
УДК 621.314

В.М. Щека, А.В. Антонов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОБМОТОК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, РЕГУЛЮЄМИХ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

Розглядаються схеми заміщення регулюємих силових трансформаторів, наводяться розрахункові співвідношення для визначення реактивних опорів і провідностей обмоток трансформаторів, рекомендується методика визначення значень напруг при зміні характеру навантаження.

Ключові слова: силовий трансформатор, схема заміщення, реактивний опір, характер навантаження, коефіцієнт трансформації.

Вступ

Постановка науково-технічної задачі. Змінювати напругу в електричних мережах з метою забезпечення необхідної якості напруги у електроприймачів можливо за допомогою регульованих трансформаторів [1], що суміщають в собі функції перетворення і регулювання напруги. У таких трансформаторів коефіцієнт перетворення напруги $k_{\text{ПР}}$ не залишається постійним, а змінюється так, щоб забезпечити необхідну величину напруги у електроприймачів

$$k_{\text{ПР}} = \frac{U_1}{U_2} = \text{var}, \quad (1)$$

де U_1 , U_2 – відповідно вхідна та вихідна напруга трансформатора. У найбільш загальному випадку регульований трансформатор можливо представити у вигляді пристрою, зображеного на рис. 1, а.

Згідно рис. 1, б напруги U_1 і U_2 можна представити у вигляді геометричних сум

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + \dot{E}_{g1} \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_{21} + \dot{E}_{g2} \end{aligned} \quad (2)$$

де E_1, E_2 – електрорушійні сили первинної і вторинної обмоток трансформатора;

E_{g1}, E_{g2} – додаткові електрорушійні сили, штучно введені в кола первинної і вторинної обмоток.

Враховуючи відоме співвідношення для визначення електрорушійних сил обмоток трансформаторів $E_i = kw_i \Phi_{mi}$ і визначивши довжину векторів U_1 і U_2 за теоремою косинусів, отримаємо аналітичний вираз для визначення коефіцієнта перетворення регульованого трансформатора

$$k_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{(kw_1 \Phi_{m1})^2 + E_{g1}^2 + 2E_{g1}kw_1 \Phi_{m1} \cos \lambda_1}{(kw_2 \Phi_{m2})^2 + E_{g2}^2 + 2E_{g2}kw_2 \Phi_{m2} \cos \lambda_2}}, \quad (3)$$

де λ_1, λ_2 – кути зсуву фаз між додатковими електрорушійними силами і електрорушійними силами обмоток трансформатора.

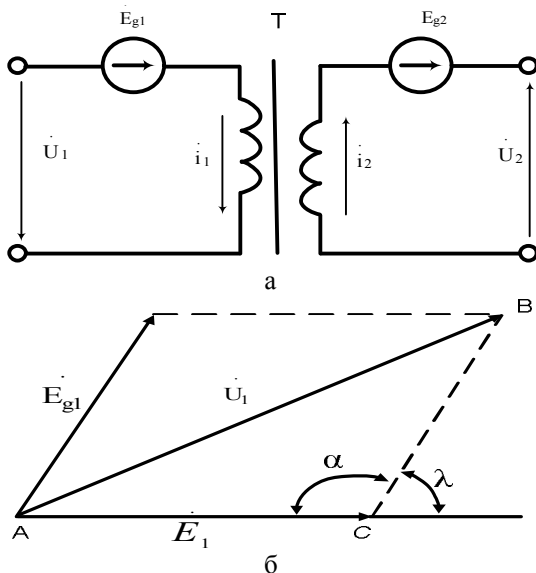


Рис. 1. Узагальнена схема і векторна діаграма регульованого трансформатора

З (3) можна визначити способи зміни коефіцієнта перетворення трансформатора, а значить і способи регулювання напруги:

- зміною кількості витків w ;
- перерозподілом магнітного потоку Φ ;
- зміною величини додаткової електрорушійної сили E_g ;
- зміною кута зрушення фаз між додатковою і основною електрорушійними силами обмотки трансформатора.

При регулюванні напруги за першим способом можна вважати, що $\Phi_{m1} = \Phi_{m2}$; $E_{g1} = E_{g2} = 0$;

$w_1 = \text{var}$;

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1. \quad (4)$$

При регулюванні напруги за третім способом $w_i = \text{const}$, $\Phi_{mi} = \text{const}$, $E_{gi} = \text{var}$, а при регулюванні напруги за четвертим способом

$$w_i = \text{const}, \Phi_{mi} = \text{const}, E_{gi} = \text{const}, \lambda_i = \text{var}. \quad (5)$$

Для плавного регулювання напруги, доцільно змінювати величину магнітного потоку, шляхом зміни ступеня намагнічування осереддя магнітопроводу. При цьому слід з'ясувати, яка з можливих схем виконання магнітопроводів регулюємих трансформаторів є раціональною.

Аналіз літератури. Робота трансформаторів, регулюємо під навантаження детально описується в [2, 3]. Разом з тим, в відомій літературі не розглядаються питання, пов'язані з з'ясуванням розрахунку значень комплексних реактивних опорів і провідностей обмоток регулюємих трансформаторів.

Мета статті – обґрунтування методики визначення значень напруг трансформатора при зміні характеру навантаження.

Основний матеріал

Розглянемо детальніше трансформатори у яких регулювання напруги здійснюється шляхом зміни величини магнітного потоку. Найчастіше це завдання вирішується шляхом підмагнічування магнітопроводу силового трансформатора.

Для можливості критичного порівняння конструкцій підмагнічуючих пристроїв і визначення якнайкращих з них проаналізуємо їх структурні електричні схеми. Схема будь-якого підмагнічуючого пристрою, якщо нехтувати активними опорами і втратами в сталі, складається з індуктивностей – нерегульованих і регульованих підмагнічуванням. Електричні обмотки регулюємих трансформаторів є комбінацією схем тільки трьох типів таких індуктивних елементів – послідовного, паралельного і послідовно-паралельного.

Напруга на якій-небудь k -й індуктивності схеми дорівнює:

$$\dot{U}_k = x_k b_{1k} \dot{U}_1 - x_k b_{2k} \dot{U}_2, \quad (6)$$

де X_k – опір індуктивності k -ої обмотки трансформатора; b_{1k} і b_{2k} – взаємна провідність між вхідним або вихідним колом і його k -м колом при короткому замиканні на виході; \dot{U}_1 і \dot{U}_2 – вхідна і вихідна напруги. Напруга \dot{U}_2 відповідно до теорії чотириполусників дорівнює:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{Z_H b_{12}}{Z_H b_{22} + j}, \quad (7)$$

де Z_H – опір навантаження; b_{12} – взаємна провідність між вхідним або вихідним колом при $Z_H = 0$; b_{22} – вхідна провідність вторинного кола.

Підставляючи (7) в (6), можна отримати залежність падіння напруги \dot{U}_k від відносної зміни опору активного або активно-індуктивного навантаження Z_H . Можливі, як це витікає з векторної діаграми рис. 2, тільки три варіанти залежностей:

\dot{U}_k збільшується із зменшенням Z_H (рис. 2, а);

\dot{U}_k зменшується або залишається незмінним при зменшенні Z_H (рис. 2, б);

\dot{U}_k із зменшенням Z_H спочатку зменшується, а потім збільшується, міняючи фазу на 180° (рис. 2, в).

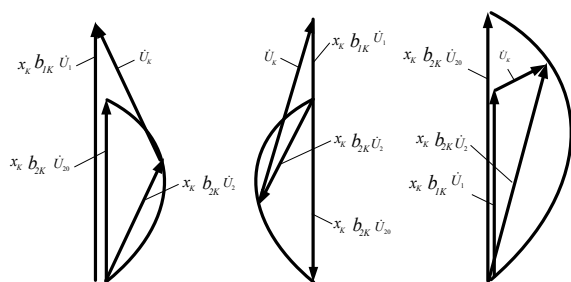


Рис. 2. Векторних діаграми, що ілюструє залежність U_k від Z_H :

а – діаграми для послідовного елементу;

б – те ж для паралельного елементу;

в – те ж для послідовно-паралельного елементу

Перший варіант має місце при

$$0 < b_{12}b_{2k} < b_{22}b_{1k}; \quad (8)$$

другий – при $b_{2k} \leq 0$; (9)

третій – при $0 < b_{22}b_{1k} \leq b_{12}b_{2k}$. (10)

При збільшенні X_k у елементі, що характеризується співвідношенням (8), зменшується вихідна напруга. Як бачимо, такий елемент є подібний індуктивному опору, включеному послідовно з навантаженням. Тому ми і назвали його послідовним, сервісним елементом. Елемент, що характеризується співвідношенням (9), схожий з індуктивністю, включеною паралельно навантаженню або вхідним затискачам. Тому він і названий паралельним елементом. При зменшенні індуктивності елементу, що характеризується співвідношенням (10) U_2 зменшується, якщо Z_H більше певної величини, і збільшується, якщо Z_H менше цієї величини. Трансформаторний підмагнічуючий регулятор повинен містити послідовний і паралельний елемент.

Для аналізу роботи розділеної конструкції застосуємо універсальну вузлову схему. Вона може бути отримана із спрощених схем заміщення, складених для кожної з трьох груп однофазних елементів. Спрощені схеми заміщення легко можуть бути

отримані з електричних схем, якщо нехтувати розсіюванням і активним опором обмоток і замінити паралельний трансформатор, або автотрансформатор, нерегульованим або регульованим дроселем. При такій заміні потрібно, як і при складанні схеми заміщення звичайного трансформатора, привести до первинної сторони параметри вторинних кіл електричних схем по наступних формулах:

$$\left. \begin{aligned} I'_2 &= \frac{I_2}{k_w}; \\ U'_2 &= U_2 k_w; \\ Z'_H &= Z_H k_w^2; \\ w'_{2C} &= w_{2C} k_w^2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\text{де} \quad k_w = \frac{W_{1\Pi}}{W_{2\Pi}}. \quad (12)$$

Спрощені схеми заміщення для всіх трьох груп однофазних елементів представлені на рис. 3, а, б, в.

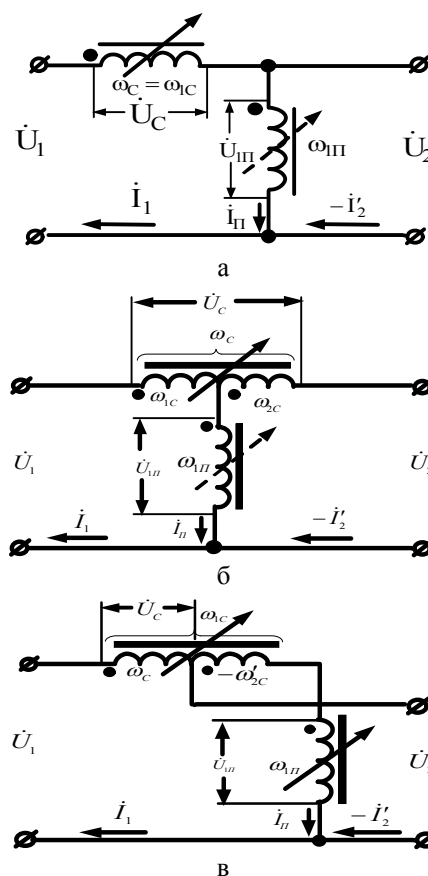


Рис. 3. Схеми заміщення однофазних підмагнічуючих трансформаторів і автотрансформаторів:

а – схема першої групи; б – другої групи;

в – третьої групи

Суцільні стрілки на них показують, що відповідний елемент підмагнічується у всіх початкових схемах, а пунктирні – тільки в деяких з них. На рис. 4 показана універсальна вузлова схема відповідна спрощеним схемам заміщення всіх трьох груп двоелементних трансформаторів. Вона складається з

паралельного і послідовного дроселя, обмотка якого має три затискача – затискач 1, підключений до живлячої мережі, затискач 2 – підключений до кола навантаження, і пересувний затискач 3, підключений до паралельного елемента.

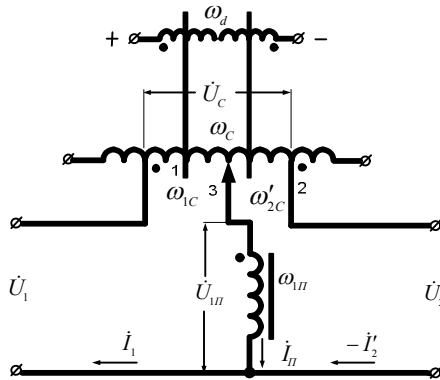


Рис. 4. Універсальна вузлова схема

Різним схемам заміщення відповідає те або інше положення рухомого затискача. Його положення характеризує коефіцієнт групи, який визначається співвідношенням

$$K_{\Gamma} = w_{1C}/w_C; \quad (13)$$

де

$$w_C = w_{1C} + w'_{2C}. \quad (14)$$

У цих формулах w_{1C} і w'_{2C} – відповідно кількості витків частин обмотки послідовного елемента між затискачами 1 і 3 або 3 і 2; w'_{2C} береться із знаком мінус, якщо затискач 3 розташований правіше за затискач 2.

Універсальна вузлова схема заміщення може бути використана і для аналізу трьохелементного трансформатора. Основні рівняння трансформатора, отримані при нехтуванні струмом, що намагнічує паралельний елемент, наступні:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 &= \dot{I}_1 j\omega L_C - \dot{I}_{C\Pi} j\omega L_C; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 \frac{\omega_{\Delta\Pi} + \omega_{\Pi\Pi}}{\omega_{\Pi\Pi}} &= \dot{I}_{C\Pi} j\omega L_{C\Pi}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Основні рівняння для трансформатора, з урахуванням того, що $\dot{I}_{\Pi} = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$, а w'_{2C} узятю із знаком плюс:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 &= \dot{I}_1 j\omega L_C + \dot{I}_{\Pi} j\omega L_C \frac{\omega'_{2C}}{\omega_{2C}}; \\ \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 \frac{\omega_{1C}}{\omega'_{2C}} &= -\dot{I}_{\Pi} j\omega L_{\Pi} \frac{\omega_C}{\omega'_{2C}}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Рівняння (15) і (16) ідентичні, оскільки можна прийняти, що

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\Pi} / \omega_{\Delta\Pi} &= K_{\Gamma} - 1; \\ \dot{I}_{C\Pi} &= -\dot{I}_{\Pi} (K_{\Gamma} - 1); \\ L_{C\Pi} &= L_{\Pi} / (K_{\Gamma} - 1)^2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Висновки

1. Для розрахунку зовнішніх характеристик регульованих трансформаторів доцільно використовувати універсальну вузлову схему заміщення, в якій паралельний елемент – лінійний, а послідовний – нелінійний.

2. Для спрощення розрахунків напруги, струми, магнітні потоки, а також параметри схеми необхідно записувати в системі відносних одиниць.

3. Розрахунок слід проводити в два етапи. На першому – розраховується залежність між першими гармоніками вторинної напруги $\dot{U}_{2(1)}$ і струму $\dot{I}_{2(1)}$. При цьому вважається, що вищих гармонік в колі немає. На другому етапі розраховується залежність між значеннями вторинної напруги і струму, що діють (\dot{U}_2 і \dot{I}_2) з урахуванням їх третіх гармонік $\dot{U}_{2(3)}$ і $\dot{I}_{2(3)}$.

Список літератури

1. Системы управления электроснабжением и электроприводом: учебн. / Б.Ф. Самойленко и др. – МО СССР, 1982 – 416 с.
2. Барзам А.Б. Системная автоматика / А.Б. Барзам. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатом издат, 1989. – 446 с.
3. Электрические системы. Кибернетика электрических систем / В.А. Веников и др. – М.: Энергия, 1968.

Надійшла до редколегії 29.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський Університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, РЕГУЛИРУЕМЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ

В.Н. Щека, Р.В. Антонов

Рассматриваются схемы замещения регулируемых силовых трансформаторов, приводятся расчетные соотношения для определения реактивных сопротивлений и проводимостей обмоток трансформаторов, рекомендуется методика определения значений напряжений при изменении характера нагрузки.

Ключевые слова: силовой трансформатор, схема замещения, реактивное сопротивление, характер напряжения, коэффициент трансформации.

CALCULATION OF PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS, MANAGED ON-LOADING

V.N. Scheka, R.V. Antonov

Ground of method of determination of values of tensions of transformer character of loading changes in which. The charts of substituting for the managed power transformers are examined, calculation correlations are pointed for determination of reactances and проводимостей обмоток трансформаторов, the method of determination of values of tensions is recommended at the change of character of loading.

Keywords: power transformer, chart of substitution, reactance, character of tension, coefficient of transformation.