

ТЕОРІЯ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ І СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Виявлена недостатньо висока ефективність використання структур відомих схем заміщення лінійного трансформатора, який досліджено за допомогою теорії чотириполосників, що дозволяє визначити коефіцієнти А-форми запису рівнянь чотириполосника, знайти комплексні опори Т-образної схеми заміщення, що є і схемою заміщення трансформатора, однозначно відповідною електромагнітним процесам.

Вьявлена недостаточно высокая эффективность использования структур известных схем замещения линейного трансформатора, который исследован с помощью теории четырёхполосников, позволяющей определить коэффициенты А-формы записи уравнений четырёхполосника, найти комплексные сопротивления Т-образной схемы замещения, являющейся и схемой замещения трансформатора, однозначно соответствующей электромагнитным процессам.

ВСТУП

Трансформатором є статичний пристрій, що призначається для перетворення електромагнітної енергії змінного струму з одним співвідношенням напруги і струму в електричну енергію змінного струму з іншим співвідношенням цих величин. Трансформатор ізолює в електричному відношенні один електричне кола (первинну обмотку) від іншого (вторинної), зберігаючи можливість передачі електромагнітної енергії. Включення трансформатора між джерелом і приймачем енергії дозволяє здійснити їх узгодження.

Передача електромагнітної енергії з первинної обмотки у вторинну здійснюється за допомогою магнітного поля, точніше потоком взаємної індукції, створюваного струмами обох обмоток. Даний потік зростає, якщо обмотки трансформатора надіті на загальний феромагнітний сердечник, що може привести до нелінійних ефектів. Проте, основні риси робочого режиму, як енергетичних трансформаторів, так і трансформаторів вимірювальних пристроїв достатньо точно виявляються при розрахунках, що припускають лінійність. Нелінійність трансформаторів енергетичних мереж позначається практично тільки в режимах холостого ходу і деяких аномальних режимах [1].

Методи заміни дійсного електричного кола трансформатора еквівалентним колом з усуненими індуктивними зв'язками знаходять широке застосування в практичних розрахунках. Отже, еквівалентні схеми заміщення трансформатора без індуктивних зв'язків мають велике практичне значення.

Разом з тим відомі схеми заміщення лінійного трансформатора, що розглядаються в теорії лінійних електричних кіл, не забезпечують високу ефективність вищезгаданих розрахунків. Це обумовлено тим, що одна з них [2] не адекватна електромагнітним процесам лінійного трансформатора. Так рівнянню, складеному за другим законом Кірхгофа для первинної обмотки трансформатора, відповідає вираз: $\dot{U}_1 = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2$ [3], тоді як аналогічне рівняння для вхідного контуру схема заміщення [2] описується формулою: $\dot{U}_1 = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2$. Така ж невідповідність і рівнянь, складених по другому закону Кірхгофа для вторинної обмотки трансформатора і вихідного контуру схеми заміщення. Другу ж відому схему заміщення [4] не можна реалізувати, оскільки в цьому простому електричному колі напрям струму у вітки, де включено на-

вантаження, протилежний дії вхідної напруги. Крім того, і в одній і в іншій схемі заміщення напруга на вітці, що містить тільки взаємну індуктивність, не відповідає напрузі, що врівноважує результуючу е.р.с. взаємної індукції лінійного трансформатора.

Тому дослідження і уточнення схеми заміщення лінійного трансформатора з метою встановлення відповідності її структури електромагнітним процесам є актуальною проблемою. Її вирішення дозволить підвищити точність розрахунку трансформаторів і таким чином забезпечити більш ефективно функціонування електротехнічних пристроїв та електроенергетичних систем, що містять лінійні трансформатори.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Структура еквівалентної схеми заміщення лінійного трансформатора без індуктивних зв'язків може бути досліджена за допомогою теорії чотириполосників [5]. Будь-який лінійний трансформатор можна розглядати як прохідний пасивний чотириполосник (рис. 1), що задовольняє умові взаємності, у якого між трьома будь-якими напругами і струмами існує лінійна залежність виду: $z = ax + by$, де x, y, z – будь-які із струмів і напруг, що визначають режим чотириполосника.

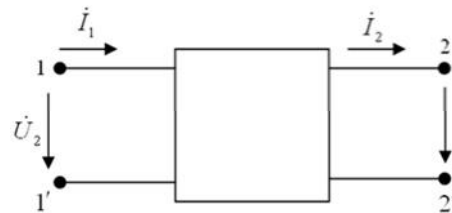


Рис. 1

Для трансформатора такими величинами є вхідні і вихідні комплексні напруги і струми $(\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2)$. Рівняння, що зв'язують первинні напругу \dot{U}_1 і струм \dot{I}_1 з вторинними напругою \dot{U}_2 і струмом \dot{I}_2 називаються основними рівняннями чотириполосника, рівняннями передачі або системою рівнянь А – форми запису:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 \end{cases} \quad (1)$$

Щоб визначити коефіцієнти А – форми запису рівнянь чотириполосника необхідно розглянути його режими холостого ходу й короткого замикання [3]. У

режимі холостого ходу (рис. 2) струм на виході трансформатора дорівнює нулю, тому система рівнянь A – форми запису повинна мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1x} = A\dot{U}_{2x}, \\ \dot{I}_{1x} = C\dot{U}_{2x}, \end{cases} \quad (2)$$

тому що $\dot{I}_{2x} = 0$.

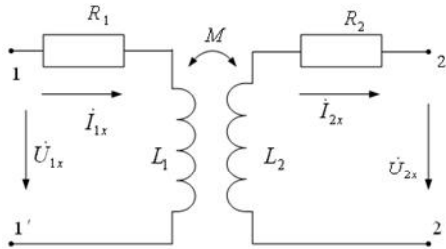


Рис. 2

Відповідно до закону Ома струм у первинній обмотці трансформатора у режимі холостого ходу визначається вираженням:

$$\dot{I}_{1x} = \frac{\dot{U}_{1x}}{R_1 + j\omega L_1}, \quad \text{тобто:}$$

$\dot{U}_{1x} = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_{1x}$. Разом з тим на підставі закону електромагнітної індукції (закону Фарадея):

$$\dot{U}_{2x} = -j\omega M \dot{I}_{1x} = \dot{E}_{M12},$$

тому коефіцієнт A описується вираженням:

$$A = \frac{\dot{U}_{1x}}{\dot{U}_{2x}} = \frac{(R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_{1x}}{-j\omega M \dot{I}_{1x}} = -\frac{R_1 + j\omega L_1}{j\omega M}, \quad (3)$$

разом з тим коефіцієнту C відповідає співвідношення:

$$C = \frac{\dot{I}_{1x}}{\dot{U}_{2x}} = \frac{\dot{I}_{1x}}{-j\omega M \dot{I}_{1x}} = -\frac{1}{j\omega M}. \quad (4)$$

У режимі короткого замикання (рис. 3) напруга на виході трансформатора дорівнює нулю.

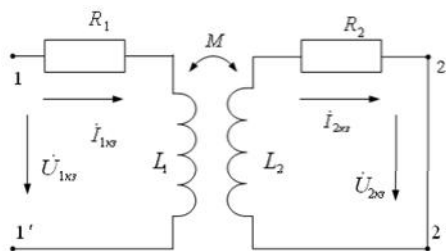


Рис. 3

Таким чином:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1кз} = B\dot{I}_{2кз}, \\ \dot{I}_{1кз} = D\dot{I}_{2кз}, \end{cases} \quad (5)$$

тому що $\dot{U}_{2кз} = 0$.

З рівнянь, складених по другому закону Кірхгофа для вторинної $[-j\omega M \dot{I}_{1кз} = (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_{2кз}]$ й первинної $[\dot{U}_{1кз} - j\omega M \dot{I}_{2кз} = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_{1кз}]$ обмоток трансформатора, одержуємо:

$$\dot{I}_{1кз} = -\frac{(R_2 + j\omega L_2)}{j\omega M} \dot{I}_{2кз}, \quad (6)$$

$$\dot{U}_{1кз} = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_{1кз} + j\omega M \dot{I}_{2кз}. \quad (7)$$

Отже згідно з першим рівнянням системи (5):

$$B = \frac{\dot{U}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}} = \frac{(R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_{1кз} + j\omega M \dot{I}_{2кз}}{\dot{I}_{2кз}} = (R_1 + j\omega L_1) \left(-\frac{R_2 + j\omega L_2}{j\omega M} \dot{I}_{2кз} \right) + j\omega M \dot{I}_{2кз} = \frac{j\omega M \dot{I}_{2кз}}{\dot{I}_{2кз}},$$

тобто коефіцієнт B визначається формулою:

$$B = -\frac{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2)}{j\omega M} + j\omega M. \quad (8)$$

Тоді як відповідно до другого рівняння тієї ж системи рівнянь коефіцієнт D описується вираженням:

$$D = \frac{\dot{I}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}} = \frac{-\frac{(R_2 + j\omega L_2)}{j\omega M} \dot{I}_{2кз}}{\dot{I}_{2кз}} = -\frac{R_2 + j\omega L_2}{j\omega M}. \quad (9)$$

Для лінійних чотириполосників є справедливим принцип взаємності, відповідно до якого коефіцієнти рівнянь A – форми запису зв'язані співвідношенням:

$$AD - CB = 1.$$

Це рівняння може бути використано для перевірки правильності попереднього розрахунку даних коефіцієнтів.

Отже з формул (3) і (9) слід що:

$$AD = -\frac{R_1 + j\omega L_1}{j\omega M} \cdot \left(-\frac{R_2 + j\omega L_2}{j\omega M} \right) = \frac{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2)}{\omega^2 M^2},$$

а рівняння (4) та (8) дозволяють визначити добуток:

$$CB = -\frac{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2) - \omega^2 M^2}{j\omega M} \cdot \left(-\frac{1}{j\omega M} \right) = \frac{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2) - \omega^2 M^2}{\omega^2 M^2},$$

тому: $AD - CB = 1$,

Таким чином розрахунок коефіцієнтів виконано вірно. Функції пасивного взаємного чотириполосника як передавальної ланки між джерелом живлення і навантаженням може виконувати T – образна схема заміщення (рис. 4)

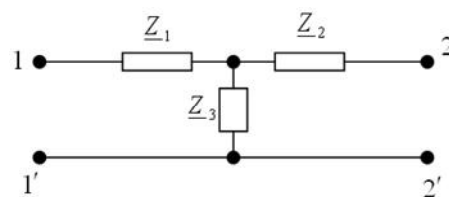


Рис. 4

Відповідно до теорії чотириполосників [3,4,5] опори T -образної схеми заміщення однозначно визначаються коефіцієнтами A – форми запису рівнянь чотириполосника. Причому:

$$\underline{Z}_1 = \frac{A-1}{C},$$

тоді згідно з рівняннями (3) і (4):

$$\underline{Z}_1 = \frac{-\frac{R_1 + j\omega L_1}{j\omega M} - 1}{-\frac{1}{j\omega M}} = \frac{-\left(\frac{R_1 + j\omega L_1 + j\omega M}{j\omega M} \right)}{-\frac{1}{j\omega M}},$$

тобто:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega(L_1 + M). \quad (10)$$

Крім того:

$$\underline{Z}_2 = \frac{D-1}{C},$$

тому з урахуванням виразень (4) та (9):

$$\underline{Z}_2 = \frac{-\frac{R_2 + j\omega L_2}{j\omega M} - 1}{-\frac{1}{j\omega M}},$$

або:

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega(L_2 + M). \quad (11)$$

З огляду на те, що:

$$\underline{Z}_3 = \frac{1}{C},$$

тому:

$$\underline{Z}_3 = -j\omega M, \quad (12)$$

того що згідно рівняння (4):

$$C = -\frac{1}{j\omega M}.$$

Відповідно до отриманих комплексних значень опорів \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 та \underline{Z}_3 зображена T-образна електрична схема заміщення чотириполюсника (рис. 5).

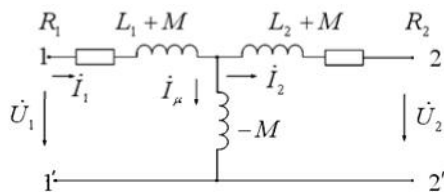


Рис. 5

ВИСНОВКИ

Дана T-образна схема чотириполюсника (рис. 5) є еквівалентною схемою заміщення трансформатора, яка не утримує індуктивних зв'язків. Вона ідентична електромагнітним процесам трансформатора. Рівняння, що складені по другому закону Кірхгофа для вхідного і вихідного контурів, отриманої схеми заміщення, відповідають аналогічним рівнянням, які складені для первинної та вторинної обмоток трансформатора. Крім того, напруга на вітті, що містить тільки взаємну індуктивність, рівна напрузі, що врівноважує результуючу е.р.с. взаєміндукції лінійного трансформатора.

Таким чином, отримана схема заміщення лінійного трансформатора дозволить підвищити точність розрахунків трансформаторів, а це в свою чергу забезпечить більш ефективне функціонування електротехнічних пристроїв, що містять такі трансформатори. Крім того, використання такої схеми заміщення при розрахунках і аналізі режимів енергопостачання підвищить надійність та ефективність функціонування електроенергетичних систем та мереж.

Слід додати, що дана схема ідентична схемі заміщення трансформатора, яка виведена в роботі [6], тобто дослідження, що проведені у цій статті, підтверджують результати, які були отримані раніше.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Т.1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
2. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.
4. Нейман Л.Р. Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. Теория линейных электрических цепей. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
5. Жуховицкий Б., Негневицкий И. Теоретические основы электротехники. Ч. II. Четырёхполюсники, длинные линии, нелинейные цепи. – М-Л.: Энергия, 1965. – 240 с.
6. Придубков П.Я., Хоменко И.В. Дослідження схеми заміщення лінійного трансформатора // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 9. – С. 50.

Надійшла 11.11.2010

Придубков Павло Якович, к.т.н., доц.

доцент кафедри "Електротехніка та електричні машини"
Українська державна академія залізничного транспорту
61050, Харків, пл. Фейербаха, 7
тел. (057) 7301996

Хоменко Ігор Васильович, к.т.н., доц.

доцент кафедри "Передача електричної енергії"
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
61002, Харків, вул. Фрунзе 21

P.Y. Pridubkov, I.V. Khomenko

Theory of quadripoles and substitution scheme of transformer.

Not enough high efficiency of the use of structures of the known charts of substitution of linear transformer, which is explored by the theory of quadripoles, allowing to define coefficients forms of record of equalizations of quadripole, is exposed, to find complex resistances vivid chart of his substitution, being and chart of substitution of transformer, is synonymous the proper to the electromagnetic processes.

Key words – transformer, quadripole, electromagnetic processes.