کابل با کاغذ اشباع و هادی مفتولی (Solid) بکار برده می شوند. ممکن است پیشگیری هایی برای این مایعات در رابطه با تصاعد گاز مشابه با آنچه برای روغن های معدنی بکار می رفت، نیز لازم باشد.

آلکیل های بنزن، خواصی شبیه به روغنهای معدنی سبک دارند. یکی از معروفترین آنها دودسیل بنزین (که زنجیری است با ۱۲ کربن و یک حلقه بنزنی متصل به آن می باشد. خواص اندازه گیری شده این ماده نشان می دهد، که استفاده از آن در کاربردهای الکتریکی، نتایج رضایت بخشی در بردارد، ولی در مورد چگونگی عملکرد آن در سرویس، تجربیات زیادی موجود نیست.

۱۲-۱- مایعات سیلیکونی:

پلیمرهای حاوی مقدار سیلیکون کم با جرم مولکولی ۴۰۰ به بالا، بحالت مایع می باشند. آنها در حالتی شبیه به پلیمرهای لاستیکی، با گروه های جانبی متیل یا فنیل، ساخته می شوند. دارای دانسیته ای حدود 0.96 g/ml ، ویسکوزیته ای از چند سانتی استوک به بالا (در دمای اتاق)، و نقطه ریزشی حدود ۵۰- درجه سانتی گراد (بجز برای مایعات با پایین ترین ویسکوزیته که دارای نقطه ریزش حدود ۸۰- درجه سانتی گراد می باشد) می باشند. منحنی های ویسکوزیته - دما مربوط به آنها پهن تر از منحنی های مربوط به دیگر مایعات دی الکتریک بوده، در رابطه با ویسکوزیته از فراریت کمی برخوردار بوده، و نقطه ریزش آنها تقریباً مستقل از ویسکوزیته می باشد. نقطه اشتعال تمام آنها، بجز سبکترینشان زیاد می باشد. در دماهای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی گراد و در معرض هوا بدون اینکه تغییرات مهمی در خواص الکتریکی و دیگر خواص آنها روی دهد، در مقابل حرارت پایدار بوده، و در آنها تشکیل لجن صورت نمی گیرد. در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی گراد نیز در صورتیکه با هوا در تماس نباشند، پایدار می باشند.

سیلیکونها بر پوشش ها (*Varnish*) و پلاستیک های معمولی اثری نداشته، ولی درزگیرهای لاستیکی که با سیلیکونها در تماس هستند، بایستی از مواد مناسب این کار ساخته شوند. نفوذ پذیری نسبی آنها بین ۲/۲ تا ۲/۴ تغییر کرده (که با افزایش وزن مولکولی، افزایش پیدا می کند.) و ضریب تلفات متیل سیلوکسان ها (*Methyl siloxanes*) در دمای اتاق در دامنه فرکانس 1KHz - 10MHz ، معمولاً کمتر از 10^{-4} بوده، و تا یک پیک (ماکزیمم) 0.03 در فرکانس حدود 10^{10} Hz ، بالا می رود. در جهت فرکانس های پایین افزایش زاویه تلفات در دماهای بالا و دماهای زیر صفر، بیشتر از افزایش آن در دماهای معمولی بوده. ولی انجام این افزایش در هیچ حالتی (مطابق با نتایج *Bartnikas* در سال ۱۹۶۷) منطبق بر یک هدایت ساده نمی باشد. همچنین اثر

افزایش تنش الکتریکی بالاتر از $8KV/mm$ را بر روی ضریب تلفات فرکانس قدرت. آزمایش کرده، و افزایشی در حدود ۳ تا ۶ برابر را مشاهده نمود. مقاومت الکتریکی سیلیکونها، قابل مقایسه با دیگر مایعات بوده و در مورد اثرات رطوبت نتیجه، عکس مورد اول است. این مایعات در بسیاری از موارد از جمله بعنوان سرد کننده ترانسفورماتور، مورد استفاده قرار می گیرند.

۱۳- نیتروبنزن:

نیتروبنزن مایع ($C_6H_5NO_2$) با نقطه انجماد ۶ درجه سانتی گراد و نقطه جوش ۲۱۱ درجه سانتی گراد و دانسیته $1.2g/ml$ (در دمای اتاق) بعنوان یک سیال در نقش عایق مورد توجه نبوده و علت ذکر آن در اینجا کاربرد وسیع آن در گذشته نزدیک می باشد، توجه به آن ناشی از نفوذ پذیری بالا (حدود ۳۵ در دمای اتاق)، بوده و نسبت به مایعات دیگری که نفوذ پذیری بالایی دارند، از خواص عایقی بهتری برخوردار است.

نیتروبنزن می تواند بعنوان یک نیمه هادی در نظر گرفته شود. و روش های خالص سازی معمولی، ممکن است مقاومت آن را تا $10^6 - 10^7 \Omega m$ بالا ببرد، ولی بوسیله روش های دقیق خشک کردن و خالص سازی، همراه با الکترودیالیز (که با استفاده از یک رزین تعویض یونی اسیدی، در کاتد و نوع قلیائی آن، در آند انجام می شود). بهبود شگرفی در آن حاصل می شود. بوسیله این روش، می توان به مقاومت های حدود $10^{10} \Omega m$ نیز دست پیدا کرد.

Felici و *Tobazeon* و *Gartner* در سال ۱۹۷۰ با استفاده از کاغذ خیلی خالص و ورقه آلومینیوم، که از نیتروبنزن (خالص و الکترودیالیز شده) اشباع شده بودند، خازنهای آزمایشی ساخته اند. نفوذ پذیری کاغذ اشباع شده در حدود ۱۲ بوده و در مقابل تنش های $V/\mu m$ ۱۶ و ۹ و در فرکانس های $50Hz$ بمدت ۵۰۰ ساعت مقاومت می کرد. در یک خازن که به جای آب بندی شدن در نیتروبنزن (که به طور مداوم در یک مدار خالص سازی گردش می کرد) غوطه ور شده بود. ضریب تلفات در میزانی حدود ۰/۰۰۷ (در دمای ۲۴ درجه سانتی گراد) مستقل از تنش اعمال شده باقی ماند.

۱۴-۱- گازهای تک عنصری مایع شده:

وسایلی از قبیل آهنرباهای فوق هادی در ماشین های مولد ذرات پر انرژی، یا در ماشین های چرخان آزمایشی، که در دماهای پایین کار می کنند یا بایستی بدون عایق مایع کار کنند و یا بایستی در آنها، از معدود مایعاتی که در دمای مورد لزوم وجود دارند، استفاده شود.

بویین های فوق هادی فقط در دماهایی حدود چند درجه کلوین موثر بوده، و بطور عادی در هلیوم مایع و در دمایی نزدیک به دمای جوش آن ($4.2^{\circ}k$) عمل می کنند هیدروژن مایع (در دمای $2.0^{\circ}k$ -۱۴ درجه) برای کاربرد موثر در تمام فوق هادی هایی که تا بحال کشف شده است، باندازه کافی سرد نیست، ولی برای بهره گیری از هدایت زیاد آلومینیوم در 2.0 درجه کلوین بکار برده شده است. نیتروژن مایع، بعنوان ماده واسط جهت سرد کردن بکار می رود. آرگون نیز در این دسته بندی قرار می گیرد، چون کارهای تجربی زیادی بر روی آن انجام شده است اکسیژن و فلئور نیز به علت اینکه عناصر فعالی می باشند، از این جنبه قابل توجه نمی باشند. جدول (۶-۱) خواص اساسی ۴ نوع مایع ذکر شده در بالا را نشان می دهد.

جدول ۶-۱ - خواص مایعات کم دما

آرگون	نیتروژن	هیدروژن	هلیوم	
۸۷/۳	۷۷/۳	۲۰/۴	۴/۲	نقطه جوش در فشار $1atm$ ($^{\circ}k$)
۸۳/۹	۶۳/۲	۱۴	-	نقطه ذوب ($^{\circ}K$)
۱/۴۱	۰/۸۱	۰/۰۷۱	۰/۱۲	دانسیتته در نقطه جوش (g/m)
۱/۵۳	۱/۴۳	۱/۲۳	۱/۰۵	نفوذ پذیری نسبی در نقطه جوش

زاویه تلفات در ولتاژ پائین، در همه موارد، کمتر از $1\mu rad$ می باشد.

اطلاعات زیادی از تنش ها و اشکالات موجود در حین کار، برای این مایعات منتشر نشده است. تا بحال بیشترین کارهای آزمایشگاهی، صرف یافتن بالاترین میزان تنشی شده است، که آنها پس از طی مراحل

خالص سازی، تقطیر و فیلتراسیون، می توانند تحمل کنند. این کار معمولاً با ولتاژ اعمال شده بصورت مداوم یا شبه مداوم، انجام می شود. در این مورد مقاله های اولیه توسط *Lewis* در سال ۱۹۵۹ و *Watson* و *sharbaugh* در سال ۱۹۶۲، تهیه و خلاصه شده است. آنها نتیجه گرفتند که در این مایعات، شکست الکتریکی در تنش هایی بوجود می آید که با تنشهای موجود در روغن های عایق، تحت شرایط مشابه از نظرخالص سازی (و در دماهای معمولی) قابل مقایسه می باشد، و در درجات بالایی از خالص سازی اثر جنس و نوع الکتروود، قابل توجه است. بررسی های *swan Lewis* در سال ۱۹۶۰ در مورد آرگون، اثر اکسیداسیون الکتروودها و اکسیژن موجود در آرگون را، در بالا رفتن مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده، بیان کرد (اثراتی که همچنین در دیگر مایعات مشاهده می شود). به طور معمول در چنین آزمایشاتی بر روی مایعات (به جز هلیوم)، استقامت الکتریکی به میزان $100-200kv/mm$ به دست آمد. این اندازه گیری ها، اکثراً با در نظر گرفتن فاصله کمی بین الکتروودها انجام می شد و گاهی مقادیر کم اندازه گیری شده، پذیرفته نبود. چون انگیزه اصلی در آن زمان، به دست آوردن بالاترین تنشی بود که مایعات می توانستند آن را تحمل کنند.

نتایج تطبیقی برای نیتروژن، هیدروژن، هلیوم در فرکانس $60HZ$ ، تحت شرایطی مشابه با شرایط آزمایش معمول بر روی مایعات، توسط *mathes* در سال ۱۹۶۷ و *mathes* و *Jefferies* در سال ۱۹۷۰، گزارش شده است. نتایج آنها برای نیتروژن در 77 درجه کلوین و فشار یک اتمسفر در حدود $80kv(pk)/mm$ و برای هیدروژن در 20 درجه کلوین و فشار یک اتمسفر، مساوی با $25-100kv(pk)/mm$ بود و در هر دو مورد، استقامت الکتریکی با کاهش دما افزایش می یافت، و با افزایش فشار به $4atm$ (در دمای ثابت) تقریباً دو برابر می شد. *mathes* در مورد هلیوم در $4/2$ درجه کلوین و فشار اتمسفر یک (با فاصله ای حدود یک میلیمتر بین الکتروودها)، به مقادیر خیلی کمتری در حدود $30-40 Kv(pk)/mm$ دست پیدا کرد.

Mathes و *Jefferies* همچنین ضریب تلفات را برای نیتروژن و هیدروژن اندازه گیری کرده و

دریافتند که این پارامتر در استقامت الکتریکی حدود $40Kv/mm$ قابل اندازه گیری بوده، و وقتی تنش موجود، به تنش لازم برای شکست عایقی نزدیک می شد. بسرعت تا مقادیری در حدود $0/001$ افزایش پیدا می کرد.

Mathes در سال ۱۹۷۲ اثرات دما و فشار را روی استقامت متوسط الکتریکی هلیوم مایع و گازی در دمای بالاتر از ۴ درجه کلوین و فاصله ای حدود یک میلیمتر بین الکترودها، مشاهده کرده و مقادیر $25kv/mm$ و $45kv/mm$ را بترتیب برای فشارهای اتمسفریک و $7atm$ بدست آورد.

فصل دوم:

خواص فیزیکی و شیمیایی عایق های مایع و اندازه گیری آن ها:

۱-۲- مقدمه:

انواع عایق های الکتریکی بسیار زیاد می باشد. این امر بدین دلیل است که شرایط کار عایق ها متفاوت است و هر عایق برای شرایط معینی مناسب است. عایق الکتریکی گاهی باید دارای استقامت مکانیکی خوبی باشد و یا در مقابل اشعه خورشید مقاومت داشته باشد؛ در ضمن در مجاورت باد و باران و گرد و غبار صدمه نبیند. در شرایط دیگر باید انعطاف پذیر باشد و یا در مقابل تخلیه جزئی مقاوم باشد در مواردی قابلیت هدایت حرارتی عایق نقش مهمی بازی می کند و یا نفوذ رطوبت در آن باید بسیار کم باشد. در شرایط دیگر عایق باید تحمل درجه حرارت های خیلی بالا و یا خیلی پایین را داشته باشد و یا در مقابل بعضی مواد شیمیایی مقاوم باشد. همچنین ممکن است سازگاری عایق با مواد دیگر اهمیت داشته باشد. البته زمانی که از یک عایق چند انتظار مختلف برود، کار مشکل تر می گردد.

به دلیل انتظاراتی متفاوتی که در شرایط مختلف از یک عایق می رود، در موارد مختلف از عایق های مختلف استفاده می شود. البته قیمت عایق و دسترسی به آن نیز نقش عمده ای در انتخاب آن دارد. بسته به این که عایق در کجا مورد استفاده قرار می گیرد و چه انتظاری از آن می رود، خواص متفاوتی از عایق دارای اهمیت می باشد. اغلب یک عایق به تنهایی نمی تواند مورد استفاده واقع شود و ترکیب چند عایق دارای خواص مورد نظر را دارا می باشند.

خواص عایق های الکتریکی از جهات گوناگون مورد توجه است. این خواص ممکن است از جهت الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی، حرارتی محیط زیست و غیره باشد. تنوع این خواص مانع از آنست که بتوان از همه آن ها نام برد. در این فصل بعضی خواص مهم عایق ها ذکر شده و روش اندازه گیری

خواص شرح داده می شود.

قابل ذکر است که هر یک از خواص عایق ها مطابق استاندارد مربوط به آن دقیقاً تعریف می گردد و روش اندازه گیری نیز در این استاندارد شرح داده می شود. لذا پس از اندازه گیری خاصیت معینی از عایق ، باید استناداری که مطابق آن اندازه گیری انجام شده است، ذکر گردد.

بدیهی است هر کشور بسته به سابقه و شرایط اقتصادی و امکانات و غیره، برای خود استاندارد معینی وضع می نماید. انتخاب استاندارد، سازگاری قطعات و تولیدات را بوجود می آورد؛ ضمناً نوعی وابستگی نیز به شمار می رود. لذا باید در انتخاب استاندارد دقت شود. برای هماهنگ کردن استانداردها در دنیا کوشش هایی صورت گرفته است و موسسات بین المللی استاندارد بوجود آمده اند.

دو استاندارد *IEC* و *ISO* در درجه اول اهمیت قرار دارند. زیرا استانداردهای بین المللی بوده و اکثر کشورها، از جمله ایران، عضو این دو موسسه می باشند.

خواص و مشخصات مختلف برای عایق های مختلف، بسته به مورد استفاده آنها، دارای اهمیت متفاوتی می باشند؛ ولی بعضی از خواص برای همه عایق ها دارای اهمیت است که در این فصل از آن ها نام برده می شود.

۲-۲- ویژگی های الکتریکی و خواص فیزیکی و شیمیایی مواد عایقی:

کاربرد عایق ها در ساخت ژنراتورها، موتورها، ترانسفورماتورها، برقگیرها، خازن ها، کابل ها، کلیدهای فشار قوی، مقره ها و سایر تجهیزات فشار قوی بسیار گسترده است. با توجه به نوع کاربرد و شرایط محیطی که عایق در آن قرار می گیرد، علاوه بر خاصیت الکتریکی، سایر خواص فیزیکی و شیمیایی آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. ویژگی های یک ماده عایقی را برای استفاده های بخصوص می توان به صورت زیر، اولویت بندی نمود:

۱- رفتار مکانیکی

۲- رفتار گرمایی

۳- پارامترهای شیمیایی

۴- خصوصیت های الکتریکی

۵- عوامل اقتصادی

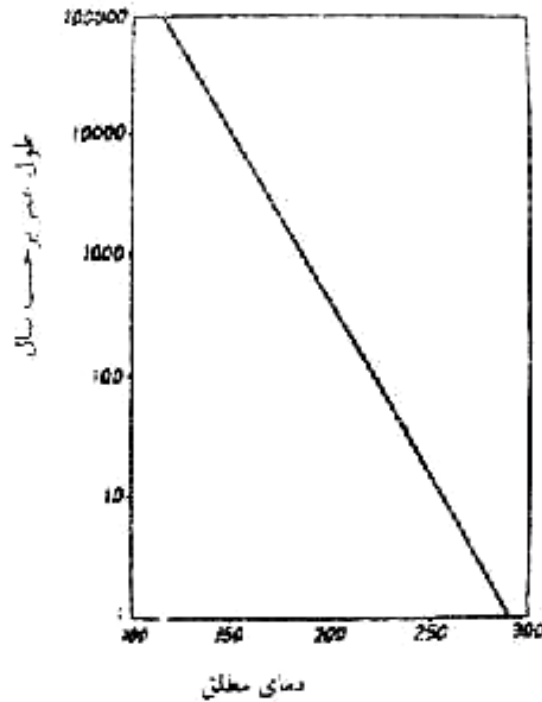
۱-۲-۲- رفتار مکانیکی ماده عایقی:

استحکام ماده عایقی، نیاز اصلی و اساسی آن می باشد. ضریب کشسانی برای یک ساختمان سخت، باید بالا و برای یک سیستم عایقی باید پایین باشد. به عنوان مثال، جنس صفحه آستر شیار ماشین های الکتریکی باید به اندازه کافی سفت باشد تا بتواند در مقابل صفحه داخلی شکاف منبسط شده، بدون شکستن تا بخورد و نیز باید لبه شکاف در مقابل ورقه ورقه شدن، ارتعاش، تأثیر شیمیایی روغن جلای به کار رفته، اثر افزایش دما، جذب رطوبت و غیره مقاومت کند. برآمدگی سیم پیچ باید در قبال فرسودگی، مقاومت زیادی کند و یا ضریب اصطکاک کمی داشته باشد. جلای عایقی باید کاملاً به سیم ها چسبیده باشد و الا سیته لازم برای انبساط را داشته باشد تا بر اثر تغییر دما، مس ها بتوانند به هم برسند. بنابراین ملزومات مکانیکی بسته به نوع کاربرد برای یک عایق متفاوت اند.

۲-۲-۲- رفتار گرمایی ماده عایقی:

در به کارگیری بسیاری از عایق ها به نوعی از مواد عایقی نیاز است که در یک دوره کوتاه اضافه بار و در دماهای بسیار بالا منبسط نگردند. معمولاً ویژگی های فیزیکی مواد با افزایش دما، تغییر می کنند. نیروی کششی در عایق ها نباید به نقطه ای برسد که باعث تغییر شکل و فرسودگی بیش از اندازه آن شود. همچنین یک ماده عایقی از نوع ترموپلاستیک، نباید دمای عملکرد آن (حتی برای یک مدت زمان کوتاه) به دمای نقطه ذوب برسد. وقتی مواد عایقی برای مدت طولانی تری در معرض حرارت قرار می گیرند، ترکیب شیمیایی آن ها تغییر می کند. این تغییر شیمیایی باعث تغییر ویژگی های فیزیکی از حالت مجاز به حالت غیرمجاز می شود و در نتیجه، کهنگی و فرسودگی ماده را به همراه خواهد داشت. بنابراین، می توان گفت که مدت زمان عملکرد عایق با دمای مطلق آن عایق، نسبت عکس دارد که

نمودار آن اغلب عایق ها ، یک نمودار تقریباً خطی خواهد بود. در شکل (۱-۱) این ارتباط نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) رابطه بین دمای مطلق و کارکرد عایق

۲-۲-۳- رفتار شیمیایی:

رفتار شیمیایی به تأثیر محیط روی ماده عایق بستگی دارد. معمولاً این محیط همان هوای حامل رطوبت است. اکسیژن موجود در هوا قادر است عایق را به گونه ای اکسید کند که به شکل زیان آوری، ویژگی های فیزیکی آن از بین رود. همچنین می تواند باعث تخریب بعضی عایق ها شود. به علاوه اثرات تخریبی روی سطح عایق باعث می شود که مقاومت عایقی پایین بیاید.

۲-۲-۴- خصوصیات الکتریکی:

از مهمترین خصوصیات هر عایقی، استقامت الکتریکی آن است. استقامت الکتریکی عایق ها برحسب حداکثر شدت میدان الکتریکی قابل تحمل آنها سنجیده می شود و معمولاً بر حسب Kv/cm بیان می

گردد. ولتاژ شکست یک قطعه عایق، به ضخامت آن بستگی دارد؛ لیکن میدان شکست عایق تقریباً مستقل از ضخامت آن است و به جنس عایق بستگی دارد.

۵-۲-۲- عوامل اقتصادی:

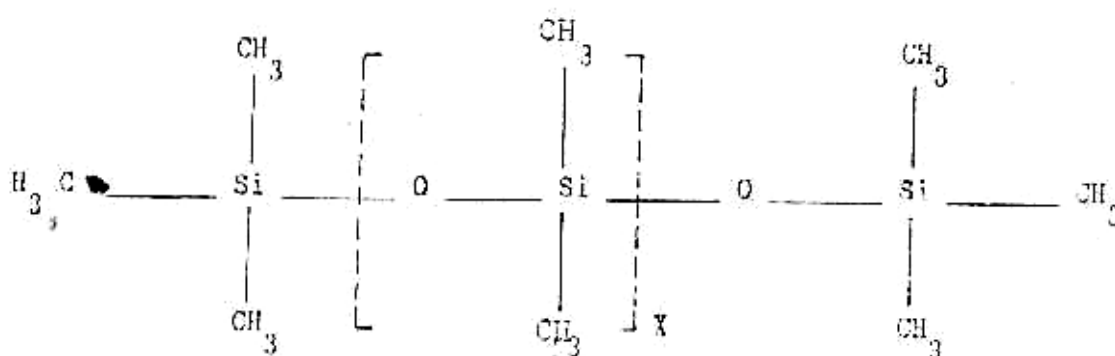
یکی از عوامل موثر در طراحی عایق ها، طرح یک سیستم عایقی است، به گونه ای که بهترین عملکرد را به ازای قیمت مناسب داشته باشد. البته این موضوع به معنای تلاش برای کم کردن قیمت های در واحد وزن، برای سیستم های عایق کاری و تجهیزات آن نمی باشد. اگر با صرف هزینه بیشتری برای یک یا چند قطعه در سیستم، بتوان ابعاد سیستم را کاهش داد، در نتیجه عاقلانه تر است که از عایق های گران تر، بیشتر استفاده شود. جملگی این مسائل باید پیرامون قیمت در واحد وزن، تولید، مصرف و تغییر طراحی برای انطباق در دماهای بالاتر مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۲- شیمی مایعات دی الکتریک:

بلحاظ تاریخی روغن های معدنی عایق کننده، مشخصات نفت خام با پایه نفتی بوده اند. اخیراً روغن هایی با وزن مولکولی بالا با پایه پارافینی در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار گرفته اند. که علت آن عدم قابلیت استفاده از **PCB (Poly Chlorinated Biphenyl)** می باشد. به هر حال ترکیب این روغن ها خیلی پیچیده بوده و به نوع نفت خام، نوع پالایش، افزودنی ها و بسیاری عوامل دیگر بستگی دارد. روغنهایی که اساساً حاوی هیدروکربورهای اشباع می باشند، بسادگی اکسید شده، که این مسئله با افزودن باز دارنده اکسیداسیون به روغن، کنترل می شود. برای کاهش مواد فرار و افزایش نقطه اشتعال روغن های معدنی، روش هیدروژناسیون مخصوص و فرآیندهای عریان سازی با حصول افزایش در ویسکوزیته، بکار برده می شوند. شدت اکسیداسیون روغنهای معدنی صنعتی ممکن است بوسیله بکار بردن روش های خاصی از پالایش، تا حد زیادی کند شود. در این روشها، بعضی ترکیبات آروماتیک که بطور طبیعی در روغن وجود دارد، در آن به جا مانده و دیگر ترکیبات آروماتیک

که سبب اکسیداسیون و تشکیل لجن در روغن می شوند، از آن خارج می شود.

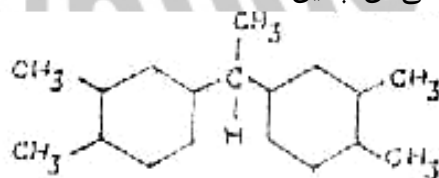
مایعات دی الکتریک سیلیکونی، پلی دی متیل سیکلوکسانها بوده که ساختمان عمومی این پلیمرهای خطی بشکل زیر است



این مایعات بوسیله توزیع محدودتر وزن مولکولی نسبت به روغن های معدنی یا *askarels* تشخیص داده می شوند. آنها حاوی ۰/۵ درصد مواد فرار بوده، که باعث می شود عملیات در دماهای بالاتر و با یک فشار بخار متناظر کمتر، انجام شود.

DXE یا *dixylyethane* یک عایق مایع آروماتیکی مشتق از نفت خام می باشد، که در مقابل

حرارت پایدار بوده و فرمول ساختمانی آن چنین است:



۴-۲- طبقه بندی مایعات دی الکتریک:

روغنهای معدنی و مایعات سیلیکونی در دامنه وسیعی از ویسکوزیته، موجود می باشند. اکثر روغن های معدنی که در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند، دارای ویسکوزیته تقریباً ۱۰ سانتی استوک در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد بوده و ویسکوزیته مایعات سیلیکونی تقریباً ۴ سانتی استوک می باشد. ویسکوزیته روغن های معدنی با وزن مولکولی بالا، خیلی زیاد بوده و در حدود ۱۳۰ سانتی استوک می

باشد. روغن های معدنی جدید صنعتی با مقاومت معمولی و یا مقاومت زیاد در مقابل اکسیداسیون، همچنین *DXE* با ویسکوزیته ۱۲/۵ سانتی استوک در دمای ۳۸ درجه سانتی گراد موجود می باشند.

۲-۵- خواص مایعات دی الکتریک:

چندین پارامتر وجود دارد که اهمیت هر یک از آنها نسبت به نوع کاربرد، تفاوت می کند. این پارامترها عبارتند از:

۱-۲-۵- سمیت مایعات دی الکتریک:

بجز *PCB* هاوتتراکلرواتیلن، مایعات دی الکتریک که در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند، ضرورتاً غیر سمی هستند. بهرحال محصولات ناشی از تجزیه مایع، ممکن است میزان سمیت مایع را تغییر بدهند. ولی معمولاً این مسئله در استفاده از آنها، مانعی ایجاد نمی کند. گمان می رود تری کلرواتیلن فلورواتان برای لایه ازن جو زیان آور باشد.

۲-۲-۵- قابلیت اشتعال مایعات دی الکتریک:

قابلیت اشتعال، پارامتر مهمی در ارتباط با انتخاب یک مایع دی الکتریک می باشد. یک خصوصیات برجسته مایعات کلرینه یا فلورینه شده، غیر قابل اشتعال بودن آنها می باشد. روغنهای سیلیکونی و روغن های پارافینی بخوبی تصفیه شده با وزن مولکولی بالا، دارای قابلیت اشتعال کم، می باشند.

۳-۲-۵- بی اثری و پایداری شیمیائی و حرارتی مایعات دی الکتریک:

یک مایع دی الکتریک، در صورتی می تواند بدون زوال بمدت زیادی دوام داشته باشد، که ازدرجه بالایی از خلوص، بی اثری و پایداری شیمیائی و حرارتی برخوردار باشد. از بین مایعاتی که در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند، سیلیکون ها پایداریترین آنها هستند. شروع شکست حرارتی آنها، در دماهای بیش از ۲۳۰ درجه سانتی گراد که همراه با تشکیل ترکیبات سیلیکونی حلقوی فرار، بمقدار زیاد می باشد. مایعات سیلیکونی ترانسفورماتور، در دمای بیش از ۱۷۵ درجه سانتی گراد و در حضور اکسیژن، بکندی شروع به اکسیداسیون می نمایند. وقتی این مایعات اکسید می شوند، بتدریج پلیمریزه

شده و ویسکوزیته آنها افزایش پیدا می کند، تا اینکه تبدیل به ژله می شوند. در این حال خواص دی الکتریکی پایدار باقی مانده و هیچ نوع اسید یا لجن زیان آوری تشکیل نمی شود.

روغنهای معدنی عاری از بازدارنده، در حضور اکسیژن بسادگی اکسید شده که این اکسیداسیون همراه با تشکیل لجن و اسید می باشد. این واکنش ممکن است با اضافه کردن یک بازدارنده اکسیداسیون (که در قسمت های بعد در مورد آنها توضیح داده می شود) بکندی صورت بگیرد. سرعت اکسیداسیون در مایعات پارافینی با وزن مولکولی زیاد نسبت به روغن های معدنی صنعتی خیلی کمتر است و مسائل نیز بایستی طوری طراحی شوند که اثرات اکسیداسیون روغن را حداقل برسانند ترانسفورماتورها بایستی طوری ساخته شوند که تماس هوا با روغن، در آنها محدود باشد. اقدام موثر دیگر پوشاندن مایع با یک گاز بی اثر مثل نیتروژن می باشد. شدت اکسیداسیون تمام روغن های معدنی، با افزایش دما، افزایش پیدا می کند. یک تجربه عملی نشان می دهد که شدت اکسیداسیون برای هر افزایش دما بمیزان ۱۰ درجه سانتی گراد، دو برابر می شود. در دستگاه های حاوی روغن معدنی که در آنها فلزاتی از قبیل مس، آهن و سرب بکار می رود، این فلزات در افزایش شدت اکسیداسیون مانند یک کاتالیزور عمل می کنند. اثرات هر فلز و غلظت آن، متفاوت بوده، و بستگی به میزان اکسیژن موجود دارد. این اثرات در حالتی که میزان اکسیژن موجود خیلی کم می باشد، چندان قابل ملاحظه نیست.

۴-۵-۲- اثر جرقه در مایعات دی الکتریک:

از روغن های معدنی و سیلیکونی، تحت جرقه های ناشی از عبور جریان الکتریکی زیاد، گازهای قابل اشتعال متصاعد می شود. گازهای ناشی از جرقه در هر دو نوع مایع، شامل هیدروژن (گاز اصلی)، نیتروژن، متان، اکسیژن - آرگون، منو اکسید کربن و مقادیر خیلی کم اتیلن، استیلن و دی اکسید کربن می باشد. وقتی عمل تجزیه به وسیله جرقه انجام می شود، ترکیبات هالوژنه باعث تشکیل مواد سمی و خورنده شده که اینها نیز باعث از بین رفتن مواد سلولزی می شوند.

۵-۵-۲- اثرات میزان آب موجود در مایعات دی الکتریک:

مایعات دی الکتریک در جریان حمل و ذخیره سازی، همچنین تولید وسایل الکتریکی (که حاوی این مایعات هستند)، وقتی در تماس با مواد خیلی مرطوب قرار می گیرند. ممکن است مقادیری آب جذب کنند. بهر حال ضروری است که میزان رطوبت مایعات دی الکتریک، در حداقل ممکن نگه داشته شود. در غیر این صورت، رطوبت موجود با دیگر مواد آلوده کننده ترکیب شده و باعث تسریع در زوال دی الکتریکی و شیمیائی مایع می شود. وقتی رطوبت اضافی موجود باشد در دماهای پائین، ممکن است همراه با تشکیل امولسیون و کاهش قابل توجه در میزان دی الکتریک مایع، آب از مایع جدا شود. جدول زیر حداکثر میزان مجاز آب موجود در مایعات دی الکتریک را که بطور گسترده مورد استفاده واقع می شوند، نشان می دهد. میزان آب موجود در مایعات تحویلی، معمولاً از مقدار نشان داده شده در جدول، کمتر است.

جدول (۱-۲) حداکثر میزان مجاز آب موجود در مایعات دی الکتریک (*ASTM D1533*)

نوع مایع	<i>PPm</i> آب موجود
روغن معدنی جدید	۲۵
روغن معدنی با وزن مولکولی بالا	۱۵
مایعات سیلیکونی	۵۰
<i>DXE</i>	۳۰۰

۶-۵-۲- خواص عایقی:

شکست عایقی ناشی از ولتاژ، در یک مایع در فرکانسهای برق صنعتی، تحت تأثیر پارامترهای زیر می باشد:

۱- شکل، مساحت سطح، خصوصیات سطح و جنس الکترودها

۲- فاصله بین الکترودها

۳- یکنواختی میدان الکتریکی

۴- مدت زمان قرار گرفتن مایع، تحت تنش الکتریکی

۵- دمای مایع

۶- درجه خلوص

۷- غلظت گازهای حل شده و تمایل به *gassing* (تولید گاز)

سیستم عایق سازی ترانسفورماتورها، کابل ها و خازنهای، اغلب شامل کاغذ و دیگر مواد جاذب و سلولزی می باشد که نسبت به مایعات دی الکتریک، تمایل بیشتری برای جذب آب دارند. از این روسیستم های دی الکتریک بایستی در تعادل رطوبتی باشند تا اندازه گیری دی الکتریک انجام شده بتواند مورد قبول واقع شود.

به علت اینکه اندازه گیری های دی الکتریکی توسط تولیدکنندگان، اغلب تحت شرایط متفاوتی از نظر روش تست بکار رفته، نوع الکترودها و فاصله بین آنها، فرکانس مورد استفاده، میزان رطوبت، درجه خلوص و انجام می شود مقایسه مقادیر دی الکتریک مایع های عایق کننده، تا اندازه ای مشکل است. منطقی ترین مقایسه ها آنهایی هستند که بر روی کل سیستم ها انجام می شوند. ولی بهر حال شرایط کاربرد نهایی، نوع مایع مورد استفاده را تعیین می کند. در رابطه با موادی که در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. مقادیری دی الکتریک برای مایعات بدون رطوبت، صاف شده و گاز زدائی شده موجود در ترانسفورماتور، در دامنه های نشان داده شده در جدول زیر قرار می گیرند:

جدول (۲-۲) خواص دی الکتریک مایعات دی الکتریک مورد استفاده در ترانسفورماتورها:

دما	دامنه مقادیر	روش <i>ASTM</i>
$25^{\circ}C$	56-60(Kv)	D1816
$25^{\circ}C$	2.2-2.7	D924
$25^{\circ}C$	$10^{13} - 10^{15} (ohm -$	D1169

مقاومت دی الکتریکی (0.08gap)
ثابت دی الکتریک (در فرکانسهای قدرت)
مقاومت حجمی

cm)

یک خصوصیت قابل توجه دی الکتریک های مایع، ترمیم شدن خواص آنها بطور خود بخودی، پس از شکست عایقی آنها می باشد. یعنی دستگاه حاوی مایع فوراً توسط جریان مایع، بطور مجدد عایق بندی می شود.

۷-۵-۲- اثر شدت انتقال حرارت در مایعات دی الکتریک:

قابلیت بکار رفتن یک مایع دی الکتریک، بعنوان سیال سرد کننده، بوسیله بررسی خواص انتقال حرارت آن مایع تعیین می شود. این خواص عبارتند از:

۱- ویسکوزیته

۲- جرم مخصوص

۳- ضریب هدایت حرارتی

۴- گرمای ویژه

۵- ضریب انبساط حرارتی

برای انتقال حرارت بهینه، ویسکوزیته یک مایع بایستی حتی الامکان کم بوده و مقادیر دیگر پارامترهای بایستی زیاد باشد. خواص حرارتی مایعات دی الکتریک، که در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند، در جداول زیر نشان داده شده است:

جدول (۲-۳) ویسکوزیته و نقطه ریزش مایعات دی الکتریک بکار رفته در ترانسفورماتور

(ASTM D 445)

نقطه ریزش ($^{\circ}C$)

برحسب سانتی استوک

	$100^{\circ}C$	$40^{\circ}C$	$0^{\circ}C$	
	۲/۳	۹	۵۵	روغن معدنی جدید
	-۴۵			

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoocn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

عایق های مایع

-۲۴	۱۳	۱۳۰	-	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
-۵۵	۱۶	۳۸	۹۵	سیلیکون
-۳۴	-	۱۳	-	<i>DXE</i>

جدول (۲-۴) جرم مخصوص مایعات دی الکتریک بکار رفته در ترانسفورماتور (*ASTM D 1298*)

گرم بر سانتی متر مکعب	دما ($^{\circ}C$)	
۰/۹۱	۱۵	روغن معدنی جدید
۰/۸۷	۲۵	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
۰/۹۶	۲۵	مایع سیلیکونی
۱/۴۲	۲۵	تری کلروتری فلورواتان
۱/۶۳	۲۵	تتراکلرواتیلن
۰/۹۸	۱۶	<i>DXE</i>

جدول (۲-۵) ضریب هدایت حرارتی مایعات دی الکتریک بکار رفته در ترانسفورماتور

$Cal./sec.cm^2$	دما ($^{\circ}C$)	
$^{\circ}C/cm$		
3.5×10^{-4}	25	روغن معدنی جدید
3.1×10^{-4}	25	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
3.6×10^{-4}	25	مایع سیلیکونی
1.2×10^{-4}	-	<i>DXE</i>

جدول (۲-۶) گرمای ویژه مایعات دی الکتریک بکار رفته در ترانسفورماتور

Cal/gm ^o C	دما (°C)	
0.53	25	روغن معدنی جدید
0.46	25	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
0.36	25	سیلیکون
0.63	25	DXE

جدول (۲-۷) ضریب انبساط حرارتی مایعات دی الکتریک بکار رفته در ترانسفورماتور (ASTM D

1903)

Cc/cc ^o C	دما (°C)	
-----	-	روغن معدنی جدید
0.0007	25	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
0.0010	25	مایع سیلیکونی
0.00063	25	DXE

جدول (۲-۸) نقطه اشتعال و نقطه احتراق مایعات دی الکتریک به کار رفته در ترانسفورماتور (ASTM

D92)

نقطه اشتعال (°C)	نقطه احتراق (°C)	
145	-	روغن معدنی جدید
284	312	روغن معدنی با وزن مولکولی بالا
300	315	مایع سیلیکونی
163	193	DXE

۸-۵-۲- انطباق پذیری مایعات دی الکتریک:

مایعاتی که دارای موارد استفاده گسترده ای بعنوان عایق الکتریکی می باشند، ضرورتاً با اکثر مواد دیگری (مانند کاغذ های سلولزی و پلی آمیدی، محصولات میکا، چوب، مواد دزدگیر و آب بند) که در ساخت دستگاه های الکتریکی بکار می روند سازگاری دارند بهر حال در انتخاب مواد درزگیر و آب بندی، دقت زیادی لازم بوده و آزمایشاتی جهت اطمینان از وجود سازگاری لازم است از تماس سیلیکون مایع با درزگیرها و روکش های سیم از جنس سیلیکون را بر (لاستیک سیلیکون دار) و دیگر مواد سیلیکونی بایستی اجتناب شود. سیلیکون را بر و مایع سیلیکونی ترانسفورماتور، از لحاظ شیمیائی شبیه به هم بوده و مایع سیلیکونی به آسانی جذب لاستیک شده و باعث تورم لاستیک و از بین بردن خواص فیزیکی آن می شود. مایعات سیلیکونی همچنین تمایل به جذب مواد نرم کننده موجود در لاستیک طبیعی و مصنوعی، داشته و باعث افزایش سختی آنها و از بین بردن خواصشان بعنوان مواد درزگیر، می شوند. زمانیکه به علتی تصمیم به تعویض مایعات **PCB** گرفته می شود. بایستی فقط مایعاتی (مانند روغنهای پارافینی با وزن مولکولی بالا یا برخی روغنهای سیلیکونی) که برای این گاز، مناسب تشخیص داده شده اند، در نظر گرفته شوند.

۹-۵-۲- قیمت مایعات دی الکتریک:

در مرحله ارزیابی خصوصیات و ویژگی های مایعات دی الکتریک، برای انتخاب یکی از آنها، مسئله قیمت یک پارامتر تعیین کننده می باشد، روغن معدنی صنعتی، از ابتدا کمترین قیمت را دارا بوده و مایعات سیلیکونی، گرانترین مایعات می باشند. روغنهای پارافینی با وزن مولکولی بالا، اگر چه به گرانی مایعات سیلیکونی نیستند، ولی از روغنهای معدنی خیلی گرانتر می باشند. بهر حال در نظر گرفتن کل قیمت یک سیستم عایقکاری، اهمیت زیادی دارد.

۶-۲- روغنهای عایق:

تمام روغن ها، اعم از ترکیبی یا معدنی، دارای منشاء نباتی یا حیوانی، اگر عاری از آب، اسید، الکل و دیگر مایعات رسانای مشابه با این مواد باشند. در تست های اندازه گیری استقامت الکتریکی تعیین شده برای روغن های مایع، از خود مقاومت نشان خواهند داد. عامل مهم، در این روغن ها، همانند جامدات، توانایی حفظ خواص عایقی و دیگر خواص مطلوب در هنگام در هنگام عملیات می باشد. اکنون مشخص شده است که از بین مایعاتی که بطور طبیعی در دسترس می باشند. فقط روغن های معدنی که بطور مناسب تصفیه شده اند. دارای پایداری شیمیائی لازم برای کاربردهای عمومی می باشند. مایعات ترکیبی دیگری (از قبیل آروماتیکهای کلردار، فلوروکربن ها و سیلیکونها، همراه با هیدروکربورهای ترکیبی مشابه با نوع طبیعی آن) نیز هستند که باندازه کافی پایداری دارند. هر کدام از این ها در شرایط مخصوص مورد استفاده قرار می گیرند، ولی هیچکدام نمی توانند در مقیاس وسیع، جانشین روغنهای معدنی، که بطور قابل ملاحظه ای ارزاتر هستند، بشوند.

برای خنک کردن دستگاه هایی که با روغن خنک می شوند. (نظیر ترانسفورماتورها، بوشینگ های پر شده با روغن) به یک سیال واسطه، نیاز می باشد. این سیال بایستی در تمام دماهای محیطی و عملیاتی، به آسانی شعله ور نشده و باندازه کافی در مقابل اکسیداسیون توسط هوا، مقاوم باشد، تا در ضمن کار مواد خورنده و مقادیر بزرگ لجن تولید نشده و ویسکوزیته افزایش پیدا نکند. کابل های روغنی فشار قوی، با هادی توخالی، با نفوذ پذیری و زاویه تلفات کم، نیازهای وسیعاً مشابه با دستگاه های فوق داشته و چون مستقیماً در معرض هوا قرار نمی گیرند، مقاومت اکسیداسیونی در آنها از اهمیت کمتری برخوردار است.

از طرف دیگر در کابلها تنش های الکتریکی بالاتری وجود دارد، بنابراین در ساخت آنها بایستی از به کار بردن روغن هایی که وقتی در معرض دشارژ قرار می گیرند، گاز تولید می کنند. اجتناب کرد از اکسیداسیون در جریان فرآیند نیز بایستی اجتناب شود. چون اسید تولید شده باعث تسریع در زوال و از هم پاشیدن کاغذ می شود.

برای جلوگیری از محل ریزش از سطوح بالاتر به سطوح پائین تر در ضمن کار در کابل‌های با عایق کاغذ اشباع شده و هادی غیر رشته ای، یک ماده اشباع کننده ویسکوز، مورد نیاز می باشد که این ماده می تواند یک روغن معدنی همراه با مقداری ماده غلیظ کننده باشد.

سیالیت روغنهای بکار رفته در کلیدها و تابلوها، تحت تمام شرایط آب و هوایی بایستی حفظ شده و وقتی در معرض یک قوس الکتریکی قرار می گیرند. نبایستی از آنها مواد سمی یا خیلی خورنده تولید شود. همین مسئله، استفاده از هیدروکربورهای کلرینه (کلردار) را بعلت تولید اسید کلریدریک در اثر یک قوس الکتریکی ممنوع می سازد.

خازنها نیز ممکن است تحت تنش های بالا (در ولتاژ کلی نسبتاً پایین) قرار گرفته و بجز مواردی که از آن برای ذخیره برق *d.c* استفاده می شود. به یک زاویه تلفات کم نیاز دارند. یک نفوذ پذیری بالا در مورد آنها خیلی مطلوب بوده، ولی پایداری در مقابل اکسیداسیون در آنها نسبت به اجتناب از *gassing* در تنش های بالا از اهمیت کمتری برخوردار است.

۲-۷- روغن های معدنی:

روغن های معدنی حاصل از منابع مختلف، ترکیبات متفاوتی دارند، هر یک از این روغن‌ها از تعداد زیادی مولکول تشکیل شده، که بسیاری از آنها با هم مشابه نیستند. آنها بوسیله وجود نسبت هایی از سه نوع هیدروکربور در دامنه وسیعی طبقه بندی شده اند: پارافینی (هیدروکربورهای اشباع با زنجیر مستقیم یا با شاخه های فرعی) تفکیک (سیکلوپارافین ها) و آروماتیک (دارای ساختمان مولکولی حلقوی با تعداد تقریباً مساوی از اتم های هیدروژن و کربن). نسبت به باندهای غیر اشباع و انواع مختلف ناخالصی در آنها، نیز از اهمیت زیادی برخوردار است.

تولید روغنهای عایق مناسب، از جهتی بستگی به انتخاب برش نفتی مناسب و از جهت دیگر، بستگی به روش تصفیه در رابطه با برش مورد استفاده دارد. اگر چه تغییراتی در روشهای تصفیه (مانند تغییر از

تصفیه توسط اسید به تصفیه توسط حلال) انجام شده است ولی برای چندین دهه هیچ تغییر شگرفی در خصوصیات محصول پیدا نشده است و تمام کوشش ها متوجه بهبود کیفیت محصول بوده و بر روی روشهای متفاوت تعیین پایداری، توسط آزمایشات کنترل کیفیت، متمرکز شده است.

۱-۷-۲- پارامترهای موثر در اکسیداسیون روغنهای معدنی:

گمان می رود هیدروکربورهای خیلی خالص در مقابل اکسیداسیون نیز خیلی پایدار باشند. ولی اگر این مسئله درست باشد، دلیلی ندارد که روغن هایی که بیشترین تصفیه روی آنها انجام گرفته بیشترین پایداری را نیز داشته باشند. بویژه تصفیه بوسیله عمل کردن با اسید سلفوریک روغن خالص بیرنگی را تولید می کند، که خیلی آسانتر نسبت به روغن قبل از تصفیه، اکسید می شود. بنظر می رسد پایداری در مقابل اکسیداسیون، بوسیله حضور برخی ترکیبات طبیعی افزایش می یابد. از طرف دیگر مادامی که روغن تازه است خواص الکتریکی آن توسط فرآیندهای تصفیه بهبود می یابد.

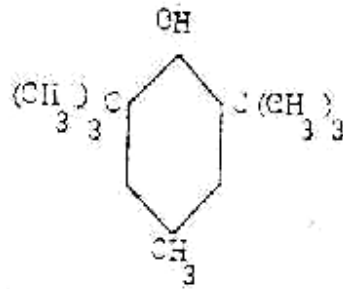
فرآیند اکسیداسیون در حضور مس و تا حدی فلزات دیگر تسریع می شود شیلدز (*Childs*) و استانت (*Stannet*) در سال ۱۹۵۳ دریافتند که نفتنات آهن و مس در حالت محلول در روغن نیز به همان شدت اکسیداسیون را تسریع می کنند. *Massey* در سال ۱۹۵۲ نتیجه گرفت که مس خیلی بیشتر از آهن یا هر ماده دیگری که بطور معمول در ترانسفورماتور استفاده می شود. در تسریع اکسیداسیون موثر است.

اینکه آیا فلز مس در فصل مشترک فلز - روغن، باعث تسریع اکسیداسیون می شود یا فقط پس از حل شدن توسط اسیدهای آلی سبب این کار می شود، بدرستی مشخص نشده است. مقادیر خیلی کم فلز در حد *ppm* برای تأثیر در اکسیداسیون کافی بوده. در حالیکه افزایش بیش از حدود ۰.۱٪ هیچ تسریعی در اکسیداسیون ایجاد نمی کند. روغنهای کابل و خازن، بجز در ضمن فرآیند، معمولاً در معرض هوا قرار ندارند. ترانسفورماتورها معمولاً توسط یک نگهدارنده (*Conservator*) از تماس با هوا دور نگه داشته می شوند، ولی جهت ایزولاسیون کامل از هوا، از لایه ای نیتروژن، که در مقابل انبساط و

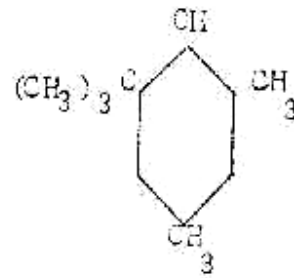
انقباض، انعطاف پذیر می باشد. استفاده می کنند. که البته بواسطه گرانی آن، کاربرد وسیعی ندارد. وقتی روغن در معرض تخلیه الکتریکی قرار می گیرد. مواد آروماتیکی موجود در روغن، تمایل آن را نسبت به جذب اکسیژن افزایش می دهند و بطور وسیعی اعتقاد بر این است که این مسئله تمایل به اکسیداسیون را نیز در روغن افزایش می دهد. *Wilson* در سال ۱۹۶۵ از یک سری مطالعات آزمایشگاهی، بر روی پایداری نسبی روغن ها، تحت شرایط مختلف از نظر اکسیژن موجود، کاتالیست مس و دمای آزمایش، نتیجه گرفت که مقادیر بهینه ای برای میزان آروماتیک موجود در روغن وجود دارد که این مقادیر برای هر آزمایش (با شرایط خاص) و همچنین برای هر روغن، متفاوت است ولی در مجموع مقادیری بین ۸-۱۶ درصد آروماتیک موجود در روغن (بسته به نوع روغن) می تواند مطلوب باشد. *Melchiorre* و *Mills* در سال ۱۹۶۷ نتیجه گرفتند که اگر در ابتدا ترکیبات گوگرد از روغن جدا گردند. آروماتیک ها می توانند باعث بالا رفتن پایداری روغن در مقابل اکسیداسیون بشوند. بطور معمول روغن های ترانسفورماتور حاوی ۵-۱۵ درصد آروماتیک می باشند، در حالیکه روغنهای کابل و خازن که در مقابل اکسیداسیون، آسیب پذیری کمتری دارند. (ولی تحت تأثیر تخلیه الکتریکی، گاز تولید نمی کنند) حاوی ۱۵-۲۵ درصد مواد آروماتیک می باشند.

استفاده از بازدارنده های اکسیداسیون در روغن ترانسفورماتور، طی چندین سال در آمریکا، بخوبی مورد اجرا گذاشته شده است مهمترین انواع بازدارنده ها عبارتند از:

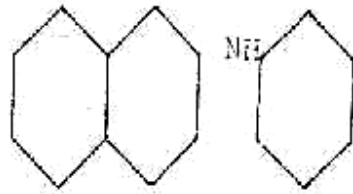
ditertiary butyl-P-cresol (DBPC)



dimethyl-6-Tertiary-butyl-P-cresol (2-M6B)



t-naphthylamine (PBN)



این افزودنی ها بمیزان کسری از یک درصد مورد استفاده قرار می گیرند. در تست های آزمایشگاهی اثر آن ممکن است بصورت کاهش شدت اکسیداسیون ظاهر شود، ولی بطور کلی پس از افزودن آنها یک "Induction Period" ایجاد می شود. (یعنی یک فاصله زمانی بین شروع واکنش اکسیداسیون و اولین تغییرات قابل مشاهده، که بمقدار کم انجام می شود. (و در پی آن، اکسیداسیون با همان شدتی که در زمان عدم حضور بازدارنده انجام می شود. صورت نمی گیرد یا اینکه عمل اکسیداسیون بمقدار کم انجام می شود.) و در پی آن، اکسیداسیون با همان شدتی که در زمان عدم حضور بازدارنده انجام می شود. صورت می گیرد. *Massey* و *Wilson* در سال ۱۹۵۸ با استفاده از دستگاه طرح شده توسط *Button* و *Davies* در سال ۱۹۵۳ (که در آن اکسیژن بصورت الکترولیتی تولید شده و در فضای بالای سطح روغن جای می گیرد) اثرات فوق الذکر را بوسیله مشاهده جذب اکسیژن در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد و در حضور مس حل شده، مطالعه کرده اند. آنها نتیجه گرفتند که یک تست مناسب

برای روغنهای حاوی بازدارنده، اندازه گیری زمانی است که ۱۰۰ گرم روغن مقدار ۳۰۰ میلی لیتر اکسیژن را در شرایط استاندارد جذب می کند و تا حدود زیادی متناظر با ارزش اسیدی یک میلی گرم کاستیک پتاس در هر گرم روغن می باشد. آنها این پارامتر را *useful life period* یا دوره عمر مفید نام نهادند. این پارامتریک پیوند مقایسه ای برحسب ساعت و منتج از یک آزمایش سریع می باشد و بهیچوجه عمر روغن را در سرویس، آنچنان که انتظار می رود، نشان نمی دهد. آنها دریافتند که دوره عمر مفید، به طور تقریبی با مقدار کمیت باز دارنده ورد استفاده متناسب بوده و این دوره برای روغنهای حاوی بازدارنده در دمای کمتر از حدود ۱۱۵ درجه سانتی گراد، برای روغنهای عاری از بازدارنده در دمای کمتر از حدود ۸۵ درجه سانتی گراد خیلی طولانی می باشد، و افزون بازدارنده تازه قبل از پایان دوره عمر مفید این دوره طولانیتر کرده ولی مخلوط کردن بازدارنده ها یا روغنهای حاوی بازدارنده، ممکن است اثرات بازدارندگی را کاهش دهد.

Patterson و *Hornsby* و *Irving* در سال ۱۹۶۵ بر روی دو ترانسفورماتور تازه ساخته شده **50KVA** (که دمای روغن آنها ۱۰۵-۱۰۰ درجه سانتی گراد بود). عمل کردند. در حالیکه یکی از آنها حاوی بازدارنده و دیگری عاری از آن بود. روغن عاری از بازدارنده بعد از ۱۲ ماه تبدیل به اسید شده و باروغن تازه تعویض شد.

در حالیکه روغن حاوی بازدارنده دچار چنین تغییری نشد. پس از ۲۸ ماه هر دو روغن حاوی اسید زیادی بودند. و بازرسی ترانسفورماتور حاوی بازدارنده که یکبار از روغن پر شده بود نشان داد که شرایط این ترانسفورماتور عاری از بازدارنده که دوبار از روغن پر شده بود. یکسان است. *Shroff* و *Wilson* در سال ۱۹۶۷ در مطالعه اکسیداسیون با مقدار محدودی از اکسیژن موجود و در غیاب مس در دمای نه چندان بالاتر از دمای کار معمولی ترانسفورماتور ، باین نتیجه رسیدند که بازدارنده ها وقتی اکسیژن بعد وفور موجود بوده و نسبت بزرگی از مس به روغن وجود داشته باشد، (یعنی شرایطی که عمر مفید روغن نسبتاً کوتاه می شود) دارای تأثیر شگرفی می باشند.

بنابراین کاربرد بازدارنده ها در ترانسفورماتورهای توزیع و ترانسفورماتورهای مشابه آن، که در شرایط نسبتاً سخت کار می کنند دارای بیشترین راندمان می باشد بعضی بازدارنده ها با جرم مولکولی زیاد، شناخته شده اند که در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی گراد تبخیر نمی شوند ولی کوشش های جدی جهت استفاده از این بازدارنده ها در روغن های ترانسفورماتور که قادرند که در دماهای بقدر کافی بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد عمل کنند صورت نگرفته، چون در کنار آن جانشینی کاغذهای عایق بوسیله موادی گرانتر، که قادرند چنین دماهای بالایی را در روغن تحمل کنند، از لحاظ اقتصادی مقرون بصرفه نیست.

۲-۷-۲- گازهای حل شده و گازهای تولید شده بوسیله تخلیه الکتریکی و بوسیله دماهای بالا:

روغن های عایق در فشار اتمسفر یک هوا را بمیزان ۱۰ درصد حجمی در خود حل می کنند، که این مقدار در شرایط دمای عملیات بیش از ۲۰ درصد افزایش پیدا می کند. بطور معمول حلالیت، متناسب با فشار هوای موجود در تماس با مایع می باشد. در دستگاه هایی که در تماس با اتمسفر می باشند، فشار تقریباً ثابت باقی می ماند و میزان کاهش حلالیت در اثر افت دما بقدری کم است که در هنگام سرد کردن روغن، باعث تشکیل حباب هوا در آن نمی شود. در دستگاه های آب بندی شده، کابلها، خازنها و ترانسفورماتورهای آب بندی شده نسبت به هوا، کم شدن دما باعث کم شدن فشار شده و گاز حل شده در حالت تعادل و در فشار اتمسفر یک، ممکن است بصورت حباب درآمد و باعث تخلیه الکتریکی و ایجاد زوال در عایق کاری اشباع شده تحت فشار زیاد بشود. بنابراین روغن های مورد استفاده در چنین دستگاه هایی بایستی قبل از عمل اشباع سازی، گاز زدائی شوند.

مسئله گاز زدائی مشکل متصاعد شدن خود بخودی گازها را از هیدروکربورها، در نتیجه تجزیه هیدروکربور بوسیله عمل تخلیه الکتریکی حل نمی کند. این مسئله در هیدروکربورهای اشباع (پارافینی و سیکلوپارافینی) پیش می آید و تأثیر آشکاری بر عایقکاری تحت فشار زیاد، داشته و ایجاد یک حالت ناپایدار می کند. در این حالت هر حباب تولید شده توسط تخلیه الکتریکی، از گازهایی که آن را بوجود

آورده اند، شروع به رشد و بزرگتر شدن می نماید. از طرف دیگر هیدروکربورهای غیر اشباع (آلفین ها و آروماتیک ها) وقتی در تماس با گاز بی اثری نظیر نیتروژن، در معرض تخلیه الکتریکی قرار می گیرند یا گاز کمی تولید کرده یا اصلاً گازی تولید نمی کنند و وقتی این عمل در تماس با هیدروژن انجام شد تمایل به جذب آن دارند. (همانطور که انتظار می رود، در تماس با آتمسفری از هوا نیز گاز اکسیژن جذب این هیدروکربورها می شود.) در کابلها و خازنها برای اطمینان از عدم تصاعد گاز، بهتر است مواد جاذب هیدروژن یا مواد ترکیبی مانند پلی بوتیلن یا دودسیل بنزن به روغن اضافه شود. در ترانسفورماتورها مشاهده شده است که روغن های حاوی مقادیر زیاد آروماتیک، نیاز به جلوگیری از تصاعد گاز ندارند. (بواسطه تنش های الکتریکی کم) در حالیکه وجود آروماتیکم ها بواسطه سهولت در انجام اکسیداسیون قطعاً مضر است. امروزه گمان می رود که میزان ۲۰-۱۰ درصد آروماتیک در روغن، برای کاهش اکسیداسیون مقداری بهینه باشد و در ترانسفورماتورهای فشار قوی و بوشینگ ها، حد بالای دامنه فوق (یعنی ۲۰ درصد) ترجیح داده می شود.

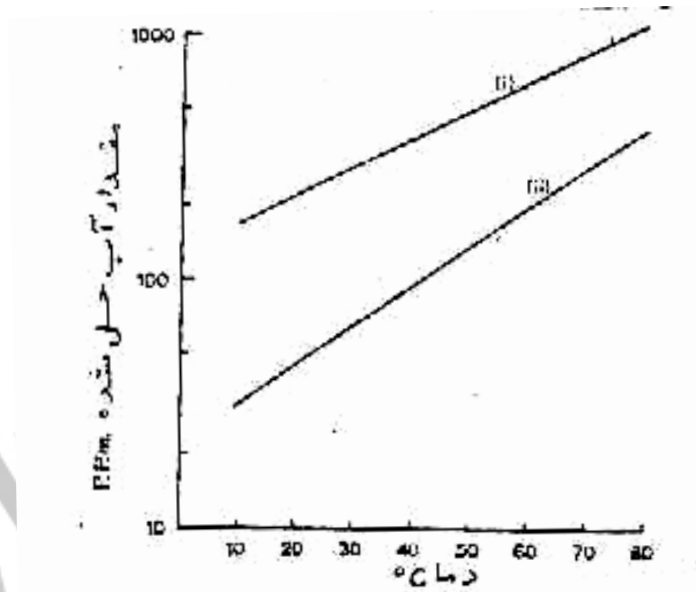
انواع زیادی از وسایل آزمایش بر روی خواص تصاعد گاز وجود دارند. در بعضی از آنها سطح روغن توسط یک الکتروود فلزی آویزان در بالا یا غوطه ور در روغن در معرض تخلیه الکتریکی قرار می گیرد و در بعضی دیگر روغن در فضای بین دو لوله شیشه ای هم محور قرار داده شده و توسط الکترودهایی واقع در سطح بیرونی لوله بیرونی و سطح داخلی لوله داخلی، در معرض یک تخلیه الکتریکی "silent" قرار می گیرد. همچنین بسیاری از انواع وسایل و روشهای اندازه گیری تغییر حجم گاز وجود دارند. **Black و Reynolds** در سال ۱۹۷۲ تجربیاتی در رابطه با خواص هیدروکربورهای اشباع بدست آورده و تأیید کردند که سرعت جذب یا تصاعد گاز توسط روغن همراه با تغییر و یا تنش الکتریکی تغییر می کند. آنها همچنین دریافتند که استرومایعات سیلیکونی در حالتی شبیه به هیدروکربورها عمل کرده و گروه های آروماتیک موجود در آنها، تمایل به جذب هیدروژن دارند.

تخلیه الکتریکی از نوع **Cold**، کرونا (**Corona**) و تخلیه الکتریکی جزئی (**Partial** یا **glow**) باعث

تصادف مقادیر زیادی گاز هیدروژن و متان از روغن می شوند، ولی از تأثیر قوس الکتریکی (*arcing*) بر روی روغن مقدار قابل توجهی استیلن تولید می شود. در صورتیکه از تماس روغن با فلز در دمای ۳۰۰-۲۰۰ درجه سانتی گراد، چندین نوع هیدروکربورو در مقادیر کم بوجود می آید. در عایقکاری با کاغذ نیز، مقادیری گازهای منو و دی اکسید کربن تولید می شود، که نسبت به مقدار گاز تولید شده توسط روغن و هوای حل شده در آن، بیشتر است این مسائل منجر به گسترش تکنیک هایی برای تشخیص عیوب در ترانسفورماتورهای در حال کار، شده که اساساً از مشاهده گازهای متصادف و جمع شده در ترانسفورماتورهایی که مجهز به رله *Buchholz* بودند، شروع گردید. روش های جدید تشخیص مقادیر خیلی کم گاز، این توانایی را فراهم آورده است، که آنالیز انجام شده بر روی گازهای حل شده در روغن. بطور دقیق و اطمینان بخشی در تشخیص عیوب موثر باشد. بهر حال طرز تشخیص و پیش بینی عیوب، نیاز به تجربه قابل ملاحظه ای در رویارویی بامسائل عملی دارد.

۳-۷-۲- حل شدن آب در روغن هیدروکربوری :

Kaufman در سال ۱۹۵۵ دریافت که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، میزان رطوبت موجود در روغن، متناسب با رطوبت هوایی است که با روغن در تماس است. (و بنابراین در رابطه با قانون هنری. با فشار جزئی بخار آب در سطح روغن، متناسب است) و معمولاً فرض می شود که این مسئله در دیگر دماها نیز صادق است. او همچنین در دماهای ۱۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد، آب موجود در یک نوع روغن ترانسفورماتور یک نوع روغن سرشار از آروماتیک را. که در تعادل با هوای اشباع بودند. اندازه گیری کرد. این نتایج به وسیله دو خط در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. دیگر اندازه گیری ها. معمولاً در فاصله بین این دو خط قرار گرفته و نتایج حاصله برای روغن ترانسفورماتور، به خط پایین نزدیکتر است افزایش در میزان آروماتیک، وجود اکسیداسیون یا تصفیه ناقص. حلالیت آب در روغن را افزایش داده و البته الیاف سلولزی معلق در روغن. رطوبت را جذب کرده و حلالیت ظاهری را افزایش می دهند. بنابراین منحنی حلالیت واحدی برای روغن های ترانسفورماتور وجود ندارد.



های
عایق

شکل (۲-۲) منحنی

حلالیت آب در روغن

برحسب دما

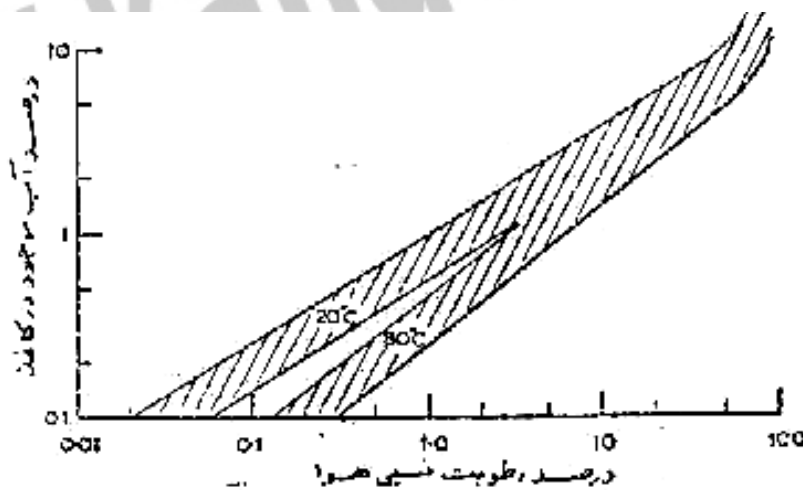
(i) - روغن های با میزان ۳۰ درصد آروماتیک

(ii) - روغن پارافینی با آروماتیک کم

در شکل (۲-۴) خطوط *Oil* مربوط به حلالیت نشان داده شده توسط خط (ii) (در فشار بخار اشباع به دما) در شکل (۲-۳) که با قانون هنری ترکیب شده و حلالیت ها را در فشارهای جزئی و کمتر بخار آب نشان می دهد.

این خطوط برای بحثی که در پی می آید، در حکم معرف یک روغن ترانسفورماتور خواهد بود. تعادل بین هوا، روغن و کاغذ از لحاظ میزان آب موجود، در یک ترانسفورماتور، موضوعی است که می تواند باعث مغشوش شدن نتایج شده و تفسیرهای نادرستی بار آورد. در شکل (۲-۳) دامنه تعادل بین میزان رطوبت کاغذ و رطوبت موجود در هوا، در همان دماها داده شده است. برای اجتناب از پیچیدگی سر و کار داشتن با چنین دامنه ای، شکل (۲-۴) منحنی هایی از میزان آب موجود در یک

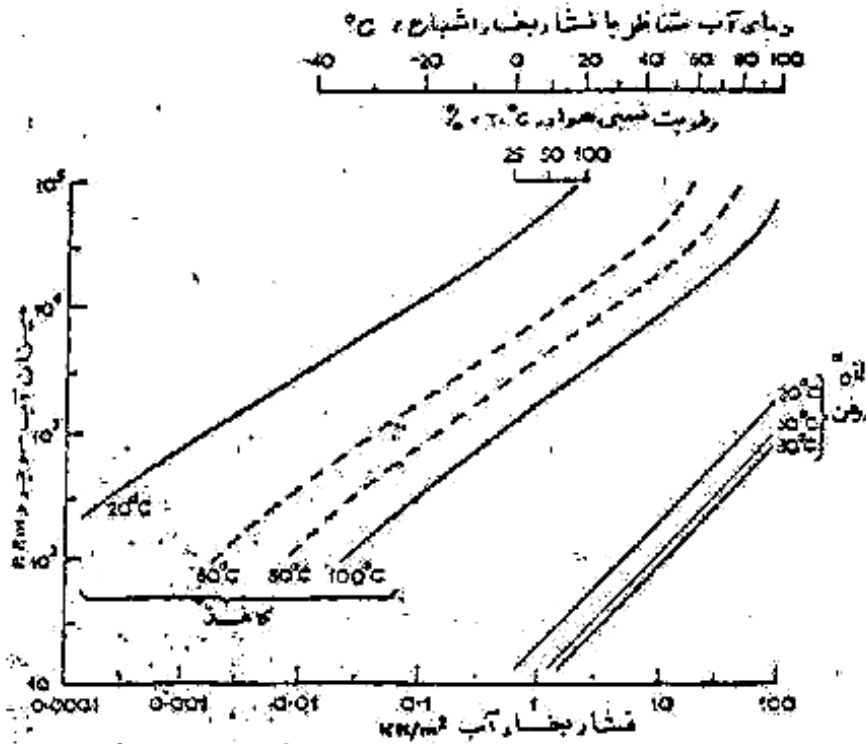
نوع کاغذ را برحسب فشار بخار موجود، نشان می دهد، که در داخل دامنه نشان داده شده در شکل (۳-۳) قرار می گیرد. البته میزان رطوبت روغن و کاغذ در یک دمای تعیین شده، وقتی متناظر با فشار بخار موجود در آن دما باشند، در تعادل با یکدیگر خواهند بود، که بستگی به وجود یک سطح تماس با بخار آزاد، ندارد. انواع فرآیندهایی که در یک ترانسفورماتور صورت می گیرد، از روی شکل (۳-۴) مشخص می شود.



شکل (۳-۳) دامنه تقریبی میزان رطوبت موجود در کاغذ برحسب رطوبت نسبی هوای در تعادل یا آن در یک ترانسفورماتور یا میزان یک درصد رطوبت در کاغذ آن (با این فرض که رطوبت یکنواخت توزیع شده، که فرضی مناسب ولی تا حدودی غیر واقع بینانه است). که در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد کار می کند، میزان آب موجود در روغن مطابق با شکل (۳-۴) بایستی $15ppm$ باشد. در چنین شرایطی، اگر هوای خارج در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد باشد. روغن در تماس با چنین هوایی بایستی در تعادل با آن باشد. پس از آن اگر ترانسفورماتور در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد کار کند، فشار بخار تعادلی آب در کاغذ، بایستی تا حدود $4 KN/m^2$ بالا رفته و آب موجود در روغن، نیز بایستی به $34ppm$ برسد. در چنین شرایطی، بایستی تبخیر آب موجود در روغن، بداخل هوای ۲۰ درجه سانتی گراد (با هر مقدار رطوبت) آغاز گردد. از این رو، در ترانسفورماتور گرایش به سمت خشک

شدن (ولو در سرعت کم) ایجاد می شود. اکنون اگر ترانسفورماتور، خارج از سرویس در اتمسفری با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، در رطوبت ۶۰ درصد قرار گیرد، میزان رطوبت روغن ساکن در تماس با هوا، بایستی در مقدار $25ppm$ باقی بماند. در حالیکه روغن در تماس با کاغذی که یک درصد رطوبت دارد، بایستی حاوی $1/7ppm$ را رطوبت باشد. (خارج از حدود شکل ۳-۲) آب بایستی از بین این نواحی، عبور کرده و کاغذ در طی یک مدت طولانی و در تعادل با اتمسفری که در نظر داریم، بایستی $6/5$ درصد آب از طریق روغن، جذب کند.

اگر در موارد خیلی غیر عادی، رطوبت کاغذ به چنین حد زیادی رسید و ترانسفورماتور مجدداً در ۸۰ درجه سانتی گراد راه اندازی شد، فشار بخار تعادلی، بایستی در حدود $38 KN/m^2$ باشد و همچنین رطوبت متناظر با آن در روغن (با سرعت تبخیر کم در هوا) بایستی میزان $320ppm$ بوده و نزدیک بهمین حد باقی بماند. در حالت خارج از سرویس بودن ترانسفورماتور و در حال سرد شدن آن تا دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، آب بایستی از محلول خارج شود. چون در فشار بخار اشباع در ۲۰ درجه سانتی گراد (مقیاس بالای شکل ۴-۲). میزان رطوبت در محلول در تعادل با آب، بایستی فقط $45ppm$ باشد. این آب بصورت قطرات ریز و معلق بوده و قبل از بکارگیری مجدد ترانسفورماتور، بایستی ته نشین شده و یا بوسیله کاغذ جذب



شکل (۲-۴) - منحنی میزان آب موجود بر حسب فشار بخار آب برای یک نمونه کاغذ و یک نمونه روغن در دماهای مختلف

شرایط تعادل بوسیله نقاطی با فشار بخار یکسان مشخص شده است. بالاترین مقیاس افقی دمایی را نشان می دهد، که در این دما مقدار فشار بخار اشباع آب بطور عمودی در زیر پائین ترین مقیاس مشخص شده است. رطوبت نسبی هوا در ۲۰ درجه سانتی گراد (که دارای یک فشار جزئی آب نشان داده شده در مقیاس پائین می باشد)، نیز در بالای گراف نشان داده شده است.

از طرف دیگر، اگر ترانسفورماتور تحت بار در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به یک خشک کن کمکی (که میزان رطوبت روغن را در حد 35ppm نگه می دارد). مجهز شود، کاغذ بتدریج خشک شده تا میزان رطوبت آن به یک درصد برسد. در رابطه با مطالعات *Norris* در سال ۱۹۶۳، میزان آب موجود در کاغذ بکار رفته در ترانسفورماتور قدرت در حال کار بصورت عادی، ۲ درصد و در روغن آن $10-20\text{ppm}$ خواهد بود. در رابطه با شکل (۲-۴) این مقدار بایستی با فشار بخار آب (در حدود $1/3\text{KN/m}^2$) در

دمای ۵۰ درجه سانتی گراد ترانسفورماتور، متناظر بوده و همچنین در تعادل با یک رطوبت خارجی بمیزان ۱۰۰-۵۰ درصد، در دماهای معمولی باشد.

۴-۷-۲- پارامترهای موثر بر استقامت در مقابل شکست عایقی:

تحت شرایط بهینه آزمایشگاهی، ممکن است میزان استقامت الکتریکی روغن در مقابل جریان برق $D.C$ و جریان برق $A.C$ با فرکانس $50 Hz$ ، به حدود $100 Kv/mm$ نیز برسد و وقتی آزمایش با روش استاندارد انجام می شود، روغنهای مرغوب مورد استفاده در کابل ها، معمولاً استقامتی بمیزان $50 Kv/mm$ از خود نشان می دهند. روغنهای مورد استفاده در کلیدها و ترانسفورماتورها با داشتن استقامتی حداقل حدود $10 kv(r.m.s)/mm$ در مقابل فرکانس $50 Hz$ مشخص می شوند، که با استفاده از یک روغن تازه، این مقدار به ۲ یا ۳ برابر نیز می رسد.

مطابق با نظرات *Goswami* و *Anacrer* و *ward* در سال ۱۹۷۰ مقاومت در مقابل شکست عایقی برای روغن های ترانسفورماتور، در فرکانسهای $50-1000 Hz$ ، در یک مقدار ثابت باقی می ماند.

بخوبی مشخص شده است که شکست عایقی در روغن، اغلب از شناور شدن ذرات (مخصوصاً الیاف سلولزی) ناشی می شود. این ذرات بداخل قویترین ناحیه میدان کشیده شده، تا اینکه دسته ها یا پلی (*bridge*) از ذرات را تشکیل می دهند، که اگر روغن بخوبی خشک نشده باشد. احتمالاً حاوی رطوبت بوده و بتدریج رسانا می شوند. بکار بردن موانعی از جنس چوب فشرده، در دستگاه فشار قوی و غوطه ور در روغن. به جلوگیری از شروع شکست عایقی توسط ذرات شناور، کمک می کند، اگر چه یک محاسبه کمی رضایت بخش از اثرات ذرات یا جلوگیری از این اثرات توسط موانع، وجود ندارد.

اثرات ترکیبی رطوبت و ذرات معلق در شکل (۵-۲) مشخص شده، که توسط *Binggeli* در سال ۱۹۶۶ بررسی گردیده است. منحنی بالاتر نشان می دهد که یک روغن فیلتر شده، زمانیکه رطوبت آن بالغ بر $20-30 ppm$ نشود، بطور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر رطوبت قرار نمی گیرد، و مقدار ذکر شده احتمالاً حد حلالیت می باشد. برعکس استقامت روغن حاوی $50 ppm$ ذرات جامد، وقتی میزان

رطوبتش از $5ppm$ بیشتر می شود، بطور یکنواخت کاهش یافته، و در رطوبت های بیشتر، این کاهش شدت بیشتری پیدا می کند. شکل (۴-۲) نشان می دهد که میزان آب موجود در سلولز، برای روغن بمیزان $30ppm$ در دمای اتاق، چند درصد می باشد و گمان می رود که نفوذ پذیری یا هدایت زیاد بوجود آمده، تمایل ذرات را برای حرکت بداخل محدوده قوی میدان، بیشتر کرده و وقتی ذرات به چنین محدوده ای برسند، تمایل بیشتری برای ایجاد شکست عایقی از خود نشان می دهند.

۵-۷-۲- نفوذ پذیری و افت دی الکتریک:

نفوذ پذیری نسبی روغنهای تصفیه شده در دمای اتاق در محدوده $2/3 - 2/1$ می باشد. ضریب تلفات (*oss tangent*) در فرکانس $50Hz$ و در دمای اتاق، می تواند تا میزان 10^{-5} کاهش یافته و در روغنهای مرغوب بکار رفته در کابل، نبایستی بالغ بر 5×10^{-5} در دمای اتاق، و بیشتر از 3×10^{-3} در دمای 100 درجه سانتی گراد بشود.

(i) روغن خالص حاوی تقریباً $55ppm$ ناخالصی های جامد

(ii) همان روغن پس از دو بار گذشتن از یک فیلتر از نوع *fritted glass*

Bartnikas در سال ۱۹۶۷ میزان نفوذ پذیری و تلفات را با استفاده از دامنه وسیعی از فرکانس و دما، در ۵ نمونه روغن معدنی بطور کامل مطالعه نموده و در این رابطه نتایجی را بدست آورد. او در چهار نمونه روغن، با میزان آروماتیک قابل توجه، متوجه شد که در یک مکانیسم *relaxation* در فرکانسهای $10^7 - 10^8 Hz$ و در دماهای معمولی، وجود دارد. که به سمت فرکانسهای قدرت در دماهای $50 - 60$ درجه سانتی گراد در حرکت است. چنین مکانیسمی به احتمال قوی به چرخش مولکولی دو قطبی (که اندازه چرخش متناسب با میزان آروماتیک بود) نسبت داده شد. (یک مولکول هیدروکربور غیر متقارن آروماتیک، مانند یک مولکول آلیفاتیک با باند دوگانه ای که بطور نامتقارن قرار گرفته، دارای گشتاور قطبی ناچیزی می باشد). همچنین او دریافت که در همین ۴ نمونه روغن و در دمای 90 درجه سانتی گراد، یک هدایت *a.c* با فرکانس پائین و مستقل از فرکانس وجود

دارد که احتمالاً یک هدایت یونی مستقیم بوده و اندازه آن متناسب با میزان آروماتیک موجود، در روغن می باشد. با افزون نفتنات کلسیم میزان هدایت، افزایش یافته و فرض می شود (فرض همراه با تردید) که تفکیک یونی بطور کامل در نمک، صورت گرفته باشد. با این شرایط، او برای یون ها در دمای معمولی و در مایعی با ویسکوزیته $9cp$ تحرکی معادلی با $2 \times 10^{-9} m/vs$ بدست آورد.

پنجمین روغن که عاری از آروماتیک بود، در دماهای کمتر از ۲۷ درجه سانتی گراد. تلفاتی قابل ملاحظه ($0.001 - 0.003$) بیار آورد. در دمای $90^{\circ}C$ و در فرکانس پائین هدایت تقریباً مستقل از فرکانس بوده و از میزان هدایت در روغن های حاوی آروماتیک کمتر بود.

همچنین *Bartnikas* اثر افزایش تنش الکتریکی، بمیزان بالاتر از $7Kv/mm$ را، بر روی ضریب تلفات فرکانس قدرت دو نوع روغن (باید بدون افزودن نفتنات کلسیم) در دماهای حدود ۲۵ درجه و ۸۵ درجه سانتی گراد مشاهده کرد، میزان افزایش برای روغن های با بالاترین ویسکوزیته ۲ تا ۲/۵ برابر، و برای روغن های با کمترین ویسکوزیته، بیش از ۵ برابر بود.

رطوبت، اکسیداسیون، آلودگی یا تصفیه ناقص، همیشه باعث افزایش ضریب تلفات می شوند، ولی نمی توان انتظار داشت که هر یک از این کمیت ها توسط یک رابطه خاص، با ضریب تلفات مربوط باشند. بنظر می رسد، هر کوششی برای ارتباط سیستماتیک خواص الکتریکی با عدد اسیدی یا میزان رطوبت روغن ها، مگر در زمینه ای کاملاً محدود، محکوم به شکست است.

بخش دوم:

فیزیک عایقها

تمامی اجسام دارای قابلیت هدایت الکتریکی هستند؛ بنابراین از این لحاظ، تفاوتی اصلی بین عایقها و هادیها نیست. عامل مبین در شناسایی عایقها و هادیها تنها در کیفیت هدایت الکتریکی آنهاست. هدایت الکتریکی در اجسام عبارت است از انتقال بار الکتریکی این انتقال خود به دو طریق می تواند انجام گیرد:

(۱) به وسیله الکترونها، و در این حال فقط بار الکتریکی انتقال می یابد. (از جرم بسیار کوچک الکترون چشم پوشی شود).

(۲) به وسیله یون ها که در این حال انتقال بار الکتریکی و انتقال جرم هر دو انجام می پذیرد. در به وجود آمدن و تشکیل چنین ذره ای حاوی بار الکتریکی به دو طریقه متفاوت از هم برمی خوریم:

- یونیزاسیون : در یونیزاسیون، اتم خنثی به یک ذره با بار مثبت (یون) و ذره و یا ذره هایی با بار منفی (الکترون) تقسیم می شود. این الکترون که از پیوند اتمی جدا شده است، می تواند در مواردی بر روی اتم دیگر قرار گرفته و از این راه یونی منفی پدید آورد.

- دیسوسیاسیون: تشکیل ذره های باردار از طریق دیسوسیاسیون در محلولها امکان پذیر است با عمل دیسوسیاسیون، مولکول خنثی را به ذرات باردار تبدیل می کنیم. در اینجا قبول می کنیم که میدان الکتریکی ابتدا مولکول را تقسیم می کند، و اتمها یا گروهی از اتمهای صاحب بار الکتریکی پدید می آید که جریانی که در الکتروولت موجب می شود.

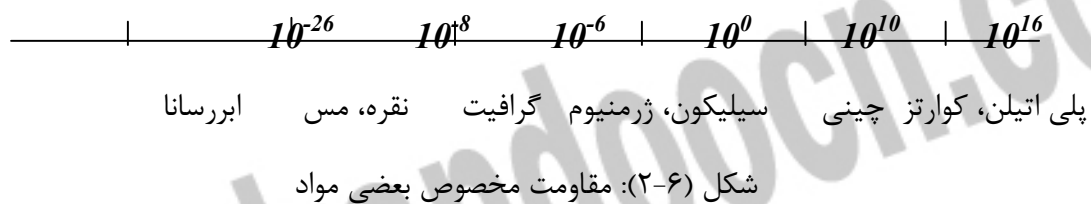
۸-۲- مقاومت مخصوص:

مقاومت مخصوص یکی از خواص مهم عایق می باشد. در حقیقت وجه تمایز بین عایق و هادی مقاومت مخصوص ماده است. عایقهای الکتریکی نیز مانند هادی ها، دارای قابلیت هدایت الکتریکی کمی می باشند. قابلیت هدایت الکتریکی در مواد به دلیل حرکت الکترون ها و یا یون ها در داخل ماده می باشد.

دلیل وجود قابلیت هدایت الکتریکی در مواد مختلف، بسته به جنس آن و اینکه آن ماده بصورت گاز، مایع و یا جامد باشد متفاوت است. در مایعات یون های مثبت و منفی و الکترون ها می توانند حرکت نمایند. در جامدات حرکت الکترون ها باعث ایجاد جریان الکتریکی می گردد.

دلیل به وجود آمدن یون ها و الکترون های آزاد در مواد متفاوت است و در این جا از ذکر آن خودداری می شود. آنچه قابل ذکر است اینکه وجود رطوبت و آلودگی در مواد عایق، قابلیت هدایت الکتریکی آنها را بشدت بالا می برد و احتراز از این عوامل برای عایقها ضروری است.

مقاومت مخصوص بعضی مواد عایق، از جمله کوارتز و پلی اتیلن به 10^{16} اهم متر می رسد. در حالیکه مقاومت مخصوص مس در ۲۰ درجه سانتی گراد برابر 1.75×10^{-8} اهم متر است. یعنی مقاومت مخصوص مس در حدود 10^{-24} برابر مقاومت مخصوص عایقها می باشد. شکل (۶-۲) مقاومت مخصوص چند ماده را نشان می دهد.



۱-۸-۲- قابلیت هدایت الکتریکی در عایق:

در عایق های مایع جریان الکتریکی به دلیل وجود یون های مثبت و منفی می باشد. الکترون ها نقش کوچکی را در این مورد برعهده دارند. زیرا الکترون ها با یون های مثبت ترکیب شده یون را خنثی می کنند و یا آنکه مولکول های مایع جمع شده آن را تبدیل به یون منفی می نمایند. لذا تعداد الکترون ها در واحد حجم عایق مایع قابل توجه نیست.

در میدان الکتریکی دائم، اگر سرعت حرکت یون برابر v و بار الکتریکی آن q و تعداد یون ها در واحد حجم برابر n باشد، برای چگالی سطحی جریان الکتریکی می توان نوشت:

$$J = nqv \quad (2-1)$$

سرعت یون بستگی به شدت میدان الکتریکی E و ضربی که آنرا تحرک گویند، دارد. تحرک، نسبت سرعت متوسط یون تقسیم بر شدت میدان الکتریکی است. اگر b تحرک باشد داریم:

$$b = v/E \quad (2-2)$$

و لذا برای چگالی سطحی جریان می توان نوشت:

$$J = nqbE \quad (2-3)$$

تحرک یون در مایع بستگی معکوس با غلظت آن مایع η و شعاع یون r و بستگی مستقیم با بار الکتریکی یون دارد.

$$b = q/6\pi\eta r \quad (2-4)$$

در صورتی که یون های مثبت و منفی دارای تحرک های مختلف باشند و یا تعداد آنها در واحدهای حجم برابر نباشد، باید روابط بالا را برای یون های مثبت و منفی جداگانه نوشت و چگالی سطحی جریان را از مجموع چگالی سطحی ناشی از یون های مثبت و منفی بدست آورد. مقاومت مخصوص ماده را می توان از روابط بالا بدست آورد و نوشت:

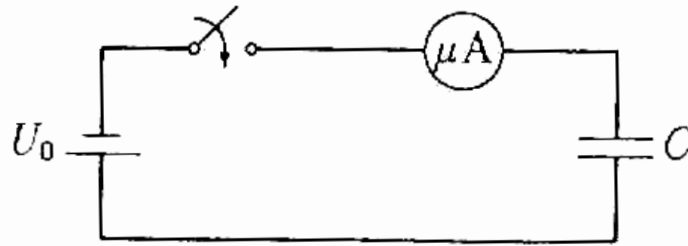
$$\rho = 1/qnb \quad (2-5)$$

و یا برعکس ضریب قابلیت هدایت الکتریکی ماده برابر است با:

$$\sigma = qnb \quad (2-6)$$

در فلزات مقادیر b و n بزرگ هستند. لذا قابلیت هدایت الکتریکی فلزات بزرگ می باشد. در آب با اضافه کردن نمک یا اسید (ناخالصی) یون های مثبت و منفی بوجود می آیند که باعث می شوند. مقاومت مخصوص آب پائین بیاید. در عایق هاد تعداد بارهای الکتریکی که بتوانند حرکت کنند بسیار محدود است و اگر تعدادی بار الکتریکی آزاد نیز وجود داشته باشند. سرعت بوجود آمدن بارهای جدید بسیار کم است.

آزمایش: در یک آزمایش مطابق شکل (۲-۷) یک خازن با عایق از جنس رزین اپوکسید را از طریق یک آمپر متر که قادر به اندازه گیری مقادیر بسیار کم جریان باشد، به یک منبع ولتاژ دائم ثابت وصل می کنیم. پس از وصل کلید جریان را خوانده و ثبت می نمائیم این عمل برای مدت طولانی انجام می دهیم.

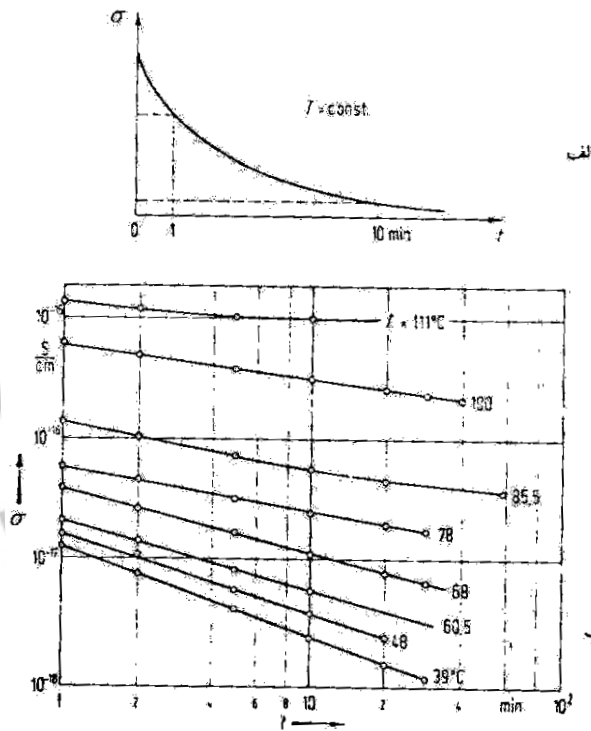


شکل (۲-۷): اندازه گیری جریان الکتریکی در یک عایق و تعیین قابلیت هدایت الکتریکی

نتیجه کلی آزمایش در شکل (۲-۸ الف) رسم شده است در این شکل با توجه به ابعاد خازن، ضریب قابلیت هدایت الکتریکی σ عایق محاسبه و ضبط شده است. از این شکل مشخص می گردد که قابلیت هدایت الکتریکی عایق بستگی به زمان دارد. درجه حرارت عایق نیز در قابلیت هدایت الکتریکی عایق نقش دارد. لذا در شکل (۲-۸ ب) قابلیت هدایت الکتریکی رزین اپوکسید برای درجه حرارت های مختلف بر حسب زمان رسم شده است. باید دقت داشت که در این شکل محور زمان لگاریتمی می باشد. نه تنها رزین اپوکسید بلکه تمام عایق های الکتریکی کم و بیش دارای همین رفتار می باشد.

در لحظه صفر، پس از وصل کلید، جریان زیادی برای شارژ کردن خازن از مدار عبور می نماید اما این جریان، مورد توجه ما نیست. مدت عبور جریان برای شارژ خازن بسیار کوتاه است اگر ظرفیت خازن برابر C و مقاومت مدار برابر R باشد، جریان شارژ خازن از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$i(t) = \frac{U}{R} e^{-t/\tau} \quad (2-7)$$



شکل (۸-۲): (الف) حالت کلی تغییرات ضریب قابلیت هدایت الکتریکی ماده عایق برحسب زمان و (ب)

برای رزین اپوکسید برحسب زمان برای درجه حرارت های روشن

در صورتی که ظرفیت C برابر ۱ میکروفاراد و مقاومت مدار ۱۰۰ کیلو اهم باشد، ثابت زمانی τ برابر ۰/۱ ثانیه می شود. در نتیجه پس از گذشت ۱۰ ثانیه مقدار جریان، با فرض آنکه ولتاژ منبع یک کیلوولت باشد، کمتر از 10^{-45} آمپر می شود که البته قابل اندازه گیری نیست. بنابراین جریانی که بعد از گذشت ۱۰ ثانیه از وصل کلید اندازه گیری شود به قابلیت هدایت الکتریکی عایق مربوط است. نکته جالب توجه آنکه جریان برحسب زمان تغییر می نماید و مدت زمان طولانی لازم است تا جریان به مقدار ثابتی برسد. این مدت گاهی به یک ساعت و حتی چندین روز می رسد.

در حقیقت پولاریزاسیون و جهت گرفتن دو قطبی ها، مانند عبور جریان است. ولی مدتی طول می کشد تا همه دو قطبی ها در جهت میدان قرار بگیرند. پولاریزاسیون الکترونی یعنی جابجا شدن مرکز

ثقل بارهای مثبت و منفی اتم ها و یا مولکول ها به زمان بسیار کوتاه احتیاج دارد و در حدود 10^{-12} ثانیه و کمتر طول می کشد. ولی پولاریزاسیون جهتی، یعنی تغییر جهت دادن مولکول هایی که از قبل دو قطبی بوده اند، زمان بیشتری لازم دارد و ممکن است به چند ساعت برسد.

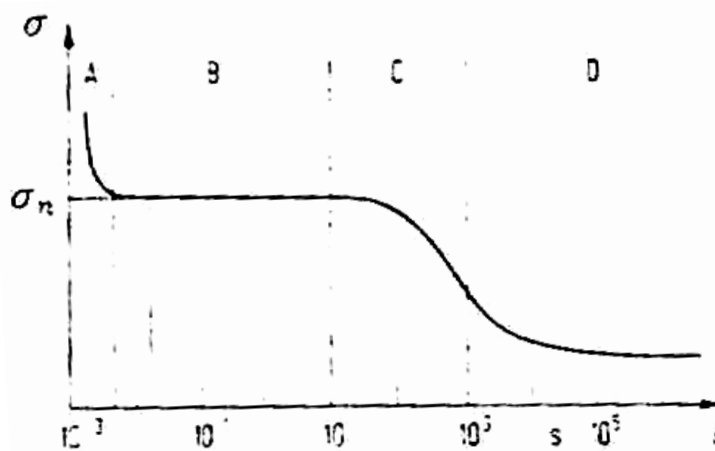
نوعی پولاریزاسیون وجود دارد که ناشی از غیر همگن بودن ماده عایق است. این نوع پولاریزاسیون نیز مانند عبور جریانی است که البته در طول زمان از شدت آن کاسته می شود. ثابت زمانی این جریان بسیار طولانی است. در این حالت بارهای الکتریکی، قسمتی از عایق با قابلیت هدایت الکتریکی بهتر را می پیمایند و در فصل مشترک عایق دیگری که قابلیت هدایت الکتریکی کمتری دارد جمع می شوند. این عمل زمان بیشتری لازم دارد و ممکن است چندین روز طول بکشد.

همچنین ممکن است الکترون ها از کاتد به داخل عایق نفوذ کرده ولی در اطراف کاتد گردآمده و به حرکت خود ادامه ندهند. ممکن است تعدادی الکترون از عایق به سوی آند رفته اما الکترون های جدیدی از داخل عایق جانشین آنها نشوند در نتیجه بارهای الکتریکی منفی در اطراف کاتد و بارهای الکتریکی مثبت در اطراف آند جمع می شوند و این پدیده نیز به معنی عبور جریان است. از شدت جریان نیز به تدریج کاسته می شود. قسمتی از جریان که در حقیقت ناشی از عبور بارالکتریکی از یک جوشن خازن به جوشن دیگر است. قابلیت هدایت الکتریکی عایق را تشکیل می دهد. ولی اندازه گیری این جریان زمان طولانی لازم دارد.

در اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق یا عکس آن یعنی ضریب قابلیت هدایت الکتریکی، مطابق شکل (۸-۲) زمان و درجه حرارت اهمیت دارند. کمیات دیگری نظیر شدت میدان الکتریکی و میزان رطوبت و غیره نیز دارای اهمیت هستند. لذا برای اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق نیز باید دقیقاً روش توصیه شده استاندارد را نیز ضمیمه نتیجه اندازه گیری نمود. تنها در این صورت است که اندازه گیری مجدد توسط فردی برای یک نوع عایق معین به نتیجه مشابه می رسد.

قابلیت هدایت الکتریکی مواد مختلف برحسب زمان متفاوت است شکل (۹-۲) تغییرات ضریب قابلیت

هدایت الکتریکی یک عایق مایع را برحسب زمان نشان می دهد. در قسمت A پولاریزاسیون از نوع جهتی است. پولاریزاسیون جهتی در عایق مایع خیلی بسرعت انجام می گیرد. زیرا مولکول ها به آسانی می توانند در جای خود بچرخند. در قسمت B یون های موجود در مایع عامل بوجود آمدن قابلیت هدایت الکتریکی عایق می باشند. در صورتی که قابلیت هدایت الکتریکی با ولتاژ متناوب و با فرکانس ۵۰ هرتس اندازه گیری شود، مقدار آن در محدوده B می باشد.



شکل (۲-۹) : تغییرات ضریب هدایت الکتریکی یک عایق مایع برحسب زمان

در شکل (۲-۹) این مقدار با σ_n نمایش داده شده است. در قسمت C از شدت جریان کاسته می شود. دلیل آن کم شدن یون ها در مایع است. همچنین تجمع یون ها در اطراف الکترون ها باعث کم شدن شدت جریان می گردد. در حقیقت علت بوجود آمدن یون در عایق متفاوت است. اگر میدان الکتریکی بر روی یون ها اثر نگذارد، آنها آزادانه در حرکت خواهند بود. گاهی یون های با علامت مختلف به یکدیگر برخورد کرده با هم تبادل بار می کنند و به صورت مولکول خنثی در می آیند.

تعداد یون ها در واحد حجم بستگی به تعداد یون هایی که در واحد زمان بوجود می آیند و نیز عمر متوسط آنها قبل از آنکه به دلیل برخورد با یون مخالف خنثی گردند دارد. ولی اگر میدان الکتریکی بر روی یون ها اثر بگذارد، آنها در جهت میدان حرکت در می آیند و لذا پس از مدتی از تعداد یون ها در

واحد حجم کاسته می شود. بنابراین از قابلیت هدایت الکتریکی ماده نیز کاسته می شود.

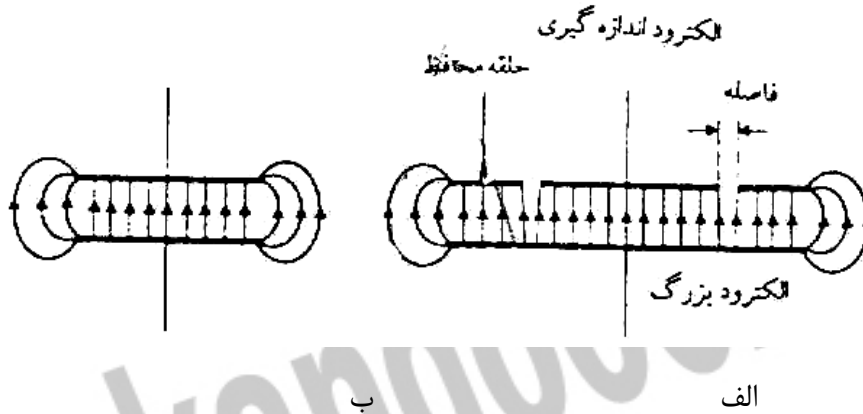
در قسمت **D** تنها آن تعداد از یون ها که در واحد زمان بوجود می آیند. به الکترودها می رسند و پیش از آن هیچ یونی در این قسمت وجود نداشته است. در نتیجه قابلیت هدایت الکتریکی ماده کاهش می یابد.

قابلیت هدایت الکتریکی عایق های مایع بستگی به عوامل مختلف از جمله حرارت و شدت میدان الکتریکی دارد با افزایش درجه حرارت این قابلیت افزایش می یابد. همچنین اگر شدت میدان از حد معینی بیشتر شود، قابلیت هدایت الکتریکی عایق افزایش یافته و در نهایت به هادی تبدیل می گردد.

۹-۲- اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق:

برای اندازه گیری ضریب مقاومت مخصوص باید دو جریان عمقی و سطحی را از یکدیگر جدا نمود. همچنین لازم است فقط قسمتی از جریان عمقی که به صورت یکنواخت از عایق عبور می کند، اندازه گیری شود. برای این منظور از خازن با حلقه محافظ استفاده می شود. شکل (۱۰-۲) دو خازن صفحه ای را نشان می دهد. یکی از این دو دارای حلقه محافظ و دیگری بدون حلقه محافظ است. خازن با حلقه محافظ دارای سه الکتروده است. یکی از الکترودها بزرگتر است و مطابق شکل (۱۱-۲) مستقیماً به یک سر منبع ولتاژ وصل می گردد. الکتروده دیگر کوچکتر است و از طریق دستگاه اندازه گیری جریان به سر دیگر منبع ولتاژ وصل می گردد. الکتروده سوم که به شکل حلقه می باشد، به فاصله کمی از الکتروده کوچکتر قرار گرفته و با آن هم پتانسیل می باشد و جریان آن از دستگاه اندازه گیری عبور نمی نماید. این الکتروده را الکتروده محافظ یا حلقه محافظ می خوانند.

جریان سطحی و قسمتی از جریان عمقی که به صورت غیریکنواخت از عمق عایق می گذرد و از الکتروده محافظ عبور می نماید، اندازه گیری نمی شود. بین الکتروده کوچک که دستگاه اندازه گیری جریان به آن وصل است و الکتروده محافظ، جریان عبور نمی کند. زیرا این دو الکتروده هم پتانسیل هستند.

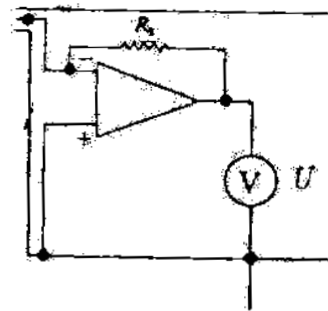
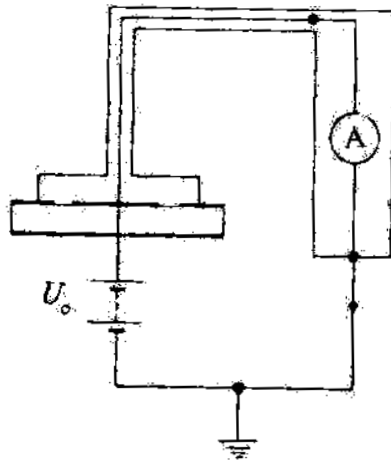


شکل (۱۰-۲): الف) خازن صفحه ای با حلقه محافظ ب) بدون حلقه محافظ

دستگاه اندازه گیری مستقیماً می تواند مقدار مقاومت را نشان دهد. مقدار مقاومت مخصوص از رابطه معروف زیر بدست می آید.

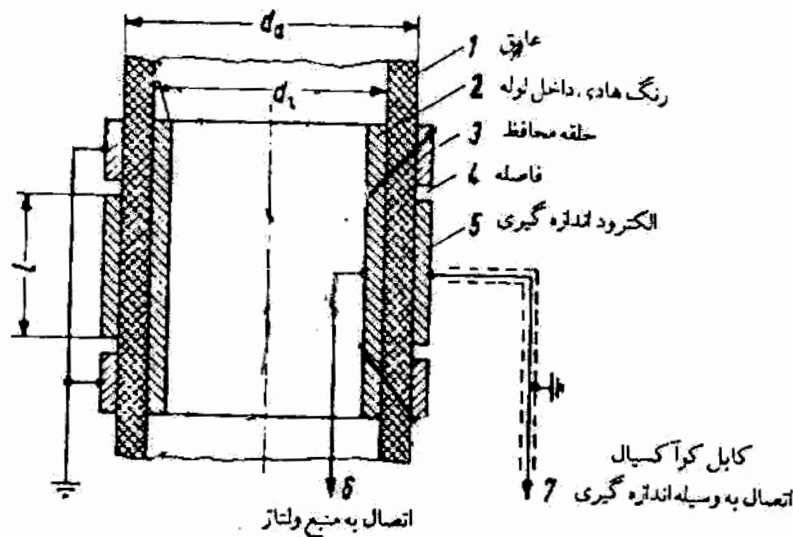
$$R = \rho l / A$$

در این رابطه d ضخامت عایق، A سطح الکتروود کوچکتر، ρ مقاومت مخصوص عمقی عایق و R مقاومت اندازه گیری شده می باشد. دستگاه اندازه گیری مقاومت باید بتواند مقاومت های خیلی بزرگ را اندازه گیری نماید. به عنوان نمونه سطح A در یک نوع از دستگاه ۱۰ سانتی متر مربع است. حال اگر ضخامت عایق ۲ میلیمتر و مقاومت مخصوص آن 10^{12} اهم متر می باشد، دستگاه اندازه گیری باید بتواند مقاومت 4×10^{12} اهم را اندازه بگیرد.

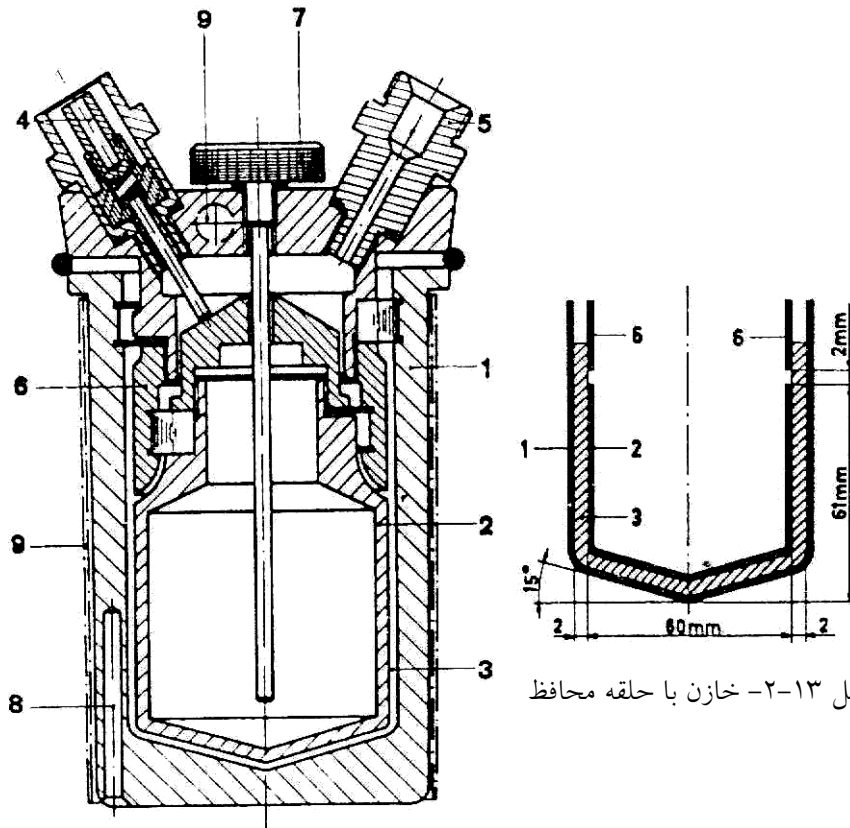


$$R_x = R_s \frac{U_0}{U}$$

شکل (۲-۱۱): خازن صفحه ای با حلقه محافظ در مدار اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق و استفاده از تقویت کننده عملیاتی برای تعیین مقاومت بدن افت ولتاژ. در حالت اخیر مدار سمت راست به جای آمپر متر قرار می گیرد.



شکل (۲-۱۲): روش اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق که به صورت لوله ساخته شده است. برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی عایقی که به صورت لوله ساخته شده باشد می توان مطابق شکل (۲-۱۲) عمل نمود. در داخل لوله یک رنگ هادی زده شده است. در خارج لوله به طول l نیز رنگ هادی زده شده است. در دو طرف این رنگ و به فاصله کمی از آن، دو حلقه محافظ با کمک رنگ هادی بوجود آورده شده است و مطابق مدار شکل (۲-۱۱) اندازه گیری انجام می گیرد. حلقه های محافظ در اینجا نیز باعث جلوگیری از اثر میدان های غیر یکنواخت و جریان سطحی می گردد.



شکل ۱۳-۲- خازن با حلقه محافظ

شکل (۱۴-۲): دستگاه خازن با حلقه محافظ برای اندازه گیری مشخصات عایق های مایع

(۱) الکتروود فشار قوی (۲) الکتروود اندازه گیری (۳) نمونه روغن (۴) محل اتصال کابل به الکتروود اندازه

گیری (۵) محل اتصال به پمپ خلاء (۶) الکتروود محافظ (۷) وسیله اندازه گیری درجه حرارت (۸) سنسور

(۹) *Pt 100* وسیله گرم کردن

رنگ هادی را از پودر نقره یا از پودر گرافیت همراه با چسب می سازند. در صورت نیاز و در دسترس

نبودن پودر گرافیت، می توان مغز مداد مشکی را کوبید و از پارچه عبور داد تا پودر کاملاً نرمی بدست

آید. بعد از مخلوط کردن پودر با لاک یا چسب، رنگ هادی حاصل می شود. پس از اینکه رنگ بر روی

سطح عایق زده شد و کاملاً خشک گردید، مقاومت بین نقاط مختلف آن را می توان اندازه گیری کرده و

از کیفیت آن اطمینان حاصل نمود.

۱-۹-۲- اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق های مایع:

برای اندازه گیری مقاومت مخصوص عایق های مایع نیز به صورت مشابه عمل می شود. ولی مطابق شکل (۱۳-۲) خازن با حلقه محافظ به صورت یک ظرف است که عایق مایع در آن ریخته می شود. مشکلی که در اینجا وجود دارد این است که مقادیر d و A مشخص نیستند. در اینجا می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$RC = \rho \varepsilon \quad (2-9)$$

در یک خازن که بین دو جوشن آن عایقی با ضریب دی الکتریک ε و مقاومت مخصوص ρ قرار داشته باشد، حاصلضرب مقاومت عایق R در ظرفیت خازن C برابر $\rho \varepsilon$ است. اثبات این رابطه برای خازن های صفحه ای با میدان یکنواخت ساده است. از یکسو ظرفیت و از طرف دیگر مقاومت را حساب کرده در هم ضرب می کنیم:

$$RC = \rho \frac{d}{A} \varepsilon \frac{A}{d} = \rho \varepsilon$$

البته باید دقت داشت که ε حاصلضرب $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ است. با در دست داشتن مقادیر R ، C و ε_r و با توجه به مقدار ε_0 می توان مقاومت مخصوص ρ را حساب کرد.

خازن با حلقه محافظ برای اندازه گیری ضریب تلفات عایقی یا $\tan \delta$ و عدد دی الکتریک یعنی ε_r نیز بکار می رود که در قسمت های بعدی بحث خواهد شد.

۲-۹-۲- تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی عایق بر حسب زمان:

قابلیت هدایت الکتریکی عایق های مایع بر حسب زمان تغییر می نماید. در شکل (۲-۹) تغییرات ضریب هدایت الکتریکی یک نوع روغن عایق بر حسب زمان نشان داده و در مورد دلیل این تغییرات صحبت شد. از این شکل مشخص می شود که قابلیت هدایت الکتریکی این عایق پس از یک روز یا ۸۶۴۰۰ ثانیه همچنان در حال تغییر است. لذا در ذکر ضریب هدایت الکتریکی و یا مقاومت مخصوص عایق باید لحظه اندازه گیری ذکر شود.

در این شکل جریانی که در لحظات اولیه پس از وصل کلید، از خازن عبور می نماید، جریان شارژ خازن

بوده و ارتباطی با عایق ندارد. لذا این جریان مطرح نیست. در حالت مانا مقدار جریان بستگی به تعداد یون های مثبت و منفی دارد که در واحد زمان به وجود می آیند. عمل تجزیه مایع به یون های مثبت و منفی را دیسوسیاسیون گویند.

۳-۹-۲- تغییر قابلیت هدایت الکتریکی عایق مایع با درجه حرارت:

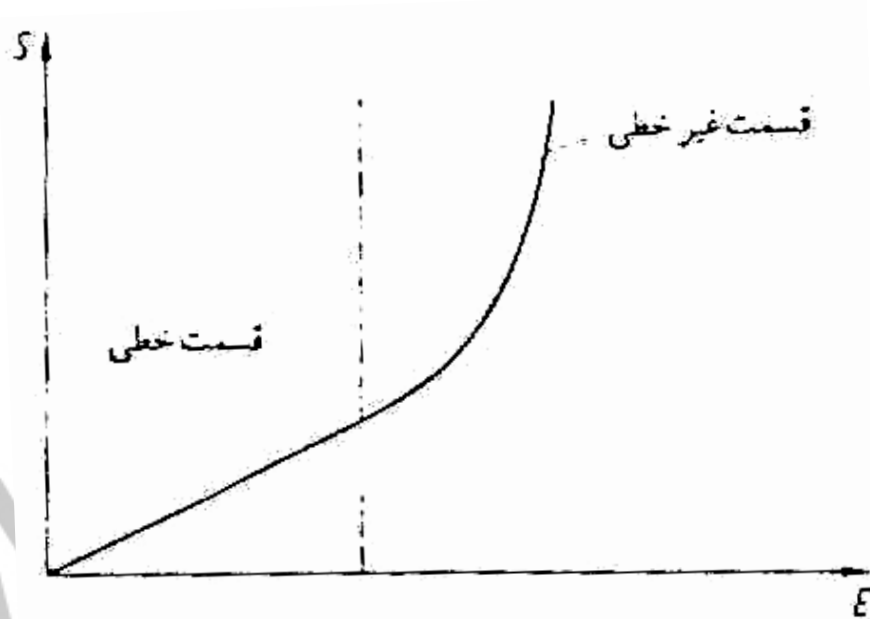
با افزایش درجه حرارت، تعداد یون های بوجود آمده در واحد زمان افزایش می یابد. در نتیجه تمرکز یون ها نیز افزایش می یابد. از طرف دیگر ویسکوزیته مایع تغییر می کند و مایع روان تر می شود. در نتیجه یون ها راحت تر می توانند حرکت کنند و قابلیت هدایت الکتریکی مایع افزایش می یابد. برای تغییرات درجه حرارت در محدوده کم، می توان از رابطه زیر تغییر قابلیت هدایت الکتریکی مایع را برحسب درجه حرارت به دست آورد.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-F/KT} \quad (2-11)$$

در این رابطه T درجه حرارت مطلق، K ثابت بولتزمن و σ_0 و F به نوع مایع بستگی دارند. رابطه (۱۱)-۲ در محدوده ای از شدت میدان الکتریکی صادق است که مقاومت مخصوص (یا قابلیت هدایت الکتریکی) به شدت میدان الکتریکی بستگی نداشته باشد. این رابطه به نام فانت هوف خوانده می شود.

۴-۹-۲- تغییر قابلیت هدایت الکتریکی عایق مایع با شدت میدان الکتریکی:

قابلیت هدایت الکتریکی عایق مایع با بالا رفتن شدت میدان الکتریکی افزایش می یابد. شکل (۱۵)-۲ تغییر چگالی سطحی جریان الکتریکی را برحسب شدت میدان نشان می دهد.



شکل (۱۵-۲): تغییر چگالی سطحی جریان الکتریکی عایق مایع با شدت میدان الکتریکی

برای شدت میدان الکتریکی کم، رابطه چگالی سطحی جریان الکتریکی و شدت میدان الکتریکی خطی است. ولی اگر شدت میدان الکتریکی از حد معینی تجاوز کند چگالی سطحی جریان الکتریکی سریع تر از خطی بزرگ می شود. این افزایش جریان الکتریکی را ناشی از افزایش یون های مثبت و منفی در مایع می دانند. هر چه درجه حرارت بالاتر باشد، تبدیل از حالت خطی به حالت غیرخطی در شدت میدان الکتریکی کمتری انجام می گیرد. برای مثال در روغن ترانسفورماتور خشک با درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی گراد نقطه شروع غیر خطی شدن در ۲۰ کیلوولت بر سانتی متر است. در حالی که در درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی گراد اگر شدت میدان الکتریکی از ۸ کیلو ولت بر سانتی متر تجاوز کند، حالت غیر خطی پیش می آید.

۱۰-۲- استقامت الکتریکی عایق مایع:

مقصود از استقامت الکتریکی یک عایق، حداکثر شدت میدان الکتریکی است که آن عایق در شرایط

خاص تحمل می نماید. در صورتی که شدت میدان الکتریکی از این حد تجاوز نماید، در عایق شکست واقع می گردد. یعنی عایق تبدیل به هادی می شود. استقامت الکتریکی عایق بستگی به عوامل مختلف دارد. از جمله درجه حرارت عایق، شکل و علامت ولتاژ و مدت زمان اعمال آن، ضخامت عایق و رطوبت در میزان استقامت الکتریکی عایق موثر هستند.

از آن جا که استقامت الکتریکی به ضخامت عایق نیز بستگی دارد، مناسب است که ولتاژ شکست در هر مورد تعیین گردد. یعنی الکترودهای معین را در فاصله معینی از یکدیگر قرار می دهند و به آن ها نوع مشخص ولتاژ را اعمال می نمایند. ولتاژ را رفته رفته بالا می برند تا شکست واقع گردد. به این ترتیب ولتاژ شکست یک عایق معین در شرایط خاص به دست می آید. محاسبه و در نظر گرفتن شدت میدان الکتریکی در این حالت، یک کمیت کمکی است. لذا تعیین استقامت الکتریکی عایق در حقیقت از تعیین ولتاژ شکست شروع می شود و می بایست مطابق شرایطی کاملاً مشخص و معلوم انجام گیرد تا بتوان در زمان و مکان دیگر نیز همین جواب را به دست آورد.

برای اندازه گیری استقامت الکتریکی استانداردهایی تعیین شده اند و معمولاً این استانداردها برای نوع مشخص ماده می باشند، تا بتوان مرغوبیت آن ماده مشخص را تعیین نمود.

۱-۱۰-۲- ولتاژ شکست عایق مایع:

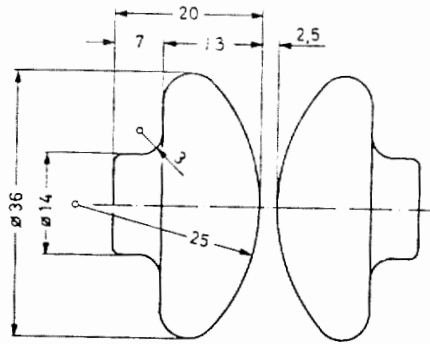
در مورد عایق های مایع، استانداردهای مختلف روش اندازه گیری ولتاژ شکست را تعیین نموده است. از جمله استانداردهای مربوط به تعیین ولتاژ شکست عایق مایع می توان از استانداردهای *ASTM D*

1816 ، *ASTM D 877* ، *VDE 0370* ، *IEC 156* نام برد.

دیده می شود که استاندارد *ASTM* دو روش مختلف را برای تعیین استقامت الکتریکی عایق مایع تدوین کرده است. لذا باید ذکر هر گونه نتیجه ای همراه با ذکر شماره استاندارد باشد.

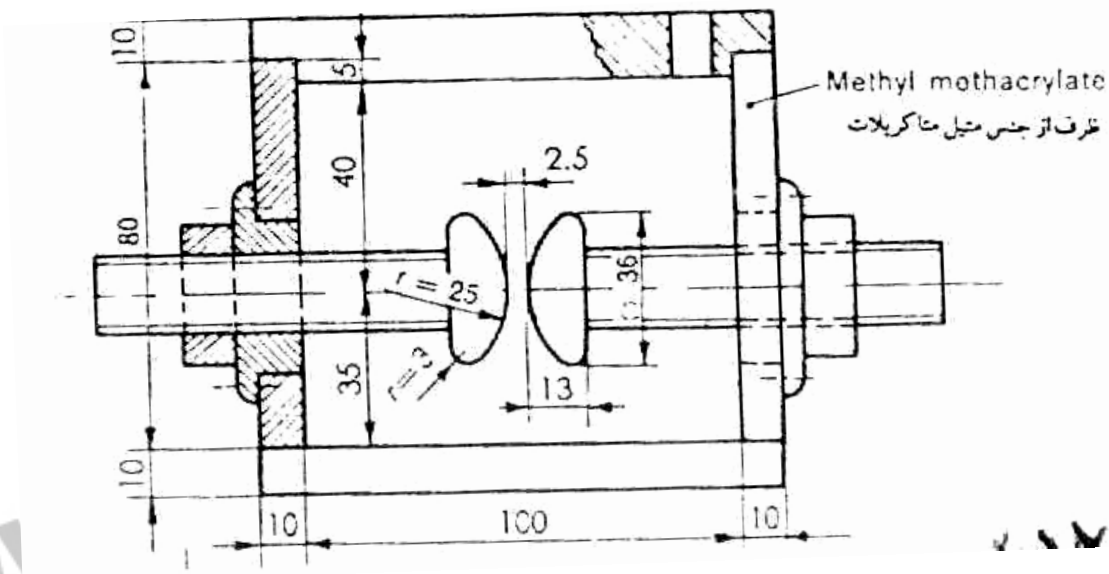
مطابق استاندارد *VDE 0307* الکترودها به صورت عرق چین کروی هستند که در فاصله ۲/۵ میلیمتر از یکدیگر قرار دارند. در تنظیم فاصله باید خطا کمتر از ۰/۰۵ میلیمتر باشد.

این الکترودها در *IEC 156* و *ASTM D 1816* نیز مورد استفاده قرار می گیرند و لذا به نام الکترودهای *VDE* خوانده می شوند. درجه حرارت روغن درجه حرارت اطلاق است یعنی در حدود ۲۰ درجه سانتی گراد و ولتاژ متناوب سینوسی شکل ۵۰ هرتس با سرعت 2KV/s افزایش داده می شود تا شکست واقع گردد. مقدار موثر ولتاژ شکست تعیین می گردد. بر روی هر نمونه عایق ۶ بار آزمایش با فواصل ۲ دقیقه انجام می گیرد. پس از هر بار آزمایش روغن در داخل ظرف به هم زده می شود تا روغن بین الکترودها عوض شود.



شکل (۱۶-۲): ابعاد الکترودهای عرق چین کروی برای تعیین ولتاژ شکست عایق مایع

پس از تکرار آزمایش، متوسط ولتاژ شکست تعیین و ذکر می گردد. اختلاف در ولتاژ شکست به وجود ذرات معلق و حباب های گاز بین الکترودها که اتفاقی است مربوط می شود.



شکل (۱۷-۲): الکترودهای عرق چین کروی و ظرف روغن برای تعیین ولتاژ شکست عایق مایع مطابق

استاندارد IEC 156

البته آزمایش وقتی انجام می شود که حباب های گاز از مایع خارج شده باشند. ولی به هر حال تعدادی حباب گاز بسیار کوچک در داخل روغن وجود دارند. در زیر دیگر نکات ذکر شده در استاندارد **VDE 0370** در مورد تعیین ولتاژ شکست عایق مایع ذکر می گردند:

در این استاندارد ابعاد ظرف و مشخصات منبع ولتاژ تعیین شده اند. قدرت ترانسفورماتور مولد فشار قوی باید حداقل ۲۵۰ ولت آمپر باشد. نقطه وسط سیم پیچ فشار قوی را می توان زمین کرد.

با کمک مقاومت مناسب و رله اضافه جریان باید جریان عبوری از محل قوس بین ۲۰ تا ۱۰۰ میلی آمپر محدود گردد و این جریان باید در مدت کمتر از ۰/۰۲ ثانیه قطع گردد. منبع ولتاژ باید به وسیله یک موتور به طور یکنواخت ولتاژ را با سرعت ۲ کیلو ولت بر ثانیه افزایش دهد. ولتاژ ورودی ترانسفورماتور فشار قوی به وسیله یک ولت متر (قاب گردان و یکسو کننده) با کلاس دقت حداقل ۱/۵ اندازه گیری می شود.

فاصله بین دو الکترودها با دو میله که قطر یکی ۲/۵۵ میلی متر و قطر دیگری ۲/۴۵ میلی متر است کنترل

می شود. به این ترتیب که میله ضخیم تر باید از وسط دو الکتروود عبور نکند و میله نازک تر باید از وسط دو الکتروود عبور نماید. ظرف روغن از جنس شیشه یا چینی یا پلاستیک مناسب است و جنس الکتروودها از مس می باشد. فاصله الکتروودها از دیواره ظرف باید حداقل ۱۵ میلیمتر و از سطح روغن حداقل ۱۰ میلیمتر باشد. قطر میله های رابط بین هر الکتروود و دیواره ظرف باید حداقل ۱۰ میلیمتر ضخامت داشته باشند. حجم روغن در ظرف نباید کمتر از ۲۵۰ سانتیمتر مکعب باشد. یک میله تمیز یا وسیله دیگر از شیشه یا چینی یا شیشه نشکن برای هم زدن روغن باید موجود باشد. پس از هر بار شکست به کمک این میله روغن همزده می شود. این کار می تواند با دست یا به صورت اتوماتیک به کمک یک موتور انجام شود.

ظرف روغن باید در حد امکان همیشه با روغن خشک پر باشد و یا در داخل کوره با درجه حرارت ۹۰ درجه سانتی گراد نگهداری شود. قبل از آزمایش ظرف با روغن مورد آزمایش شستشو می شود و بهتر است از شستشوی مکانیکی خودداری گردد. در مورد میله هم زن نیز همین مسأله صادق است روش نمونه برداری مهم است و اگر نکات لازم رعایت نشوند، نتیجه بدست آمده در موارد مختلف یکسان نخواهد بود. رعایت کامل دقت و نظافت باید انجام گیرد و از نفوذ گرد و غبار و رطوبت الیاف به روغن جلوگیری شود. محل نمونه برداری و وسایل کمکی همه باید قبل از نمونه گیری تمیز شوند و از پارچه هائی که پرز می دهند استفاده نگردد. برای حمل روغن لازم است از شیشه دهان گشاد مطابق استاندارد **DIN 12039** با ظرفیت حداقل ۱ لیتر استفاده شود. ظرف حمل روغن باید تمیز و خشک نگهداری شود و درب آن کاملاً محکم بسته باشد و قبل از نمونه برداری، با روغن مورد آزمایش شستشو شود.

اگر اطمینان از خشک بودن شیشه نیست باید قبل از نمونه برداری در کوره با درجه حرارت ۱۵۰ درجه سانتی گراد خشک و با روغن خشک شستشو داده شود. نمونه روغن باید در حد امکان از کف ظرف ترانسفورماتور برداشته شود. قبل از نمونه برداری باید حدود ۱۰ لیتر روغن از شیر نمونه برداری تخلیه

گردد تا روغن مستقیماً از محل بین دو اتصال کلید برداشته شود. نمونه روغن باید طوری در ظرف آزمایش ریخته شود که حباب هوا ایجاد ننماید. ظرف حمل روغن یا ظروف آزمایشی پر شده از روغن باید مدت کافی در اطاق آزمایش بماند تا درجه حرارت آن با درجه حرارت اطاق برابر گردد.

قبل از اعمال ولتاژ باید نمونه روغن در ظرف آزمایش ۱۰ دقیقه آرام باقی بماند. ولتاژ از مقدار صفر شروع شده با سرعت ۲ کیلوولت بر ثانیه افزایش داده می شود. ولتاژ در لحظه شکست قطع می گردد. شش آزمایش متوالی بر روی یک نمونه روغن (داخل ظرف آزمایش) انجام می گیرد. بعد از هر آزمایش روغن هم زده می شود تا روغن بین دو الکتروود تعویض گردد. اولین عدد اندازه گیری شده کنار گذاشته می شود و مقدار متوسط ۵ دقیقه است تا کلیه حباب های گاز از بین دو الکتروود و ظرف روغن خارج شده باشند. در استاندارد *ASTM D 877* الکتروودها به صورت دو استوانه با قطر ۱ اینچ (یا ۲۵ میلیمتر) و طول حداقل ۱/۸ اینچ (یا ۴۵ میلیمتر) می باشد. لبه های الکتروود پخ نشده است. فاصله دو الکتروود از یکدیگر 0.005 ± 0.01 اینچ یا 0.1 ± 0.25 میلیمتر می باشد.

به دلیل آنکه لبه های تیز الکتروودها ذرات معلق را جذب می نمایند گفته می شود که این روش برای روغن در حال کار دستگاه های فشار قوی مناسب می باشد. به هر حال این استاندارد برای روغن ترانسفورماتور نو و تصفیه شده و برای دستگاه های با ولتاژ نامی بالاتر از ۲۳۰ کیلوولت توصیه نشده است. در استاندارد *ASTM D 1816* الکتروودها همان الکتروودهای *VDE* یا عرق چین کروی هستند.

فصل سوم

شکست در عایق های مایع:

۱-۳- مقدمه:

بطور خلاصه، شکست الکتریکی فرآیندی جمع شونده (*Cumulative*) است که در آن ذرات باردار توسط یک میدان الکتریکی شتابدار شده و از طریق برخورد با اتم ها یا مولکول های خنثی شده مایع، ذرات باردار بیشتری ایجاد کرده و نتیجتاً توده عظیمی از یون ها که برای هدایت یک جریان کافی هستند؛ به وجود می آید.

چون مایعات دی الکتریک با انواع عایق های دیگر و مواد فلزی در تماس بوده و رطوبت و ذرات خارجی در طی ذخیره سازی و تولید دستگاه وارد آن می شوند. استقامت عایقی یک مایع در یک سیستم عایق کاری، تقریباً همیشه بمقدار قابل ملاحظه ای کمتر از مقاومت نمونه خالص آزمایش شده در آزمایشگاه می باشد. ممکن است ذرات بین الکترودها جهش کنند.

باری که یک ذره در نزدیکی یک الکتروود بدست می آورد، باعث پرتاب آن به سمت الکتروود مخالف شده و در آن جابار و خود را از دست داده و دوباره به سمت الکتروود اول پرتاب می شود. در مایعاتی که با گازها یا رطوبت آلوده شده اند، دمای عملیات می تواند باعث تشکیل حباب هایی در اطراف ذرات با اندازه ای کمتر از میکرون شده، و با این علت خواص عایقی مایع را تضعیف کند.

بنابراین این نکته حائز اهمیت است که مایعات و دستگاه های در تماس با آنها، برای کارایی بهتر، تا حد امکان از رطوبت و ذرات آلوده کننده بدور باشند.

عایق های مایع و جامد کاربردهای زیادی در صنعت عایق کاری دارند و شناخت خواص آنها از جمله شکست عایق دارای اهمیت فوق العاده ای می باشد. متأسفانه دلایل این مطلب این است که برخلاف گازها، عایق های مایع و جامد را مشکل می توان به صورت خالص یافت. وجود ناخالصی باعث ضعف

عایق و شکست آن می گردد. البته این ناخالصی ها ناخواسته و معمولاً ناشناخته هستند. بدون شناخت ناخالصی ها، شناخت اثر آن ها غیر ممکن است به همین علت بررسی دلایل شکست عایق های مایع و جامد کاری مشکل است و نمی توان برای رفتار این عایق ها قوانین محکمی یافت.

در قرون اخیر مایعات را از برخی جنبه ها مورد پژوهش قرار داده اند ولی یافته ها و نتایج حاصله نمی تواند کاملاً مورد قبول واقع شود. بنابراین بدلیل اینکه اطلاعات متنوع بوده و در برخی موارد با هم متناقض هستند. چنین یافته هایی نمی توانند منجر به دست یابی به یک تئوری کلی قابل اعمال به مایعات شوند.

دلیل اصلی این وضعیت فقدان تئوری جامعی است که مبانی فیزیکی حالت مایع را مورد توجه قرار داده و چهارچوبی ارائه کند که بر مبنای آن مشاهدات با هم مقایسه شده و به آن استفاده شود.

بررسی های جامعی روی اطلاعات تدوین شده در این مورد، به طور متناوب انجام شده است، موارد اخیر بررسی هایی از لوپس، شرباغ و داتسون، سوان و کوک، کراسوکی و زکی و هالی و گالا هر را شامل می شود. کار به طور وسیع در دو مکتب فکری قرار می گیرد. یک طرف آن هایی هستند که شکست در مایعات را روی مدلی دنبال می کنند که تعمیم یافته شکست گازها براساس یونیزه کردن بهمنی اتم ها و حاصل از برخورد مسیر الکترون ها در میدان اعمالی است. فرض می شود که الکترون ها به سبب پرتوافشانی میدان از کاتد کنده شده و بدرون مایع رانده می شوند و خلاصی آنها از زنجیره سطح می تواند در اثر کمک میدان یا اثر شاتکی (ازدیاد ترمویونیک میدان) باشد. این نوع مکانیسم شکست برای مایعات همگن با درجه خلوص بینهایت زیاد مورد توجه قرار گرفته و به عایق های مایعی که به شکل تجاری تولید شده قابل اعمال نیست. مطالعات در مورد هدایت در مایعات خیلی خالص نشان داد که در میادین ضعیف، هدایت به خاطر تجزیه ناخالصی ها عمدتاً یونی است و به طور خطی با شدت میدان افزایش می یابد. در میادین متوسط هدایت به اشباع می رسد. در میدان های شدید همچنانکه به شکست نزدیک می شویم، هدایت با سرعت بیشتری گسترش یافته و به ناپایداری منجر می گردد.

اعتقاد بر این است که این افزایش حاصل از پرتوافشانی الکترون در کاتد به وسیله یک یا هر دو مکانیسم فوق الذکر بوده و احتمالاً به سبب تأثیر میدان در تجزیه مولکولهای مایع است. مدت زیادی است که مشخص شده، حضور ذرات خارجی در عایق های مایع تأثیر بسیار زیادی روی استقامت الکتریکی مایعات دارند. در یک بررسی فرض شده است که ذرات معلقه قابل پلاریزه بوده و دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی بیشتری نسبت به مایع هستند. در نتیجه در معرض نیروی الکتریکی قرار می گیرند که آنها را به طرف حداکثر شدت میدان می راند. با وجود میدانی یکنواخت، فرض شده که حرکت ذرات به سبب تخلخل سطح الکترودها (که گرادیان های موضعی را افزایش می دهد) باشد. تجمع ذرات ادامه یافته و به شکل گیری پلی بین دو الکتروود منجر می گردد که این آغاز شکست است.

ناخالصی ها همچنین می توانند حباب هایی گازی با قدرت شکستی کمتر از مایع باشند. در این حالت شکست حباب ها می تواند باعث تحریک شکست کلی مایع شود. مدلی ریاضی برای شکست حفره توسط کائو پیشنهاد شده است.

مهمترین عایق مورد مصرف در صنعت، روغن ترانسفورماتور است که از نفت معدنی تهیه می گردد. عایق های دیگر مانند روغن نسوز یا روغن مصنوعی برای مدتی به دلیل خواص مناسب آن ها مورد مصرف قرار می گرفتند. ولی به علت مشکلاتی که برای محیط زیست و موجودات زنده تولید می نمایند، امروزه منسوخ و در برخی ممالک به کلی ممنوع شده است، عایق های مایع دیگری نیز وجود دارند. برای مثال می توان از مواد عایق مایع نام برد که در خازن های فشار قوی و یا در کابل های فشار قوی به کار می روند. همچنین روغن سیلیکون به جهت استقامت در مقابل درجه حرارت زیاد و بالا بودن نقطه اشتعال گاهی به کار می رود.

دلایل استفاده از عایق مایع علاوه بر عایق کاری، اثر آن در انتقال حرارت و پرمودن خلل و فرج عایق جامد است. در کلیدهای قدرت فشار قوی، عایق مایع برای خاموش کردن قوس الکتریکی بکار می رود.

همچنین استفاده از عایق مایع با دی الکتریک بزرگ برای افزایش ظرفیت خازن ها دارای اهمیت است. البته شکل و جنس الکترودها و ناهمواری سطح آنها و وجود حایل بین الکترودها و نیز نوع ولتاژ (ضربه، متناوب، دائم، کلیدزنی) و علامت آن، در ولتاژ شکست موثر هستند. با توجه به نکات فوق دلایل زیر را برای شکست در عایق های مایع صنعتی ذکر می نمایم.

۳-۲- عایق های مایع خالص و تجارتي:

عایق های مایع بسته به درجه خلوص آنها، به دو دسته عایق های مایع خالص و تجارتي تقسیم می شوند. روغن های خالص دارای درجه خلوص شیمیایی هستند نسبت ناخالصی آنها کمتر از 10^9 است و دارای ساختمان ساده ای می باشند. n -هگزان (C_6H_{14}) و n هپتان (C_7H_{16}) و هیدروکربن های پارافین را می توان از این دسته نام برد. بررسی جداگانه عوامل موثر بر هدایت و شکست الکتریکی مایعات با استفاده از عایق های مایع ساده و خالص آسان تر است. از طرف دیگر، عایق های مایع تجاری مانند روغن ها، از نظر شیمیایی خالص نیستند و از مخلوطی از مولکول های ارگانیک پیچیده (که مشخص کردن یا تولید مجدد آن ها با آزمایش های ساده امکان پذیر نیست)، تشکیل می شوند. حداکثر ولتاژ شکست چند مایع خالص در جدول (۳-۱) آمده است. عایق مایع الکتریکی به لحاظ داشتن خواص الکتریکی موردنیاز، از نوع عایق تجارتي است و از ترکیب روغن حاصل از نفت با مواد افزودنی مخصوص به دست می آید.

جدول (۳-۱): ولتاژ شکست چند عایق مایع خالصی

نوع مایع	قدرت شکست حداکثر در چند عایق (MV/cm)
هگزان	1.1-1.3
بنزن	1.1

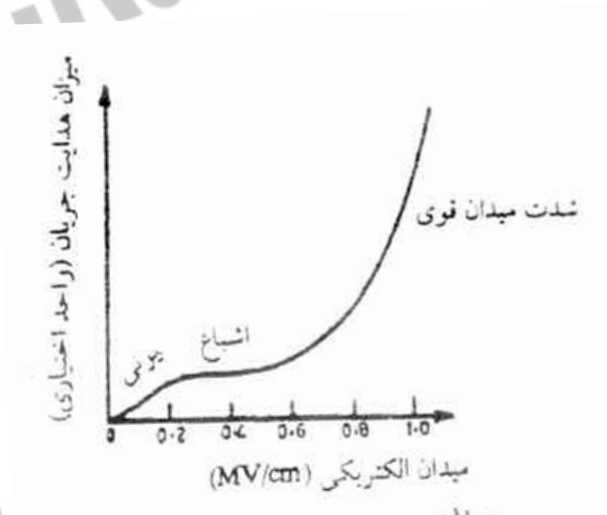
1.0	روغن ترانسفورماتور
1.0-1.2	سیلیکون
2.4	اکسیژن مایع
1.6-1.9	نیترژن مایع
1.0	هیدروژن مایع
0.7	هلیوم مایع
1.10-1.42	آرگون مایع

۳-۳- نظریه شکست الکترونی:

وقتی الکترونی به درون مایع تزریق می شود، از میدان الکتریکی اعمالی انرژی می گیرد. در نظریه شکست الکترونی، این گونه فرض می شود که برخی الکترون ها، میزان انرژی دریافتی از میدانشان، بیشتر از انرژی است که در برخورد با مولکول ها از دست می دهند. اصولاً این نوع مکانیزم شکست برای مایع های خالص قابل توجیه است؛ اما برای عایق های مایع تجاری، قابل استفاده نیست. مطالعات هدایت در مایعات با درجه خلوص بالا نشان می دهد که در میدان های ضعیف، هدایت در مایعات با درجه خلوص بالا نشان می دهد که در میدان های ضعیف، هدایت الکتریکی، بیشتر از نوع یونی و به صورت جابجایی ناخالصی ها است که با افزایش شدت میدان، به طور خطی افزایش می یابد. با افزایش میدان، این جریان هدایتی به اشباع می رسد در میدان های قوی شدت میدان قوی که به شکست الکتریکی می انجامد، میزان هدایت سریع تر افزایش می یابد که تمایل به پایداری دارد. اعتقاد بر این است که این افزایش جریان ناشی از کل انتشار الکترون در کاتد (توسط یک یا هر دو مکانیسم فوق یعنی انتشار حرارتی و انتشار بر اثر شدت میدان قوی) است. شکل (۱-۳) سه مرحله مختلف هدایت عایق های مایع را در میدان الکتریکی نشان می

می دهد.

در میدان های خیلی ضعیف، جریان از جابجایی یون ها ایجاد می شود. در میدان های متوسط، این جریان به اشباع می رسد. در میدان های قوی، جریان مذکور بر اثر انتشار الکترون ها از کاتد و انجام فرآیندی شبیه یونیزاسیون اولیه و ثانویه تا نزد تا اندازه ای افزایش می یابد تا به شکست عایق بیانجامد. ولتاژ شکست به شدت میدان، فاصله الکترودها، جنس کاتد و درجه حرارت کاتد بستگی دارد و به علاوه لزجی، درجه حرارت، چگالی و ساختار مولکولی عایق مایع هم در ولتاژ شکست آن موثر است.



شکل (۳-۱) مراحل مختلف هدایت عایق های مایع

به طور کلی در عایق های مایع، شکست الکتریکی ناشی از انتشار الکترون توسط کاتد را (خواه بر اثر میدان قوی و یا بر اثر حرارت)، شکست الکترونی می گویند. شرط لازم برای تشکیل بهمن الکترونی این است که انرژی که یک الکترون در طی میانگین فاصله آزاد به دست می آورد، با انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول عایق مایع مساوی و یا بزرگتر از آن باشد یعنی:

$$eE\lambda \geq W$$

(۳-۱)

در این رابطه، E شدت میدان الکتریکی اعمال شده، λ میانگین طول فاصله آزاد، e بار الکتریکی یک الکترون و W انرژی لازم برای یونیزه شدن مولکول است.

۳-۴- مکانیسم ذره جامد معلق:

ناخالصی های جامد ممکن است به شکل رشته ها یا ذرات جامد متفرق در مایع ظاهر شوند. اگر ذره ای کروی با شعاع r و ضریب نفوذ پذیری الکتریکی ϵ معلق در مایعی با ضریب نفوذ پذیری الکتریکی ϵ_0 را در نظر بگیریم، آنگاه تحت تأثیر میدان ذره پلاریزه شده و نیروی زیر را تحمل می کند:

$$F_e = r^3 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E \text{grad} E \quad (3-2)$$

جهت این نیرو به طرف محل دارای بیشترین شدت می بود اگر $\epsilon > \epsilon_0$ ، ولی برای حباب ها $\epsilon < \epsilon_0$ دارای جهت مخالف خواهد بود. نیروی بدست آمده از معادله (۳-۲) با ازدیاد توسعه (ϵ) یافته و در مورد یک ذره هادی ($\epsilon \rightarrow \infty$) می شود:

$$F_e = r^3 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E \text{grad} E \quad (3-3)$$

بنابراین نیرو، ذره را وادار به حرکت به سوی ناحیه شدیدتر میدان می کند.

در یک فاصله دارای میدان یکنواخت یا فاصله هوایی کروی کوچک، شدیدترین میدان در ناحیه یکنواخت واقع است، در این ناحیه گرادیان E برابر صفر است به طوری که ذره در حالت تعادل باقی خواهد ماند.

نتیجتاً ذرات به داخل ناحیه میدان کشیده خواهند شد، اگر ضریب نفوذ پذیری الکتریکی ذره نسبت به مایع واسط بزرگتر باشد، آنگاه حضور آن در ناحیه یکنواخت میدان باعث تمرکز فشار در سطح آن می شود. سایر ذرات بدون ناحیه دارای تمرکز شار بالاتر جذب شده و به مرور زمان به شکل سر به ته

شکل می گیرد تا آنکه روی فاصله هوایی پل بزنند. میدان در مایع بین ذرات شدیدتر شده و اگر به حد بحرانی برسد، شکست رخ خواهد داد.

چسبندگی با جابجایی ذرات تحت اثر نیروی الکتریکی مخالفت می کنند. به دلیل حرکت ذرات به طرف ناحیه دارای فشار زیاد، انتشار نیز باید به حساب آورده شود. برای ذره ای به شعاع r که با آهستگی با سرعت v در محیطی با چسبندگی η در حال حرکت است، نیروی کششی با رابطه استوکز داده می شود:

$$F_{drag} = 6\pi r \eta v(x) \quad (3-4)$$

با معادل قرار دادن نیروی الکتریکی با نیروی کشش ($F_e = F_{drag}$) به دست می آوریم:

$$v_E = \frac{r^2 E}{6\pi \eta} \frac{dE}{dx} \quad (3-5)$$

که v_E سرعت ذره به طرف ناحیه دارای حداکثر فشار است.

با احتساب فرآیند انتشار، سرعت رانده شدن ناشی از انتشار با معادله زیر داده می شود:

$$v_d = -\frac{D}{N} \frac{dN}{dx} = -\left(\frac{kT}{6\pi r n}\right) \frac{dN}{N dx} \quad (3-6)$$

رابطه سمت راست معادله از شکل رابطه استوکز - انیشتین $D = kT/6\pi r n$ تبعیت می کند. k ثابت

بولتزمن و T دمای مطلق است. با مساوی قرار دادن v_d با v_E به دست می آوریم:

$$\frac{r^2}{6\pi n} E \frac{dE}{dx} = -\left(\frac{kT}{6\pi r n}\right) \frac{dN}{N dx} \quad (3-7)$$

رابطه فوق بستگی استقامت الکتریکی به زمان را با تجمع ذرات N ، شعاع ذرات و چسبندگی مایع نشان

می دهد. مقدار بحرانی میدان عکس شده $E(x)$ (مقدار حالت تعادلی که بالاتر از آن شکست دیر یا زود

رخ می دهد.) را می توان با انتگرال گیری از معادله (3-7) به دست آورد.

$$\left[\frac{r^2 E^2}{2} \right]_{E=E(x)}^{E=E(\infty)} = \left[\frac{kT}{r} \ln N \right]_{N=N(x)}^{N=N(\infty)} \quad (3-8)$$

اگر افزایش انرژی الکترواستاتیک ذراتی که به طرف مکان دارای بیشترین فشار رانده می شوند، خیلی بیشتر از انرژی جنبشی شان باشد یعنی $r^3 \{E^2(x) - E^2(\infty)\} - 22kT$ ، عمر عایق نامحدود است معیار شکست به دست آمده از حرکت ذرات به طرف ناحیه دارای بیشترین فشار مربوط است به وضعیتی که:

$$r^3 \{E^2(x) - E^2(\infty)\} = 2kT \quad (3-9)$$

اگر حالتی در نظر گرفته شود که در آن غیر یکنواختی اولیه میدان به خاطر برآمدگی شبه کروی روی الکترودها باشد فرض شود که اعمال دراز مدت میدان E_0 منجر به شکست گردد، آنگاه حداکثر فشار در نوک کره $3E_0$ می باشد، یا به طور کلی حداکثر فشار gE_0 فاکتوری هندسی است.

به این ترتیب معادله (3-9) را می توان چنین نوشت:

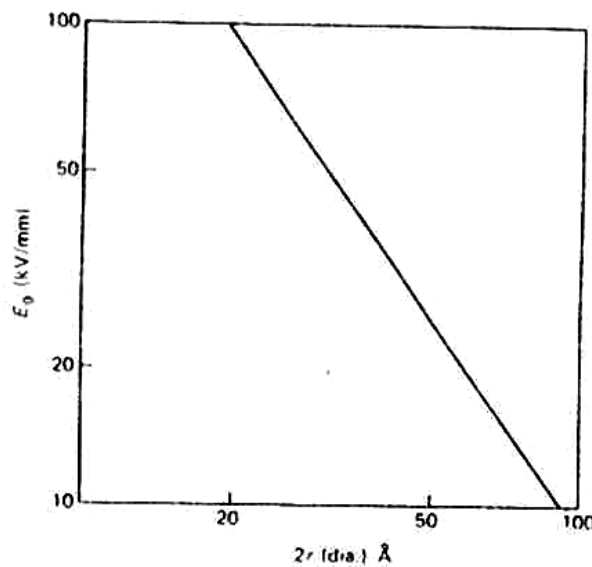
$$r^3 [g^2 - 1] E_0^2 = 2kT \quad (3-10)$$

به ازاء $g = 3$ حاصل می شود:

$$r^3 E_0^2 = 1/4kT \quad (3-11)$$

یک نظریه کاملتر با به حساب آوردن ضرایب عایقی، رابطه زیر را ارائه می دهد:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} r^2 E_0^2 = \frac{1}{4} kT$$



شکل (۳-۲): ترسیمی از معادله (۳-۱۱) را در محدوده ای از ابعاد 50\AA و دمای $T = 300^{\circ}\text{K}$ در

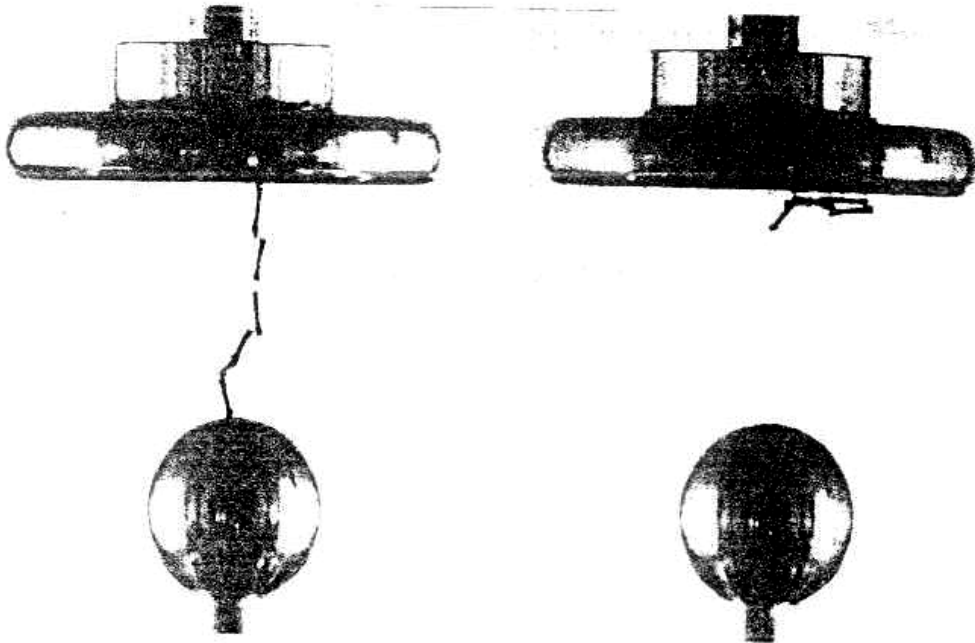
حالتی که $\epsilon_0 \ll \epsilon$ نشان می دهد

معادله (۳-۱۱) استقامت الکتریکی E_0 را پس از زمانی طولانی به شکل تابعی به شکل تابعی از ابعاد ذرات معلق نشان می دهد. این رابطه به شکل تجربی آزمایش شده و توافقی منطقی با محاسبات به دست آمده است. شکل (۳-۲) ترسیمی از معادله (۳-۱۱) را در محدوده ای از ابعاد 50\AA و دمای $T = 300^{\circ}\text{K}$ در حالتی که $\epsilon_0 \ll \epsilon$ نشان می دهد.

۳-۵- مکانیزم شکست در اثر ذرات ناخالص جامد:

آزمایش: در یک ظرف روغن دو الکتروود نسبتاً نوک تیز با فاصله حدود ۱۵ سانتیمتر قرار می دهیم و دو الکتروود را به یک منبع ولتاژ متناوب فشار قوی وصل می نمائیم. داخل ظرف روغن چند تکه نخ پنبه ای نازک و حتی الامکان خشک به طول دو الی سه میلیمتر می ریزیم و ولتاژ را تدریجاً بالا می بریم. تکه های نخ خود را به الکتروودها رسانده و در جهت میدان الکتریکی قرار می گیرند. در واقع از طرف میدان

الکتریکی به این ذرات معلق نیرو وارد شده و ذره معلق به طرف شدت میدان قویتر جذب می شود.



شکل (۳-۳): اثر ذرات معلق در روغن عایق و بوجود آمدن پل

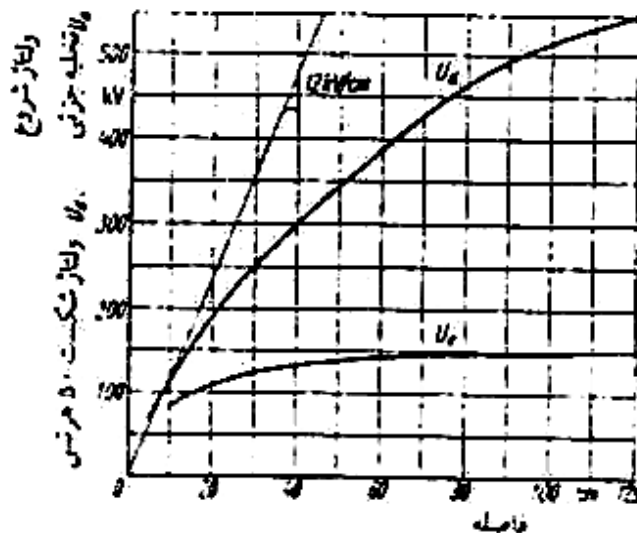
به دنبال این آزمایش چند تکه نخ مرطوب وارد روغن می نمائیم. برای تشخیص تکه نخهای مرطوب و خشک از همدیگر، می توان آنها را از رنگهای مختلف انتخاب نمود. این بار نیز نخهای مرطوب جذب الکترودها می گردند. ولی چون نخ مرطوب قابلیت هدایت الکتریکی خوبی دارد، نخهای مرطوب چسبیده به الکترودها ادامه الکترودها محسوب می شوند و در نتیجه تکه نخهای جدید جذب نوک تکه نخ چسبیده به الکترودها می گردند. به این ترتیب تکه نخهای مرطوب دنبال یکدیگر قرار گرفته و یک پل بین دو الکترودها تشکیل می دهند. در صورتی که ولتاژ را آهسته بالا ببریم، شاهد ایجاد این پل و بروز جرقه های ریزی خواهیم بود که در فاصله تکه نخهایی که کاملاً به هم متصل نیستند، به وجود می آید. این جرقه های ریز گازهایی را تولید می نمایند که از تجزیه روغن بوجود آمده اند. شکل (۳-۳) پل بوجود آمده توسط نخها در روغن را نشان می دهد. نخهای خشک در اینجا نشان داده نشده اند.

این آزمایش ساده ای است که بادستگاه اندازه گیری استقامت الکتریکی روغن می تواند انجام شود. الکترودها می توانند در امتداد افقی قرار گیرند. ذرات معلق در روغن که عدد دی الکتریک آنها بزرگتر از عدد دی الکتریکی روغن است در جهت میدان قویتر جذب می گردد.

ذرات معلق با عدد دی الکتریک کمتر از روغن (حباب گاز) در جهت میدان ضعیف تر حرکت می نمایند. نیروی وارده به یک ذره عایق کروی شکل با شعاع r با عدد دی الکتریک ϵ_1 در یک مایع با عدد دی الکتریک ϵ ، برابر است با:

$$F_e = \frac{1}{2} r^3 \frac{\epsilon_1 - \epsilon}{\epsilon_1 + 2\epsilon} \text{grad} E^2 \quad (3-12)$$

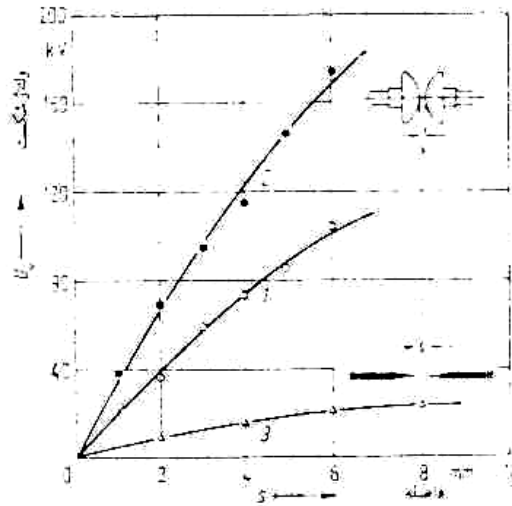
نیرو در جهت افزایش E است. برای تکه های نخ مرطوب که عملاً هادی هستند می توان ϵ_1 را برابر بینهایت فرض نمود و لذا نیروی وارده بزرگتر است بدین ترتیب نخهای خشک نیز جذب الکترودها می گردند. زیرا در اطراف الکترودها، خصوصاً الکترودهای تیز شدت میدان الکتریکی بزرگتر است.



شکل (۳-۴) تغییرات ولتاژ شکست برای روغن ترانسفورماتور بر حسب فاصله در فرکانس ۵۰ هرتس

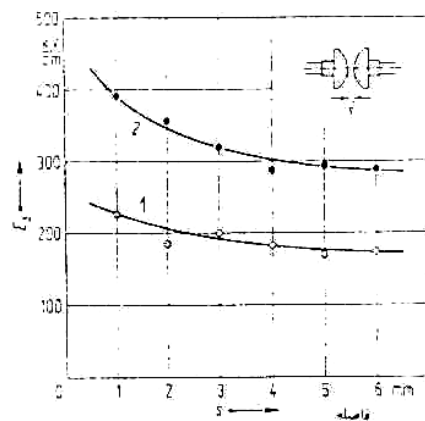
ϵ_1 را برابر بینهایت فرض نمود و لذا نیروی وارده بزرگتر است. بدین ترتیب نخهای خشک نیز جذب

الکترودها می گردند. زیرا در اطراف الکترودها، خصوصاً الکترودهای تیز شدت میدان الکتریکی بزرگتر است.



شکل (۳-۵) تغییرات ولتاژ شکست برای روغن ترانسفورماتور بر حسب فاصله در فرکانس ۵۰ هرتس در منحنی ۱ با درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی گراد و منحنی ۲ با درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی گراد و منحنی ۳ مربوط به الکترودهای سوزن است.

[20]



شکل (۳-۶) شدت میدان الکتریکی شکست برای روغن ترانسفورماتور بر حسب فاصله در فرکانس ۵۰ هرتس بر حسب فاصله برای الکترودهای عرقچین کروی در منحنی ۱ با درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی گراد و منحنی ۲ با درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی گراد

جریانی که در طول چنین زنجیره ای ایجاد می شود، حرارت موضع را افزایش می دهد. از آنجا که ضریب نفوذ پذیری الکتریکی آب در مقایسه با روغن بسیار زیاد است، نیروی F بر ذرات آب و یا ذرات مرطوب زیاد خواهد بود. بنابراین وجود چنین ذراتی ولتاژ شکست را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. برای جلوگیری از این حادثه، می توان از مواد جاذب رطوبت هوا مانند سلیکاژل در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده کرد. سلیکاژل در ابتدا آبی رنگ و پس از جذب رطوبت صورتی و یا بنفش رنگ می شود که باید آن را تعویض کرد و هر چند وقت یکبار با تصفیه روغن، ذرات معلق آن را جداساخت.

اغلب موارد، همراه با عایق مایع، عایق جامدی، نظیر کاغذ نیز به کار برده می شود. از این کاغذهای جامد، به تدریج و به مرور زمان، ذرات معلق جدا شده، در عایق مایع غوطه ور می شوند. رطوبت هم معمولاً به دلایل مختلف از خارج وارد محفظه عایق مایع می شود و یا از قبل در عایق وجود داشته است. همچنین ممکن است رطوبت به مرور زمان در اثر اکسیداسیون به وجود می آید بنابراین، عملاً نمی توان به طور کامل از وجود ذرات معلق در عایق های مایع جلوگیری کرد؛ ولی باید تا حد امکان از حضور ذرات معلق و مرطوب در آنها جلوگیری نمود. مثلاً باید قبل از پر کردن دستگاه با روغن، عایق های کاغذی را با درجه حرارت های بالا (در حدود ۱۰۰ درجه) و با خلاء، کاملاً خشک نمود تا رطوبت کاملاً از آن بیرون آید. سپس با وجود خلاء، دستگاه را با روغن پر کرد و برای جلوگیری از جذب رطوبت هوا به وسیله روغن دستگاه، از مواد جاذب رطوبت هوا نظیر سلیکاژل در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده نمود.

۳-۶- مکانیزم شکست در اثر حباب های ناخالص گازی:

در عایق های مایع همانند عایق های گازی، ممکن است اطراف الکترودهای نوک تیز، تخلیه ناقص ایجاد شود که این موضوع باعث گرم شدن روغن، تجزیه روغن و در نتیجه بوجود آمدن حباب های گازی در

روغن می شود. این حباب های گازی (البته تعدادی از آن ها)، ممکن است در روغن حل شوند و تعدادی از آنها ممکن است در داخل روغن غوطه ور گردند. همچنین حفره های گازی ممکن است روی شیارهای ناصاف بر سطح کاند به وجود آیند و یا در اثر تغییر درجه حرارت و فشار گاز و یا به هم زدن روغن، حباب های گازی در آن بوجود آیند. همچنین به علت آن که روی ناهمواری های سطح الکترودها دانسیته جریان زیادتر می باشد، از این رو، مایع اطراف آن بخار شده و حباب های گازی تشکیل می شود.

شدت میدان الکتریکی در داخل حباب های گازی کروی شکل، با عدد مطلق دی الکتریک ۱ برابر است با:

$$E = \frac{3\varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + 1} E_0 \quad (3-13)$$

که در این رابطه،

ε_1 = عدد مطلق دی الکتریک روغن؛

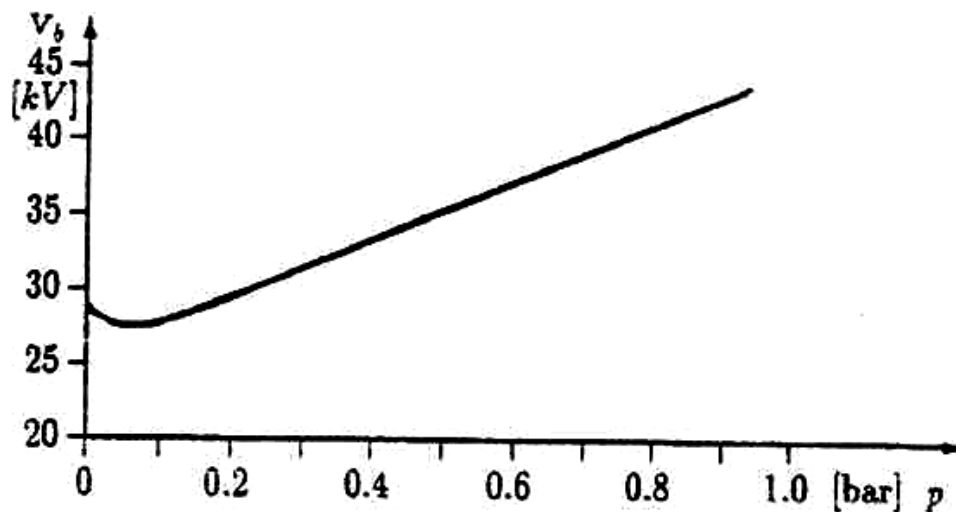
E_0 = شدت میدان الکتریکی داخل عایق مایع قبل از تشکیل حباب ها است.

هنگامی که این شدت میدان الکتریکی، از شدت میدان الکتریکی شکست حباب های گاز بیشتر باشد. شکست گاز داخل حفره ها رخ می دهد (معمولاً این شدت میدان از شدت میدان الکتریکی داخل عایق مایع بیشتر است و از طرفی استقامت الکتریکی حفره های گازی، خیلی کم تر از استقامت الکتریکی روغن است). گرمای ایجاد شده در اثر بروز جرقه و شکست الکتریکی در این حفره های گازی، باعث تبخیر مایع اطراف آنها و در نتیجه، تشکیل حباب های گازی بیشتر شده و در نهایت، موجب تشکیل پل بین الکترودها و تخلیه الکتریکی کامل عایق مایع می شود. پس از تشکیل حباب، بر اثر نیروهای الکترواستاتیکی، حباب ها در امتداد میدان کشیده می شوند و در عین حال حجم حباب ثابت می ماند. کشیدگی حباب در طول میدان، باعث قرار گرفتن ولتاژ بیشتری در دو سر آن می شود. وقتی شدت میدان حباب به E و یا ولتاژ دو سر حباب به ولتاژ شکست گاز برسد، شکست الکتریکی در آن رخ می

دهد. رابطه تجربی زیر برای شدت میدان شکست الکتریکی حباب توسط کائو ارائه شده است.

$$E = \frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE_0} \right) - 1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3-14)$$

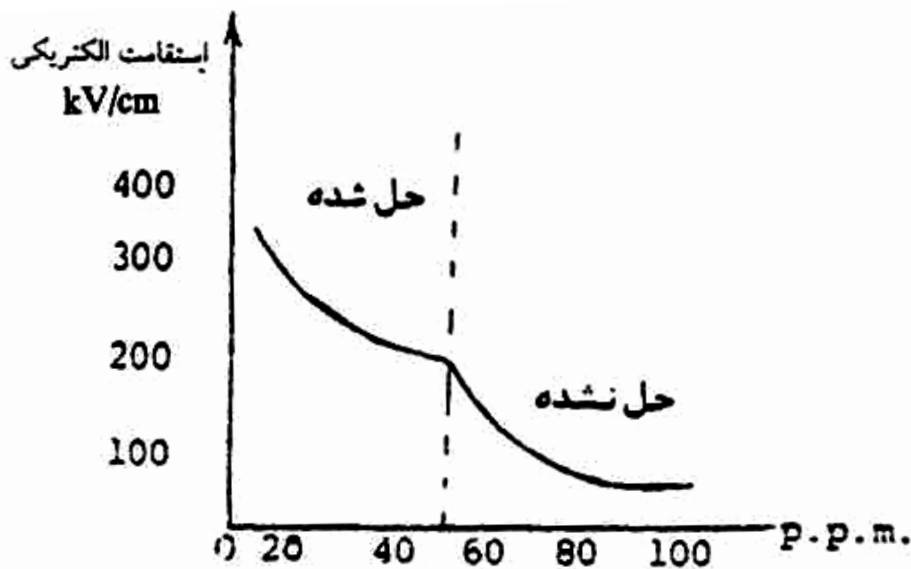
در این رابطه σ تنش سطح مایع، ε_1 و ε_2 به ترتیب ضریب نفوذ پذیری عایق مایع و حباب، r شعاع اولیه حباب کروی شکل (قبل از کشیده شدن در جهت میدان) و V_b افت ولتاژ در حباب می باشند. رابطه (۳-۱۴) نشان می دهد که شدت میدان الکتریکی لازم برای شکست الکتریکی مایع به اندازه اولیه حباب بستگی دارد که آن هم، متأثر از فشار و درجه حرارت است. این نظریه، تولید حباب اولیه را منظور نمی کند و در نتیجه، با نتایج آزمایشگاهی قدری متفاوت است همچنین رابطه (۳-۱۴) تغییر شکل حباب را در میدان الکتریکی در نظر نمی گیرد؛ چون استقامت الکتریکی حباب های گازی به فشار آن بستگی دارد. بنابراین، استقامت الکتریکی روغن های عایق نیز، به فشار بستگی خواهد داشت که این موضوع در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.



شکل (۳-۷): ولتاژ شکست عایق مایع بر حسب تغییرات فشار

۳-۷- مکانیزم شکست در اثر ناخالصی قطرات مایع های دیگر:

جذب رطوبت توسط عایق مایع، استقامت الکتریکی آن را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد، به طوری که استقامت الکتریکی روغن ها به میزان زیادی به رطوبت آنها بستگی دارد. اگر رطوبت به صورت محلول در روغن باشد، استقامت الکتریکی روغن کم تر از موقعی که به صورت قطرات آب شناور در روغن باشد، کاهش می یابد. این موضوع را می توان در شکل (۳-۸) مشاهده نمود. میزان 0.1% آب در روغن، 20% قدرت عایقی روغن را کاهش می دهد. اصولاً روغن در درجه حرارت 20°C مقدار آبی که می تواند در آن حل شود، حدود 80 PPM است، مقادیر بیشتر آب به صورت ذرات ریز در روغن شناور و یا به صورت قطرات درشت ته نشین می شوند. رطوبت موجود در ترانسفورماتور، از طریق نفس کشیدن ترانسفورماتور وارد آن می شود و یا از طریق اکسیداسیون روغن به وجود می آید. با استفاده از ماده سلیکاژل، رطوبت هوای تنفس روغن قابل جذب است (تعویض به موقع سلیکاژل از اهمیت بالایی برخوردار است).



شکل (۳-۸) تغییرات ولتاژ شکست روغن با درصد آب حل شده در آن

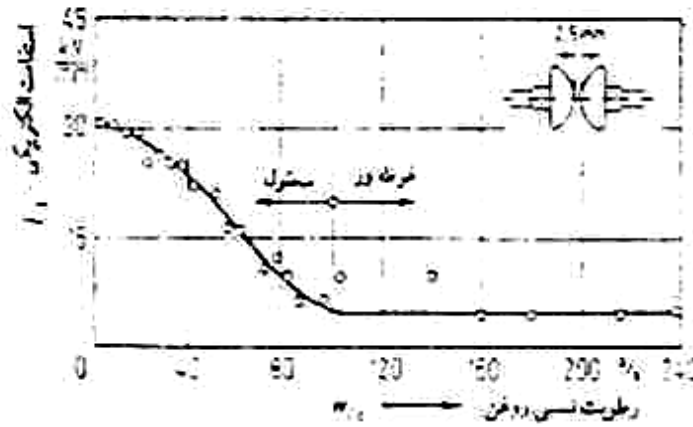
بر اثر وجود ذرات معلق، ولتاژ شکست عایق مایع- که از مهمترین انواع آن روغن ترانسفورماتور می

باشد. پایین می آید. ذرات معلق می توانند دارای ابعاد مختلف باشند و تعداد آنها در واحد حجم نیز می تواند متفاوت باشد. در طول عمر عایق بر تعداد این ذرات معلق افزوده می شود. پیدا کردن رابطه ای مستقیم بین ولتاژ شکست عایق مایع و تعداد ذرات معلق در واحد حجم و یا ابعاد این ذرات، بدون در نظر گرفتن سایر عوامل نظیر رطوبت و درجه حرارت بی نتیجه است. از طرف دیگر در عایقهای مایع در هر حال به میزان معینی ذرات معلق وجود دارد و جلوگیری کامل از وجود این ذرات ممکن نیست. با تسویه روغن می توان هر چند سال یکبار این ذرات را تا حدی جدا نمود و مانع از افزایش آنها گردید. ضمناً روغن در حین این تصفیه خشک می شود.

با افزایش رطوبت و ذرات معلق، علاوه بر کاهش ولتاژ شکست، سایر مشخصات عایق نظیر مقاومت مخصوص و ضریب تلفات عایقی ($\tan \delta$) و غیره نیز تغییر می نمایند. لذا با اندازه گیری این کمیات می توان به کیفیت روغن پی برد و اقدامات لازم را به عمل آورد.

شکل (۳-۹) تغییرات استقامت الکتریکی روغن بین دو الکتروود را که به شکل عرقچین کروی (الکترودهای VDE) است و به فاصله $2/5$ میلیمتر از یکدیگر قرار گرفته اند برحسب مقدار رطوبت موجود در آن نشان می دهد. محور افقی در این شکل برحسب درصد رطوبتی است که روغن می تواند در خود حل نماید.

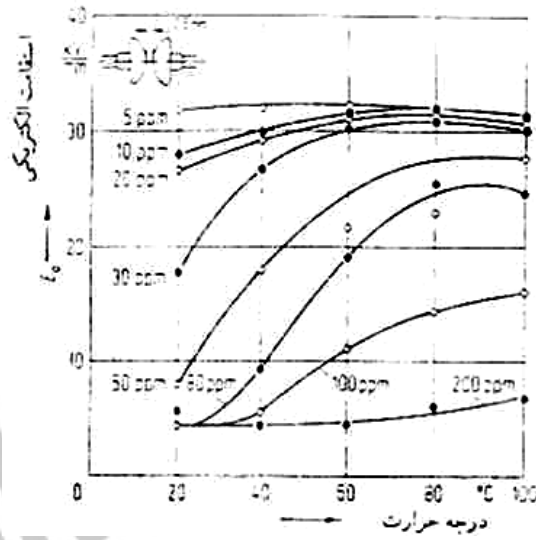
البته مقدار آبی که روغن قادر است در خود حل کند به درجه حرارت آن بستگی دارد. با بالا رفتن درجه حرارت، میزان آب قابل حل در روغن افزایش می یابد. لذا با گرم شدن روغن مرطوب، استقامت الکتریکی آن نیز بالا می رود.



شکل (۹-۳) تغییرات استقامت الکتریکی روغن برحسب میزان رطوبت برای الکترودهای *VDE*

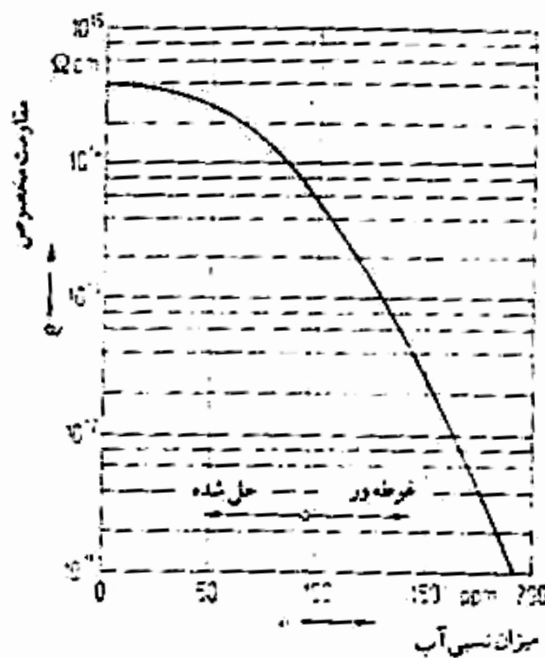
میزان آبی که روغن می تواند در خود حل نماید در درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی گراد معادل ۸۰ قسمت در میلیون (*PPM*) است. بدین معنی که مقدار آب بیشتر در داخل روغن حل نمی شود و به صورت قطرات ریز معلق باقی می ماند و یا در پایین ظرف جمع می گردد. در این صورت استقامت الکتریکی روغن برای الکترودهای *VDE* به ۲۵ کیلوولت یا ۱۰ کیلوولت بر میلیمتر می رسد. در صورتی که بر اثر گرم شدن مجدد روغن آب معلق در آن حل شود، استقامت الکتریکی آن نیز بالا خواهد رفت.

شکل (۱۰-۳) تغییرات استقامت الکتریکی روغن ترانسفورماتور را برحسب درجه حرارت برای مقادیر مختلف آب حل شده در آن نشان می دهد. چنانچه میزان آب در روغن کم باشد (*PPM* ۵ و کمتر) استقامت الکتریکی روغن به درجه حرارت بستگی نخواهد داشت و اگر میزان آب زیاد باشد (*PPM* ۲۰۰ و بیشتر) مجدداً استقامت الکتریکی روغن مستقل از درجه حرارت خواهد بود. ولی چنانچه میزان رطوبت در روغن به میزانی برسد که در درجه حرارت کمتر آب در روغن معلق باشد و در درجه حرارت بالاتر آب در روغن حل شود، تغییرات استقامت الکتریکی روغن برحسب درجه حرارت بسیار زیاد می شود.

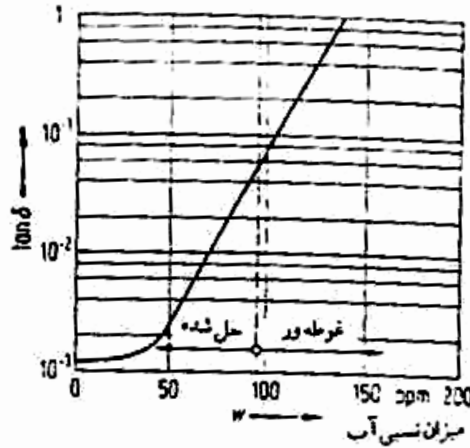


شکل (۳-۱۰): تغییرات استقامت الکتریکی روغن عایق با پایه مواد نفتی بر حسب درجه حرارت برای

مقادیر آب حل شده در آن



شکل (۳-۱۱) تغییرات استقامت الکتریکی روغن برحسب مقدار آب موجود در آن

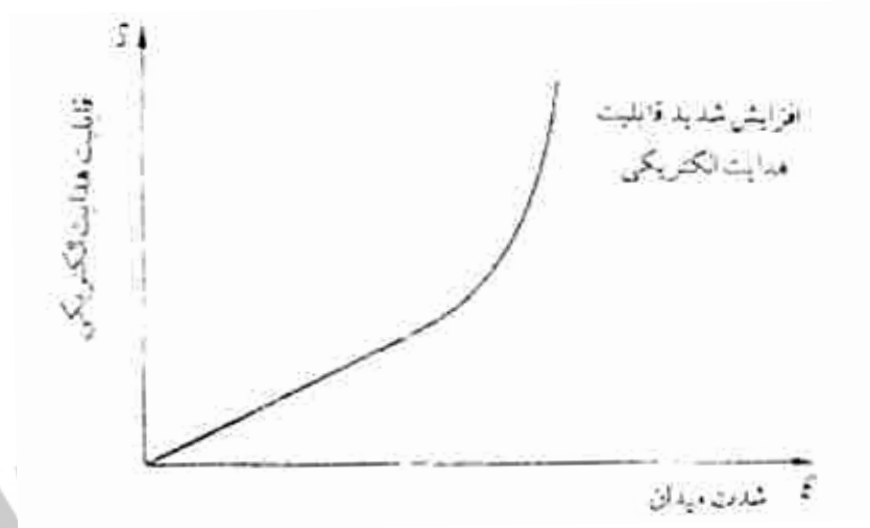


شکل (۳-۱۲) تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن ترانسفورماتور برحسب میزان آب موجود در

آن

وجود رطوبت در روغن باعث کاهش مقاومت مخصوص آن می گردد. شکل (۳-۱۱) تغییرات مقاومت مخصوص روغن را برحسب میزان آب موجود در آن برحسب PPM نشان می دهد. ضریب تلفات عایقی روغن نیز با افزایش رطوبت افزایش می یابد. شکل (۳-۱۲) تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن را برحسب میزان رطوبت موجود در آن نمایش می دهد.

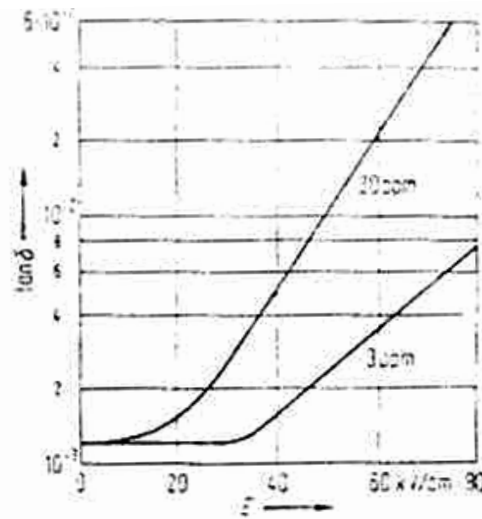
قابل ذکر است که مقاومت مخصوص روغن و همچنین ضریب تلفات عایقی آن بستگی به شدت میدان الکتریکی دارند. شکل (۳-۱۳) تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی عایق را برحسب شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر آن نشان می دهد. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی با افزایش شدت میدان الکتریکی می توان مشابه نحوه افزایش جریان الکتریسیته درگازها در قبال افزایش شدت میدان الکتریکی تا قبل از بروز پدیده شکست دانست.



شکل (۳-۱۳) تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی عایق را برحسب شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر آن نشان می دهد.

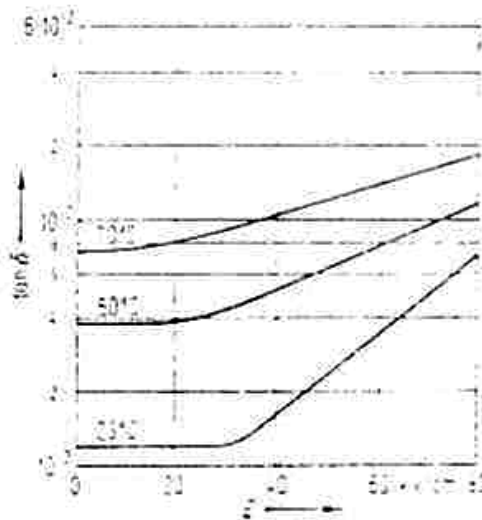
شکل (۳-۱۴) تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن را برحسب شدت میدان الکتریکی و به ازاء دو مقدار مختلف رطوبت موجود در روغن مایع نشان می دهد و سرانجام تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن برحسب شدت میدان الکتریکی در درجه حرارتهای مختلف در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است.

از آنجا که روغن معدنی (روغن ترانسفورماتور) قابل اشتعال می باشد، گاهی باعث آتش سوزی می گردد. لذا روغنهای نسوز ساخته شدند که در آنها ماده کلر وجود دارد. این مواد نامهای تجاری مانند کلوفن و آسکارل هستند ولی این مواد از نظر محیط زیست مناسب نیستند و لذا استفاده از آنها ممنوع و منسوخ گردیده است.



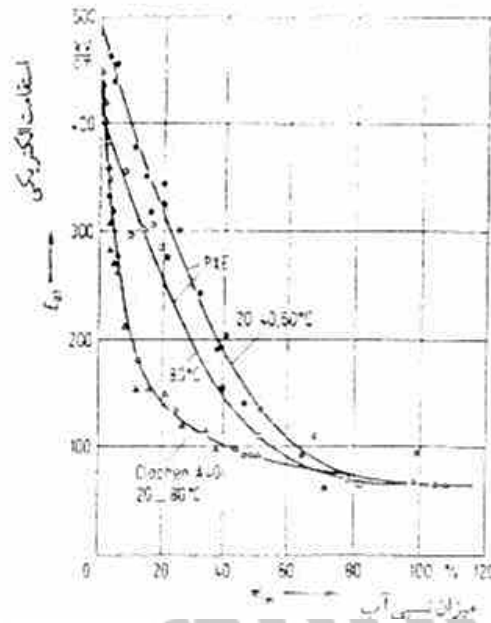
شکل (۳-۱۴) تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن را برحسب شدت میدان الکتریکی و به ازاء دو مقدار مختلف رطوبت موجود در روغن مایع نشان می دهد

با حذف این مواد عایقهای مایع بدون کلر ساخته شده است از جمله می توان از فنول کسلیل اتان نام برد. این ماده نیز رفتاری مانند روغن ترانسفورماتور دارد. عدد دی الکتریک آن $2/6$ و نقطه اشتعال آن 170 درجه سانتی گراد می باشد.



شکل (۳-۱۵) تغییرات ضریب تلفات عایقی یک نوع روغن برحسب شدت میدان الکتریکی در درجه حرارت های مختلف

ولتاژ شکست کلوفن نیز در این شکل آورده شده است. شکل (۱۶-۳) استقامت الکتریکی این عایق را برحسب میزان رطوبت نسبی نشان می دهد. برای مقایسه



شکل (۱۶-۳) استقامت الکتریکی عایق یک نوع روغن را برحسب میزان رطوبت نسبی نشان می دهد.

همچنین رطوبت روغن را هم می توان به کمک حرارت و پمپ خلاء از آن خارج کرد. رطوبت، باعث افزایش ضریب تلفات عایقی و در نتیجه، افزایش تلفات عایقی می شود. (شکل ۱۲-۳ را مشاهده کنید). مقدار این تلفات عایقی (P) برابر است با:

$$P = V^2 c \omega \tan \delta$$

در این رابطه، $\tan \delta$ ضریب تلفات عایقی، $\omega = 2\pi f$ ، ولتاژ اعمالی به عایق و C ظرفیت خازنی عایق مایع است. وجود قطرات مایع های دیگری نظیر قطرات آب در روغن، باعث می شود که در یک شدت میدان الکتریکی بحرانی، این قطرات به صورت ناپایدار درآمده و در راستای میدان، به صورت

کشیده درمی آیند و باعث ایجاد یک مسیر با مقاومت کم بین الکترودها و در نهایت، موجب شکست کامل عایق مایع می شود. می توان ثابت کرد که میدان الکتریکی بحرانی (E_{crit}) که در آن قطرات کروی شکل به شعاع R به حالت ناپایدار می رسند از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{crit} = 487.7 \sqrt{\frac{\sigma}{R \epsilon_1}} \quad V/cm \quad (3-16)$$

که در این رابطه،

R = شعاع ذرات کروی آب

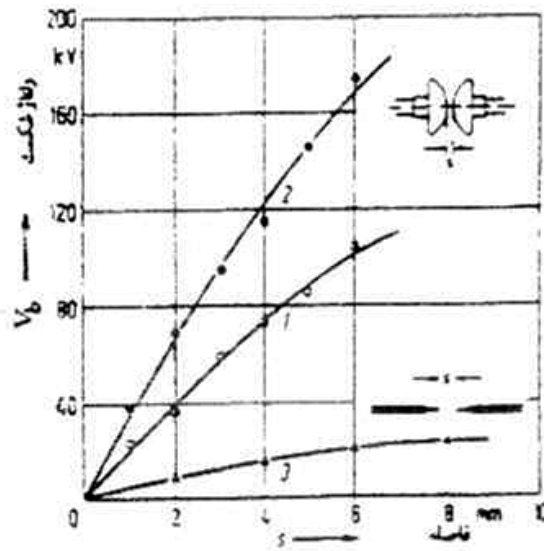
σ = کشش سطحی روغن بر حسب dyn/cm

ϵ_1 = عدد دی الکتریک روغن است.

۸-۳- عوامل موثر بر ولتاژ شکست عایق مایع:

وجود ناخالصی ها، منشاء شکست الکتریکی در عایق های مایع مورد استفاده در تجهیزات الکتریکی هستند. علاوه بر وجود رطوبت، گازهای حل شده و حل نشده در عایق مایع، و ذرات جامد معلق در آن نیز، باعث کاهش استقامت الکتریکی عایق های مایع می گردند. عوامل متعددی بر مقدار ولتاژ شکست عایق های مایع موثرند که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) جنس الکترودها: جنس الکترودها و میزان ناهمواری سطح آنها در ولتاژ شکست موثرند. جنس الکترودها در انتشار الکترون از سطح کاتد موثر است و ناهمواری سطح آن نیز، در زیاد شدن دانسیته جریان در نقاط نوک تیز و ایجاد حباب های گازی در اثر بخار شدن مایع اطراف آن موثر هستند.



شکل (۳-۱۷): ولتاژ شکست برای الکترودهای مختلف

(۲) شکل الکترودها: با ثابت بودن سایر عوامل، ولتاژ شکست عایق مایع به شکل الکترودها بستگی دارد (شکل ۳-۱۷ را ببینید) مثلاً ولتاژ شکست عایق مایع برای الکترودهای کروی شکل، بیشتر از الکترودهای میله ای نوک تیز است. هر چه میدان، غیر یکنواخت تر باشد، ولتاژ شکست عایق مایع کمتر می شود؛ زیرا اطراف نقاط میدان قوی، مایع گرم شده و تجزیه گشته و تولید گاز می کند. (۳) فاصله بین الکترودها: با زیاد کردن فاصله بین الکترودها ولتاژ شکست به همان نسبت زیادتر نمی شود؛ بلکه ولتاژ شکست عایق مایع کم تر از مقدار مورد نظر است. این موضوع در رابطه تجربی زیر مشخص می شود:

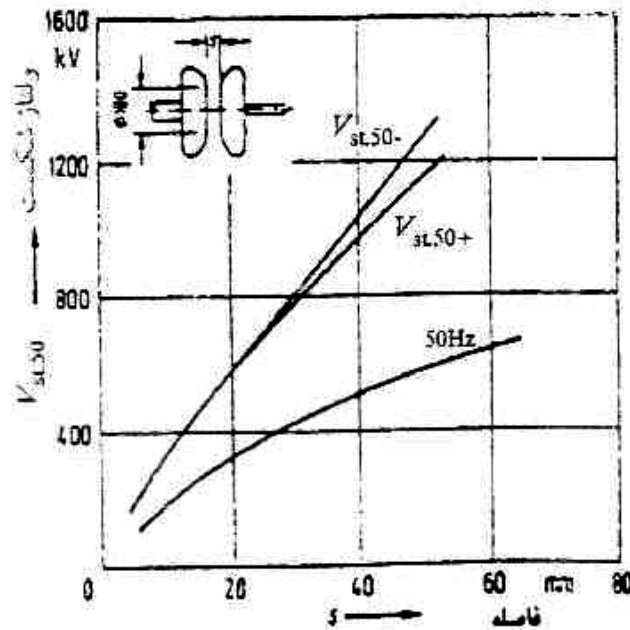
$$V_s = A d^n \quad (۳-۱۷)$$

که در این رابطه، d فاصله الکترودها، A عدد ثابت و n عدد ثابت و کوچک تر از یک است. پارامترهای A و n به شکل الکترودها و جنس آن بستگی دارند.

(۴) شکل ولتاژ اعمالی به عایق: بسته به شکل ولتاژ اعمالی که آیا ولتاژ دائم یا متناوب یا ضربه ای باشد، ولتاژ شکست عایق متفاوت است. در شکل (۳-۱۸)، ولتاژ شکست روغن بین الکترودهای صفحه -

صفحه برای ولتاژ متناوب 50Hz و ولتاژ ضربه مثبت و منفی با شکل موج $1/2/50$ میکروثانیه نشان داده شده است. در این شکل، دامنه ولتاژ شکست با احتمال 50% می باشد.

به طور کلی ولتاژ شکست عایق مایع، به مدت زمان اعمال ولتاژ بستگی دارد. اگر مدت زمان اعمال ولتاژ، کوتاه مدت باشد، استقامت الکتریکی آن بالاتر خواهد بود. بنابراین، ولتاژ شکست عایق مایع برای ولتاژهای ضربه ای، بیشتر از ولتاژهای متناوب با فرکانس صنعتی است. در حالت ولتاژ ضربه ای، زمان پیشانی و زمان نیم پشت موج در ولتاژ شکست عایق موثر است هر چه زمان نیم پشت موج بیشتر باشد، ولتاژ شکست مایع کمتر است. در مورد ولتاژهای ضربه ای با زمان خیلی کم، فرصتی برای به وجود آمدن پلی از ذرات معلق ایجاد نمی شود.



شکل (۱۸-۳): ولتاژ شکست

۵) سرعت افزایش ولتاژ: اگر ولتاژ را سریعاً بالا ببریم، در ولتاژ بالاتری، شکست الکتریکی واقع می شود؛ ولی اگر افزایش ولتاژ به تدریج، آهسته و با سرعت کم صورت گیرد، شکست عایق مایع در ولتاژ کمتری اتفاق می افتد. دلیل آن هم فرصت یافتن ذرات الیاف داخل روغن برای ساختن پل بین الکترودها و

پلاریزاسیون است.

(۶) درجه حرارت روغن: هر چه درجه حرارت روغن زیادتر شود، رطوبت آن کمتر می گردد و ولتاژ شکست آن بالاتر می رود. با افزایش درجه حرارت، میزان آب قابل حل در روغن بیشتر می شود و از این رو استقامت الکتریکی آن افزایش می یابد. (این موضوع در شکل ۱۷-۳ در مقایسه منحنی های ۱ و ۲ نشان داده شده است.) البته افزایش بیش از حد درجه حرارت، موجب اکسیداسیون روغن و کاهش استقامت الکتریکی آن می شود.

(۷) پوشاندن الکترودها در کاغذ:

اگر دو الکتروود در بردارنده عایق مایع را در پوشش عایق های جامد کاغذی قرار دهیم، پل های تشکیل شده از ذرات معلق داخل مایع، به الکترودها نمی رسند. از طرفی چون عددی دی الکتریک کاغذ بیشتر است، از شدت میدان الکتریکی اطراف الکترودها کاسته می شود. در این حالت، پوشاندن الکترودهایی که در ناحیه شدت میدان قوی تر هستند (مانند میله نوک تیز با شعاع خمش کم تر)، با کاغذ از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ این کار باعث بالا رفتن ولتاژ شکست عایق مایع خواهد شد. هر چه ضخامت کاغذ بیشتر باشد، ولتاژ شکست بالاتر می رود.

(۸) استفاده از ورقه کاغذ نازک بین الکترودها

اگر بین دو الکتروود در بردارنده عایق مایع، ورقه های کاغذی قرار دهیم و به این ترتیب فاصله بین دو الکتروود را به چند قسمت کوچک تر تقسیم کنیم، استقامت الکتریکی افزایش یافته و ولتاژ شکست افزایش می یابد. وجود این ورقه، مانع از تشکیل سریع پل های ناشی از ذرات معلق می شود. برای افزایش استقامت الکتریکی روغن در ولتاژهای بالا در تجهیزات الکتریکی فشار قوی، معمولاً از چندین ورقه کاغذی بین الکترودها استفاده می شود. این ورقه های کاغذ باید روی سطوح هم پتانسیل قرار گیرند تا استقامت الکتریکی روغن را خیلی زیاد بالا برند. شکل (۱۹-۳) نتایج آزمایش های اندازه گیری درصد افزایش ولتاژ شکست را، در اثر قراردادن یک ورقه کاغذ در عایق مایع نشان می دهد نتایج این

شکل، در حالتی است که عایق مایع، بین الکتروود میله نوک تیز - صفحه یا دو الکتروود کره - صفحه (در حالتی که ورقه مذکور به فاصله a از الکتروود میله نوک تیز یا الکتروود کره قرار دارد)، قرار گرفته باشد. از این شکل معلوم می شود که در یک مقدار معین از نسبت a/d لایه کاغذ، بیشترین اثر را در افزایش ولتاژ شکست عایق مایع دارد. این حالت وقتی است که صفحه، انطباق نزدیکی با سطوح هم پتانسیل میدان الکتریکی دارد.

به طور کلی ترکیب عایق های مایع با لایه های کاغذ، موجب افزایش استقامت الکتریکی عایق های مایع می گردد. از نظر اقتصادی نیز ترکیب عایق های مایع با لایه های کاغذی مناسب تر از استفاده از هر یک از عایق های مایع یا کاغذ به تنهایی است گر چه استقامت الکتریکی کاغذ، بیشتر از عایق مایع است، ولی استفاده از آن به تنهایی مقرون به صرفه نیست؛ مگر آن که فضای عایق کاری کم باشد. مهمترین نمونه های موارد کاربرد ترکیب عایق مایع روغن، با لایه های کاغذ در کابل های روغنی، پوشینگ ها (مقره های عبوری) و حتی در داخل ترانسفورماتورها است.

۹) حجم عایق:

آزمایش های متعدد نشان می دهند که با افزایش حجم عایق مایع، استقامت الکتریکی کاهش می یابد.

۹-۳- مدل انتقال حرارت الکتریکی و هیدرودینامیک الکتریکی شکست عایق:

اهمیت انتقال حرارت الکتریکی در مایعات عایقی در معرض ولتاژهای زیاد تا این اواخر احساس نشده بود. بیشتر کارهایی که در این مورد انجام شده مربوط به فلیسی و همکارانش می باشد. در مایعات عایقی با درجه خلوص بالا، قرار گرفته در معرض ولتاژ زیاد، هدایت الکتریکی عمدتاً در اثر حامل های باری است که از سطح الکتروود به داخل مایع تزریق می شود. بار فضای به وجود آمده نیروی کولمب را افزایش می دهد، که در شرایطی ویژه باعث ناپایداری هیدرودینامیکی منجر به جریان انتقال حرارت می گردد.

به عبارت دیگر هر گاه، هدایت در یک میدان با شکل گیری بار فضایی قابل ملاحظه همراه گردد. وقوع

حرکت انتقال حرارت بسیار محتمل است. لاکرویکس و همکاران شرایط حرکت متلاطم را مورد مطالعه قرار داده اند. آنها با استفاده از الکترودهای مسطح موازی و جریان تزریق کنترل شده، نشان دادند که آغاز ناپایداری با ولتاژ بحرانی مرتبط است. آنها مشاهده کردند که وقتی ولتاژ اعمالی تا نزدیکی ولتاژ بحرانی ازدیاد می یابد، حرکت در ابتدا یک ساختمان سلولی ۶ وجهی را نشان می دهد و با افزایش بیشتر ولتاژ، حرکت متلاطم می شود. بنابراین عملکرد متقابل میدان الکتریکی و بار فضا، نیروهای ایجاد کننده حرکت گردابی مایع را تقویت می کنند ثابت شده است که در ولتاژهای نزدیک به شکست، سرعت این حرکت به مقدار بدست آمده از رابطه $\frac{\sqrt{\epsilon}}{\rho E}$ نزدیک است. ϵ ضریب نفوذپذیری الکتریکی مایع، ρ وزن مخصوص و E شدت میدان الکتریکی است. در مایعات نسبت این سرعت به سرعت رانده شدن یون ها (KE) همیشه بزرگتر از یک و در برخی مواقع خیلی بزرگتر از واحد است. (جدول ۲-۳ را

$$\text{بینید). } K \text{ قابلیت جابجایی و } M = \frac{\sqrt{\epsilon}}{K} \text{ می باشد.}$$

ملاحظه شده است که M یک نقش مسلط را در تئوری انتقال حرارت الکتریکی بازی می کند. بنابراین حمل بار به طور گسترده ای به سبب حرکت مایع است تا به وسیله رانده شدن یونی. شرط کلیدی برای آغاز ناپایداری آنست که سرعت جریان محلی $u (= \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho} E})$ از سرعت رانده شدن یونی تجاوز کند.

$$(u > KE)$$

مقادیر تجربی M برای محیطهای سیال عایقی گوناگون و یون های معمولی به وسیله لاکرویکس به دست آمده است، که در جدول (۲-۳) دیده می شود. در جدول مزبور مقادیر مربوط به هوا در شرایط استاندارد نیز آمده است دیده می شود که در این حالت $M \ll 1$ و شدت انتقال حرارت الکتریکی قابل

$$M = \frac{\sqrt{\epsilon}}{K} \text{ چشم پوشی است، برای مایعات مختلف}$$

$$M = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon}{P}}}{K} \quad \text{جدول (۳-۲)}$$

<i>Medium</i>	<i>Ion</i>	<i>Relative permittivity</i>	<i>M number</i>
<i>Methanol</i>	H^+	33.5	4.1
<i>Ethanol</i>	Cl^-	25	26.5
<i>Nitrobenzine</i>	Cl^-	35.5	22
<i>Propylene carbonate</i>	Cl^-	69	51
<i>Transformer oil</i>	H^+	2.3	~200
<i>Air N.T.P</i>	O_2^-	1.0	2.3×10^{-2}

آزمایش ها نشان می دهد که انتقال الکتریکی در تمامی محیط های آزمایشی مایعات عایق در معرض میدان های الکتریکی شایع است این موضوع غیر از هندسه فاصله هوایی، حتی در مورد مایعاتی که واقعاً غیر قابل یونیزه اند. صادق است، مشروط بر این که ولتاژی به اندازه کافی بزرگ اعمال شود. علت آن تأمین یون کافی از طرف الکترودها است که به واسطه اثر فرآیندهای مربوط به شدت میدان می شود. کراس و همکاران حرکت القایی ناشی از فشار میدان را در روغن ترانسفورماتور تحت فشارهای dc و $60Hz$ مطالعه کرده اند. آنها با به کارگیری عکس برداری سریع شیلرن دریافتند که حرکت متلاطم ناشی از تزریق بارهای مثبت از یک الکتروده می باشد. این مسئله هم برای ولتاژ dc و هم برای ولتاژ $60Hz$ به اثبات رسید. آنها همچنین دریافتند که تأخیر زمان شروع ناپایداری به وضعیت تزریق یا تولید بار سطح الکترودها مربوط می شود و نیز دریافتند که تأخیر زمانی به سرعت با افزایش شدت میدان از چند ثانیه در 10^6 ولت بر متر تا چند میلی ثانیه (6×10^6) کاهش می یابد. دیده شد که در

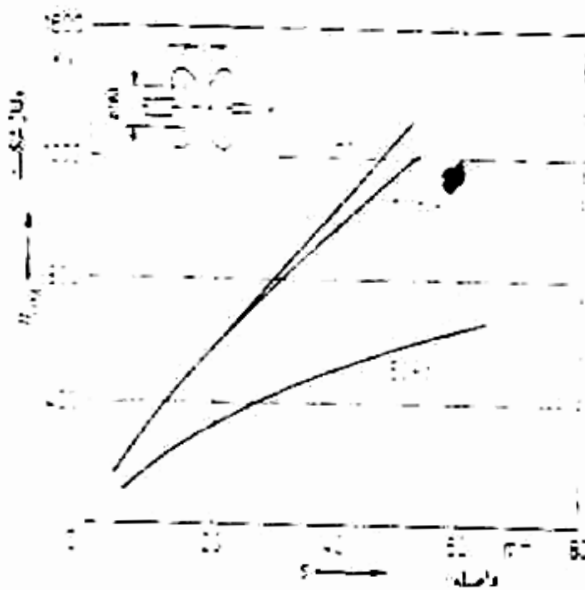
یک میدان مشخص تأخیر زمانی با افزایش دما، کاهش می یابد، همچنان که انتظار می رفت مشاهده شده که تحت ولتاژ 60Hz ، تأخیر زمانی به حد اقلی در حدود ۴ میلی ثانیه می رسد یک موج ۶۰ هرتز به $4/17$ میلی ثانیه زمان نیاز دارد که به پیک برسد. از این مشاهدات و محاسبات کراس و همکاران نتیجه گرفتند که تحت این شرایط، وقتی که شدت تزریق به حدی برسد که در خلال یک و نیم سیکل ولتاژ بحرانی را روی لایه بار فضا برقرار کند، ناپایداری رخ خواهد داد. کمترین مقدار ولتاژ بحرانی در جایی اتفاق می افتد که شرایط محدودیت بار فضا در الکتروود تزریق کننده غالب شود.

۱۰-۳- شکست الکتریکی در ولتاژ ضربه :

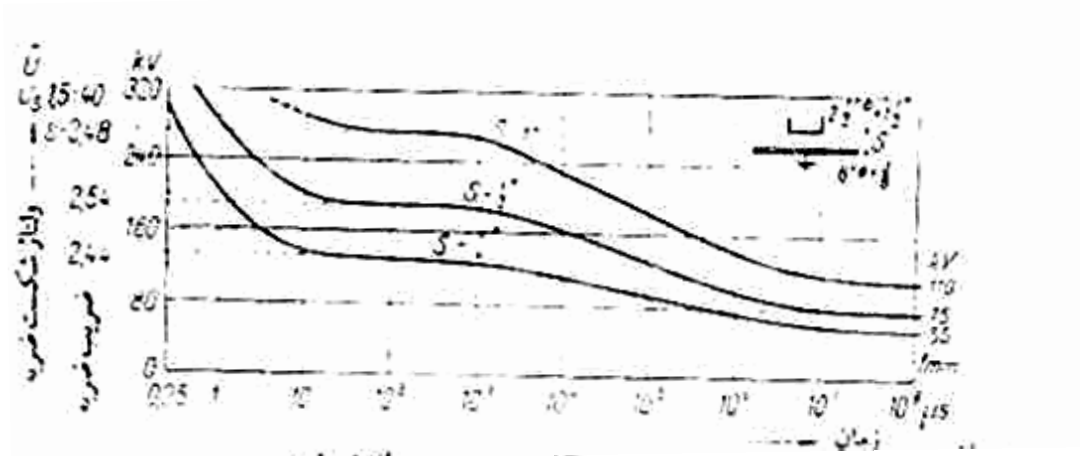
در مورد ولتاژهای کوتاه مدت مانند ولتاژ ضربه، فرصت برای به وجود آمدن پلی از ذرات معلق نیست. در این مورد تصور می شود که الکترون های موجود در روغن در میدان الکتریکی و در فضای خالی بین مولکول ها شتاب گرفته و انرژی کسب می نمایند. در این فضاهای خالی گازهای تبخیر شده از عایق مایع و یا گازهای حل شده در مایع وجود دارند. فضاهای دیگری نیز به صورت حبابهای کوچک گاز در روغن به دلیل وجود میدان الکتریکی، تجزیه عایق مایع و یا اشباع شدن مایع از گازهای حل شده در آن بوجود می آید. در این فضاهای کوچک بین مولکول ها و در حبابهای کوچک به جهت بالا بودن شدت میدان الکتریکی یونیزاسیون گاز یا تخلیه جزئی پدید می آید که منجر به تجزیه عایق مایع و افزایش گاز و بزرگ شدن حباب می گردد. در داخل این حباب ها تخلیه الکتریکی مطابق آنچه در مورد تخلیه الکتریکی در گازها بیان شد صورت می پذیرد و باعث تجزیه بیشتر عایق مایع و بزرگ شدن حباب گاز و نهایتاً تخلیه الکتریکی می گردد. ضمن آنکه شدت میدان الکتریکی نیز در درون حباب گاز افزایش می یابد.

شکل های (۳-۴) و (۳-۵) و (۳-۶) تغییرات ولتاژ شکست و شدت میدان الکتریکی شکست را برای روغن ترانسفورماتور در فرکانس صنعتی بر حسب فاصله نشان می دهد. در این شکلها U_d دامنه ولتاژ شکست،

U_d مقدار موثر ولتاژ شکست و U_a ولتاژ شروع تخلیه جزئی و U_a مقدار موثر ولتاژ شروع تخلیه جزئی می باشد شکل (۳-۲۰) ولتاژ شکست روغن بین الکترودهای صفحه - صفحه را برای ولتاژهای ضربه مثبت و منفی با شکل موج $1/2/50$ میکروثانیه نشان می دهد. در این شکل برای مقایسه ولتاژ شکست 50 هرتس نیز آ در شکل (۳-۲۱) تغییرات ولتاژ شکست برای الکترودهای میله - صفحه در روغن برحسب زمان برای سه فاصله مختلف نشان داده شده است. محور میله بر صفحه عمود می باشد. ابعاد برحسب اینچ در شکل مشخص شده اند. از این شکل معلوم می گردد که استقامت الکتریکی روغن بستگی به مدت زمان اعمال ولتاژ دارد و اگر ولتاژ کوتاه مدت باشد استقامت الکتریکی خیلی بالاتر است. باید دقت داشت که 10^8 میکروثانیه بیش از $1/5$ دقیقه است. ورده شده است. در این شکل U_{50} 50 دامنه ولتاژ شکست با احتمال 50 درصد است.



شکل (۳-۲۰) ولتاژ شکست روغن بین الکترودهای صفحه - صفحه را برای ولتاژهای ضربه مثبت و منفی با شکل موج $1/2/50$ میکروثانیه نشان می دهد. برای مقایسه ولتاژ شکست 50 هرتس.

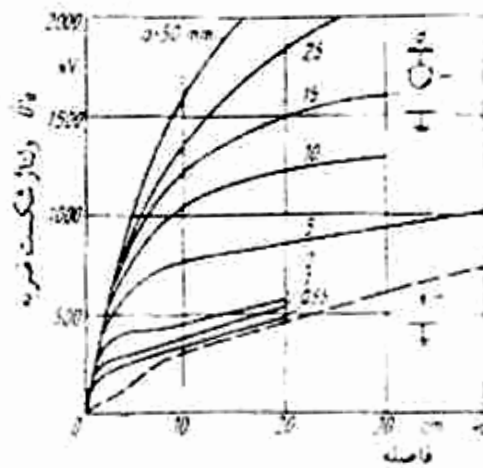


شکل (۳-۲۱) تغییرات ولتاژ شکست برای الکترودهای میله - صفحه در روغن برحسب زمان برای سه

فاصله مختلف نشان می دهد

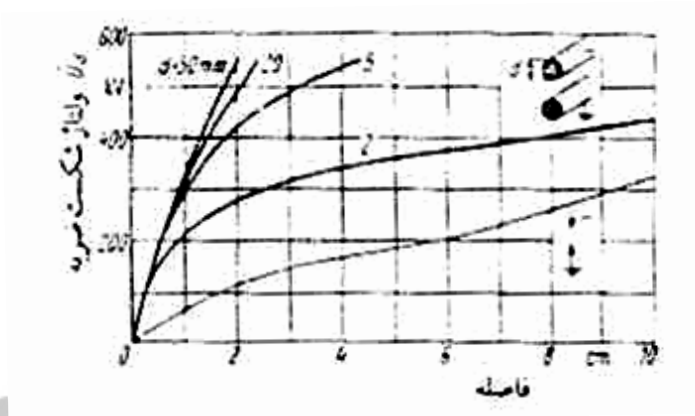
شکلهای (۳-۲۲) و (۳-۲۳) به ترتیب ولتاژ شکست الکترودهای کره - صفحه و استوانه - استوانه

موازی را برای ولتاژ ضربه و برای قطره های مختلف کره و استوانه در روغن نمایش می دهد.



شکل (۳-۲۲) تغییرات ولتاژ شکست برای الکترودهای میله - صفحه در روغن برحسب زمان برای سه

فاصله مختلف نشان می دهد

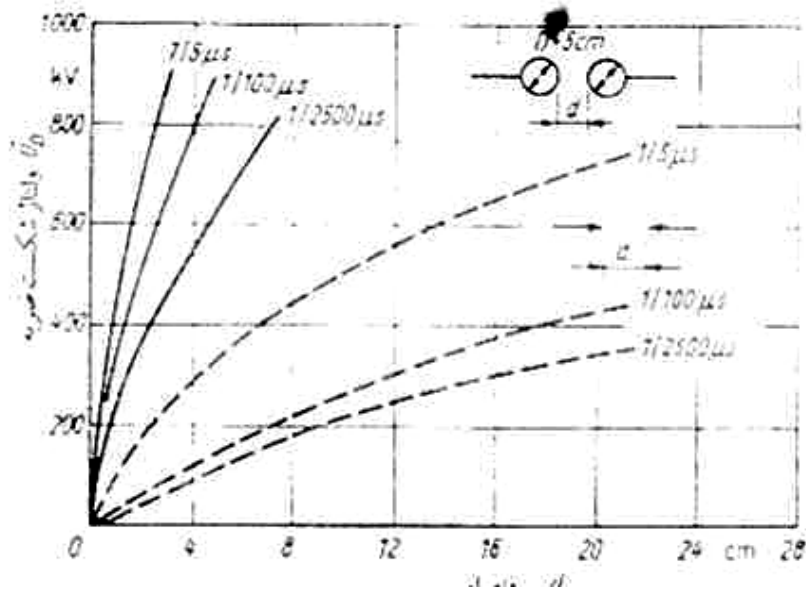


شکل (۲۳-۳) ولتاژ شکست الکترودهای کره - صفحه و استوانه - استوانه موازی

در ولتاژ ضربه نیم زمان پشت موج دارای اهمیت است. هر چه نیم زمان پشت موج بیشتر باشد، ولتاژ شکست پایین تر است. شکل (۲۴-۳) ولتاژ شکست روغن را برحسب فاصله برای ولتاژ ضربه با نیم زمانهای پشت مختلف نشان می دهد. در این شکل الکترودها در یک حالت از نوع کره - کره به قطر ۵ سانتی متر و در حالت دیگر از نوع سوزن - سوزن می باشند.

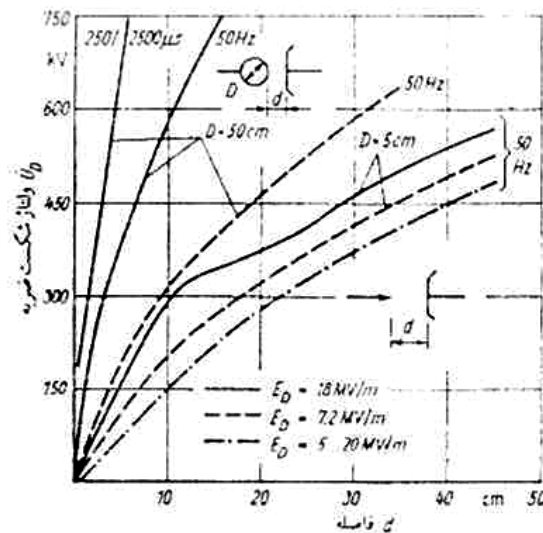
همانطور که بیان گردید، استقامت الکتریکی روغن به میزان آلودگی یعنی ذرات معلق بستگی دارد. رطوبت نیز دارای اهمیت فوق العاده است که در مورد آن صحبت خواهد شد. در مورد روغن آلوده، هر چه میدان غیر یکنواخت تر باشد، اثر آلودگی کمتر است. در حقیقت در اطراف سوزن با توجه به شدت میدان بالا، روغن تجزیه می شود و گاز تولید می نماید. این گاز است که باعث شکست می گردد در حالی که آلودگی اثر کمتری دارد در اینجا فرض بر این است که شدت میدان الکتریکی در اطراف سوزن خیلی زیاد باشد. در غیر این صورت در نوک سوزن گاز تولید نمی شود و در این حالت میدان غیر یکنواخت بهتر می تواند ذرات معلق را به طرف خود جذب کند. این مطلب را می توان از شکل (۲۵-۳)

نتیجه گرفت.



شکل (۳-۲۴) ولتاژ شکست روغن را برحسب فاصله برای ولتاژ ضربه با نیم زمانهای پشت مختلف نشان

می دهد



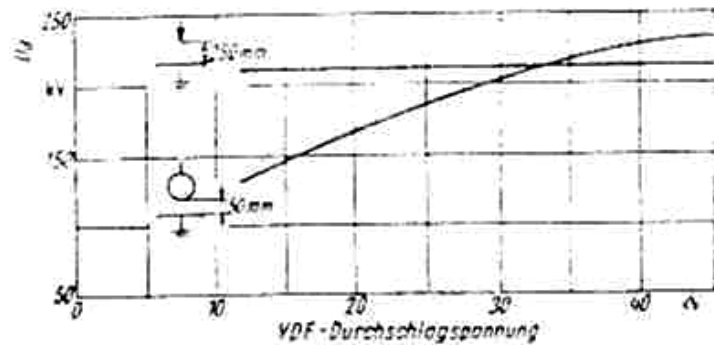
شکل (۳-۲۵) روغن نوع اول با منحنی یکنواخت روغن نوع دوم با منحنی خط چین و روغن نوع سوم با منحنی خط نقطه رسم شده است روغن نوع سوم فقط با الکترودهای سوزن - صفحه و ولتاژ متناوب بررسی گردیده است بدون اینکه استقامت الکتریکی روغن در ولتاژ شکست اثر قابل توجه ای داشته

باشد.

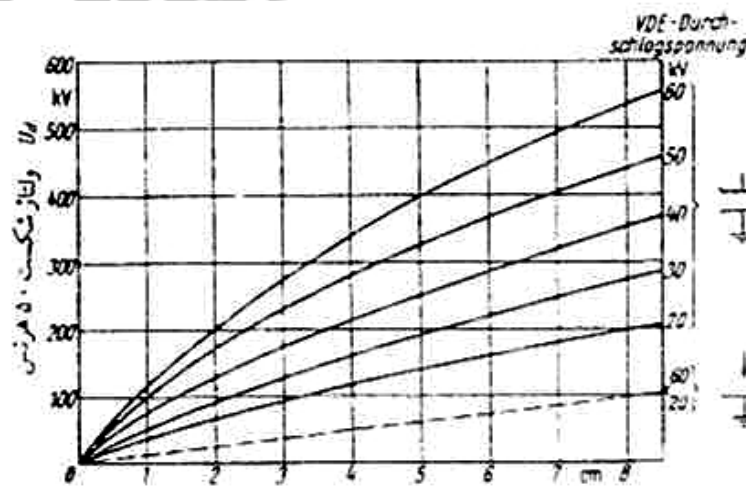
میدان غیر یکنواخت بهتر می تواند ذرات معلق را به طرف خود جذب کند. در این شکل ولتاژ شکست روغن برحسب فاصله برای الکترودهای کره - صفحه و سوزن - صفحه برای سه نوع روغن رسم شده است. یکی از سه روغن در آزمایشات استقامت الکتریکی بین الکترودهای عرقچین کره ای، با قطر ۲۵ و فاصله ۲/۵ میلیمتر مطابق استاندارد *VDE* یا *IEC* دارای استقامت الکتریکی ۱۸۰ کیلوولت بر سانتی متر و دیگری ۷۲ کیلوولت بر سانتی متر بوده است. نوع سوم روغن، در حقیقت چند روغن مختلف با استقامت الکتریکی بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوولت بر سانتی متر بوده است. در شکل (۳-۲۵) روغن نوع اول با منحنی یکنواخت روغن نوع دوم با منحنی خط چین و روغن نوع سوم با منحنی خط نقطه رسم شده است روغن نوع سوم فقط با الکترودهای سوزن - صفحه و ولتاژ متناوب بررسی گردیده است بدون اینکه استقامت الکتریکی روغن در ولتاژ شکست اثر قابل توجه ای داشته باشد.

در الکترودهای کره - صفحه با قطر کره برابر ۵۰ سانتی متر میدان یکنواخت است و نوع روغن اثر بیشتری دارد. برای قطر کره برابر ۵ سانتی متر نسبتاً غیر یکنواخت و اثر نوع روغن کمتر می باشد.

استقامت الکتریکی روغن در ولتاژ دائم و برای میدان های کمی غیر یکنواخت، نسبت به ولتاژ متناوب ۵۰ هرتس کمتر است با افزایش فرکانس تا ۱ کیلوهرتز، استقامت الکتریکی نیز بالا می رود و از ۱۰ کیلوهرتز بیشتر استقامت الکتریکی با افزایش فرکانس پایین می آید. این کاهش استقامت از تلفات انرژی ناشی می شود.



شکل (۳-۲۶)



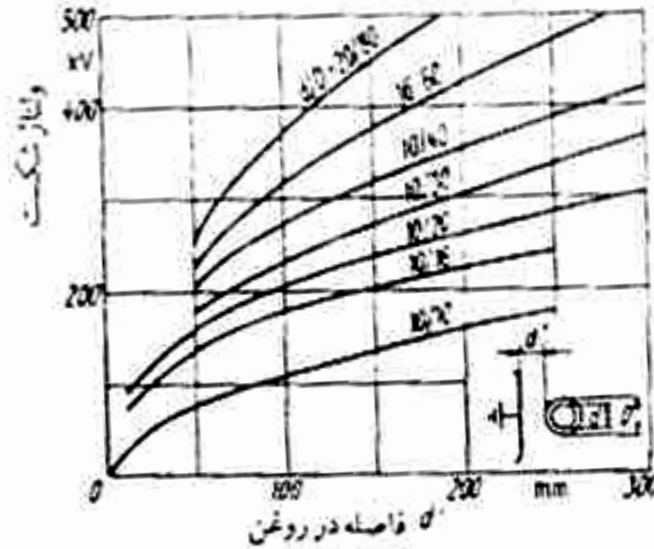
شکل (۳-۲۷)

در روغن نیز استقامت الکتریکی برای ولتاژ ضربه مثبت نسبت به ولتاژ ضربه منفی پایین تر است و این اثر در میدان غیر یکنواخت بیشتر ظاهر می گردد.

۳-۱۱- پوشاندن الکترودها با عایق جامد:

در صورتی که اطراف الکترودها را با عایقی جامد مثل کاغذ بپوشانند، ولتاژ شکست افزایش می یابد. زیرا از طرفی به دلیل عدد دی الکتریک بزرگتر کاغذ نسبت به روغن، از شدت میدان الکتریکی اطراف الکترودها کاسته می شود و از سوی دیگر ذرات معلق نمی توانند مستقیماً تا نزدیکی سطح الکترودها ایجاد

پل نمایند.



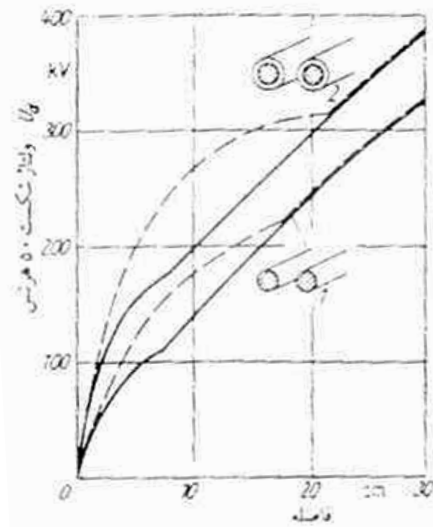
شکل (۲۸-۳) اثر پوشاندن الکتروود استوانه ای با کاغذ را برای الکتروودهای استوانه - صفحه نشان می

دهد.

البته در این رابطه، پوشاندن الکتروود تیز اثر بیشتری دارد. شکل (۳-۲۸) اثر پوشاندن الکتروود استوانه ای با کاغذ را برای الکتروودهای استوانه - صفحه نشان می دهد. در این شکل D ضخامت استوانه با عایق جامد (کاغذ) و d ضخامت استوانه بدون عایق می باشد. این مقادیر برحسب میلیمتر داده شده اند. هر چه ضخامت کاغذ بیشتر باشد، ولتاژ شکست بالاتر است. ولی تنها یک لایه نازک رنگ یا دو لایه کاغذ با ضخامت ۰/۰۷ میلیمتر می تواند موثر باشد.

در شکل (۳-۲۹) ولتاژ شکست برای الکترودهای استوانه - استوانه بدون عایق (لخت) و عایق شده با دو ورقه عایق نشان داده شده است. در منحنی پر قطر استوانه مساوی ۳ میلیمتر در منحنی خط چین قطر استوانه ۱۰ میلیمتر می باشد.

شکل (۳-۲۹) ولتاژ شکست برای الکترودهای استوانه - استوانه بدون عایق (لخت) و عایق شده با دو

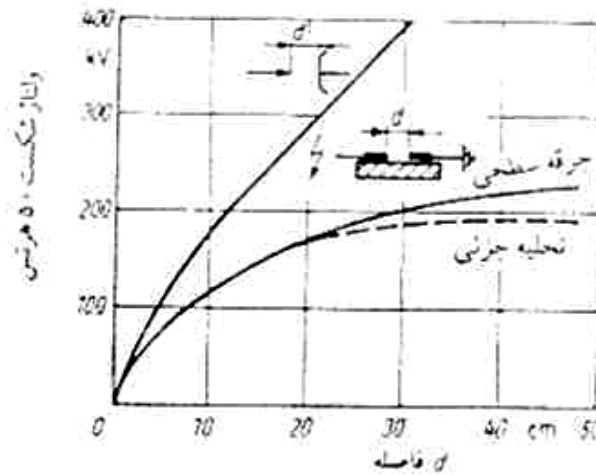


ورقه عایق نشان می دهد

۱۲-۳- اثر حایل:

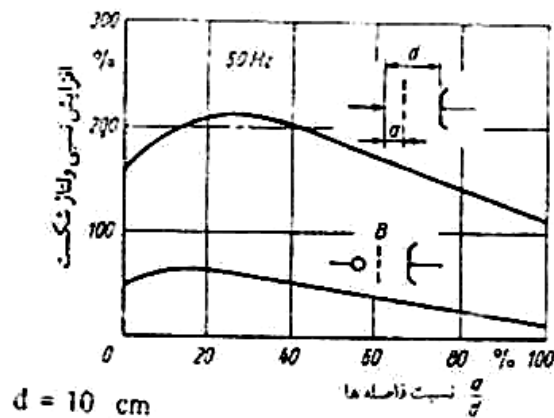
در عایق مایع با قراردادن حایل بین دو الکتروده می توان استقامت الکتریکی روغن را بالا برد. چرا که وجود یک حایل مانع از آن می شود که ذرات معلق بسادگی قادر به ایجاد پل گردند. در ولتاژ ضربه نیز این حایل باعث بالا رفتن استقامت الکتریکی می گردد. در حقیقت افزایش استقامت الکتریکی روغن برای ولتاژهای بالا فقط با استفاده از حایل ممکن است و برای تجهیزات الکتریکی با ولتاژ زیاد از چندین حایل استفاده می شود. چنین حایلی البته باید در حد امکان بر روی یک سطح هم پتانسیل قرار داشته باشد. در صورتی که حایل در امتداد خط نیرو باشد، استقامت الکتریکی را پایین می آورد.

این حالت از نظر عایق کاری نقطه ضعف بزرگی می باشد. شکل (۳-۳۰) کاهش ولتاژ شکست در روغن را برای حالتی که فصل مشترک عایق مایع و جامد موازی خط نیرو باشد را نسبت به الکترودهای سوزن - سوزن با همان فاصله نشان می دهد.



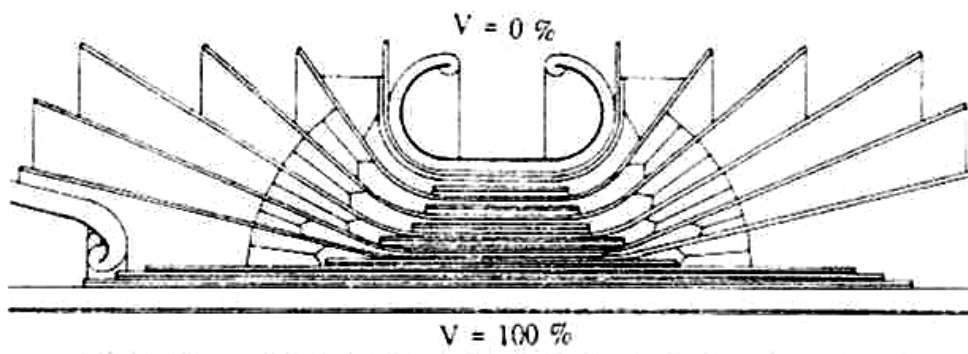
شکل (۳-۳۰) - کاهش ولتاژ شکست در روغن را برای حالتی که فصل مشترک عایق مایع و جامد موازی خط نیرو

در صورتی که اگر حایل بر روی صفحه هم پتانسیل قرار گیرد، استقامت الکتریکی بسیار بالا می رود. شکل (۳-۳۱) درصد افزایش ولتاژ شکست بین الکترودهای کره - صفحه و سوزن - صفحه را به دلیل قراردادن یک حایل نسبت به حالتی که حایل وجود نداشته باشد، نشان می دهد. در این شکل بین الکترودها با d و فاصله بین الکتروود تیزتر با حایل با a نمایش داده شده و محور افقی نسبت a/d می باشد.



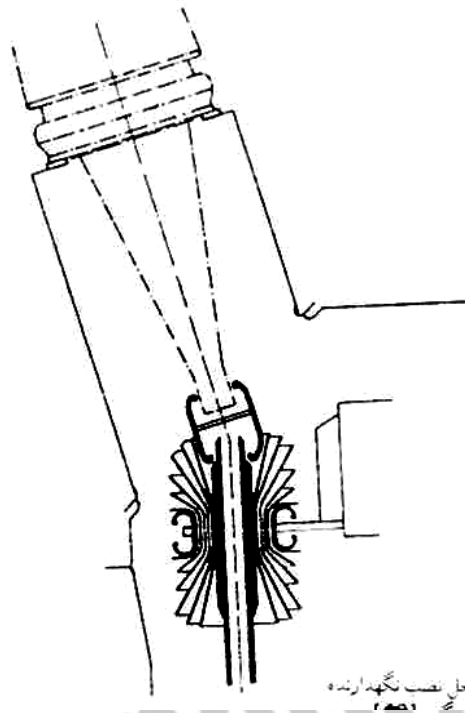
شکل (۳-۳۱): درصد افزایش ولتاژ شکست بین الکترودهای کره - صفحه و سوزن - صفحه را به دلیل قراردادن یک حایل نسبت به حالتی که حایل وجود نداشته باشد، نشان می دهد.

این روش برای دستیابی به استقامت الکتریکی کافی در ولتاژهای بالا ضروری است و گاه لازم است از چندین حایل استفاده شود. شکل (۳-۳۲) یک نگهدارنده را در داخل روغن نشان می دهد. از وسط این نگهدارنده یک لوله هادی که دارای ولتاژ فشار قوی است عبور می نماید. قسمت خارجی نگهدارنده یک الکترود چنبره ای شکل است که دارای پتانسیل زمین می باشد و بوسیله یک پایه به دیواره محکم شده است.



شکل (۳-۳۲) یک نگهدارنده را در داخل روغن نشان می دهد. از وسط این نگهدارنده یک لوله هادی که دارای ولتاژ فشار قوی است

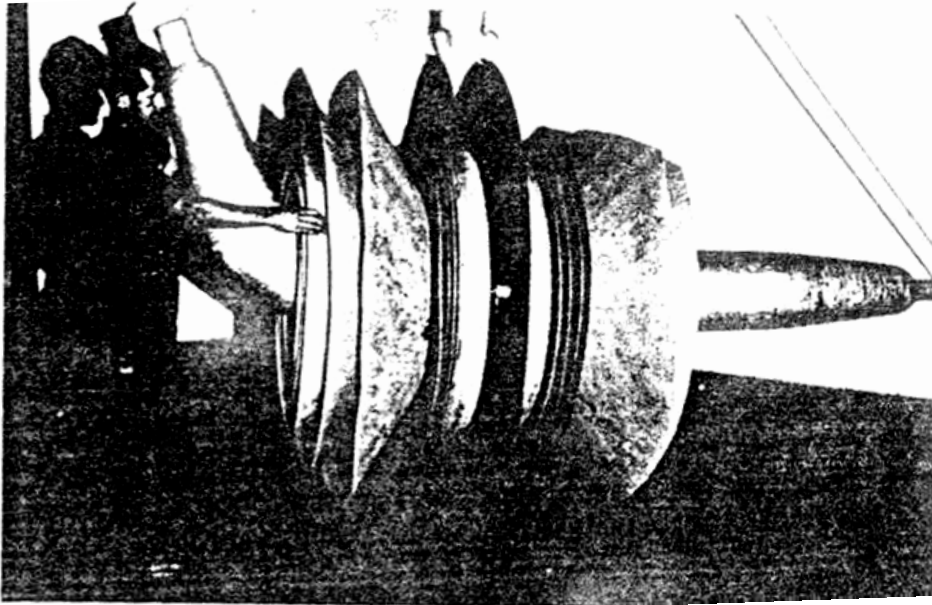
به این ترتیب لوله به دیواره محکم شده است تا بتواند نیروهای ناشی از جریان اتصال کوتاه را تحمل نماید.



شکل (۳-۳۳) محل قرار گرفتن چنین نگهدارنده ای را در یک ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت نشان می دهد.

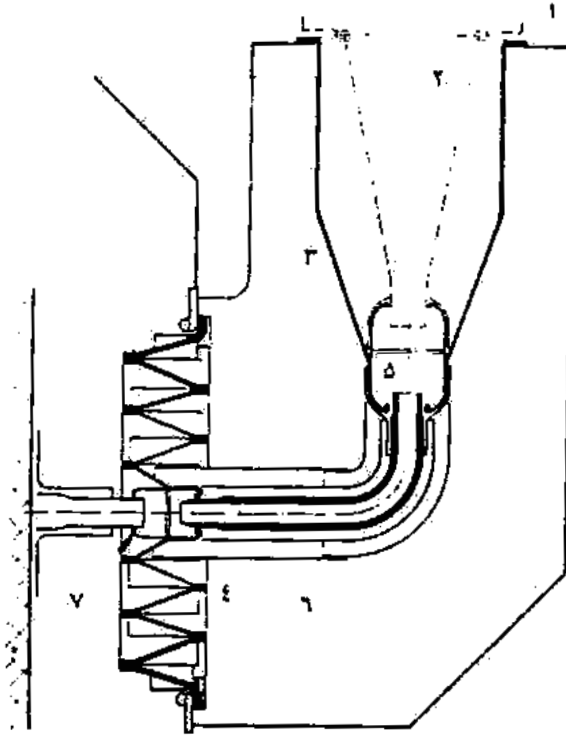
بوسیله یک پایه به دیواره محکم شده است به این ترتیب لوله به دیواره محکم شده است تا بتواند نیروهای ناشی از جریان اتصال کوتاه را تحمل نماید.

شکل (۳-۳۳) محل قرار گرفتن چنین نگهدارنده ای را در یک ترانسفورماتور ۴۰۰ کیلوولت نشان می دهد. لوله وسط نگهدارنده، خروجی سیم پیچ را به زیر پوشینگ وصل می کند. در تصویر (۳-۳۴) چنین نگهدارنده ای برای یک ترانسفورماتور قدرت با ولتاژ نامی ۱۲۰۰ کیلوولت نشان داده شده است. البته ساخت چنین ترانسفورماتوری جنبه تحقیقاتی دارد.



شکل (۳-۳۴): نگهدارنده برای ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۲۰۰ کیلوولت

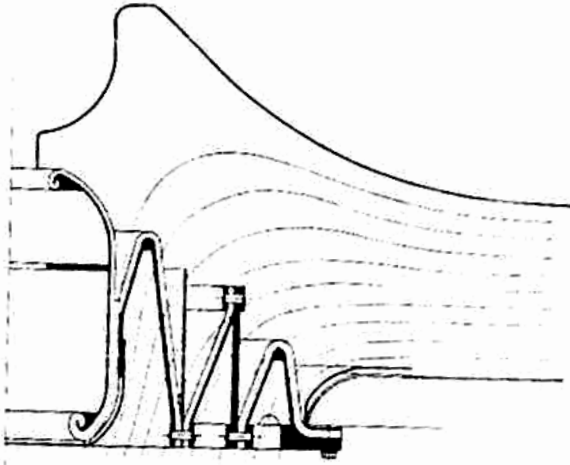
نکته جالب توجه در شکل‌های (۳-۳۲) تا (۳-۳۴) قراردادن حایل‌ها در امتداد سطوح هم‌پتانسیل است. ولی در بعضی موارد قرار دادن فصل مشترک عایق‌های مایع و جامد در امتداد سطح هم‌پتانسیل ممکن نیست و حتی لازم است این فصل مشترک، بین دو الکتروود هم‌پتانسیل قرار گیرد. در این صورت سعی میشود. طول خزندگی بزرگ باشد. در شکل (۳-۳۵) یک سطح جداکننده بین مخزن اصلی و مخزن زیر بوشینگ در یک ترانسفورماتور قدرت با ولتاژ نامی ۷۵۰ کیلوولت مشاهده می‌شود. برای افزایش طول خزشی، این جداکننده شبیه آکاردئون ساخته شده است. در این شکل جداکننده دیگری بین فلانش بوشینگ و نوک چتر بوشینگ قرار گرفته است که برای افزایش طول خزندگی به صورت مخروط ساخته شده است. این جداکننده‌ها، مانع از ورود آلودگی به ترانسفورماتور در موقع نصب و تعمیر می‌گردند. شکل (۳-۳۶) سطوح هم‌پتانسیل و جداکننده آکاردئونی را در یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳۵) : دو نوع جداکننده در یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۷۵۰ کیلوولت

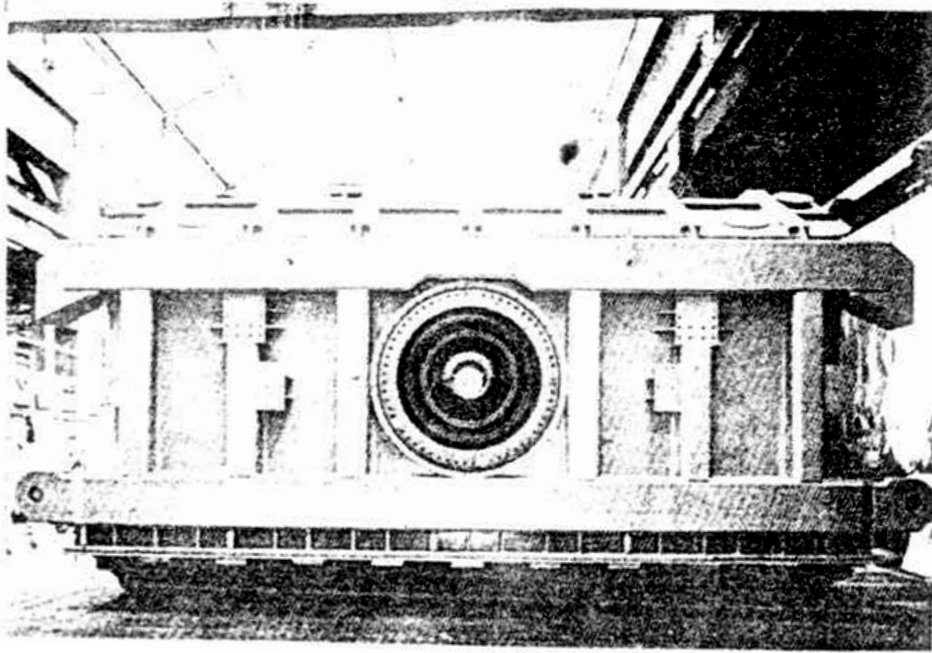
۱- فلانش پوشینگ ۲- پوشینگ ۳- جداکننده خمه ای ۴- جداکننده آکاردئونی ۵- چتر زیر پوشینگ

۶- مخزن زیر پوشینگ ۷- مخزن اصلی



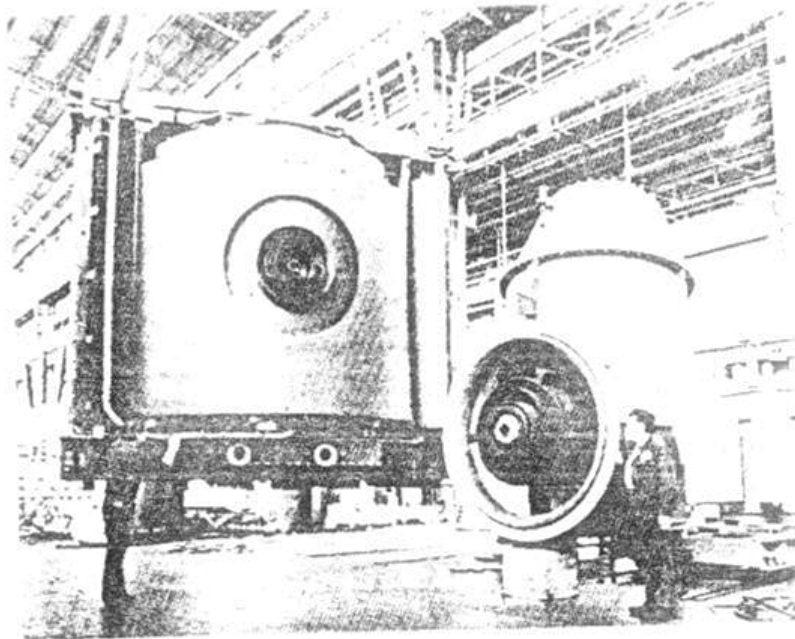
شکل (۳-۳۶): جداکننده آکاردئونی برای ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت و سطوح هم پتانسیل

شکل (۳-۳۷) یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت را پس از تکمیل و قبل از نصب زیر پوشینگ نشان می دهد. در این شکل جداکننده آکاردئونی بخوبی مشاهده می شود. در شکل (۳-۳۸) رابطه بین پوشینگ و بدنه ترانسفورماتور (اصطلاحاً زیر پوشینگ) و عایقهای آن برای یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت نشان داده شده است در این شکل هسته و سیم پیچ نیز مشاهده می گردند. شکل (۳-۳۹) ترانسفورماتور مذکور را پس از نصب پوشینگ نشان می دهد.

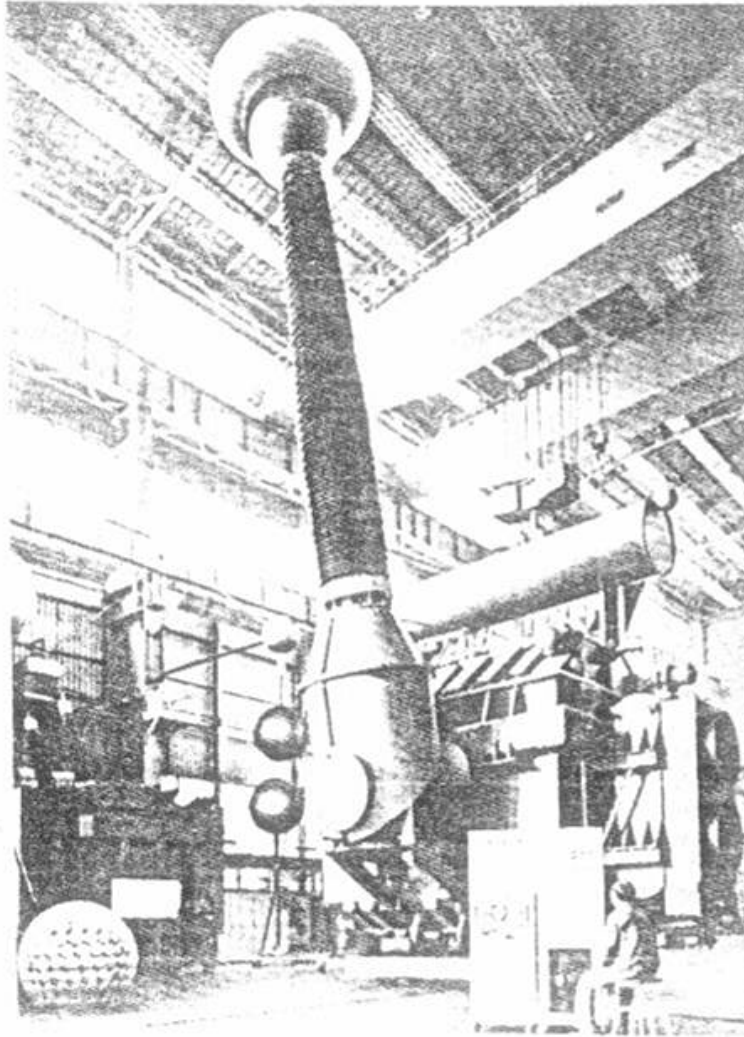


شکل (۳-۳۷): یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰ کیلوولت پس از تکمیل و قبل از نصب زیر پوشینگ.

در این شکل آکاردئونی بخوبی مشاهده می گردد.



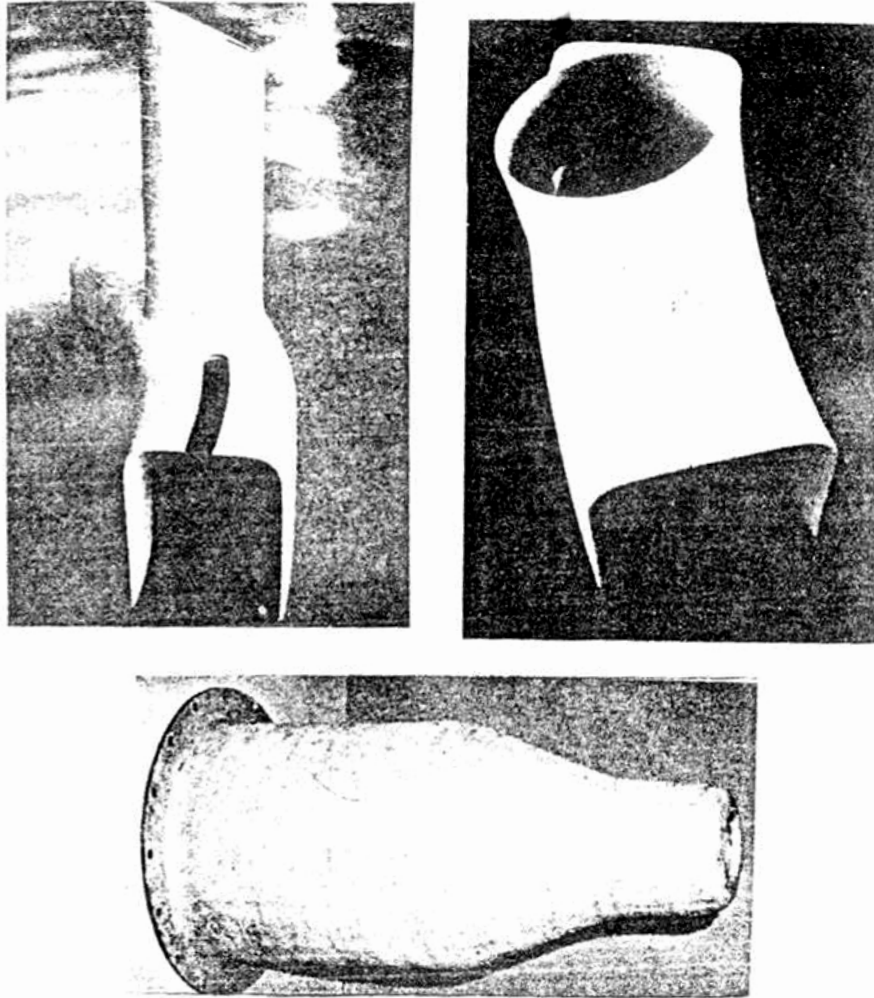
شکل (۳-۳۸): رابطه بین پوشینگ و بدنه ترانسفورماتور (اصطلاحاً زیر پوشینگ) و عایقهای آن در یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت. در این شکل هسته و سیم پیچ نیز مشاهده می شود.



شکل (۳-۳۹): ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۱۰۰۰ کیلوولت در آزمایشگاه فشارقوی

قطعات حایل و جداکننده با چندین ورق کاغذ ساخته می شوند. کاغذ کاملاً خیس، با دست بر روی قالبهای قرار داده می شوند. بدون چسب ورقه های کاغذ تحت فشار به یکدیگر می چسبند. شکلهای (۳-۴۰) قطعات مختلفی را که از این طریق ساخته شده اند و در ترانسفورماتورها به عنوان عایق مورد

استفاده قرار می گیرند، نشان می دهند.

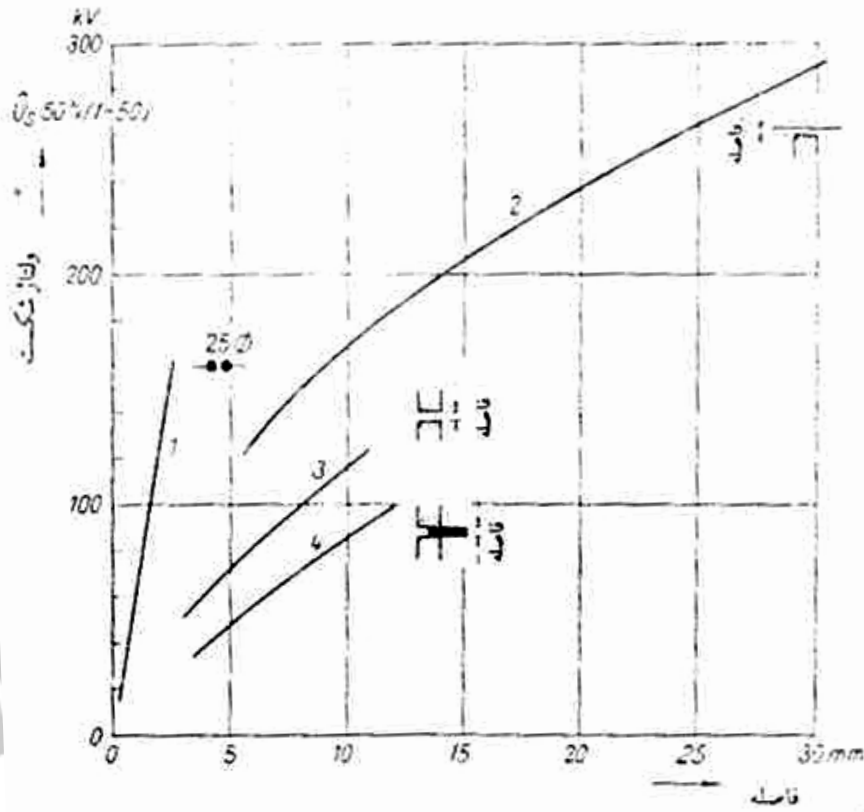


شکل (۳-۴۰): قطعات حایل و جداکننده برای استفاده در روغن

برای ساختن کاغذ عایق و برای شکل دادن آن از آب مقطر استفاده می شود و دقت زیادی صورت می گیرد تا حداقل آلودگی وارد این قطعات گردد.

همانطور که بیان شد، اگر فصل مشترک عایقهای مایع و جامد در امتداد خط نیرو باشد، استقامت الکتریکی عایق پایین می آید. در شکل (۳-۴۱) ولتاژ شکست برای چند نوع الکتروود مختلف در روغن

ترانسفورماتور برای ولتاژ ضربه برحسب فاصله نشان داده شده است. منحنی ۱ دو الکتروود کره ای با قطر ۲۵ میلیمتر، منحنی ۲ الکتروودهای استوانه - صفحه و منحنی ۳ دو الکتروود استوانه ای با قطر مساوی که در امتداد هم قرار دارند و منحنی ۴ همان دو الکتروود به همراه یک ورقه کاغذ فشرده که بین آنها قرار گرفته است را نشان می دهد. این کاغذ سبب بروز تخلیه سطحی می گردد یعنی فصل مشترک دو عایق جامد و مایع در جهت خطوط نیرو هستند. اختلاف بین دو منحنی ۳ و ۴ اثر تخلیه سطحی یا تأثیر قرار گرفتن فصل مشترک دو عایق را در جهت خطوط نیرو نمایش می دهد.

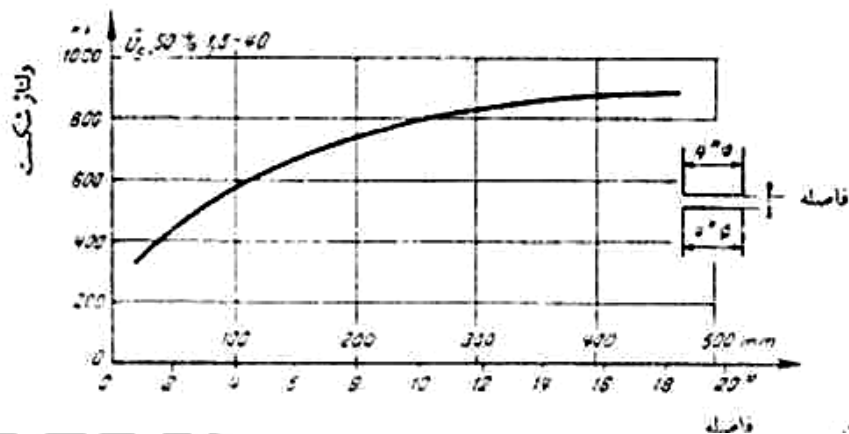


شکل (۳-۴۱): ولتاژ شکست برای چند نوع الکتروودهای مختلف برحسب فاصله در روغن ترانسفورماتور با ولتاژ ضربه $1/50$ میکروثانیه و اثر تخلیه در فصل مشترک عایقهای مایع و جامد

شکل (۳-۴۲) ولتاژ شکست برحسب فاصله را برای دو الکتروود استوانه ای با قطر ۴ اینچ و لبه های تیز

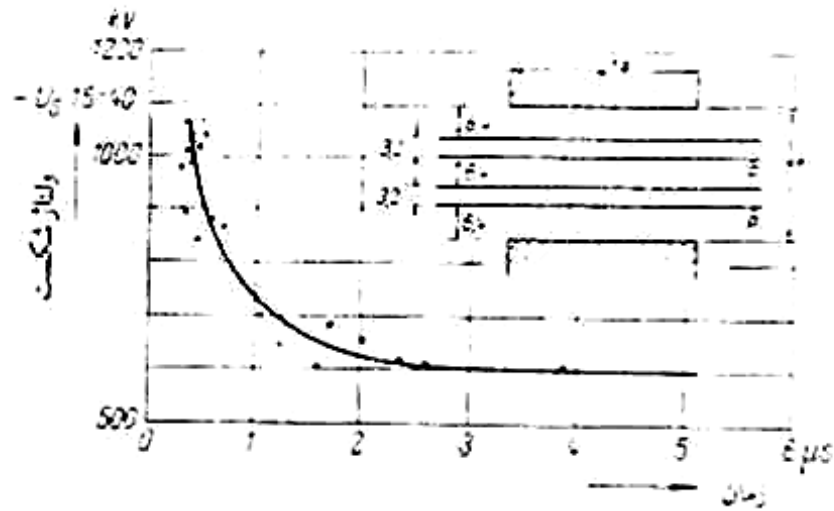
که در امتداد یکدیگر قرار دارند، نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده ضربه منفی $1.5/40$ میکروثانیه است. با افزایش فاصله ولتاژ شکست فقط تا حد معینی بالا می رود. برای افزایش بیشتر ولتاژ شکست می باید از حایل استفاده نمود.

در شکل (۳-۴۳) مشخصه شکست بر حسب زمان برای دو الکتروود استوانه ای که در امتداد یکدیگر قرار دارند، نشان داده شده است. در بین الکتروودها دو ورقه حایل قرار دارند. فاصله الکتروودها ۱ اینچ می باشد که به ۳ فاصله مساوی روغنی هر یک برابر $6/4$ میلیمتر تقسیم شده است و دو حایل از جنس پرس شپان هر یک با ضخامت $3/2$ میلیمتر بین آنها قرار دارند. شکل (۳-۴۴) همین مشخصه را در حالی که فاصله الکتروودها و ضخامت ورقه های پرس شپان نصف شده است، نشان می دهد. با مقایسه بین دو شکل اخیر می توان دریافت که با دو برابر شدن ابعاد، ولتاژ شکست دو برابر نمی شود.



شکل (۳-۴۲): ولتاژ شکست بر حسب فاصله در روغن ترانسفورماتور برای ولتاژ ضربه $1/5/40$ میکروثانیه

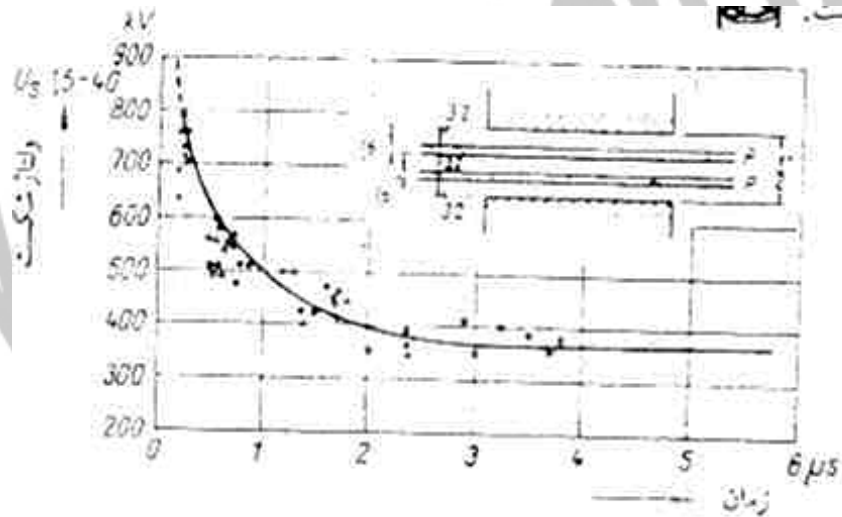
بین الکتروودهای استوانه ای با قطر ۴ اینچ (حدود ۱۰ سانتی متر)



شکل (۳-۴۳): زمان تأخیر شکست بین الکترودهای استوانه ای با قطر ۴ اینچ (حدود ۱۰ سانتی متر) در

روغن ترانسفورماتور در حالی که دو حایل از جنس پرس شپان بین الکترودها قرار دارد. ولتاژ اعمال

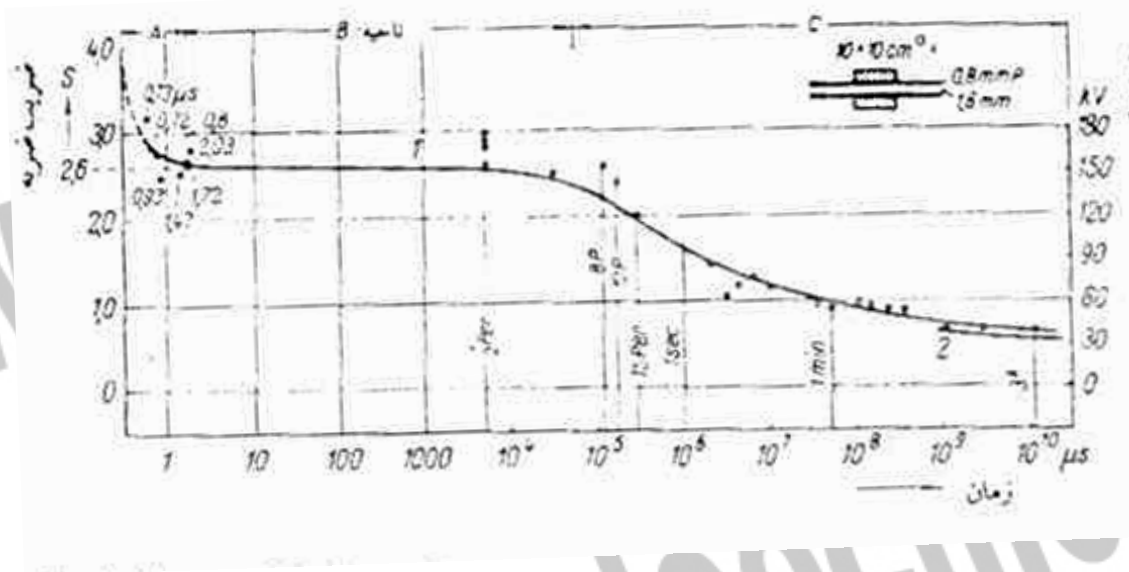
شده ضربه منفی ۱/۵/۴۰ میکروثانیه است.



شکل (۳-۴۴): زمان تأخیر شکست بین الکترودهای استوانه ای با فاصله ۵ سانتی متر، دیگر مشخصات

مانند شکل (۳-۴۳) می باشد.

شکل (۳-۴۵) مشخصه شکست بر حسب زمان برای دو الکتروود با مقطع مربع شکل به ابعاد 10×10 سانتی متر را که بین آنها دو ورقه شپان با ضخامت 0.8 میلیمتر و یک فاصله روغنی $1/6$ میلیمتری قرار دارد، نشان می دهد. در منحنی شماره ۲ ولتاژ شروع تخلیه خزنده بر روی سطح پرس شپان نشان داده شده است.



شکل (۳-۴۵): مشخصه شکست بر حسب زمان برای دو الکتروود با مقطع مربع شکل به ابعاد 10×10 سانتی متر را که بین آنها دو ورقه شپان با ضخامت 0.8 میلیمتر و یک فاصله روغنی $1/6$ میلیمتری قرار دارد، نشان می دهد. در منحنی شماره ۲ ولتاژ شروع تخلیه خزنده بر روی سطح پرس شپان نشان می دهد.

۳-۱۳ ضریب ضربه

در رابطه با شکل (۳-۴۵) می توان ضریب ضربه را تعریف نمود. این ضریب نسبت ولتاژ شکست برای ولتاژ ضربه، تقسیم بر ولتاژ شکست برای ولتاژ متناوب صنعتی است. مقصود از ولتاژ ضربه استاندارد یعنی $1/2/50$ میکرو ثانیه یا نزدیک به آن می باشد. این ضریب برای ترکیب عایق مایع و جامد بین ۲

و ۳ است و بستگی به مشخصات الکتروود ها و عایق دارد.

بدیهی است ، در صورتی که ولتاژ ضربه کوتاه مدت باشد ، ضریب ضربه بزرگتر است . ولتاژ شکست در ترکیب عایق مایع و جامد برای ولتاژ ضربه ۲ تا ۳ برابر ولتاژ شکست برای ولتاژ متناوب است . این ضریب می تواند در مواردی کوچکتر یا بزرگتر از مقادیر ذکر شده باشد . در شکل (۳-۴۵) این ضریب برابر ۲/۶ می باشد که با S نشان داده شده است.

۳-۱۴- ترکیب عایق های مایع و جامد

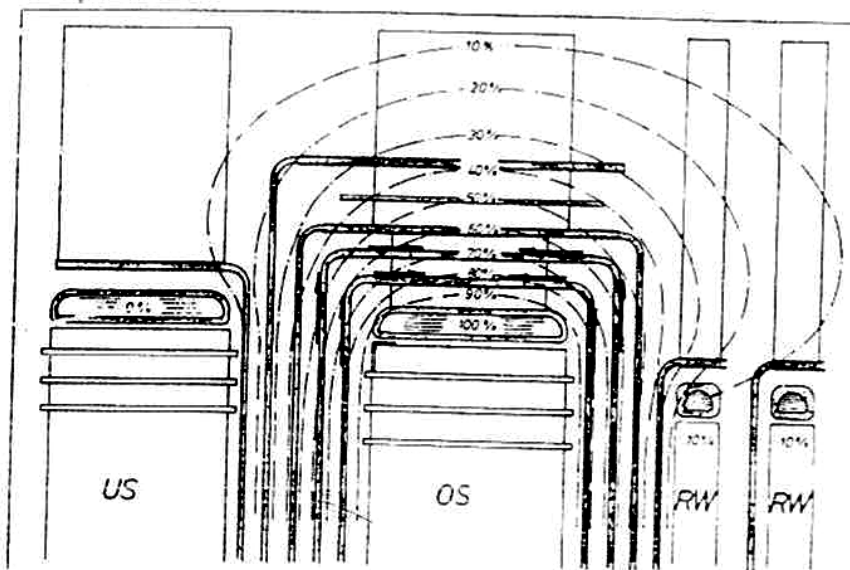
اثر حایل در روغن ، تقسیم طول عایق به چند قسمت است. از این راه می توان استقامت الکتریکی را بالا برد. در این بحث فرض بر آن بود که حایل تنها برای تقسیم فاصله است و خود تاثیر عایق کننده ندارد. به همین دلیل نیز حایل (همچنین پوشش الکتروود) نازک فرض شد.

در عمل برای ولتاژهای زیاد، از ترکیب عایق های مایع و جامد استفاده می گردد. در این حالت سعی می شود که فصل مشترک دو عایق ، سطح هم پتانسیل باشد و اگر لازم باشد که عایق جامد در بین دو الکتروود یا دو سطح با پتانسیل های متفاوت قرار گیرد ، طول خزندگی را افزایش می دهند . با رعایت این مطلب ، ترکیب عایق های مایع و جامد ، مانند روغن و کاغذ از استقامت بالایی برخوردار خواهند بود و از نظر اقتصادی مناسبتر از عایق جامد یا مایع می باشد که هر یک به تنهایی به کار می رود .

در حقیقت استقامت عایق جامد ، مانند کاغذ یا رزین اپوکسی یا نومکس که همراه با روغن عایق به کار می روند بیش از استقامت الکتریکی روغن است. ولی استفاده از عایق جامد به تنهایی همیشه مقرون به صرفه نیست . مگر آنکه فضای موجود برای عایق کاری کم باشد که در این صورت از عایق جامد استفاده می گردد. در کابل روغنی ، و در پوشینگ یا مقره عبوری عایق اصلی کاغذ است. در خازن نیز عایق اصلی ورقه نازک جامد می باشد. در این حالت روغن فقط برای پر کردن خلل و فرج نقش دارد.

بررسی ثنوری شکست در ترکیب عایقهای مایع و جامد البته پیچیده تر از حالتی است که تنها عایق مایع یا عایق جامد وجود داشته باشد. در هر صورت آزمایش نشان می دهد که افزایش ضخامت حایل که تا حدودی در امتداد سطوح هم پتانسیل باشد، در بالا بردن ولتاژ شکست نقش عمده ای دارد. در اینجا می توان تصور نمود که اگر ضخامت حایل کافی باشد، حتی اگر در یک قسمت از روغن شکست واقع گردد، حایل و قسمت های دیگر روغن، ولتاژ را تحمل می کنند.

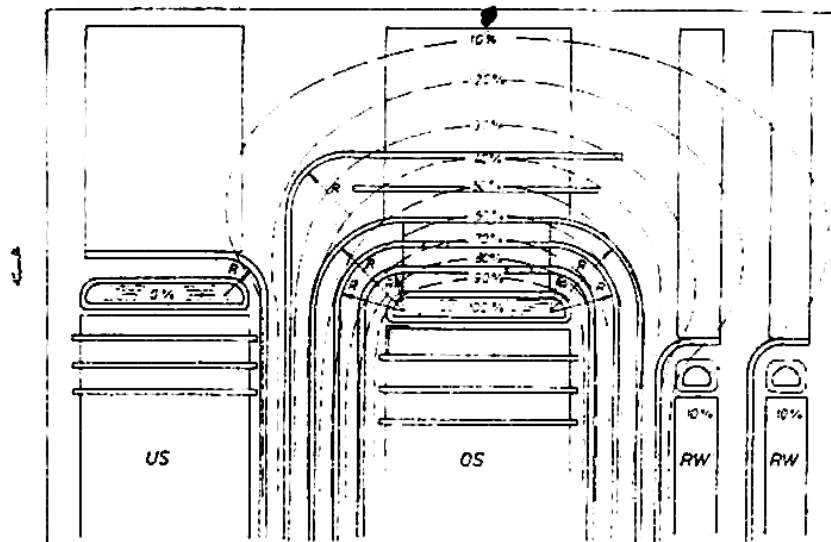
در طراحی عایق از ترکیب مایع و جامد باید دقت داشت که شدت میدان الکتریکی در هیچ یک از دو نوع عایق بیش از حد مجاز نباشد افزایش ضخامت عایق جامد ممکن است علاوه بر مخارج اضافی، باعث افزایش شدت میدان در عایق مایع گردد. محاسبه میدان الکتریکی و ترسیم خطوط هم پتانسیل در این موارد بسیار مفید است و اساس طراحی تجهیزات فشار قوی می باشد.



ورقه های حایل بین سیم پیچ ولتاژ بالا (*OS*) و سیم پیچ ولتاژ پایین (*US*) و سیم پیچ های تنظیم ولتاژ (*RW*) را در یک ترانسفورماتور در این شکل خطوط هم پتانسیل نیز رسم شده اند. پتانسیل سیم پیچ ولتاژ برابر ۱۰٪ از اختلاف پتانسیل کل فرض شده است.

شکل (۳-۴۶ الف وب) ورقه های حایل بین سیم پیچ ولتاژ بالا (OS) و سیم پیچ ولتاژ پایین (US) و سیم پیچ های تنظیم ولتاژ (RW) را در یک ترانسفورماتور قدرت نشان می دهد. در این شکلها خطوط هم پتانسیل نیز رسم شده اند. با توجه به خطوط هم پتانسیل حایلها در شکل (۳-۴۶ ب) مناسبتر می باشد.

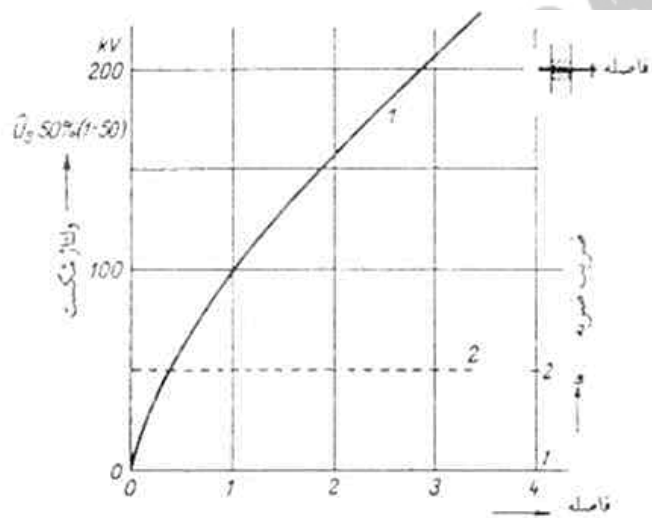
البته قراردادن حایل بر روی سطح هم پتانسیل در همه جا ممکن نیست. اغلب ماده عایق جامد به عنوان نگهدارنده مورد استفاده واقع می گردد و اجباراً، به دلیل مکانیکی، باید شکل خاص داشته باشد. در ولتاژهای نه چندان بالا و در صورت وجود فضای کافی، نیازی به دقت زیاد نیست و می توان راه اقتصادی تر را برای عایق کاری انتخاب نمود در یک دستگاه ممکن است عایق کاری بعضی قسمتها حساس تر بوده و در بعضی قسمتها، به دلیل کوچک بودن ولتاژ یا شدت میدان الکتریکی، از اهمیت کمتری برخوردار باشد. به هر حال لازم است شناخت کافی از استقامت الکتریکی عایق برای حالتی که اغلب پیش می آید، داشت و در طراحی از آن استفاده نمود.



شکل (۳-۴۶ ب) ورقه های حایل بین سیم پیچ ترانسفورماتور. در این شکل خطوط هم پتانسیل رسم شده اند. حایل ها با توجه به خطوط هم پتانسیل ساخته شده اند.

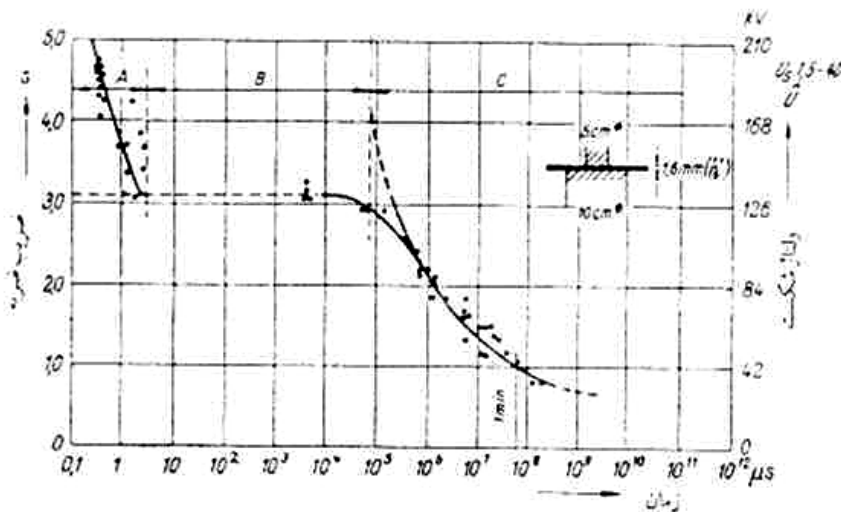
در اینجا باید توجه داشت که ولتاژ شکست بستگی به شرایط مختلفی دارد و ممکن است با تغییر این شرایط تغییر نماید. لذا نباید انتظار داشت که از نتایج آزمایشهای دیگران در همه جا استفاده نمود. بلکه لازم است طراح با انجام آزمایش در شرایط خاص خود، مشخصه شکست عایق را بررسی و از آن استفاده نماید. ولی البته نتایج بررسی دیگران برای شروع کار بسیار مفید است و در صورتی که فرصت و یا امکان آزمایش وجود نداشته باشد، می توان از این نتایج استفاده کرد. در اینجا با استفاده از منابع مختلف مشخصه های شکست در ترکیب عایق پرس شپان و روغن آورده شده است.

شکل (۳-۴۷) ولتاژ شکست ورقه پرس شپان داخل روغن را در بین الکترودهای لب تیز، برحسب ضخامت پرس شپان نشان می دهد. در این شکل ضریب ضربه نیز آورده شده و بدون توجه به ضخامت ورقه عایق برابر ۲ است.



شکل (۳-۴۷) ولتاژ شکست ورقه پرس شپان داخل روغن را در بین الکترودهای لب تیز، برحسب ضخامت پرس شپان. در این شکل ضریب ضربه نیز آورده شده و بدون توجه به ضخامت ورقه عایق برابر ۲ است. علامت ولتاژ ضربه منفی می باشد.

شکل (۳-۴۸) ولتاژ شکست ورقه پرس شیپان داخل روغن را در بین الکترودهای استوانه ای لب تیز برحسب زمان نشان می دهد. در این شکل ضریب ضربه نیز آورده شده است. ضخامت پرس شیپان $1/6$ میلیمتر و قطر الکترودها به ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی متر است. در این شکل سه ناحیه متفاوت مشاهده می شود. در ناحیه **A** ولتاژ شکست با افزایش زمان بشدت کاهش می یابد. در ناحیه **B** ولتاژ شکست با زمان تغییر عمده ای نمی کند و در ناحیه **C** بار دیگر ولتاژ شکست با زمان کاهش می یابد.



شکل (۳-۴۸) ولتاژ شکست ورقه پرس شیپان داخل روغن را در بین الکترودهای استوانه ای لب تیز برحسب زمان نشان می دهد. در این شکل ضریب ضربه نیز آورده شده است.

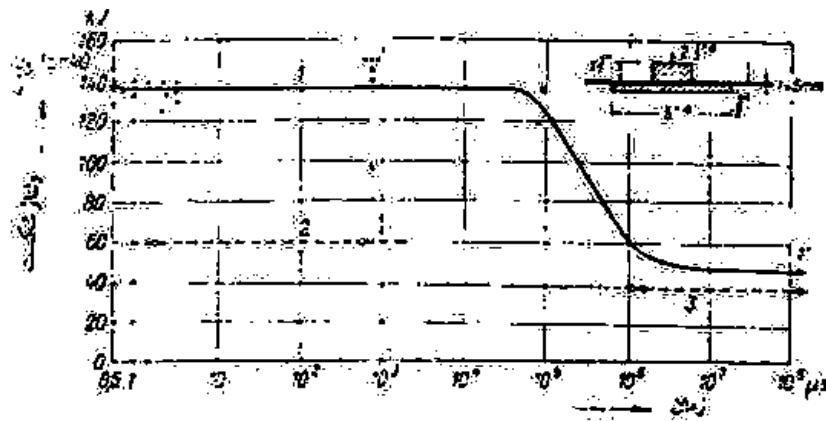
در اینجا ظاهراً دو نوع مکانیسم مختلف تخلیه وجود دارد که مستقل از یکدیگر عمل می نمایند چنانچه ملاحظه می گردد، به ازاء زمان اعمال ولتاژ کمتر از ۱۰۰ میکروثانیه یک نوع مکانیسم با یک نوع منحنی مخصوص به خود وجود دارد و به ازاء زمانهای بیش از ۱۰۰۰ میکروثانیه مکانیسم تخلیه تفاوت می کند و یک منحنی دیگر صادق می باشد. در مورد مکانیسم تخلیه در عایقهای جامد بعداً صحبت خواهد شد. در این شکل ضریب ضربه نیز آورده شده است. بدیهی است با تغییر زمان ضربه، این ضریب

کوچک می شود که برای یک دقیقه برابر یک است زیرا مبنای ضریب ضربه ولتاژ شکست متناوب یک دقیقه است.

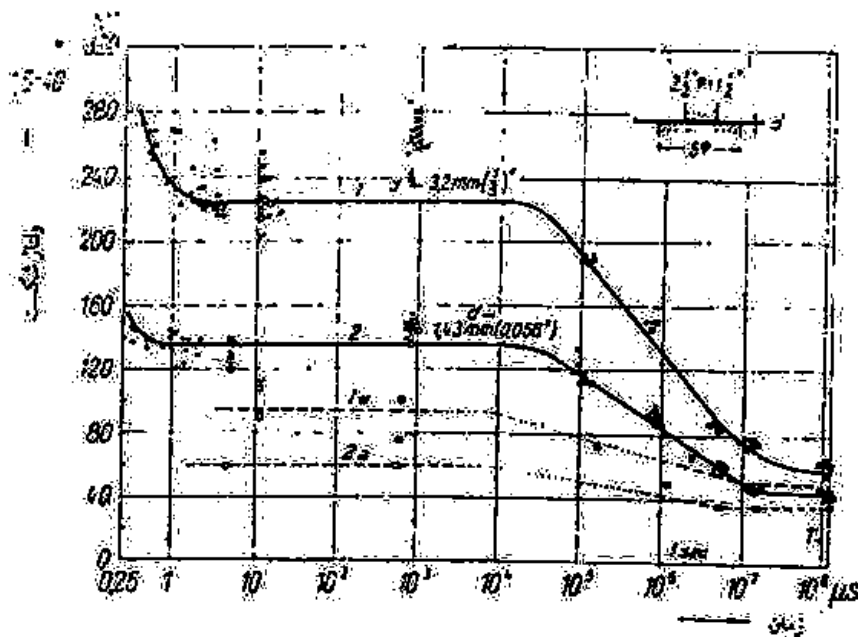
شکل‌های (۳-۴۹) و (۳-۵۰) همین مشخصه را برای ضخامت ورقه پرس شپان به ترتیب برابر $1/45$ و $3/2$ میلیمتر نشان می دهند. در شکل (۳-۴۹) ولتاژ شروع تخلیه خزنده نیز آورده شده است. تخلیه خزنده یک تخلیه جزئی می باشد. یعنی از الکتروود تیز شروع می گردد ولی به الکتروود دیگر نمی رسد. منحنی شماره ۲ در شکل (۳-۴۹) شروع تخلیه قابل دیدن و منحنی شماره ۳ در این شکل شروع تخلیه قابل شنیدن را نشان می دهد.

در شکل (۳-۵۰) منحنی شماره ۱ مربوط به شکست برای ضخامت $3/2$ میلیمتر و منحنی شماره ۲ مربوط به ضخامت $1/45$ میلیمتر می باشد. منحنی های $1a$ و $2a$ به همان ترتیب ولتاژ شروع تخلیه جزئی را نشان می دهند. علامتهای داخل شکل مربوط به نتایج هر آزمایش می شود. مفهوم این علامتها در زیر شکل (۳-۵۰) توضیح داده شده است.

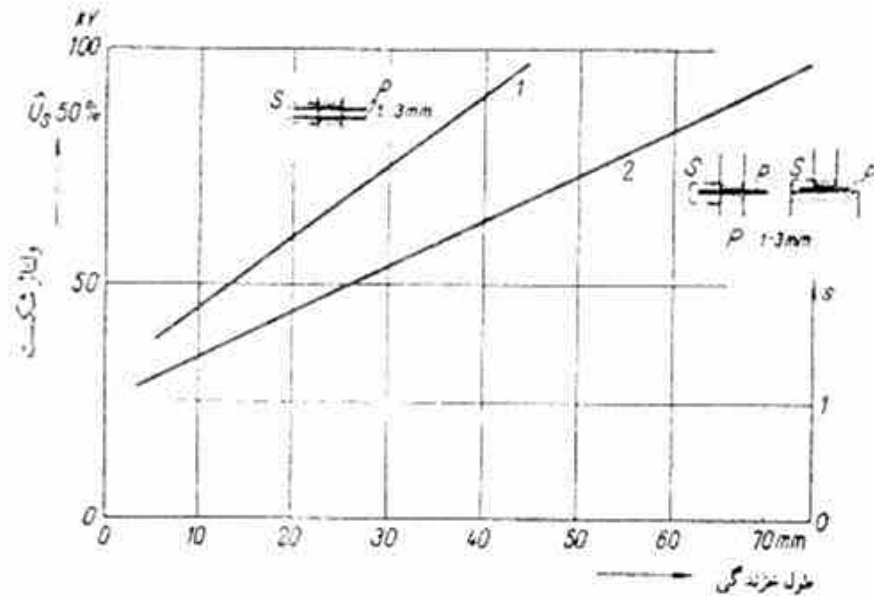
شکل (۳-۵۱) ولتاژ شکست خزنده را برحسب طول خزندگی نشان می دهد. در اینجا شکست خزنده یعنی شکستی که بر روی فصل مشترک عایقهای جامد و مایع انجام گیرد. شکل الکتروودها مشابه با آنچه که در شکل (۳-۴۹) داشتیم، می باشد. ولی در شکل (۳-۵۱) شکست بر روی سطح عایق جامد انجام می گیرد و عایق را سوراخ نمی کند. لذا همانطور که در این شکل مشاهده می شود، ضخامت عایق جامد می تواند بین ۱ تا ۳ میلیمتر تغییر کند، بدون آنکه در نتیجه تأثیر داشته باشد. منحنی شماره ۱ در این شکل، برای حالتی است که تخلیه، علاوه بر سطح عایق جامد یک مسیر در عایق مایع نیز داشته باشد. در منحنی شماره ۲ مسیر روغن وجود ندارد.



شکل (۳-۴۹) ولتاژ شروع تخلیه خزنده نیز آورده شده است. تخلیه خزنده یک تخلیه جزئی می باشد. یعنی از الکتروود تیز شروع می گردد ولی به الکتروود دیگر نمی رسد. شروع تخلیه قابل دیدن و منحنی شماره ۳ در این شکل شروع تخلیه قابل شنیدن را نشان می دهد.



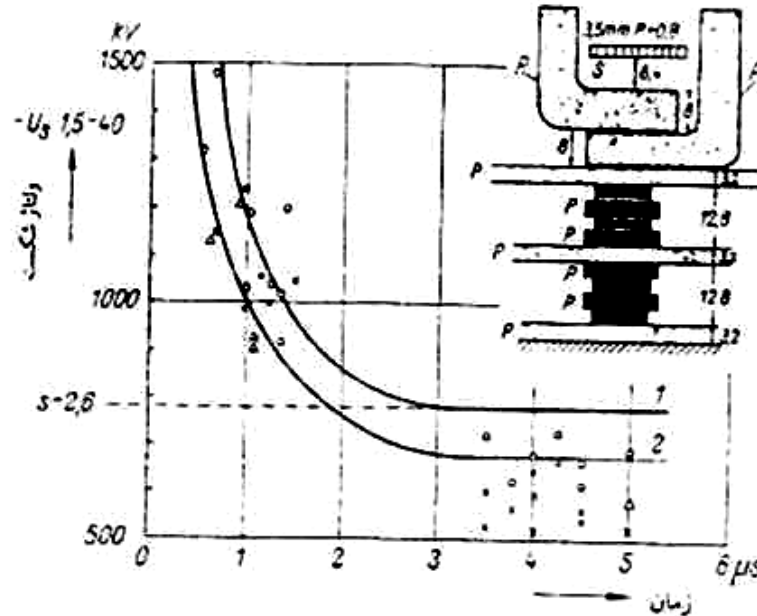
شکل (۳-۵۰) منحنی شماره ۱ مربوط به شکست برای ضخامت $3/2$ میلیمتر و منحنی شماره ۲ مربوط به ضخامت $1/45$ میلیمتر می باشد. منحنی های $1a$ و $2a$ به همان ترتیب ولتاژ شروع تخلیه جزئی را نشان می دهند. علامتهای داخل شکل مربوط به نتایج هر آزمایش می شود.



شکل (۳-۵۱) شکست بر روی سطح عایق جامد انجام می گیرد و عایق را سوراخ نمی کند. لذا همانطور که در این شکل مشاهده می شود، ضخامت عایق جامد می تواند بین ۱ تا ۳ میلیمتر تغییر کند، بدون آنکه در نتیجه تأثیر داشته باشد. منحنی شماره ۱ در این شکل، برای حالتی است که تخلیه، علاوه بر سطح عایق جامد یک مسیر در عایق مایع نیز داشته باشد. در منحنی شماره ۲ مسیر روغن وجود ندارد.

شکل (۳-۵۲) عایق بندی بیم سیم پیچ و هسته در ترانسفورماتور و ولتاژ شکست این عایق بندی را برحسب زمان نشان می دهد. عایق سیمها ۱/۵ میلیمتر کاغذ و ۰/۸ میلیمتر از جنس نوار پارچه پنبه ای است نکته جالب در این رابطه اینکه اگر ولتاژ ضربه چند بار به عایق اعمال شود، ولتاژ شکست پایین می آید. در این شکل منحنی شماره ۱ شکست در اولین ضربه و منحنی شماره ۲ شکست پس از چند بار اعمال ولتاژ را نشان می دهد. در این شکل اگر ولتاژ از حد منحنی شماره ۳ بیشتر شود، تخلیه جزئی خزنده پیش می آید. منحنی شماره ۴ شکست در ولتاژ متناوب است و منحنی شماره ۵ شروع تخلیه

کیلوولت باشد و اگر دامنه ولتاژ متناوب برابر ۳۰۰ کیلوولت باشد شکست روی می دهد.

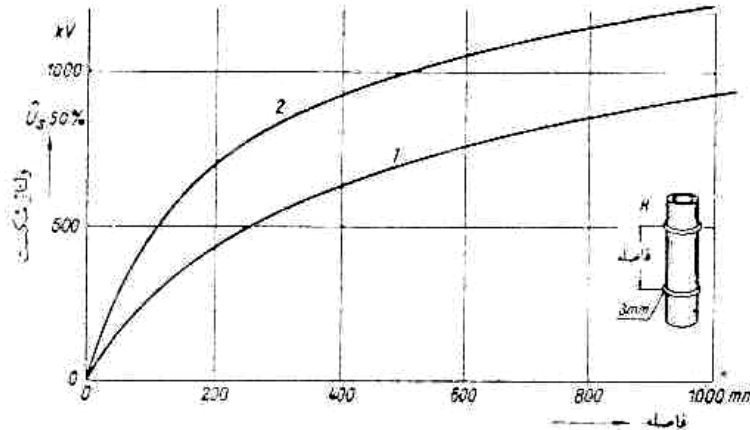


شکل (۳-۵۳) عایق بندی بین سیم پیچ و یوغ در یک ترانسفورماتور و تأخیر شکست این عایق بندی برحسب زمان. منحنی شماره ۱ شکست و منحنی شماره ۲ ولتاژ شروع تخلیه جزئی خزنده را نشان می دهد. شروع تخلیه خزنده در ولتاژ متناوب زمانی پیش می آید که حداکثر ولتاژ برابر ۲۸۰ کیلوولت باشد و اگر دامنه ولتاژ متناوب برابر ۳۰۰ کیلوولت باشد شکست روی می دهد.

شکل (۳-۵۴) ولتاژ شکست ضربه منفی برای دو الکتروود حلقه ای را بر روی لوله عایق از جنس کاغذ سخت یا فیبر استخوانی در داخل روغن برحسب فاصله نشان می دهد. ضخامت حلقه ها ۳ میلیمتر است. منحنی شماره ۱ مربوط به موج ۱/۵۰ میکروثانیه و منحنی شماره ۲ مربوط به موج ۱/۵ میکروثانیه (موج شکسته) می باشد.

شکل (۳-۵۵) پراکندگی ولتاژ شکست ضربه منفی را برای عایق بین دو حلقه مجاور نشان می دهد. این

عایق شامل کاغذ بر روی سیم و یک فاصله روغنی همراه با جداکننده می باشد. بدیهی است ولتاژ شکست بستگی به ضخامت کاغذ و فاصله روغنی دارد. ولتاژ شکست بین حلقه های مجاور برحسب فاصله روغنی و برای مقادیر مختلف ضخامت کاغذ روی سیم در شکل (۳-۵۶) نشان داده شده است.



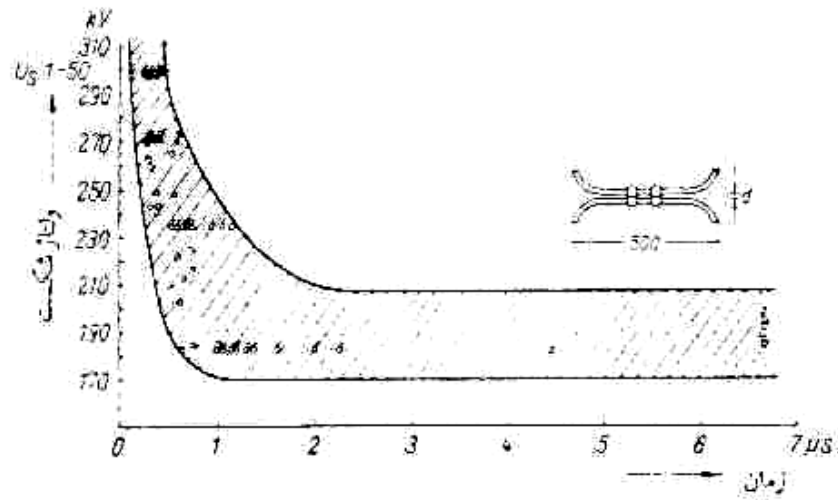
(۳-۵۶)

شکل

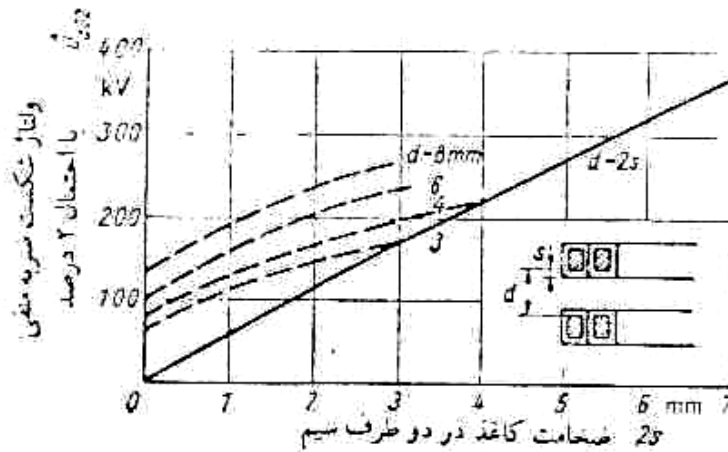
ولتاژ شکست ضربه منفی برای دو الکتروود حلقه ای را بر روی لوله عایق از جنس کاغذ سخت یا فیبر

استخوانی در داخل روغن برحسب فاصله نشان می دهد. منحنی شماره ۱ مربوط به موج ۱/۵۰

میکروثانیه و منحنی شماره ۲ مربوط به موج ۱/۵ میکروثانیه است.



شکل (۳-۵۵) پراکندگی ولتاژ شکست ضربه منفی را برای عایق بین دو حلقه مجاور



شکل (۳-۵۶): ولتاژ شکست ضربه منفی بین حلقه های مجاور برحسب فاصله روغنی و برای مقادیر

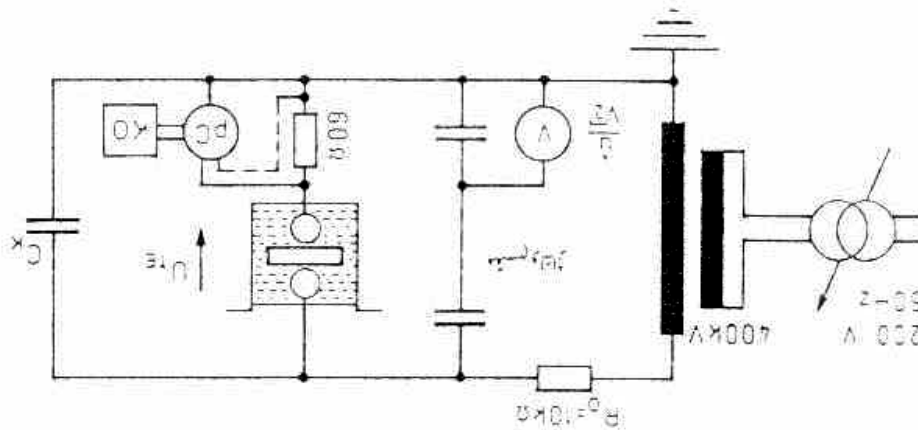
مختلف ضخامت کاغذ روی سیم

۳-۱۵- تخلیه جزئی در ترکیب عایقهای مایع و جامد:

از آنجا که تخلیه جزئی در مجاورت مواد عایق آلی باعث تخریب عایق و دیر یا زود منجر به شکست می

گردد، طراحی عایق بندی تجهیزات فشار قوی با توجه به این نکته انجام می گیرد یعنی در کار عادی و در ولتاژ نامی یا بهتر بگوییم در ولتاژ کار، نباید هیچ گونه تخلیه جزئی در عایق انجام گیرد. تخلیه جزئی دارای حالت هیستریزیس است؛ یعنی در ولتاژ بالاتری شروع و در ولتاژ پایین تری خاموش می گردد. لذا این خطر وجود دارد که بر اثر اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه، تخلیه جزئی شروع شود و در ولتاژ نامی خاموش نگردد. عایق بندی دستگاه ها با توجه به این نکته طراحی می گردد.

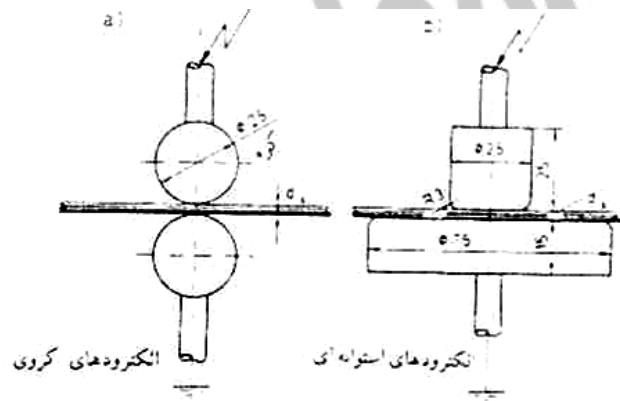
شکل (۳-۵۷) مدار اندازه گیری ولتاژ شروع تخلیه جزئی را نشان می دهد. میزان تخلیه جزئی نیز با کمک این مدار اندازه گیری می شود. در این شکل PC دستگاه اندازه گیری تخلیه جزئی و KO اسیلوسکوپ می باشد. تخلیه جزئی را بر حسب PC یعنی پیکوکولن می سنجند و آن بار الکتریکی است که بر اثر تخلیه جزئی، در زمان معینی مثلاً در هر پریود، از امپدانس 60 اهم در این مدار عبور می نماید. در این مدار ولتاژ را بالا می برند و تخلیه جزئی را برای هر مقدار ولتاژ اندازه می گیرند. ولتاژی که در آن تخلیه جزئی شروع می گردد، ولتاژ شروع تخلیه جزئی خوانده می شود.



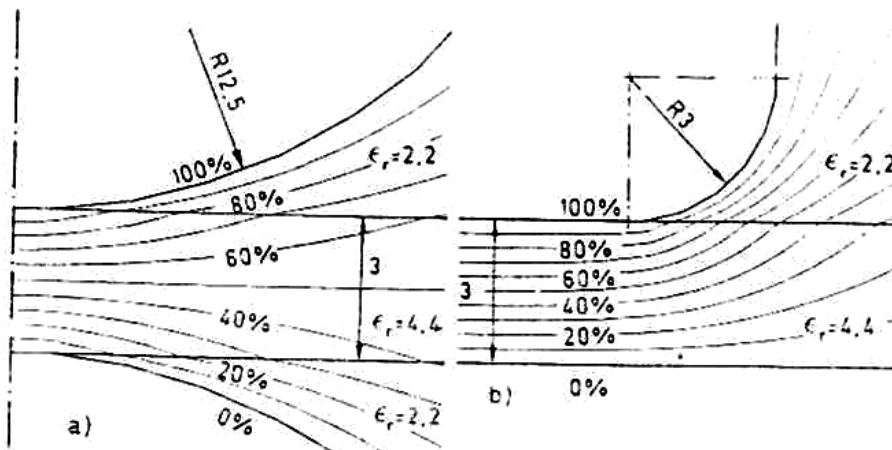
شکل (۳-۵۷) مدار اندازه گیری ولتاژ شروع تخلیه جزئی

الکترودها در این مدار ممکن است کره ای شکل یا استوانه ای شکل با لبه تخت باشند. شکل (۳-۵۸)

الکترودهای معمول برای این اندازه گیری را نشان می دهد. الکترودهای استوانه ای مطابق استاندارد *IEC 641-2 / IEC 243* می باشند. شکل (۳-۵۹) میدان الکتریکی این الکترودها را در حالی که در روغن قرار گرفته و بین آنها ورقه پرس شپان با ضخامت ۳ میلیمتر و $\epsilon_r = 4.4$ وجود دارد، نشان می دهد. عدد دی الکتریک روغن برابر ۲/۲ انتخاب شده است.



شکل (۳-۵۸) الکترودهای معمول برای اندازه گیری ولتاژ شروع تخلیه جزئی

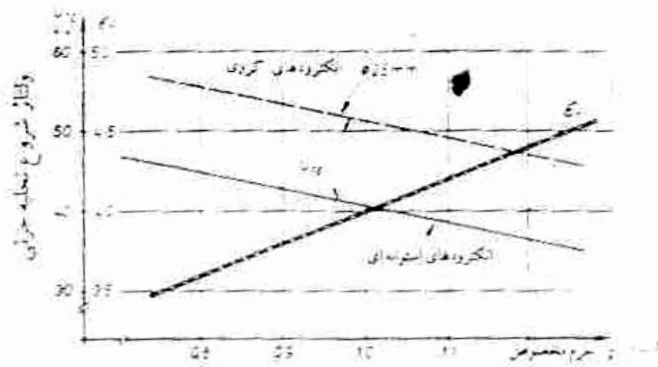


شکل (۳-۵۹) میدان الکتریکی الکترودهای استوانه ای و کروی

مولفه شدت میدان الکتریکی در امتداد فصل مشترک عایق مایع و جامد، بر روی ولتاژ شروع تخلیه جزئی و شدت آن موثر می باشد. لذا ولتاژ شروع تخلیه جزئی برای الکترودهای کروی شکل، بالاتر می

باشد. نسبت عدد دی الکتریک پرس شپان به عدد دی الکتریک روغن در مولفه سطحی میدان موثر است و با بالا رفتن عدد دی الکتریک پرس شپان این مولفه بزرگ و ولتاژ شروع تخلیه جزئی کوچک می شود.

شکل (۳-۶۰) تغییرات ولتاژ شروع تخلیه جزئی را برای الکترودهای کروی و استوانه ای برحسب جرم مخصوص ورق پرس شپان با ضخامت ۳ میلیمتر نشان می دهد. جرم مخصوص در عدد دی الکتریک موثر است و رابطه عدد دی الکتریک با جرم مخصوص پرس شپان نیز در این شکل آورده شده است.

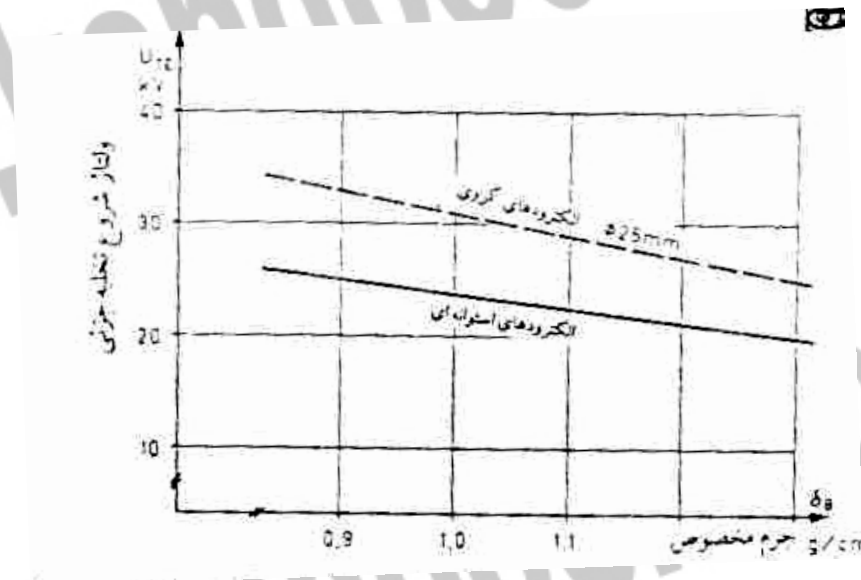


شکل (۳-۶۰) تغییرات ولتاژ شروع تخلیه جزئی را برای الکترودهای کروی و استوانه ای برحسب جرم مخصوص ورق پرس شپان با ضخامت ۳ میلیمتر نشان می دهد. جرم مخصوص در عدد دی الکتریک موثر است و رابطه عدد دی الکتریک با جرم مخصوص پرس شپان نیز در این شکل آورده شده است.

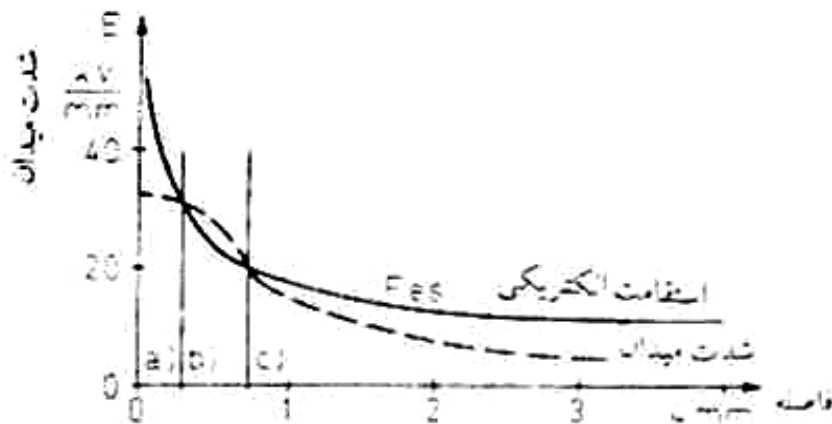
شکل (۳-۶۱) مشابه شکل (۳-۶۰) می باشد. ولی در این شکل ضخامت پرس شپان برابر ۱ میلیمتر است.

در شکل (۳-۶۲) استقامت الکتریکی روغن برحسب ضخامت فاصله روغنی و شدت میدان الکتریکی در نزدیکی الکترودهای کره در بین کره و عایق جامد، در حالی که اختلاف سطح بین دو کره برابر ۵۰ کیلوولت می باشد، رسم شده است. برای ضخامت روغن کمتر از ۰/۳ میلیمتر و بیشتر از ۰/۷ میلیمتر تخلیه

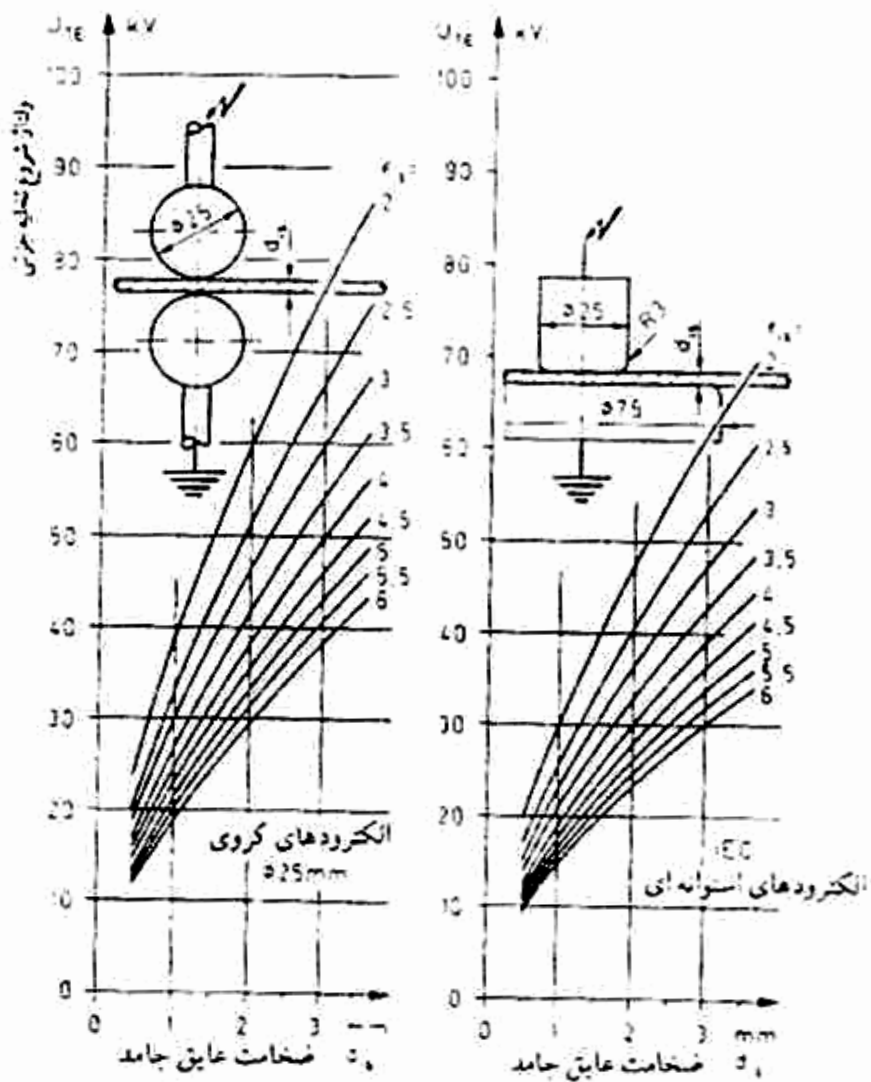
جزئی وجود ندارد در ضخامت روغن بین ۰/۳ و ۰/۷ میلیمتر تخلیه جزئی بوجود می آید. این نظریه تنها شدت میدان الکتریکی در روغن و نه مولفه سطحی شدت میدان در روغن را دلیل تخلیه جزئی می داند. با فرض صحت این نظریه، ولتاژ شروع تخلیه جزئی در شکل (۳-۶۳) برای ضخامتهای مختلف عایق جامد و اعداد دی الکتریک مختلف آن برای دو نوع الکتروود محاسبه و رسم شده است.



شکل (۳-۶۱): ولتاژ شروع تخلیه جزئی برای الکترودهای استوانه ای و کروی برای ورقه پرس شپان با ضخامت ۱ میلیمتر برحسب جرم مخصوص آن.



شکل (۳-۶۲) استقامت الکتریکی روغن بر حسب ضخامت فاصله روغنی و شدت میدان الکتریکی در نزدیکی الکترود کره در بین کره و عایق جامد، در حالی که اختلاف سطح بین دو کره برابر ۵۰ کیلوولت است

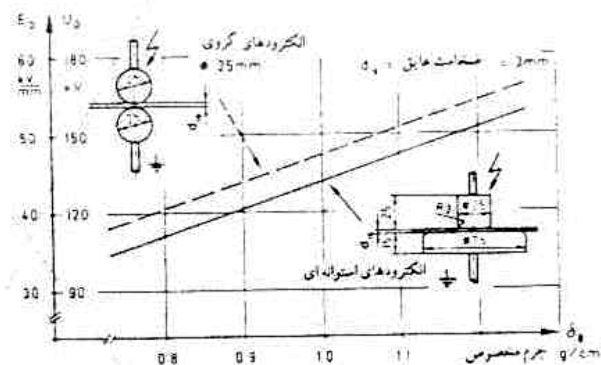


شکل (۳-۶۳) برای ضخامتهای مختلف عایق جامد و اعداد دی الکتریک مختلف آن برای دو نوع الکترود محاسبه و رسم شده است.

۱۶-۳- شکست عایق جامد در روغن:

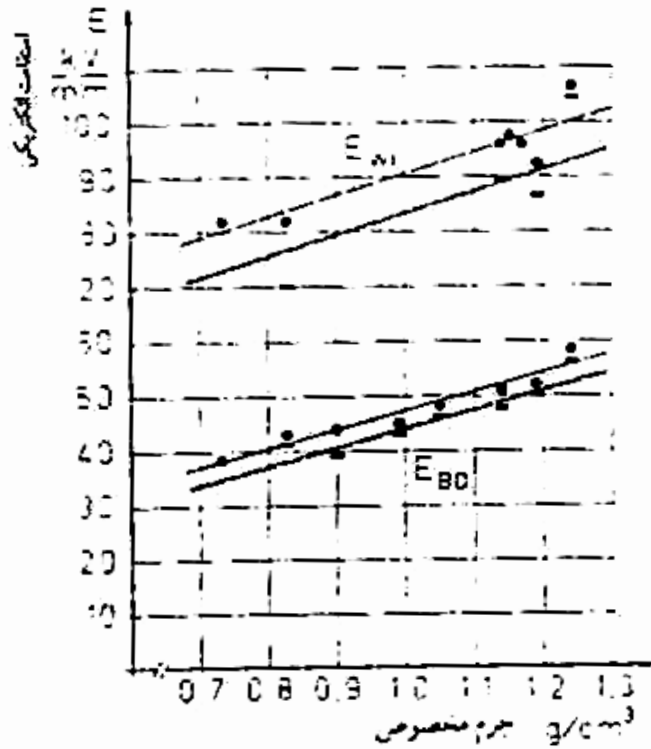
همانطور که گفته شد، تخلیه جزئی در مجاورت عایق جامد باعث تخریب آن می گردد. ولی این تخریب ممکن است با توجه به شدت تخلیه جزئی در بلند مدت باعث شکست شود. این تخلیه جزئی در روغن باعث تجزیه روغن به اجزاء سازنده آن مانند هیدروکربورها C_nH_m و هیدروژن می شود. گازهایی که به این ترتیب به وجود می آیند قسمتی در روغن حل شده و قسمتی به صورت حباب درمی آیند این حبابها می توانند باعث شکست در روغن گردند.

در صورتی که پس از شروع تخلیه جزئی ولتاژ را افزایش دهیم، در روغن و خصوصاً بر روی سطح جامد یعنی فصل مشترک دو عایق تخلیه خزنده بوجود می آید. با افزایش ولتاژ این تخلیه سطح عایق جامد را سوراخ می کند و یا از طریق سطح از یک الکتروود به الکتروود دیگر می رسد و باعث شکست می گردند. شکل (۳-۶۴) ولتاژ شکست و استقامت الکتریکی پرس شپان را برای الکتروودهای کروی و استوانه ای در روغن برحسب جرم مخصوص پرس شپان برای ولتاژ متناوب ۵۰ هرتس نشان می دهد. ضخامت ورق پرس شپان در این شکل ۳ میلیمتر است.



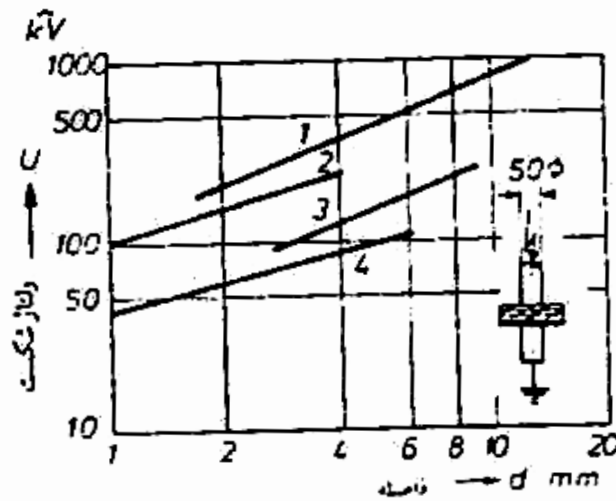
شکل (۳-۶۴) ولتاژ شکست و استقامت الکتریکی پرس شپان را برای الکتروودهای کروی و استوانه ای در روغن برحسب جرم مخصوص پرس شپان برای ولتاژ متناوب ۵۰ هرتس نشان می دهد. ضخامت ورق پرس شپان در این شکل ۳ میلیمتر است.

ولتاژ شکست برای ولتاژ ضربه بالاتر از ولتاژ شکست برای ولتاژ متناوب می باشد. شکل (۳-۶۵) استقامت الکتریکی ورق پرس شپان در روغن را برای ولتاژ ضربه منفی و برای ولتاژ متناوب نشان می دهد. ضخامت پرس شپان ۳ میلیمتر است. شکل (۳-۶۶) ولتاژ شکست پرس شپان در روغن را برای ولتاژ ضربه منفی و برای ولتاژ متناوب برحسب فاصله نشان می دهد. منحنی ۱ و ۲ مربوط به ولتاژ ضربه و منحنی ۳ و ۴ مربوط به ولتاژ متناوب ۱ دقیقه است.



شکل (۳-۶۵) استقامت الکتریکی ورق پرس شپان در روغن را برای ولتاژ ضربه منفی و برای ولتاژ متناوب نشان می دهد.

تفاوت بین منحنی های ۱ و ۲ همچنین ۳ و ۴ مربوط به نحوه نفوذ دادن روغن در پرس شپان است.

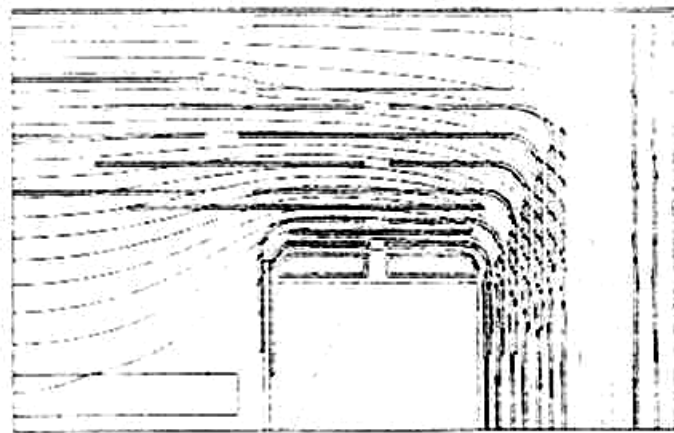


شکل (۳-۶۶) ولتاژ شکست پرس شپان در روغن را برای ولتاژ متناوب ۵۰ هرتس ۱ دقیقه (منحنی ۱ و ۲) و برای ولتاژ ضربه (منحنی های ۳ و ۴)

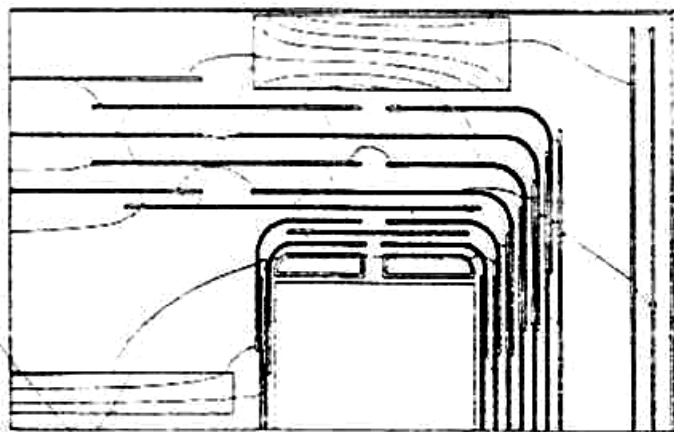
۳-۱۷- اثر نوع ولتاژ در ترکیب عایقها:

نکته ای که در طراحی تجهیزات فشار قوی بایستی در نظر گرفته شود آن است که عایق ممکن است تحت تأثیر ولتاژ متناوب، دائم، ضربه و کلید زنی قرار گیرد. گاهی نیز ترکیبی از این ولتاژها پیش می آید. در شبکه انتقال انرژی با ولتاژ متناوب ممکن است در حین کار تجهیزات، صاعقه باعث ایجاد ولتاژ ضربه شود و آنگاه هر دو نوع ولتاژ با هم به عایق اعمال گردد.

همچنین عایق ترانسفورماتورهای قدرت فشار قوی که برای تغذیه یکسوکنده ها - مثلاً به منظور انتقال انرژی با ولتاژ فشار قوی دائم- به کار می روند، همزمان تحت تنش ولتاژهای متناوب و دائم قرار دارند. در این حال ممکن است ولتاژ ضربه نیز به عایق وارد گردد. طراح باید کلیه شرایط ممکن را بررسی کند و عایق بندی را از همه نظر کنترل نماید.



تقسیم ولتاژ متناوب



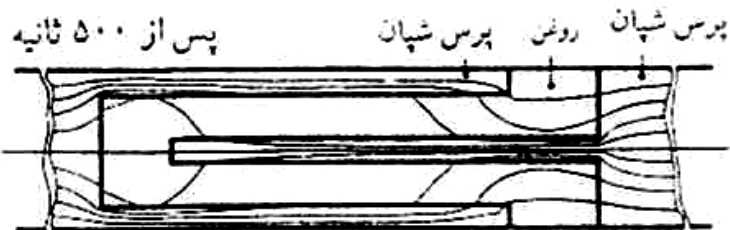
تقسیم ولتاژ دائم

شکل (۳-۶۷) تقسیم ولتاژ در عایق ترانسفورماتور را برای ولتاژ متناوب و برای ولتاژ دائم نشان می دهد. در شکل بالا ولتاژ متناوب است و اعداد دی الکتریک عایق جامد و مایع به ترتیب $4/4$ و $2/2$ می باشند. در شکل پایین ولتاژ دائم و نسبت مقاومت مخصوص عایقهای جامد به مایع برابر 20 می باشد.

تقسیم ولتاژ در طول عایق بستگی به نوع ولتاژ و زمان دارد، تقسیم ولتاژ در طول عایق برای ولتاژ دائم با زمان تغییر می نماید. در لحظه وصل ولتاژ دائم، تقسیم با توجه به ضرایب دی الکتریک انجام می گیرد. ولی با گذشت زمان ، تقسیم ولتاژ متناسب با قابلیت هدایت الکتریکی مواد عایق، تغییر می نماید. شکل (۳-۶۷) تقسیم ولتاژ در عایق ترانسفورماتور را برای ولتاژ متناوب و برای ولتاژ دائم نشان می دهد. در شکل بالا ولتاژ متناوب است و اعداد دی الکتریک عایق جامد و مایع به ترتیب $4/4$ و $2/2$ می باشند.

در شکل پایین ولتاژ دائم و نسبت مقاومت مخصوص عایقهای جامد به مایع برابر ۲۰ می باشد.

لحظه وصل ولتاژ



حالت دائمی



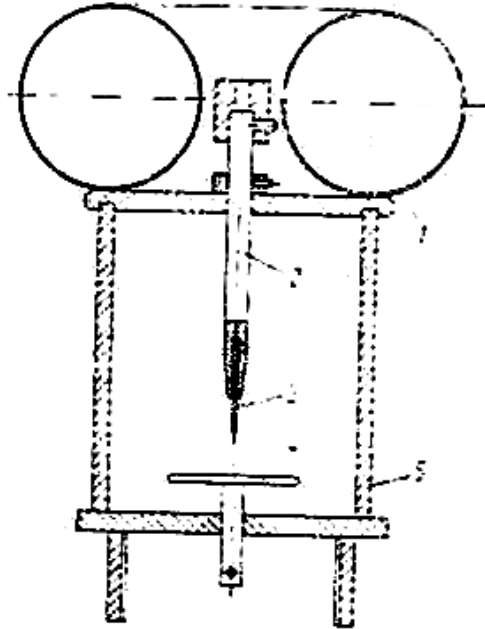
شکل (۳-۶۸) تغییر تقسیم ولتاژ در عایق ترانسفورماتور برای ولتاژ دائم برحسب زمان

شکل (۳-۶۸) تغییر شکل میدان را در طول زمان در قسمتی از عایق ترانسفورماتور نشان می دهد. در زمان $t = 0$ ولتاژ وصل شده و تقسیم ولتاژ متناسب با اعداد دی الکتریک دو عایق است. ولی در نهایت تقسیم ولتاژ متناسب با مقاومت مخصوص دو عایق خواهد بود.

۳-۱۸- استقامت الکتریکی روغن در میدان غیریکنواخت:

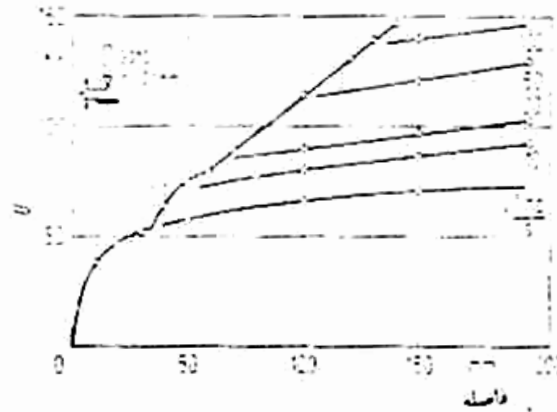
در میدان الکتریکی غیر یکنواخت، مانند میدان الکترودهای سوزن - صفحه، قبل از تخلیه الکتریکی تخلیه جزئی پیش می آید. شکل (۳-۶۹ الف) الکترودهای سوزن - صفحه را نشان می دهد. چنبره بزرگ در بالای شکل برای جلوگیری از تخلیه بر روی سطح عایق استوانه ای شماره ۵ است. با کمک

این الکترودها می توان تخلیه الکتریکی در میدان غیریکنواخت را مطالعه نمود.



شکل (۳-۶۹ الف): الکترودهای سوزن - صفحه برای شکست در عایق مایع برای میدان غیر یکنواخت. ۱- الکتروود چنبره ای برای یکنواخت کردن میدان بر روی سطح استوانه عایق ۲- پایه ۳- الکتروود سوزن ۴- الکتروود صفحه ۵- استوانه عایق

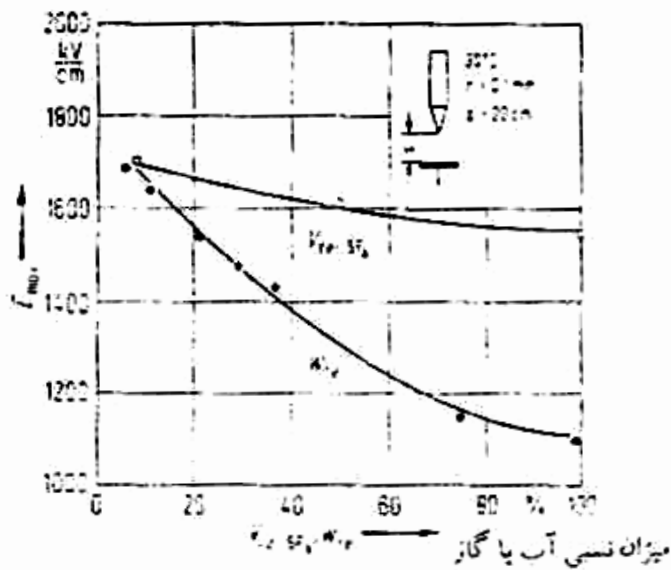
شکل (۳-۶۹ ب) نتیجه بررسی را تا فاصله ۲۰۰ میلیمتر نشان می دهد. در این مورد شعاع انحنای نوک سوزن ۰/۱ میلیمتر است. در شکل (۳-۶۹ ب) تا فاصله ۴۰ میلیمتر تخلیه الکتریکی بدون تخلیه جزئی انجام می گیرد. یعنی اولین تخلیه منجر به شکست می شود. ولی از این فاصله به بعد، قبل از تخلیه الکتریکی، تخلیه های جزئی پیش می آید. با افزایش ولتاژ، تعداد پالس های تخلیه جزئی در هر ثانیه نیز افزایش می یابد. در این آزمایش ولتاژ اعمال شده یک ولتاژ دائم بوده است



شکل (۳-۶۹ ب): ولتاژ شکست و ولتاژ شروع تخلیه جزئی در الکترودهای سوزن - صفحه برحسب فاصله در روغن ترانسفورماتور. میزان رطوبت نسبی روغن ۱۲ درصد و درجه حرارت ۲۳ درجه سانتی گراد بوده است.

در ولتاژ دائم بار الکتریکی که از تخلیه جزئی در روغن وارد می شود، باعث کاهش شدت میدان الکتریکی در اطراف سوزن می شود. پس از مدتی این بار فضائی از سوزن دور می شود و شرط تخلیه جزئی مجدداً برقرار می گردد. در ولتاژ متناوب پس از تغییر علامت ولتاژ، بارهای الکتریکی در فضای اطراف سوزن باعث افزایش شدت میدان در این ناحیه می شود. لذا تخلیه جزئی با شدت بیشتر و تعداد بیشتر در هر ثانیه انجام می گیرد.

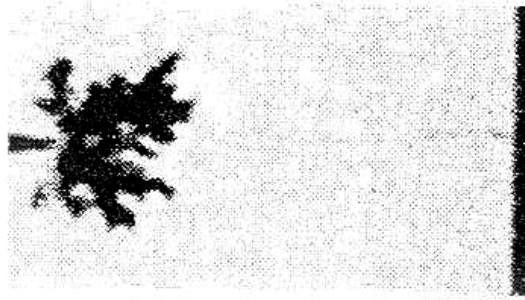
در میدان غیر یکنواخت، رطوبت مانند میدان یکنواخت عمل می کند. و باعث کاهش ولتاژ شروع تخلیه جزئی می گردد. در این رابطه میزان گازهای حل شده در روغن نیز دارای اهمیت است. شکل (۳-۷۰) شدت میدان الکتریکی شروع تخلیه جزئی روغن را برحسب میزان نسبی رطوبت و گاز حل شده در آن نشان می دهد. در این آزمایش گاز حل شده در روغن SF_6 است.



شکل (۳-۷۰) شدت میدان الکتریکی شروع تخلیه جزئی روغن را برحسب میزان نسبی رطوبت و گاز حل شده در این آزمایش گاز حل شده در روغن SF_6 است.

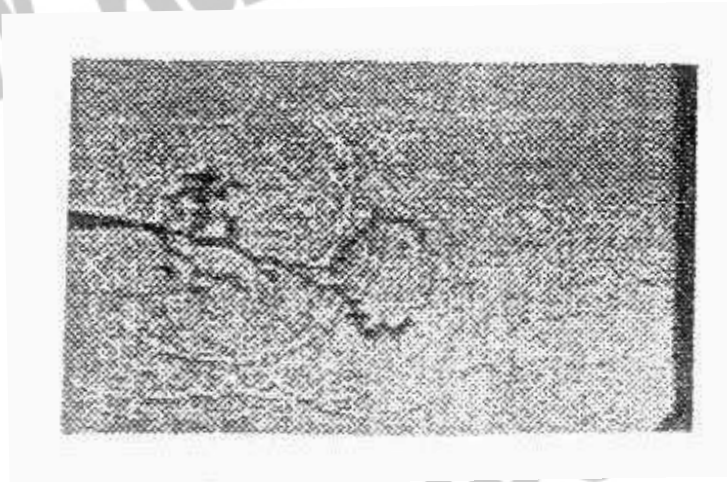
۳-۱۹- استریمر در عایق مایع:

در صورتی که میدان الکتریکی در عایق مایع بسیار غیریکنواخت باشد، پدیده استریمر پیش می آید. برای مشاهده این پدیده از الکترودهای سوزن - صفحه استفاده می شود و نوک سوزن را بسیار تیز انتخاب می کنند. بدیهی است تخلیه از نوک سوزن شروع می شود و شکل تخلیه مانند گازها بستگی به علامت ولتاژ سوزن دارد. شکل (۳-۷۱ الف و ب) تخلیه در نوک سوزن را برای سوزن منفی و مثبت در مایع n -hexan نشان می دهد. این تصاویر مشابه استریمر در هوا هستند.



شکل (۳-۷۱ الف) تخلیه در نوک سوزن را برای سوزن منفی در مایع *n-hexan* ولتاژ ۴۱ کیلوولت؛

فاصله الکترودها ۴ میلیمتر؛ زمان عکس برداری ۱۲ میکروثانیه پس از مشاهده اولین پالس جریان



شکل (۳-۷۱ ب) تخلیه در نوک سوزن در مایع عایق *n-hexan* با سوزن مثبت. ولتاژ ۲۵ کیلوولت؛

فاصله الکترودها ۵ میلیمتر؛ زمان عکس برداری ۲ میکروثانیه پس از مشاهده اولین پالس جریان

شکل (۳-۷۲) مدار آزمایش و وسایل لازم برای تهیه عکس را نشان می دهد. در این شکل *HVDC*

منبع ولتاژ فشارقوی دائم است. مقاومت R_s برابر ۲۲۵ مگا اهم و برای حفاظت سوزن می باشد. ولتاژ از

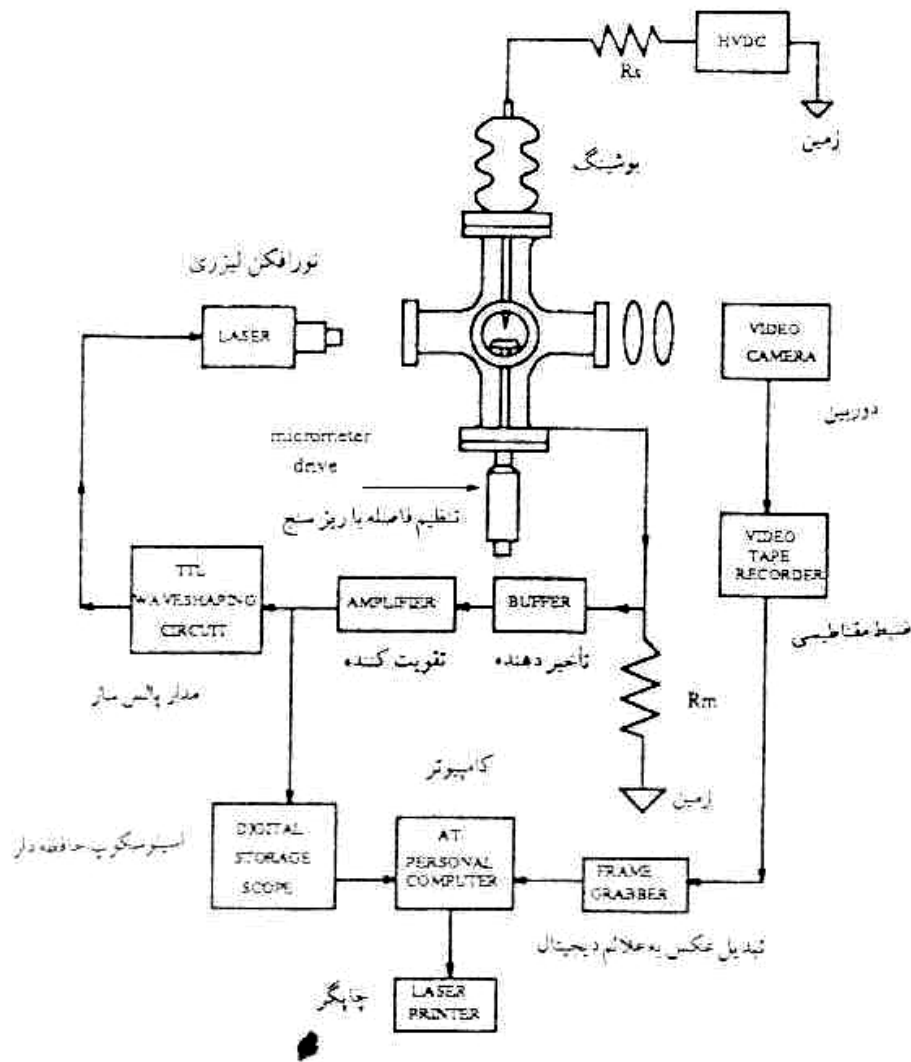
طریق یک بوشینگ به داخل محفظه وارد می شود. مقاومت R_m برای تشخیص پالس های جریان است

که از تخلیه ناشی می گردد مدار مخصوصی جریان تخلیه پالسی را از جریان نشتی جدا می کند و

سپس تقویت نموده از طرفی به اسیلوسکوپ با حافظه و از طرفی به یک مولد پالس قوی و کوتاه می

دهد. پالس اخیر یک شعاع لیزر با عرض زمانی ۳ نانو ثانیه تولید می کند. این شعاع از محل تخلیه عبور

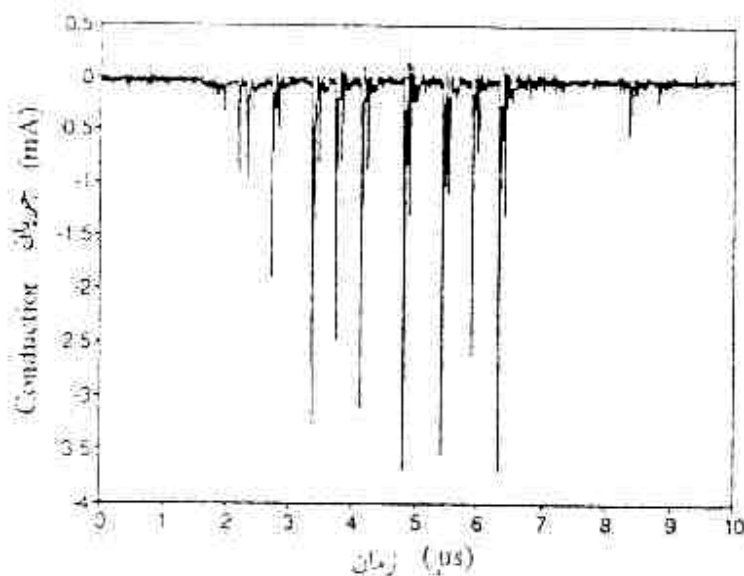
داده می شود. شکل استریمر توسط یک دوربین عکس برداری می گردد. این دوربین قادر است اطلاعات مربوط به عکس را به صورت دیجیتال درآورده به یک کامپیوتر شخصی منتقل نماید. شکل پالس های تخلیه نیز توسط اسیلوسکوپ ضبط و به کامپیوتر وارد می شود.



شکل (۳-۷۲): مدار آزمایش و عکس برداری از نوک سوزن در عایق مایع و در تخلیه سریع

شکل (۳-۷۳) جریان تخلیه را برای سوزن منفی نشان می دهد. این جریان از جریان نشستی که ناشی از قابلیت هدایت الکتریکی روغن می باشد جدا شده و به صورت پالس های متوالی در می آید. این جریان

نشان می دهد که تخلیه در نوک سوزن به صورت یکنواخت پیشرفت نمی کند بلکه به صورت جهشی جلو می رود. هر پالسی مربوط به جهش یکی از شاخه های استریمر می باشد.



شکل (۳-۷۳) جریان تخلیه را برای سوزن منفی در عایق مایع نشان می دهد.

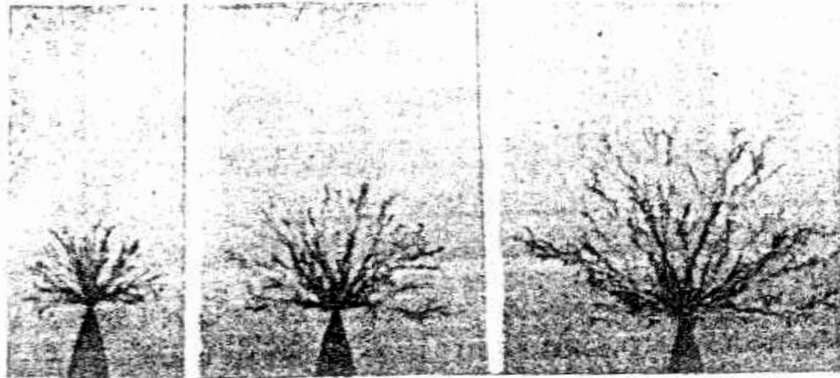
با آزمایشهای متوالی مشخص شده است که استریمر با افزایش زمان از نوک سوزن به طرف صفحه حرکت می نماید و در طول مسیر به چندین شاخه تقسیم می گردد. سرعت سیر استریمر در روغن ترانسفورماتور به ۱/۸ کیلومتر در ثانیه می رسد. شکل (۳-۷۴) پیشرفت استریمر مثبت را در نوک سوزن نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده به شکل ضربه (پالس) با دامنه معین ولی زمان های مختلف است با افزایش زمان استریمر پیشرفت نموده است.

استریمر اگر چه با زمان پیشرفت می کند ولی لازم نیست در نهایت به الکتروود دیگر برسد و ممکن است پس از طی یک مسیر متوقف شود. در این صورت ولتاژ بیشتری لازم است تا استریمر طولانی تر گردد.

البته دامنه ولتاژ نیز در پیشرفت استریمر موثر است. شکل (۳-۷۵) استریمر در نوک سوزن مثبت را در

روغن ترانسفورماتور نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده ضربه (پالس) با طول ثابت و دامنه متفاوت بوده است. دامنه ولتاژ به ترتیب برابر ۱۱، ۱۲/۵، ۱۵ و ۲۲ کیلو ولت بوده است. از این شکل مشخص است که با افزایش دامنه ولتاژ، استریمر پیشرفت بیشتری دارد.

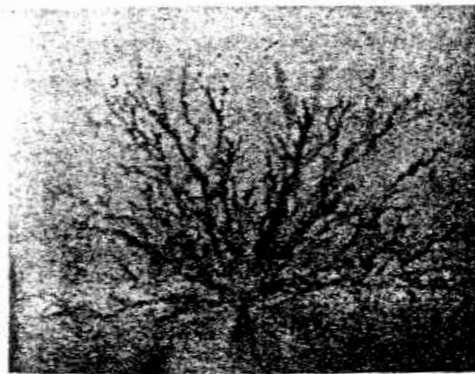
هر بار که استریمر یک جهش می کند، مقداری بار الکتریکی جابجا می شود. مقدار این بار را می توان با توجه به اجزاء مدار الکتریکی از طریق انتگرال گیری جریان در مقاومت R_m در شکل (۳-۷۲) بدست آورد. با افزایش ولتاژ و طول استریمر، میزان بار جابجا شده نیز تفاوت می کند. مقدار این بار الکتریکی می تواند نمایانگر شدت تخلیه جزئی و صدمه ای باشد که این نوع تخلیه به عایق وارد می نماید.



1

2

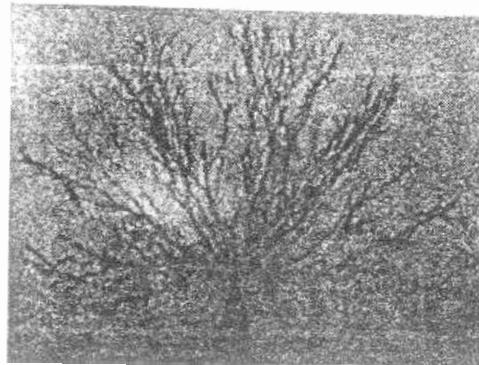
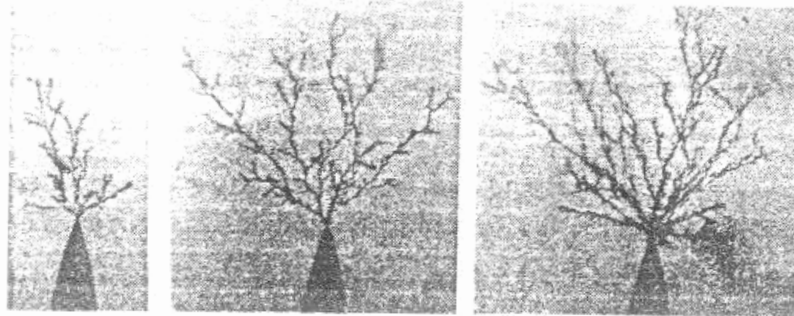
3



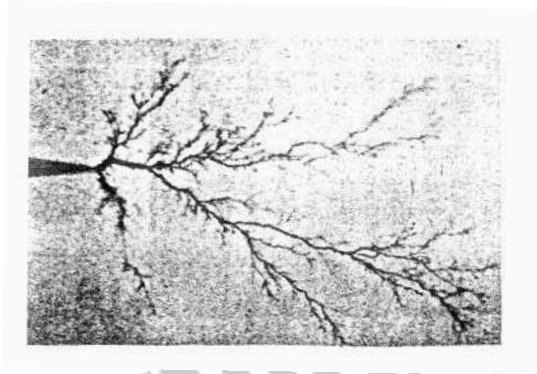
4

شکل (۳-۷۴) پیشرفت استریمر مثبت را در نوک سوزن نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده به شکل ضربه (پالس) با دامنه معین ولی زمان های مختلف است با افزایش زمان استریمر پیشرفت نموده است.

استریمر در ولتاژ مثبت بیشتر خود را نشان می دهد. در این حالت تخلیه الکتریکی در عایق مایع مانند تخلیه الکتریکی در گازها با فشار زیاد است. ابتدا در نوک سوزن شدت میدان الکتریکی بزرگی بوجود می آید که باعث یونیزاسیون می گردد. بارهای الکتریکی منفی سریعاً جذب سوزن می شوند. بارهای مثبت باعث افزایش شدت میدان می گردند. این بارها یک مسیر هادی ایجاد می کنند که از نوک سوزن شروع شده و به نوک استریمر ختم می شود در نوک استریمر بارهای مثبت در حدود ۵ پیکوکولن وجود دارد که میدانی علاوه بر میدان ناشی از اختلاف سطح بین الکترودها به وجود می آورد. در نوک استریمر در فواصل زمانی کوتاه یونیزاسیون به وجود می آید.



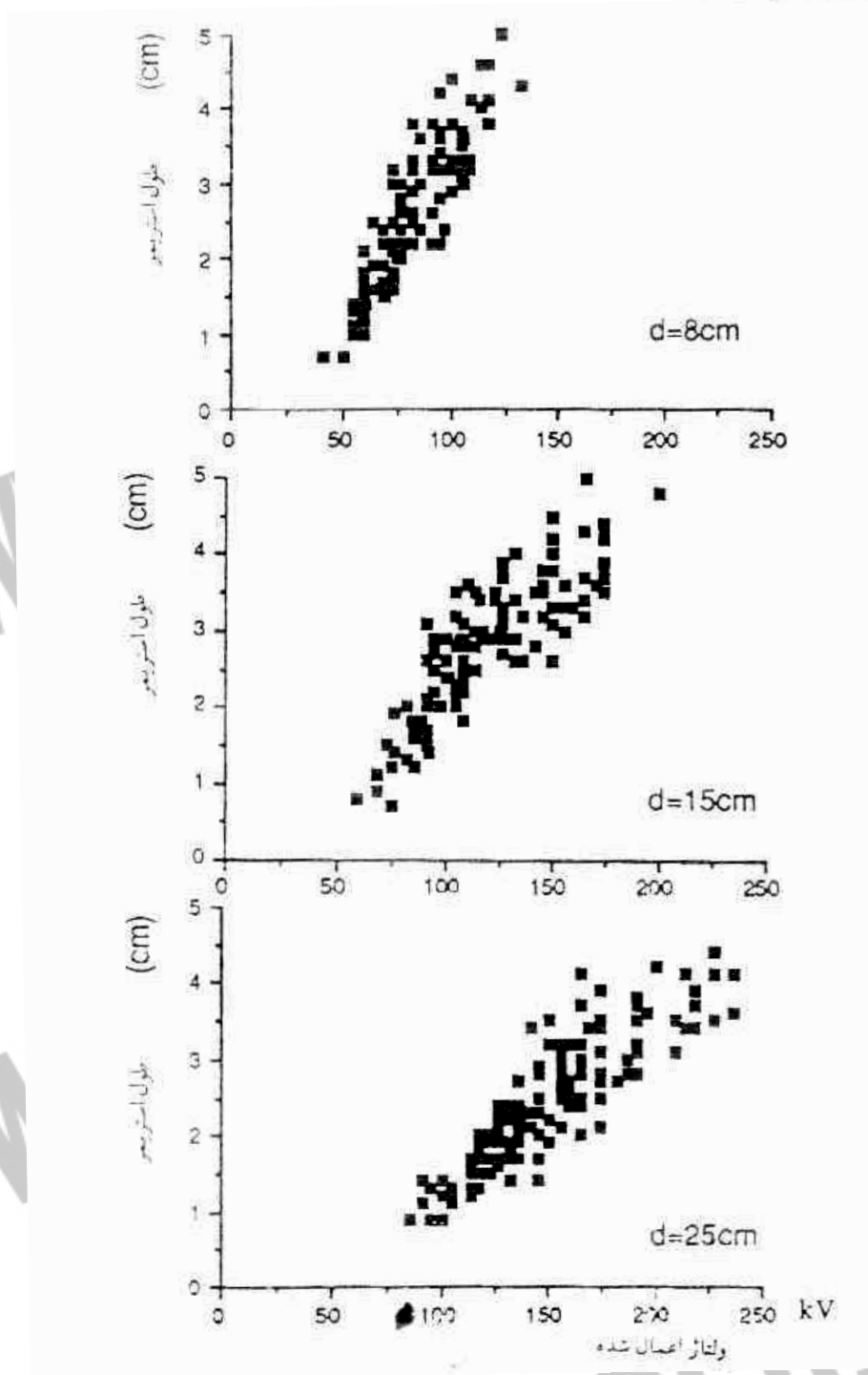
شکل (۳-۷۵) استریمر در نوک سوزن مثبت را در روغن ترانسفورماتور نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده ضربه (پالس) با طول ثابت و دامنه متفاوت بوده است. دامنه ولتاژ به ترتیب برابر ۱۱، ۱۲/۵، ۱۵ و ۲۲ کیلو ولت بوده است. از این شکل مشخص است که با افزایش دامنه ولتاژ، استریمر پیشرفت بیشتری دارد.



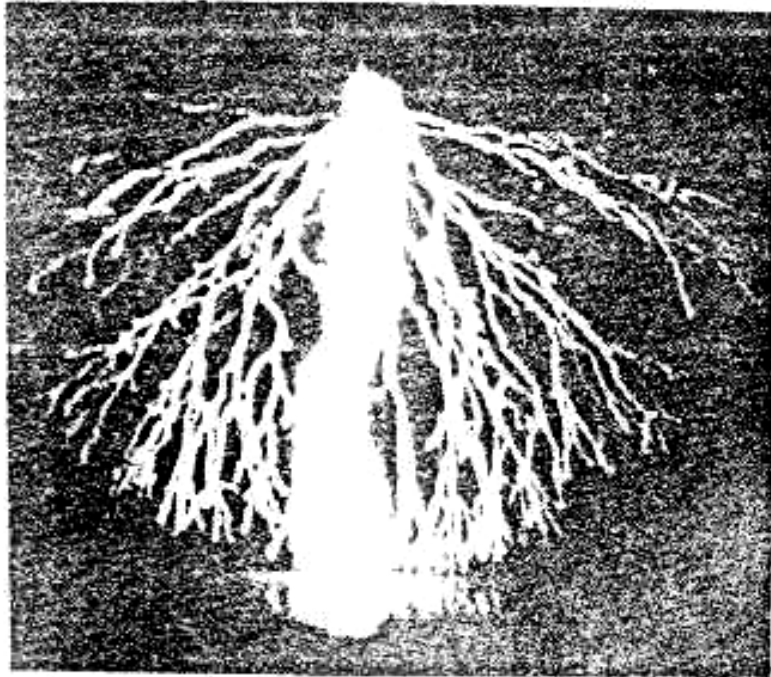
شکل (۳-۷۶): استریمر مثبت در روغن سیلیکون برای ولتاژ ۲۲/۵ کیلوولت. دیگر مشخصات مانند شکل (۳-۷۵) است.

شکل استریمر به علامت ولتاژ، نوع عایق و غلظت آن بستگی دارد. شکل (۳-۷۶) استریمر مثبت را در روغن سیلیکون نشان می دهد.

رابطه بین طول استریمر و ولتاژ برای سه فاصله مختلف بین الکترودهای سوزن - صفحه در روغن ترانسفورماتور در شکل (۳-۷۷) نشان داده شده است. شکل (۳-۷۸) یک استریمر را که به شکست کامل منجر شده است نشان می دهد.



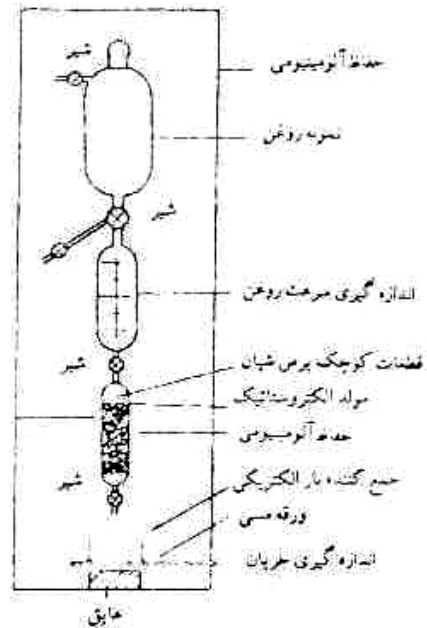
شکل (۳-۷۷): رابطه بین طول استریمر در روغن ترانسفورماتور با ولتاژ برای سه فاصله مختلف الکترودها



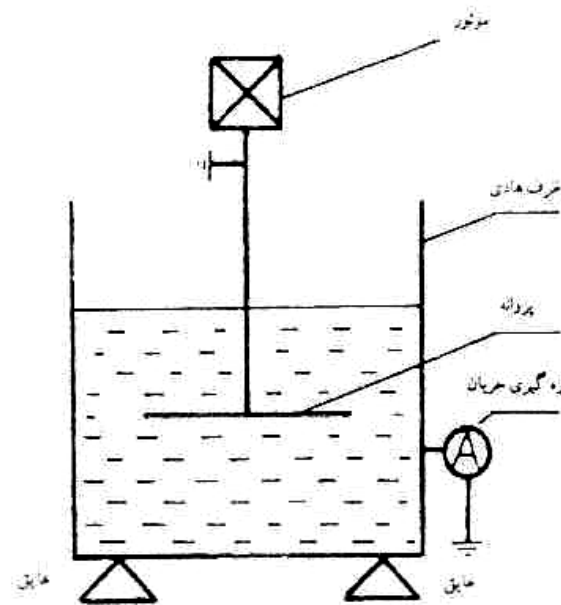
شکل (۸۷-۳): یک استریمر که به شکست کامل منجر شده است.

۲۰-۳- ایجاد الکتریسیته ساکن بر اثر حرکت عایق مایع:

حرکت عایق مایع در لوله ها و یا در داخل تجهیزات باعث مالش آن با جداره می گردد. در نتیجه این مالش الکتریسیته ساکن بوجود می آید که ممکن است باعث خطرانی برای تجهیزات شود. این خطر از آنجا ناشی می گردد که میدان الکتریکی ناشی از این بارها به میدان الکتریکی کار عادی تجهیزات افزوده می شود. در ترانسفورماتورهای بزرگ روغن به کمک پمپ با سرعت نسبتاً زیاد در بین سیم پیچ ها در حرکت می باشد. مواردی از سوختن ترانسفورماتورها به دلیل الکتریسیته ساکن ناشی از حرکت روغن گزارش شده است.



شکل (۳-۷۹): روش اندازه گیری تمایل روغن عایق به ایجاد الکتریسیته ساکن



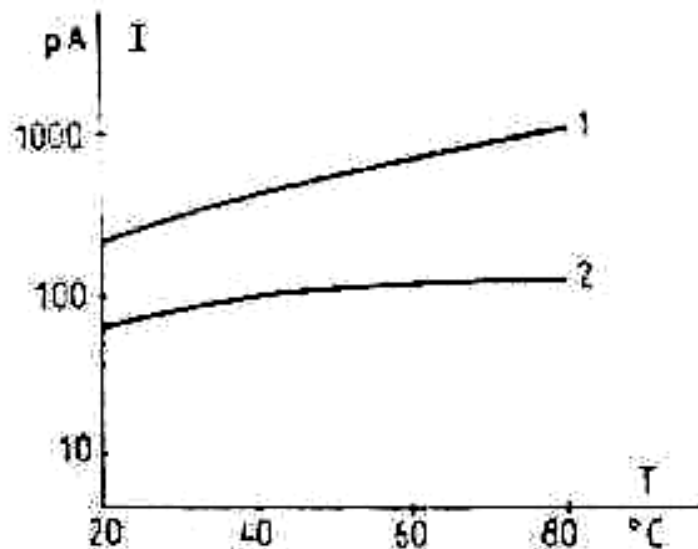
شکل (۳-۸۰): روش اندازه گیری تمایل روغن به ایجاد الکتریسیته ساکن با کمک پروانه

تمایل روغنها به ایجاد الکتریسیته ساکن متفاوت است و لذا روشهایی برای بررسی این تمایل پیشنهاد

گردیده است. در یک روش روغن از لوله ای در تماس با کاغذ عایق عبور داده شده و داخل یک ظرف ریخته می شود. این ظرف نسبت به زمین عایق شده است و بین ظرف و زمین یک پیکو آمپر متر قرار دارد. جریانی که این آمپر متر نشان می دهد با تمایل روغن به ایجاد الکتریسیته ساکن ارتباط دارد. در این آزمایش سرعت روغن نیز اهمیت دارد. در صورتی که جریان کم باشد یا پیکو آمپر متر در اختیار نباشد، می توان مدتی صبر نمود تا بار قابل توجهی جمع گردد و سپس اندازه گیری نمود. شکل (۳-۷۹) روش اندازه گیری تمایل روغن عایق به ایجاد الکتریسیته ساکن را نشان می دهد.

در روش دیگری به کمک یک پروانه، روغن در یک ظرف با شدت به حرکت درآورده می شود و جریان عبوری از ظرف به زمین اندازه گیری می گردد. شکل (۳-۸۰) وسایل و مدار لازم برای این روش را نشان می دهد. برای عایق نمودن ظرف از زمین از عایق تفلون (پلی تترا فلورو اتیلن) استفاده می شود که دارای قابلیت هدایت الکتریکی بسیار کمی می باشد.

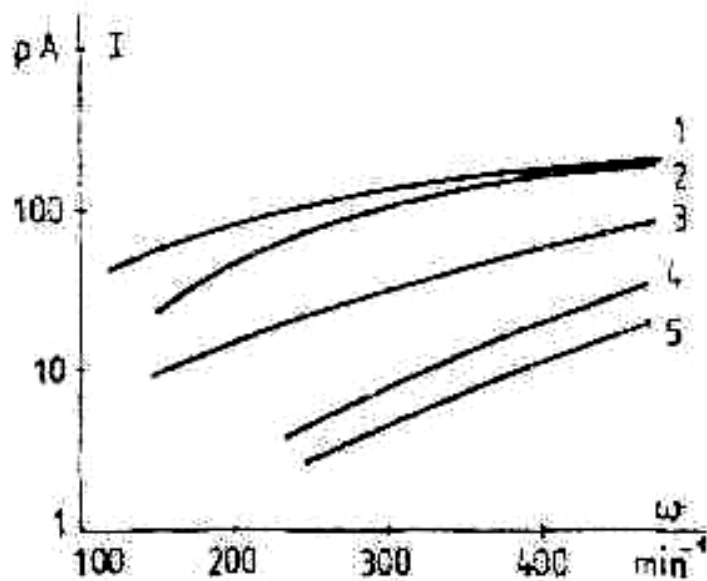
مقدار جریان در این روش متناسب با سرعت پروانه و قطر آن و همچنین نوع روغن و درجه حرارت است. شکل (۳-۸۱) رابطه بین جریان و سرعت پروانه را برای مقادیر مختلف قطر پروانه نشان می دهد.



شکل (۳-۸۱) رابطه بین جریان و سرعت پروانه را برای مقادیر مختلف قطر پروانه. قطر پروانه برای

منحنی های ۱ تا ۵ به ترتیب برابر ۱۳۵، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ میلیمتر بوده است.

در شکل (۳-۸۲) رابطه بین جریان و درجه حرارت برای یک نوع روغن و دو سرعت مختلف نشان داده شده است.



شکل (۳-۸۲) رابطه بین جریان و درجه حرارت برای یک نوع روغن و دو سرعت مختلف نشان می دهد. در روش دیگر بجای پروانه روش قبل، از یک استوانه که داخل استوانه دیگر می چرخد و هر دو هم مرکز هستند، استفاده می شود. در این روش می توان سطح استوانه را با عایق جامد مانند پرس شبان یا کاغذ پوشاند و اثر وجود این نوع مواد را نیز مطالعه کرد. همچنین می توان بین دو استوانه ولتاژ متناوب برقرار نمود و شرایطی مشابه شرایط داخل ترانسفورماتور ایجاد کرد.

از طرفی این اثر باعث پیری روغن می گردد و از طرف دیگر روغن پیر تمایل بیشتر به ایجاد الکتربسیته ساکن از خود نشان می دهد. با افزودن بعضی مواد می توان تمایل روغن به ایجاد الکتربسیته ساکن را کاهش داد. از جمله این مواد بنزوتری ازول *BTA* می باشد.

۲۱-۳- تقسیم بارهای الکتریکی داخل عایق مایع ناشی از میدان الکتریکی:

پس از اعمال ولتاژ دائم، بارهای الکتریکی در داخل روغن به حرکت درمی آیند. تقسیم این بارها در داخل مایع باعث تغییر در شدت میدان الکتریکی نقاط مختلف می گردد. موادی که برای جلوگیری از ایجاد الکتریسیته ساکن افزوده می شوند، باعث تغییر در این خاصیت می شود و وجود آب نیز اثرزیادی دارد.

برای اندازه گیری شدت میدان الکتریکی در روغن عایق می توان از اثر کر استفاده نمود. این اثر را می توان چنین بیان کرد که اگر نور پولاریزه شده از مواد یکنواختی که در آنها میدان الکتریکی وجود داشته باشد، عبور کند. سرعت نور در جهت میدان و در جهت عمود بر آن متفاوت می باشد. این اختلاف سرعت متناسب با شدت میدان است با اندازه گیری اختلاف فاز بین دو جزء عمود بر هم نور پولاریزه می توان شدت میدان الکتریکی را بدست آورد.

در میدان یکنواخت شدن میدان مشخص است. حال اگر بارهای فضائی باعث تغییر در شدت میدان گردند، می توان از طریق اندازه گیری، میدان بارهای فضائی را بدست آورد. پس از قطع ولتاژ بارهای فضائی باعث ایجاد میدان الکتریکی می گردند. که با گذشت زمان از شدت آن کاسته می شود.

بارهای الکتریکی مثبت در نزدیک کاتد و بارهای الکتریکی منفی در نزدیک آند جمع می شوند. واضح است که این بارها در حرکت هستند و بارهای جدید جای بارهایی را که به الکترودها رسیده و خنثی می شوند پر می کنند. در صورتی که روغن کاملاً خشک باشد، تعداد یون های مثبت و منفی بسیار کم بوده و این اثر نیز خفیف می باشد. قابل ذکر است که حداکثر میزان آبی که می تواند در روغن ترانسفورماتور حل شود، با توجه به درجه حرارت تغییر می یابد.

نتیجه گیری و پیشنهادات:

ساخت و تهیه عایق های ترکیبات کربنی از راه مصنوعی در سال های اخیر سیلی از انواع عایق ها با خواص ممتاز و کاربردی وسیع را برای ساختمان دستگاه ها و ماشین های الکتریکی عرضه داشته است. بررسی عملکرد عایق ها، نیاز به بررسی های عملی (با استفاده از نظریه فیزیکی و روابط ریاضی) و همچنین بررسی های تجربی (از طریق آزمایشها و اندازه گیری های لازم) روی عایق ها دارد. تاکنون خازنهای قدرت همه از عایق «کاغذ - روغن» ساخته می شدند، در حالیکه در سالهای اخیر برای ساختن خازنهای جریان ضعیف از عایقهای مصنوعی استفاده شده است علی رغم تکامل عایق های مصنوعی در سالهای پس از جنگ اخیر، بدلائل زیر کاربرد عایقها در ساختمان خازنهای قدرت میسر نشده است:

عدد عایقی عایقهای مصنوعی مانند پلی پروپیلن و پلی ستیروول در حدود $2/2$ تا 3 فقط نصف عدد عایقی کاغذ آغشته به کلوفن می باشد. پاره ای از عایقهای مصنوعی، در مقابل کلوفن دچار تغییرات شیمیائی می شوند. بعلاوه در خازنهای ساخته شده از لایه های عایق مصنوعی به اشکال می توان تمامی گاز را از راه خلاء کردن بیرون کشید. آخرین دلیل، قیمت زیاد عایقهای مصنوعی در مقابل «کاغذ - کلوفن» می باشد.

در چند سال اخیر خازنهایی برای فشار الکتریکی 220 تا 380 ولت از کاغذ عایق های مصنوعی درست شده است. در این خازنها، صفحات کاغذ را از دو سمت متالیزه می کنیم و از لایه های پلی پروپیلن و یا پلی کربنات بعنوان عایق استفاده می جوئیم. همچنین اخیراً در خازن های با فشار الکتریکی متوسط از لایه های عایق مصنوعی و لایه های آلومینیوم استفاده شده است.

پدیده بارداری استاتیکی تشریح شده و چگونگی تولید بار و جمع آوری آنها ذکر گردید در مدار حلقه بسته، مدل ریاضی برای الکتروود کواکسیالی توصیف شده و برای جریان رانشی در دو حالت (با وجود ولتاژ الکتریکی و بدون ولتاژ) فرمول ریاضی ارائه گردید و در نهایت تأثیر میدان الکتریکی، فرکانس، دما

و سرعت جریان روغن مشخص شد که به صورت زیر خلاصه می شود:

با افزایش میدان الکتریکی جریان رانشی نسبی افزایش می یابد و این امر در اثر گسترده تر شدن منطقه توزیع بارها و سریع شدن فرآیند تولید بار در اثر افزایش میدان الکتریکی رخ می دهد. همچنین با افزایش فرکانس جریان رانشی نسبی کاهش می یابد و علت آن این است که بارها در اثر افزایش فرکانس تحت تأثیر میدان الکتریکی به نوسان آمده و به آسانی نمی توانند همراه جریان روغن به حرکت در آیند.

افزایش دما موجب افزایش رسانائی روغن، کاهش لزجیت و در نهایت افزایش انرژی بارها می شود که این امر موجب افزایش جریان رانشی نسبی می شود.

جریان رانشی در اثر افزایش سرعت سیال بیشتر می شود که این امر در اثر افزایش تنش برشی بر لایه های دوگانه مجاور می باشد.

با توجه به مطالب ارائه شده می توان پیشنهادات زیر را جهت بهره برداری با راندمان بهتر و عمر طولانی تر از ترانسفورماتورهای قدرت موجود در پستهای ایران ارائه نمود.

۱- طبق دستورالعمل های استاندارد در دوره های پیشنهاد شده از روغن ترانسفورماتورها نمونه برداری شده و در آزمایشگاه هائی که می توان با حداقل وسائل لازم و با مخارج کمی در مراکز استانها دایر نمود و یا ارسال نمونه ها به مراکز آزمایشگاهی شرکت توانیر در تهران آزمونهای دوره ای را انجام داد.

در ضمن باید متذکر شد که روش انجام آزمایش خود بسیار با اهمیت می باشد و چون در سطح مملکت متداول است. لذا پیشنهاد می گردد که در سطح مملکت و لاقلاً در شرکت توانیر این روشهای تست به صورت استاندارد درآمده و فقط به یک روش اندازه گیری گردد.

۲- تغییر مشخصات این روغنها که بهترین معرف تغییرات تدریجی یا ناگهانی در کارکرد ترانسفورماتور می باشد در پرونده های مربوط به هر ترانسفورماتور که در واقع تاریخچه کار آن می باشد ثبت و نگهداری شود.

۳- چنانچه نتایج آزمون تغییرات نامطلوبی را نشان داد علت پیگیری شده و چنانچه ناشی از تنش الکتریکی ناگهانی و نامطلوبی در کار شبکه ترانسفورماتور باشد. در جهت رفع برآمده و اگر ناشی از افزایش عمر روغن است در حد مقادیر مرزی داده شده در جداول متن دستور تصفیه فیزیکی یا فیزیکی شیمیایی روغن و خشک کردن کاغذ و پاک کردن تانک از لجن در محل و تحت نظر کادر متخصص داده شود.

۴- نهایتاً نتایج آزمون پس از این تصفیه نیز جهت پیگیری های بعدی ثبت گردد.
بدین طریق هزینه ای که صرف این برنامه ریزی می گردد در طولانی مدت در ازای هزینه های سنگین و ناگهانی صدمات جبران ناپذیر احتمالی ترانسفورماتورها که می تواند منجر به خروج آنها از شبکه با خسارات کلی و یا حتی منجر به تعویض کامل آنها و عمری کوتاه تر شود جبران می گردد.

منابع و ماخذ:

۱- شاهرخی، طهماسب، اضافه ولتاژ های قطع و وصل در شبکه های انتقال انرژی

۲- دکتر محسنی، حسین، رساناها و عایق سازی آنها

۳- دکتر محمدی، محمد قلی، فیزیک و تکنولوژی عایق های الکتریکی

۴- دیزندورف، والتر، هماهنگی عایقی در سیستم های فشار قوی

۵- مهندس ثقفی، مهدی، عایق ها و فشار قوی

۶- دکتر محمدی، محمد قلی، تکنولوژی فشار قوی الکتریکی

۷- دکتر کافل، پروفیسور زانگل، مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی

۸- دکتر محمدی، محمد قلی، اصول مهندسی فشار قوی الکتریکی

۹- دکتر محسنی، حسین، مهندسی فشار قوی الکتریکی پیشرفته

۱۰- مهندس سلطانی، مسعود، راهنمای آزمایشگاه فن فشار قوی

۱۱- شاهرخی، طهماسب، آلودگی محیط و ایزولاسیون تجهیزات فشار قوی

۱۲- مجموعه مقالات کنفرانس برق دانشگاه فردوسی مشهد سال ۱۳۸۳

۱۳- استاندارد IEC

۱۴- مقالات مرکز تحقیقات نیرو در زمینه عایق ها

15- WWW.IEEE.COM

16- WWW.100.COM

17- WWW.TAVANIR.ORG.IR

18- WWW.AJ.ORG. IR

Abstract:

This project is “fluid insulators in power electricity”.

It includes three chapters. You become familiar with liquid insulators.

Different types of it, application types of it, application and physical properties.

In the first chapter with the title of “classifying the fluid insulators”, liquid insulatory types and classes of them are presented. Physical and chemical Properties of these insalators is described too.

In the second chapter is about physical and chemical properties of liquid insulators. You become familiar with insulators oils, physical and chemical Properties and electrical properties and electrical Properties of them.

“Diffraction in liquid insulators” is the title of third chapter. In this chapter theories of diffraction. Composition of solid and liquid insalators are are described. Finally conclusion of related topics of all chapter is presented

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoocn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

Filename: Document1
Directory:
Template: C:\Documents and Settings\hadi tahaghoghi\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title: چکیده:
Subject:
Author: amin
Keywords:
Comments:
Creation Date: 3/28/2012 5:46:00 PM
Change Number: 1
Last Saved On:
Last Saved By: H.H
Total Editing Time: 0 Minutes
Last Printed On: 3/28/2012 5:47:00 PM
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 186
Number of Words: 29,197 (approx.)
Number of Characters: 166,428 (approx.)