



دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

گرایش : قدرت

عنوان :

روش های خشک کردن کردن و ارزیابی رطوبت ترانسفورماتورهای قدرت

استاد راهنما : دکتر حسن رضا میرزایی

نگارش : فرزین احسانی

شهریور ۹۶

فصل اول: مقدمه ۷

فصل دوم: پولاریزاسیون و ضریب تلفات عایق (δ TAN) [۴] ۱۰

۱-۲ تعریف پولاریزاسیون ۱۰

۲-۲ ضریب تلفات عایقی یا تانژانت دلتا ۱۰

۳-۲ اندازه گیری ضریب تلفات عایق $\tan(\delta)$ ۱۳

فصل سوم: مطالعه روش های موجود برای بررسی مقدار رطوبت در ترانسفورماتور ۱۷

۱-۳ آشنایی با اندازه گیری پاسخ دی الکتریک در حوزه فرکانس (FDS) ۱۷

۲-۳ پاسخ دی الکتریک برای ترانسفورماتور در سرویس و در طول خشک سازی ۲۱

۳-۳ توسعه پایگاه داده و اعتبارسنجی [۲] ۲۳

فصل چهارم: روش های خشک سازی ۲۹

۱-۴ معرفی: ۲۹

۲-۴ خشک کردن در محل ترانسفورماتورهای قدرت: ۳۱

۳-۴ خشک کردن به روش هوای داغ (HA): ۳۲

۴-۴ خشک کردن به روش روغن داغ (HO): ۳۲

۵-۴ روش اسپری داغ روغن (HOS): ۳۳

۶-۴ تکنولوژی LFH (LFH = LOW FREQUENCY HEATING) ۳۳

۷-۴ فیزیک خشک شدن [۳] ۳۳

۸-۴ فن آوری پایه خشک کردن فرکانس پایین [۳] ۳۵

۹-۴ مفهوم دستگاه [۳] ۳۶

۱۰-۴ خشک کردن در محل با گردش روغن یا اسپری داغ روغن ۳۷

۱۱-۴ ترکیب با روش LFH ۳۸

۱۲-۴ روش عملیات برای ترکیب با فرایند گردش روغن ۳۸

۱۳-۴ روند فرآیند ترکیب با اسپری روغن داغ ۳۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ فازورهای ولتاژ و جریان خازن و بدون تلفات عایقی و با تلفات عایقی ۱۱
- شکل ۲-۲ مدار معادل خازن با تلفات ۱۲
- شکل ۳-۲ فازورهای ولتاژ و جریان در مدار شکل (۲-۲) ۱۲
- شکل ۴-۲ مدار ساده شده پل شرینگ ۱۴
- شکل ۵-۲ مدار پل شرینگ ۱۶
- شکل ۱-۳ پاسخ دی الکتریک معمولی برای ترانسفورماتور با مخزن پر شده از روغن ۲۲
- شکل ۲-۳ پاسخ دی الکتریک معمولی برای ترانسفورماتور بدون روغن ۲۲
- شکل ۳-۳ اجزاء پاسخ دی الکتریک ناشی از پرسبورد (a)، روغن (b) و قطبش سطحی (c) ۲۲
- شکل ۴-۳ مدار تست برای پاسخ دی الکتریک نمونه های سلولز ۲۳
- شکل ۵-۳ ضریب تلفات فرکانس برای نمونه های پرسبورد اشباع نشده با روغن در 0;1;2;3;4;5 و 6% محتوای آب در 20°C ۲۴
- شکل ۶-۳ تأثیر دما بر روی پاسخ دی الکتریک نمونه های پرسبورد دارای محتوای آب ۱٪ در 20°C و 55°C و 95°C ۲۵
- شکل ۷-۳ مدار اندازه گیری با مدل استوانه ای و ابزار تست ۲۶
- شکل ۸-۳ ضریب تلفات برای مقادیر مختلف آب برای ۱ mm پرسبورد در طول خشک شدن در دمای 120°C ۲۷
- درجه سانتیگراد ۲۷
- شکل ۹-۳ ظرفیت مختلط ۱mm پرسبورد با محتوای آب ۰/۳٪ در دمای عایق 80°C و 120°C ۲۸
- شکل ۱-۴ افزایش نسبی ضریب نفوذ پرسبورد غیراشباع در سطوح مختلف رطوبت، فشار و دمای فرآیند ۳۵
- شکل ۲-۴ سیستم فرآیند LFH ۳۷
- شکل ۳-۴ تعداد ترانسفورماتورهای قدرت که با تکنولوژی LFH خشک شده اند ۴۰
- شکل ۴-۴ سرعت خشک کردن از ۳٪ تا ۱/۵٪ رطوبت متوسط ۴۲

فصل اول: مقدمه

یافته های گذشته نشان می دهد که ترکیبی از روغن معدنی و پرسی بورد^۱ به طور گسترده ای در تولید ترانسفورماتور استفاده می شود. عمر این ترکیب بسیار وابسته به عامل های دما، غلظت اکسیژن، اسیدی بودن روغن و میزان رطوبت در عایق است. به خصوص میزان آب و درجه حرارت نقش عمده ای را دارند. دما به طور عمده وابسته به طراحی ترانسفورماتور، بارگیری، امکانات خنک کننده و دمای محیط است. تغییر این پارامترها معمولاً شامل سرمایه گذاری های بزرگ می شود.

پس از ساخت ترانسفورماتور، همیشه مقداری رطوبت در عایق آن باقی می ماند. مقدار رطوبت در یک ترانسفورماتور جدید معمولاً حدود ۰/۵ درصد در وزن است. وقتی که ترانسفورماتور پیر شد، محتوای آب آن به دلیل آب تولید شده توسط واکنش های تجزیه در کاغذ عایق افزایش می یابد.

پیری عایق ترانسفورماتور و میزان رطوبت آن دو پارامتر مهم در تعیین قابلیت اطمینان کوتاه مدت و بلند مدت ترانسفورماتور محسوب می شوند. آب در عایق جامد باعث تسریع پیری و در نتیجه باعث کاهش عمر متوسط آن می شود. کاغذ و پرسبورد شامل سلولز عمدتاً به دلیل هیدرولیز در سرویس پیر می شوند. آب این واکنش شیمیایی را تسریع می بخشد که شامل آب بیشتر می شود.

با توجه به IEEE Std. 62-1995 ترانسفورمانور با محتوای آب کمتر از ۲ درصد خشک در نظر گرفته می شوند؛ وقتی محتوای آب بین ۲ تا ۴ درصد است مرطوب در نظر گرفته می شود و بالاتر از ۴/۵٪ بیش از حد مرطوب در نظر گرفته می شود. ترانسفورماتورها در پایان عمر خود، می توانند به سطوح رطوبت حدود ۵٪-۶٪ در وزن برسند.

می توان گفت که اگر محتوای آب یک کاغذ دی الکتریک دو برابر شود، عمر آن به نصف کاهش می یابد. بنابراین، هر یک از اینها یک ترانسفورماتور با سطح رطوبت ۴٪ در ده سال کهنه می شود به طوری که ترانسفورماتور دیگری با رطوبت ۲٪ در ۲۰ سال [۱].

¹ Pressboard

علاوه بر این، رطوبت، قدرت دی الکتریک عایق ترانسفورماتور را کاهش می دهد و ولتاژ شروع تخلیه جزئی را کاهش می دهد، و احتمال شکست ترانسفورماتور افزایش می یابد.

به طور معمول خشک کردن مناسب که پس از مونتاژ محتوای آب را تا ۰/۵٪ کاهش دهد طول عمر بلند را تضمین می کند. همچنین ممکن است پس از تعمیر، خشک کردن عایق جامد لازم باشد. برای تعمیرات در قسمت های فعال ترانسفورماتورهای قدرت، مخزن باز می شود و روغن تخلیه می شود به طوری که کاغذ و پرسپورد به طور مستقیم در معرض رطوبت محیط قرار می گیرند. آب می تواند از هوای اطراف به داخل عایق جابه جا شود. این فرآیند برای دمای بالای عایق یا مواد سلولزی جدیدی که با روغن اشباع نشده است سریعتر است. با این حال حتی برای عایق اشباع شده با روغن در دمای محیط، مقدار آب پس از چند روز افزایش قابل توجهی خواهد داشت [۲].

خشک کردن صحیح ترانسفورماتور یکی از عوامل تعیین کننده برای طول عمر ترانسفورماتورها است. و در طول تولید یا بعد از تعمیر، خشک کردن عایق، کاری ضروری است. اما اندازه ها و طراحی ها و مواد خام مختلف نیازمند زمان خشک کردن متفاوت هستند که تعریف زمان خشک کردن را به چالش می کشاند. یک نظارت مستقیم بر رطوبت عایق در طول فرآیند خشک کردن به بهینه کردن این فرآیند کمک خواهد کرد. در این پایان نامه یک رویکرد جدیدی از آنالیز پاسخ دی الکتریک برای نظارت بر فرآیند خشک کردن معرفی می کنیم. آنالیز پاسخ دی الکتریک به طور گسترده به عنوان یک روش قابل اعتماد برای تعیین مقدار رطوبت ترانسفورماتورهای در حال سرویس شناخته شده است. با استفاده از یک پایگاه داده جدید برای سلولز غیر اشباع با روغن، این روش می تواند برای نظارت بر روند خشک کردن استفاده شود. این روش اطلاعات مستمیری را از محتوای آب در طول فرآیند خشک کردن فراهم می کند. نرم افزار بارها و بارها شروع به اندازه گیری می کند و بعد از هر اندازه گیری الگوریتم آنالیز خودکار محتوای آب و روند کار را تعیین می کند [۲].

روش طیف سنجی فرکانسی از روش های مدرن برای تشخیص رفتار اجسام و پدیده ها در حوزه گسترده ای از علم و تکنولوژی می باشد. اساس کار آن نیز بررسی پاسخ فرکانسی سیستمها در شرایط تعریف شده آزمایشگاهی است. این روش در صنعت فشارقوی نیز کاربردهای فراوانی دارد. مثلا با تعیین میزان تلفات عایقی مواد در فرکانس

های مختلف و مقایسه آن با مواد استاندارد یا شناخته شده می توان نتایج قابل توجهی در مورد طول عمر عایق یا ضعف عایقی آن به دست آورد. در روش طیف نمایی حوزه فرکانس^۲، از اندازه گیری امپدانسهای مختلط و یا

تانژانت دلتا استفاده می شود. در این روش در فرکانس های گوناگون، بخش های موهومی و حقیقی ظرفیت خازنی سیستم عایقی محاسبه شده و با استفاده از روش تطبیق نمودار، رطوبت عایقی مناسب با این ظرفیت خازنی پیدا می گردد.

خشک کردن ترانسفورماتور کار کرده موضوعی است که سال ها روی آن کار شده است. مشکل اصلی رسیدن به خشک کردن بهینه یک ترانسفورماتور پیر بدون بدون جابه جایی به تعمیرگاه است. چون این عمل خیلی هزینه بر و گاهی اوقات غیرممکن است. طیف وسیعی از امکانات موجود در بازار وجود دارد. در حال حاضر امکان جدیدی

به نام سیستم LFH ارائه شده است. این سیستم در طول زمان توسعه یافته و در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

با این روش بیش از ۴۰ ترانسفورماتور قدرت با قدرت تا ۴۰۰ MVA با موفقیت در محل خشک شدند. اندازه گیری طولانی مدت نشان داده است که اثرات خشک شدن بسیار بهتری نسبت به سایر فرآیندهای شناخته شده می

تواند بدست آید [۳].

در این پایان نامه به روش های مختلف خشک سازی ترانسفورماتور به خصوص روش LFH به صورت مفصل،

می پردازیم.

فصل دوم: پولاریزاسیون و ضریب تلفات عایق (δ TAN) [۴]

۱-۲ تعریف پولاریزاسیون

ایجاد دو قطبی را پولاریزاسیون (polarization) می گویند. پولاریزاسیون ممکن است بر اثر تغییر مرکز ثقل بارهای مثبت و منفی در اتم باشد. یعنی مرکز ثقل الکترون ها و هسته اتم در نتیجه نیروی وارده در میدان الکتریکی از یکدیگر جدا شوند. این پدیده پولاریزاسیون الکترونی خوانده می شود. همچنین پولاریزاسیون یونی داریم و آن وقتی است که اتم ها یا یون های با علامت الکتریکی مخالف جا به جا شوند. حالت دیگر این است که دو قطبی هایی در ماده وجود دارند و به صورت نامنظم قرار گرفته اند. بر اثر میدان الکتریکی، دو قطبی ها در جهت میدان منظم می شوند. این پدیده را پولاریزاسیون جهتی می گویند.

۲-۲ ضریب تلفات عایقی یا تانژانت دلتا

می دانیم که برای ولتاژ متناوب جریان یک خازن 90° درجه جلوتر از ولتاژ دو سر آن است. این در صورتی است که خازن هیچ گونه تلفات انرژی نداشته باشد. اگر در خازن با اتصال آن به ولتاژ متناوب انرژی تلف شود، جریان و ولتاژ کمتر از 90° درجه اختلاف فاز دارند. متمم زاویه بین جریان و ولتاژ خازن را با δ نمایش می دهند و تانژانت این زاویه را ضریب تلفات عایقی یا تانژانت دلتای عایق می خوانند. شکل (۱-۲) فازورهای ولتاژ و جریان برای یک خازن بدون تلفات و یک خازن با تلفات عایقی را نشان می دهد.

فصل ششم: نتیجه گیری

مقدار رطوبت بالا پیری عایق را سرعت می بخشد و بنابراین باعث طول عمر کوتاه ترانسفورماتور می شود. اما همچنین مقدار رطوبت بالا با ایجاد حباب و یا زمانی که آب آزاد ظاهر می شود می تواند منجر به شکست فوری ترانسفورماتور شود. بنابراین، خشک نگه داشتن ترانسفورماتور، یکی از عوامل مهم از جهت قابلیت اطمینان بالا و طول عمر است.

خشک کردن مناسب ترانسفورماتورهای قدرت، امید به زندگی بالا را تضمین می کند، زیرا آب در عایق جامد، پیری را تسریع می کند. امروزه برآورد زمان خشک شدن هنوز هم چالش برانگیز است. این تحقیق بر استفاده از

تجزیه و تحلیل پاسخ دی الکتریک برای نظارت بر میزان آب در عایق جامد در طول فرایند خشک کردن متمرکز شده است. این روش برای روش های خشک کردن آفلاین قابل استفاده است.

اندازه گیری پاسخ دی الکتریک حوزه ی فرکانس یا در حوزه زمان حاوی اطلاعات مهمی در خصوص وضعیت عایق دستگاه مورد آزمایش، مثلا ترانسفورماتور است. با استفاده از روش طیف نمایی در حوزه فرکانس به مقدار

رطوبت موجود در روغن نیز می توان پی برد. اندازه گیری به روش FDS یک تکنیک جدید است برای تشخیص و

تست روغن و عایق به کار رفته در ترانس ها که اساسا کار آن در واکنش دی الکتریک مربوط به مواد عایقی به کار رفته در فرکانس های مختلف است. اگر چه دما و حرارت نیز تاثیر عمده و بسزایی در نتایج تست دارد مخصوصا در فرکانس های پایین. $\tan \delta$ ، بخش حقیقی و موهومی همگی به میزان دما بستگی دارند. دلیل آن

نیز این است که دما هم به هدایت الکتریکی روغن هم به پولاریزاسیون بستگی دارد. و همچنین تاثیر حرارت و

دما در نتایج اندازه گیری به روش FDS برای ارزیابی درست شرایط روغن و کاغذ عایق به کار رفته در ترانس بسیار حائز اهمیت است.

تکنیک LFH همراه با روش های مناسب، در حال حاضر یک ابزار قوی برای خشک کردن در محل حتی بزرگترین ترانسفورماتورهای قدرت در یک زمان کوتاه ارائه می دهد. این مزیت را دارد که فرایند پیر شدن کاغذ

بلافاصله کاهش می یابد و ترانسفورماتورها نیازی به انتقال به یک کارگاه تعمیر نیستند که می تواند به زمان

بیشتری منتهی شود. در مقایسه با سیستم های انعطاف پذیر آنلاین، خشک کردن LFH بر تجزیه و تحلیل DGA اثر نمی گذارد، که برای تشخیص شکست در ترانسفورماتور در مرحله اولیه استفاده می شود.

تجربه جمع آوری شده از خشک شدن بیش از ۴۰ ترانسفورماتور در این زمینه نشان می دهد که سطح رطوبت به

سطوح بسیار پایین کاهش می یابد و در طول سال ها پایدار است، که نشان می دهد که بخش های داخلی عایق گروه

نیز خشک شده اند

کاربرد IDAX300 اندازه گیری پاسخ فرکانسی عایق، پارامترهای ظرفیت خازنی، تانژانت دلتا به صورت تابعی از فرکانس و توانایی نمایش گراف های مربوط به میزان آب محلول در روغن، هدایت الکتریکی روغن و وضعیت عایقی ترانسفورماتور بدون نیاز به ولتاژ زیاد.



مراجع

- [۱] J. Bosiger, "The use of low frequency heating techniques in the insulation drying process for liquid filled small power transformers," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf. Expo., Oct.–Nov. 2001, vol. 2, pp. 688–692.
- [۲] Monitoring the Drying Process of Power Transformers Using Dielectric Response Analysis Dr.-Ing. Stephanie Raetzke, Dr.-Ing. Maik Koch, Dipl.-Ing. Martin Anghuber
OMICRON electronics, Oberes Ried 1, 6833 Klaus, Austria
- [۳] PRACTICAL EXPERIENCE WITH THE DRYING OF POWER TRANSFORMERS IN THE FIELD, APPLYING THE LFH** TECHNOLOGY ** (LFH = LOW FREQUENCY HEATING) PAUL KOESTINGER*, ERIK ARONSEN ABB POWER TECHNOLOGIES DIVISION AS (Norway) PIERRE BOSS ABB Sécheron SA (Switzerland) GÜNTER RINDLISBACHER Micafil AG (Switzerland)
- [۴] دکتر محسنی، مبانی مهندسی فشار قوی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران ۱۳۸۵
- [۵] محمد امین پرتوی، رسول مهر آرا، "اندازه گیری پاسخ دی الکتریک روغن ترانسفورماتور در حوزه فرکانس (FDS)
- [۶] José Antonio Almendros-Ibáñez, Juan Carlos Burgos, Transformer Field Drying Procedures: A Theoretical Analysis, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 24, NO. 4, OCTOBER 2009
- [۷] CIGRE, W.G. A2.18 Guide for Life Management Techniques for Power Transformers; 2003.