ارزیابی مقاومت عایقی ترانسفورماتورها

عاطفه زارعی/ شرکت مدیریت تولید برق منتظر قائم/ نیروگاه زواره

مقدمه

روش مرسوم پایش کیفیت عایق؛ اندازه گیری مقاومت عایقی می باشد. با اعمال ولتاژ به عایق تحت آزمون و اندازه گیری جریان حاصل و با استفاده از قانون اهم؛ مقاومت عایقی محاسبه می شود. با توجه به وابستگی میزان مقاومت عایقی به دما به منظور ارزیابی آن معمولا از شاخص پلاریزاسیون یا نرخ جذب دی الکتریک استفاده می شود. هرچند شاخص های فوق از دیرباز به عنوان یک معیار اساسی در بررسی وضعیت عایق مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما در بعضی از موارد نتایج عجیبی بدست می آید. به طور مثال ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ علی رغم داشتن مقاومت عایقی بالا (در حد چند گیگا اهم) شاخص پلاریزاسیون یا جذب پایینی دارد. آیا عایق ترانسفورماتور در این وضعیت تخریب شده است یا خیر؟

به منظور بررسی این موضوع ابتدا ماهیت شکست عایقی و نحوه ارزیابی مقاومت عایقی تشریح و سپس با مدلسازی عایق ترانسفورماتور؛ شاخص های فوق مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

علت های تخریب عایق

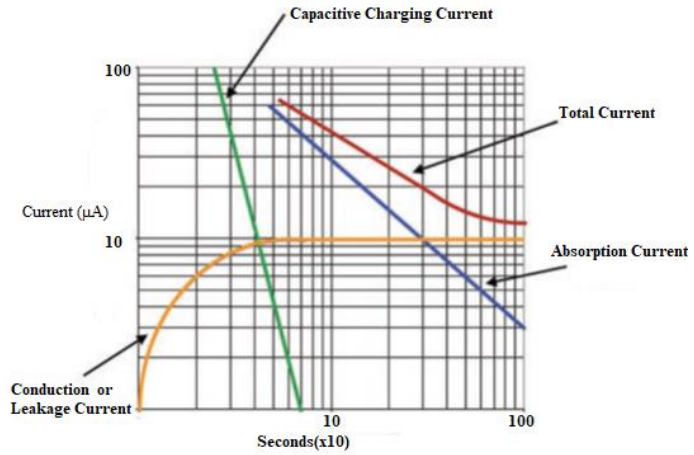
عایق ترانسفورماتور یکی از مهم ترین قسمت های آن می باشد از این رو نیاز به نگه داری منظم و دقیق دارد. فرآیند پیری عایق به محض در مدار قرار گرفتن ترانسفورماتور آغاز می شود. اما اگر شرایط غیرعادی که منجر به آسیب دیدگی عایق می شود؛ بررسی نشود منجر به تسریع این فرآیند خواهد شد. علت های اصلی تخریب عایق به شرح زیر می باشد: (این عوامل با یکدیگر در تعامل بوده و موجب تسریع در فرآیند تخریب می شود.)

- تنش های الکتریکی: هر عایق برای یک کاربرد خاص طراحی شده است. ولتاژ کمتر یا بیشتر از میزان طراحی موجب ایجاد تنش بر روی عایق و در نتیجه ترک برداشتن آن می شود.
- تنش های مکانیکی: علاوه بر ضربه های مکانیکی؛ کار در حالت نامتعادل و خاموش و روشن شدن های متوالی نیز منجر به اعمال تنش های مکانیکی بر روی عایق می شود.
- تنش های شیمیایی: عایق ممکن است تحت تاثیر بخارهای خورنده، مواد زائد و روغن خاصیت خود را از دست بدهد.
- تنش های حرارتی: کار در دمای بیشتر یا کمتر از دمای طراحی عایق منجر به انبساط و انقباض و در نتیجه تخریب آن می شود. به هر حال در هر بار خاموش و روشن شدن نیز عایق تحت تنش حرارتی قرار می گیرد مگر اینکه برای کار متناوب طراحی شده باشد. در غیر این صورت این امر به طور قابل توجهی در عمر عایق تأثیرگذار است.
- آلودگی های محیطی: شامل رطوبت، گرد و غبار و جوندگان

جریان های عبوری از عایق

شکست عایقی زمانی رخ می دهد که عایق در جلوگیری از شارش جریان در مسیرهای مختلف کیفیت خود را از دست بدهد. این مسیرها شامل سطوح داخلی و خارجی (جریان نشتی سطحی)، بدنه عایق (جریان هدایتی) و ... می باشد. در صورت عدم تشخیص به موقع این امر احتمال شوک الکتریکی، برق گرفتگی، آتش سوزی و تخریب دستگاه وجود دارد. بنابراین پایش کیفیت عایق بخش مهمی از برنامه تعمیر و نگه داری هر تجهیز می باشد. در غیر این صورت هر مشکلی خطرناک و بسیار پر هزینه خواهد بود. مطابق با شکل (۱) جریان عبوری از مسیرهای مختلف به طور خلاصه به شرح زیر می باشد:

- جریان خازنی[1] (I_C) جریان مورد نیاز برای شارژ ظرفیت عایق تحت آزمون می باشد. در واقع زمان اعمال ولتاژ عایق مانند دی الکتریک یک خازن شارژ می شود. این جریان با مقدار زیادی شروع شده و پس از شارژ کامل مدار به صورت نمایی (پس از چند ثانیه یا چند دهم ثانیه) به سمت صفر میل می کند. این جریان به مقاومت داخلی ابزار اندازه گیری و ظرفیت هندسی تجهیز بستگی دارد و در مقایسه با جریان های دیگر ناچیز بوده و بنابراین در اندازه گیری مقاومت عایقی تاثیر چندانی ندارد.
- جریان جذبی یا پلاریزاسیون[2] (I_A) ناشی از قطبش مولکولی و رانش الکترون های آزاد ماده عایق؛ تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمال شده می باشد. در واقع اعمال میدان موجب تراز مولکول های قطبی در راستای میدان می شود در حالیکه این هم ترازی در حالت خنثی کاملا تصادفی است. در عین حال مولکول ها تحت تأثیر فشار یکدیگر نیز می باشد؛ بنابراین چند دقیقه بعد از اعمال میدان دوباره تغییر جهت داده و جریان پلاریزاسیون افت می کند. مولفه دیگر جریان جذبی به دلیل رانش تدریجی الکترون ها و یون ها تا زمان به دام افتادن آنها می باشد. افت این جریان نسبت به جریان خازنی کندتر است و به نوع و شرایط ماده عایق بستگی دارد. پلاریزاسیون جهتی با وجود رطوبت افزایش می یابد. زیرا مواد آلوده قطبی تر شده و در نتیجه درجه پلاریزاسیون و جریان مربوط به آن افزایش می یابد.
- جریان سطحی[3] (I_S) شامل جریان نشتی[4] (I_L) و هدایتی[5] (I_G) بوده که نسبت به زمان ثابت می باشد و میزان آن به درجه یونیزاسیون که خود وابسته به دماست بستگی دارد. در صورت وجود مواد رسانا (آلودگی و رطوبت) در سطح عایق جریان پراکندگی سطحی ایجاد می شود. جریان هدایتی ثابت بوده و به کیفیت ماده عایق بستگی دارد.



شکل(۱): انواع جریان ها

مقاومت عایقی

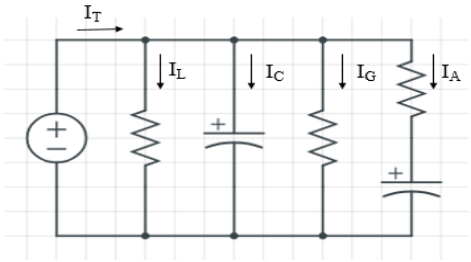
مقاومت عایقی از تقسیم ولتاژ اعمال شده بر مجموع جریان ها[۶] (I_T) بدست می آید. جهت بررسی وضعیت عایق مقایسه تغییرات جریان یا مقاومت در طول مدت آزمون مفید می باشد. همانطور که بیان شد پس از گذشت مدت زمان ناچیزی از اعمال ولتاژ جریان خازنی حذف شده و مقدار مقاومت به سایر جریان ها وابسته است. اگر میزان جریان نشتی به دلایلی مانند کیفیت پایین، وجود رطوبت یا آلودگی بزرگ باشد؛ جریان کل پس از مدت زمان کوتاهی تقریبا برابر با آن خواهد شد. در غیر این صورت جریان کل با گذشت زمان کاهش می یابد زیرا جریان جذبی اثر بیشتری بر آن دارد. مدار معادل جریان های فوق در آزمون مقاومت عایقی در شکل (۲) نشان داده شده است.

همانطور که بیان شد میزان مقاومت عایقی به شدت متأثر از دما می باشد. طبق استاندارد به ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما میزان مقاومت عایقی تا نصف کاهش می یابد. با توجه به این امر به منظور ارزیابی آن معمولا از شاخص پلاریزاسیون[۷] (PI) یا نرخ جذب دی الکتریک[۸] (DAR) طبق روابط زیر استفاده می شود.

$$PI = \frac{R_{10min}}{R_{1min}}$$

$$DRA = \frac{R_{60s}}{R_{15-30\,s}}$$

در این صورت به منظور بررسی مقاومت عایقی نیاز به اصلاح دما نمی باشد. زیرا دما در مدت زمان آزمون (حداکثر ۱۰ دقیقه) تغییر قابل توجهی نداشته و در نتیجه تأثیر دما بر شاخص های فوق ناچیز است. به هر حال اگر دمای اولیه سیم پیچ زیاد باشد؛ کاهش دمای عایق در طول مدت آزمون منجر به تفاوت قابل توجه میان مقادیر قرائت شده و در نتیجه افزایش میزان شاخص ها به ویژه PI می شود. در این صورت به منظور صحت سنجی میزان PI تکرار آزمون در دمای ۴۰ درجه یا کمتر پیشنهاد می شود. همچنین لازم است دمای سیم پیچ چند درجه بالاتر از نقطه شبنم باشد تا از تجمع رطوبت روی عایق جلوگیری شود. در غیر این صورت تفسیر نتیجه باید با در نظر گرفتن آلودگی های رطوبتی باشد.



شکل (۲): مدار معادل انواع جریان ها

علاوه بر این با استفاده از این شاخص ها امکان ارزیابی کیفیت عایق تجهیزات بسیار بزرگ با زمان شارژ کامل بیش از یک ساعت نیز فراهم می شود. هرچند در استاندارد مقادیر مطلوب شاخص های فوق مشخص نشده است، ولی در مراجع مختلف برای ارزیابی کیفیت عایق مقادیری پیشنهاد شده است که تقریبا یکسان می باشد. فرض کنید مقادیر مطلوب طبق جدول (۱) باشد.

جدول(۱): معیار ارزیابی شاخص های پلاریزاسیون و جذب دی الکتریک

شاخص پلاریزاسیون	شاخص جذب دی الکتریک	وضعیت عایق
<۱	-	خطرناک
۱-۱/۲۵	۱-۱/۱	ضعیف
۱/۲۵-۱/۵	۱/۱-۱/۲۵	مشکوک
۱/۵-۲/۵	۱/۲۵-۱/۴	متوسط
۲/۵-۴	۱/۴-۱/۶	خوب
>۴	>۱/۶	عالی

به عنوان نمونه نتایج مربوط به ترانسفورماتورهای روغنی واحد گازی نیروگاه زواره با عمر تقریبی ۱۰ سال در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با وجود اینکه مقاومت عایقی مقادیر بسیار بالایی دارد، عایق با توجه به شاخص جذب حاصل در رده ضعیف یا مشکوک قرار می گیرد. درحالیکه نتایج سایر آزمون های عایقی مطلوب و ترانسفورماتورها هیچ مشکلی قبل از انجام آزمون نداشته و بعد از آن نیز برقدار و تحت بار می باشد. بنابراین به نظر می رسد این شاخص معیار مناسبی برای ارزیابی عایق نمی باشد. در ادامه این موضوع با توجه به مدلسازی دی الکتریک عایق تشریح خواهد شد.

جدول (۲): نتایج آزمون مقاومت عایقی ترانسفورماتور

16 MVA- 15.75/6.9 kV						
Temp. =12 °C						
(+)	(-)	Guard	Meas. (kV)	Resistance (GΩ)		
				15 Sec.	60 Sec.	DAR
HV	LV	Ground	5	14.99	17.43	1.16
HV	Ground	LV	5	31.7	32.61	1.03
LV	Ground	LV	5	14.71	18.41	1.25
200 MVA- 245/15.75 kV						
Temp. =20 °C						
(+)	(-)	Guard	Meas. (kV)	Resistance (GΩ)		
				15 Sec.	60 Sec.	DAR
HV	LV	Ground	5	23.46	24	1.02
HV	Ground	LV	5	6.1	6.7	1.1
LV	Ground	LV	5	7.8	11.48	1.47

مدلسازی عایق و بررسی شاخص ها

با توجه به پیچیدگی ساختار عایق ترانسفورماتورها معمولا برای محاسبه جریان جذبی زمان آزمون مقاومت عایقی از مدل دی الکتریک یکنواخت دو لایه مطابق شکل (۳) استفاده می شود. طبق این مدار معادل تا زمانیکه کلید بسته است جریان برابر است با:

$$i = I_S + I_A e^{-t/\tau} = \frac{U}{R_1+R_2} + \frac{U(R_1C_1 - R_2C_2)^2}{(R_1+R_2)*R_1R_2*(C_1+C_2)^2} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} * (C_1+C_2)$$

در رابطه فوق با قرار دادن پارامترهای مربوط به عایق روغن (C_o , R_o) و کاغذ (C_P , R_P) شاخص جذب یک ترانسفورماتور برابر است با:

$$DRA = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{I_{15s}}{I_{60s}} = \frac{I_S + I_A e^{-15/\tau}}{I_S + I_A e^{-60/\tau}}$$

اگر عایق خیلی مرطوب، آلوده یا بی کیفیت باشد، جریان سطحی (I_S) خیلی بزرگ بوده و در نتیجه جریان جذبی (I_A) در مقایسه با آن ناچیز است. بنابراین شاخص جذب تقریبا برابر با یک می باشد. اگر عایق خیلی خشک یا با کیفیت باشد، مقادیر R_o و R_p و در نتیجه τ خیلی بزرگ است و در نتیجه شاخص جذب مقدار کمی دارد. به طور مثال فرض کنید $\tau = 200$ باشد؛ در نتیجه $e^{\frac{-15}{200}} = 0.928$ و $e^{\frac{-60}{200}} = 0.741$. بنابراین با توجه به اینکه جریان سطحی ناچیز است و در مقابل جریان جذبی قابل صرف نظر کردن می باشد؛ شاخص جذب برابر است با:

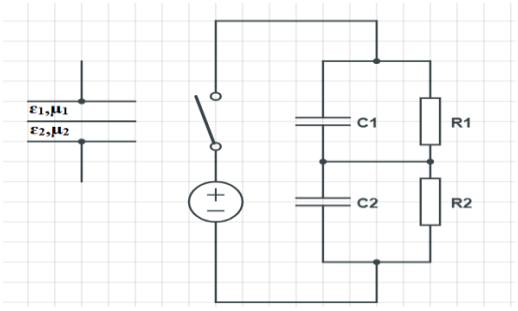
$$DRA = \frac{I_S + 0.928\, I_A}{I_S + 0.741\, I_A} = \frac{0.928}{0.741} = 1.25$$

در عمل I_S قابل صرف نظر کردن نمی باشد. طبق محاسبات اگر $\tau = 200$ و $I_S > 0.007 I_A$ باشد؛ شاخص جذب کوچکتر از 1.25 می شود. بنابراین در تست مقاومت عایقی؛ مقاومت عایقی بالا و شاخص جذب کمتر از مقدار مطلوب نشان دهنده مرطوب یا بی کیفیت بودن عایق نمی باشد. در واقع زمانیکه مقاومت عایقی از مقدار مشخصی بیشتر است، معیار ضریب جذب نیز باید به طور مناسبی کاهش یابد.

شاخص پلاریزاسیون برابر است با:

$$PI = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} = \frac{I_{1min}}{I_{10min}} = \frac{I_S + I_A e^{-60/\tau}}{I_S + I_A e^{-600/\tau}}$$

اصول کلی شاخص پلاریزاسیون نیز مانند شاخص جذب است با این تفاوت که فرآیند اندازه گیری طولانی تر است. زمانیکه فرآیند جذب طولانی است شاخص جذب نمی تواند به طور کامل وضعیت عایق را نشان دهد.



شکل (۳): مدل دی الکتریک عایق ترانسفورماتور

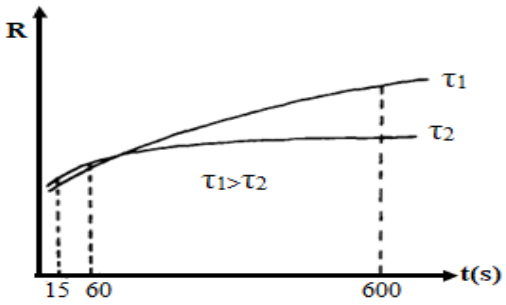
همانطور که بیان شد شاخص جذب بر مبنای فرآیند جذب و مقاومت عایقی ۱۵ و ۶۰ ثانیه می باشد. اگر مقاومت ۱۰ دقیقه نیز اضافه شود؛ فرآیند جذب توسط ۳ نقطه شرح داده می شود. در شکل (۴) تشخیص عایق بهتر با توجه به شاخص جذب دشوار است ولی با توجه به مقاومت ۱۰ دقیقه، عایق ۱ به عنوان عایق بهتر تشخیص داده می شود. بنابراین شاخص پلاریزاسیون می تواند برخی از معایب شاخص جذب را رفع نماید.

نکته جالب دیگر این است که اغلب شاخص PI برای ترانسفورماتورهای روغنی سالم نیز مقداری نزدیک یک دارد. به طور کلی می توان گفت این آزمون برای ترانسفورماتورهای روغنی مناسب نمی باشد. علت این امر با توجه به ساختار به نسبت سخت مواد عایق جامد قابل توضیح است. انرژی جذب برای پیکربندی مجدد ساختار مولکول های تقریبا ثابت در برابر میدان اعمال شده موردنیاز است. پس از گذشت زمان و رسیدن به آرایش نهایی مولکول ها این جریان جذبی به طور مداوم کاهش و در نتیجه مقاومت عایقی افزایش می یابد.

در واقع آزمون PI با این پدیده تعریف شده است و بنابراین برای مواد سیال قابل اعمال نمی باشد. زیرا عبور جریان آزمون از یک نمونه پر از روغن منجر به عبور جریان های همرفتی شده که خود باعث به هم زدن مداوم روغن و در نتیجه مانع از ایجاد یک ساختار نامنظم و ثابت برای عایق می شود. به این ترتیب با ایجاد مسیرهای مختلف مانع از کاهش جریان جذبی شده و در نتیجه با گذشت زمان تفاوت چندانی در میزان مقاومت حاصل نشده و مقدار PI پایینی بدست می آید.

نتیجه گیری

اگر عایق خیلی خشک یا با کیفیت باشد ممکن است شاخص جذب مقدار کمی داشته باشد. بنابراین درصورتیکه مقاومت عایقی از یک حد مشخصی بیشتر باشد محدودیت شاخص جذب نیز باید به طور مناسب کاهش یابد. به طور کلی با توجه به ساختار مواد سیال شاخص پلاریزاسیون یا جذب معیار مناسبی برای ارزیابی عایق ترانسفورماتورهای روغنی نمی باشد.



شکل (۴): مقایسه شاخص های پلاریزاسیون و جذب دی الکتریک

[1] Geometric Capacitive Current
[2] Absorption (Polarization) Current
[3] Surface Current
[4] Leakage Current
[5] Conduction Current
[6] Total Current
[7] Polarization Index
[8] Dielectric Absorption Ratio