

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: В роботі показано ефективність застосування методу діелектричної частотної характеристики для діагностики стану ізоляції силових трансформаторів та іншого високовольтного електрообладнання. Проаналізовано переваги застосування даного методу у порівнянні з традиційними методами діагностики, зокрема, таким як вимірювання тангенса втрат ($\tan \delta$) на одній частоті.

Ключові слова: силовий трансформатор, діагностика, стан ізоляції, діелектрична частотна характеристика.

Abstract: The paper shows the effectiveness of using the dielectric frequency response method for diagnosing the insulation condition of power transformers and other high-voltage electrical equipment. The advantages of using this method in comparison with traditional diagnostic methods, in particular, such as measuring the loss tangent ($\tan \delta$) at a single frequency, are analyzed.

Keywords: power transformer, diagnostics, insulation condition, dielectric frequency response.

Вступ

Сучасні електроенергетичні системи вимагають надійної роботи силових трансформаторів, які є ключовими елементами в передачі та розподілі електроенергії. Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно пов'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму [1]. Основною причиною аварійних ситуацій у трансформаторах є погіршення стану ізоляції, зокрема, її зволоження, старіння та забруднення. Традиційні методи контролю, такі як вимірювання тангенса діелектричних втрат або внутрішнього опору, часто не дають повної картини змін, що відбуваються всередині ізоляційної системи.

Прийнята в електропостачальних компаніях стратегія планово-попереджувальних ремонтів стає малоефективною в сучасних умовах, як з економічних причин (необґрунтовані витрати на обстеження устаткування, що не потребує термінового ремонту, а також витрати через можливий недовідпуск електроенергії при виведенні трансформатора в плановий ремонт), так і через збільшення ймовірності відмови обладнання в міжремонтний період [2].

В умовах сучасної електроенергетики, де значна частина обладнання вже вичерпала свій експлуатаційний ресурс, особливо важливим є впровадження систем діагностики силових трансформаторів. В Україні близько 40–50% трансформаторів функціонують довше за нормативний термін служби. У Європі та в США ця частка становить – 50% і понад 65% відповідно. Це підвищує ймовірність відмов і потребує запровадження ефективних методів контролю їхнього технічного стану.

Метод діелектричної частотної характеристики (Dielectric Frequency Response (DFR)) дозволяє комплексно оцінити стан ізоляції шляхом аналізу її поведінки у широкому діапазоні частот. Це дає змогу точно визначити рівень вологості в паперовій ізоляції, оцінити ступінь старіння масла та передбачити майбутнє погіршення характеристик діелектрика.

Результати дослідження

Аналіз застосування методу DFR показує, що він є одним із найефективніших методів оцінки вмісту вологи в паперовій ізоляції силових трансформаторів. Волога може накопичуватися в паперовій ізоляції внаслідок негерметичних ущільнень, недостатньої ефективності системи осушення або природного старіння паперової ізоляції. Її наявність призводить до зниження діелектричної міцності

трансформаторного масла, що погіршує електроізоляційні характеристики обладнання. Окрім цього, волога прискорює деградацію целюлозної ізоляції, знижуючи її механічну стійкість і збільшуючи ризик пошкоджень під час експлуатації. Завдяки своїй високій чутливості, метод DFR стає одним із найбільш ефективних методів діагностики та профілактичного обслуговування трансформаторів, що дозволяє запобігти виникненню дороговартісних аварійних ремонтів і в результаті підвищити надійність експлуатації електроенергетичної системи в цілому [3].

Перший портативний прилад для вимірювання DFR/FDS характеристик трансформаторів, вводів та кабелів був представлений у 1995 році [3]. Відтоді ця технологія пройшла ґрунтовну перевірку та оцінку. На даний момент, кілька міжнародних дослідницьких проєктів і звітів визначають метод діелектричної спектроскопії разом із моделями ізоляції як пріоритетний підхід для оцінки вмісту вологи в целюлозній ізоляції силових трансформаторів.

Під час DFR-тестування вимірюють ємність та коефіцієнт діелектричних втрат ($\tan \delta$ /power factor). Принцип вимірювання та методика налаштування схожі на традиційні випробування діелектричних втрат на частоті 50/60 Гц, але з певними відмінностями. Зокрема, використовується нижча тестова напруга (від 140 до 1400 В), а замість фіксованої мережевої частоти 50/60 Гц проводять вимірювання діелектричних характеристик у широкому частотному діапазоні – зазвичай від 1 мГц до 1 кГц.

Результати подаються у вигляді залежностей ємності та/або $\tan \delta$ (коефіцієнта втрат) від частоти. Схема для виконання вимірювань зображена на рисунку 1 [3].

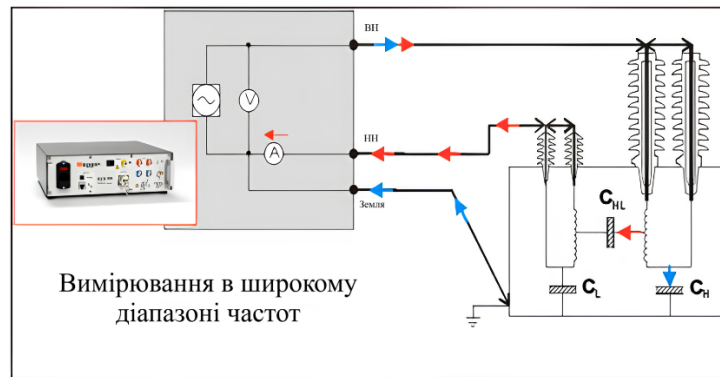


Рисунок 1 – Схема для проведення вимірювань DFR-тестування

Метод передбачає подачу низьковольтного змінного сигналу на обмотку трансформатора та вимірювання комплексного коефіцієнта діелектричної проникності $\epsilon(\omega)$ та втратного тангенса ($\tan \delta$) у діапазоні частот від 0,1 мГц до 1 кГц.

Різні частоти дають змогу отримати детальну характеристику діелектрика, а саме:

- низькі частоти (~мГц) – чутливі до вологи в паперовій ізоляції;
- середні частоти (~Гц) – дають інформацію про старіння масла та домішки;
- високі частоти (~кГц) – відображають поляризаційні процеси в ізоляційній системі.

Цей метод дозволяє отримувати дані різних параметрів, серед яких:

- ступінь вологості паперової ізоляції;
- стан трансформаторного масла;
- температурна залежність ізоляції;
- контроль старіння ізоляції;
- визначення залишкового ресурсу ізоляції.

До інших переваг DFR можна віднести наступні аспекти. По-перше, цей метод не потребує прямого виведення в ремонт трансформатора, що дозволяє зберегти його в робочому стані та значно зменшити витрати часу та ресурсів на проведення тестування. Крім того, DFR має високу швидкість і точність вимірювань, що дозволяє проводити діагностику без зупинки роботи обладнання та з мінімальними витратами часу на підготовку. Однією з важливих переваг є чутливість методу до навіть незначних змін в

діелектричних властивостях ізоляції. Це особливо важливо для виявлення проблем на ранніх етапах, що дозволяє оперативно вживати заходів і попереджати серйозні пошкодження. Також DFR надає можливість постійного моніторингу стану ізоляції в реальному часі, що сприяє своєчасній реакції на будь-які зміни і допомагає знизити ризики аварій, подовжуючи термін служби трансформаторів. Також, важливою перевагою є універсальність методу: DFR може бути застосований для діагностики не лише трансформаторів, але й для інших типів обладнання, таких як кабелі чи вводи, що робить його надзвичайно корисним у різних сферах електроенергетики.

На рисунку 2 представлено характерні криві, що демонструють, як змінюється діелектрична характеристика паперової ізоляції силового трансформатора залежно від вмісту води [3].

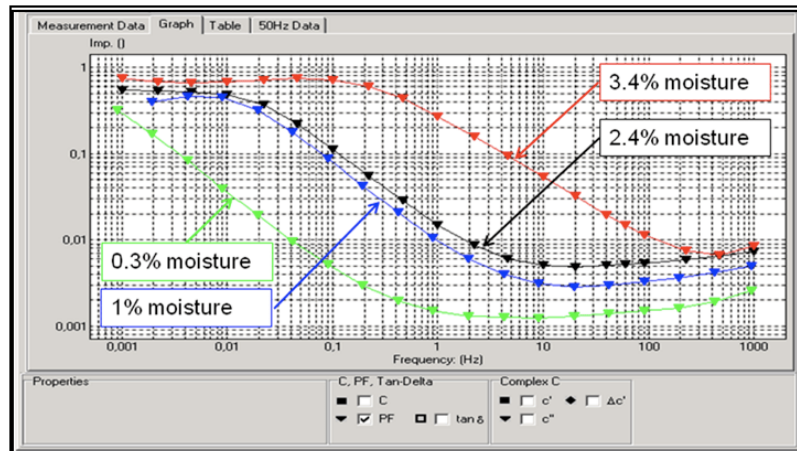
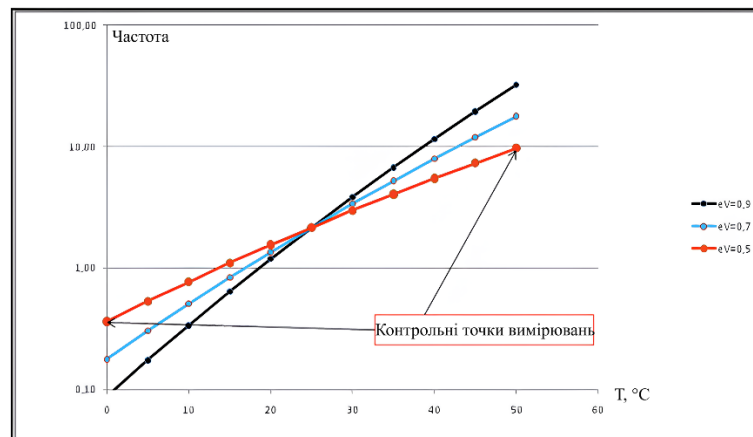


Рисунок 2 – Вимірювання DFR на 4-ьох трансформаторах при різних температурах з вмістом води в діапазоні від 0,3% до 3,4%

Вимірювання та аналіз DFR, у поєднанні з моделюванням ізоляційної системи, також враховують залежність від температури. Запатентована методика полягає в проведенні вимірювань DFR та їх перетворенні в фактор втрат при 50 Гц як функцію температури. Цей підхід має значні переваги, зокрема в спрощенні процесу вимірювань для ввідів. Замість того, щоб витрачати час на нагрівання/охолодження вводу і виконувати кілька вимірювань при різних температурах, достатньо зробити одне вимірювання DFR і перетворити його результати в значення при 50 Гц залежно від температури.

Цей метод ґрунтується на тому, що вимірювання фактора втрат при певній температурі і частоті можна порівняти з вимірюванням, проведеним при іншій температурі та частоті. На рисунку 3 показано співвідношення між значеннями коефіцієнта потужності на різних частотах, отриманих при різних температурах [3].



Перетворення результатів здійснюється через рівняння Арреніуса, яке описує, як температурні зміни впливають на властивості ізоляції:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

де k_0 — константа швидкості реакції; W_a — енергія активації; R — газова стала.

Метод Dielectric Frequency Response (DFR) є потужним інструментом для діагностики стану ізоляції електричних пристроїв, таких як трансформатори і кабелі. Однак, існують певні обмеження, які варто враховувати при його застосуванні. По-перше, цей метод може впливати на якість ізоляції, оскільки вимірювання проводяться при високих напругах. Якщо ізоляція вже має дефекти або знаходиться в поганому стані, це може призвести до її подальшого пошкодження під час тестування. По-друге, для отримання точних результатів необхідно проводити калібрування вимірювальних приладів. Невірне калібрування може викликати помилкові результати, що ускладнює інтерпретацію стану ізоляції.

Крім того, метод DFR не завжди підходить для всіх типів ізоляції. Наприклад, для ізоляційних матеріалів, таких як тверді полімери або газові ізоляції, цей метод може бути менш ефективним, порівняно з традиційними матеріалами, наприклад, папером або маслом, які використовуються в трансформаторах. Також слід враховувати, що результати DFR можуть змінюватися під впливом температури та вологості навколишнього середовища. Це може вплинути на точність вимірювань, тому важливо контролювати ці умови під час тестування. Важливою проблемою є часова залежність параметрів ізоляції. Різні вимірювання можуть давати різні результати, навіть якщо ізоляція не має дефектів, через природні зміни в матеріалі з часом. Це ускладнює аналіз, особливо якщо немає історичних даних для порівняння.

Крім того, інтерпретація результатів використання методу DFR вимагає високої кваліфікації та досвіду, оскільки частотна відповідь ізоляції може бути впливовою на різні фактори. Для правильного аналізу часто потрібно застосовувати складні математичні моделі. І, крім того, застосування даного методу не завжди дає можливість виявлення дефектів, які знаходяться в глибших шарах ізоляційного матеріалу або механічні пошкодження, які не впливають на діелектричні властивості.

Висновки

Отже, результати аналізу застосування методу DFR для діагностики стану ізоляції силових трансформаторів та іншого високовольтного електрообладнання показав, що він має ряд переваг, зокрема: високу чутливість до дефектів ізоляції, значну швидкість проведення необхідних вимірювань, а також можливість виявлення проблем на початкових стадіях зміни стану ізоляції. Завдяки цьому, даний метод являється важливим інструментом для діагностики стану ізоляції в електричних установках, що дозволяє запобігти серйозним аваріям і продовжити термін експлуатації обладнання. Попри це, застосування даного методу має і певні обмеження, зокрема – недоцільно його застосовувати для деяких типів ізоляції або у випадках виявлення механічних пошкоджень. Проте, з огляду на його значні переваги, даний метод, все-таки, варто активно використовувати, враховуючи особливості функціонування електрообладнання та технічну складність об'єкта дослідження. Крім того, застосування даного методу дозволяє отримати більш точні результати та дає можливість прогнозувати залишковий ресурс ізоляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. «Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори.» Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2008. - 219 с.
2. Притискач І. В. «моделі та методи діагностування силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ». Автореферат. Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2015. 22 с. Режим доступу URL: <https://ep.kpi.ua/files/aref/2017/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%87.%20%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82.pdf>.

3. Using Dielectric Frequency Response to Assess Insulation in Bushings & Instrument Transformers. Режим доступу URL: <https://www.inmr.com/frequency-response-to-assess-bushing-instrument-transformer-insulation/>.

Микола Олегович Сліденко – студент групи ЕС-21б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: slidenkonick@gmail.com.

Науковий керівник: **Наталія Вікторівна Остра** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: natalyaostra@ukr.net

Mykola O. Slidenko - student of group ES-21b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: slidenkonick@gmail.com.

Supervisor: **Natalia V. Ostra** - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natalyaostra@ukr.net