

ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ОСЕРДЯ ТРАНСФОРМАТОРУ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Сгоров О. Б., Слєцька Г. О., Геращенко А. О.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Запропонований метод врахування нелінійної магнітної проникності осердя дозволяє врахувати внутрішні петлі гістерезису в магнітопроводі трансформатора. Це дає можливість отримати більш високу фізичну точність результатів розрахунків перехідних процесів, у порівнянні з лінійною моделлю зв'язаних індуктивностей.

Постановка проблеми. Методи розрахунків перехідних процесів, що застосовуються на практиці, у потужних трансформаторах не дозволяють із достатньою точністю одержати форми кривих струмів та напруги перехідних процесів при нелінійності навантажень і складних видах ушкоджень [1]. Звичайно при розрахунках перехідних процесів ведеться або якісний, або кількісний аналіз параметрів процесу, так значення струмів і напруг, симетричних складових, гармонійного состава сигналів струму й напруги, і не розглядається вся картина перехідного процесу в цілому, з урахуванням взаємного впливу магнітних властивостей магнітопроводу осердя [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Облік магнітних властивостей силового трансформатора є актуальним завданням для моделювання перехідних процесів в енергосистемі. Насичення й залишкова намагніченість осердя трансформатора суттєво проявляються при комутаціях і перехідних процесах у мережі. Це позначається, насамперед, в "кидках" струму намагнічування, що мають більшу амплітуду й тривалість [3], що приводить до підвищення навантаження на обмотки трансформатора. Моделювання трансформаторів на основі широко розповсюджених схем заміщення в силу значного числа допущень дає велику похибку при моделюванні перехідних процесів у СЕП. Такі схеми заміщення трансформаторів зручні для аналізу тільки статичних режимів СЕП. У роботі [4] описаний підхід, у якому враховується конфігурація магнітної системи силового трансформатора. Відповідно до застосованого підходу, магнітна система трансформатора представлена у вигляді магнітного ланцюга. Методика, описана в [4] не враховує властивості феромагнітного осердя, такі, як його магнітне насичення й гістерезисні явища. Облік нелінійної магнітної проникності осердя, при моделюванні перехідних процесів у трансформаторі, представлений у роботі [5]. Для моделювання перехідних процесів усередині трансформатора, потрібні додаткові рішення систем рівнянь, що негативно позначається на швидкості й продуктивності розрахунків.

Модель трансформатора, що запропонована в роботі, урахує в перехідних режимах роботи трансформатора нелінійне насичення й гістерезисні явища при переміщенні осердя. У моделі використовуються загальноприйняті для більшості моделей трансформаторів допущення: однорідність магнітного поля в системі та інші. [2, 6].

Мета статті. Таким чином, удосконалювання методів моделювання й розробка відповідної методики розрахунків перехідних процесів у силових трансформаторах з нелійними характеристиками магнітопроводів є актуальним завданням.

Основні матеріали дослідження. Для опису моделювання кривій намагнічування матеріалу осердя з урахуванням залишкової намагніченості застосована модель магнітного гістерезису Джайлса-Атертона. Модель заснована на описі кривої намагнічування диференціальним рівнянням. Представляється важливим, що методика враховує наявність внутрішніх петель гістерезису, що дозволяє уточнити результат у перехідних режимах.

Моделювання магнітного гістерезису по моделі Джайлса - Атертона розділяється на два основні етапи. У першому етапі розглядається безгістерезисна намагніченість. Потім, на другому етапі, гістерезис описується диференціальним рівнянням з урахуванням знака зміни напруженості магнітного поля H .

Безгістерезисна намагніченість - це значення намагніченості в матеріалі після процесу розмагнічування, що є нижчою постійною значення напруженості магнітного поля H . Однак, дані про безгістерезисну намагніченість для різних електротехнічних сталей відсутні в довідковій літературі.

У моделі Джайлса - Атертона безгістерезисна [7, 8] намагніченість у феромагнітних матеріалах моделюється аналогічно моделі намагніченості в парамагнітних матеріалах. Для парамагнітних матеріалів значення намагніченості може бути визначене за допомогою розподілу Больцмана напрямку магнітних доменів за наступним виразом

$$M_{nap} = M_s^0 \frac{\int_0^\pi e^{\frac{-Em(\theta)}{k_\beta T}} \sin(\theta) \cos(\theta) d(\theta)}{\int_0^\pi e^{\frac{-Em(\theta)}{k_\beta T}} \sin(\theta) d(\theta)} \quad (1)$$

де M_s – намагніченість насичення парамагнетика;
 Θ – кут між магнітним моментом і напрямком магнітного поля B ;

K_β – постійна Больцмана.

Енергія магнітного поля представлена виразом [9]:

$$Em(\theta) = -\mu_0 m_{ar} H \cos(\theta). \quad (2)$$

Для анізотропних феромагнітних матеріалів модель Джайлса – Атертона може бути розширена у формі, що дає значення безгістерезисної намагніченості матеріалу [10, 11]:

$$M_{nap} = Ms \frac{\int_0^\pi e^{E(1)+E(2)} \sin(\theta) \cos(\theta) d(\theta)}{\int_0^\pi e^{E(1)+E(2)} \sin(\theta) d(\theta)} \quad (3)$$

$$\text{де } E(1) = \frac{H_g}{a} \cos(\theta) - \frac{K_{an}}{Ms\mu_0 a} \sin^2(\psi - \theta); \quad (4)$$

$$E(2) = \frac{H_g}{a} \cos(\theta) - \frac{K_{an}}{Ms\mu_0 a} \sin^2(\psi + \theta). \quad (5)$$

У цьому випадку K_{an} це середня щільність енергії пов'язана з неосьювою анізотропією в магнітному матеріалі й ψ – кут між напрямком магнітного поля й віссю намагнічування матеріалу при анізотропії.

Висновки. Модель трансформатора з урахуванням фізичних особливостей осердя краща для науково-дослідних цілей, оскільки дає більш високу фізичну точність результатів, у порівнянні з лінійною моделлю із зв'язаних індуктивностей. Її істотний недолік при використанні для прикладних цілей полягає обов'язковій вимозі завдання параметрів магнітної системи трансформатора, які не є паспортними даними й потребують додаткового уточнення.

Облік гістерезису в матеріалі осердя дозволяє врахувати втрати на перемагнічування матеріалу й викривлення форми сигналу при насиченні осердя. Запропонований даний метод дозволяє врахувати внутрішні петлі гістерезису. Це дає можливість більш повно розглядати перехідні процеси при різних амплітудах і формах вхідних сигналів, одержати більш достовірні результати розрахунків перехідних процесів в електроенергетичних системах.

Список використаних джерел

1. Єгоров О. Б. До питання розрахунку динамічних режимів електричної системи / О. Б. Єгоров // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – Вип.4(26). – С. 172-174
2. Крючков И. П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учеб. для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев и др. – М: МЭИ, 2008. – 416 с.
3. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
4. Лурье А. И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание / А. И. Лурье // Электротехника. – 2008. – №2. – С. 2-18
5. Дмитриев М. В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной

системы / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – №2. – С. 37-48.

6. Зирка С. Е. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода / С. Е. Зирка, Ю. И. Мороз, Е. Ю. Мороз, А. Л. Тарчуткин // Техническая электродинамика. – № 2. – 2010. – С. 11-20.

7. Soda N. Improvement of T-joint part constructions in three-phase transformer cores by using direct loss analysis with E&S model / N. Soda, M. Enokizono // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – Т. 36. – №. 4. – С. 1285-1288.

8. Mechler G. E. Magnetic flux distributions in transformer core joints / G. E. Mechler, R. S. Girgis // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Т. 15. – №. 1. – С. 198-203.

9. Moses P. S. Dynamic modeling of three-phase asymmetric power transformers with magnetic hysteresis: No-load and inrush conditions / P. S. Moses, M. A. S. Masoum, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2010. – Т. 25. – №. 4. – С. 1040-1047.

10. Tziouvaras D. A. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers / D. A. Tziouvaras // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Т. 15. – №. 1. – С. 62-72.

11. Dolinar M. A Three-phase core-type transformer iron core model with included magnetic cross saturation / M. A. Dolinar // IEEE transactions on magnetics. – 2006. – Т. 42. – №. 10. – С. 2849-2851.

Аннотация

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Егоров А. Б., Елецкая А. А., Геращенко А. А.

Предложенная методика учета нелинейности магнитной проводимости сердечника позволяет учитывать внутренние петли гистерезиса в магнитопроводе трансформатора. Это дает возможность получить большую физическую точность результатов расчетов переходных процессов, по сравнению с линейной моделью связанных индуктивностей.

Abstract

ACCOUNT OF NONLINEARITY OF MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE TRANSFORMER CORE WITH MODELING TRANSITION PROCESSES

A. Yegorov, A. Yeletskaia, A. Gerashenko

The proposed method for taking into account the nonlinearity of the magnetic conductivity of the core allows one to take into account internal hysteresis loops in the magnetic circuit of the transformer. This makes it possible to obtain greater physical accuracy of the results of the calculations of transient processes, in comparison with the linear model of coupled inductances.