

О.Ю. КИМСТАЧ, І.М. ІЛЛЯШЕНКО, А.О. ЖЕЖЕЛО
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З УРАХУВАННЯМ АСИМЕТРІЇ МАГНІТОПРОВОДУ

В роботі запропоновано математичну модель трифазного планарного трансформатора стрижневої конструкції, яка враховує асиметрію магнітної системи. Математична модель побудована на основі трьохосової моделі узагальненої електричної машини, яка відрізняється широким визнанням та характеризується високим рівнем адекватності. Використано уточнений варіант моделі, котрий враховує втрати потужності у магнітопроводі. На основі запропонованої математичної моделі проаналізовані розрахункові перехідні процеси для трансформатора потужністю 63 кВА і напругою 6/0,4 кВ. Встановлено, що максимальна різниця, яку вносить врахування асиметрії магнітної системи трансформатора, становить 5...6 % при вмиканні його на повне навантаження.

Ключові слова: математична модель, трансформатор, асиметрія, магнітопровід.

O.YU. KIMSTACH, I.M. ILLIASHENKO, A.O. ZHEZHELO
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

MATHEMATICAL MODELING OF A THREE-PHASE TRANSFORMER TAKING INTO ACCOUNT A MAGNETIC CORE ASYMMETRY

The paper analyses the aspects of modelling the operation of a three-phase core-type transformer. The features of the magnetic system construction of the transformer, which generate asymmetry, are disclosed. The fundamentals and methods for modelling a transformer in dynamic modes are considered. The main purpose of the paper is to research the influence of taking into account the asymmetry of the transformer magnetic core on its dynamic model. The paper proposes the mathematical model of a three-phase planar core-type transformer, which takes into account the asymmetry of the magnetic core. The mathematical model is based on the model of a generalized electric machine in the ABC axes, which is widely recognized and characterized by a high level of adequacy. A refined model, which takes into account the power losses in the magnetic core, has used. As is well known, such a model is characterized by higher accuracy and adequacy in the calculation of transient processes. For the proposed mathematical model, a comparative analysis of the calculated curves of transient processes for a 63 kVA transformer with a voltage of 6 / 0.4 kV is made. To disclose the effect of taking into account the magnetic core asymmetry of the transformer in the mathematical model, the current differences were calculated in pu for the modes of switching on at full power and three-phase short circuit. These modes are the most common and indicative in the analysis of the operability and stability of transformers. It was found that the most significant difference, which is obtained by taking into account the magnetic system asymmetry of the transformer, is 5...6% when it is switched on at full load. Thus, the relatively simple transformations and updating of the mathematical model of the transformer allow significantly increase its adequacy. The proposed mathematical model can be more effectively used when the non-typical design of three-phase transformers or reactors with significant asymmetry of the magnetic core is considered.

Keywords: mathematical model, transformer, asymmetry, magnetic core.

Постановка проблеми

Будова сучасних систем електропостачання неможлива без використання трансформаторних підстанцій [1]. Вони використовуються для перетворення кількості фаз, зміни величини напруги, гальванічного розв'язування електричних кіл, покращення показників якості електричної енергії та ін. Трансформаторні підстанції найбільш важливі та коштовні елементи сучасних електроенергетичних систем [2], вони працюють у статичних та динамічних режимах, які можуть бути викликані нормальними явищами (зміна схеми електропостачання, комутація споживачів, регулювання напруги та ін.) та аварійними ситуаціями (обрив дроту, коротке замкнення, перевантаження та ін.). Найбільш небезпечними являються динамічні режими, які характеризуються значними сплесками струму та напруги, що, в свою чергу, може стати причиною ушкодження коштовного електрообладнання та порушення електропостачання. Тому дослідження динамічних режимів роботи трансформаторних підстанцій, яке потребує застосування досконалих математичних моделей і методів моделювання, традиційно являється актуальним питанням.

Основним інструментом для моделювання трансформаторів у динамічних режимах являється математична модель (ММ), яка побудована на основі моделі узагальненої електричної машини [3]. Але вона має достатньо багато припущень, серед яких – відсутність врахування магнітних втрат потужності, але його можна усунути, якщо застосовувати вдосконалену ММ [4, 5]. Інше важливе припущення – повна симетрія конструкції й параметрів трансформатора, але це відповідає лише трансформаторам з рамним (просторовим) магнітопроводом [6–8]. Для найбільш поширених трансформаторів планарної конструкції [6], які мають асиметрію магнітної системи, котра призводить до асиметрії параметрів та характеристик трансформаторів за фазами, таке припущення може вносити суттєву помилку в результат моделювання. Тому доцільно дослідити вплив останнього припущення на результат математичного моделювання динамічних режимів планарних трансформаторів.

Аналіз останніх джерел

Асиметрія магнітопроводів планарних трансформаторів призводить до негативних явищ у системах електропостачання: перекосу навантаження, яке викликає додаткові втрати потужності [9]; різнобічної величини перекручення синусоїди струмів за фазами, яка досягає приблизно 25 % [10]; появи зворотної

послідовності, котра для струму холостого ходу досягає майже 20 % [10]. Тому можна припустити, що врахування асиметрії у ММ трансформатора призведе до суттєвого результату при аналізі динамічних режимів.

Більшість досліджень щодо врахування асиметрії магнітної системи трансформатора виконувалися традиційно для статичних режимів роботи [6, 9], а в динамічних ММ це зазвичай призводило до значного її ускладнення, тому з урахуванням достатньо низької точності звичайних ММ знехтування асиметрією магнітопроводу вважалось нормальним явищем, але існують і протилежні випадки. Так в роботі [11] виконано за допомогою просторових векторів аналіз картини асиметричного магнітного поля трансформатора, але це дуже складна ММ, яка придатна для вирішення зазначеної в [11] задачі та достатньо складна для загального аналізу роботи трансформатора у складі систем електропостачання.

Значна кількість досліджень щодо моделювання роботи трансформаторів базується на застосуванні прикладних програмних рішень: Comsol Multiphysics [11], MatLab Simulink [12], ANSYS Maxwell [13] та ін. З одного боку це спрощує побудову досліджень, за рахунок вбудованих ММ та методів їх розрахунку, а з іншого – вносять обмеження та зменшують можливості проведення нестандартних досліджень.

Важливим моментом визначення шляхів та засобів дослідження є обрання відповідної ММ. Для аналізу динамічних режимів роботи трансформатора в основному застосовуються ММ на основі рівнянь Кирхгофа [7] або рівнянь узагальненої електричної машини [3]. Останні ММ можна побудувати у двох осях [3, 4] або у трьох осях [3].

Як відомо, ММ трансформатора і асинхронного двигуна споріднені, а при загальмованому роторі взагалі співпадають, тому окремі нароби та підходи з дослідження динамічних режимів асинхронних машин можна використати при дослідженні трансформаторів. Так при аналізі роботи електричної машини в динамічному режимі при несинусоїдальних струмах [14] або при неповнофазному режимі [15] більш прийнятними для використання являються трьохосьові ММ. А взагалі перехід від ММ в двох осях до ММ в трьох осях або навпаки для струму і напруги наведено у роботах [3, 16]. Можна спочатку обрати вектори, які зображають зміну струму і напруги, а потім його розкласти на складові за відповідними осями, як це показано у [17]. Враховуючі, що більшість силових трансформаторів в системах електропостачання трифазні, доцільно для аналізу впливу асиметрії магнітної системи трансформатора на його динамічні характеристики обрати трьохосьову ММ в осях *ABC*.

Метою роботи є дослідження впливу врахування асиметрії магнітної системи планарних трансформаторів на їх динамічні характеристики.

Виклад основного матеріалу

Асиметрія магнітопроводу планарного трансформатора обумовлена різною довжиною силової лінії основного магнітного потоку для середнього та крайніх стрижнів [6]. Це викликає різницю струмів холостого ходу для відповідних фаз трансформатора. Врахування асиметрії магнітної системи трансформатора можна шляхом визначення і врахування різниці взаємної індуктивності для обмоток кожної фази та між фазами трансформатора.

Розглядається стрижневий тип трансформатора, як найбільш простий і більш затребуваний для основної кількості поширених трансформаторів малої та середньої потужності. Приймаються наступні позначення для трансформатора: крайні стрижні відповідають фазам *A* і *C*, а середній стрижень фазі *B*.

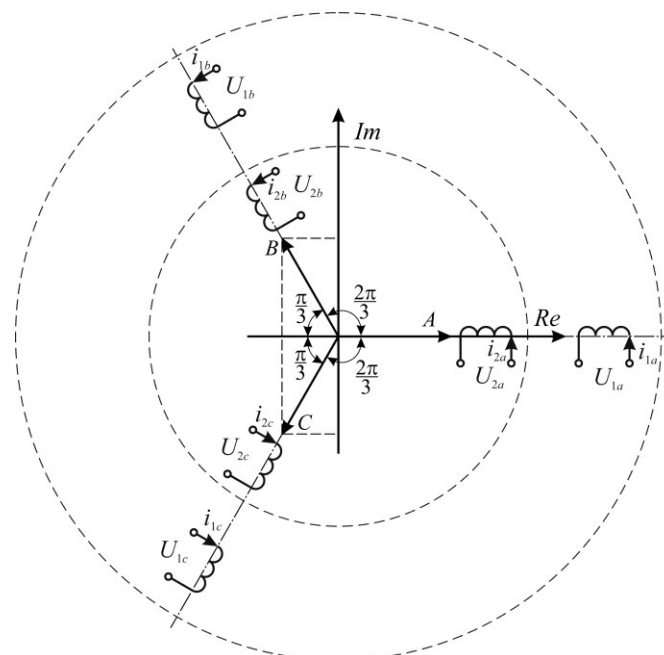


Рис. 1. Трьохосьова математична модель трансформатора

Для взаємної індуктивності обмоток приймаються наступні позначення:

- між середнім і крайнім стрижнями $M_{AB} = M_{BA} = M_{CB} = M_{BC}$, приймаються у подальших розрахунках рівними M_{AB} ;
- між крайніми стрижнями $M_{AC} = M_{CA}$ і для крайніх стрижень $M_A = M_C$, приймаються у подальших розрахунках рівними M_A ;
- для середнього стрижня M_B .

Слід зазначити, що розрахунок виконується у відносних одиницях за базовими величинами, визначення котрих наведено у [4], а відповідно індуктивні опори й індуктивності мають однакові значення у відносних одиницях.

Схематичний вигляд ММ трансформатора в осях ABC наведено на рис. 1, де ось A і дійсна ось співпадають, але таке рішення не є обов'язковим, хоча і спрощує формування ММ.

Відповідно ММ в осях ABC [3] побудовано системи рівнянь:

- для поточкозчеплень

$$\begin{cases} \Psi_{1a} = L_{1A}i_{1a} - 0.5M_{AB}i_{1b} - 0.5M_{AC}i_{1c} + M_Ai_{2a} - 0.5M_{AB}i_{2b} - 0.5M_{AC}i_{2c}; \\ \Psi_{1b} = L_{1B}i_{1b} - 0.5M_{AB}i_{1a} - 0.5M_{AC}i_{1c} + M_Bi_{2b} - 0.5M_{AB}i_{2a} - 0.5M_{AC}i_{2c}; \\ \Psi_{1c} = L_{1C}i_{1c} - 0.5M_{AB}i_{1b} - 0.5M_{AC}i_{1a} + M_Ai_{2c} - 0.5M_{AB}i_{2b} - 0.5M_{AC}i_{2a}; \\ \Psi_{2a} = L_{2A}i_{2a} - 0.5M_{AB}i_{2b} - 0.5M_{AC}i_{2c} + M_Ai_{1a} - 0.5M_{AB}i_{1b} - 0.5M_{AC}i_{1c}; \\ \Psi_{2b} = L_{2B}i_{2b} - 0.5M_{AB}i_{2a} - 0.5M_{AC}i_{2c} + M_Bi_{1b} - 0.5M_{AB}i_{1a} - 0.5M_{AC}i_{1c}; \\ \Psi_{2c} = L_{2C}i_{2c} - 0.5M_{AB}i_{2b} - 0.5M_{AC}i_{2a} + M_Ai_{1c} - 0.5M_{AB}i_{1b} - 0.5M_{AC}i_{1a}, \end{cases} \quad (1)$$

де повні індуктивності для обмоток обчислюються за формулами [3]:

$$\begin{aligned} L_{1A} &= L_{1C} = L_{1\sigma} + M_A; \\ L_{1B} &= L_{1\sigma} + M_B; \\ L_{2A} &= L_{2C} = L_{2\sigma} + M_A; \\ L_{2B} &= L_{2\sigma} + M_B, \end{aligned} \quad (2)$$

де $L_{1\sigma}$ і $L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток у в.о.;

- для кіл обмоток

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{1a}}{dt} = U_{1a} - r_1 \cdot i_{1a} + \frac{\Psi_{1b} - \Psi_{1c}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1a} + i_{2a} - 0.5 \cdot (i_{1b} + i_{2b} + i_{1c} + i_{2c})]; \\ \frac{d\Psi_{1b}}{dt} = U_{1b} - r_1 \cdot i_{1b} + \frac{\Psi_{1c} - \Psi_{1a}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1b} + i_{2b} - 0.5 \cdot (i_{1a} + i_{2a} + i_{1c} + i_{2c})]; \\ \frac{d\Psi_{1c}}{dt} = U_{1a} - r_1 \cdot i_{1a} + \frac{\Psi_{1a} - \Psi_{1b}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1c} + i_{2c} - 0.5 \cdot (i_{1b} + i_{2b} + i_{1a} + i_{2a})]; \\ \frac{d\Psi_{2a}}{dt} = -r_2 \cdot i_{2a} + \frac{\Psi_{2b} - \Psi_{2c}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1a} + i_{2a} - 0.5 \cdot (i_{1b} + i_{2b} + i_{1c} + i_{2c})]; \\ \frac{d\Psi_{2b}}{dt} = -r_2 \cdot i_{2b} + \frac{\Psi_{2c} - \Psi_{2a}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1b} + i_{2b} - 0.5 \cdot (i_{1a} + i_{2a} + i_{1c} + i_{2c})]; \\ \frac{d\Psi_{2c}}{dt} = -r_2 \cdot i_{2a} + \frac{\Psi_{2a} - \Psi_{2b}}{\sqrt{3}} - r_m [i_{1c} + i_{2c} - 0.5 \cdot (i_{1b} + i_{2b} + i_{1a} + i_{2a})]; \end{cases} \quad (3)$$

де r_1 – активний опір первинної обмотки у в.о.; r_2 – сума активних зведених опорів вторинної обмотки трансформатора та навантаження у в.о.; r_m – активний опір гілки намагнічування заступної схеми трансформатора у в.о.

Для практичного застосування ММ система рівнянь (1) розв'язується для струмів

$$\left\{ \begin{aligned} i_{1a} &= \frac{s_{ac}\Psi_{1a} + A \cdot M_{AB}x_b\Psi_{1b} + Cx_b\Psi_{1c} + s_r\Psi_{2a} + A \cdot M_{AB}b_x\Psi_{2b} + Cb_x\Psi_{2c}}{-A \cdot B \cdot x_1}; \\ i_{1b} &= \frac{M_{AB}x_b\Psi_{1a} + s_b\Psi_{1b} + M_{AB}x_b\Psi_{1c} + M_{AB}b_x\Psi_{2a} + b_r\Psi_{2b} + M_{AB}b_x\Psi_{2c}}{-B \cdot x_1}; \\ i_{1c} &= \frac{Cx_b\Psi_{1a} + A \cdot M_{AB}x_b\Psi_{1b} + s_{ac}\Psi_{1c} + Cb_x\Psi_{2a} + A \cdot M_{AB}b_x\Psi_{2b} + s_r\Psi_{2c}}{-A \cdot B \cdot x_1}; \\ i_{2a} &= \frac{-r_{ac}\Psi_{1a} - A \cdot M_{AB}x\Psi_{1b} - Cx\Psi_{1c} - r_{ca}\Psi_{2a} - A \cdot M_{AB}x_1^2\Psi_{2b} - Cx_1^2\Psi_{2c}}{A \cdot B}; \\ i_{2b} &= \frac{M_{AB}x\Psi_{1a} - b_s\Psi_{1b} + M_{AB}x\Psi_{1c} + M_{AB}x_1^2\Psi_{2a} + r_b\Psi_{2b} + M_{AB}x_1^2\Psi_{2c}}{-B}; \\ i_{2c} &= \frac{-Cx\Psi_{1a} - A \cdot M_{AB}x\Psi_{1b} - r_{ac}\Psi_{1c} - Cx_1^2\Psi_{2a} - A \cdot M_{AB}x_1^2\Psi_{2b} - r_{ca}\Psi_{2c}}{A \cdot B} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де використані наступні коефіцієнти

$$\begin{aligned} A &= 3M_a(x_1 + x_2) + 2x_1x_2; \\ B &= (M_{ab}^2 - M_aM_b)(x_1 + x_2)^2 - 2x_1^2x_2^2 - (M_a + 2M_b)(x_1 + x_2)x_1x_2; \\ C &= 2M_ax_1x_2 + (x_1 + x_2)(M_{ab}^2 + 2M_aM_b); \\ s_{ac} &= 3BM_ax_2 - AB + Cx_2^2x_1; \\ s_b &= Cx_2 - B - AM_bx_2 - 2M_ax_2^2x_1; \\ s_r &= AB - 3BM_ax_2 - 2Bx_1x_2 + Cx_2x_1^2; \\ x_b &= x_2^2x_1; \\ x &= x_2x_1; \\ r_{ca} &= Cx_1^2 - B(3M_a + 2x_1); \\ r_{ac} &= 3BM_a + Cx_2x_1; \\ b_r &= B - Cx_2 + AM_bx_2 + Ax_1x_2 - 2M_ax_2x_1^2; \\ b_x &= x_2x_1^2; \\ b_s &= M_bA - C + 2M_ax_1x_2; \\ r_b &= M_bA - C + Ax_1 - 2M_ax_1^2, \end{aligned} \quad (5)$$

де x_1 – індуктивний опір первинної обмотки у в.о.; x_2 – сума індуктивних зведених опорів вторинної обмотки трансформатора та навантаження у в.о.

За системами рівнянь (3)-(5) будується ММ трансформатора з урахуванням асиметрії магнітної системи, звичайна ММ трансформатора може бути отримана з наведеної, якщо задати параметри взаємної індуктивності однаковими за всіма осями.

Для аналізу результатів моделювання використовуються повні первинний і вторинний струми, які розраховуються за відповідними формулами:

- для первинного струму

$$I_1 = \sqrt{\left(i_{1a} - \frac{i_{1b}}{2} - \frac{i_{1c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1c}\right)^2}; \quad (6)$$

- для вторинного струму

$$I_2 = \sqrt{\left(i_{2a} - \frac{i_{2b}}{2} - \frac{i_{2c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_{2b} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{2c}\right)^2}. \quad (7)$$

В якості прикладу розрахунку для порівняльного аналізу використано спроектований стрижневий трансформатор потужністю 63 кВА на напругу 6/0,4 кВ.

На рис. 2 наведені перехідні характеристики для повного (вектору відображення) та осьових складових первинного струму трансформатора при вмиканні на повне навантаження, які розраховані за двома ММ з (струми зі штрихом) та без врахування асиметрії магнітопроводу. Для повного струму різниця декілька менше проявляється ніж для складових за відповідними осями, але слід зазначити, що при врахуванні асиметрії магнітної системи спостерігається збільшення максимумів струму, а цей фактор слід враховувати при налаштуванні захисної апаратури трансформаторної підстанції.

Для кількісної оцінки різниці у динамічних характеристиках трансформатора за рахунок врахування асиметрії магнітної системи використовуються процентні різниці первинних та вторинних струмів, які

розраховуються за наступними формулами:

- для первинного струму

$$\Delta I_1 = |I_1 - I'_1| \cdot 100\% ; \tag{8}$$

- для вторинного струму

$$\Delta I_2 = |I_2 - I'_2| \cdot 100\% . \tag{9}$$

Відповідно (8) і (9) процентне значення різниці розраховується відносно номінального значення струму, яке прийняте за базове значення.

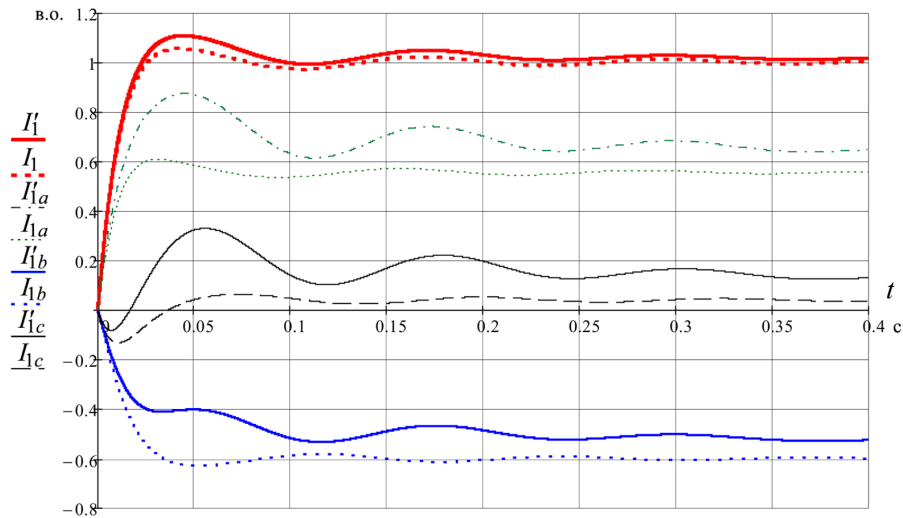


Рис. 2. Перехідні характеристики для первинного струму трансформатора при вмиканні на повне навантаження, розраховані за двома математичними моделями

Порівняння результатів моделювання виконується для двох випадків (рис. 3): вмикання при повному навантаженні; трифазне коротке замкнення, що сталося при роботі на повне навантаження.

Перший випадок являється найбільш важким та розповсюдженим нормальним режимом роботи, а другий – самий тяжкий приклад аварійної ситуації [18, 19]. При розгляді режиму короткого замкнення іноді виконується перерахунок взаємної індуктивності для обмоток [20], але у даному випадку це не виконується.

Розраховані за (8) і (9) різниці для первинних і вторинних струмів наведено на рис. 3. Вони показують, що при вмиканні на повне навантаження (рис. 3, а) спостерігається максимальне розходження первинного струму у 5,3 %, при цьому вторинний струм майже не має різниці.

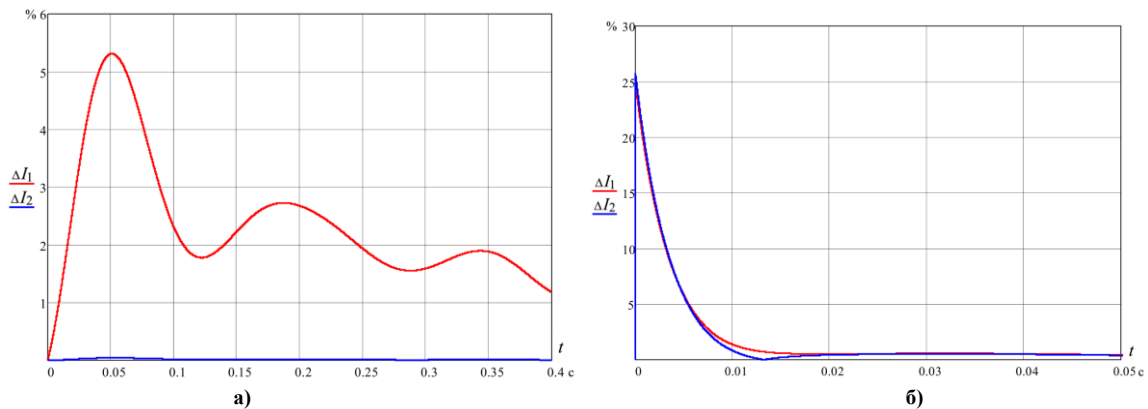


Рис. 3. Різниця первинних і вторинних повних струмів трансформатора: а) при вмиканні на повне навантаження; б) в режимі короткого замкнення

При короткому замкненні (рис. 3, б) спостерігається приблизно однакова різниця для первинного і вторинного струмів, яка максимально проявляється на початку перехідного процесу і досягає величини більше 25 % номінального струму, але порівняно зі струмом короткого замкнення, котрий більше номінального у десятки разів така різниця стає менш вагомою.

В обох режимах можна помітити, що при поступовому затуханні перехідного процесу різниця зменшується, що додатково свідчить про адекватність наведеної ММ.

Запропонована ММ показала, що при незначному ускладненні можна значно розширити можливості моделювання нестандартних конструктивних схем або аварійних режимів трансформаторів, які передбачають наявність асиметрії магнітної системи. Отримані результати моделювання для підвищення їх достовірності доцільно перевірити за допомогою експериментальних досліджень на прикладі декількох

типорозмірів трансформаторів, але враховуючі їх математичне обґрунтування та адекватну поведінку ММ при моделюванні, можна стверджувати про високий рівень достовірності викладених положень.

Наведену методику врахування асиметрії магнітної системи трансформатора при математичному моделюванні можна використати і для інших типів трансформаторів.

Висновки

Запропонована ММ трансформатора, яка враховує асиметрію магнітної системи планарного стрижневого трансформатора, має всі ознаки адекватної моделі. Її застосування надає можливість усунути припущення знехтуванням асиметрією магнітопроводу, яка має вагомість на рівні 5...6 %.

Література

1. Kimstach, O. Yu. Definition of Optimal Structure of Power Network/ Problemele energeticii regionale, 1 (39), 2019, pp. 22–33.
2. Yasid N. F. M., Alawady A. A., Yousof M. F. M., Talib M. A., Kamarudin M. S. The Effect of short circuit fault in three-phase core-typed transformer. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 409–416. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp409-416
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И.П. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
4. Кімстач О.Ю. Урахування магнітних втрат потужності при моделюванні перехідних процесів у трансформаторах / О.Ю. Кімстач, В.О. Загурський // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон : ХНТУ, 2018. – Вип. 2 (65) – С. 182–189.
5. Пустоветов М. Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора / М. Ю. Пустоветов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – № 321 (4). – С. 97–100.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / Тихомиров П.М. – М. : Энергия, 1976. – 544 с.
7. Рогинская Л.Э. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами / Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Том 14, № 4. – С. 76–83.
8. Мазуренко А.А. Исследование магнитного режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции / А.А. Мазуренко, Е.Т. Смирнов // Наука и техника. – 2017. – 16(2). – С. 171–176. – URL : <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176>
9. Орлов А.И. Снижение потерь в трехфазных трансформаторах при выравнивании несимметричной нагрузки / А.И. Орлов, С.В. Волков, А.А. Савельев // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № (1). – С. 52–60.
10. Дивчук Т.Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т.Е. Дивчук, Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник, М.И. Коцур, Ю.С. Безверхняя // Электротехника та електроенергетика. – (2017). – № 2. – С. 56–66. – DOI: 10.15588/1607-6761-2017-2-6
11. Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Kylymnyk I.M. Electromagnetic Processes Simulation of Power Transformers in Operation and in No-load Modes. Problemele Energeticicii Regionale: 2020, 1(45) pp. 1–13. DOI: 10.5281/zenodo.3713396
12. Тихонов А.И. Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № (1). – С. 22–31.
13. Modaragamage MDCD, Aarabi S., Liyanage HKY, Senevirathne H. and Lucas JR. Effect of size and position of pin holes on transformer core loss. KDU IRC 2020 (13th International Research Conference). 2020, pp. 150–158. ISBN 978-624-5574-14-8.
14. Коршунов А. Математическая модель асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором, не использующая понятие вращающегося магнитного поля / А. Коршунов // Силовая электроника. – 2019. – № 6. – С. 12–19.
15. Однокопылов Г.И. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – № 323 (4). – С. 133–137.
16. Ahmed Ibrahim jaber, Husham Idan Hussein “Mathematical driving model of three phase induction motors in stationary coordinate frame” *Diyala Journal of Engineering Sciences*, No. 4, Vol. 8, Special Issue, 2015, pp. 255–265.
17. Нго С.К. Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя / С.К. Нго, Н.И. До, Х.А. Зьонг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № (3). – С. 221–228.
18. Кімстач О.Ю. Коротке замкнення між витками обмоток трансформатора / О.Ю. Кімстач, А.О. Жежело, О.В. Агафонов // Актуальные научные исследования в современном мире. Переяслав-

Хмельницький, 2019. – Вып. 6(50), ч. 6. – С. 29–34.

19. Гусев А.С. Универсальная математическая модель силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – № 311 (4). – С. 77–81.

20. Anil Kumar, Ajay Rathore, Ashish Patra. Analysis of Power Transformer using fuzzy expert and neural network system. International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, Issue 5, May 2012, pp. 487–492.

References

1. Kimstach, O. Yu. Definition of Optimal Structure of Power Network/ Problemele energeticii regionale, 1 (39), 2019, pp. 22–33.
2. Yasid N. F. M., Alawady A. A., Yousof M. F. M., Talib M. A., Kamarudin M. S. The Effect of short circuit fault in three-phase core-typed transformer. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 409–416. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp409-416
3. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin / Kopylov I.P. – М. : Vyssh. shk., 2001. – 327 s.
4. Kimstach O.Iu. Urakhivannia mahitnykh vtrat potuzhnosti pry modeliuванні perekhidnykh protsesiv u transformatorakh / O.Iu. Kimstach, V.O. Zahurskyi // Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Kherson : KhNTU, 2018. – Vyp. 2 (65) – S. 182–189.
5. Pustovetov M. Yu. Matematicheskaya model trehfaznogo transformatora / M. Yu. Pustovetov // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2012. – № 321 (4). – S. 97–100.
6. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov : ucheb. posobie dlya vuzov / Tihomirov P.M. – М. : Energiya, 1976. – 544 s.
7. Roginskaya L.E. Imitacionnoe modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie trehfaznogo transformatora s vitymi lentochnymi ploskimi i prostranstvennymi magnitoprovodami / L.E. Roginskaya, D.V. Gusakov // Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika». – 2014. – Tom 14, № 4. – S. 76–83.
8. Mazurenko A.A. Issledovanie magnitnogo rezhima trehfaznogo transformatora s simmetrichnym magnitoprovodom ramnoj konstrukcii / A.A. Mazurenko, E.T. Smirnov // Nauka i tehnika. – 2017. – 16(2). – S. 171–176. – URL : <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176>
9. Orlov A.I. Snizhenie poter v trehfaznykh transformatorah pri vyravnavanii nesimmetrichnoj nagruzki / A.I. Orlov, S.V. Volkov, A.A. Savelev // Vestnik Chuvashskogo universiteta. – 2018. – № (1). – S. 52–60.
10. Divchuk T.E. Podhod k opredeleniyu tokov holostogo hoda silovykh trehfaznykh transformatorov s ploskimi sterzhnevymi magnitnymi sistemami / T.E. Divchuk, D.S. Yarymbash, S.T. Yarymbash, I.M. Kilimnik, M.I. Kocur, Yu.S. Bezverhnyaya // Elektrotehnika ta elektroenergetika. – (2017). – № 2. – S. 56–66. – DOI: 10.15588/1607-6761-2017-2-6
11. Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Kylymnyk I.M. Electromagnetic Processes Simulation of Power Transformers in Operation and in No-load Modes. Problemele Energeticii Regionale: 2020, 1(45) pp. 1–13. DOI: 10.5281/zenodo.3713396
12. Tihonov A.I. Razrabotka nelinejnoj modeli trehfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoj sistemy na rabotu ustrojstva v proizvolnykh rezhimakh / A.I. Tihonov, A.V. Stulov, A.A. Karzhev, A.V. Podobnyj // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2020. – № (1). – S. 22–31.
13. Modaragamage MDCCD, Aarabi S., Liyanage HKY, Senevirathne H. and Lucas JR. Effect of size and position of pin holes on transformer core loss. KDU IRC 2020 (13th International Research Conference). 2020, pp. 150–158. ISBN 978-624-5574-14-8.
14. Korshunov A. Matematicheskaya model asinhronnogo trehfaznogo dvigatelya s faznym rotorom, ne ispolzuyushaya ponyatie vrashayushegosya magnitnogo polya / A. Korshunov // Silovaya elektronika. – 2019. – № 6. – S. 12–19.
15. Odnokopylov G.I. Matematicheskaya model asinhronnogo dvigatelya v nepolnofaznom rezhime raboty / G.I. Odnokopylov, A.D. Bragin // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2013. – № 323 (4). – S. 133–137.
16. Ahmed Ibrahim jaber, Husham Idan Hussein “Mathematical driving model of three phase induction motors in stationary coordinate frame” Diyala Journal of Engineering Sciences, No. 4, Vol. 8, Special Issue, 2015, pp. 255–265.
17. Ngo S.K. Modelirovanie elektroprivoda s chastotnym upravleniem asinhronnogo dvigatelya / S.K. Ngo, N.I. Do, H.A. Zyong // Izvestiya Tulsckogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2014. – № (3). – S. 221–228.
18. Kimstach O.Iu. Korotke zamknennia mizh vytkamy obmotok transformatora / O.Iu. Kimstach, A.O. Zhezhelo, O.V. Ahafonov // Aktualnye nauchnye yssledovaniya v sovremennom myre. Pereiaslav-Khmelnytskyi, 2019. – Вып. 6(50), ч. 6. – С. 29–34.
19. Gusev A.S. Universalnaya matematicheskaya model silovykh trehfaznykh transformatorov i avtotransformatorov / A.S. Gusev, S.V. Svechkar, I.L. Plodistyj // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2007. – № 311 (4). – С. 77–81.
20. Anil Kumar, Ajay Rathore, Ashish Patra. Analysis of Power Transformer using fuzzy expert and neural network system. International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, Issue 5, May 2012, pp. 487–492.

Надійшла/Paper received : 13.03.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.