

УДК 621.3.013.1

Кучерявий А.В.¹, Яримбаш Д.С.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² д-р техн. наук, проф НУ «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Активне впровадження високовольтних систем постійного струму для передачі енергії на великі відстані та інтеграції відновлюваних джерел обумовлює появу в силових трансформаторах паразитних постійних струмів, які призводять до їхнього насичення, зростання гармонік, локальних перегрівів, зниження ефективності, збільшенню ризику аварій та скороченню терміну служби обладнання. Геомагнітні збурення генерують постійні струми в землі, які протікають через заземлені нейтралі трансформаторів, призводячи до їх пошкоджень і аварій. Тому актуальної є потреба в розробці

точних моделей для прогнозування впливу геомагнітно індукованих струмів та розробки захисних заходів. Проблемою традиційних моделей трансформаторів є те, що вони використовують лінійні наближення магнітних опорів витoku та не враховують нелінійність при зсуві за постійним струмом, що може призводити до похибок при прогнозуванні гармонік, оцінці термічної стійкості трансформаторів, аналізі механічних напружень тощо.

Розвиток обчислювальних методів розв'язання диференціальних рівнянь та мультифізичного моделювання дозволяють враховувати нелінійність матеріалів, динаміку магнітних полів, взаємодію електричних, магнітних та теплових процесів.

Метою роботи була інтеграція методів скінченних елементів з електромагнітним моделюванням для динамічного розрахунку параметрів витoku.

Модель еквівалентного магнітного кола трансформатору складається з магніторушійних сил, які відображають впливи обмоток, опорів магнітопроводу, які розраховуються на основі нелінійних кривих намагнічування та опорів виток, які моделюють шляхи потоків через металеві частини.

Для обчислення магнітних опорів витoku використовувалась скінчено-елементна модель на основі рівнянь Максвелла для магнітного векторного потенціалу та електричного скалярного потенціалу. За результатами моделювання визначалась енергія магнітних витоків та еквівалентні опори витoku. Для моделювання зв'язку з електричною системою використовувалось інтегрування моделі трансформатора з еквівалентною схемою енергосистеми.

Дослідження проводились для трансформатору 250000 кВА / 330 кВ з постійним струмом 100 А.

За результатами моделювання було встановлено, що для досліджуваного трансформатору при врахуванні динамічних опорів витoku відбувається зміна спектру гармонік струму, зростає вміст непарних гармонік. Магнітні потоки у магнітопроводі практично не змінюються при цьому потік витoku стає більш спотвореним, через зростання енергії в шляхах витoku. Опори витoku зростають до 3 разів у порівнянні з лінійним наближенням.

Уточнений розрахунок енергії витоків дозволяє прогнозувати нагрів конструктивних елементів трансформатору та проводити аналіз вібрацій трансформаторів.

Запропонована модель із динамічними опорами витoku дозволяє підвищити точність аналізу зсуву за постійним струмом, особливо для ефектів, пов'язаних із потоками витoku. Інтеграція скінчено-елементного моделювання із системним моделюванням дозволяє враховувати нелінійність

матеріалів без значних витрат обчислювальних ресурсів. Результати моделювання підтвердили, що при зсувах за постійним струмом гармоніки залежать від динаміки опорів витоку, а енергія у магнітних витоках може суттєво зростати, що критично для оцінки термічної стійкості трансформатора.