

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تقدیم به استاد بزرگوارم
جناب آقای دکتر ابوالفضل واحدی





شرکت ملی نفت ایران
روابط عمومی

راهنمای آزمایش‌ها و تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس استاندارد IEEE

تألیف و ترجمه:
مهدی رمضانی

سرشناسه: رمضانی، مهدی، ۱۳۴۹-

عنوان و نام پدیدآور: راهنمای آزمایش ها و تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای قدرت

بر اساس استاندارد IEEE/ تألیف و ترجمه مهدی رمضانی.

مشخصات نشر: تهران: شرکت ملی نفت ایران، روابط عمومی، ۱۳۸۹.

مشخصات ظاهری: ۱۱۲ ص.: مصور، جدول.

شابک: 978-964-04-5856-3

وضعیت فهرست نویسی: فیا

یادداشت: ص.ع. به انگلیسی: ... Mehdi Ramezani. Power transformers tests and maintenance guide

یادداشت: کتابنامه: ص. ۱۱۰ - ۱۱۲.

موضوع: ترانسفورماتورها

موضوع: ترانسفورماتورها -- نگهداری و تعمیر

شناسه افزوده: شرکت ملی نفت ایران، روابط عمومی

رده بندی کنگره: TK۲۵۵۱/۸۲ ۱۳۸۹

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۱۴

شماره کتابشناسی ملی: ۲۰۹۲۶۷۹



شرکت ملی نفت ایران مدیریت توسعه منابع انسانی

عنوان کتاب: راهنمای آزمایش ها و تعمیر و نگهداری ترانسفورماتورهای

قدرت بر اساس استاندارد IEEE

تألیف و ترجمه: مهدی رمضانی

ویراستار: فاطمه جوادی نیا آذری

ناشر: روابط عمومی شرکت ملی نفت ایران، مطالعات، انتشارات، اطلاع رسانی

ناظر: مدیریت توسعه منابع انسانی - آموزش مرکزی

مجری طرح: گروه هنری طرح ساده

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

چاپ اول: ۱۳۸۹

قیمت: ۳۲۰۰۰ ریال

شابک: 978-964-04-5856-3

«کلیه حقوق چاپ و نشر محفوظ و متعلق به ناشر است»

آدرس: تهران، خیابان طالقانی، ساختمان مرکزی شرکت ملی نفت

صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۱۸۶۳

۱. پیش گفتار مؤلف	
۲. مقدمه	۱
۳. فلوچارت عیب یابی ترانسفورماتور	۲
۴. ایمنی	۵
۴-۱. مقدمه	۵
۴-۲. ایمنی افراد	۵
۴-۳. ایمنی تجهیزات	۶
۵. آزمایش و تکنیک های آزمایش تجهیزات مختلف ترانسفورماتورها	۷
۵-۱. سیم پیچ ها	۷
۵-۲. مقره ها (بوشینگ ها)	۴۳
۵-۳. روغن عایق ترانسفورماتور	۴۷
۵-۴. تپ چنجرها	۶۶
۵-۵. هسته	۷۴
۵-۶. تانک و تجهیزات جانبی	۷۸
۶. ضمائم	
ضمیمه الف اندازه گیری ضریب قدرت	۹۰
ضمیمه ب بوشینگ ها	۹۴
ضمیمه ج اندازه گیری دما با استفاده از اشعه مادون قرمز (IR)	۹۸
منابع	۱۰۲



۱- پیش گفتار مؤلف

نظر به گسترش روز افزون صنعت برق و اهمیت موضوع تعمیرات و نگهداری پیش گیرانه مخصوصا در صنایع عظیم همانند: نیروگاه ها، صنایع نفت و گاز، فولاد و... به کارگیری استانداردهای بین المللی که حاصل تجارب و تحقیقات بسیار ارزشمند متخصصین این امر می باشد موضوعی حیاتی و الزامی است.

ترانسفورماتورهای قدرت از تجهیزات گران قیمت و اساسی در سیستم های قدرت و تغذیه برق می باشند. خارج شدن یک ترانسفورماتور قدرت از سرویس باعث توقف خط تولید می گردد این توقف در صناعی همانند نفت و یا نیروگاه ها باعث ایجاد میلیون ها تومان ضرر خواهد گردید. در صورت پوشیده ماندن ضعف های جزئی ترانسفورماتور، این ضعف ها به تدریج تشدید یافته به گونه ای که باعث توقف سرویس دهی می گردد. لذا آشکار کردن این عیب ها و ضعف های جزئی و رفع آن ها با هزینه ناچیز باعث جلوگیری از صرف هزینه های هنگفت می گردد.

هر چند در این باب منابع متعددی منتشر گردیده ولی به لحاظ عدم موجود بودن ترجمه به زبان فارسی و یا عدم در دسترس بودن آن ها باعث به عدم به کارگیری این منابع ارزشمند در صنعت کشور گردیده است. این مرجع که حاصل سال ها تجربه و تحقیق و کنکاش در زمینه آزمایش های عیب یابی و تعمیرات و نگهداری ماشین های الکتریکی فشار قوی می باشد به منظور در اختیار قرار دادن بخشی از تجارب و تحقیقات شخصی این جانب و هم چنین موضوعات و مطالب مطروحه در منابع معتبر و بین المللی برق می باشد. امید است مطالب این کتاب مورد استفاده متخصصین و دست اندر کاران صنایع برق گردد. بی شک این کتاب خالی از نقص نمی باشد، لذا از کلیه اساتید، صاحب نظران، متخصصین و دانشجویان گرامی خواهشمند است نظرات و پیشنهادات خود را به آدرس e-mail: mramezanie@gmail.com فرمایند.

در خاتمه از مدیریت توسعه منابع انسانی شرکت ملی نفت ایران و اعضای محترم کمیته انتشارات که امکان نشر این اثر را فراهم آوردند سپاس گزاری نموده و برای همه دست اندر کاران انتشارات مطالب علمی آرزوی توفیق مینمایم.

۲- مقدمه

وضعیت و شرایط تجهیزات الکتریکی سیستم های قدرت از مهم ترین عوامل در کارکرد مناسب، پایدار و با ضریب اطمینان بالا می باشد.

در طی حمل و نقل، نصب و بهره برداری این امکان وجود دارد که این تجهیزات در معرض شرایطی قرار بگیرند که باعث آسیب رسیدن به آن ها گردیده و یا سبب کاهش طول عمر مفید و ضریب اطمینان آن ها گردد. یکی از اهداف اساسی تعمیرات پیش گیرانه و نگهداری، ردیابی ضعف ها در مراحل اولیه پیدایش آن ها و اقدام مناسب جهت برطرف کردن آن ها می باشد. ردیابی اشکالات و ضعف ها در سایت های صنعتی معمولاً با استفاده اندازه گیری ها و آزمایش های خاص دوره ای صورت می گیرد. در این کتاب آزمایش ها و روش های عیب یابی استاندارد و رایج که جهت ترانسفورماتورهای قدرت در سایت های صنعتی صورت می گیرد بیان شده است. برای هر آزمایش قید شده در این راهنما تحلیل آن نیز بیان گردیده است که جهت راهنمایی بیشترخواننده قید گردیده است. البته باید در نظر داشت که آزمایش های انجام شده در سایت تا حدی با آزمایش های انجام شده در کارخانه های صنعتی متفاوت می باشد ولی به هر صورت این آزمایش های بخشی از آزمایش های کارخانه های سازنده این تجهیزات می باشد. نتایج آزمایش هایی که در دوره گارانتی صورت می گیرد در صورتی که در شرایط یکسان با محیط مکانی سازنده باشد بایستی با نتایج کارخانه سازنده مطابقت داشته باشد. در صورتی که آزمایش ها و اندازه گیری ها پس از طی دوره گارانتی صورت گیرد نتایج حاصله با مقادیر کارخانه مقداری تفاوت خواهد داشت. تحلیل این نتایج بایستی بر پایه مقایسه باترانسفورماتورهایی که از نظر نوع طول عمر و شرایط کارکرد همانند باشند صورت گیرد. بعضی از مقادیر قید شده در این کتاب نتایج تجربیات مستمر می باشد. این مقادیر به صورت استاندارد موجود نبوده و در این رابطه نظرات متفاوتی وجود دارد. لزوم و پریودهای انجام آزمایش های قید شده در این کتاب وابسته به نوع، اندازه، عمر و تاریخچه وضعیت و سرویس دهی ترانسفورماتور می باشد. توصیه می شود که جهت تعمیرات پیش گیرانه و نگهداری ترانسفورماتورها یک برنامه زمان بندی بر اساس وضعیت آن ها و توصیه های سازنده تهیه شود و نتایج آزمایش ها و اندازه گیری ها جهت ایجاد یک بانک اطلاعاتی برای عیب یابی و ارزیابی ترانسفورماتورها به کارگرفته شود.

۳- فلوجارت آزمایش‌ها و بازرسی‌های عیب‌یابی و نگهداری ترانسفورماتورها، راکتورها و رگولاتورها

در این کتاب شرح آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی که برای عیب‌یابی ترانسفورماتورهای روغنی در سایت‌ها انجام می‌گیرد بیان شده است. روش‌های قید شده در این راهنما برای تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و راکتورهای شانت نیز قابل استفاده می‌باشد، آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های قید شده در این راهنما به صورت تفکیک شده برای بخش‌های مختلف و تجهیزات جانبی ترانسفورماتور شرح داده شده است. برای شناسایی و طبقه‌بندی آسان‌تر تجهیزات مختلف ترانسفورماتورها و رگلاتورها و راکتورها و همچنین روش‌های عیب‌یابی مورد استفاده برای هر یک از آن‌ها از جدول یک می‌توان استفاده کرد.

در این راهنما پس از تشریح هر روش آزمایش و یا اندازه‌گیری جهت برآورد وضعیت ترانسفورماتور و یا عیب‌یابی آن، نحوه تحلیل نتایج آزمایش قید گردیده است که جهت افزایش بینش و نتیجه‌گیری بهتر شخص انجام دهنده نسبت به نتایج این روش‌ها می‌باشد. باید توجه داشت که تحلیل بعضی از آزمایش‌ها بایستی با استفاده از نتایج آزمایش‌های پیشین همین ترانسفورماتور و یا ترانسفورماتورهای مشابه آن باشد تا بتوان نتیجه‌ای کامل و صحیح از آزمایش‌ها را استخراج نمود. هم‌چنین بایستی در نتیجه‌گیری از آزمایش‌ها بایستی معیارهای مطلوب بودن سازنده را برای تجهیزات تحت آزمایش به عنوان مرجع اصلی در نظر گرفته شود.

	ترانسفورماتور	راکتورها	رگولاتورها
مقاوت اهمی	*	*	*
نسبت تبدیل / پلاریته / گروه برداری	*		*
(جریان تحریک) جریان بی باری	*	*	*
امپدانس اتصال کوتاه	*		
مقاومت عایقی	*	*	*
ظرفیت خازنی	*	*	*
ضریب قدرت / ضریب تلفات	*	*	*
ولتاژ القایی (فرکانس بالا) تخلیه جزئی	*	*	
ظرفیت خازنی	*	*	*
تلفات دی الکتریک	*	*	*
ضریب قدرت / ضریب تلفات	*	*	*
تخلیه جزئی	*	*	*
(دما) مادون قرمز	*	*	*
سطح روغن	*	*	*
بازرسی چشمی	*	*	*
آب موجود در روغن	*	*	*
گازهای محلول	*	*	*
قدرت عایقی	*	*	*
ذرات نامحلول در روغن	*	*	*
تلفات دی الکتریک	*	*	*
ضریب قدرت / ضریب تلفات	*	*	*
کشش بین سطحی	*	*	*
اسیدیته	*	*	*
بازرسی چشمی	*	*	*
رنگ	*	*	*
پایداری در مقابل اکسیداسیون	*	*	*

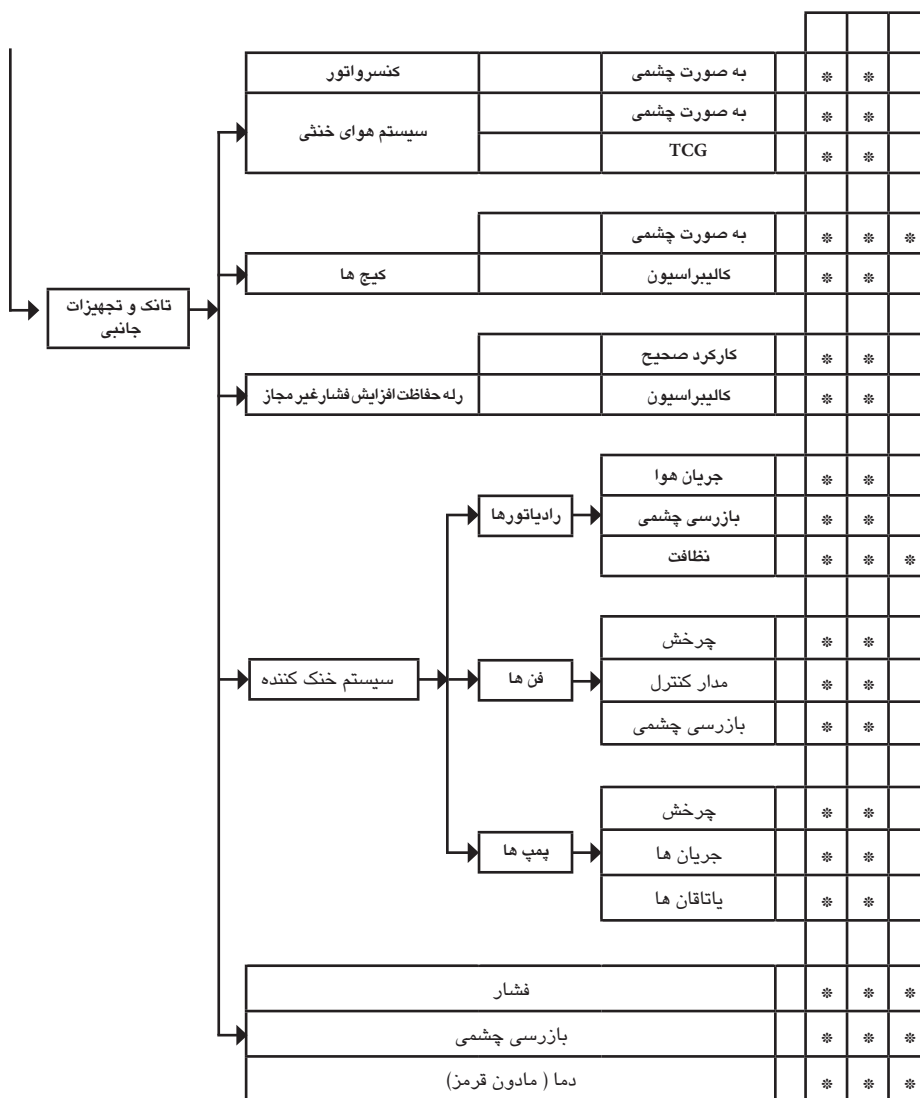
سیم پیچ ها

بوشینگ ها

روغن عایق

ترانسفورماتور و رگولاتور
ها و
راکتورهای قدرت

ادامه از صفحه قبل



۴- ایمنی

۴-۱ کلیات

رعایت ایمنی در آزمایشگاه‌های الکتریکی نه تنها جهت موارد انسانی بایستی در نظر گرفته شود بلکه باید جهت ایمنی تجهیزات آزمایش و نیز تجهیزات تحت آزمایش لحاظ گردد. موارد زیر برخی از اصول مهم رعایت ایمنی در آزمایش های الکتریکی را بیان کرده است.

از آن جایی که بیان جزییات در این راهنما امکان پذیر نمی باشد لذا برای دسترسی به اطلاعات کامل در رعایت ایمنی در آزمایش های الکتریکی می توان از استاندارد IEEE std 510-2000 استفاده کرد.

پیش از انجام هرگونه آزمایش، بایستی در طی یک جلسه برای کلیه افراد فعال در آزمایش‌ها فرآیند آزمایش مورد بحث و تشریح قرار گیرد تا کلیه افراد فهم کامل از فرآیند آزمایش‌ها را داشته باشند. در این جلسه بایستی موقعیت‌ها و موارد خطرناک را مورد تأکید قرار داد تا آزمایش‌ها و اندازه گیری‌ها با دقت مناسب و بدون هر گونه ریسکی صورت گیرد.

۴-۲ ایمنی افراد

۴-۲-۱ خطرها

آزمایش های عایقی در کارگاه های صنعتی بدون در نظر گرفتن موارد ایمنی و احتیاطات لازم باعث ایجاد خطرات می گردد. در هنگام آزمایش تجهیزات و مداراتی که بایستی تحت آزمایش قرار گیرند باید از منابع تغذیه نرمال خود جدا شوند. برای اطمینان از ایزوله شدن آن ها باید با استفاده از بازرسی چشمی و یا توسط ولت متر چک شده و سپس نقاط لازم سیستم اتصال زمین شوند. به پرسنل نیز تفهیم شود که معنی تجهیز بدون اتصال زمین، وجود برق و خطر در آن می باشد.

۴-۲-۲ اتصالات زمین

استفاده و نحوه اتصالات زمین باید بر اساس راهنمای سازنده دستگاه و یا دستورالعمل‌های فرآیند آزمایش باشد. برای اطلاعات بیشتر به استاندارد ASTM 855-9 مراجعه شود [۴].

۴-۲-۳ احتیاط‌ها

هنگام انجام آزمایشات می‌باید احتیاطات لازم برای جلوگیری از برخورد با قسمت‌های برق دار ترانسفورماتور و هم چنین تجهیزات آزمایش در نظر گرفته شود. در این آزمایشات می‌توان از یک شخص که در یک موقعیت مناسب نسبت به مکان آزمایش ایستاده استفاده نمود و یا این که از یک سیستم برای بی برق کردن فوری تجهیز در مواقع خطر و یا نزدیک شدن اشخاص غیر مرتبط و بی اطلاع به مدار برق دار استفاده نمود.

۴-۲-۴ علامت‌های هشدار و موانع نزدیک شدن به خطر

ناحیه‌ای که در آن آزمایش انجام می‌شود می‌باید علامت دار بوده و توسط یک نوار که به راحتی مشهود می‌باشد مشخص شود.

۴-۲-۵ جو درون مخزن ترانسفورماتور

پیش از ورود به مخزن اصلی ترانسفورماتور لازم است از وضعیت جوی داخل تانک ترانسفورماتور برای تنفس کامل اطمینان حاصل کرد. این موضوع باید به استناد راهنمای سازنده ترانسفورماتور صورت گیرد.

۴-۳-۱ ایمنی تجهیزات

۴-۳-۱-۱ پیامد فالت‌های غیر مترقبه تجهیزات تحت آزمایش

بعضی از آزمایش‌های خاص عایقی امکان ایجاد آتش و یا احتراق در اثر فالت‌های شدید را فراهم کند بنابراین تأکید می‌گردد پیش از انجام آزمایش، تجهیزات آتش نشانی مناسب در دسترس قرار گیرد.

۴-۳-۲ اضافه ولتاژ

در حین آزمایش ولتاژ فشار قوی امکان افزایش ولتاژ بیش از حد تعیین شده وجود دارد. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از این موضوع می‌توان از دو گوی با فاصله هوایی از پیش تنظیم شده استفاده کرد. ولتاژ آرک در این گوی‌ها می‌باید کمی بیشتر از ولتاژ فشار قوی تعیین شده برای آزمایش باشد (برای اطلاعات بیشتر به استاندارد

IEEE std4-1990 مراجعه شود). با قرار دادن یک مقاومت به صورت سری با گوی‌ها می‌توان از آرک به عنوان یک سیگنال هشدار استفاده کرد و یا با استفاده از یک مدار کمکی می‌توان در صورت افزایش غیر مجاز ولتاژ، فرمان تریپ را برای بریکر منبع تغذیه ولتاژ ارسال کرد [۲۰].

۳-۳-۴ کلاسهای مختلف سیستم عایقی

هنگامی که یک ترانسفورماتور در بخش‌های مختلف خود دارای کلاسهای متفاوت سیستم عایقی باشد، برای اعمال ولتاژهای آزمایش عایقی لازم است کمترین کلاس موجود در سیستم عایقی ترانسفورماتور به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گیرد و ولتاژ آزمایش بر آن مبنا تعیین گردد.

۴-۳-۴ آزمایش تحت خلأ

هنگامی که ترانسفورماتور در شرایط خلأ قرار دارد به هیچ وجه نباید هیچ آزمایشی بر روی آن صورت گیرد. چرا که قدرت عایق سیستم در این شرایط بسیار کم می‌باشد.

۵-۳-۴ برق گیر

در صورتی که ولتاژ آزمایش ترانسفورماتور در آزمایش‌های مختلف بیش از ولتاژ نامی ترانسفورماتور باشد لازم است برق گیرهای ترانسفورماتور پیش از برق دار کردن ترانسفورماتور از مدار خارج گردند. این عمل باعث جلوگیری از آسیب رسیدن به برق گیرها و هم چنین محدودیت ولتاژ اعمالی به علت عملکرد برق گیر در ولتاژهای بالا می‌گردد.

۵-آزمایش‌ها و تکنیک‌های آزمایش برای تجهیزات مختلف ترانسفورماتورها [۲۵].

۱-۵ سیم پیچ‌ها

به طور کلی بازرسی و آزمایش سیم پیچ‌ها برای بررسی وضعیت آن‌ها از لحاظ جابه جایی فیزیکی، ضعف اتصالات، قطع شدن اتصالات، اتصال حلقه سیم پیچ‌ها یا خراب شدن سیستم عایقی می‌باشد. در این بخش پارامترهایی که در آزمایش‌های سیم پیچ‌ها اندازه گیری می‌شوند و هم چنین معیارهای کیفی آن بیان می‌گردند. در آزمایش‌های

سیم پیچ ها لازم است پمپ های روغن ترانسفورماتور از مدار خارج شوند.

۵-۱-۱ مقاومت اهمی سیم پیچ ها

علت اندازه گیری مقاومت سیم پیچ ترانسفورماتور در سایت، بررسی شرایط غیر طبیعی سیم پیچ های ترانسفورماتور به دلیل عدم استحکام اتصالات، شکستگی هادی ها و مقاومت بالا در کنتاکت های تپ چنجر می باشد. تفسیر و تحلیل نتایج این آزمایش بر پایه مقایسه مقادیر اندازه گیری شده در فازهای مختلف می باشد با مقایسه مقاومت اهمی سیم پیچ های فشار ضعیف با یک دیگر و سیم پیچ های فشار قوی با یک دیگر و بررسی تفاوت های مقادیر اندازه گیری شده می توان وضعیت سیم پیچ های ترانسفورماتور را ارزیابی کرد. این مقایسه ها ممکن است با مرجع قرار دادن مقادیری که در کارخانه اندازه گیری شده صورت بگیرد. در صورتی که ترانس مقادیر اندازه گیری شده کوچک تر ۵٪ باشد، مقادیر قابل قبول می باشد.

از آن جایی که آزمایش های صورت گرفته بر مبنای دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد صورت می گیرد. لذا برای اصلاح مقادیر اندازه گیری شده در دماهای دیگر می توان از رابطه زیر استفاده کرد (با افزایش دمای محیط در حین اندازه گیری مقاومت اهمی سیم پیچ ها افزایش می یابد).

$$R_s = R_m \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k}$$

که در آن

R_s = مقاومت در دمای مرجع (۲۰ درجه سانتی گراد)

R_m = مقاومت اندازه گیری شده

T_s = دمای مرجع (۲۰ درجه سانتی گراد)

$T_k = 234.5^\circ \text{C}$ (سیم پیچ از جنس مس)

$T_k = 225^\circ \text{C}$ (سیم پیچ از جنس آلومینیوم)

T_m = دمای محیط در حین اندازه گیری مقاومت

نکته: مقدار T_k برای آلیاژهای آلومینیوم تا مقدار ۲۳۰ درجه سانتی گراد نیز می تواند باشد.

تعیین دمای سیم پیچ های ترانسفورماتور در هنگام اندازه گیری مقاومت آن ها بسیار با اهمیت می باشد. اما اندازه گیری دمای سیم پیچ ها در شرایط کارگاهی بسیار مشکل می باشد. مقداری از روش های رایج برای این موضوع در زیر آورده شده است.

الف) قرار دادن یک ترمومتر در تماس با دیواره مخزن ترانسفورماتور. این روش در صورتی که از بی برق کردن ترانسفورماتور زمان کوتاهی گذشته باشد عدد صحیحی را ارایه نمی دهد.

ب) استفاده از نمایش دهنده دمای سیم پیچ ها که توسط کارخانه سازنده که بر روی ترانسفورماتور نصب شده است. با استفاده از این روش می توان دمای سیم پیچ ها را تخمین زد.

ج) برای ترانسفورماتورهایی که توسط نیتروژن پر شده و آب بندی گردیده اند ترمومترهای دایم در چاهک هایی که جهت این منظور در نظر گرفته شده نصب می گردند. برای وارد کردن یک ترمومتر در تانک اصلی بایستی تانک اصلی را از حالت آب بندی خارج کرد و فشار مثبت نیتروژن را از دست داد. که متعاقب آن امکان ورود رطوبت و یا ذرات خارجی و آلودگی و یا هاری ایجاد می گردد. ترمومترهایی که جهت این امر استفاده می گردند نبایستی از نوع جیوه ای باشند چرا که در صورت شکستن ته آن جیوه به داخل روغن و سیم پیچ ها نفوذ کرده و شرایط فالت را فراهم می کند. برای وارد کرده ترمومتر کالیبره آزمایش در چاهک ترمومترهای دایم این گونه از ترانسفورماتورها، بایستی ترمومتر دایم از موقعیت خود خارج گردد.

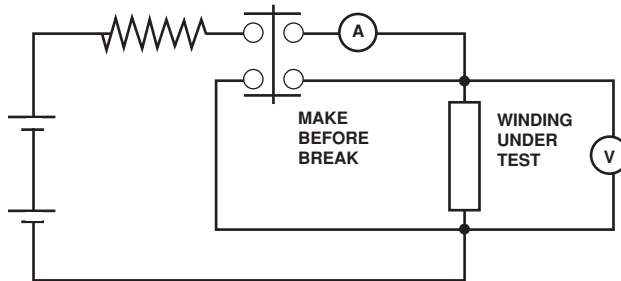
معمولاً سنسورهای مختلف دماهای متفاوتی را نمایش می دهند در صورتی که به مدت طولانی ترانسفورماتور خارج از سرویس باشد به گونه ای که دما در سرتاسر قسمت های مختلف ترانسفورماتور یکسان و یک نواخت شده باشد. مقدار متوسط دمای نشان داده شده توسط ترمومترهای مختلف نصب شده بر روی آن مقدار صحیح تری خواهد بود.

۵-۱-۱-۱ تکنیک اندازه گیری مقاومت اهمی هادی ها (سیم پیچ ترانسفورماتور)

مقاومت سیم پیچی ترانسفورماتور معمولاً با استفاده از تکنیک پل وتستون یا روش آمپر متر ولت مترو یا توسط میکرو اهم متر اندازه گیری می شود. معمولاً برای مقاومت های بالاتر از یک اهم از پل وتستون و برای مقاومت های زیر یک اهم از پل کلوین و یا میکرو اهم متر استفاده می شود.

۵-۱-۱-۱ روش ولت متر آمپر متر

در بعضی موارد روش ولت متر آمپر متر از روش پل کارا تر می باشد. این روش بایستی برای ترانسفورماتورهای با جریان نامی بیش از یک آمپر مورد استفاده قرار گیرد. برای اندازه گیری در این روش از ولت مترهای و آمپر مترهای دیجیتال و با دقت بالا می توان استفاده کرد. در این روش، اندازه گیری با استفاده از تزریق جریان مستقیم به سیم پیچ ها و اندازه گیری ولتاژ صورت می گیرد. مدار شکل ۲ نحوه اتصالات را در این روش اندازه گیری مقاومت سیم پیچ ها نمایش می دهد. برای محاسبه مقدار مقاومت می باید ولتاژ و جریان هم زمان خوانده شود و با استفاده قانون اهم مقدار مقاومت به دست آید.



شکل ۲ - مدار اندازه گیری مقاومت سیم پیچی با استفاده از روش ولت متر- آمپر متر

در این روش معمولاً از یک باتری ۱۲ ولت به عنوان منبع ولتاژ استفاده می شود. استفاده از هر گونه منبع تغذیه الکترونیکی در صورتی که میزان ریبیل ولتاژ آن کم تر از ۱٪ باشد نیز امکان پذیر می باشد.

به منظور به حداقل رساندن خطا در اندازه گیری لازم است موارد زیر در نظر گرفته شود. الف) وسایل اندازه گیری بایستی دارای رنجی باشند که مقدار خوانده شده در این آزمایش به مقدار حداکثر رنج آن نزدیک باشد و یا از ۷۰٪ حداکثر رنج آن بیشتر باشد. ب) پلاریته مغناطیسی هسته در طی کلیه اندازه گیریهای مقاومت اهمی یکسان باشد.

توجه: معکوس شدن پلاریته ولتاژ باعث تغییر در ثابت زمانی مدار مغناطیسی شده و سبب ایجاد خطا در اندازه گیری می گردد.

ج) سیمهای ولت متر بایستی مجزا از سیمهای حامل جریان باشند و تا حد ممکن به

ترمینال های سیم پیچ هایی که بایستی مقاومتشان اندازه گیری شوند باشند و این موضوع باعث جلوگیری از ورود خطا به مقادیر اندازه گیری در اثر مقاومت سیم های حامل جریان می گردد.

معمولاً سیم پیچ های ترانسفورماتورها دارای ثابت زمانی زیادی می باشند. خواندن مقادیر ولت متر و آمپر بایستی پس از ثابت شدن آنها صورت گیرد. برای کاهش زمان ثابت شدن جریان از یک مقاومت کاملاً اهمی خارجی می توان استفاده کرد. این مقاومت به صورت سری با منبع ولتاژ DC قرار می گیرد. مقدار این مقاومت بایستی نسبت به مقدار مقاومت سیم پیچ ترانسفورماتور بزرگتر باشد. برای جبران افت ولتاژ در اثر وارد کردن مقاومت اضافی بایستی ولتاژ منبع ولتاژ افزایش داده شود.

زمان مورد نیاز برای ثابت شدن جریان با مدار باز بودن سیم پیچ های دیگر کاهش می یابد.

معمولاً جریان های مورد استفاده در این آزمایش بایستی از ۱۵٪ جریان نامی بیشتر شود. این موضوع از گرم شدن سیم پیچ ها و هم چنین افزایش مقاومت آنها جلوگیری می کند. مقدار مقاومت در هر سیم پیچ بایستی بیشتر از ۵٪ با مقدار مقاومت سیم پیچ های فازهای دیگر تفاوت داشته باشد.

توجه: در صورتی که جریان به صورت ناگهانی قطع شود باعث ایجاد ولتاژ زیاد در دو سر سیم پیچ می گردد. برای قطع جریان در این گونه مدارات بایستی از کلیدی که دارای قدرت عایقی مناسبی باشد استفاده نمود و پیش از قطع مدار بایستی دو سر سیم پیچ اتصال کوتاه شود تا از آسیب رسیدن به منبع ولتاژ و یا مقاومت سری جلوگیری شود.

برای جلوگیری از آسیب رسیدن به ولت متر بایستی پیش از وصل و یا قطع کردن جریان در مدار، ولت متر از مدار جدا باشد.

۵-۱-۱-۲ روش پل و یا میکرواهم متر برای اندازه گیری مقاومت سیم پیچ

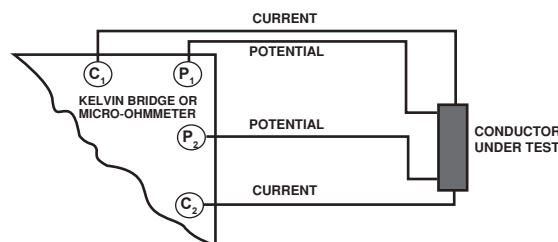
استفاده از مدار پل و میکرواهم متر برای اندازه گیری مقاومت اهمی آن یکسان می باشد. در این روش ۴ عدد سیم موجود می باشد که دو عدد آنها مربوط به ولتاژ و دو عدد آنها مربوط به جریان مدار اندازه گیری می باشد. هر چهار عدد سیم بایستی به

دو ترمینال انتهایی و ابتدایی سیم پیچ متصل گردند. باید توجه داشت که اتصال سیم‌ها به ترمینال‌ها بایستی کامل بوده و کلیه سیم‌ها مشابه باشند (از نظر جنس یا طول و سطح مقطع). هم چنین دقت شود که سیم‌های حامل جریان در بیرون از سیم‌های ولتاژ قرار گیرند. (به شکل ۳۲ مراجعه شود)

برای اندازه‌گیری مقاومت توسط روش پل بایستی مدار شامل مدار مقاومت‌های کمکی و مقاومت سیم پیچ به حالت تعادل درآید یعنی جریان صفر گردد و سپس با استفاده از رابطه مورد استفاده در تکنیک پل و مقدار مقاومت‌های کمکی مقاومت مجهول یعنی مقاومت سیم پیچی محاسبه شود.

(مطابق فرآیند در بخش ۵-۱-۱) از مقدار اصلاح شده مقاومت اندازه‌گیری شده (بر حسب دمای محیط) می‌توان جهت مقایسه با مقدار مقاومت اهمی به دست آمده در آزمایش‌های پیشین که در شرایط استاندارد اندازه‌گیری شده استفاده کرد تحلیل و نتایج این آزمایش بسیار وابسته به نوع هادی که مقاومت آن اندازه‌گیری شده می‌باشد. بعضی از هادی‌ها شامل چند رشته موازی بوده و قطع و یا عدم اتصال کامل یکی از هادی‌ها ممکن است در محدوده دقت شرایط اندازه‌گیری نباشد. در صورتی که قطعی در بیش از یک رشته اتفاق افتاده و یا در مقاومت مسیر افزایش مقاومت زیادی رخ داده باشد میکرو اهم متر یا پل کلون می‌تواند آن را ردیابی نماید.

جهت ارزیابی و تحلیل مقادیر مقاومت اهمی اندازه‌گیری شده توصیه می‌شود که با مقاومت فازهای دیگر و یا با ترانسفورماتور و مشابه آن و یا با مقادیر اندازه‌گیری شده در دوره‌های قبلی مقایسه شوند (در سایت‌های صنعتی). در مقایسه صورت گرفته اختلاف مقادیر نبایستی بیش از ۰.۵٪ باشد.



شکل ۳- مدار اتصالات در اندازه‌گیری مقاومت اهمی

۵-۱-۲ آزمایش های نسبت تبدیل و (پلاریته) سیم پیچ ها

۵-۱-۲-۱ کلیات

نسبت حلقه های یک ترانسفورماتور عبارت است از: نسبت تعداد حلقه های سیم پیچ های فشار قوی به تعداد حلقه های سیم پیچ های فشار ضعیف یک فاز و نسبت ولتاژ یک ترانسفورماتور عبارت است از: نسبت ولتاژ مؤثر (rms) سمت فشار قوی به نسبت ولتاژ مؤثر (rms) سمت فشار ضعیف تحت شرایط بار گیری مشخص. در موارد عملی در شرایط مدار باز نسبت ولتاژ و نسبت حلقه های یک ترانسفورماتور یکسان در نظر گرفته می شود.

پلاریته یک ترانسفورماتور وابسته به نحوه اتصالات داخلی می باشد و در پلاک نامی ترانسفورماتور قید می گردد. پلاریته ترانسفورماتور هنگامی که ترانسفورماتور بایستی با یک یا چند ترانسفورماتور دیگر موازی شود از اهمیت برخوردار می گردد. نتایج آزمایش پلاریته و نسبت تبدیل مقادیر یکتا بوده و بایستی کاملاً با پلاک مشخصات ترانسفورماتور مطابقت داشته باشد.

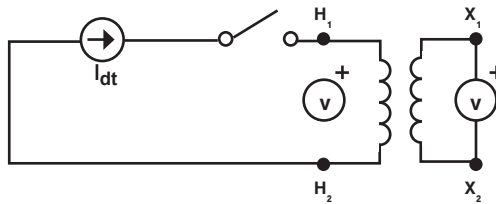
۵-۱-۲-۲ آزمایش پلاریته ترانسفورماتور

برای انجام آزمایش نسبت حلقه های ترانسفورماتور دستگاه های تجاری زیادی موجود می باشد. این دستگاه ها در صورتی که مطابق دستورالعمل راهنما که توسط سازنده ارائه می گردند به کار گرفته شوند به خوبی و با دقت نسبت حلقه ها و پلاریته ترانسفورماتور را مشخص می کند.

در صورتی که این گونه دستگاه ها در دسترس نباشند پلاریته ترانسفورماتور با استفاده از فرآیند ذکر شده در بخش ۵-۱-۲-۱ و ۵-۱-۲-۲ امکان پذیر می باشد.

۵-۱-۲-۱-۲ آزمایش پلاریته ترانسفورماتور با استفاده از ضربه القایی

آزمایش پلاریته توسط ضربه القایی را می توان با استفاده از دو عدد ولت متر DC و یک منبع جریان انجام داد. برای ایجاد ایمنی بیشتر ترجیحاً بایستی جریان به سمت ولتاژ فشار قوی تزریق گردد. شکل ۴ مدار این آزمایش را نشان می دهد.



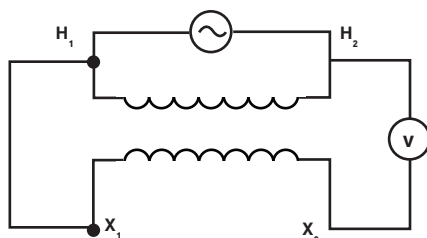
شکل ۴- مدار آزمایش پلاریته با استفاده از ضربه القایی

برای انجام این آزمایش یک ولت متر DC می‌باید بین ترمینال‌های به گونه ای بسته شود که ترمینال مثبت ولت متر به ترمینال متصل شود ولت متر DC دیگر بایستی به ترمینال‌های (ترمینال به ترمینال مثبت وصل شود) ولت متر متصل شود. یک منبع با ولتاژ DC با دامنه کم مانند باتری بایستی به ترمینال‌های متصل گردد. اتصال این منبع ولتاژ باعث ایجاد یک جریان کم و حرکت قابل توجه عقربه ولت متر در ترمینال‌های پس از وصل کلید خواهد گردید. اتصال منبع ولتاژ DC بایستی به گونه ای باشد که ولت متر DC عدد مثبت را نمایش دهد. مقدار حرکت عقربه ولت متر حایز اهمیت نمی باشد. جهت بررسی جهت انحراف عقربه ولت متر DC متصل به ترمینال‌های، بایستی هنگامی که تحریک قطع می گردد (توسط کلید) جهت حرکت عقربه ولت متر در نظر گرفته شود. در صورتی که انحراف عقربه به سمت مثبت باشد. پلاریته مطابق علامت گذاری‌های مدار بوده می باشد در صورتی که انحراف عقربه به سمت منفی باشد پلاریته سیم پیچ‌ها بر خلاف مدار است. میزان انحراف عقربه اهمیتی در تعیین پلاریته ندارد.

۵-۱-۲-۲-۲ آزمایش پلاریته ترانسفورماتور با استفاده از اعمال ولتاژ متناوب

در صورتی که نسبت تبدیل ترانسفورماتور کوچک‌تر از ۳۰ باشد می‌توان پلاریته ترانسفورماتور را با استفاده یک منبع ولتاژ متناوب و یک ولت متر ac مطابق شکل ۵ انجام داد. ترانسفورماتور بایستی مطابق مدار شکل ۵ به مدار آزمایش متصل شود. یک ولتاژ متناوب با دامنه کم (چند ده ولت) توسط یک اتو ترانسفورماتور به مدار تغذیه شود و به ترمینال‌های H_1, H_2 متصل شود.

در صورتی که ولت متر ac مقداری کمتر از ولتاژ اعمالی را نمایش دهد پلاریته مطابق مدار می‌باشد در صورتی که ولت متر مقداری بیشتر از ولتاژ اعمالی را نمایش دهد پلاریته بایستی به صورت معکوس علامت گذاری شکل می باشد.



شکل ۵- آزمایش پلاریته با استفاده از روش ac

۵-۱-۲-۳- آزمایش پلاریته ترانسفورماتورهای چند فازه

کلیه فازهای یک ترانسفورماتور چند فازه بایستی با توجه به ترمینال‌های مشخص شده پلاریته یکسان باشند. برای تعیین پلاریته این ترانسفورماتورها می‌توان از روش‌های ذکر شده در بخش‌های ۵-۱-۲-۲ و ۵-۱-۲-۲-۲ و یا با استفاده از دستگاه‌های آزمایش تجاری موجود استفاده نمود.

۵-۱-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری نسبت تبدیل ترانسفورماتور

برای اندازه‌گیری نسبت تبدیل ترانسفورماتور انواع دستگاه‌های تجاری که توسط شرکت‌های صنعتی ساخته می‌شوند در بازار موجود می‌باشد این دستگاه‌ها در صورتی که مطابق دستورالعمل راهنمای سازنده به کار گرفته

۵-۱-۲-۳- روش ولت متری

در این روش از دو ولت متر ac استفاده می‌شود. یکی از این ولت مترها با سمت فشار قوی و دیگری با سمت فشار ضعیف موازی می‌شوند. سپس سیم پیچی سمت فشار قوی توسط ولتاژی که بیش از ولتاژهای ولت متر نباشد تحریک می‌گردد. و سپس مقادیر ولتاژ در ولت متر خوانده شده و ثبت می‌گردد. در مرحله دوم آزمایش بایستی جای دو ولت متر عوض و مجدداً مقادیر خوانده شده و ثبت شوند. مقدار متوسط نسبت تبدیل به دست آمده بیان گر مقدار حقیقی نسبت تبدیل ترانسفورماتور می‌باشد. خواندن مقادیر نشان داده شده توسط ولت متر به صورت هم زمان از ملزومات این آزمایش می‌باشد.

دقت ولت متر به کار گرفته شده بایستی با توجه به مقدار 0.5% نسبت تبدیل ترانسفورماتور انتخاب شود.

۵-۱-۲-۳-۲ اندازه گیری نسبت تبدیل با استفاده از پل تعیین ضریب قدرت و ظرفیت خازنی

نسبت تبدیل را می توان با استفاده از پل تعیین ضریب قدرت و ظرفیت خازنی (این پل گاهی با نام پل ضریب پراکندگی نیز نامیده می شوند) اندازه گیری کرد. نتایج آزمایش نسبت تبدیل با استفاده از این روش به خوبی آزمایش با استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ می باشد که در آن ها خطای تغییر فاز ولتاژ نیز وارد می گردد. علاوه بر آن توسط این دستگاه می توان ولتاژ با سطح بالا را به ترانسفورماتور اعمال نمود معمولاً این ولتاژ در حدود ۱۰ الی ۱۲ کیلو ولت می باشد. برای انجام این آزمایش توسط دستگاه پل دستگاه های مختلفی توسط سازندگان صنعتی ساخته شده است. دستورالعمل راهنمای این دستگاه ها روش دقیق انجام آزمایش را بیان کرده است.

۵-۱-۲-۴ تحلیل نتایج آزمایش نسبت تبدیل ترانسفورماتور

تِلرانس نسبت تبدیل در فازهای مختلف یک ترانسفورماتور بایستی کم تر از 0.5% در مقایسه با مقدار بیان شده در پلاک نامی ترانسفورماتور باشد. برای ترانسفورماتورهای سه فاز به اتصال ستاره این تِلرانس برای ولتاژ فاز به نوترال در نظر گرفته می شود. در صورتی که ولتاژ فاز به زمین به صورت مشخص قید نشده باشد با استفاده از تقسیم ولتاژ فاز به فاز بر می توان آن را تعیین نمود.

بعضاً مشاهده می شود نسبت تبدیل دو سیم پیچ های طرفین در ترانسفورماتور سه فاز به نسبت تبدیل قید شده در پلاک نامی متفاوت می باشد. در صورتی که این اختلاف کم تر از تِلرانس 0.5% درصد باشد قابل قبول بوده و دلیلی برای رد ترانسفورماتور نمی باشد. ندرتاً مشاهده می شود که نسبت تبدیل یک ترانسفورماتور سالم با مقدار قید شده در پلاک نامی آن متفاوت می باشد این موضوع هنگامی ممکن است اتفاق بیافتد که یک ترانسفورماتور بسیار بزرگ دارای یک سیم پیچی فشار ضعیف با تعداد دورهای کم باشد. در این حالت اندازه گیری بایستی در شرایطی صورت بگیرد که کلیه حلقه های سیم پیچ سمت فشار ضعیف در مدار باشند (با استفاده از تپ چنجر) چرا که ممکن است تعداد

حلقه‌های سمت فشار ضعیف کم تر از ۲۰۰ دور باشد (برای دقت ۰/۵٪ در نسبت تبدیل بایستی حداقل تعداد دور سیم پیچ‌ها ۲۰۰ دور باشد). برای اطلاعات بیشتر به استاندارد IEEE Std C57.90-1999 مراجعه شود [۲۵].

بایستی توجه داشت که در ترانسفورماتورهایی که تپ چنجر در سمت فشار ضعیف آن‌ها قرار داده شده است، ممکن است تعداد حلقه‌های بین هر دو تپ یکسان نباشند (به دلیل لزوم ایجاب شده درمسایل طراحی) در چنین حالتی تغییرات ولتاژ در تغییرات تپ‌های مقداری یکسان نخواهد بود. گرچه ممکن است مقادیر اندازه‌گیری شده در این تپ‌ها دقیقاً مطابق پلاک مشخصات ترانسفورماتور نباشد. ولی این نسبت تبدیل در کلید تپ‌ها و برای هر سه فاز بایستی یک سان باشند. (از تفرانس مجاز برخوردار باشند)

۳-۱-۵ جریان تحریک

۱-۳-۱-۵ کلیات:

آزمایش جریان تحریک تک فاز در مکان یابی فالت‌ها، هم چون خرابی در ساختمان هسته مغناطیسی ترانسفورماتور، تغییر مکان سیم پیچ‌ها، اتصال حلقه و یا اشکال در سیستم تپ چنجر مناسب می باشد. این شرایط باعث تغییر در ولولتانس مدار مغناطیسی ترانسفورماتور و در نتیجه افزایش جریان مورد نیاز جهت ایجاد فلوی مغناطیسی مطلوب می گردد.

۲-۳-۱-۵ روش های آزمایش

این آزمایش شامل اندازه گیری ساده جریان تک فاز در یک سمت ترانسفورماتور و معمولاً سمت فشار قوی بوده در حالی که دیگر سمت ترانسفورماتور مدار باز می باشد (در این حالت نوترال زمین می گردد). در ترانسفورماتورهای سه فاز ولتاژ تک فاز برای هر سیم پیچ به صورت جداگانه اعمال شده و جریان‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌گردند. این آزمایش بایستی با بالاترین ولتاژ ممکن صورت گرفته و از ولتاژ نامی ترانسفورماتور تجاوز نکند. در صورت امکان، سیستم آزمایش بایستی جریان‌های خازنی سیم پیچ‌ها با یک دیگر و با بدنه تانک و با هسته مغناطیسی را اندازه گیری کند. جهت مقایسه جریان های اندازه گیری شده در فازهای مختلف بایستی ولتاژ اعمالی و شرایط اتصالات برای کلیه فازهای یکسان در نظر گرفته شوند.

۵-۱-۳-۳ تحلیل نتایج آزمایش

روش معمول برای تحلیل نتایج آزمایش جریان تحریک، مقایسه نتایج آزمایش‌های قبلی و یا ترانسفورماتورهای تک فاز مشابه و یا در فازهای مختلف ترانسفورماتورهای سه فاز می باشند. در اکثریت ترانسفورماتورهای سه فاز جریان تحریک در سیم پیچ‌های طرفین ترانسفورماتور بیشتر از جریان سیم پیچ وسط می باشد. برای اندازه‌گیری جریان تحریک در ترانسفورماتورهای دارای تپ چنجر (OLTC) توصیه می شود که اندازه‌گیری‌ها در تپ‌های وسط و نوترال و تپ اول در دو جهت مثبت و منفی صورت می گیرد. نتایج گرفته شده در تپ‌های مختلف ممکن است متفاوت باشند اما هماهنگی آن‌ها در فازهای مختلف باید مشاهده شود. برای تحلیل مطلوب نتایج اندازه‌گیری‌ها بایستی فهم صحیحی از تغییر جریان تحریک به علت تغییر تپ موجود باشد.

۵-۱-۳-۴ تأثیر پسماند مغناطیسی در هسته

هسته ترانسفورماتور ممکن است به علت جدا شدن از شبکه برق و یا آزمایش اندازه‌گیری مقاومت DC سیم پیچ‌ها دارای پسماند مغناطیسی باشد. پسماند مغناطیسی سبب ایجاد جریان تحریک بیشتر از حالت طبیعی خواهد گردید.

در سایت‌های صنعتی برای تمایز افزایش جریان تحریک ناشی از فالت در ترانسفورماتور و یا پسماند مغناطیسی روش‌های متداولی موجود نمی باشد. ولی تجارب نشان داده است که گرچه معمولاً پسماند مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور موجود می باشد ولی در بیشتر حالات باعث تغییرات قابل توجه در نتایج اندازه‌گیری‌ها نمی گردد.

در اکثر فالت‌ها و اشکالاتی که توسط فرآیند اندازه‌گیری جریان تحریک ردیابی می گردند اختلاف جریان تحریک اندازه‌گیری شده بین دو فاز می باید از ۱۰٪ بیشتر گردد. این مقایسه ممکن است با جریان‌های اندازه‌گیری شده در دوره‌های قبلی نیز انجام شود. اختلاف‌های کم تر در جریان فازهای مختلف ممکن است بیان گر فالت در هسته مغناطیسی نیز بوده و لازم است تحت بررسی دقیق قرار گیرد.

در صورتی که اختلاف قابل توجه در جریان‌ها مشاهده شود برای خارج کردن اثر پسماند مغناطیسی در نتایج اندازه‌گیری بایستی هسته مغناطیسی، مغناطیس زدایی شود. توصیه می شود برای جلوگیری از ایجاد پسماند مغناطیسی آزمایش اندازه‌گیری مقاومت اهمی DC پس از آزمایش جریان تحریک ترانسفورماتور صورت گیرد.

۵-۳-۱-۵ روش های مغناطیس زدایی هسته

دو روش برای مغناطیس زدایی هسته ترانسفورماتور وجود دارد. روش اول اعمال یک جریان متناوب با دامنه کم شونده به یکی از سیم پیچ های ترانسفورماتور می باشد. برای اکثر ترانسفورماتورهای قدرت که دارای ولتاژ بالا می باشند این آزمایش غیر عملی بوده و باعث ایجاد خطرات انسانی می گردد.

روش دیگری که دارای کارایی خوبی می باشد استفاده از اعمال جریان DC می باشد. پایه این روش بر مبنای خنثی کردن پسماند مغناطیسی هسته آهنی با استفاده از اعمال ولتاژ DC به یکی از سیم پیچ های ترانسفورماتور می باشد. ولتاژ DC اعمال شده به صورت متناوب پلاریته آن معکوس شده و دامنه آن کاهش می یابد است مقدار ولتاژ در هر تناوب به گونه ای انتخاب می شود که جریان مغناطیس زدا در هر تناوب نسبت به تناوب قبلی کمتر شود و سپس پلاریته عوض شده و فرآیند تکرار می گردد و آن قدر این مراحل تکرار می شود تا جریان به مقدار صفر برسد. در ترانسفورماتورهای سه فازه روش کاربردی این است که فرآیند برای فازی صورت گیرد که دارای بیشترین جریان تحریک باشد. تجربه نشان داده است که در اکثر موارد، این فرآیند جهت مغناطیس زدایی کل هسته کفایت می کند.

۵-۱-۴ امپدانس اتصال کوتاه

۵-۱-۴-۱ کلیات

در بعضی موارد در سایت های صنعتی، امپدانس اتصال کوتاه (Z ٪) ترانسفورماتورهای قدرت اندازه گیری شده و با پلاک نامی یا نتایج ارایه شده توسط کارخانه سازنده مقایسه می شوند. این آزمایش برای ردیابی حرکت سیم پیچ ها که ممکن است در اثر آزمایش های کارخانه ای اتفاق افتاده باشد به کار گرفته می شود. حرکت سیم پیچ ها معمولاً به علت جریان های شدید فالت و یا آسیب های مکانیکی در اثر حمل و نقل و یا نصب اتفاق می افتد.

اندازه گیری امپدانس اتصال کوتاه معمولاً برای هر فاز به صورت جداگانه صورت می گیرد. تغییرات بیش از در امپدانس اتصال کوتاه بایستی مورد توجه و بررسی قرار گیرد. [۳۱]

۵-۱-۴-۲ روش و نحوه آزمایش

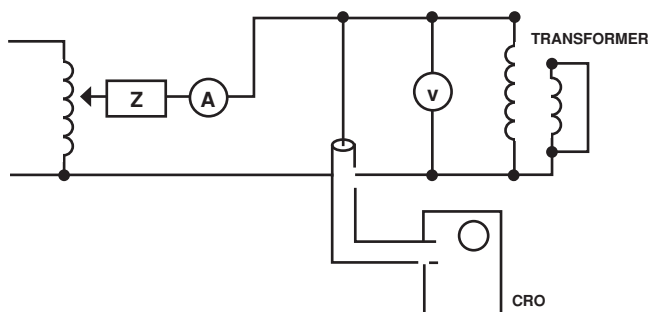
روش آزمایش: یک روش کار آ برای اندازه گیری امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتورها روش ولت متر- آمپر متر می باشد. این روش برای ترانسفورماتورهای تک فاز و سه فاز دارای کاربرد می باشد. در این روش از یک منبع تغذیه برای ایجاد جریان در امپدانس ترانسفورماتور استفاده می شود. جریان و ولتاژ امپدانس به صورت هم زمان اندازه گیری شده و نسبت ولتاژ به جریان امپدانس اتصال کوتاه می باشد.

آماده سازی: هادی های مورد استفاده برای اتصال کوتاه سیم پیچ های ترانسفورماتور بایستی از مقاومت کمی برخوردار باشند و سطح مقطع برابر یا بزرگ تر شماره ۱ AWG باشد. طول این هادی ها بایستی حتی المقدور کوتاه بوده و دور از مواد مغناطیسی قرار گیرند. اتصالات بایستی تمیز و محکم باشند. اعمال این موارد از اهمیت زیادی برخوردار بوده و سبب جلوگیری از ورود امپدانس های اضافی و تلفات و خطا در اندازه گیری ها می گردد. ابزارهای اندازه گیری بایستی توانایی اندازه گیری مقادیر مؤثر rms کامل شکل موج را دارا بوده و هم چنین از دقت حداقل ۰/۵٪ برخوردار باشند. منبع تغذیه بایستی ولتاژ و جریان با فرکانس نامی ترانسفورماتور را تأمین کند. برای این منظور می توان از یک اتو ترانسفورماتور ۰ تا ۲۸۰ ولت با جریان دهی حداقل ۱۰ آمپر استفاده کرد. برای ایجاد یک منبع ولتاژ با دامنه متغیر نمی توان از یک ژنراتور قابل حمل نیز استفاده کرد چرا که معمولاً شکل موج ولتاژ این ژنراتور کاملاً سینوسی نبوده و فرکانس آن ها نیز کاملاً پایدار و ثابت نمی باشد.

۵-۱-۴-۳ آزمایش امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای تک فاز

برای انجام این آزمایش یکی از سیم پیچ های ترانسفورماتور (معمولاً سیم پیچی فشار ضعیف) توسط یک هادی با مقاومت کم اتصال کوتاه شده و ولتاژ با فرکانس نامی ترانسفورماتور به سیم پیچی دیگر اعمال می گردد. دامنه ولتاژ اعمالی به گونه ای تنظیم می شود که جریان حدود ۰/۵ تا ۱ درصد جریان نامی یا ۲ تا ۱۰ آمپر وابسته به توان نامی ترانسفورماتور تحت آزمایش ایجاد می گردد. بایستی جریان کشیده شده از منبع تا حدی باشد که مانع از ایجاد شکستگی شکل موج ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور گردد. جهت این موضوع بایستی از یک اسکوپ برای مشاهده شکل موج ولتاژ اعمالی استفاده کرد. ولتاژ اعمالی جهت آزمایش امپدانس اتصال کوتاه می تواند نسبت به ولتاژ

نامی خیلی کم باشد، بدون این که باعث ایجاد خطا در نتایج آزمایش گردد. نمای یک نمونه مدار آزمایش امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور تک فاز در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶- مدار اندازه گیری امپدانس اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای تک فاز

برای اندازه گیری صحیح، ولت متر بایستی مستقیماً به ترمینال های ترانسفورماتور متصل شود تا افت ولتاژ ناشی از سیم های رابط به منبع تغذیه در نتایج اندازه گیری خطا ایجاد نکند. رنج دستگاه های اندازه گیری بایستی به گونه ای انتخاب شود که مقدارقراءت شده توسط آن در نیمه دوم از رنج آن قرار گیرد.

امپدانس اتصال کوتاه ($\%Z$) ترانسفورماتور تک فاز با استفاده از فرمول زیر قابل

محاسبه می باشد.

$$\%Z = (1/100) \cdot [(E_m / I_m) \cdot KVA_r / (KV_r)^2]$$

که در آن

$$E_m = \text{ولتاژ آزمایش}$$

$$I_m = \text{جریان}$$

$$KVA_r = \text{کیلو ولت آمپر نامی}$$

$$KV_r = \text{کیلو ولت نامی ترانسفورماتور}$$

۵-۴-۱-۴ آزمایش امپدانس اتوترانسفورماتور

یک اتوترانسفورماتور می تواند بدون تغییر اتصالات داخلی تحت آزمایش اندازه گیری امپدانس قرار گیرد. برای انجام این آزمایش بایستی سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده و ولتاژ با فرکانس نامی به سمت فشار قوی اتوترانسفورماتور اعمال شود و به دنبال آن پروسه ذکر شده جهت آزمایش امپدانس در ترانسفورماتورهای

تک فاز، بر روی اتوترانسفورماتور انجام شود.

۵-۴-۱-۵ آزمایش امپدانس برای ترانسفورماتورهای سه فاز دو سیم پیچه

آزمایش امپدانس یک ترانسفورماتور سه فاز را می توان بدون در نظر گرفتن نحوه سربندی (ستاره یا مثلث یا ...) توسط یک منبع تغذیه تک فاز انجام داد. نقطه نوترال ترانسفورماتور در صورت وجود نیز در این آزمایش بلا استفاده می باشد. جهت انجام این آزمایش بایستی سه ترمینال سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده و یک منبع ولتاژ قابل تنظیم با فرکانس به دو ترمینال سمت فشار قوی اعمال گردد. در این آزمایش سه مقدار به ازای انجام آزمایش بر روی جفت ترمینال ها با یک جریان یکسان به دست می آید (به عنوان مثال $H_1, H_2, H_3, H_1, H_2, H_3$). با اندازه گیری مقادیر یاد شده امپدانس در هر $(\%Z)$ ترانسفورماتور سه فاز از رابطه زیر به دست می آید.

$$\%Z = (1/10) \cdot [(E_{12} + E_{23} + E_{31}) / I_m \cdot [KVA_{3r} / (KV_r)^2]]$$

که در آن

$$E_{12}, E_{23}, E_{31} = \text{ولتاژهای آزمایش}$$

$$I_m = \text{جریان آزمایش}$$

$$KVA_{3r} = \text{کیلو ولت آمپر نامی سه فاز}$$

$$KV_r = \text{ولتاژ نامی خط - خط ترانسفورماتور بر حسب کیلو ولت}$$

۵-۴-۱-۶ آزمایش امپدانس در ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ

جهت اندازه گیری امپدانس ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه که سه فازه و یا تک فاز می باشند این آزمایش مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش امپدانس یک جفت سیم پیچ در هر ساق اندازه گیری می شود. یعنی برای یک ترانسفورماتور سه سیم پیچ سه فاز سه مقدار برای هر سیم پیچ در هر ساق به دست آمده که قابل مقایسه می باشند. آزمایش اندازه گیری امپدانس برای ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ طبق روش ترانسفورماتورهای دو سیم پیچ می باشد. با این تفاوت که سه مقدار منحصر بفرد برای هر سیم پیچ در هر ساق با استفاده از عبارات زیر به دست می آید.

$$Z_1 = (Z_{12} - Z_{23} - Z_{31})/2$$

$$Z_2 = (Z_{23} - Z_{31} - Z_{12})/2$$

$$Z_3 = (Z_{31} - Z_{12} - Z_{23})/2$$

که در آن Z_{31} ، Z_{23} ، Z_{12} امپدانس های اندازه گیری شده جفت سیم پیچ ها در هر ساق بوده و بر مبنای KVA یکسان تعیین می گردند.

۵-۱-۴-۷ آزمایش امپدانس در اتوترانسفورماتور با سیم پیچ سوم

آزمایش امپدانس در اتوترانسفورماتور با سیم پیچی سوم تک فاز با سه فازه نیز مطابق روش قید شده برای ترانسفورماتورهای سه سیم پیچی می باشد.

۵-۱-۴-۸ تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش امپدانس

مشاهده تغییر در مقدار امپدانس اتصال کوتاه بیانگر حرکت سیم پیچ ها در داخل ترانسفورماتور می باشد. از آنجایی که خطای اندازه گیری کلی نمی تواند بیشتر از یک درصد باشد، استفاده از دستگاه های اندازه گیری با دقت ۰/۵٪ قابل قبول می باشند. حدود ۲٪ تفاوت، در مقدار امپدانس اتصال کوتاه فازهای مختلف قابل قبول می باشد. اما تفاوت بیشتر از ۳ ±٪ قابل توجه و بررسی می باشد. به عنوان مثال تغییر و تفاوت امپدانس اتصال کوتاه به میزان ۵/۴٪ - ۰/۵٪ نسبت به فازهای دیگر بیانگر تغییر امپدانس اتصال کوتاه حدود ۸٪ نسبت به آن ها می باشد. برای اطلاعات تکمیل جهت آزمایش امپدانس اتصال کوتاه به استاندارد IEEE Std C57.90-1999 مراجعه شود.

۵-۱-۵ مقاومت عایقی

۵-۱-۵-۱ کلیات

اندازه گیری مقاومت عایقی معمولاً جهت بررسی خشک بودن (عاری بودن از رطوبت) تا حد قابل قبول عایق های سیم پیچ ها و هسته انجام می گیرد. آزمایش مقاومت عایقی هم چنین امکان ردیابی بعضی از عیوب پنهانی موجود در بوشینگ های (مقره های) ترانسفورماتور را ایجاد می کند. در تحلیل نتایج آزمایش مقاومت عایقی امکان مشاهده عدم تطابق نتایج آزمایش ها در

تجهیزات مختلف و در شرایط مختلف وجود دارد. لذا برای نتیجه‌گیری و تحلیل صحیح نتایج آزمایش، بایستی آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های بر روی تجهیزات مشابه و در شرایط مشابه صورت گیرد.

با اعمال ولتاژ به یک سیستم عایقی جریانی که شامل سه جزء می‌باشد از منبع کشیده می‌شود این جریان‌ها به شرح زیر می‌باشد.

الف) جریان شارژ خازنی

این جریان در اثر شارژ شدن خازن‌هایی ایجاد شده توسط هادی‌ها و عایق‌هایی که این هادی‌ها را در بر گرفته‌اند ایجاد می‌شود. البته ساختار و ابعاد فیزیکی مجموعه هادی و عایق آن تعیین‌کننده ظرفیت خازن مجموعه می‌باشد. هر چه ظرفیت خازنی بیشتر باشد جریان خازنی کشیده شده در لحظه وصل منبع ولتاژ بیشتر خواهد بود. مقدار این جریان در حالتی که ولتاژ منبع تغذیه dc باشد با گذشت زمان افت کرده و در بعضی از تجهیزات با شارژ کامل ظرفیت خازنی مقدار آن به صفر خواهد رسید.

ب) جریان جذبی

این جریان در اثر تغییر موقعیت مولکولی در عایق در اثر وصل ولتاژ و ایجاد میدان الکتریکی در آن ایجاد می‌شود. تغییر موقعیت مولکولی باعث کشیده شدن جریان از منبع ولتاژ به مدت چندین ثانیه تا چندین دقیقه در ترانسفورماتورها می‌گردد و به صورت انرژی در ساختار عایقی ذخیره می‌شود.

ج) جریان نشستی

این جریان فوراً به مقدار نهایی و پایدار خود می‌رسد. مقدار جریان نشستی عبارت است از حاصل تقسیم مقدار ولتاژ اعمالی به عایق به مقدار مقاومت اهمی عایق (مطابق با قانون اهم). یعنی هر چه مقاومت عایقی بیشتر باشد مقدار جریان نشستی کمتر بوده و بیانگر کیفیت بهتر مقاومت عایقی می‌باشد. در حالت ایده آل به منظور اندازه‌گیری دقیق مقاومت عایقی بایستی مقاومت عایقی پس از این که جریان شارژ خازنی و جریان جذبی مولکولی به صفر رسید اندازه‌گیری صورت گیرد. (مراجعه شود به ۵-۱-۵ تا ۵-۲) اندازه‌گیری مقاومت عایقی در ترانسفورماتورها معمولاً با ولتاژ DC با دامنه تا مقدار ۵۰۰۰ ولت صورت می‌گیرد. آزمایش مقدار مقاومت عایقی با ولتاژ تا مقدار ۵۰۰۰ ولت

را می توان با استفاده دستگاه هایی که با باتری یا ژنراتورهای دستی تغذیه می شوند انجام داد این دستگاه ها تا ولتاژ ۵۰۰۰ ولت را ایجاد کرده و ولتاژ آن ها در سه الی چهار رنج (مثلاً ۱۰۰ و ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰) قابل تنظیم بوده و مقدار مقاومت عایقی مستقیماً قابل خواندن می باشد.

آزمایش اندازه گیری مقاومت عایقی با ولتاژ بیشتر از ۵۰۰۰ ولت را می توان با مگا اهم مترهایی با ولتاژ بالاتر و یا دستگاه های آزمایش مقاومت عایقی با ولتاژهای بیش از ۵۰۰۰ ولت انجام داد. این دستگاه ها ممکن است به میکروآمپرتر مجهز باشند که برای محاسبه مقدار مقاومت عایقی با استفاده از قانون اهم می توان مقدار آن را به دست آورد. برای اندازه گیری مقاومت عایقی دستگاه های بسیار مجهز موجود می باشد. ولی به هر صورت برای اندازه گیری صحیح و دقیق مقاومت عایقی بایستی اتصالات کامل و سیستم گارد موجود باشد. هم چنین به کارگیری دستورالعمل های سازندگان دستگاه در به دست آوردن نتایج صحیح ضروری و لازم می باشد.

یکی از عوامل بسیار مهم در مقدار مقاومت عایقی، دمای عایق در حین آزمایش می باشد. مقاومت عایقی نسبت به دما بسیار حساس بوده و رابطه عکس با آن دارد. در بعضی از سیستم های عایقی افزایش دما به میزان 10°C سبب افت مقاومت عایقی به مقدار نصف مقدار اولیه خواهد شد. در اندازه گیری مقاومت عایق معمولاً دمای 20°C به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و با استفاده از یک جدول و یا منحنی اصلاح، مقدار مقاومت عایقی در این دمای مرجع به دست می آید تا برای کاربردهای بعدی و یا مقایسه ها مورد استفاده قرار گیرد.

در این آزمایش تانک هسته بایستی زمین شده شده و سیم پیچ ها اتصال کوتاه گردند. سیم پیچی که تحت آزمایش نمی باشند بایستی زمین گردد. کلیه مقرر ها بایستی کاملاً تمیز شده به گونه ای که آثاری ناشی از آلودگی ها و هم چنین رطوبت بر روی آن ها باقی نماند.

توجه: هیچ مقدار استاندارد برای قابل قبول بودن مقدار مقاومت عایقی موجود نمی باشد ولی به هر صورت مقدار به دست آمده جهت مقایسه مقادیر قبلی مقاومت عایقی بوده و روند تغییر تدریجی کیفیت و وضعیت عایق را بیان می کند.

۵-۱-۲ آزمایش اندیس پلاریزاسیون

در آزمایش ترانسفورماتورهای بزرگ زمان طولانی جریان جذبی نیز ممکن است در نظر گرفته شود. آزمایش اندیس پلاریزاسیون، آزمایش اندازه‌گیری یک نسبت می‌باشد که برای پیش بینی کیفیت سیستم عایقی حتی در صورتی که جریان جذب پس از گذشت زمان طولانی به صفر نرسد به کار گرفته می‌شود. یکی از مهم ترین شاخصه های این آزمایش عدم حساسیت آن نسبت به دما می باشد چرا که عدد به دست آمده حاصل یک نسبت می باشد و در نتیجه نیازی به اصلاح مقدار به دست آمده در دمای مرجع نمی باشد.

آزمایش اندیس پلاریزاسیون آزمایش ارزیابی کیفیت عایق بوده که نیاز به صرف زمان ۱۰ دقیقه دارد. در این آزمایش مقاومت عایقی پس از یک دقیقه بعد از شروع آزمایش ثبت شده و مجدداً پس از گذشته ۱۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش مقدار مقاومت عایقی ثبت می گردد. اندیس پلاریزاسیون نسبت حاصل از مقدار مقاومت عایقی در ۱۰ دقیقه به مقدار مقاومت عایقی در ۱ دقیقه می باشد.

$$PI: R_{10} / R_1$$

که در آن

PI اندیس پلاریزاسیون و R مقاومت عایقی می باشد.

پس از قرایت مقادیر مقاومت عایقی بایستی ولتاژ اعمالی به صفر برگردانده شود و سیستم عایقی تخلیه گردد.

تفسیر آزمایش: برای ترانسفورماتورهای کوچک مقدار اندیس پلاریزاسیون برابر یا کمی بیشتر از ۱ می باشد. در ترانسفورماتورهای بزرگ تر اندیس پلاریزاسیون بین ۱/۱ تا ۱/۳ می باشد. مقدار بالای اندیش پلاریزاسیون بیانگر کیفیت خوب سیستم عایقی بوده و مقادیر کوچک تر از ۱ بیان گر نیاز فوری به تعمیر و نگهداری پیش گیرانه ترانسفورماتور می باشد.

در صورتی که مقدار اندیس پلاریزاسیون در محدوده مقادیر مطلوب برای سیستم عایق کاری نبوده و یا در مقایسه با مقادیر قبلی کم تر باشد نظافت و خشک کردن سیستم عایقی غالباً می تواند مقدار اندیس پلاریزاسیون را بهبود و به سطح مطلوب برساند.

۵-۱-۳ ایمنی

جریان شارژ خازنی و جریان جذبی تولید شده توسط ولتاژ آزمایش قابل برگشت می باشند و وابسته به ولتاژی که در آن ولتاژ مدار قطع می گردد انرژی در نمونه آزمایش باقی مانده و بسیار خطرناک می باشد و بایستی حتماً تخلیه گردد. توصیه می شود که با اتصال کوتاه کردن نمونه آزمایش در مدت حداقل چهار برابر زمان آزمایش عمل تخلیه صورت گیرد. پیش از لمس هادی های لخت توسط دست بایستی با استفاده از اندازه گیری از عدم وجود ولتاژ اطمینان حاصل گردد. اندازه گیری مقاومت عایقی بایستی در هنگامی که کلیه سیم پیچی و هادی های مرتبط با سیم پیچ ها کاملاً در روغن غوطه ور هستند انجام و اصلاح مقدار مقاومت عایقی در دمای مرجع صورت گیرد. انجام آزمایش مقاومت عایقی در صورت وجود خلأ در محفظه تانک ترانسفورماتور به هیچ وجه مجاز نمی باشد.

احتیاط: انرژی ذخیره شده در نمونه ممکن است مرگ بار باشد و بایستی به صورت ایمن تخلیه گردد.

۵-۱-۶ ظرفیت خازنی، ضریب قدرت و ضریب تلفات

۵-۱-۶-۱ ظرفیت خازنی

تجهیزات الکتریکی مورد بحث در این کتاب بسیار شبیه یک خازن ساده می باشند. این تجهیزات مانند یک خازن ساده شامل دی الکتریک (عایق) بین دو الکترود (هادی ها) می باشد. میزان ظرفیت خازنی این تجهیزات وابسته به مشخصه مواد دی الکتریک و فرم قرار گرفتن هادی ها می باشد. در تجهیزات الکتریکی در صورتی که مشخصه مواد عایقی و یا فرم قرار گرفتن هادی ها تغییر کند ظرفیت خازنی اندازه گیری شده تغییر خواهد کرد. این تغییرات معمولاً ناشی از آسیب دیدن و یا ضعیف شدن و یا آلوده شدن سیستم عایقی می باشد.

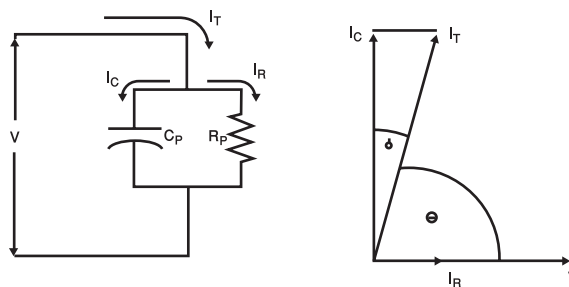
۵-۱-۶-۲ ضریب قدرت و ضریب تلفات

تلفات دی الکتریک در سیستم عایقی عبارت است از: توان تلف شده در عایق هنگامی که

به عایق ولتاژ متناوب اعمال می‌گردد. مقدار توان تلف شده در کلیه عایق‌ها در تجهیزات الکتریکی قابل اندازه‌گیری می‌باشند. مقدار کم توان تلف شده در عایق بیان‌گر کیفیت مطلوب عایق و مقدار زیاد توان تلف شده در آن بیان‌گر احتمال وجود اشکال و ضعف در عایق می‌باشد.

پیری طبیعی باعث افزایش میزان توان تلف شده (تلفات دی الکتریک) می‌گردد. آلودگی عایق‌ها توسط مدار شیمیایی، آب و کثیفی‌های دیگر نیز باعث افزایش توان تلف شده در عایق می‌گردد. هم‌چنین صدمات فیزیکی ناشی از تنش‌های الکتریکی و یا نیروهای تنشی (ارتعاشات و نیروهای الکترومغناطیسی) دیگر باعث افزایش در میزان توان تلف شده خواهد بود.

ضریب تلفات به صورت یک نسبت بدون دیمانسیون و بر حسب درصد بیان می‌گردد که نشان‌گر وضعیت کیفیت عایق می‌باشد. عبارت معمول برای این تلفات ضریب پراکندگی توان ($\tan\Delta$) یا ضریب قدرت عایق می‌باشد. اعمال ولتاژ متناوب به عایق باعث جاری شدن جریان در عایق می‌شود (مطابق شکل ۷) این جریان شامل دو بخش می‌باشد که یک بخش آن مقاومتی و بخش دیگر آن خازنی می‌باشد که هر کدام از این جریان‌ها به صورت مجزا قابل اندازه‌گیری می‌باشند. به عبارت ساده ضریب پراکندگی توان عایق ($\tan\Delta$) عبارت است از: نسبت جریان مقاومتی به نسبت جریان خازنی جاری در عایق و ضریب قدرت عایق عبارت است از: نسبت جریان مقاومتی به جریان کل جاری شده در عایق.



شکل ۷- دیاگرام برداری در آزمایش ضریب پراکندگی توان (ضریب توان تلف شده)

I_C = جریان خازنی	V = ولتاژ اعمالی
I_R/I_C = ضریب پراکندگی توان	I_T = جریان کل
I_R/I_T = ضریب قدرت	I_R = جریان مقاومتی

۵-۱-۶-۳ کاربرد آزمایش

نتایج آزمایش تلفات دی الکتریک دارای چندین فایده می باشد. از نتایج انجام این آزمایش بر روی تجهیزات نو و تازه دریافت شده از سازنده می توان برای بررسی و ردیابی اشکالات ممکن در فرآیند ساخت تجهیز و یا حمل و نقل و همین مقادیر بنچارک (مقادیر مرجع اولیه) برای مقایسه های بعدی استفاده کرد.

انجام این آزمایش به صورت دوره ای در طول سرویس دهی تجهیز می تواند روند پیر شدن طبیعی عایق و با سرعت بیش از حد تضعیف سیستم عایقی را نشان دهد. آزمایش های عیب یابی بر روی تجهیزات ممکن است موقعیت فالت و یا دلیل آن را روشن نماید. آزمایش های تلفات و دی الکتریک هنگامی بهترین مزایا را در اختیار قرار می دهد که به صورت دوره ای در برنامه تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شود.

۵-۱-۶-۴ تجهیزات آزمایش

تلفات دی الکتریک معمولاً توسط پل اندازه گیری تعیین می گردد که از آن نمونه می توان به پل شرینگ اشاره کرد. تجهیزات اندازه گیری از این نمونه امکان اندازه گیری مقدار خازن و هم چنین ضریب تلفات عایق تحت آزمایش را نیز دارند.

برای انجام این آزمایش علاوه بر پل اندازه گیری، نیاز به یک منبع ولتاژ و یک خازن استاندارد برای اندازه گیری ضریب تلفات می باشد. دستگاه های اندازه گیری قابل حمل که شامل پل، منبع تغذیه و خازن استاندارد و به صورت یک مجموعه می باشد برای آزمایش تجهیزات موجود در سایت توسط سازندگان مختلف ساخته شده است. این تجهیزات دارای ابعاد مختلف ولتاژهای مختلف و پروسه های کارکرد متفاوت می باشند. شخصی که انجام این گونه از آزمایش را بر عهده دارد بایستی کاملاً با پروسه انجام آزمایش و هم چنین نکات ایمنی این آزمایش ها آشنا باشد.

۵-۱-۶-۵ ولتاژ آزمایش

آزمایش تلفات دی الکتریک می تواند با هر ولتاژی که در محدوده ولتاژ نامی تجهیز الکتریکی باشد صورت گیرد. انجام آزمایش ضریب قدرت یا تلفات دی الکتریک با اعمال ولتاژ نامی تجهیزات الکتریکی فشار قوی در سایت امکان پذیر نمی باشد. جهت انجام آزمایش

به وسیله ابزار آزمایش قابل حمل، این تجهیزات از نظر ابعاد و وزن در سطح ولتاژ و جریان‌های محدود اما قابل قبول ساخته می‌شوند. به عبارت دیگر، اهمیت قابل حمل بودن این دستگاه‌ها باعث محدود کردن سطح ولتاژ و جریان دستگاه‌های آزمایش می‌گردد.

ولتاژ آزمایش تجهیزات در سایت‌های کارگاهی معمولاً در رنج ۱۰۰ ولت تا ۱۰ کیلوولت می‌باشد. آزمایش‌ها در سایت‌های کارگاهی معمولاً با ولتاژ نامی و تا ماکزیمم ۱۰ کیلوولت انجام می‌گیرد. برای انجام این آزمایش بایستی حتماً دستورالعمل‌های سازندگان تجهیزات و هم چنین استانداردهای آزمایش مد نظر و اجرا قرار گیرد.

۵-۱-۶-۶ شرایط محیطی

ثبت شرایط محیطی برای آزمایش‌ها و مخصوصاً آزمایش‌های دوره‌ای مقایسه‌ای بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

ضریب تلفات عایق نسبت به تغییرات دما حساس می‌باشد و لذا مقادیر اندازه‌گیری شده در دماهای مختلف بایستی با یک ضریب اصلاح گردند. این اصلاح امکان مقایسه صحیح نتایج چندین آزمایش را در دماهای مختلف فراهم می‌کند. دمای مرجع در آزمایش‌های عایقی معمولاً ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و ضرایب اصلاح را می‌توان از سازندگان این تجهیزات، شرکت‌های آزمایش‌کننده، سازندگان دستگاه‌های آزمایش و یا استانداردهای فنی استخراج نمود.

انجام آزمایش در دماهای بسیار پایین (دمای یخ زدگی) نبایستی صورت گیرد. چرا که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج اندازه‌گیری داشته و حتی باعث خطا در تحلیل‌ها می‌گردد. یکی از دلایل با اهمیت انجام این آزمایش ردیابی رطوبت عایق‌ها می‌باشد. از آن جایی که خاصیت الکتریکی یخ و آب بسیار متفاوت می‌باشند و امکان ردیابی یخ در عایق‌ها بسیار مشکل و حتی غیر ممکن می‌باشد، لذا لزوم عدم انجام آزمایش عایقی در دماهای بسیار پایین که آب تبدیل به یخ می‌شود محرز می‌گردد.

عوامل محیطی دیگر هم چون رطوبت نسبی و آلودگی هوا در زمان انجام آزمایش بایستی ثبت گردند تا در آزمایش‌های بعدی و مقایسه‌ها در نظر گرفته شوند. مقدار بسیار کمی از بخار آب بر روی سطح خارجی عایق باعث افزایش مقدار جریان ناشی سطحی و هم چنین افزایش توان تلف شده در عایق می‌گردد. این عامل مخصوصاً در

تجهیزات فشار ضعیف که دارای فاصله خزش کوتاه جریان در بوشینگ ها می باشد قابل ملاحظه می باشد. به این دلیل آزمایشات عایقی در شرایط آب و هوایی با رطوبت بالا و آلوده بایستی دقت و ملاحظات لازم صورت گیرد به عبارت دیگر، ارزیابی و تحلیل نتایج و انجام آزمایشات دقیق عایقی، در این شرایط کاری بسیار سخت می باشد.

تعیین ضریب قدرت عایقی ترانسفورماتورها اطلاعات خوبی در رابطه با کیفیت عایق سیم پیچ ها و سیم پیچ ها با بدنه ترانسفورماتور و روغن عایق در اختیار قرار می دهد. این آزمایش هم چنین میزان خشک بودن مجموعه عایق ترانسفورماتور را ارزیابی می کند. با بررسی ضریب قدرت عایق، چگونگی شرایط کارکرد، آسیب های احتمالی ناشی از رطوبت، کربنیزه شدن عایق ها، آسیب دیدگی بوشینگ ها، آلوده شدن روغن توسط مواد و یا ذرات هادی و زمین شدن نامناسب هسته قابل ردیابی می باشد. هر چند ضریب قدرت برای بیشتر ترانسفورماتورهای کهنه قابل استفاده زیر ۰/۵٪ در در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد اما در این تجهیزات ضریب قدرت بین ۰/۵٪ تا ۱٪ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد نیز ممکن است قابل قبول باشد ولی در مواردی که ضریب قدرت بیش از ۱٪ در ۲۰ درجه سانتی گراد باشد بایستی علل آن بررسی و جستجو شود.

۵-۱-۶-۷ اندازه گیری ها

کلیه خازن های ایجاد شده در یک تجهیز الکتریکی دارای سیستم عایقی بایستی صورت مجزا تحت آزمایش و کنترل کیفی قرار گیرند. بررسی و وضعیت عایق قسمت های مختلف یک تجهیز الکتریکی از این لحاظ ارزشمند است که محدوده مکانی اشکالات ضعف ها کوچکتر شده و با صرف زمان و هزینه کمتری می توان آن ها را ردیابی و برطرف نمود.

۵-۱-۶-۸ نحوه و روش آزمایش

- تجهیزات الکتریکی مورد آزمایش بایستی کاملاً از شبکه مجزا گردند (ایزوله شوند)
- بازرسی و بازدید چشمی تجهیز برای شناسایی و با ردیابی صدمات یا شرایط غیر طبیعی خارجی صورت گیرد.
- نوع سیستم بایستی تجهیز الکتریکی از لحاظ سادگی و یا پیچیده بودن مشخص

گردد (یک ترانسفورماتور سه فاز دارای یک سیستم عایقی پیچیده می‌باشد) تا نحوه اتصال مدار آزمایش و میزان ولتاژهای اعمالی تعیین گردد.

اندازه‌گیری‌های مورد نظر آزمایش بایستی بر طبق دستورالعمل‌ها و راهنماهای دستگاه و سازنده تجهیزات و هم چنین استانداردهای فنی صورت گیرد. در این آزمایش ممکن است نیاز به انجام آزمایش در حالات مختلف اتصالات سیم‌ها به ترمینال‌های ترانسفورماتور تحت آزمایش باشد.

- در فرم ثبت نتایج آزمایش بایستی کلیه مشخصات و اطلاعات درج شده بر روی پلاک مشخصات ترانسفورماتور تحت آزمایش درج شود.

تفسیر: با وجود این که مقادیر استاندارد برای تلفات مجاز عایقی برای بیشتر تجهیزات الکتریکی موجود نمی‌باشد اما این مقادیر برای ترانسفورماتورهای روغنی با عایق کاغذ موجود می‌باشد. به هر صورت بهترین روش، روش مقایسه‌ای می‌باشد. یعنی مقادیر اندازه‌گیری شده با دوره‌های پیشین و هم چنین تجهیزات کاملاً مشابه مقایسه گردد. در بعضی تجهیزات الکتریکی مقادیر نتایج آزمایشات تلفات دقیقی در راهنمای سازندگان تجهیزات درج می‌گردد که به عنوان مرجع می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

ضریب قدرت ترانسفورماتورها و رآکتورهایی که تازه با روغن عایق پر گردیده‌اند نبایستی در دمای در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد از ۰/۵٪ بیشتر باشد. در صورتی که این ضریب قدرت بیش از این مقدار باشد بایستی دلایل آن توسط تأمین کننده روغن روشن شود. در صورتی که علت زیاد بودن ضریب قدرت روغن عایق نو مواد ترکیبی آن باشد تعویض روغن با روغن با ضریب قدرت کم تر توصیه می‌گردد چرا که باعث تضعیف نتیجه‌گیری از این آزمایش‌ها می‌گردند. به هر صورت برق دار کردن یک ترانسفورماتور نو با ضریب قدرت بیش از ۰/۵٪ بدون بازرسی کامل داخلی و مشورت و یا فرآیندهای تعمیری و یا خشک کردن مجاز نمی‌باشد.

۷-۱-۵ آزمایش ولتاژ القایی (induced voltage)

۱-۷-۱-۵ کلیات

این آزمایش به ندرت در زمان نصب تجهیزات الکتریکی مانند ترانسفورماتورها انجام

می‌شود. از این آزمایش برای تعیین مناسب بودن شرایط این تجهیزات جهت سرویس دهی از لحاظ کیفیت عایقی و میزان تخلیه جزئی (در صورت وجود) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش هم چنین ممکن است برای ترانسفورماتورها و یا رگولاتورهایی که جهت تغییرات اساسی و یا اصلاحات ساختاری در نظر گرفته شده اند مورد استفاده قرار بگیرد.

آزمایش ولتاژ القایی معمولاً جهت ترانسفورماتورها با ولتاژ خیلی زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد اما به هر صورت برای ترانسفورماتورهای دیگر نیز ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد. اولین عواملی که در انجام این آزمایش بررسی می‌گردد عوامل زمان و هزینه این آزمایش می‌باشد. از دلایل دیگر عدم انجام این آزمایش بر روی ترانسفورماتورهای با کلاس ولتاژی پایین، عدم وجود تنش های ولتاژی در آنها می‌باشد. آزمایش های عیب یابی ممکن است در سایت صورت گیرد و از آن جایی که نمی‌توان کلیه تجهیزات مجاور تجهیزات تحت آزمایش را بی برق کرد و از طرفی برق دار بودن تجهیزات مجاور باعث سخت تر شدن تحلیل آزمایش ها می‌شود (به دلیل تخلیه های جزئی ناشی از تجهیزات مجاور و یا ولتاژ های رادیویی مؤثر (RIV)) لذا بایستی با توجه به این موارد و هم چنین هزینه های انجام این آزمایش، لزوم و یا عدم لزوم انجام آن بررسی گردد.

اشکالات جزئی در تعمیرات و یا نصب ترانسفورماتورها امکان ایجاد صدمات جدی پس از برق دار نمودن آنها را فراهم می‌کند. یکی از دلایل انجام آزمایش ولتاژ القایی، برق دار شدن ترانسفورماتور با ولتاژ بالاتر از ولتاژ نامی در این آزمایش می‌باشد. این کار باعث فعال کردن منابع تخلیه جزئی، اندازه گیری و تعیین مکان آنها می‌باشد. برای انجام این آزمایش نیاز به اعمال ولتاژ بالاتر از ولتاژ نامی با فرکانس بالاتر از فرکانس نامی می‌باشد. فرکانس بالاتر جهت جلوگیری از به اشباع رفتن هسته مغناطیسی ترانسفورماتور می‌باشد.

ایجاد این ولتاژ با استفاده از یک مجموعه موتور- ژنراتور می‌باشد. فرکانس ولتاژ تولیدی بایستی بین ۱۸۰ تا ۴۰۰ هرتز می‌باشد و با استفاده از یک اتو ترانسفورماتور متغیر می‌توان سطح ولتاژ را تنظیم نمود. ترانسفورماتور تحت آزمایش به صورت یک بار خازنی در مدار ژنراتور می‌باشد لذا برای کاهش بار یا جریان کشیده شده از ژنراتور می‌توان از یک سلف (راکتور) جبران ساز استفاده کرد. علاوه بر این ایجاد یک

بار پس فاز برای ژنراتور به وسیله موازی کردن یک سلف (راکتور) با موضوع آزمایش باعث جلوگیری از خطر خود تحریکی آرمیچر می گردد. (Armature reaction) این روش معمولاً برای سیستم های سه فازه مورد استفاده می گیرد اما برای سیستم های تک فاز نیز ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. ابزار اندازه گیری لازم در این آزمایش ضریب قدرت متر، PD متر با پهنای باند فرکانسی زیاد یا RIV متر با فرکانس ثابت و فرکانس متر می باشد. اطلاعات بیشتر در رابطه با وسایل اندازه گیری در استاندارد IEEE std c57.12.90- 1999 و IEEE std c57.113- 2002 آمده است [۲۵ و ۳۰].

روش دیگر انجام این آزمایش بر پایه رزونانس سری می باشد. در این روش هر فاز ترانسفورماتور به صورت جداگانه و تک به تک تحت آزمایش قرار می گیرد. در این تکنیک از یک راکتور (سلف) قابل تنظیم که بین ترانسفورماتور قابل تنظیم (به عنوان تنظیم کننده ولتاژ تغذیه) و سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور تحت آزمایش سری قرار می گیرد استفاده می شود. از آن جایی که ترانسفورماتورهای بزرگ به صورت یک بار خازنی در فرکانس آزمایش ولتاژ القایی ظاهر می شوند لذا بایستی راکتور به گونه ای تنظیم شود که پدیده رزونانس اتفاق بیافتد. با افزایش ولتاژ روی راکتور قابل تنظیم، ولتاژ ترانسفورماتور موضوع آزمایش افزایش می یابد و به وسیله تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور، ولتاژ مورد نیاز آزمایش ترانسفورماتور حاصل خواهد شد. در صورتی که ترانسفورماتور تحت آزمایش به اندازه کافی ظرفیت خازنی نداشته باشد می توان با استفاده از سری کردن یک خازن در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور ظرفیت لازم جهت رزونانس ایجاد نمود.

۵-۱-۷-۲ آزمایش های مقدماتی

آزمایش های فشار ضعیف (مقاومت عایقی، ضریب قدرت، نسبت تبدیل، روغن دی الکتریک و غیره) برای اطمینان از مناسب بودن شرایط سیستم عایق ترانسفورماتور جهت برق دار نمودن آن به کار گرفته می شوند.

برای آزمایش روغن ترانسفورماتور بایستی نمونه گیری از روغن مطابق روش های گفته شده پیشین (به استاندارد ASTM 923-2001 مراجعه شود) صورت گیرد. گازهای محلول در روغن بایستی آنالیز گردیده و نوع و مقدار آنها مشخص شده و مناسب

بودن کیفیت روغن از این لحاظ مورد تأیید قرار گیرد. آزمایش تعیین میزان رطوبت در روغن بایستی نشان دهد که مقدار رطوبت در روغن بیش از حد مجاز نمی باشد و آزمایش نسبت تبدیل برای تأیید وضعیت مطلوب انشعابات تپ چنجر و عدم وجود اتصال حلقه در سیم پیچ های ترانسفورماتور بایستی صورت گیرد [۳].

تفسیر نتایج آزمایش: به جدول ۱ مراجعه شود.

۵-۱-۷-۳ احتیاطات خاص پیش از انجام آزمایش

برای جلوگیری از تخلیه های کرونا در هوا جهت آماده شدن برای آزمایش کلیه بوشینگ های سمت فشار قوی ترانسفورماتور بایستی این بوشینگ ها توسط رینگ های کرونا مناسب حفاظت گردند. برای جلوگیری از کرونا به زمین بایستی کلیه لبه های تیز در بالای تانک و نزدیک به آن توسط پوشانندهای نیمه هادی (لاستیک های لوله ای) غیر مسطح و یا رینگ های فلزی مانع کرونا، که به صورت فلزی به تانک متصل گردیده اند حفاظت گردند.

ترانسفورماتور بهره برداری شده	ترانسفورماتور نو	آزمایش
$> 2\%$	$> 0.5\%$	ضریب قدرت
$> 0.5\%$	$> 0.5\%$	کل گازهای محلول در روغن
$> 15 \text{ PPM}$	$> 10 \text{ PPM}$	میزان رطوبت موجود در روغن
۰/۵٪ حداکثر ترانس مجاز با پلاک مشخصات	۰/۵٪ حداکثر ترانس مجاز با پلاک مشخصات	نسبت تبدیل

جدول ۱- شاخصه های آزمایش های عیب یابی ترانسفورماتور

کلیه بوشینگ های ترانسفورماتور بایستی کاملاً تمیز شده و خشک گردند و دقیقاً پیش از انجام آزمایش بایستی مجدداً کاملاً خشک شوند. هیچ شیء هادی و نیمه هادی نبایستی بدون آن که زمین گردند، نزدیک و یا روی ترانسفورماتور قرار گیرند چرا که باعث ایجاد تخلیه الکتریکی می گردند. بنابراین این اشیا یا بایستی کاملاً از ترانسفورماتور تحت آزمایش دور گردند و یا به طور مناسب زمین شوند. کلیه اتصالات و مسیرهای جریان الکتریکی بایستی کاملاً محکم شوند چرا که وجود هر گونه لقی در اتصالات و جرقه های

ناشی از آن در میزان تخلیه های جزئی اندازه گیری شده درون ترانسفورماتور مؤثر خواهد بود و باعث خطا در تحلیل و نتایج آزمایش می گردد.

برق گیرهای ترانسفورماتور در صورت وجود بایستی از مدار خارج شوند (باز شوند) تا از محدودیت ولتاژ آزمایش و خراب شدن آن ها جلوگیری شود.

۵-۱-۷-۴ پیش آزمایش اندازه گیری ضریب قدرت

بعد از اتصال تجهیزات آزمایش به ترانسفورماتور تحت آزمایش، بایستی ابتدا یک پیش آزمایش تعیین ضریب قدرت بار صورت گیرد تا از جبران سازی سلفی مدار برای جلوگیری از خازنی شدن بار ژنراتور و محافظت از ایجاد ولتاژ زیاد خطرناک (over voltage) ژنراتور به علت خود تحریکی ژنراتور گردد. برای انجام این پیش آزمایش بایستی بوشینگ های ترمینال های سمت فشار قوی ترانسفورماتور تحت آزمایش، موقتاً به فاصله هوایی جرقه زنی مجهز گردند تا در ولتاژ ۵۰٪ ولتاژ نامی ترانسفورماتور، تخلیه الکتریکی از مسیر برق گیر اتفاق بیافتد. در این پیش آزمایش ولتاژ بایستی بیش از ۳۰٪ ولتاژ نامی شود و یا حداکثر به ولتاژی برسد که امکان انجام صحیح آزمایش اندازه گیری ضریب قدرت فراهم شود. باید توجه کرد که ژنراتور بایستی امکان تغذیه بار کمی خازنی را داشته باشد در صورتی که بار کشیده شده از مرز توانایی تأمین بار خازنی ژنراتور بیشتر شود باعث ناپایداری ژنراتور و افزایش سرعت شدید آن خواهد شد. برای اطمینان از ایمنی فرآیند آزمایش بایستی جبران سازی سلفی کمی بیش از میزان مورد نیاز فراهم شده و به گونه ای باشد که مرزهای باردهی ژنراتور رعایت شده و از عمل کرد سیستم های حفاظت جلوگیری شود. استفاده کننده از این سیستم بایستی مطلقاً از عدم خارج شدن از مدار سیستم به علت عملکرد حفاظت ها و یا خروج از مرز توانایی باردهی ژنراتور مطمئن باشد. از موارد حایز اهمیت در انجام این آزمایش در نظر گرفتن یک ترانسفورماتور افزاینده به گونه ای که ولتاژ خروجی آن تا حد ممکن نزدیک به ولتاژ آزمایش باشد. این موضوع باعث اطمینان به انتقال توان ماکزیمم از ژنراتور به ترانسفورماتور تحت آزمایش می گردد.

بعد از انجام پیش آزمایش و اطمینان از جبران سازی صحیح توان راکتیو سیستم، فاصله هوایی تخلیه الکتریکی را می توان از سیستم جدا کرد و ولتاژ مورد نظر را به ترانسفورماتور اعمال کرد.

۵-۱-۷-۵ آزمایش ولتاژ القایی

این آزمایش بایستی در یک روز که هوا تمیز می باشد انجام شود. کلیه نویزهای محیطی هم چون جرثقیل های در حال کار و وسایل نقلیه موتوری بایستی از محل دور و یا خاموش گردند تا نتایج و تحلیل آزمایشات به صورت صحیح باشد. سطح ولتاژ اعمالی و طول زمان آزمایش هایی که در سایت صورت می گیرد بایستی با مذاکره و بحث تعیین شود. این مقادیر ممکن از میزان مقادیر در نظر گرفته شده برای ترانسفورماتورهای نو تا میزان مقادیر حداقل که وابسته به عمر و تاریخچه سرویس دهی ترانسفورماتور می باشد، تغییر کند.

بعد از اتصال و کالیبراسیون مجموعه دستگاه های آزمایش متصل به ترانسفورماتور تحت آزمایش، ولتاژ بایستی به تدریج به ولتاژ نهایی آزمایش برسد. تجهیزات اندازه گیری بایستی مداوماً تحت نظر بوده و مقادیر PD یا RIV در یک دوره ۵ دقیقه ای ثبت گردند. نقاط پیک مشاهده شده برای این مقادیر بایستی مورد توجه قرار گیرند. خواندن نامنظم مقادیر ممکن است باعث برداشت ناصحیح شده و یا سبب اقدام به خاتمه آزمایش بدون لزوم گردد.

در صورتی که مقادیر PD یا RIV افزایش مداوم داشته باشد بایستی آزمایش آن قدر ادامه پیدا کند تا سطح مقادیر پایدار شده و یا این که به سمت کاهش متمایل گردد. تحلیل: میزان PD بیشتر از ۵۰۰ پیکوکولن یا RIV بالاتر از ۱۰۰ میکروولت بیان گر اشکال محتمل در ترانسفورماتور می باشد.

۵-۱-۸-۵ رديابی تخلیه جزیی

۵-۱-۸-۱-۵ کلیات

PD (اغلب با نام کرونا شناخته شده است) هنگامی در یک سیستم عایق موجود می آید که یک شکست محلی، جزیی و غیر دایم در عایق سبب توزیع مجدد بارها در درون سیستم عایق می گردد. این شکست عایقی در یک مکان جزیی رخ داده و باعث ایجاد یک مسیر دایم جریان نمی گردد. معمولاً پدیده PD در نواحی از سیستم عایقی که دارای حباب های هوا و یا گازها و یا مواد خارجی هم چون آب و یا مکان هایی که آسیب دیده اند ایجاد می شود. این نوع تخلیه باعث تضعیف تدریجی سیستم عایقی گردیده و نهایتاً سبب آسیب دیدگی ناگهانی و غیر منتظره ترانسفورماتور می گردد.

پدیده تخلیه جزیی، پالس‌های جریان با دامنه کم و در زمان کوتاه ایجاد می‌کند. معمولاً از دو تکنیک متفاوت برای ردیابی و اندازه‌گیری این پالس‌ها استفاده می‌شود. یکی از تکنیک‌ها عبارت است از: اندازه‌گیری توسط اندازه‌گیر نویزهای رادیویی می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده در حد میکرو ولت بوده و به عنوان سیگنال‌های RIV شناخته می‌شوند. روش دوم اندازه‌گیری توسط ردیاب PD می‌باشد. در این روش سیگنال‌ها بر حسب پیکوکولومب اندازه‌گیری می‌شود.

سیگنال‌های PD و RIV را می‌توان به صورت پالس‌های کوچک (با دامنه کم) و فرکانس بالا که بر روی موجهای ولتاژ فشار قوی سوار شده‌اند تصور کرد. برای انجام یک آزمایش موفقیت‌آمیز جهت ردیابی این پالس‌ها بایستی کلیه مواردی که جهت برآورد دقیق آن‌ها نیاز می‌باشد را رعایت کرد. جهت این امر بایستی کلیه اشیایی که در معرض و یا نزدیک ولتاژ فشار قوی می‌باشند زمین شده و قطعات فلزی که دارای لبه تیز و یا گوشه می‌باشند (مانند پیچ‌ها و لبه‌های تانک ترانسفورماتور) توسط مواد هادی که دارای سطح صاف هندسی می‌باشند پوشیده شوند. محل اتصال هادی‌ها در مسیر جریان بایستی کاملاً تمیز و محکم و ایمنی گردند.

۵-۱-۸-۲ ولتاژهای رادیو مؤثر (RIV)

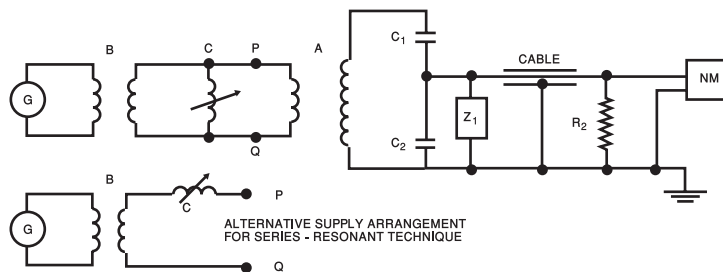
سیگنال‌های RIV معمولاً از انشعاب خازنی بوشینگ ترانسفورماتور (بوشینگ نوع کندانسوری یا خازنی) مطابق شکل ۸ به دست می‌آیند. اندوکتانس متغیر با خازن ایجاد شده توسط تپ بوشینگ با زمین و در فرکانس اندازه‌گیری نویز رادیویی تنظیم می‌گردد. هنگام تنظیم بایستی کابل کوکسیال با امپدانس مناسب در مدار قرار گرفته باشد. هدف از تنظیم مدار به حداقل رسانیدن اثر تقسیم ظرفیت خازنی در تپ بوشینگ در فرآیند آزمایش می‌باشد و نبایستی تصور گردد که کابل کوکسیال در نظر گرفته شده برای یک آزمایش در کلیه آزمایش‌ها مطلوب می‌باشد چرا که مجموعه آزمایش بایستی برای هر آزمایش جداگانه تنظیم گردد. رایج‌ترین ابزار جهت کالیبراسیون، اعمال سیگنال فرکانس رادیویی با دامنه مشخص مساوی با فرکانس دستگاه‌های اندازه‌گیری به ترمینال فشار قوی می‌باشد سپس این سیگنال توسط سیستم اندازه‌گیری شده و کالیبراسیون صورت می‌گیرد.

کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری به صورت مجزا، بایستی مطابق دستورالعمل سازنده

دستگاه اندازه گیری صورت گیرد. برای این آزمایش از فرکانس های موج متوسط در رنج ۰/۸۵ تا ۱/۱۵ مگا هرتز استفاده می شود. اما در صورت وجود فرکانس های رادیویی اضافی در محیط آزمایش می توان از فرکانس های دیگر نیز استفاده کرد.

پیش از برق دار کردن سیستم آزمایش بایستی مدارات کاملاً کالیبره شده باشند. منبع ولتاژ فشار قوی باید در ولتاژ صفریا ولتاژ کم روشن شده و به تدریج به ولتاژ مورد نظر در این آزمایش رسانیده شود. مقادیر اندازه گیری شده بایستی در طی افزایش ولتاژ تحت نظر باشد و ثبت گردد. نویزهای اندازه گیری شده در ولتاژهای کم نمایشگر نویزهای محیطی و خارجی می باشند. در صورتی که نویزهای محیطی و یا خارجی قابل حذف کردن نباشند بایستی حساسیت سیستم به گونه ای تنظیم شود که این نویزها در اندازه گیری وارد نشوند. در عمل یک اپراتور با تجربه در این آزمایش می تواند نویزهای محیطی و یا خارجی را از نویزهای اصلی شناسایی و جداسازی کند.

تحلیل نتایج آزمایش RIV نیاز به یک مجموعه افراد مجرب در آزمایش RIV و هم چنین آشنا با نوع تجهیز تحت آزمایش می باشد. از آن جایی که این آزمایش در یک باند باریک فرکانسی انجام می گیرد و امکان ایجاد رزونانس در نمونه آزمایش ایجاد می گردد. بهترین راه تحلیل نتایج این آزمایش استفاده از نتایج اندازه گیری های پیشین تجهیز تحت آزمایش و یا تجهیز مشابه با آن می باشد. این اندازه گیری ها می تواند از آزمایش های دوره ای پیشین و یا آزمایش های کارخانه ای به دست آمده باشد.



شکل ۸ - اندازه گیری RIV با استفاده از تپ بوشینگ

A = ترانسفورماتور تحت آزمایش

C2 = تپ خازن بوشینگ فشار قوی

B = ترانسفورماتور کمکی افزاینده

Z1 = اندوکتانس متغیر

$R1$ = مقاومت	C = (سلف) راکتور متغیر
$CABLE$ = کابل شیلد دار	G = ژنراتور تغذیه
NM = دستگاه اندازه گیری نویز رادیویی	$C1$ = خازن بوشینگ فشار قوی

۵-۱-۸-۳ تخلیه جزئی (PD)

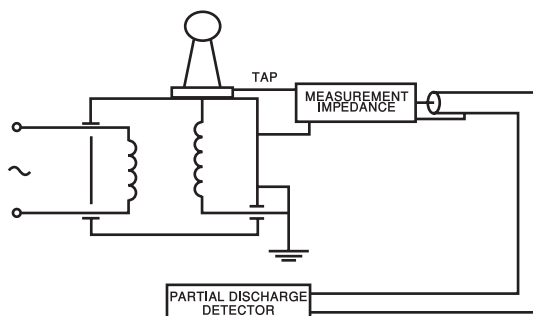
همانند اندازه گیری RIV، سیگنال های PD نیز بایستی با استفاده از تپ بوشینگ خازنی اندازه گیری شوند. یک نمونه مدار آزمایش PD در شکل ۹ آمده است. امپدانس اندازه گیری Z_m معمولاً مختلط بوده (مقاومتی و سلفی) و جهت فیلتر کردن سیگنال های با فرکانس های مختلف که در آزمایش ایجاد می گردد می باشد.

حساسیت مدار وابسته به ظرفیت خازن کوپل شده، ظرفیت خازنی ترانسفورماتور تحت آزمایش و خازن های اضافی ناشی از مدار آزمایش می باشد. لذا برای انجام هر آزمایش، سیستم اندازه گیری بایستی مجدداً کالیبره گردد تا نتایج صحیح استخراج شود. بنابراین دلیل به همراه دستگاه های اندازه گیری تجاری یک دستگاه پالس ژنراتور نیز جهت کالیبراسیون ارایه می گردد. روش معمول برای کالیبراسیون، تزریق مقدار مشخصی از بار به ترمینال فشار قوی ترانسفورماتور و تنظیم حساسیت سیستم اندازه گیری PD برای خواندن مطلوب می باشد. در عمل این کار با استفاده از اعمال ولتاژ پالس فشار قوی به سمت فشار قوی ترانسفورماتور از طریق یک خازن با ظرفیت کم ($PD 100$) صورت گیرد.

بنا به دلایل قید شده فوق سیستم اندازه گیری بایستی کالیبره گردد. در صورتی که جهت کالیبراسیون از خازن با ولتاژ پایین استفاده شود مدار بایستی پیش از برق دار شدن کالیبره گردد و سپس خازن از مدار جدا شده و آزمایش صورت گیرد. برای انجام دقیق کالیبراسیون سیستم اندازه گیری PD بایستی از دستورالعمل راهنمای سیستم آزمایش استفاده شود.

برای انجام آزمایش PD معمولاً منبع تغذیه فشار قوی در ولتاژ صفر یا خیلی پایین روشن شده و به تدریج به ولتاژ مورد نظر رسانیده می شود. در طی افزایش ولتاژ، نمایش دهنده PD بایستی تحت نظر بوده و مقادیر آن ثبت گردد.





شکل ۹- مدار اندازه گیری تخلیه جزیی با استفاده از تپ بوشینگ

وجود نویز در ولتاژهای پایین بر روی نمایش دهنده PD بیانگر نویزهای محیطی و یا ناشی از دستگاه های جانبی می باشد. در صورتی که این نویزها قابل حذف یا مرتفع کردن نباشد. بایستی حساسیت سیستم به گونه ای تنظیم شود که این نویزها در مقادیر اندازه گیری وارد نشود. در عمل یک اپراتور با تجربه می تواند این نویزهای خارجی را شناسایی و از نتایج اندازه گیری خارج نماید.

معمولاً سیگنال های PD در ولتاژهای پایین ظاهر نمی گردند این سیگنال ها به صورت ناگهانی در طی افزایش ولتاژ و در یک ولتاژ مشخص به نام ولتاژ آغاز تخلیه جزیی ظاهر گردند. به محض این که ولتاژ بیشتر از ولتاژ آغاز تخلیه جزیی گردد، پالس های بیشتری از تخلیه جزیی ظاهر گردیده و نیز دامنه آن ها افزایش خواهد یافت. در این هنگام با کاهش ولتاژ ممکن است اثر هیستریزس اتفاق بیافتد یعنی حتی با کم تر شدن ولتاژ از ولتاژ آغاز تخلیه جزیی باز هم پالس های تخلیه جزیی موجود باشد. هنگامی این پالس ها از بین خواهد رفت که ولتاژ به تعداد قابل توجهی کم تر از ولتاژ آغاز تخلیه جزیی گردد. ولتاژی که در این فرآیند هیستریزس، پالس های PD در آن ناپدید می گردد را ولتاژ خاموشی تخلیه جزیی می گویند.

برای تحلیل نتایج آزمایش PD نیاز به تجربه و آشنایی کلی با این آزمایش و هم چنین با تجهیزاتی که این آزمایش بر روی آن می شود می باشد. بعضی از انواع سیگنال های تخلیه جزیی به راحتی شناسایی می شود و لذا مشاهده این موارد جهت رفع اشکال در مدار اندازه گیری مفید می باشد. مخصوصاً سیگنال های مشابه PD که هم فاز با ولتاژ اعمالی می باشند احتمالاً ناشی اتصال ناکامل و نامحکم در مسیر جریان هستند.

این اشکال بایستی بیش از انجام آزمایش برطرف گردد. نمایش غیر متقارن بر روی نمایش دهنده PD بیانگر تخلیه جزئی در هوا می باشد. این پدیده ناشی از نقاط تیز در هادی های مدار و یا مدار زمین می باشد.

این منابع تخلیه جزئی معمولاً با بازرسی چشمی و یا با کمک تجهیزات ردیاب اولتراسونیک قابل شناسایی می باشند. جهت دسترسی به اطلاعات بیشتر جهت کالیبراسیون و اندازه گیری و هم چنین تحلیل نتایج آزمایش تخلیه جزئی می توان از استاندارد IEEE std C57-113-2002 استفاده کرد [۳۰].

۵-۸-۴ تکنیک صوتی

تکنیک صوتی برای ردیابی PD در ترانسفورماتورها برای چندین سال مورد استفاده بوده است. این روش دارای حساسیت خوبی نسبت به بعضی از انواع منابع PD بوده و امکان مکان یابی PD را در بعضی موقعیت ها را فراهم می کند.

از مزایای تکنیک صوتی برای ردیابی تخلیه جزئی استفاده از آن در زمان برق دار بودن ترانسفورماتور و هم چنین غیر حساس بودن آن نسبت به نویزهای خارجی و محیطی در صورت به کارگیری صحیح و مناسب آن می باشد. اما حساسیت این روش نسبت به تخلیه های جزئی در لایه های عمیق درون ساختار سیستم عایقی مانند نواحی درونی سیم پیچ های ترانسفورماتور کم می باشد.

سیگنال های صوتی معمولاً با استفاده از یک ترانسدیوسر که به دیواره ترانسفورماتور نصب می شود اندازه گیری می شوند. چگونگی نصب ترانسدیوسر از موارد حایز اهمیت می باشد چرا که انعکاسات صوتی ناشی از برخورد صوت با سطوح جانبی متعلقات ترانسفورماتور و ترانسدیوسر می تواند باعث کاهش سطح سیگنال های منتقل شده گردد. تجهیزات مورد نیاز برای ردیابی تخلیه جزئی توسط تکنیک صوتی شامل یک منبع ولتاژ فشار قوی (در صورتی که ترانسفورماتور برق دار نباشد)، یک ترانسدیوسر اولتراسونیک و یک نمایش دهنده که در مجموع یک بسته ردیاب را تشکیل می دهند می باشد. جهت اندازه گیری PD دستگاه های آزمایش تجاری، صنعتی که توسط سازندگان مختلف ساخته می شود به کار گرفته می شود که شامل کلیه این تجهیزات می باشد.

در بعضی از ترانسفورهای خاص و پر قدرت ترانسدیوسر نصب شده بر روی ترانسفورماتور هنگام خرید آن موجود می باشد. برای به کارگیری این ترانسدیوسرها از

تقویت کننده و یا یک اسیلوسکوپ می توان استفاده کرد. در این روش معمولاً برای ردیابی تخلیه جزیی از ترانس دیوسر های اولتراسونیک پیزوالکتریک در محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۲۰۰ کیلو هرتز استفاده می شود.

چگونگی فرآیند و نتایج آزمایش PD بسیار وابسته به تجهیز تحت آزمایش و میزان اهمیت مدنظر در این آزمایش می باشد. ممکن است جهت تصمیم گیری در رابطه با آزمایش کامل و دقیق PD نیاز به بررسی وجود یا عدم وجود PD در یک بخش از ترانسفورماتور با استفاده از یک دستگاه پر تابل و ساده دارای ترانس دیوسر/ ردیاب صوتی باشد. به عبارت دیگر وجود اشکال احتمالی در یک تجهیز بزرگ و گران قیمت ممکن است لزوم و توجیه یک آزمایش دقیق و همه جانبه PD به روش تکنیک صوتی و با در نظر داشتن رفتار امواج صوتی در مایعات و گازها و جامدات در بخش های مختلف تجهیز را ارایه کند.

۲-۵ بوشینگ ها

۲-۵-۱ کلیات

بوشینگ ها از نظر ساختمانی به صورت های مختلف ساخته می شوند و از اجزا بسیار مهم در ترانسفورماتورها می باشند. این عناصر نسبت به قیمت یک ترانسفورماتور نسبتاً ارزان می باشند. اما نقص و ضعف در بوشینگ ها ممکن است باعث تخریب اساسی ترانسفورماتور گردد. بنابراین بوشینگ ها بایستی به صورت دوره ای تحت بازرسی قرار گیرند. در صورت مشاهده اشکال و یا نقص در آن ها باید با در نظر گرفتن اهمیت ضعف و اشکال تعمیر و یا تعویض گردند. گرچه بوشینگ ها از نظر ساختاری در انواع مختلف ساخته می شوند ولی روش بازرسی و عیب یابی آن ها در اکثر موارد یکسان می باشد. این روش ها به شرح زیر می باشند.

۲-۵-۲ بازرسی فیزیکی (چشمی)

بعضی از بازرسی های فیزیکی را می توان در حین برق دار بودن ترانسفورماتور انجام داد. با استفاده از دوربین می توان بعضی از اشکالات هم چون ترک، شکستگی، نشستی از واشرهای پلاستیکی و سطح روغن موجود در بوشینگ را مشاهده کرد. در

زمان بازرسی مناسب است که به دمای محیط و بار کشیده شده از ترانسفورماتور توجه شود و مقادیر آن‌ها ثبت گردد.

بازرسی فیزیکی دقیق‌تر را هنگامی که ترانسفورماتور بی برق می‌باشد می‌توان انجام داد. علاوه بر موارد ذکر شده فوق در هنگام بی‌برقی می‌توان توسط بازرسی چشمی نزدیک‌تر ترک‌های مویی، ضعف اتصالات سیمانی و آلودگی سطحی را نیز بازرسی و تشخیص داد. در صورتی که ناحیه چینی بوشینگ شکسته شده باشد علت شکستگی بایستی بررسی و مشخص گردد. پدیدگی سطح چینی از موارد مهم نمی‌باشد. از بین رفتن لعاب چینی باعث حوادث سریع متعاقب آن نمی‌گردد چرا که چینی‌های مورد استفاده در سیستم‌های الکتریکی دارای خلل و فرج نبوده و رطوبت جذب نمی‌کنند. در صورت مشاهده و ترکی که به سمت داخل بوشینگ امتداد دارد (از یک منطقه روی سطح و یا از نواحی فوقانی و تحتانی بوشینگ) بایستی بازرسی به صورت دقیق‌تر صورت گیرد. این گونه ترک‌ها ممکن است کاملاً به ناحیه درونی بوشینگ سرایت کرده و سبب فالت ناگهانی شوند. در چنین مواردی بوشینگ بایستی تعویض شود چرا که تعمیر اساسی بوشینگ در سایت‌های صنعتی امکان پذیر نمی‌باشد.

۵-۲-۳ سطح روغن بوشینگ

سطح روغن موجود در بوشینگ بایستی توسط دریچه شیشه‌ای و یا گیج روغن بازرسی می‌شود. جهت بررسی دقیق سطح روغن باید دمای سطح در نظر گرفته شود. اشتباه معمول در این مورد اضافه کردن روغن داخل بوشینگ در دماهای پایین برای رسانیدن سطح روغن به سطح نرمال می‌باشد. سطح روغن هنگامی می‌بایستی در سطح نرمال قرار گیرد که دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد باشد.

اضافه کردن روغن در دمای پایین محیط باعث پر شدن بیش از حد و اضافه شدن روغن در زمان افزایش دما یا تابستان می‌گردد. در صورتی که امکان پذیر باشد بایستی وضعیت روغن از لحاظ واکسی شدن و یا کثیف شدن از طریق دریچه شیشه‌ای بوشینگ بررسی گردد.

۵-۲-۴ ظرفیت خازنی، ضریب قدرت و ضریب تلفات بوشینگ

در بازرسی‌ها و آزمایش‌های بوشینگ‌ها بایستی ظرفیت خازنی و ضریب قدرت (یا

ضریب پراکندگی) خازن های C_1 و C_2 اندازه گیری شوند. اتصال کوتاه شدن خازن ها در بعضی از نواحی درون بوشینگ باعث افزایش ظرفیت خازنی بوشینگ می گردد. وجود رطوبت یا دیگر آلودگی ها در ساختار عایقی بوشینگ ها باعث افزایش ضریب قدرت (ضریب پراکندگی) بوشینگ می گردد. در آزمایش ضریب قدرت (ضریب پراکندگی) اعمال اصلاح دمای محیط در اندازه گیری ها الزامی می باشد. در زمان انجام آزمایش ها بر روی خازن C_2 بایستی توجه کرد که ولتاژ اعمالی بیش از ولتاژ قابل تحمل تپ بوشینگ نگردد. بایستی توجه کرد که ضریب قدرت خازن C_1 و خازن C_2 ممکن است به مقدار قابل توجهی با یک دیگر متفاوت باشند. ظرفیت خازن C_2 معمولاً از ۱۰ برابر ظرفیت خازن C_1 بزرگ تر نمی باشد پیش از انجام آزمایش ضریب قدرت بوشینگ بایستی آلودگی ها و رطوبت سطح بوشینگ کاملاً تمیز شده تا نتایج اندازه گیری دارای دقت مناسبی باشد. آزمایش حلقه داغ برای ارزیابی یک ناحیه خاص از سیستم عایقی بوشینگ در ناحیه بین چینی بالای بوشینگ و هادی مرکزی حامل جریان بسیار مفید می باشد. این آزمایش به وسیله برق دار کردن یک یا چند الکتروود (به شکل حلقوی و معمولاً از جنس نیمه هادی) در محیط خارجی بوشینگ و زمینی کردن هادی مرکزی انجام می گیرد این آزمایش برای ردیابی ترک های روی چینی بوشینگ، ضعیف سیستم عایقی در بخش فوقانی بوشینگ، سطح پایین روغن یا رزین و وجود حباب های هوا در آن می گردد.

محدوده ضریب قدرت مجاز توسط سازنده ارایه گردیده و یا بر روی پلاک آن ثبت می گردد. نتایج آزمایش های ضریب قدرت در سایت های صنعتی بایستی با مقادیر قید شده در پلاک مشخصات مقایسه شود.

بوشینگ هایی که در طی چند سال متوالی در ضریب قدرت آن ها افزایش مستمر مشاهده می شود بایستی تحت بازرسی دقیق تر و حتی از سرویس خارج گردند. در عمل در صورتی که ضریب قدرت بوشینگ های از نوع خازنی بیش از ۱٪ افزایش یابند بایستی تحت بازرسی تخصصی و رفع عیب قرار گیرند.

۵-۲-۵ تخلیه جزئی (PD)

۵-۲-۵-۱ کلیات

پدیده تخلیه جزئی طولانی مدت و مداوم در سیستم عایقی پوشینگها، باعث ضعف تدریجی قدرت عایقی پوشینگ و در نتیجه وقوع فالت ناگهانی می‌گردد. وجود کرونا توسط اندازه‌گیری RI یا PD ردیابی می‌گردد این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ولتاژ فشار قوی نامی فاز به زمین و یا بیشتر (به عنوان مثال : ۱۳۰٪-۱۵۰٪) صورت می‌گیرد. این اندازه‌گیری‌ها را می‌توان در آزمایش ولتاژ القایی بر روی ترانسفورماتور انجام داد. امکان تفکیک سیگنال‌های ناشی از تخلیه جزئی در اندازه‌گیری‌ها از ناحیه تجهیزات درون تانک ترانسفورماتور و یا پوشینگها میسر نمی‌باشد. بنا به همین دلیل در صورت نیاز به اندازه‌گیری RIV یا PD ترجیحا بایستی پوشینگها از ترانسفورماتور جدا شده و هر کدام به صورت جداگانه آزمایش شوند. برای آزمایش تخلیه جزئی پوشینگها، آن ها در یک محفظه مخصوص قرار گرفته و توسط ولتاژ فشار قوی تحت آزمایش قرار می‌گیرند.

۵-۲-۵-۲ وسایل مورد نیاز جهت انجام آزمایش

برای انجام آزمایش تخلیه جزئی بر روی پوشینگها به تنهایی، نیاز به منبع ولتاژ فشار قوی، ردیاب PD یا دستگاه اندازه‌گیری نویز رادیویی و یک خازن کوپل برای کوپل شدن تجهیزات اندازه‌گیری به باس ولتاژ قوی و یک سیستم کالیبراسیون می‌باشد. منبع ولتاژ فشار قوی ممکن است یک ترانسفورماتور و یا یک مدار رزونانس سری بدون تخلیه جزئی باشد. هدف از استفاده خازن کوپلاژ جداسازی پالس‌های PD با دامنه کوتاه از باس فشار قوی و انتقال آن به دستگاه اندازه‌گیری PD می‌باشد. ولتاژ نامی خازن مورد استفاده بایستی با ولتاژ آزمایش همخوانی داشته و فاقد سیگنال‌های تخلیه جزئی باشد. مقدار ظرفیت این خازن برای دریافت نتایج رضایت بخش pF1000 می‌باشد.

سیگنال‌های PD را می‌توان به وسیله دستگاه اندازه‌گیری PD و یا دستگاه اندازه‌گیری نویز رادیویی اندازه‌گیری کرد. این دستگاه به صورت تجاری در بازار موجود می‌باشند. دستگاه اندازه‌گیری PD به همراه یک صفحه نمایش اسیلوسکپی که سیگنال‌های PD بر روی آن نمایش داده می‌شود ارایه می‌گردد. اسیلو سکوپ علاوه بر نمایش

سیگنال های تخلیه جزئی می تواند موقعیت سیگنال ها نسبت به شکل موج ولتاژ فشار قوی اعمالی را نمایش دهد. در بررسی های دقیق موقعیت سیگنال ها نسبت به شکل موج ولتاژ آزمایش جهت تحلیل نتایج مفید می باشد. دستگاه اندازه گیری نویز رادیویی، سیگنال های شبه ضربه تخلیه الکتریکی در یک باند باریک فرکانسی ردیابی و اندازه گیری می کند. توسط این دستگاه سیگنال های رادیویی با ولتاژ حدود چند میکروولت دریافت و اندازه گیری می شود. فرکانس مورد استفاده در این دستگاه تقریباً یک مگاهرتز می باشد اما در صورت وجود فرکانس های نویز ناشی از محیط اندازه گیری (به عنوان مثال فرکانس رادیویی AM) می توان از فرکانس های دیگر نیز استفاده کرد. پهنای باند فرکانسی مورد استفاده معمولاً ۹ کیلو هرتز می باشد [۲۷ و ۲۸].

۵-۳ سیال های عایق (روغن های معدنی مورد استفاده جهت ترانسفورمرها) ۵-۳-۱ کلیات

روغن های معدنی به عنوان یک سیال عایق در اکثر تجهیزات الکتریکی قدرت مورد استفاده قرار می گیرند. این سیالات علاوه بر این که دارای خاصیت عایقی می باشند در بعضی موارد به عنوان واسط انتقال حرارت ایجاد شده ناشی از تلفات تجهیزات قدرت نیز عمل می کنند. آزمایش هایی که جهت این سیالات در نظر گرفته می شود برای تعیین شاخص ها کیفی، وضعیت ضعف و پیری روغن ها در سرویس و هم چنین عیب یابی ترانسفورماتور در بعضی از شرایط می باشد [۲۹ و ۱]. تکنیک نمونه گیری در این آزمایش ها (مراجعه شود به استاندارد ASTM D923-2001) بایستی به گونه ای باشد که نمونه گرفته شده دارای کلیه شرایط و وضعیت کیفی روغن تجهیز الکتریکی باشد و از آن جایی که امکان نفوذ آلودگی های محیطی رطوبت و گرد و غبار به مجرای شیر نمونه گیری روغن وجود دارد، بایستی پیش از نمونه گیری مقداری از روغن خارج شده از شیر نمونه گیری روغن، بیرون ریخته شود تا آلودگی های جمع شده در مسیر روغن تمیز گردد. هنگام نمونه گیری بایستی دقت شود تا فشار مثبت در محفظه تانک ترانسفورماتور موجود باشد. عدم وجود فشار مثبت باعث ورود حباب هوا به درون تانک و نفوذ آن بین حلقه های ترانسفورماتور شده و سبب بروز فالت زودرس می گردد.

برای انجام کلیه آزمایش‌های روغن نیاز به مقدار کافی نمونه روغن می‌باشد این مقدار حدود یک لیتر می‌باشد. برای کسب اطلاعات کافی در رابطه با ظروف نمونه‌گیری و فرآیند نمونه‌گیری به استانداردهای ASTM D923-2001 می‌توان رجوع کرد. مقدار نمونه روغن مورد نیاز جهت انجام بعضی از آزمایش‌ها در جدول زیر بیان شده است.

نوع آزمایش	استاندارد	حجم سیال مورد نیاز (میلی لیتر)
اسیدیته	ASTM D974-2002	۲۰
رنگ (در سایت)	ASTM D1524-2003	۱۰
عایقی	ASTM D877-2002	۷۵
عایقی	ASTM D1816-97a	۵۰۰
گازهای محلول	ASTM D3612-2002	۵۰
کشش سطحی	ASTM D 971-2002	۲۰
کشش سطحی	ASTM D2285-200	۱۵
شمارش ذرات	N/A	۱۰۰
ضریب قدرت	ASTM D 924-2003b	۲۵۰
پلی کلراید بی فنیل	ASTM D 4059-2005	۱۰
لجن	ASTM D 1698-2003	۵۰
مقدار آب	ASTM D 1522-2003	۵۰
چشمی	ASTM D1524-2003	۱۰
وزن مخصوص	ASTM D 1298-2003	۱۲۵
رنگ (آزمایشگاه)	ASTM D 1500-2001	۱۲۵
حجم کل		۱۴۰۰

جدول ۲- حداقل حجم مورد نیاز نمونه روغن برای آزمایش‌ها

مقادیر قید شده در جدول فوق معمولاً برای آزمایش‌های ذکر شده کافی می‌باشد. اما به هرصورت بایستی پیش از انجام نمونه‌گیری جهت تعیین حجم نمونه روغن مورد

نیاز با آزمایشگاه مربوطه مشورت شود.

نمونه روغن گرفته شده بایستی توسط ظرف تمیز و خشک شیشه ای به آزمایشگاه منتقل شود. این نمونه نبایستی در مدت طولانی در معرض نور مستقیم و یا رطوبت زیاد هوا محیط قرار بگیرد. بعضی از مقادیر حجم روغن نمونه که در بخش ۶,۳ آمده اند مقادیر استاندارد نیستند اما این مقادیر حاصل تجارب عملی و مکرر می باشند و به صورت رایج مورد استفاده قرار می گیرند.

روغن های عایق در سرویس با توجه به ارزیابی وضعیت و مشخصات آن به چهار کلاس زیر طبقه بندی می گردند.

گروه I: روغن هایی که دارای شرایط رضایت بخش جهت تداوم کاربری می باشند.
گروه II: روغن هایی که جهت استفاده بعدی بایستی احیاء گردند (تصفیه و گاززدایی و اسید زدایی و.....)

گروه III: روغن های دارای شرایط نامناسب (این روغن ها بایستی یا به کارخانه سازنده فروخته شود (جهت احیا در کارخانه) و یا در صورت عدم صرفه اقتصادی دور ریخته شود)

گروه IV: روغن های دارای شرایط بسیار نامناسب که از نظر فنی قابل استفاده مجدد نبوده و بایستی دور ریخته شود. کلیه آزمایش ها بایستی حداقل سالیانه انجام گرفته در صورتی که تجهیز دارای موقعیت مهم و خاص باشد آزمایش ها بایستی در پریودهای کوتاه تر تکرار شود.

۵-۳-۲ اسیددینه و عدد خنثی سازی (neutralization)

این آزمایش جهت تعیین میزان اسیددینه روغن در سرویس مورد استفاده قرار می گیرد این آزمایش جهت برآورد تغییر وضعیت روغن عایق در شرایطی که امکان اکسیداسیون روغن وجود دارد به کار گرفته می شود میزان اسیددینه روغن توسط معیار عدد خنثی سازی اندازه گیری می شود. عدد خنثی سازی عبارت است از: مقدار میلی گرم هیدروکسید پتاسیم که برای خنثی سازی حالت اسیدی یک گرم روغن نیاز باشد. روغن های معدنی مورد استفاده در ترانسفورمرها دارای مقدار ناچیزی خاصیت اسیدی می باشند اما با افزایش زمان سرویس دهی عدد خنثی سازی نیز افزایش می یابد. یک روغن مستعمل دارای NN بالا بوده که بیان گر اکسید شدن روغن و یا آلوده شدن آن توسط موارد

آلوده کننده ای هم چون وارنیش، رنگ و یا مواد دیگر می باشند. وجود خاصیت اسیدی در روغن امکان لجنی بودن روغن را نیز نشان می دهد. بین NN و تمایل خوردگی فلز توسط روغن در تجهیزات الکتریکی قدرت نبایستی ارتباط مستقیم وجود داشته باشد.

اسیدهای آلی باعث ایجاد صدمه و خسارت به سیستم عایق کاری تجهیز الکتریکی گردیده و در صورت وجود رطوبت باعث اکسیداسیون فلزات می گردند. وقوع این پدیده ها معمولاً نیاز به گذشت زمان زیاد دارد. عدد بالا NN نشان گر وجود اشکال در تجهیزات الکتریکی نمی باشد اما بیان گر تهدیدی بالقوه برای تجهیزات الکتریکی داخل روغن می باشد. مقادیر تجربی برای NN جهت تعیین امکان کاربری و یا عدم امکان کاربری روغن، در استاندارد ASTM D974-2002 آمده است ماکزیمم مقادیر توصیه شده برای NN و روغن هایی با شرایط مختلف در جدول ۳ آمده است [۷].

نوع روغن	کلاس ولتاژ (کیلوولت)	عدد اسیدی (ماکزیمم میلی گرم KOH گرم روغن)
روغن نو و تازه دریافت شده از پالایشگاه	$69 >$	۰/۰۳
روغن در سرویس گروه I	$69 <$	۰/۲
	۲۸۸-۶۹	۰/۲
	$345 >$	۰/۱
روغن در سرویس گروه II		۰/۲
روغن در سرویس گروه III		۰/۵

جدول ۳- مقادیر پیشنهادی برای روغن های در سرویس با توجه به کلاس ولتاژی

۳-۳-۵ رنگ

این آزمایش جهت تعیین رنگ روغن عایق در حال سرویس دهی به کار گرفته می شود.

این آزمایش بایستی برای تعیین تغییر رنگ نسبی روغن به کار گرفته شود. رنگ روغن توسط یک مقدار عددی (و هم چنین توصیف رنگ) و برپایه مقایسه با سری رنگ های استاندارد بیان می شود. تغییر رنگ روغن بایستی به عنوان یک ملاک مستقیم جهت تخصیص یک مشکل خاص به روغن استفاده شود. تغییر رنگ سریع عدد رنگ روغن همراه با تغییر شرایط کار کرد تجهیز بیان گر وجود اشکال در ترانسفورماتور می باشد. عدد رنگ بالا روغن بیان گر کیفیت نامناسب روغن و یا آلوده بودن آن و یا هر دو این حالات می باشد. مقادیر تجربی جهت برآورد کیفیت روغن، با استفاده از عدد رنگ روغن، در استاندارد ASTM D1500-2001 آمده است. انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D1524-2003 و به صورت بصری انجام می شود [۹ و ۱۰].

عدد رنگ	رنگ در استاندارد ASTM	شرایط روغن
۰-۰/۵	روشن	روغن نو
۰/۵-۱	زرد تیره	روغن خوب
۱-۲/۵	زرد	روغن در سرویس
۲/۵-۴	زرد روشن	روغن در شرایط بحرانی
۴-۵/۵	نارنجی	شرایط بد
۵/۵-۷	قهوه ای	شرایط بسیار بد
۷-۸	قهوه ای تیره	(a) شرایط خیلی خیلی بد (روغن دور ریختنی)

جدول ۴- شرایط نسبی روغن بر اساس رنگ

a: جهت تأیید قطعی نتیجه آزمایش، آزمایش مجدداً صورت گیرد.

۴-۳-۵ آزمایش قدرت عایقی

این آزمایش جهت تعیین ولتاژ شکست عایقی روغن در سرویس به کار برده می شود. دو روش رایج جهت تعیین ولتاژ شکست عایقی روغن وجود دارد. مطابق استاندارد ASTM D1816-97 برای تجهیزات با ولتاژ بالاتر از ۲۳۰ کیلوولت و روغن فیلتر شده،

گازدایی شده، رطوبت زدایی شده و پیش از پر شدن تجهیز توسط این روغن، آزمایش بایستی با استفاده الکترودهای کروی شکل نوع VDE انجام شود. مطابق استاندارد ASTM D877-2002 روغن عایق انواع تجهیزات بایستی توسط الکترودهای مسطح تحت آزمایش قدرت عایقی قرار گیرد. بنا به همین دلیل در بخش ۴,۳,۶ تأیید بر آزمایش با استفاده از استاندارد اخیر می باشد.

وجود مواد آلوده کننده در روغن و از دست رفتن خواص روغن باعث کاهش قدرت عایقی آن می گردد. ولتاژ شکست عایقی روغن عایق بیانگر میزان توانایی تحمل تنش ولتاژی روغن بدون ایجاد فالت می باشد. قدرت عایقی بالا بیانگر عدم وجود مواد آلوده کننده در روغن نمی باشد. بین ولتاژ شکست عایقی روغن و وقوع فالت در ترانسفورماتور هم بستگی شفافی وجود ندارد به عبارت دیگر نمی توان گفت که در یک ولتاژ شکست عایقی مشخص روغن وقوع فالت در ترانسفورماتور قطعی می باشد. در استانداردهای ASTM D877-2002 و ASTM D1816-97 مقادیر مجاز ولتاژ شکست عایقی روغن های عایق در تجهیزات الکتریکی که به صورت تجربی به دست آمده بیان شده است:

این آزمایش در محل کارگاه صنعتی (سایت) قابل انجام می باشد اما در آزمایشگاه قابل کنترل تر و با دقت بیشتری همراه می باشد. پیش از انجام آزمایش نمونه بایستی به صورت بصری تحت بازرسی قرار گیرد تا از عدم وجود (حباب های هوا یا قطرات آب که ممکن است در اثر تکان های ناشی از انتقال نمونه به آزمایشگاه به داخل آن راه یافته اطمینان حاصل شود. با توجه به امکانات در دسترس از یکی از استانداردهای ASTM D1816-97 یا ASTM D877-2002 برای تعیین ولتاژ شکست عایق می توان استفاده شود از استاندارد IEEE 637-1999 نیز می توان به عنوان راهنما استفاده نمود [۲۱ و ۲۳].

استاندارد ASTM D877-2002

کلاس تجهیز الکتریکی حاوی روغن (KV)	مینیمم ولتاژ شکست عایقی
> ۶۹	۲۶
۶۹- ۲۸۸	۲۶
۲۸۸	۲۶

استاندارد ASTM D1816-97 (برای فاصله هوایی ۰/۰۴۰ اینچ)

کلاس تجهیز الکتریکی حاوی روغن (KV)	مینیمم ولتاژ شکست عایقی
> ۶۹	۲۳
۶۹- ۲۸۸	۲۶
۲۸۸	۲۶

۵-۳-۵ گازهای محلول در روغن

این آزمایش برای تعیین مقدار گازهای محلول در روغن‌های در سرویس به کار گرفته می‌شود. این آزمایش برای تعیین مقدار و نوع گازهای خاص متصاعد شده در ترانسفورماتورهای روغنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع و مقدار گازهای تولید شده در روغن این ترانسفورماتورها بیان کننده نوع خطا (Fault) در ترانسفورماتور می باشد. آرک، PD (تخلیه جزئی) جرقه های با انرژی کم، اضافه بار شدید و افزایش شدید دما در بعضی نقاط سیستم عایقی سیم پیچ‌ها بعضی از مکانیزم هایی هستند که باعث تجزیه شیمیایی مواد عایقی و تولید گازهای محلول قابل احتراق و غیرقابل احتراق در روغن می‌گردند. کارکرد نرمال ترانسفورماتور نیز ممکن است باعث تولید این گازها گردد اما مقدار آن در مقایسه با گازهای متصاعد شده در اثر خطاهای شدید ناچیز می‌باشد.

مقادیر بحرانی برای گازهای متصاعد شده و حل شده در روغن ترانسفورماتور که به صورت تجربی به دست آمده‌اند در منابع فنی موجود می‌باشند. در صورت وجود این مقادیر حجم گازهای موجود در روغن بایستی از در سرویس قرار دادن ترانسفورماتور جلوگیری شود. اما این مقادیر لزوماً بیان گر فالت قریب الوقوع در ترانسفورماتور نمی باشند. برای تحلیل دلایل احتمالی متصاعد شدن گاز از روغن روش‌های عیب‌یابی استاندارد موجود می باشد [۱۶ و ۲۹].

توجه، نمونه روغن گرفته شده بایستی توسط یک ظرف تمیز، بدون رطوبت و کاملاً قابل آب بندی جهت ایزولاسیون در مقابل رطوبت هوای محیط نگهداری شود. بایستی دقت نمود که پس از نمونه گیری و پیش از بستن درب ظرف نمونه گیری کلیه گازهای آزاد از

ظرف خارج گردند. برای اطلاعات بیشتر به استاندارد ASTM D3613-98 مراجعه شود [۱۶].
آزمایش روغن بایستی در محیطی آزمایشگاهی صورت گرفته و بر اساس استاندارد ASTM D3612-2002 نتایج آزمایش استخراج گردد پس از تعیین مقادیر گازهای محلول در روغن نمونه با استفاده از این فرآیند، بایستی از روش های عیب یابی ذکر شده، برای تحلیل نتایج استفاده شود [۱۶].

بدون در دسترس بودن سوابق وضعیت گازهای محلول در یک ترانسفورماتور تعیین وضعیت عادی و غیرعادی کارکرد برای ترانسفورماتور کاری مشکل می باشد. در رابطه با شرایط کارکرد عادی ترانسفورماتورها با توجه به میزان گازهای موجود در روغن آن ها اختلاف نظرات قابل توجهی وجود دارد.

۵-۳-۶ کشش سطحی (IFT)

این آزمایش جهت تعیین کشش بین مولکولی روغن مستعمل ترانسفورماتور در و آب به کار گرفته می شود. توسط این آزمایش نیروی جاذبه بین مولکولی بین دو ملکول غیرمشابه که مجاور یک دیگر قرار گرفته اند اندازه گیری می شود.

این آزمایش تعیین کننده مقدار متوسط مولکول های دوقطبی کثافات محلول در روغن می باشد. رابطه بین پارامترهای IFT و NN به این صورت می باشد که با افزایش NN روغن، IFT روغن کاهش می یابد. IFT بیان گر طول عمر مفید باقیمانده روغن می باشد کوچک بودن IFT بیان گر وجود اشکال در تجهیز نمی باشد اما بیان گر تهدید در عمل کرد آتی آن می باشد. جهت ارزیابی وضعیت کیفی ترانسفورماتور، مقادیری تجربی برای این پارامتر روغن وجود دارد، استانداردهای ASTM D971-2002 و ASTM D 2285-2000 در این باره بحث نموده است این آزمایش در محیط کار و هم چنین محیط آزمایشگاهی قابل انجام می باشد. اما برای انجام آزمایش دقیق تر بایستی فرآیند آزمایش با استفاده از استاندارد ASTM D971-2002 و در محیط آزمایشگاهی، آزمایش صورت گیرد. از استاندارد IEEE Std نیز راهنمای این آزمایش می باشد.

حداقل مقدارهای توصیه شده جهت IFT روغن در شرایط مختلف در جدول زیر آمده است [۱۳ و ۵].

نوع روغن	کلاس ولتاژ (KV)	حداقل نیروی کشش مجاورت مولکولی (دین/سانتی متر)
روغن عایق نو و یا استفاده نشده		۴۰
روغن نو در تجهیز استفاده نشده		۳۵
روغن نو که در تجهیز ریخته شده ولی هنوز تجهیز برق دار نگردیده است		۳۵
روغن تحت سرویس دهی	۶۹	۲۴
	۲۸۸-۶۹	۲۶
	۳۴۵<	۳۰
روغنی که بایستی احیا گردد و یا این که تعویض شود- گروه II		۲۴
روغنی که بایستی احیا گردد و یا این که تعویض شود- گروه III		۱۶

جدول ۵- مقادیر پیش نهادهای IFT برای روغن های عایق در سرویس و در کلاس های مختلف ولتاژی

۵-۳-۷ شمارش ذرات موجود روغن

این آزمایش جهت تعیین مقدار، اندازه و تا حدودی نوع ذرات اضافی موجود در روغن تحت سرویس مورد استفاده قرار می گیرد. این آزمایش ممکن است برای تعیین میزان آلودگی روغن با یک ماده خاص مورد استفاده قرار می گیرد. حجم ذرات اضافی در روغن متناسب با ولتاژ شکست عایقی بوده و بر روی ضریب قدرت روغن مؤثر می باشد، نوع ذرات و هم چنین مقدار آن روغن بر روی این شاخص ها تأثیر گذار می باشد. وجود ذرات فلزی زیاد در روغن بیان گر ضعف بیرینگ ها در پمپ های خنک کن روغن می باشد. برای این آزمایش مقادیر و تجربی جهت تعیین حدود شرایط کار کردی عادی و یا غیرعادی وجود ندارد.

توجه: نمونه روغن بایستی در شرایط رطوبت کوچک تر از ۵۰٪ و با استفاده از ظرف تمیز و خشک گرفته شود تا از ورود ذرات آلوده شده و رطوبت موجود در هوا به ظرف جلوگیری شود.

پس از نمونه گیری روغن در یک ظرف تمیز و با ظرفیت ۵۰ الی ۱۰۰ میلی لیتر، نمونه بایستی جهت آنالیز به آزمایشگاه منتقل شود. این آزمایش در محیط کار قابل انجام نمی‌باشد. جهت شمارش تعداد ذرات موجود در نمونه و همگن نمودن نمونه می‌توان از یک اشعه تفرق محوری استفاده کرد. استفاده از این نمونه دستگاه‌ها بایستی کاملاً مطابق دستورالعمل سازنده باشد تا ارزیابی با دقت هر چه بیشتر صورت گیرد.

در صورتی که نیاز به تشخیص و جداسازی نوع ذرات موجود در روغن باشد استفاده از شمارنده ذرات ترجیح داده می‌شود. استفاده از میکروسکوپ نوری نیز در تشخیص ذرات کمک می‌کند. برای بررسی نوع عناصر تشکیل دهنده ذرات غوطه‌ور در روغن، می‌توان از روش‌ها و آزمایش‌های تکمیلی استفاده کرد. برای تشخیص فلزی بودن و یا مغناطیسی بودن ذرات آزمایش‌های خاص دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر پایه روش‌های فروگرافی می‌باشد.

تفسیر آزمایش شمارش ذرات موجود در روغن عایق: در این آزمایش ذرات در رنج ۳ الی ۱۵۰ میکرومتر در ۱۰ میلی لیتر ($10ml / 150-3 \mu m$) شمرده می‌شود. با استفاده از جدول زیر میزان آلودگی روغن برحسب تعداد ذرات موجود در روغن تعیین می‌گردد.

وضعیت روغن	تعداد ذرات در ۱۰ میلی لیتر روغن
طبیعی	< 1500
مرزی	$1500 - 5000$
آلوده	> 5000

توجه:

در بعضی از استانداردها اهمیت تعداد ذرات در روغن و یا نوع آن‌ها را نسبت به تعداد و نوع ذرات در دوره قبلی نمونه برداری ارزیابی می‌کنند. در صورتی که سابقه ضعف بیش از حد بیرینگ‌ها پمپ‌های خنک کننده موجود باشد تغییرات در میزان ذرات فلزی موجود در روغن ترانسفورماتور با اهمیت می‌باشد. عقیده این استانداردها بر این است که با توجه به نشست ذرات بزرگ فلزی، سلولزی و مسی در ته تانک و عدم

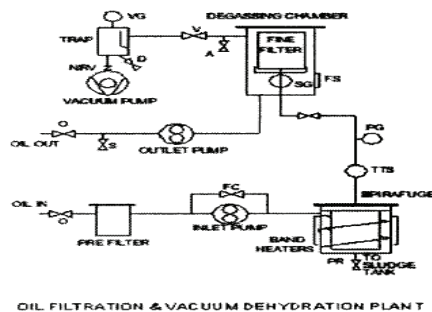
امکان برآورد میزان این ذرات در آزمایش ها، نمی توان با توجه به تعداد ذرات موجود در روغن وجود مشکل در ترانسفورماتور را تشخیص داد.

۵-۳-۸ ضریب قدرت روغن

توسط این آزمایش ضریب قدرت روغن های مستعمل و یا جدید تعیین می گردد. این آزمایش برای تعیین میزان توان تلف شده دی الکتریکی روغن هنگامی که روغن در یک میدان الکتریکی متناوب قرار می گیرد استفاده می شود. توان تلف شده در روغن به صورت گرما آزاد می شود. ضریب قدرت در این آزمایش عبارت است از: نسبت توان تلف شده برحسب وات به حاصل ضرب جریان مؤثر در ولتاژ مؤثر اعمالی برحسب ولت آمپر که در این آزمایش ولتاژ اعمالی و جریان به صورت سینوسی می باشند. ضریب قدرت کم نشان گر تلفات دی الکتریک کم می باشد. روغن های آلوده و یا با کیفیت پایین که در آزمایش ها و استانداردهای دیگر از نظر الکتریکی و شیمیایی تأیید می گردند توسط این آزمایش کیفیت، پایین آن ها تشخیص داده می شود. مقادیر استاندارد که تأیید کننده کیفیت روغن در این آزمایش می باشد در استاندارد ASTM D 1524-2003 قید گردیده است.

انجام این آزمایش در سایت به خوبی آزمایشگاه قابل انجام می باشد پیش از انجام آزمایش بایستی دقت شود که حباب های هوای ناشی از حمل و نقل در آن موجود نباشد و پس از ته نشین شدن ذرات معلق در آن با استفاده از استاندارد (b) ASTM D 924-2003 بایستی آزمایش انجام شود. برای انجام این آزمایش در سایت بایستی از دستورالعمل سازندگان تجهیزات آزمایش استفاده کرد. درصد ضریب قدرت مطابق فرآیند ذکر شده در استاندارد ذکر شده تعیین گردیده و سپس برای دمای ۲۰ درجه سانتی گراد اصلاح می گردد. در آزمایشگاه این آزمایش معمولاً در دماهای ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد صورت می گیرد [۴، ۱۰].

تحلیل: ماکزیمم درصد ضریب قدرت برای روغن های نو و در سرویس در جدول ۶ آمده است.



نوع روغن	کلاس ولتاژ (KV)	درصد ضریب قدرت در ۲۵ درجه سانتی گراد	درصد ضریب قدرت در ۲۵ درجه سانتی گراد
روغن نو		۰/۰۵	۰/۳
روغن نو در تجهیز نو	>۶۹	۰/۱۵	۱/۵
	۶۹-۲۸۸	۰/۱	۱
روغن نو پس از ریختن در تجهیز و پیش از برقرار کردن آن		۱	
روغن در سرویس گروه I	>۶۹	۰/۵	
	۶۹-۲۸۸	۰/۵	
	≥۳۴۵	۰/۵	
روغن در سرویس گروه II	>۶۹	۰/۵	
	۶۹-۲۸۸	۰/۵	
	≥۳۴۵	۰/۳	
روغن در سرویس گروه III	>۶۹	۱/۰	
	۶۹-۲۸۸	۰/۷	
	≥۳۴۵	۰/۳	

جدول ۶- ماکزیم درصد ضریب قدرت پیش نهادی برای روغن های نو و در سرویس

مقادیر مرزی ذکر شده برای ضریب قدرت روغن ترانسفورماتور که در جدول فوق آمده

است بر پایه این درک به کار گرفته شده است که افزایش ضریب قدرت با افزایش میزان آب موجود و یا مواد زاید دیگر دو قطبی در آن ارتباط مستقیم دارد. اکثر روغن‌های عایق الکتریکی در سرویس در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ضریب قدرت کوچک تر ۰/۲٪ دارند. زیاد بودن ضریب قدرت (بزرگ تر از ۰/۵٪ در ۲۵ درجه سانتی گراد) مسئله‌ای مهم می‌باشد چرا که در این حالت امکان جمع شدن کثیفی‌ها در یک ناحیه پر تنش الکتریکی و نفوذ آن‌ها به داخل سیم پیچ‌ها ایجاد می‌گردد. این امر باعث مشکل شدن تمیز کردن سیم پیچ‌ها از مواد زاید گردیده و هم چنین باعث ایجاد خطا در تحلیل آزمایش ضریب قدرت سیم پیچ‌ها به علت تغییر میزان نفوذ آب به سیم پیچ‌ها می‌گردد (توسط آزمایش ضریب قدرت سیستم عایقی سیم پیچ‌ها تغییرات میزان رطوبت جذب شده در سیم پیچ‌ها به دلیل این پدیده به خوبی مشهود نمی‌گردند).

ضریب قدرت روغن بسیار بالا (بزرگ تر از ۱٪ در ۲۵ درجه سانتی گراد) ممکن است در اثر وجود آب آزاد که می‌تواند برای برق‌دار کردن ترانسفورماتور خطرناک باشد اتفاق بیافتد. در این موارد دلیل بایستی حتماً شناسایی و مرتفع گردد. اکسید شدن روغن، آب آزاد، ذرات خیس، آلودگی‌ها و ناسازگاری مواد در ترانسفورماتور همگی عوامل بالا بودن ضریب قدرت روغن می‌باشند. برای اطلاعات بیشتر به استاندارد IEEE C57.106,2002 مراجعه شود [۲۹].

۵-۳-۹ آزمایش تعیین میزان پلی کلراید بی فنیل (PCB)

تعیین میزان PCB در روغن عایق تحت سرویس دهی توسط این آزمایش صورت می‌گیرد. مقدار مجاز PCB در روغن‌های عایق در بعضی از کشورها تعیین شده است به همین دلیل برآورد میزان PCB موجود در تجهیزات قدرت بسیار با اهمیت می‌باشد. مقدار کم PCB (کوچک از ۵۰ ppm) معمولاً خطر بسیار کمی را همراه دارد و با این مشخصه روغن در کلاس بدون آلودگی رده بندی می‌گردد. مقدار متوسط PCB (بزرگ تر از ۵۰ ppm) و کوچکتر از ۵۰۰ ppm در روغن باعث قرار گرفتن روغن در کلاس آلودگی رده بندی می‌شود. برای مقدار PCB بیشتر از ۵۰۰ ppm سیال را مانند PCB خالص در نظر می‌گیرند و دارندة تحت همین کلاس بندی مجازات می‌گردد. از آن جایی که در اکثر قوانین کشورها برای افزایش میزان PCB موجود در روغن‌های

عایق مجازات در نظر گرفته شده است لذا بایستی همواره میزان PCB موجود در این سیالات تحت نظر باشد. در بعضی از کشورها حتی مقدار مجاز PCB در روغن‌های عایق را کم تر از ۵۰ ppm مشخص کرده‌اند.

آزمایش PCB را می‌توان در سایت به خوبی و با دقت آزمایشگاه انجام داد. برای انجام این آزمایش در آزمایشگاه، استاندارد ASTM D4059-2005 بایستی مرجع قرار گیرد. برای انجام آزمایش PCB در سایت صنعتی کیت های نمایش دهنده مختلفی موجود می‌باشد. این کیت‌ها دارای زمان اعتبار و مصرف می‌باشند که پیش از انجام آزمایش این تاریخ بایستی بررسی شود. در این نوع از آزمایش‌ها تنها میزان تمرکز وجود PCB به صورت غیر عددی نمایش داده می‌شود. برای انجام این آزمایش‌ها الزامی است که دستورالعمل راهنمای سازنده دقیقاً به کار گرفته شود. در این نوع از آزمایش کمیت نمایش دهنده نسبت به کلیه ترکیبات کلراید دار حساس می‌باشد لذا آزمایش کننده بایستی اطلاع کامل در رابطه با ترکیب شیمیایی روغن مصرفی تحت آزمایش داشته باشد. تحلیل آزمایش: قوانین مربوط به PCB در نواحی و کشورهای مختلف متفاوت می‌باشد. لذا برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها بایستی با منابع قانونی مرتبط با این موضوع مشورت نمود [۱۷].

۵-۳-۱۰ آزمایش لجن

این آزمایش برای تعیین پنتان نامحلول در روغن عایق تحت سرویس دهی به کار گرفته می‌شود. این آزمایش تنها در صورتی صورت می‌گیرد که $0.15 \text{ mg KOH/g} > \text{NN}$ باشد. لجن یک ماده رزینی پلیمری بوده که به صورت جزئی هادی الکتریکی و جاذب رطوبت بوده و عایق در مقابل انتقال حرارت می‌باشد.

در صورت وجود آب در ترانسفورماتور، آب توسط لجن جذب می‌شود. وجود لجن محلول نمایش دهنده خراب شدن روغن و یا وجود آلودگی در آن و یا هر دو می‌باشد. وجود لجن محلول در روغن هشدار در رابطه با شکل گیری رسوب در روغن ترانسفورماتور می‌باشد این آزمایش معمولاً برای روغن‌های تحت سرویس دهی در ترانسفورماتور انجام می‌گیرند. بعضی از آزمایش‌های خاص که ادامه این آزمایش بوده و در استاندارد ASTM D 1698-2003 آمده، جهت بررسی شروع و یا عدم شروع لجنی شدن روغن می‌باشد. نتیجه این آزمایش رایه یک شماره برای تعیین میزان لجنی بودن روغن می‌باشد. این شماره

تعیین کننده راهکار مناسب برای نگهداری ترانسفورماتور می باشد. در صورتی که روغن شروع به لجنی شدن نکرده باشد و یا کمی لجنی باشد، روغن ترانسفورماتور را می توان با فیلتر کردن احیاء کرده و طول عمر ترانسفورماتور را افزایش داد. در صورتی که لجنی شدن روغنی پیشرفت کرده به طوری که ایجاد رسوب کرده باشد به فرآیند تعمیرات و نگهداری کامل تری نیاز می باشد. این فرآیند شامل خارج کردن ترانسفورماتور از سرویس، شستشوی داخلی و سیستم عایقی آن، شستشوی تانک ترانسفورماتور و سیستم خنک کن آن می باشد. این کار الزامی بوده چرا که لجن یا رسوب آن و رطوبت گیر افتاده در سیستم خنک کاری باعث کاهش کارایی سیستم خنک کننده می گردد. هم چنین احتمال قرارگیری لجن مرطوب در نواحی حساس ترانسفورماتور که تحت تنش شدید الکتریکی می باشد وجود دارد. قرارگیری لجن در این مکان باعث بروز فالت های زودرس و یا کاهش انتقال حرارت می گردد [۱۱].

برای انجام این آزمایش یک نمونه روغن به حجم حدود ۵۰ میلی لیتر لازم می باشد. دو میلی لیتر از نمونه بایستی در یک شیشه کوچک ریخته شود. بهترین ابعاد شیشه $10 \times 1/8$ سانتی متر می باشد. ده میلی لیتر از n -پنتان را درون شیشه ریخته و درب آن محکم بسته شده و شیشه تکان داده شود. نمونه بایستی به مدت ۲۴ ساعت در یک اتاق تاریک نگهداری شود. پس از آن محلول بایستی به دقت از لحاظ وجود ردهای از لجن مشاهده شود این بررسی بایستی با استفاده از کج کردن شیشه به گونه ای که حباب هوا در داخل روغن به سمت پایین شیشه حرکت کند و باعث آشفته گی روغن شود صورت می گیرد.

در صورت وجود لجن در روغن معمولاً به صورت یک توده جرم تیره و یا ابری در ته شیشه دیده می شود. اکثر لجن ها به صورت توده ژلاتینی و یا ذرات ریز می باشند. در صورتی که ذرات جامد ریز در لحظه آغاز آشفته گی در سیال نمونه در ته شیشه دیده شود جواب آزمایش مثبت بوده و در غیر این صورت جواب آزمایش منفی می باشد. نتیجه آزمایش به صورت الف) غیرلجنی ب) لجن سبک ج) لجن سنگین ثبت می گردد.

تحلیل آزمایش: جدول زیر بیان گر عملکرد لازم با توجه به درجهٔ لجنی بودن روغن می باشد.

سطح لجن محلول/رسوب در نمونه	عملکرد لازم
بدون لجن	هیچ عملی نیاز نمی باشد و بایستی ترانسفورماتور تحت بازدیدهای دوره ای قرار گیرد
لجن سبک	احیا ترانسفورماتور
لجن سنگین	روغن بایستی دور ریخته شود و کل تانک در ترانسفورماتور توسط روغن فلاشینگ شده (شستشو شود) و روغن جدید احیا شده درون ترانسفورماتور ریخته شود.

۵-۳-۱۱ بازدید چشمی

این بازدید جهت بررسی وجود آب آزاد یا رسوبات هم چون ذرات فلزی، لجن، حلال، کربن، فیبرها، آلودگی ها و غیره در روغن تحت سرویس دهی صورت می گیرد که متعاقب آن آنالیز این موارد انجام می شود. در صورتی که آلودگی های نامحلول در روغن موجود باشد با استفاده از فیلتر کردن روغن و شناسایی آلودگی های به جا مانده اطلاعات بسیار مفیدی در رابطه با شرایط ترانسفورماتور به دست خواهد آمد. نهایتاً برای تکمیل این بازدید نیاز به به کارگیری آزمایش های دیگر و نیز استانداردهای هم چون ASTM D1500-2001 می باشد تا اشکال نهفته در ترانسفورماتور ردیابی گردد. این بازدید برای تخمین رنگ و شرایط نمونه روغن در سایت های صنعتی در نظر گرفته شده است. برای اطلاعات بیشتر به استاندارد ASTM D1524-84 مراجعه شود.

تحلیل: بررسی چشمی روغن جهت تطابق با استاندارد رنگ ASTM و بررسی وجود

رسوب در آن صورت می گیرد. روغن بایستی کاملاً براق، روشن و شفاف باشد. مشاهده تیرگی و ذرات مواد جامد عایقی، محصولات خوردگی فلزات و یا دیگر مواد معلق و هم چنین تغییر غیرطبیعی رنگ در روغن بایستی توسط امکانات آزمایشگاهی بررسی و آنالیز گردیده تا عیب یابی صحیح صورت گیرد [۸ و ۹].

۵-۳-۱۲ آب موجود در روغن

همیشه در هر ترانسفورماتور مقداری رطوبت موجود می باشد. علاوه بر این از آن جایی که کاغذ سیستم عایقی بسیار جاذب آب می باشد، اکثر رطوبت موجود در روغن توسط کاغذ عایق جذب خواهد شد.

قدرت عایقی کاغذ همانند روغن بسیار حساس به میزان رطوبت موجود در آن می باشد. بنابراین اطلاع و کنترل میزان آب جذب شده توسط کاغذ بسیار مهم می باشد. یک روش تخمین مقدار رطوبت موجود در کاغذ توسط اندازه گیری مقدار رطوبت موجود در روغن می باشد.

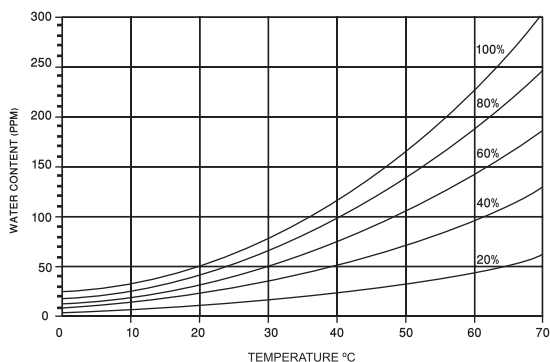
توزیع آب در عایق های جامد و مایع وابسته به تغییرات بار و در نتیجه تغییرات دما می باشد. بنابراین میزان وجود آب در روغن که برحسب ppm (part per million) بیان می شود اطلاعات کافی در رابطه با میزان رطوبت سیستم عایقی را در اختیار نمی گذارد. بیان میزان اشباع نسبی عایق در بازه گسترده بارها، اطلاعات مناسب تری را در اختیار قرار میدهد. حتی با استفاده از درصد اشباع عایق توسط رطوبت برای ارزیابی رطوبت سیستم عایقی باز هم خطا وجود خواهد داشت چرا که آب هیچ گاه به حالت پایدار در سیستم عایقی مایع و جامد نخواهد رسید. خطای اندازه گیری ممکن است مثبت یا منفی باشد این خطا ممکن است تحت تأثیر حالت گذاری کوتاه مدت در سطوح عایقی جامد/مایع اتفاق بیافتد و یا تحت تأثیر حالت گذرای بلند مدت در درون سیستم عایقی ضخیم تر باشد. اطلاعات دقیق تر در رابطه با مقدار رطوبت موجود در روغن و کاغذ را می توان با استفاده از شکل های ۱۰ و ۱۱ به دست آورد. پس از اندازه گیری مقدار رطوبت روغن در آزمایشگاه درصد اشباع آب در روغن در دماهای مختلف را از منحنی شکل ۱۰ می توان تعیین کرد. باید توجه کرد که درصد اشباع روغن ترانسفورماتور در حداقل دمای ممکن به هره- برداری از ترانسفورماتور نبایستی به ۳۰٪ و یا کوچک تر از آن برسد. هنگامی که میزان رطوبت روغن برای یک دمای مشخص تعیین گردید، رطوبت موجود در کاغذ با استفاده شکل ۱۱ برآورد می گردد. بعضی از تحلیل های کلی در رابطه با درصد اشباع آب در روغن و درصد رطوبت در وزن کاغذ عایق به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نمایش داده شده اند.

درصد اشباع آب در روغن	وضعیت روغن
۵-۰	عایق خشک
۲۰-۶	کمی خیس مقادیر کم تر بیان گر نسبتاً خشک بودن عایق و مقادیر بیشتر بیان گر نسبتاً خیس بودن عایق
۳۰-۲۱	خیس
۳۰<	خیلی خیس

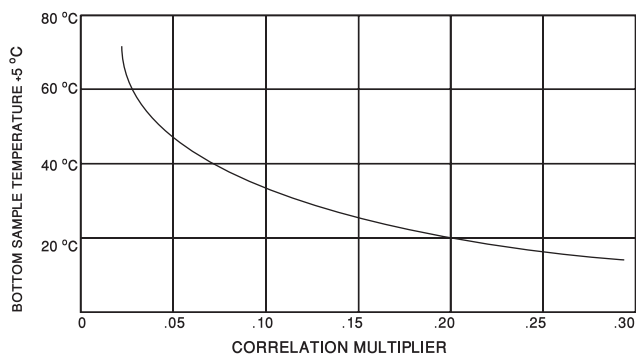
جدول ۷- راهنمای ارزیابی درصد آب موجود در روغن

درصد رطوبت در وزن خشک کاغذ	وضعیت
۲-۰	کاغذ خشک
۴-۲	کاغذ خیس
۴/۵>	کاغذ بسیار خیس

جدول ۸- راهنمای ارزیابی رطوبت در وزن خشک کاغذ



شکل ۱۰- منحنی اشباع آب در روغن معدنی



شکل ۱۱- درصد رطوبت موجود در وزن خشک عایق کاغذی

برای تعیین درصد رطوبت در وزن خشک کاغذ سلولزی عایق بایستی مراحل زیر صورت گیرد:

- ۱- تعیین ppm آب در روغن
- ۲- تعیین دما در سطح پایینی نمونه روغن
- ۳- افزایش ۵ درجه سانتی گراد به بند ۲
- ۴- تعیین ضریب تطابق در منحنی و بند ۳
- ۵- ضرب ppm آب در ضریب تطابق برای به دست آوردن درصد رطوبت در وزن خشک کاغذ سلولزی عایق

۵-۳-۱۳ وزن مخصوص

این آزمایش چگالی نسبی روغن ترانسفورماتور که نسبت وزن یک حجم معین از روغن به وزن همان حجم آب در دمای یکسان (۱۵/۶ درجه سانتی گراد) را تعیین می‌کند. مقدار وزن مخصوص روغن‌های عایق در میزان انتقال حرارت توسط آن‌ها مؤثر می‌باشد. هم چنین برای ارزیابی کارایی روغن در بعضی کاربردهای خاص تعیین وزن مخصوص روغن لازم می‌باشد. در آب هوای سرد امکان تشکیل یخ در روغن وجود دارد بنابراین ماکزیمم وزن مخصوص روغن دی الکتریک بایستی به میزانی باشد که از شناور شدن یخ در روغن جلوگیری شود. رنج وزن مخصوص روغن دی الکتریک ۰/۸۴-۰/۹۱ (مراجعه شود به استاندارد ASTM D3487-2000) می‌باشد. وزن مخصوص آب ۱/۰ و وزن مخصوص یخ حدود ۰/۹۱ می‌باشد بنابراین وزن مخصوص روغن دی الکتریک از آب و یخ کم تر می‌باشد و لذا باعث ته نشین شدن یخ و آب موجود در روغن می‌گردد. این آزمایش هم چنین برای تعیین نوع روغن‌های اسکارل و سیلیکون و معدنی بسیار سودمند می‌باشد چرا که وزن مخصوص این روغن‌ها بسیار با یک دیگر متفاوت می‌باشند استفاده از استاندارد ASTM D 1298-2003 برای این آزمایش توصیه می‌گردند [۷ و ۱۴].

۵-۴-۲ تپ چنجرها

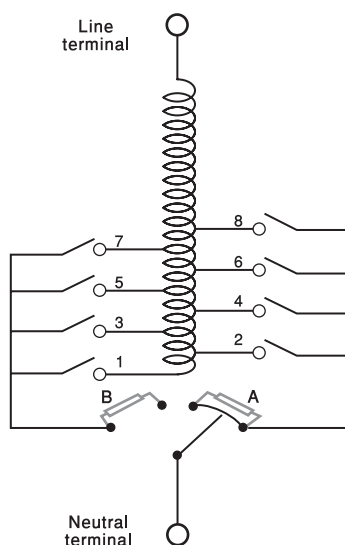
۵-۴-۱ کلیات

جهت تغییر نسبت تبدیل یک ترانسفورماتور تا حدود $\pm 5\%$ ولتاژ نامی آن از تپ چنجر استفاده می‌شود. تپ چنجرها در ترانسفورماتورهای قدرت دو نوع می‌باشند که یک نوع برای تعویض در حالت بی‌برقی (NLTC) و نوع دیگری آن جهت تعویض تپ در حالت زیر بار و برق دار می‌باشد (OLTC). ساختمان تپ چنجر NLTC که برای کار کرد در حالت بدون برق می‌باشد به گونه‌ای است که تنها در حالتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که ترانسفورماتور بی‌برق باشد. در صورتی تپ ترانسفورماتور در حالت برق دار توسط این نوع از تپ چنجر تغییر داده شود، باعث ایجاد آسیب به تجهیز و یا جراحت و حتی از دست رفتن جان شخص می‌گردد. این تپ چنجر معمولاً در سمت فشار قوی ترانسفورماتور نصب می‌گردد. تپ چنجرهای تحت بار به گونه ای طراحی شده اند که امکان تعویض تپ ترانسفورماتور در حالت برق دار و یا بارداری امکان پذیر می‌باشد.

این تپ چنجرها وابسته به نیازهای استفاده کنند و قیمت و قابلیت دستیابی آن ممکن است در سمت فشار قوی و یا فشار ضعیف ترانسفورماتور نصب گردد.

۵-۴-۲ فرآیند بازرسی تپ چنجرهای تحت بار (OLTCs)

در سیکل کار همه تپ چنجرهای تحت بار (OLTCs) در هنگام تعویض انشعاب و انتقال مسیر جریان از یک تپ به تپ مجاور دیگر بایستی دو انشعاب به مجاور یک دیگر متصل گردند و پس از اتصال، مسیر جریان از تپ قبلی جدا شده و تپ جدید تنها مسیر جریان بار خواهد بود. مدار شکل زیر بیانگر نحوه تعویض تپ ترانسفورماتور می باشد.



شکل ۱۲- مدار تپ چنجر تحت بار

در یک OLTC برای جلوگیری کنترل و محدودسازی جریان گردشی اتصال کوتاه ناشی از اتصال دو تپ مجاور یک دیگر این اتصال توسط یک امپدانس صورت می گیرد. در طراحی های قدیمی از راکتور یا سلف به عنوان امپدانس استفاده می گردید اما در طراحی های جدید از مقاومت اهمی استفاده می شود. در حین انتقال جریان از یک انشعاب به انشعاب دیگر جریان گردشی بین دو انشعاب توسط یک سویچ انتقال قطع می گردد. این سویچ می تواند به صورت یک کلید جرقه در روغن و یا جرقه در خلأ در نظر گرفته شود.

تجهیزاتی که جهت قطع و از هم گسیختن جریان به کار می‌رود بایستی تحت آزمایش، بازرسی و تعمیرات و نگهداری‌های دوره‌ای قرار گیرند. پریود این عملیات وابسته به میزان در سرویس بودن تجهیز و مشخصات و مقدار عملکرد آن می‌باشد بهترین پریود این عملیات طبق دستورالعمل سازنده می‌باشد مگر این که تجارب پیشین لزوم افزایش تعداد بازرسی‌ها و تعمیرات و نگهداری را بیان کند. اولین بازرسی تپ چنجر بایستی در پایان سال نخست بهره برداری از ترانسفورماتور صورت گیرد. بازدید بعدی بایستی بر اساس نتایج به دست آمده از بازرسی نخست (پس از پایان سال اول بهره برداری) صورت گیرد. به هر صورت زمان دوره های بازرسی نبایستی بیش از پنج سال باشد. OLTC ها ممکن است به صورت یک مجموعه مجزا در نظر گرفته شوند که یا به ترانسفورماتور جوش و یا پیچ شوند و یا درون تانک ترانسفورماتور قرار گیرند. معمولاً تپ چنجرهای دارای امپدانس انتقال راکتوری خواه با دیورتر سوییچ جرقه‌ای در روغن و یا دیورتر سوییچ خلأ به صورت یک مجموعه مجزا ساخته می‌شوند. تپ چنجرهای دارای امپدانس انتقال مقاومتری گاهی به صورت مجزا و گاهی در درون تانک اصلی ترانسفورماتور قرار می‌گیرند. تپ چنجرهایی که در تانک اصلی ترانسفورماتور قرار می‌گیرند دارای دو جز اصلی می‌باشند. جز اول یک محفظه سیلندری عایق می‌باشد که شامل دیورتر سوییچ و مقاومت‌های حین انتقال تپ می‌باشد. این محفظه کاملاً آب بندی بوده به نحوی که روغن داخل این محفظه امکان مخلوط شدن با روغن داخل تانک اصلی را ندارد. زیر تانک آب بندی شده دیورتر سوییچ، انتخاب گر انشعاب و سوییچ انتخاب انشعاب قرار گرفته است. از آن جایی که هیچ گونه جرقه‌ای در این تجهیزات رخ نمی‌دهد لذا این عناصر ممکن است در درون روغن اصلی ترانسفورماتور قرار گیرند. از آن جایی که این تجهیزات در درون روغن تانک اصلی می‌باشند، بازرسی کنتاکت‌های آن‌ها بدون تخلیه روغن تانک اصلی ممکن نمی‌باشد. اما برای بازرسی دیورتر سوییچ در درون تانک سیلندری نیاز به تخلیه روغن تانک اصلی نمی‌باشد.

OLTC هایی که در یک مجموعه مجزا می‌باشند در حالی که ترانسفورماتور در سرویس باشد می‌توانند با استفاده از اسکرن مادون قرمز تحت بازرسی قرار گیرد (مراجعه شود به ضمیمه C) در حالت طبیعی دمای این مجموعه مجزا بایستی چند درجه سلسیوس کمتر از دمای تانک اصلی باشد. نزدیک شدن دمای ایندو به یک دیگر و یا بیشتر شدن دمای OLTC از دمای تانک اصلی نمایانگر اشکال داخلی در OLTC

می باشد. پیش از باز کردن مجموعه OLTC بایستی ناحیه خارجی OLTC بازرسی گردد. مواردی که در بازرسی خارجی بایستی مد نظر قرار گیرد شامل سالم بودن رنگ، نشستی، آب بندی روغن، شیر فشارشکن و نمایش گر سطح روغن می باشد.

پس از بی برق کردن ترانسفورماتور برای بازرسی داخلی OLTC مخزن OLTC بایستی از روغن تخلیه شود. پس از باز کردن در پوش مخزن OLTC بایستی واشر آب بندی درب آن چک شود در صورت مشاهده هرگونه خرابی یا ضعیف بایستی تعویض گردد. تجهیزات واقع در کف مخزن بایستی از لحاظ وجود ذرات و خرده های فلزی و یا غیرفلزی چک شود وجود هر گونه از این ذرات یا تکه ها بیان گر ضعف و یا غیرنرمال بودن شرایط عمل کرد سوییچ می باشد. هم چنین سطوح لغزشی بایستی تحت بازرسی قرار گیرند و از سالم بودن آنها اطمینان حاصل شود.

۳-۴-۵ فرآیند بازرسی برای OLTC ها (ON Load Tap Changers)

جهت عملیات تعمیرات پیش گیرانه و نگهداری LTC ترانسفورماتور بایستی با استفاده از راهنمای سازنده موارد زیر را انجام داد:

الف) بازرسی و نگهداری تپ چنجر تحت بار از نوع مقاومتی یا راکتانس که در یک مخزن جداگانه واقع شده اند.

- ۱- عمل کرد صحیح کلیدهای فرمان
- ۲- توقف صحیح روی موقعیت مطلوب OLTC
- ۳- استحکام اتصالات
- ۴- بررسی علامت های وجود رطوبت هم چون زنگ زدگی یا قطرات آب
- ۵- بررسی فواصل مکانیکی مطابق مشخصات ارایه شده توسط سازنده
- ۶- بررسی کار کرد صحیح و وضعیت انتخاب گر انشعابات، تعویض کننده انشعابات و کلیدهای تغییر وضعیت تحت جرقه
- ۷- بررسی مکانیزم محرک سیستم تغییر انشعابات
- ۸- بررسی شمارنده تعداد تغییر انشعاب
- ۹- بررسی کارکرد صحیح نمایش گر و هماهنگی آن با مکانیزم عملکرد وضعیت انشعابات
- ۱۰- بررسی کارکرد صحیح لیمیت سوییچ
- ۱۱- بررسی سالم بودن وضعیت مکانیکی تجهیزات متعلقه

- ۱۲- بررسی کارکرد صحیح اهرم دستی و اینترلاک‌های آن
 - ۱۳- بررسی وضعیت فیزیکی انتخاب گر انشعابات
 - ۱۴- درگیر نبودن محور شافت انتقال حرکت
 - ۱۵- پس از پر کردن مخزن OLTC توسط روغن، با استفاده از اهرم دستی بر روی کلیه انشعابات حرکت شود از صحت و هماهنگی کلیه تجهیزات اطمینان به عمل آورده شود.
 - ۱۶- بررسی ولتاژ شکست روغن مخزن OLTC و در نهایت روغن مخزن OLTC، بایستی با روغن کاملاً تمیز و جدید جایگزین فلاشینگ گردد تا رسوبات کربنیزه شده از مخزن OLTC و متعلقات آن خارج شود.
 - (ب) بازرسی و نگهداری تپ چنجر تحت بار از نوع راکتانس (نوع خلأ) که در یک روغن مخزن جداگانه قرار گرفته است.
- برای این موضوع بایستی کلیه مواد قید شده در بند فوق انجام شده و موارد زیر نیز دنبال آن انجام شود.
- ۱- بررسی وضعیت خوردگی کنتاکت‌های قطع جرقه و وجود خلأ
 - ۲- بررسی کارکرد صحیح سیستم مونیتورینگ خلأ
 - ۳- بررسی هماهنگی عملکرد مخزن خلأ و مکانیزم انتخاب انشعاب
- در این سیستم بایستی مقدار بسیار کم کربن موجود می‌باشد، قدرت عایقی روغن نیز بایستی آزمایش شود (طبق بخش ۳-۵-۴). معمولاً در صورتی که عملکرد تپ چنجرهای خلأ درست باشد، کربن بسیار کمی بوجود خواهد آمد. برای پر کردن نمودن OLTC به وسیله روغن بایستی مطابق دستورالعمل سازنده رفتار شود. اکثر OLTC های از نوع خلأ بایستی در شرایط خلأ و با استفاده از روغن گازدایی شده پر شوند.

۴-۴-۵ فرآیند بازرسی کلی تپ چنجرهای در حالت بی برق (NLTC)

تپ چنجرهای در حالت بی برق در سمت سیم پیچی فشار قوی ترانسفورماتور نصب می شود و منظور از آن ایجاد نسبت تبدیل مناسب برای موقعیت های مختلف افت و یا افزایش ولتاژی دایم می باشد. از آن جایی که این تجهیز همانند یک کلید می باشد لذا آزمایش‌ها و بازرسی‌های محدودی برای اطمینان از صحت عمل کرد آن انجام می گیرد. بدی عمل کرد این سیستم توسط متصاعد شدن گازهای قابل اشتغال زیاد از روغن آشکار می گردد. این گازها بیان گر وجود فلز داغ در روغن و بدون اثری از عناصر کاغذ

سلولز در این گازها می باشد.

سیستم تپ چنجر نوع حالت بی برق در درون تانک اصلی ترانسفورماتور قرار می گیرد. بنابراین برای بازرسی آن لازم است که روغن تانک اصلی به مقداری که تپ چنجر مشاهده شود تخلیه گردد.

بازرسی های عیب یابی معمولاً شامل موارد تنظیم بودن کنتاکت ها تنظیم بودن فشار کنتاکت ها و بازرسی چشمی می باشد آزمایش های تپ چنجر از نوع حالت بی برق در حالت ترانسفورماتور بی برق صورت می گیرد بازرسی های عیب یابی برای این نوع تپ چنجر به شرح زیر می باشد.

الف- تنظیم فیزیکی

بعد از بررسی کارکرد صحیح سیستم محرک تپ چنجر بایستی صحت موقعیت کنتاکت های آن بررسی گردد. این کار توسط آزمایش نسبت تبدیل انجام می شود. این بررسی امکان ارزیابی تنظیم فیزیکی مناسب کنتاکت های تپ چنجر را بدون وارد شدن به مخزن ترانسفورماتور فراهم می کند. عدم تنظیم فیزیکی کنتاکت های تپ چنجر باعث افزایش دمای کنتاکت ها شده و در نهایت باعث فالت در ترانسفورماتور می گردد این آزمایش معمولاً اولین آزمایش است که بر روی تپ چنجر صورت می گیرد.

دستگاه آزمایش نسبت تبدیل ترانسفورماتور به سمت فشار قوی ترانسفورماتور متصل شده و ولتاژ فازهای سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور اندازه گیری می شود. بعد از تنظیمات دستگاه و قرار دادن تپ چنجر بر روی تپ نول ترانسفورماتور دسته محرک تپ چنجر در یک جهت خاص چرخانیده شده تا این که از نقطه نول ترانسفورماتور جدا شود. موقعیت دسته محرک بایستی علامت زده شود سپس بایستی دسته محرک تپ چنجر در خلاف جهت چرخانیده شده تا این که تپ چنجر به نقطه نول برسد و حرکت دسته ادامه داده شود تا مجدداً از آن جدا شود. موقعیت جدید نیز بایستی بر روی صفحه انتخابگر (Selector) علامت زده شود. سپس دسته محرک به موقعیت ON بایستی برگردانیده نشود. موقعیت نهایی دسته محرک باید دقیقاً بین دو علامت زده شده باشد. هر گونه انحراف نشانگر عدم تنظیم فیزیکی تپ چنجر بوده و پیش از برق دار شدن ترانسفورماتور بایستی برطرف گردد. فرآیند ذکر شده فوق برای کلیه تپ ها بایستی اجرا گردد.

ب- فشار کنتاکت

بعضی از تکنیک های بیان شده در بخش ۵-۱-۱ را می توان جهت اندازه گیری مقاومت اهمی کنتاکت های تپ چنجر استفاده کرد مقادیر مقاومت های اندازه گیری شده بایستی مطابق مقادیر ارایه شده توسط سازنده ترانسفورماتور اصلاح گردند. هرگونه انحراف از مقادیر ارایه شده توسط کارخانه (افزایش مقاومت) بیان گر عدم فشار مناسب کنتاکت ها می باشد. علاوه بر این در صورتی که ترانسفورماتور دارای OLTC نیز باشد بایستی برای مقایسه مقادیر مقاومت ها OLTC در موقعیت نوترال قرار گیرد.

در ترانسفورماتور تک فاز یا اتصال ستاره سه فاز هر فازی که دارای مقاومت بیشتری باشد دارای کنتاکت با فشار کم تر از حد مطلوب می باشد. در ترانسفورماتورهای با اتصال مثلث در صورتی که مقاومت بین دو بوشینگ بیشتر از حد تعیین شده باشد بیان گر وجود کنتاکت ضعیف می باشد. اندازه گیری ها بایستی بر روی کلیه تپ ها در حالت بی برق صورت گیرد.

در صورتی که هر یک از مقادیر اندازه گیری غیرطبیعی باشند، روغن ترانسفورماتور بایستی تخلیه شده و تپ چنجر از ترانسفورماتور جدا شده و آزمایش ها مجدداً صورت گیرند تا کاملاً تأیید کننده موردهای مشکوک در تپ چنجر گردند و سپس ترانسفورماتور تحت تعمیر قرار گیرد.

ج - بازرسی چشمی

جهت بررسی اشکالات عدم تنظیم فیزیکی کنتاکت ها و فشار کنتاکت ها تپ چنجر نیاز به بازرسی چشمی آن می باشد. این بازرسی در آخرین مرحله پس از تخلیه روغن تانک ترانسفورماتور صورت می گیرد. در صورتی که از لحاظ دسترسی مکانی و دید موانع وجود داشته باشد بایستی از ابزار کمی برای این منظور استفاده کرد. به عنوان مثال از یک نمایش گر فیبرنوری قابل انعطاف برای دیدن کنتاکت های تپ چنجر استفاده کرده زمان بازدید از تپ چنجر بایستی علامت هایی که ناشی از سوختن یا مسیرهای سوختگی و جرقه می باشد مورد توجه قرار گیرد.

هرگونه خرابی و یا ضعف در تپ چنجر پیش از نصب مجدد آن بایستی برطرف گردد.

۵-۴-۵ تنظیم کننده ولتاژ (Voltage Regulator)

یک تنظیم کننده ولتاژ وسیله‌ای است که ولتاژ را در یک حد از پیش مشخص شده و بدون توجه به نوسانات بار در محدوده مجاز، تنظیم می‌کند. تجهیزات این وسیله شامل یک اتو ترانسفورمر دارای چندین تپ، یک تپ چنجر تحت بار و یک سیستم کنترل می‌باشد. تعمیرات و نگهداری این وسیله معمولاً در دو حالت صورت می‌گیرد یکی در حالت بی برقی و دیگری در حالت برق دار.

جزئیات این بازرسی ها و عملیات به شرح زیر می باشند:

الف- حالت برق دار: هنگامی که تنظیم کننده ولتاژ در مدار می‌باشد بازرسی‌های

زیر صورت می‌گیرد.

۴- بررسی سطح روغن با استفاده از گیج نصب شده بر روی دستگاه

۵- کارکرد سیستم کنترل را می‌توان با قرار دادن سیستم کنترل در حالت دستی و فرمان دادن به آن جهت افزایش ولتاژ و سپس قرار دادن سیستم کنترل در حالت اتومات می‌توان انجام داد پس از قرار دادن سیستم کنترل در حالت اتومات و طی زمان تأخیر برنامه ریزی شده، بایستی ولتاژ به سطح از پیش تعیین شده و به صورت اتومات برگردد. معمولاً بایستی سیستم به تپ اولیه خود برگردد مگر این که در طی این مدت ولتاژ ورودی تغییر داده باشد برای بررسی وضعیت کاهش ولتاژ، بایستی فرآیند فوق مجدداً تکرار شود با این تفاوت که در حالت دستی ولتاژ کاهش داده می‌شود.

۳- دمای تنظیم کننده ولتاژ بایستی به وسیله ترمومتر سطح فوقانی روغن و ترمومتر سیم پیچی (در صورت وجود) و یا با استفاده از تکنیک مادون قرمز بررسی شود (به ضمیمه C مراجعه شود) کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده بایستی در فازهای مختلف بایستی با یک دیگر مقایسه شوند.

۴- در صورتی که احتمال نشت آب به داخل دستگاه وجود داشته باشد رطوبت موجود در روغن و قدرت عایقی دستگاه بایستی آزمایش شود.

ب- حالت بی برقی: بعد از بی‌برق شدن دستگاه تنظیم کننده ولتاژ اندازه‌گیری‌های زیر بایستی صورت گیرد:

۱- مقاومت عایقی سیم پیچ ها

۲- ضریب قدرت سیستم عایقی

۳- نسبت تبدیل سیم پیچ ها

۴- ولتاژ شکست عایقی روغن

بازرسی چشمی بوشینگ ها از لحاظ وجود ترک یا نشت روغن نیز بایستی صورت گیرد. این بازرسی در زمان برق دار بودن دستگاه مشکل می باشد.

در صورتی که نیاز به خارج کردن مجموعه داخلی سیم پیچ ها و قطعات از تانک دستگاه باشد موارد زیر نیز بایستی بررسی گردند:

۱- استحکام کلیه اتصالات

۲- بررسی سالم بودن کنتاکت ها مطابق دستورالعمل راهنمای سازنده

۳- برای خارج کردن مجموعه تجهیزات از درون تانک بایستی مطابق دستورالعمل راهنمای سازنده رفتار شود.

۵-۵ هسته

۵-۱ کلیات

هسته ترانسفورماتور یا از نوع زرهی بوده و یا از نوع هسته ای می باشند. سیم پیچ ها در ترانسفورماتور از نوع هسته ای به صورت سیلندری پیچیده شده و حول ساق های هسته قرار می گیرند. در نوع هسته زرهی: هسته به صورت یک فرم زرهی سیم پیچ ها را در بر می گیرد. در هر دو شکل هسته، هسته از تانک و دیگر تجهیزات زمین شده، عایق می باشد. یک نقطه از هسته ترانسفورماتور جهت جلوگیری از افزایش ولتاژ آن در حین کار زمین می گردد. در صورتی که یک نقطه دیگر از هسته ترانسفورماتور به هر علتی زمین شود، یک جریان گردشی که متناسب با عکس مقدار مقاومت مسیر می باشد در هسته مغناطیسی ایجاد می شود. در صورتی که این فالت در ترانسفورماتور اتفاق بیافتد باعث آسیب جدی به هسته می گردد. حرارت ایجاد شده در اثر فالت جریان گردشی در هسته مغناطیسی، باعث تولید مقدار زیادی گاز اتیلن می گردد و در صورتی که فالت بسیار شدید باشد مقداری گاز استیلن نیز از روغن ترانس متصاعد خواهد گردید. برای اطمینان از عدم وجود فالت زمین ناخواسته در هسته ترانسفورماتور، مقاومت عایقی هسته بایستی به صورت دوره ای اندازه گیری شده تا از صحت سیستم عایقی آن اطمینان حاصل گردد.

۵-۲-۵ مقاومت عایقی هسته ترانسفورماتور و زمین شدن ناخواسته آن

مقاومت عایقی هسته نسبت به زمین بایستی به صورت دوره‌ای اندازه‌گیری گردد. نتایج اندازه‌گیری از این لحاظ حایز اهمیت می‌باشند. که روند تغییرات آن (کم شدن مقاومت عایقی هسته) بیان‌گر ضعف سیستم عایقی هسته ترانسفورماتور می‌باشد. این آزمایش هم چنین بایستی پیش از قرار دادن ترانسفورماتور در سرویس و یا پس از انجام اصلاحات و یا تعمیرات که ممکن است باعث تأثیر منفی بر روی سیستم عایقی هسته گردند صورت گیرد. البته انجام این آزمایش در زمان‌های دیگر نیز در صورت لزوم می‌تواند صورت گیرد.

از این آزمایش علاوه بر اندازه‌گیری مقاومت عایقی هسته، جهت ردیابی زمین شدگی ناخواسته در هسته ترانسفورماتور نیز ممکن است استفاده شود. تنها روشی که برای آزمایش زمین شدگی ناخواسته هسته ترانسفورماتور صورت می‌گیرد، بی‌برق کردن ترانسفورماتور و انجام آزمایش اندازه‌گیری مقاومت هسته به تنهایی، نسبت به زمین می‌باشد. این آزمایش تنها در صورتی صحیح خواهد بود که نوار زمین هسته از زمین جدا شده و سپس آزمایش اندازه‌گیری مقاومت هسته نسبت به زمین صورت گیرد. در هسته نوع زرهی، نوار زمین معمولاً به راحتی در دسترس نمی‌باشد. در این حالت بایستی از سازنده یا یک مشاور حرفه‌ای مشورت گرفته شود. بعضی از تجهیزات دارای تعداد هسته مغناطیسی بیشتر از یکی بوده و یا هسته آن‌ها به دو واحد مجزا تقسیم شده است تماس این هسته‌ها می‌توانند به صورت یکجا تحت آزمایش اندازه‌گیری مقاومت نسبت به زمین قرار گیرند اما در صورتی که که زمینی شدگی ناخواسته در این هسته‌ها اتفاق افتاده باشد بایستی کلیه نوارهای زمینی آن‌ها جدا گردیده و هر هسته به صورت جداگانه تحت آزمایش قرار گیرد.

این آزمایش پیش از در سرویس قرار دادن ترانسفورماتور و یا پس از اصلاحات و تعمیرات قابل اجرا می‌باشد. در زمان‌های دیگر با استفاده از آزمایش گاز کار موتوگرافی می‌توان بررسی وضعیت مقاومت هسته به زمین را انجام داد.

فرآیند آزمایش: برای آزمایش مقاومت عایقی و زمین شدگی ناخواسته هسته ترانسفورماتورها ولتاژ اعمالی نبایستی بیش از ۱۰۰۰ ولت شود. مراحل زیر برای انجام آزمایش لازم می‌باشد.

الف) نوار زمین هسته ترانسفورماتور بایستی مکان یابی شود در ترانسفورماتورهای

جدید از نوع هسته درون، ممکن است اتصال زمین هسته از طریق یک بوشینگ کوچک از ترانسفورماتور بیرون آورده شود و لذا نیازی به باز کردن درب ترانسفورماتور نمی باشد. (ب) نوار زمین هسته بایستی از ناحیه اتصال زمین که ممکن است بدنه تانک و یا جای دیگر باشد جدا گردد.

احتیاط: بایستی دقت کرد که کلیه متعلقات فلزی هم چون نوار فلزی، پیچ، مهره و ابزار در مکان مناسبی قرار داده شوند به گونه ای از احتمال سقوط آن ها در سیم پیچ ها جلوگیری شود.

ج) آزمایش اندازه گیری مقاومت بایستی بین نوار زمین و زمین صورت گیرد تا در صورت وجود زمین شدگی ناخواسته وضعیت و مقاومت آن مشخص گردد. مقادیر مقاومت کوچک تر از ۱۰ مگا اهم بایستی با رنج کوچک تر مقاومت اندازه گیری شود تا مقدار اندازه گیری شده با دقت بیشتر اندازه گیری شود.

د) دمای هسته بایستی تخمین زده شود تا مطابق آن مقدار مقاومت اصلاح گردد. تحلیل آزمایش: برای تحلیل نتایج آزمایش به جدول ۹ مراجعه شود.

نوع ترانسفورماتور	مقاومت عایقی هسته	وضعیت عایقی
نو	< 1000 مگا اهم	خوب
ترانسفورماتور در سرویس	< 100 مگا اهم	خوب
	$100-10$ مگا اهم	ضعف سیستم عایقی هسته
	< 10 مگا اهم	باعث ایجاد و جریان گردش شده و بایستی بررسی و رفع عیب گردد

جدول ۹- رنج مقاومت عایقی برای شرایط مختلف سیستم عایقی هسته ترانسفورماتور

۵-۳ تعیین مکان زمین شدگی هسته:

در ترانسفورماتورهای قدرت هسته مغناطیسی توسط یک اتصال فلزی زمین می گردد. اما به علت های مختلف امکان زمین شدن ناخواسته نواحی دیگر این هسته

وجود دارد. در صورت رخ دادن این موضوع بایستی سریعاً مکان زمین شده پیدا گردیده و اشکال برطرف شود.

ردیابی و برطرف کردن این فالت در سایت ، وابسته به شرایط و امکانات موجود در آن می باشد. پیدا کردن فالت با استفاده از بازرسی چشمی در صورتی میسر می باشد که فالت در قسمت بالای هسته در ترانسفورماتورهای نوع هسته ای (Core-form) باشد در غیر این صورت تعیین مکان فالت و رفع آن بسیار مشکل می باشد.

در ترانسفورماتورهای با هسته زرهی (shell-form) نوار فلزی اتصال زمین معمولاً به راحتی در دسترس نمی باشد و از آن جایی که یافتن فالت منوط به در دسترس بودن این نوار می باشد لذا برای دریافت راهنمایی بایستی با کارخانه سازنده مشاوره نمود. برای پیدا کردن مکان زمینی شدگی هسته در اثر فالت بایستی پروسه زیر صورت گیرد:
الف) طی پیدا نمودن نوار زمین هسته مغناطیسی ترانسفورماتور
ب) جدا کردن نوار زمینی از قسمت اتصال به زمین که ممکن است بدنه و یا نقاط دیگر زمین شده باشد.

ج) یک باطری ۱۲ ولتی یا منبع تغذیه DC ایزوله شده به دو طرف ترانسفورماتور به گونه ای که کل هسته ترانسفورماتور در مدار آن قرار گیرد متصل شود.
د) ترمینال منفی یک ولت متر DC به یک نقطه تانک فلزی که کاملاً زمین شده است متصل گردد.

۵- با استفاده از اتصال ترمینال مثبت ولت متر به هسته مغناطیسی ترانسفورماتور بایستی از یک سمت هسته اندازه گیری ولتاژ شروع شود. پس از اتصال ترمینال مثبت ولت متر به هسته بایستی ولت متر یک مقدار ولتاژ را نمایش دهد. در صورت عدم وجود ولتاژ بایستی اندازه گیری از سمت دیگر ترانس آغاز شود. اندازه گیری بایستی در یک جهت ادامه یابد. مقادیر ولتاژ نمایش داده شده به تدریج بایستی کم می شود تا وقتی که مقدار صفر توسط ولت متر نمایش داده شود. آن منطقه محل زمین شدگی ترانس در اثر نقص عایقی می باشد.

تحلیل آزمایش: نقطه صفر ولتاژ، محل زمین شدگی ناخواسته هسته می باشد. در این وضعیت امکان پیدا کردن محل زمین شدگی با استفاده از بازرسی فیزیکی و چشمی وجود دارد که به تبع آن رفع اشکال نیز مقدور می باشد. در غیر این صورت بایستی مکان نوار زمین هسته مغناطیسی به محل اشکال انتقال داده شود. گرچه انتقال نوار اشکال را به صورت اساسی مرتفع نمی کند اما به هر صورت باعث کاهش جریان

گردشی و جلوگیری از آسیب رساندن به ترانسفورماتور می‌گردد. در حالتی که هسته ترانس به صورت خارجی به تانک اتصال زمین شده باشد، جریان گردشی ناشی از اتصال زمین ناخواسته هسته را می‌توان با استفاده از یک مقاومت محدود کرد. این کار هم چنین امکان مونیتورینگ هسته ترانسفورماتور را در حالت برق دار فراهم می‌کند. برای این کار، بایستی ولتاژ دو سر مقاومت اندازه‌گیری شود. پیش از انجام این تکنیک حتماً بایستی با سازنده ترانسفورماتور مشورت شود.

۵-۶ تانکها و تجهیزات جانبی

۵-۶-۱ کلیات

اکثراً تجهیزات الکتریکی در درون محفظه و یا یک پوشش فلزی قرار دارند که نقش حفاظت کننده مکانیکی و نیز نگهدارنده سیال عایق را به عهده دارد. در ترانسفورماتور تانک این نقش را به عهده دارد که همراه با آن تعدادی بوشینگ، بستها و دیگر تجهیزات جانبی نیز وجود دارد. نوع و تعداد این تجهیزات وابسته به اندازه، کلاس ولتاژ و مورد بهره برداری آن می‌باشد. تجهیزات جانبی امکانات زیر را فراهم می‌کنند:

۱- نمایش گر چشمی و وضعیت داخلی ترانسفورماتور

۲- هشدار دهنده در وضعیت‌های غیرطبیعی

۳- بهبود دهنده کارکرد ترانسفورماتور

۵-۶-۲ کنسرواتورها

کنسرواتورها مخازنی هستند که معمولاً بالاتر از سطح فوقانی تانک ترانسفورماتور قرار می‌گیرند. ته کنسرواتور بالاتر از سطح فوقانی تانک اصلی بوده و توسط یک لوله به تانک متصل می‌گردد. این وضعیت باعث ایجاد یک فشار مثبت در درون تانک نسبت به فشار اتمسفر می‌گردد و در نتیجه مانع از نفوذ رطوبت و آلودگی موجود در هوای خارج از تانک به درون تانک می‌شوند. معمولاً یک شیر در مسیر لوله اتصال به تانک از کنسرواتور و هم چنین یک نمایش گر سطح روغن بر روی کنسرواتور موجود می‌باشد. منظور از استفاده از کنسرواتور ایجاد یک مخزن برای حالتی است که دمای ترانسفورماتور و روغن آن افزایش یافته و به تبع آن حجم روغن آن در درون تانک افزایش یابد، میزان حجم افزوده روغن به داخل کنسرواتور منتقل شده و در

صورتی که دمای ترانسفورماتور کاهش یابد و یا نشت روغن وجود داشته باشد روغن از طریق کنسرواتور به تانک تغذیه می شود. اصولاً سه نوع سیستم کنسرواتور برای ترانسفورماتور وجود دارد. قدیمی ترین نوع آن تنفس آزاد می باشد. در این نوع سطح روغن با افزایش و کاهش دمای روغن، کاهش و افزایش یافته و روغن مستقیماً با هوای محیط در تماس می باشد. بعضی از کنسرواتورهای تنفس آزاد به خشک کننده و یا تمیز کننده هوای محیط که با روغن در تماس می باشند مجهز می باشند. دو نوع دیگر کنسرواتور از تماس روغن با هوای محیط جلوگیری می کنند. جدیدترین نوع کنسرواتور از یک سلول هوایی (که نام دیگر آن بادکنک است) استفاده میکنند که به صورت یک بالون داخل کنسرواتور را در بر گرفته است. وقتی که سطح روغن در کنسرواتور افزایش و یا کاهش می یابد به ترتیب هوا از توسط بالن از داخل کنسرواتور به بیرون و یا درون داده می شود. نوع قدیمی تر کنسرواتور توسط یک دیافراگم مجهز شده که با افزایش و یا کاهش حجم روغن داخل تانک پرده دیافراگم قوس به دخل و یا خارج پیدا می کند.

در بازرسی های کنسرواتور بایستی فرآیند زیر در نظر گرفته شود:

سطح روغن نمایش داده شده توسط نمایشگر سطح روغن کنسرواتور بایستی ثبت گردد. سطح ثبت شده بایستی نسبت به موقعیت علامت ۲۵ درجه سانتی گراد ثبت گردد. هم چنین دمای روغن در سطح فوقانی تانک نیز بایستی ثبت گردد. این دما برای اصلاح سطح ثبت شده روغن در کنسرواتور مورد استفاده قرار می گیرد. سطح اصلاح شده روغن با توجه به دما بایستی معادل سطح روغن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد باشد. **تحلیل:** در صورتی که سطح ثبت شده و اصلاح شده طبیعی باشد نیاز به هیچ گونه عمل کرد اضافی نمی باشد. در صورتی که سطح بالاتر یا پایین تر از حد طبیعی باشد بایستی مجدداً مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده، بررسی گردند. در نهایت نتیجه گیری بر اساس مقادیر نهایی صورت گیرد. نتایج نهایی بیانگر لزوم کاستن و یا افزودن روغن به ترانسفورماتور می باشد که بایستی طبق دستورالعمل سازنده ترانسفورماتور باشد. علاوه بر این بایستی پیش از هر اقدامی علت را جستجو و مرتفع نمود. سطح روغن در صورت عدم وجود نشتی بایستی ثابت باقی بماند.

۵-۶-۳ سیستم خنک کننده

ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت به انواع مختلف سیستم های خنک کننده مجهز می گردند. این سیستم ها ترکیبی از رادیاتورها، پمپ ها و فن ها می باشند.

۵-۶-۳-۱ سیستم کنترل فن‌ها

فن‌های خنک‌کننده به گونه‌ای طراحی می‌گردند که هم به صورت فرمان دستی و هم به صورت فرمان اتوماتیک به کار می‌افتند. فرمان اتوماتیک برای فن معمولاً وابسته به میزان بارگیری و یا برق‌دار شدن ترانسفورماتور و یا هر دوی آن‌ها می‌باشد. در صورتی که ترانسفورماتور دارای یک ظرفیت نامی باشد، سیستم خنک‌کننده بایستی هنگامی که ترانسفورماتور بر مقدار می‌شود به مدار بیاید چرا که این ترانسفورماتور تنها حالتی که سیستم خنک‌کننده در مدار باشند می‌توانند بار نامی را ارایه دهند و در غیر این صورت شدیداً افزایش دما خواهند داشت. ترانسفورماتورهای دارای سه ظرفیت بارنامی می‌تواند بدون سیستم خنک‌کننده و توسط دو مرحله در مدار آمدن سیستم‌های خنک‌کننده سه ظرفیت را ارایه دهند. این سه حالت خنک‌کنندگی به ترتیب توسط دمای روغن یا بار ترانسفورماتور و یا دمای سیم پیچ در مدار قرار می‌گیرند.

بازرسی سیستم خنک‌کننده بایستی طبق فرآیند زیر صورت گیرد:

فرآیند: به منظور تعیین نحوه و چگونگی فرآیند بازرسی و آزمایش سیستم خنک‌کننده ترانسفورماتور نوع آن بایستی مشخص گردد. راه اندازی دستی پمپ‌های پرسرعت سیستم خنک‌کننده در بعضی شرایط و در بعضی از ترانسفورماتورهای قدرت ممکن باعث ایجاد اشکال شود. لذا در این مورد بایستی مطابق دستورالعمل راهنمای سازنده رفتار کرد.

کنترل دستی: این حالت از سیستم فرمان بایستی به صورت کوتاه مدت صورت گیرد تا اطمینان از صحت مدارات و وجود برق ایجاد گردد. در این حالت بایستی روشن شدن فن‌های خنک‌کننده بررسی شود. پمپ‌های روغن نیز بایستی با مشاهده گنج‌های نشان دهنده جریان روغن بازرسی گردند. دستورالعمل راهنمای سازنده به عنوان راهنمای اصلی فرآیند بایستی در نظر گرفته شود.

کنترل کننده دما: سنسور درجه حرارت بایستی از چاهک خود در بدنه ترانس خارج گردیده و سیستم کنترل در حالت اتومات قرار داده شود. با استفاده از سیستم کالیبراسیون دستگاه کنترلر حرارت درجه حرارت ترمومتر بایستی به تدریج افزایش داده شود و عمل کرد سیستم اتومات خنک‌کن متناسب با دماهای ایجاد شده بررسی گردد.

کنترلر بار: ابتدا بایستی جریان ترانسفورماتور جریان نصب شده جهت این امر بررسی شود تا از صحت مدار آن اطمینان کامل فراهم شود. پس از اتصال کوتاه کردن خروجی ترانسفورماتور جریان (در صورت برقرار نمودن ترانسفورماتور) سیم‌های ترانسفورماتور جریان بایستی از مدار کنترل جدا شود. سپس بایستی جریان به مدار کنترل تزریق شود و مقدار آن تغییر داده شود و مطابق مدار کنترل، فرمان‌های داده شده به قسمت‌های مختلف سیستم کنترل و بررسی شود.

تحلیل: هرگونه عمل کرد ناصحیح سیستم خنک کننده بایستی کاملاً اصلاح گردد تا ترانسفورماتور کارآیی مناسب را ارایه نماید.

احتیاط: هنگام کار با ترانسفورماتورهای جریان برقرار بایستی دقت کامل به عمل آورده شود. زیرا که در صورت باز بودن مدار CT امکان ایجاد حوادث مخرب بدون هشدار برای CT فراهم می‌گردد.

۵-۶-۳-۲ چرخش فن های خنک کننده

فن‌های خنک کننده جهت به حرکت در آوردن هوا در کانال های رادیاتورها و انتقال حرارت از روغن عایق ترانسفورماتور به محیط تعبیه گردیده‌اند. چرخش پره‌های فن های سیستم خنک کننده بایستی از این لحاظ بررسی شوند که از جهت حرکت صحیح هدایت هوا به رادیاتور اطمینان حاصل شود. برای راحتی کار می‌توان جهت چرخش فن‌ها را دقیقاً پس از استارت و یا پس از فرمان خاموش شدن که فن‌ها دارای سرعت کم تری می‌باشند مشاهده کرد.

احتیاط: هنگام بررسی حرکت فن بایستی ایمنی کامل از جهت برخورد با پره فن‌ها رعایت شود.

۵-۶-۳-۳ بازرسی چشمی فن‌های خنک کن

فن خنک کن جهت افزایش میزان انتقال حرارت ناشی از تلفات ترانسفورماتورها به محیط طراحی و به کار گرفته می‌شوند. با فرض این که طراحی فن‌های به صورت صحیح صورت گرفته است ولی بایستی سرعت آن‌ها، عدم بسته بودن مسیر هوای

عبوری، محافظ‌ها و پره‌ها بازرسی کردند. بررسی سرعت فن‌ها را می‌توان با دیگر فن‌ها انجام داد. البته تا کومتر نیز قابل استفاده بوده ولی معمولاً به ندرت استفاده می‌شود.

تحلیل: جریان ناکافی هوا باعث کاهش کارایی سیستم خنک کننده شده و سبب افزایش دماهای ترانسفورماتور و به دنبال آن آسیب به آن می‌گردد. کلیه فن‌هایی که دارای سرعت طراحی شده نمی‌باشند بایستی جایگزین گردند کلیه محدودیت‌های مسیر هوا به درون رادیاتورهای بایستی مرتفع گردند پره‌های فن‌ها و نیز محافظ‌های فن‌ها در صورت معیوب بودن اصلاح و یا تعویض گردند.

۵-۶-۴ مبدل‌ها (heat exchangers) در سیستم خنک کننده ترانسفورماتور
اصولاً دو نوع از مبدل‌های حرارتی جهت خارج حرارت ایجاد شده از ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الف) خنک کننده با آب

این نوع از مبدل حرارتی شامل یک مجموعه از لوله‌های نصب شده در درون یک مخزن می‌باشند که در روغن عایق ترانسفورماتور غوطه‌ور می‌باشد. آب خنک در این لوله پمپ شده در حرارت موجود در روغن عایق توسط این آب خنک جذب گردیده و سپس از محیط خارج می‌گردد.

ب) خنک کننده روغن-آب

این سیستم در بعضی از ترانسفورماتورهای قدیمی نیروگاه‌ها به کار گرفته می‌شود. **ج) خنک کننده با حرکت هوای اجباری و حرکت روغن اجباری (forced-air, forced-oil cooler)**

این نوع از مبدل‌ها در ابتدا در نیروگاه‌ها و ترانسفورماتورهای با ولتاژ بسیار بالا و بزرگ به کار گرفته می‌شدند. سمت ورودی و خروجی لوله‌ها در یک طرف مبدل بوده و در طرف دیگر مبدل، فن نصب می‌شود. در این مبدل‌ها از لوله‌های کوچک و معمولاً عمودی که توسط فن‌های نازک در بر گرفته شده‌اند استفاده می‌شوند. به علت نزدیکی فن‌ها به یک دیگر این نوع از مبدل راندمان بسیار بالایی دارد اما احتمال مسدود شدن این لوله‌ها به وسیله رسوبات و یا مواد دیگر زیاد می‌باشد. کاهش میزان جریان هوای

خنک کننده نیز تأثیر قابل توجهی بر روی کارایی مبدل دارد. مابقی ترانسفورماتورها همگی به رادیاتور مجهز می‌باشند. این نوع سیستم خنک کننده از چندین لوله دراز، پهن و تخت تو خالی که بین دو لوله که هدر نامیده می‌شوند تشکیل گردیده است. به صورت طبیعی روغن عایق گرم به هدر فوقانی جریان پیدا کرده و پس از سرد شدن در طی حرکت در رادیاتور به هدر پایین منتقل و وارد تانک اصلی ترانسفورماتور می‌گردد.

برای بازرسی و نگهداری سیستم خنک کننده بایستی دقیقاً نوع و مشخصات آن با استفاده از راهنماهای موجود و راهنمای سازنده شناسایی شده و با این اطلاعات روش مناسب در نظر گرفته شود.

سیستم خنک کننده با آب

در این سیستم مقدار جریان آب بایستی بررسی شود تا از کارایی کامل سیستم خنک کننده اطمینان حاصل شود. مقدار ناکافی جریان آب و یا مقدار زیاده از حد جریان آب باعث کاهش کارایی این نوع از سیستم خنک کننده می‌شود. در این سیستم بایستی نمونه‌گیری در فواصل زمانی کوتاه‌تر نسبت به سیستم‌های دیگر صورت گیرد (هفتگی) چرا که در صورت وجود نشت آب به روغن در حداقل زمان ممکن بایستی این نشت مرتفع گردیده و آب نشت کرده به روغن از روغن جدا شود.

تحلیل: در این سیستم تنظیم کننده فشار و یا عملکرد پمپ آب (یا هر دو) بایستی تنظیم گردیده تا میزان مطلوب جریان آب برای ایجاد ماکزیم راندمان مبدل فراهم گردد. در صورت مشاهده هر مقدار آب در نمونه روغن بایستی سریعاً ترانسفورماتور از سرویس خارج شده تا این که نشتی آب مرتفع شده روغن آغشته به آب تصفیه گردد.



سیستم خنک کننده هوا

در این سیستم بایستی بازرسی چشمی در سرتاسر سیستم خنک کننده صورت گیرد. برای بازرسی از لحاظ گیر کردن مواد خارجی با استفاده از یک منبع نور که از طرف مقابل به درون مبدل تابانیده می‌شود. می‌توان این بازرسی را انجام داد. هم چنین سطوح فن‌ها بایستی از نظر چسبیدن مواد آلوده کننده به آن‌ها بازرسی گردد.

چرا که چسبیدن مواد آلوده کننده به این سطوح باعث کاهش انتقال حرارت می‌گردد. برای بررسی وضعیت مکش هوا از درون مبدل و توسط فن بایستی از یک کاغذ با وزن استاندارد استفاده کرد. این کاغذ بایستی توسط نیروی هوای مکش شده در قسمت مکش هوا به مبدل جذب گردد.

برای اندازه گیری دقیق تر میزان جریان هوا می توان از یک آنومتر و اندازه‌گیری جریان هوا در نقاط مختلف خنک کننده و مقایسهٔ مقادیر به دست آمده با یک نمونه همانند استفاده کرد.

رادیاتورها

در این سیستم معمولاً در مقدار جریان هوا به علت فاصله زیاد بین لوله‌ها اشکالی ایجاد نمی‌شود.

تحلیل: بایستی دقت لازم جهت برطرف کردن هرگونه گیرکردگی بین فن‌ها لوله‌های سیستم‌های خنک شونده با هوا و یا رادیاتورها صورت گیرد. علاوه بر این بایستی هر گونه آلودگی چسبیده به سطوح فن‌ها، لوله‌ها و رادیاتورها جهت جلوگیری از کاهش میزان انتقال حرارت و یا کاهش راندمان برطرف گردد.

احتیاط: هنگام کارکردن در مجاورت و یا نزدیکی فن‌ها بایستی احتیاط کامل جهت ایمنی در مقابل برخورد با پره‌های فن‌ها به عمل آید.

۵-۶-۵ پمپ‌های سیستم خنک کننده

ترانسفورماتورهای بزرگ معمولاً جهت افزایش راندمان سیستم خنک کن به پمپ‌های روغن مجهز می‌گردند. این پمپ‌ها توسط موتورهای تک فاز و یا سه فاز با ولتاژ ۲۳۰ الی ۴۸۰ ولت به حرکت در می‌آیند. موتورهای و ظرفیت پمپ‌ها بسته به مشخصات ترانسفورماتور و طراحی متفاوت می‌باشند. اکثریت پمپ‌ها دارای بیرینگ تراست از نوع اسلیو (Sleeve Bearing) یا نوع توپی یا غلطی می‌باشند. روغن ترانسفورماتورها از درون موتور پمپ و سیم پیچ‌های آن گذشته و باعث خنک‌کنندگی موتور نیز گردند.

۵-۶-۱ بیرینگ های پمپ های خنک کننده

ضعف بیرینگ ها در پمپ باعث ایجاد اشکال در پمپ می گردد. در اکثر تجهیزات تنها راه بازرسی ضعف بیرینگ های پمپ ها، باز کردن پمپ و بازدید چشمی بیرینگ ها می باشد. لرزش ها و یا سروصدای غیرطبیعی پمپ در حین کار بیان گر نیاز به بازرسی پمپ می باشد. اما این روش در تجهیزات حساس مطلوب نمی باشد. یکی از روش های که برای بازرسی ضعف بیرینگ ها در سیستم های خنک کننده جدید در نظر گرفته شده استفاده از تکنیک فیبرنوری می باشد. در این تکنیک دیگر نیازی به باز کردن پمپ برای بازرسی وضعیت بیرینگ ها آن نمی باشد.

پس از باز کردن پمپ از سیستم میزان لقی انتهای شافت بایستی اندازه گیری شود. هم چنین پره و مکان جاگیری پره از لحاظ سالم بودن و عدم وجود ایراد در آن بایستی بررسی گردد.

تحلیل: در صورت وجود ضعف زیاد در بیرینگ ها که توسط میزان لقی انتهای شافت مشخص می گردد بایستی از دستورالعمل راهنمای سازنده جهت ارزیابی دقیق و اقدامات لازم استفاده کرد. هرگونه ضعف در پروانه یا مکان قرارگیری پروانه پمپ بیان گر ضعف بیش از حد بیرینگ تراست پمپ می باشد.

احتیاط ها: برای باز کردن پمپ سیستم خنک کننده روغن ترانسفورماتور نیاز به اطلاعات کامل در رابطه با مدار گردش روغن در سیستم خنک کننده می باشد. جهت این امر بایستی ترانسفورماتور و پمپ بی برق شوند روغن سیستم خنک کننده مدار روغن ورودی به پمپ بایستی مسدود گردیده و روغن باقی مانده در پمپ موردنظر بایستی پیش از باز کردن پمپ تخلیه گردد. توصیه می شود که در پوش های مناسبی جهت در لوله هایی که پمپ از آن جدا گردیده در نظر گرفته شود. پمپ ها به هیچ وجه نبایستی بدون غوطه وری کامل در روغن عایق راه اندازی شوند.

۵-۶-۲ اشکالات الکتریکی در پمپ های سیستم خنک کننده

از آن جایی که روغن موجود در تانک اصلی ترانسفورماتور در داخل موتورهای پمپ های سیستم خنک کننده نیز جاری می شود لذا اشکال الکتریکی در موتور پمپ ها باعث متصاعد شدن گاز از روغن گردیده و هنگام گاز کار موتوگرافی روغن ترانسفورماتور این موضوع آشکار می شود که البته دلیل متصاعد شدن گاز در این آزمایش آشکار نمی باشند.

به صورت دوره‌ای و یا پس از مشخص شدن میزان غیرنرمال گازهای قابل اشتعال در روغن ترانسفورماتورها، جریان الکتریکی در یک از فازهای موتورهای پمپ‌های در حال کار بایستی به دقت اندازه‌گیری شوند.

تحلیل: نامتعادلی زیاد جریان در فازهای مختلف در صورتی که بیش از ۱۵ الی ۲۰ درصد باشد نشان‌گر وجود اشکال در موتور الکتریکی پمپ می‌باشد. جریان موتورهای مختلف نیز بایستی با یک دیگر مقایسه شوند. اختلاف زیاد جریان در موتورهای مختلف نمایش‌گر وجود مانع و مسدود بودن مسیر پمپ می‌باشد که بایستی مرتفع گردد.

۵-۶-۳ چرخش پمپ‌های سیستم خنک‌کن روغن

این عیب‌ها در بیشتر تجهیزات از نوع سانتریفوژ بوده و پمپ کردن این پمپ‌ها بسته به جهت چرخش آن‌ها نمی‌باشد این پمپ‌ها بایستی به صورت دستی روشن و خاموش شوند و عملکرد هر یک با استفاده از گیج‌های جریان روغن در زمان روشن بودن پمپ مشاهده شود. میزان جریان روغن بایستی پیش از روشن شدن پمپ به عنوان یک مرجع در نظر قرار گیرد.

تحلیل: پمپ‌هایی که در جهت عکس طراحی، چرخیده شوند جریان سیال ایجاد شده توسط آن‌ها کم‌تر از جریان سیال در حالت نرمال چرخش پمپ می‌باشد. در صورتی که گیج جریان سیال مقدار کم‌تر از نرمال را نشان دهد و موتور پمپ سه فاز باشد نشان دهنده عکس بودن جهت چرخش پمپ می‌باشد و لذا با جابجا کردن جای دو فاز می‌توان جهت چرخش پمپ را به حالت اصلی تبدیل نمود. در حالت اصلی چرخش، میزان جریان سیال پمپ شده به مراتب بیش از حالت عکس جهت چرخش می‌باشد.

۵-۶-۶ رلهٔ ردیاب گاز در روغن ترانسفورماتور

معمولاً تنها ترانسفورماتورهایی که دارای کنسرواتور می‌باشند به رلهٔ ردیاب گاز در روغن مجهز می‌شوند. رلهٔ ردیاب گاز، وجود گازهای آزاد متصاعد شده از روغن را ردیابی می‌کند. هنگامی که گاز از روغن متصاعد شده و به صورت آزاد رها می‌شود به معنی این است که روغن ترانسفورماتور به حالت اشباع از گازهای محلول در آمده است. نشت هوا به درون ترانسفورماتور که معمولاً در شرایط آب و هوایی بسیار سرد اتفاق

می افتد نیز توسط رلهٔ ردياب گاز قابل ثبت می باشد.

گازهای متصاعد شده و انباشته شده در تانک ترانسفورماتور هنگامی گيج فشار عدد بالای صفر را نمایش دهد بایستی بر اساس دستورالعمل سازنده آنالیز گردد. هم چنین گازهای محلول در روغن نیز بایستی تحت آنالیز و بررسی قرار گیرد تا در صورت نیاز اقدام به تعمیرات پیش گیرانه و یا اصلاحی نمود.

اخیراً تجهیزاتی برای ترانسفورماتورها ساخته و نصب شده که به صورت محدود گازهای موجود در روغن را به صورت on line آنالیز می کند.

هدف از این تجهیزات ایجاد یک علامت هشدار برای هنگامی که گازهای تولید شده و محلول در روغن بیش از حد شود می باشد. زمانی که این هشدار ایجاد گردید بایستی آزمایشات کامل گاز محلول در روغن صورت گیرد.

۵-۶-۷ رلهٔ افزایش فشار گاز

رله های افزایش فشار گاز ناگهانی در درون تانک دو نوع می باشند. معمول ترین آن در زیر روغن نصب می شود. نوع دیگر آن در فضای گاز نصب می گردد. آرک (جرقه) داخلی در تجهیزات قدرت که با روغن پر شده اند باعث ایجاد فشار گاز بسیار زیاد می گردد به گونه ای که می تواند صدمات شدیدی برای تجهیز و یا افراد و ایجاد کند رلهٔ فشار گاز ناگهانی با فعال نمودن سریع سیستم حفاظت مانع از ایجاد صدمات شدید به تجهیزات و یا افراد می گردد برای تنظیم، تعمیر و یا جایگزینی این سیستم بایستی توصیه های سازنده ترانسفورماتور کاملاً رعایت شود.

۵-۶-۸ گيج جریان روغن

کلیهٔ پمپ های خنک کننده تجهیزات قدرت، بایستی به گيج جریان روغن مجهز شدند. هدف از استفاده از این وسیله این است که مشخص شود آیا جریان روغن به داخل پمپ وجود دارد و یا خیر این گيج برای نمایش سرعت و یا شرایط پمپ مورد استفاده نمی باشد. پس از اطمینان از روشن بودن پمپ های سیستم خنک کن، گيج جریان روغن بایستی از لحاظ نشان دادن جریان روغن مشاهده شود. سپس پمپ بایستی موقتاً خاموش شده و گيج باید عدم عبور جریان روغن را نمایش دهد.

تحلیل: در صورتی که پمپ روشن باشد ولی جریان روغن توسط گيج نشان داده

نشود امکان اشکال در سیستم فرستنده سیگنال برای گیج وجود دارد. در صورتی که پمپ خاموش شود ولی گیج جریان، وجود جریان روغن را نمایش دهد امکان گیر بودن گیج در قسمت نشان داده شده و یا اشکال در واحد فرستنده سیگنال جریان وجود دارد. لذا واحد فرستنده و یا گیج بایستی تعویض گردند. در هنگامی که پمپ خاموش می‌شود در یک فاصله کوتاه گیج مقداری جریان را نمایش خواهد داد. که این امر طبیعی و ناشی از زمان حرکت سیال می‌باشد.

احتیاط: فقدان جریان روغن در پمپ‌های روغن در طی سرویس دهی بیان‌گر ایراد در خود پمپ روغن می‌باشد و بایستی سریعاً رفع اشکال گردد.

۵-۶-۹ بازرسی چشمی گیج‌های سطح روغن

اطلاع از سطح روغن موجود در تانک ترانسفورماتور از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. اکثر تانک‌های ترانسفورماتورها به گیج نمایش دهنده سطح روغن که در ۲۵ درجه سانتی‌گراد نرمالیزه گردیده مجهز می‌باشند. متناسب با افزایش و یا کاهش دمای روغن ترانسفورماتور سطح روغن آن مطابق با آن افزایش و یا کاهش خواهد داشت. ممکن است در پلاک مشخصات ترانسفورماتور مقدار افزایش سطح روغن به ازاء هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و یا کاهش دمای روغن قید گردیده باشد. گیج‌های معمول از نوع شناور بوده و با یک دو آلارم مجهز می‌باشد. یکی از این کنتاکت‌های در زمان پایین بودن سطح روغن فعال (بسته و یا باز) شده و فعال شدن دیگری در صورت تعبیه شدن بیان‌گر بالا بودن سطح روغن تانک ترانسفورماتور می‌باشد.

این گیج‌ها هیچ‌گاه نبایستی کالیبره مجدد گردند و در صورت عدم کالیبره بودن بایستی تعویض کامل صورت گیرد.

احتیاط‌ها: مناسب بودن سطح روغن در کلیه شرایط کارکرد و دماهای ترانسفورماتور لازم و ضروری می‌باشد. عدم تنظیم سطح روغن باعث کاهش کارایی سیستم خنک کننده شده و پیامد آن آسیب شدید به ترانسفورماتور خواهد بود.

۵-۶-۱۰ کالیبره کردن چشمی گیج های فشار

فشار داخلی ترانسفورماتور قدرت ناشی از دمای روغن و گازهای متصاعد شده از آن می باشد. این فشار توسط گیج های فشار اندازه گیری می شوند. گیج های فشار ترانسفورماتور بایستی به صورت دوره ای و بر اساس منابع و استانداردها کالیبره گردند، در تپ چنجر تحت بار (LTC) و یا تنظیم کننده های ولتاژ، تانک روغن بایستی دارای یک فشار مثبت نسبت به تانک ترانسفورماتورها باشند.

در صورتی که تپ چنجر (LTC) از نوع خلأ باشد. هیچ گونه فشار مثبتی نبایستی در آن ایجاد گردد. در مخزن تپ چنجر تحت بار، مخزن روغن کاملاً آب بندی شده و با هر تعویض تپ مقداری گاز از روغن متصاعد شده و افزایش فشار را در داخل مخزن در پی خواهد داشت. این سیستم به یک شیر رها کننده فشار مجهز بوده که در فشار psi3 باز شده و در فشار psi1 مجدداً بسته می شود. این شرایط باعث جلوگیری از نفوذ رطوبت به داخل مجموعه تپ چنجر می گردد.

احتیاط: فشار زیاد در این سیستم بیانگر شرایط نامناسب و وجود فالت در تپ چنجر بوده و بایستی فوراً بازرسی و رفع عیب گردد.

۵-۶-۱۱ گیج های دما

گیج های دمای روغن و دمای منطقه داغ برای کارکرد مناسب ترانسفورماتور حایز اهمیت می باشند. این گیج ها نه تنها دما را نمایش می دهند بلکه باعث فعال شدن فن ها و سیستم خنک کن توسط میکروسوییچها که قابل تنظیم برای دماهای مختلف می باشند می گردند. این گیج ها بایستی به صورت دوره ای و در آزمایشگاه کالیبره گردند.

الف) کالیبراسیون گیج دمای سطح فوقانی روغن

این گیج بایستی از موقعیت خود در ترانسفورماتور جدا شده و توسط یک مرجع کالیبره و یک حمام روغن داغ با دمای قابل کنترل کالیبره گردد. کالیبراسیون بایستی در چندین دما صورت گیرد.



ب) کالیبراسیون گنج دمای نقطه داغ سیم پیچ‌ها

این گنج بر پایه جریان ترانسفورماتور و دمای سطح فوقانی روغن ترانسفورماتور دمای منطقه داغ سیم پیچ‌ها شبیه سازی و نمایش می‌دهد. با استفاده از دستورالعمل راهنمای سازنده دستگاه بایستی این شرایط در محیط آزمایشگاه برای این سیستم مشابه سازی شده و کالیبره گردد.

ضمیمه الف:

اندازه گیری ضریب قدرت

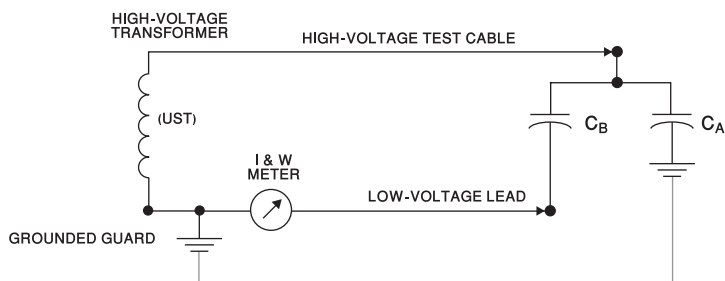
الف-۱ کلیات

دستگاه‌های آزمایش ضریب قدرت که به صورت تجاری- صنعتی در بازار موجود می‌باشند به گونه‌ای طراحی گردیده‌اند که با استفاده از آن‌ها می‌توان به راحتی سیستم‌های عایقی پیچیده را در حالت‌های مختلف آزمایش کرد. حالت‌هایی که در این دستگاه‌ها تعریف شده‌اند عبارت‌اند از: آزمایش تجهیزات زمین نشده (UST)، تجهیزات زمین شده (GST) و تجهیزات زمین شده همراه با گارد می‌باشند. این موضوع آزمایش قسمت‌های مختلف یک سیستم عایقی پیچیده را امکان پذیر می‌سازد.

الف-۲ آزمایش تجهیزات زمین نشده (UST)

حالت UST برای اندازه‌گیری و ارزیابی سیستم عایقی بین دو ترمینالی می‌باشد که زمین نشده‌اند و یا امکان جدا شدن از زمین را دارند. در حالت UST جریان جاری شده در سیستم عایقی بین ترمینال‌های تحت ولتاژ تجهیز تحت تست اندازه گیری شده و جریان جاری شده به زمین اندازه‌گیری نمی‌شود این حالت در شکل الف-۱- الف نمایش داده شده است.

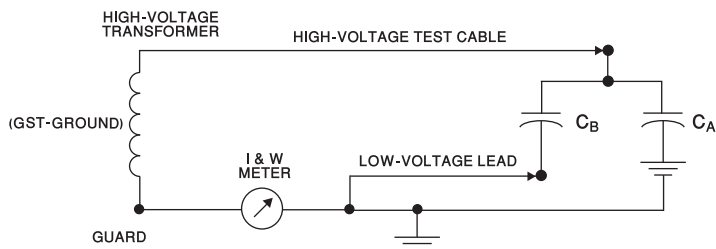




الف: آزمایش یک پوشینگ کندانسوری دارای تپ در حالت UST (روش آزمایش تجهیز بدون اتصال به زمین) که تنها C_B آزمایش می‌شود.

الف-۳ آزمایش تجهیزات زمین شده GST

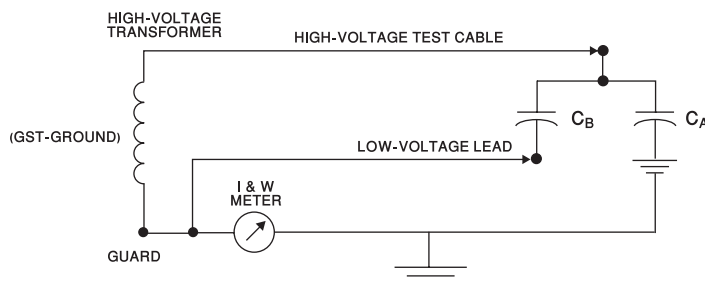
آزمایش در حالت GST، آزمایش سیستم عایقی بین یک ترمینال زمین شده و یک ترمینال زمین نشده در یک تجهیز الکتریکی می‌باشد. در حالت GST کل جریان جاری شده به زمین اندازه‌گیری می‌گردد. این حالت در شکل الف-۱-ب نمایش داده شده است.



ب: آزمایش پوشینگ کندانسوری دارای تپ در حالت GST

الف-۴ آزمایش تجهیزات زمین شده همراه با گارد

حالت GST - گارد این امکان را فراهم می‌کند تا جریان‌های ناخواسته از مسیر اندازه‌گیری خارج شوند و امکان آزمایش بخشی کوچکی از سیستم عایقی را به صورت مجزا فراهم می‌کند. در این روش تنها جریان وارد شده به زمین اندازه‌گیری می‌شود این حالت اندازه‌گیری در شکل الف.۱.ج نمایش داده شده است.



ج: آزمایش بوشینگ کندانسوری دارای تپ در حالت اتصال به گارد در این حالت تنها خازن C_A آزمایش می‌شود.

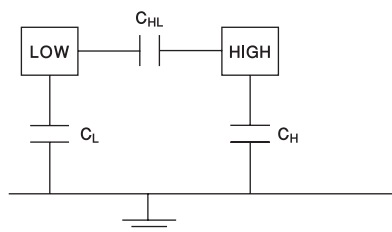
الف-۵ سیستم های عایقی ساده و پیچیده

الف-۵-۱ سیستم های عایقی ساده

یک سیستم عایقی ساده شامل دو ترمینال که توسط عایق جدا گردیده اند می‌باشد. این سیستم شبیه یک خازن می‌باشد یک مثال برای یک سیستم عایقی ساده بوشینگی می‌باشد که از یک هادی که از وسط آن گذشته و یک فلنچ که محل اتصال آن به بدنه تجهیز می‌باشد تشکیل شده است. فلنچ و هادی، دو الکتروود این سیستم عایقی ساده می‌باشد.

الف-۵-۲ سیستم عایقی پیچیده

یک سیستم عایقی پیچیده شامل سه یا بیشتر ترمینال بوده که توسط عایق از یک دیگر جدا گردیده‌اند. یک سیستم عایقی با سه ترمینال را می‌توان به صورت یک شبکه سه خازنی و یک سیستم عایقی چهار ترمینال را می‌توان به صورت شبکه ۶ خازنی بیان کرد (مراجعه شود به شکل الف . ۲) ترانسفورماتورهای دو سیم پیچ و بریکرهای فشارقوی به صورت یک سیستم عایقی پیچیده می‌باشند.



ترانسفورماتور دو سیم پیچه

تانک و هسته

خازن تحت اندازه-گیری	UST	ناحیه متصل به گارد	ناحیه زمین شده	ناحیه تحت ولتاژ	حالت آزمایش
CH	-	قسمت فشار ضعیف	-	سیم پیچ فشار قوی	GST
CL	-	قسمت فشار قوی	-	قسمت پیچ فشار ضعیف	GST
آزمایش بعدی جهت CHL					
CHL	قسمت فشار ضعیف	-	-	سیم پیچ فشار قوی	UST
CHL	قسمت فشار قوی	-	-	سیم پیچ فشار ضعیف	UST

ترانسفورماتور سه سیم پیچه

خازن تحت اندازه-گیری	UST	گارد	زمین	ناحیه تحت ولتاژ	حالت آزمایش
CH	-	سیم پیچ فشار ضعیف / سیم پیچ ثالثیه	-	سیم پیچ فشار قوی	GST

GST	سیم پیچ فشار ضعیف	-	سیم پیچ ثالثیه / سیم پیچ فشار قوی	-	CL
GST	سیم پیچ ثانیه	-	سیم پیچ فشار قوی / سیم پیچ فشار ضعیف	-	CT

آزمایش سیستم عایقی بین سیم پیچ ها

UST	سیم پیچ فشار قوی	سیم پیچ ثالثیه	-	سیم پیچ فشار ضعیف	CHL
UST	سیم پیچ فشار ضعیف	سیم پیچ فشار قوی	-	سیم پیچ ثالثیه	CLT
UST	سیم پیچ ثانیه	سیم پیچ فشار ضعیف	-	سیم پیچ فشار قوی	CHT

ضمیمه ب

بوشینگ ها

بوشینگ ها به طور کلی دو دسته های زیر طبقه بندی می گردد:

ب-۱ نوع کندانسوری

ب-۱-۱ عایق این بوشینگ کاغذ اشباع شده از روغن بوده که لایه هایی از جنس هادی در بین این سیستم عایقی قرار داده شده است.

ب-۱-۲ عایق این نوع بوشینگ از نوع کاغذ مستحکم شده با رزین بوده که لایه هایی از جنس هادی در بین این سیستم عایقی قرار داده شده است.

ب-۲ نوع غیرکندانسوری

ب-۲-۱ هسته بوشینگ از جنس یک پارچه جامد و لایه های بعدی تشکیل شده از دو بخش عایق و مایع می باشد.

ب-۲-۲ بوشینگ از جنس همگن و یک پارچه جامد و عایق و می باشد (به عنوان مثال در حین جامد)

ب-۲-۳ پوشینگ پر شده توسط گاز

برای پوشینگ‌هایی که در محیط‌هایی سرباز مورد استفاده قرار می‌گیرد. عایق اولیه در یک محیط غیرقابل نفوذ هوا قرار می‌گیرد که معمولاً از جنس چینی می‌باشد. ناحیه بین عایق اولیه و ناحیه غیرقابل نفوذ و هوا معمولاً توسط روغن عایق یا دیگر ترکیبات مانند پلاستیک و یا فوم پر می‌شود. پوشینگ‌ها هم چنین ممکن است از گازهایی چون SF6 به عنوان عایق واسط بین هادی مرکزی و سطح خارجی غیرقابل نفوذ هوا پر شوند.

طبقه بندی پوشینگ‌ها هم چنین ممکن است بر اساس مجهز بودن و یا نبودن به تپ پتانسیل (تپ آزمایش ضریب قدرت) صورت گیرد.

توجه: تپ پتانسیل را تپ خازن یا تپ ولتاژ نیز گویند

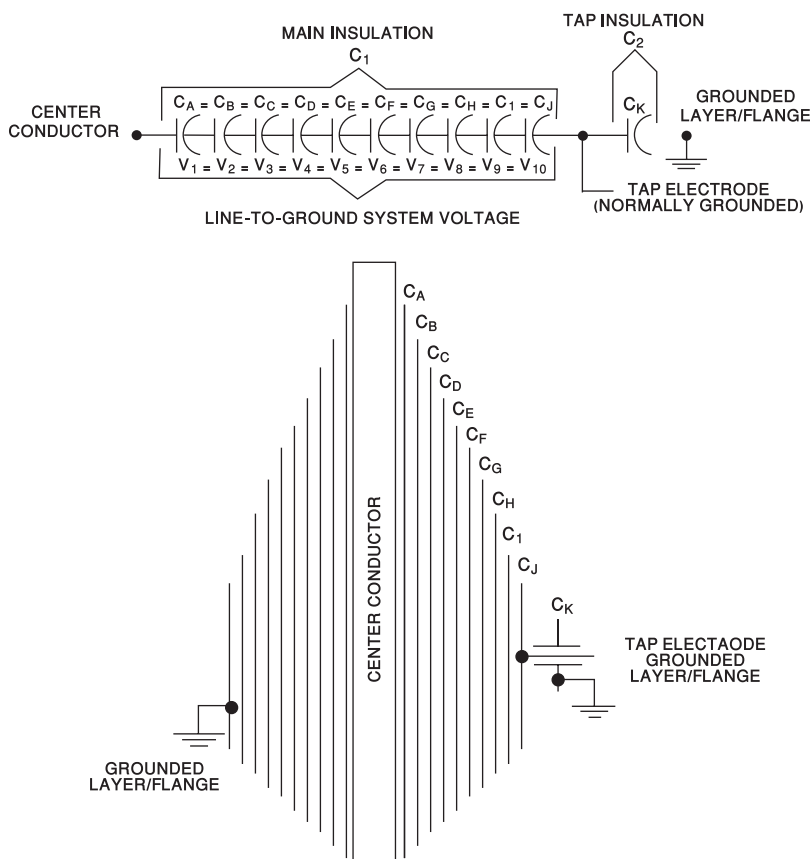
پوشینگ‌های فاقد تپ پتانسیل یا تپ ضریب قدرت، تجهیزاتی دو ترمیناله بوده که آزمایش (هادی مرکزی به فلنچ) به روش GST صورت می‌گیرد. در صورتی که این پوشینگ ها بر روی ترانسفورماتور نصب شوند اندازه گیری به روش GST کلیه قسمت هایی را که تحت ولتاژ و زمین قرار می‌گیرند در بر می‌گیرد (مانند عایق سیم پیچ و روغن و هسته)

پوشینگ های کندانسوری از یک مجموعه خازن هم محور با محوریت هادی خروجی از درون ترانسفورماتور تشکیل گردیده است که سرهای انتهایی و ابتدایی این مجموعه خازن به ترتیب به فلنچ متصل به بدنه ترانسفورماتور و هادی مرکزی پوشینگ متصل می‌باشد. تپ پوشینگ هادی می‌باشد که به یکی از صفحات هادی هم محور درون پوشینگ متصل می‌باشد. این هادی کاملاً عایق بندی شده و از پوشینگ برای انجام آزمایش‌ها خارج می‌گردد. در این حالت پوشینگ دارای سه ترمینال می‌باشد. تپ خارج شده از پوشینگ دارای بخشی از ولتاژ موجود بین هادی پوشینگ و زمین می‌باشد (حالت مقسم ولتاژ) در ترانسفورماتورهای با ولتاژ بالاتر از این تپ گاهی برای رله‌ها و یا مقاصد دیگر استفاده می‌شود. در این سیستم تپ پتانسیل هم چنین می‌تواند جهت ترمینال آزمایش ضریب قدرت عایق اصلی پوشینگ C1 به کار گرفته شود (مراجعه شود به شکل ۱.B)

معمولاً پوشینگ‌های مدرن با ولتاژ بیش از ۶۹ کیلو ولت دارای تپ پتانسیل می‌باشند.

(به ندرت دیده می شود که بوشینگ های با ولتاژ نامی ۶۹ کیلو ولت نیز به تپ پتانسیل مجهز باشند). در طراحی تپ ضریب قدرت نزدیک ترین لایه هادی در عایق درونی بوشینگ توسط یک هادی نوار پیچی شده به یک بوشینگ کوچک متصل شده و بر روی فلنچ اصلی بوشینگ نصب می شود. این انشعاب خارج شده از بوشینگ اصلی توسط یک سر پوش پیچی به فلنچ اصلی متصل به زمین ارتباط داده می شود. هنگامی که این سر پوش برداشته شود از تپ به صورت یک ترمینال با ولتاژ کم برای اندازه گیری وضعیت عایقی بوشینگ اصلی (C1) به روش UST استفاده می شود. (یعنی مقاومت عایقی بین هادی اصلی درون بوشینگ و نزدیک ترین هادی در بوشینگ به فلنچ متصل به بدنه ترانسفورماتور)





شکل ۱.۸- ساختار یک نمونه بوشینگ نوع کندانسوری

توجه:

- ۱- خازن های هم ظرفیت C_A تا C_J باعث ایجاد توزیع ولتاژ یک نواخت از هادی مرکزی تحت ولتاژ تا فلنچ، در عایق بوشینگ می گردد.
- ۲- تپ خارج شده از بوشینگ معمولاً زمین می گردد مگر در حالاتی که طراحی آن برای مقاصد خاص و یا تغذیه الکتریکی بعضی از سیستم های حفاظتی باشد.
- برای بوشینگ های دارای تپ ولتاژ، ظرفیت C_2 خیلی بزرگ تر از ظرفیت C_1 می باشد.
- برای بوشینگ های دارای تپ ضریب قدرت ظرفیت های C_1 و C_2 تقریباً یک سان می باشد.

ضمیمه ج

اندازه گیری دما با استفاده از اشعه مادون قرمز (IR)

ج-۱ کلیات

با استفاده از اشعه مادون قرمز می توان به صورت غیر تماسی و به صورت مطلوبی دماهای غیر طبیعی را در تجهیزات الکتریکی ردیابی کرد. استفاده از تشعشعات مادون قرمز برای اندازه گیری دما بر این اساس می باشد که با افزایش دما میزان تشعشعات مادون قرمز افزایش می یابد. بنابراین سیستم ردیاب مادون قرمز حرارت را در طیف مادون قرمز مشاهده می کند. این طیف همانند رنگ های قابل رویت توسط انسان برای دستگاه ردیاب قابل مشاهده می باشد.

ج-۲ اندازه گیری با استفاده از اشعه مادون قرمز

تجهیزات اندازه گیری دما با استفاده از اشعه مادون قرمز، حرارت غیر طبیعی که ناشی از فالت در درون تجهیزات می باشد را ردیابی می کند. دماهای غیر طبیعی در تجهیزات قدرت در اثر افزایش مقاومت الکتریکی به سبب وجود ضعف در اتصالات، پیری و فرسودگی سیستم و ناتنظیمی تجهیزات مکانیکی ایجاد میگردد. تشعشع انرژی مادون قرمز با افزایش دما، افزایش خواهد داشت. دستگاه های اندازه گیری اشعه مادون قرمز، انرژی تشعشع شده ناشی از اشعه مادون قرمز در ناحیه مد نظر را جمع آوری کرده و به صورت کیفی و یا کمی نمایش می دهند.

در این ضمیمه پارامترهایی که بایستی در فرآیند اندازه گیری مادون قرمز به عنوان برنامه تعمیر و نگهداری تجهیزات الکتریکی درک شود بیان می گردد.

هر شیئی از خود انرژی تشعشع می کند. مقدار انرژی تشعشع شده از هر شی بستگی به دمای آن و ظرفیت تشعشع و سطح آن دارد. ظرفیت تشعشع پارامتری است که بیانگر میزان قابلیت خروج تشعشعات از یک سطح می باشد. این مقدار بین ۰/۰ تا ۱/۰ تغییر می کند که عدد یک مربوط به تشعشع کامل سطح شی بوده و عدد ۰/۰ مربوط به اشیایی است که منعکس کننده کامل می باشند. ظرفیت تشعشع مساوی با یک منهای ظرفیت انعکاس آن شی می باشد.

به عنوان مثال در صورتی که یک شی دارای ظرفیت تشعشع ۰/۹ باشد. ۹۰٪ انرژی

مادون قرمز موجود در آن کاملاً تشعشع گردیده و ۱۰٪ از انرژی مادون قرمز نواحی دیگر توسط آن منعکس می‌گردد.

سیستم اندازه‌گیری مادون قرمز توانایی تشخیص بین انرژی تشعشع شده توسط یک شی و انرژی منعکس شده توسط سطح آن را ندارد در حالی که برای فرآیند بازرسی و تعمیرات و نگهداری موضوع انرژی تشعشع شده توسط شی حایز اهمیت می‌باشد، نه انرژی منعکس شده توسط آن چرا که تنها میزان انرژی تشعشع شده بیان گر دمای شی یا ناحیه مد نظر می‌باشد. در بعضی از سیستم های اندازه گیری امکان افزایش دقت برای اندازه گیری تنها انرژی تشعشع شده (نه انرژی منعکس شده) وجود دارد. در این دستگاه‌ها اپراتور با وارد کردن مقدار تخمینی ضریب تشعشع شی، مقدار انرژی منعکس شده محاسبه شده و با توجه به آن مقدار انرژی تشعشع شده از جسم یا ناحیه مد نظر تعیین می‌گردد. باید دانست که میزان انرژی منعکس شده ناشی از منابع انرژی دیگر به صورت مستقیم باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری انرژی تابش شده توسط شی مد نظر می‌گردد. در بعضی از دستگاه‌های اندازه‌گیری امکان وارد کردن دمای اشیاء مجاور شی مد نظر امکان پذیر می‌باشد و در بعضی دیگر از دستگاه‌ها دمای محیط به عنوان دمای اشیاء مجاور در نظر گرفته می‌شود. بهترین روش تعیین مقدار ضریب تشعشع در اشیاء مد نظر روش تجربی می‌باشد که با استفاده از جمع‌آوری اطلاعات و نتایج آزمایش‌ها می‌توان به آن دست یافت. در بعضی از موارد ضریب تشعشع توسط سازندگان دستگاه‌ها در اختیار قرار می‌گیرد. به صورت یک قاعده کلی می‌توان گفت که اکثریت اشیاء رنگ شده، کثیف و خورده شده دارای ضریب تشعشع بالا می‌باشند (۰/۷-۰/۹). خوردگی شدید سطوح علی‌رغم این که دارای ضریب تشعشع بالا می‌باشند ولی می‌توانند باعث تشکیل یک لایه عایق گردیده و نقاط داغ را پنهان نمایند. برای اشیاء رنگ شده با پوشش براق ضریب تشعشع IR نسبت به سطوح رنگ شده غیر براق بیشتر می‌باشد. اما به عنوان یک قاعده کلی رنگ باعث جلوگیری از تشعشع IR نمی‌گردد. فلزات براق معمولاً دارای ضریب تشعشع پایین می‌باشند.

شکل هندسی سیستم جاذب انرژی IR در دستگاه اندازه گیری از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد چرا که این شکل هندسی در جذب تشعشعات ناشی از منابع تشعشع و انعکاسات تشعشعات مؤثر می‌باشد. اما به هر صورت در اندازه گیری بایستی به منابع انرژی IR مجاور سیستم اندازه‌گیری توجه داشت و در محاسبات مد نظر قرار داد. در

هنگام اندازه‌گیری دما توسط IR و در محیط سر باز، بایستی انعکاسات تشعشعات مادون قرمز ناشی از نور خورشید از اندازه‌گیری حذف گردد. انرژی مادون قرمز ناشی از نور خورشید را نبایستی با افزایش دمای ناشی از تابش خورشید اشتباه کرد. برای حذف تأثیر انرژی IR منعکس شده از نور خورشید می‌توان سیستم اندازه‌گیری را به میزان ۹۰ درجه تغییر زاویه داد.

اندازه‌گیری انرژی IR در اشیا گرد و یا سیلندری سخت می‌باشد. وابسته به چگونگی سطح شی مد نظر، اندازه‌گیری دقیق دما تنها در یک جزء کوچک شی میسر می‌باشد. این اثر هنگامی که با استفاده از سیستم اندازه‌گیری تصویری انجام می‌شود کاملاً روشن می‌باشد. اما در سیستم اندازه‌گیری نقطه‌ای (SPOT) و یا اسکن خطی امکان تصور تأثیر هندسی شی در زمان اندازه‌گیری بسیار مشکل می‌باشد. در این روش یکی از روش‌های عملی ارزش مند برای اندازه‌گیری دما، اندازه‌گیری دما در موقعیت‌های مکانی مختلف می‌باشد این عمل باعث کاهش خطا در نتایج اندازه‌گیری می‌گردد.

ماکزیموم فاصله بین دستگاه‌های اندازه‌گیری IR و شی مورد آزمایش وابسته به فرم قرار گیری تجهیزات آزمایش و ابعاد و اندازه شی می‌باشد.

در سیستم اندازه‌گیری اسپات رادیومتر (SPOT RADIOMETER) ناحیه ای که تحت اندازه‌گیری قرار می‌گیرد نسبتاً بزرگ می‌باشد. برای اندازه‌گیری دقیق و جلوگیری از تأثیر دما اشیا مجاور بایستی توصیه‌های سازندگان تجهیزات آزمایش رعایت شود.

دستگاه‌های اندازه‌گیری IR به صورت تصویرگر (IMAGER) و اسکن خطی (LINE SCAN) نواحی نسبتاً کوچکی را در محدوده دید خود دارند. این نواحی نسبتاً کوچک همانند سیستم اسپات رادیو متر در این سیستم‌های دیده می‌شوند. اما تنها تفاوت آن‌ها کوچک بودن محدوده دید دستگاه‌ها می‌باشد. گرچه محدوده دید این دستگاه‌ها کوچک می‌باشد ولی در بعضی از این دستگاه‌ها امکان دیدن چندین ناحیه در یک زمان وجود دارد که از این موضوع نیز می‌توان به نحو مطلوب جهت افزایش دقت اندازه‌گیری بهره برداری نمود. به عنوان مثال گرچه یک شی نازک و یا کوچک هم چون هادی اتصال بوشینگ به سیم پیچ‌های ترانسفورماتور را می‌توان با استفاده از سیستم اندازه‌گیری تصویری مادون قرمز مشاهده کرد اما نمی‌توان بدون مشاهده تصویر با تعداد المان در سطح (پیکسل) کافی به طور دقیق به نتایج آزمایش اطمینان نمود. این موضوع همانند فاصله بین شی و دستگاه از اهمیت برخوردار می‌باشد.

جدول زیر بیانگر عملیات لازم در مقابل نتایج به دست آمده ناشی از آزمایش اندازه گیری با استفاده از اشعه مادون قرمز ترانسفورماتورهای قدرت می باشد.

عمل کرد لازم	افزایش دما نسبت به دمای محیط مجاور (درجه سانتی گراد)
تحت نظر قرار گرفتن ترانسفورماتور و اجرای برنامه تعمیرات و نگهداری دوره ای و احتمال کم آسیب فیزیکی	۰-۱۰
بازرسی فیزیکی و انجام تعمیر در آینده نزدیک	۱۱-۳۹
تعمیر در اسرع وقت، دمونتاز و بازرسی از جهت وجود ضعف در ترانسفورماتور	۴۰-۷۵
مشکل بحرانی و انجام تعمیر فوری	>۷۶

منابع:

1. ASTM D 117-2002, Guide to Test Methods and Specifications for Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin.1
2. ASTM D 877-2002, Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.
3. ASTM D 923-2001, Test Method for Sampling Electrical Insulating Liquids.
4. ASTM D 924-2003(b), Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids.
5. ASTM D 971-2002, Test Method for Interfacial Tension of Oil against Water by the Ring Method.
6. ASTM D 974-2002, Test Method for Neutralization Number by Color-Indicator Titration.
7. ASTM D 1298-2003 , Practice for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method.
8. ASTM D 1500-2001, Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale).
9. ASTM D 1524-2003, Method for Visual Examination of Used Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin in the Field.
10. ASTM D 1533-2005, Test Method for Water in Insulating Liquids (Karl Fischer Method).
11. ASTM D 1698-2003, Sediment and Soluble Sludge in Service-Aged Insulating Oils.
12. ASTM D 1816-97a, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes.
13. ASTM D 2285-2000 (Reapproved 2006), Test Method for Interfacial Tension of Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin against Water by the Drop-Weight Method.
14. ASTM D 3487-2000 (Reapproved 2006), Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
15. ASTM D 3612-2002, Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography.
16. ASTM D 3613-98, Test Methods of Sampling Electrical Insulating Oils for Gas Analysis and Determination of Water Content.
17. ASTM D 4059-2005, Test Method for Analysis of Polychlorinated Biphenyls in Insulating Liquids by Gas Chromatography.
18. ASTM F 855-97, Specification for Temporary Grounding Systems to be used on De-Energized Power Lines and Equipment.
19. IEEE Std 4-2000, IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.
20. IEEE Std 510-2000, IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing (ANSI).
21. IEEE Std 637-1999, IEEE Guide for the Reclamation of Insulating Oil and Criteria for Its Use (ANSI).

22. IEEE Std C57.12.00-2000, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers (ANSI).
23. IEEE Std C57.12.80-2002, IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers (ANSI).
24. IEEE Std C57.12.90-1999, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating
25. IEEE Std 62-2001 IEEE GUIDE FOR DIAGNOSTIC FIELD TESTING OF ELECTRIC POWER APPARATUS
26. IEEE Std C57.19.00-2002, IEEE General Requirements and Test Procedures for Outdoor Power Apparatus Bushings (ANSI).
27. IEEE Std C57.19.100-2002, IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings.
28. IEEE Std C57.104-2002, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers (ANSI).
29. IEEE Std C57.106-2002, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment (ANSI).
30. IEEE Std C57.113-2002, IEEE Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors.
31. Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers (ANSI).



National Iranian Oil Company
Human Resource Management

Power Transformers Tests and Maintenance Guide Based on IEEE Standard

by
Mehdi Ramezani

2010

