

УДК 621.3.013.1

Яримбаш Д.С.

д-р техн. наук, проф НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗАСОБАМИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Силові трансформатори (СТ) працюють при змінному навантаженні, спричиненому піковими періодами споживання електроенергії, кліматичними умовами, режимами роботи генерації та споживачами. На відміну від цифрової моделі, цифровий двійник враховує навантаження на силовий трансформатор. Температурний стан трансформатора, а також його компонентів, особливо електроізоляційних систем та обмоток, які найбільше піддаються тепловому впливу, залежить від рівня навантаження або перевантаження.

Крім того, процеси перетворення електричної енергії у дослідних режимах, таких як неробочий хід (НХ) і коротке замикання (КЗ), відрізняються від роботи силового трансформатора під навантаженням. У режимі дослідного НХ задіяні лише обмотки, що підключені до джерела живлення, тоді як обмотки іншої сторони напруги розімкнені і не беруть участь у процесах перетворення енергії. Під час дослідного КЗ напруга на стороні живлення зазвичай значно менша за номінальні значення, а обмотки на іншій стороні замкнені. Тому магнітний потік не концентрується в магнітній системі трансформатора, у відміну від роботи силового трансформатора під навантаженням.

Таким чином цифрова тінь (ЦТО) не може відобразити усі процеси у силовому трансформаторі та їх взаємозв'язок. Через це для силових трансформаторів в умовах експлуатації є особливо важливим застосування цифрових двійників (ЦД). Завдяки ЦД можна визначити взаємодію контурів намагнічування і розсіювання під час навантаження СТ, а також локалізацію місць перегріву.

Для реалізації математичної моделі ЦД електромагнітних процесів у СТ у робочих режимах навантаження застосовувалися нестационарні рівняння у формулюваннях векторного магнітного потенціалу з математичною моделлю Джилса-Аттертона для гістерезисних характеристик електротехнічної сталі у з відповідними початковими і граничними умовами.

При роботі СТ під навантаженням для ЦД електромагнітних процесів бралися стаціонарні значення температур.

Геометрична просторова асиметрія плоских магнітних систем СТ обумовлює асиметрію і несинусоїдність трифазної системи струмів намагнічування при симетричному навантаженні.

Реалізація 3D ЦД симетрично навантаженого активними опорами трифазного СТ здійснювалася у структурі засобів ПО COMSOL Multiphysics.

Умовою завершення розрахунку було встановлення перехідного процесу, який виникає після підключення навантаженого СТ до джерела живлення.

Для забезпечення збіжності обчислень перехідних процесів по початковим умовам було реалізована модель живлення з регульованою напругою.

Дослідження ЦД навантажених масляних трифазних СТ з тристрижневими магнітними системами здійснювалося для напруги ВН 6,3 кВ, 20 кВ і 35 кВ. Валідація даних випробувань ЦД у режимі номінального активного навантаження була проведена шляхом дослідження ЦД трифазного сухого трансформатора класу напруги 0,4 кВ і лабораторними дослідженнями його роботи.

При лабораторних дослідженнях трансформатора здійснювалося осцилографування фазних струмів і напруг на сторонах ВН і НН, з одночасним вимірюванням струмів, напруг і активних потужностей трансформатора.

Порівняння даних дослідження ЦД і лабораторних випробувань показало, що при номінальному навантаженні відхилення між струмами ЦД і експериментально виміряні струмами не перевищували 0,42% і відповідали класу точності приладів вимірювання. Відхилення напруги склало 0,15%, активної потужності на ВН і НН – 0,45% і 0,49%.

Це підтверджує можливість застосування ЦД СТ для визначення експлуатаційного ресурсу і втрат ресурсу у процесі експлуатації.

Дослідження ЦД проводилися для симетричного навантаження СТ. За його результатами було визначено розподіли енергії магнітного поля в об'ємі бака трансформатора, визначено складові намагнічування у струмах живлення, їх гармонійний склад, електричні параметри ЦД СТ під навантаженням.

Для уточнення параметрів контурів намагнічування навантаженого СТ і гармонійного складу складової намагнічування у струмах СТ було проведено великі обсяги дослідження ЦД. Це дозволить розробити підходи для застосування у системах моніторингу та діагностики СТ.

ЦД дозволяють визначити розподіли питомих втрат у елементах обмоток СТ, для уточнення теплових режимів, визначення найбільш нагрітих елементів і стану ізоляції який визначає строк експлуатації.