

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРІВ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО НЕНАВАНТАЖЕНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗАСОБАМИ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Сучасні тенденції у реалізації систем моніторингу силових трансформаторів базуються на поєднанні засобів польового моделювання, схемних підходів до побудови цифрових двійників, системах обробки великих обсягів даних від апаратних сенсорів і методах штучного інтелекту для прогнозування вірогідних місць пошкодження активної частини.

При такому підході велика увага приділяється достовірному визначенню опорів обмоток на сторонах низької і високої напруги, які мають активні і реактивні складові. Для порівняння початкових значень таких опорів із даними вимірів в експлуатації потрібно з високою точністю визначити їх початкові модельні значення, що стає актуальною задачею для високовольтного трансформаторного обладнання, яке тривалий час знаходиться в експлуатації.

Для такого обладнання значення активних і реактивних складових опорів обмоток на час введення в експлуатацію, як правило, є невідомими. Тому їх визначення потребує застосування сучасних підходів просторового 3D моделювання електромагнітних полів у багатокомпонентних середовищах з нелінійними властивостями складної геометричної форми на основі спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, Comsol Multiphysics, або подібного до нього.

Необхідність саме 3D моделювання обумовлена високими вимогами до його точності та потребою врахування особливостей конструктивної будови високовольтних силових трансформаторів у відповідності до наявної проєктної документації.

Побудова «time-depended» схемно-польової багатокомпонентної моделі силового трансформатора, яка дозволила відтворити електромагнітні процеси під час експлуатації, вимагала визначення параметрів нелінійних гістерезисних характеристик, насамперед, для магнітних властивостей електротехнічних сталей із застосуванням алгоритмів ройового інтелекту.

Числова реалізація такої «time-depended» моделі у структурі засобів Comsol Multiphysics дозволила перевести силовий трансформатор із одного стаціонарного стану, коли він не був підключений до мережі живлення в інший стаціонарний стан ненавантаженого трансформатора, підключеного до мережі живлення.

Падіння напруги на первинних обмотках трансформатора визначалося за розрахунковими даними для змінних у часі періодичних напруг і струмів на первинних обмотках із врахуванням даних для змінних у часі періодичних напруг вторинних обмоток при значеннях коефіцієнтів трансформації для кожного ступеня регулювання напруги.

Засобами гармонійного аналізу визначалися параметри основної гармоніки падіння напруги на первинній обмотці і основної гармоніки струму цієї обмотки у режимі ненавантаженого трансформатора. Відмінність від режиму дослідного неробочого ходу полягала у тому, що до уваги бралось не тільки число витків для первинної сторони трансформатора при номінальній напрузі, а також усі числа витків, які є допустимими при регулюванні напруги під навантаженням.

Отже складові опорів первинних обмоток визначалися як для режимів перезбудження ненавантаженого трансформатора, так і для режимів збудження нижчих за номінальний.

Це надало можливість врахувати залежність складових опорів первинних обмоток від режимів збудження силового трансформатора. Відхилення вказаних складових опорів від номінального є досить незначними у межах від $-0,5\%$ до $+1,2\%$.

Основним недоліком запропонованого підходу для дослідження опорів первинних обмоток ненавантажених силових трансформаторів засобами польового моделювання слід вважати великі витрати часу польових розрахунків для значної кількості ступенів регулювання напруги трансформатора під навантаженням.

Застосування диференційних методів для визначення струмів збудження силових трансформаторів під навантаженням із врахуванням відхилень у значеннях складових опорів первинних обмоток при змінах навантаження дозволило зменшити струмові похибки з $1,2 - 1,8\%$ до $0,1 - 0,5\%$, а кутові похибки від $3 - 4,5$ ел. градусів до $0,8 - 2,4$ ел. градусів.

Таким чином запропонований авторами підхід для визначення зміни складових опорів первинних обмоток ненавантаженого трансформаторів із тривалими строками експлуатації, за відсутності відповідних експериментальних даних, отриманих під час введення трансформаторів в експлуатацію, дозволяє доповнити масиви вихідних даних для систем моніторингу і покращити прогнозування залишкового ресурсу експлуатації обмоток і магнітних систем, а також розробити заходи поточних вибіркового ремонту для його продовження понад нормативними термінами.