

СУЧАСНІ МЕТОДИ СУШІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В роботі досліджено традиційні способи та методи сушіння ізоляції силових трансформаторів та здійснено їх порівняння з сучасними методами сушіння, а також проведено детальний аналіз процесу сушіння ізоляції трансформаторів.

Ключові слова: трансформатор, ізоляція, олива, обмотки.

Abstract. Traditional methods of the power transformers drying isolation were researched. Their comparison with modern drying methods were also implemented and a detailed analysis of the isolation drying process of transformers was carried out.

Keywords: transformer, insulation, oil, windings.

Вступ

Одним з важливих процесів у виробництві трансформаторів є ефективне видалення вологи із целюлозної ізоляції. Якість сушіння ізоляційного матеріалу безпосереднім чином позначається на параметрах діелектрика й визначає надійність трансформатора. Різноманітні способи сушіння засновані на передачі тепла від нагрітих поверхонь шляхом теплопровідності. У деяких випадках при нагріванні або охолодженні тіл після сушіння необхідно розрахувати тривалість протікання цих процесів. Існують різні способи сушіння трансформаторів (наприклад, методом в індукційних втрат сталі бака, в спеціальній шафі, інфрачервоними променями, повітрорудкою, у вакуумі, струмами короткого замикання та ін.) зі своїми перевагами і недоліками.

В процесі зберігання, транспортування та монтажу трансформаторів їх ізоляція (масло, целюлоза) зволожується за рахунок впливу навколишнього середовища. При експлуатації трансформатори зволожуються за рахунок тепло- та вологообміну між трансформатором і навколишнім середовищем (трансформатор «дихає», коли осушується при нагріванні і зволожується при охолодженні), а також за рахунок окислювальних процесів, що відбуваються в маслі при його нагріванні [1].

Зволоження погіршує ізоляційні характеристики, що може бути причиною виходу трансформатора з ладу при включенні або експлуатації. Профілактичні випробування – це один з методів контролю стану ізоляції трансформаторів в процесі експлуатації. Якщо результати цих випробувань негативні, то слід провести комплекс вимірювань для оцінки ступеня зволоження ізоляції трансформатора. Після тривалого зберігання трансформатора або перебування його в неробочому стані в несприятливих кліматичних умовах, перш ніж приступити до вимірювань за оцінкою ступеня зволоження ізоляції, проводять скорочений хімічний аналіз та випробування електричної міцності трансформаторного масла [2, 3].

Результати дослідження

Сушіння ізоляції трансформаторів необхідне для приєднання ізоляції в стані, що в повній мірі відповідає існуючим нормам і вимогам. Загалом виділяють наступні випадки:

- поява слідів води на активній частині або в баку;
- термін зберігання трансформатора без оливи (доливання оливи) перевищив один рік;
- спостерігається обводнення індикаторного силікагелю, він втратив синій колір;
- активна частина трансформатора знаходиться на повітрі більше встановленого часу (або довше);
- контрольне підсушування трансформатора не дозволило привести характеристики ізоляції до нормованих параметрів.

На сьогоднішній день на практиці використовують багато способів сушіння ізоляції трансформаторів, серед яких найпоширенішими є циркуляція гарячої сухої оливи, метод холодного вакууму, термовакуумна дифузія, розпилювання оливи, циклічне сушіння та ін. [4].

При циркуляції гарячої сухої оливи, початкова олива нагрівається до температури 80-85 °С, після чого виходить через установку сушіння та фільтрації. Суть даного методу складається в

дифузії вологи з зовнішніх слоїв в сухій оливі з наступним її видаленням за допомогою установок осушування.

Метод холодного вакууму характерний нагріванням трансформатора при вакуумуванні (залишається 0,05-1 мм.рт.ст.). Обов'язкова умова - температура ізоляції не повинна опускатися нижче 20 °С. Технологічний метод реалізується за рахунок спеціальної пастки, призначеної для виморожування водяних парів. Це підвищує ефективність роботи вакуумних насосів і дозволяє додатково виводити водяні пари з баки.

Підхід термовакуумної дифузії використовується виключно для сушіння трансформаторів, які перебувають під напругою 110-750 кВ. Початок нагрівання оливи до температури 80-85 °С, потім прогрівається ізоляція за рахунок циркуляції гарячої оливи або циркуляції струму в обмотках. Потім відбувається зливання оливи під вакуумом, а сам трансформатор вакуумується на впродовж 48 годин.

При розпилюванні оливи трансформатор нагрівають до температури 100 °С за рахунок розбризкування оливи. Залишковий тиск при цьому не повинен бути меншим 5 мм.рт.ст. Оброблення може проводитись кілька днів до закінчення виділення води в конденсаційній колоні (у випадку дуже зволоженої ізоляції).

Циклічне сушіння відбувається наступним чином: трансформатор нагрівають розбризкуванням гарячої оливи при змінному вакуумі і періодичним продуванням сухим гарячим повітрям, доки температура не буде рівною 80-90 °С. Далі трансформатор вакуумується, після чого нагрівається і омивається при розбризкуванні гарячої оливи. В залежності від початкового вологовмісту процес може містити від 3 до 8 циклів.

Спосіб сушіння гарячим повітрям: спочатку чисте повітря нагрівається до температури 100 °С, після чого воно проходить через бак трансформатора, нагріваючи при цьому магнітопровід і обмотки. Такий підхід рекомендований для використання в трансформаторах, баки яких не розраховані на повний вакуум.

Одним з найбільш сучасних способів сушіння трансформаторів, є встановлення установки вакуумного виморожування «Іней» - призначена для вакуумування і підсушування твердої ізоляції силових трансформаторів. Завдяки унікальній конструкції ці установки розвиваються до температури до -70 °С. При такій температурі вода з обмоток трансформатора конденсується в установці, що дозволяє розвинути більш глибоке розрідження в трансформаторі і знизити парціальний тиск води. Таким чином, збільшує ефективність сушіння обмоток трансформатора. Також завдяки цьому можна точно уточнити, коли обмотки і бак трансформатора висушуються достатньо добре [5].

Низькочастотне нагрівання (LFH) - це унікальний процес сушіння ізоляції трансформатора за рахунок подачі регульованого струму низької частоти на його високовольтні обмотки. Цей метод є кращим й швидшим від традиційних, при якому використовують гаряче масло й вакуумне сушіння. Він може знизити витрати енергії вдвічі і значно прискорює виробничий процес. Основний вплив на швидкість сушіння і його якість має температура об'єкта сушіння й глибина вакууму. Метод LFH, розроблений компанією ABB Micasfil, дозволяє рівномірно нагріти високовольтні й низьковольтні обмотки трансформатора зсередини, шляхом подачі струму низької частоти малої напруги на високовольтні обмотки, при цьому низьковольтні обмотки замикаються накоротко [6].

В представленому методі замість гарячого повітря або пари розчинника для нагрівання трансформаторів зсередини використовуються низькочастотні струми, що подаються у високовольтні обмотки трансформатора (рис. 1). Для більших трансформаторів метод LFH використовується в поєднанні із циркуляцією гарячого повітря.

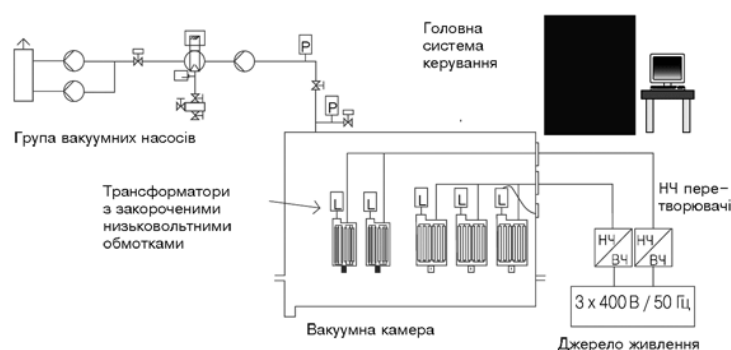


Рис. 1 - Схема сушіння трансформаторів шляхом низькочастотного нагрівання (LFH)

Метод сушіння трансформаторів Smart Dry поєднує вакуумне сушіння обмоток з низькочастотним нагріванням (LFH). Цей метод зарекомендував себе як найбільш раціональний для трансформаторів потужністю більше 10 МВА і економічно вигідний технічне рішення. Механічна міцність ізоляції трансформатора значною мірою визначається так званим ступенем полімеризації, яка оцінюється коефіцієнтом полімеризації DP. Активна частина трансформатора нагрівається шляхом подачі в високовольтну (первинну) обмотку напруги низької частоти (до 1 Гц) при замкнутій накоротко обмотці нижчої напруги (вторинної). Низька частота значною мірою зменшує реактивну складову опору кола короткого замикання і дозволяє за рахунок цього отримати відповідну величину струму при невеликій напрузі. Індуктивний зв'язок між обмотками при цьому зберігається [7].

Втрати від вихрових струмів в обмотках і деталях конструкції при низькій частоті незначні, за рахунок чого виключається можливість локального перегріву в цих елементах. Перевищення допустимих меж величин струму і напруги також стає неможливим завдяки надійності розрахунків відповідних параметрів установки. Подача в первинну обмотку напруги низької частоти регулюється залежно від температури обмоток, яка визначається шляхом безперервного контролю їх опору. За рахунок цього запобігається можливість додаткового старіння паперової ізоляції під дією нагрівання обмоток. Зазвичай масло силового трансформатора в процесі експлуатації регулярно піддається аналізу. Якщо при цьому виявляється високий вміст води, рекомендується вимірювання показника PDC (струмів поляризації і деполіаризації). На основі встановлених значень вмісту води в твердій ізоляції і маси цієї ізоляції з урахуванням масляного просочення проводиться узгодження із замовником кількості води, що підлягає видаленню, в процесі сушіння. На стадії проектування установки для сушіння активної частини трансформатора його бак і високовольтні вводи повинні перевірятися на вакуумну щільність. Якщо вводи не забезпечують потрібної герметичності, повинні встановлюватися відповідні додаткові сполучні фланці.

Весь процес сушіння складається з трьох циклів: нагрів струмом низької частоти (LFH), випуск масла та створення вакууму і сушка пульсуючим струмом низької частоти. Залежно від продуктивності насоса, що використовується, масло впродовж декількох годин відкачується з трансформатора і потрапляє в ємність для проміжного зберігання. Бак трансформатора вакуумують, після чого починається процес сушіння. При цьому залежно від вмісту вологи середню температуру обмоток ступенями по 5К підвищують до максимальної (90 ° C), а потім знову знижують (рис. 2, де: P - тиск в баку трансформатора, q - середня температура обмоток, V - сумарний вихід води, V/t - питомий вихід води на одиницю часу, I – струм).

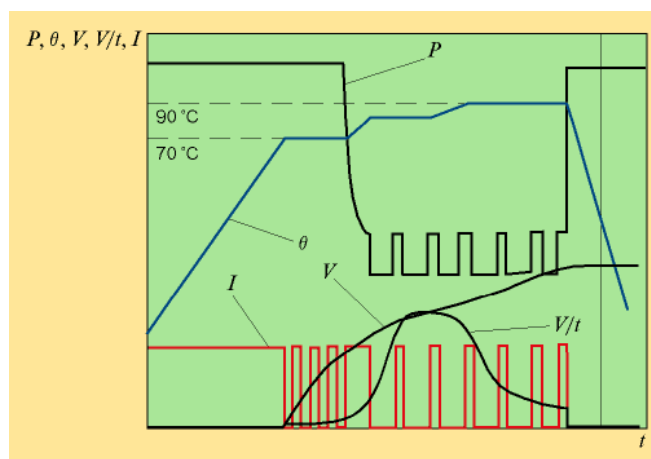


Рис. 2 - Наближене відображення процесів, що відбуваються при вакуумній сушці в поєднанні з низькочастотним нагріванням обмоток трансформатора

Максимальна напруга в первинній обмотці трансформатора під час нагрівання становить 760 В. Для того, щоб повністю виключити небезпеку електричного пробоя під час подачі струму, глибину вакууму підвищують до 40 - 60 Мбар (30 - 45 мм ртутного стовпа). Слід зазначити, що напруга, яка подається в первинну обмотку, занадто мало, щоб викликати пробій ізоляції, рівень

якої розрахований на 100 і більше кВ. При тиску в баку 1 Мбар і заданих ізоляційних відстанях, можливість пробою в процесі сушіння повністю виключається.

Сушіння закінчується після видалення встановленої кількості води, при цьому олива заправляється в бак, коли він ще перебуває під вакуумом. Після демонтажу електричних і гідравлічних з'єднань, вимірювання опору ізоляції, відновлення всіх демонтованих з'єднань і відкачування з бака повітря трансформатор витримують певний час і потім здають в експлуатацію.

Висновок

Вміст вологи в ізоляції трансформаторів відіграє вирішальну роль у процесі її старіння. Але досі цього фактору приділялося недостатньо уваги. Більшість силових трансформаторів, які знаходяться в експлуатації в даний час, мають вік 30 і більше років. Вакуумне сушіння в поєднанні з технологією нагріву LFH є ефективним способом продовження терміну служби таких трансформаторів. При використанні такого способу сушіння час відключення трансформатора може бути скорочено до 10 - 16 діб замість декількох тижнів, які потрібні при традиційних методах сушіння за допомогою циркуляції оливи. Завдяки такій істотній економії часу спосіб Smart Dry представляє особливий інтерес для систем тягового електропостачання залізниць, а також для електростанцій, підстанцій і промислових підприємств. Побожування, що цей спосіб занадто жорсткий і може призвести до викривлення ізоляції, не підтвердилися. З практики відомий випадок, коли один з просушених трансформаторів після здачі в експлуатацію піддався впливу близького короткого замикання в мережі і витримав його без пошкодження. Ще один трансформатор відразу ж після просушування в рамках випробувальної програми піддався багаторазовим впливам пікових навантажень і також витримав їх без пошкоджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лизунов С.Д. Сушка и дегазация изоляции трансформаторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1971. - 128 с.
2. Филиппшин В.Я., Туркевич А.С. Монтаж силовых трансформаторов. М.: Энергоиздат, 1981. - 432 с.
3. Инструкция по эксплуатации трансформаторов. М.: Энергия, 1978. - 80 с.
4. Аляртский И.П., Мандрыкин С.А. «Сушка электрических машин и трансформаторов». – Москва: Энергия, 2-е издание. – 1974. – 72 с.
5. <https://oil.globecore.ru/oborudovanie/obslyuzhivanie-silovyh-transformatorov/sushka-izolyatsii-transformatorov-ustanovkoj-inej.html>
6. <http://www.electrotema.com.ua/content/detail/3724>
7. <http://tek.tasvbr.com/help/339>

Юлія Володимирівна Малогулко — к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net;

Сивак Юрій Павлович — студент групи 2Е-15б, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Juliya V. Malogulko —Ph.D., Assistant Professor of electrical stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : Juliya_Malogulko@ukr.net;

Syvak P. Yurii - student of 2E-15b group, Department of Electricity, Electromechanics and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.