Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 621.311.1: 621.315

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗНИЖУВАЛЬНИХ ПІДСТАНЦІЙ НАФТОПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖ

Ю.Ф. Романюк, М.Й. Федорів, Ю.О. Терлецький

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,
e-mail: feivt@nung.edu.ua

Робота присвячена оптимізації режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій з метою зменшення в них втрат потужності та енергії шляхом забезпечення економічного розподілу потужності навантаження у випадку встановлення на підстанції трансформаторів різної номінальної потужності. Показано, що економічний розподіл потужності навантаження між трансформаторами, що відповідає мінімуму втрат, відрізняється від натурального внаслідок неоднорідності схеми електричних сполученнь. Економічний режим паралельної роботи трансформаторів різної номінальної потужності на знижувальних підстанціях можна забезпечити зміною їх коефіцієнтів трансформації. Другим можливим способом оптимізації режиму роботи трансформаторів є застосування поздовжньої компенсації реактивного опору одного з трансформаторів. Оптимізація режиму зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів є одним з простих організаційних заходів зменшення втрат потужності, економічна ефективність якого залежить від ступеня неоднорідності схеми сполучення.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, економічний розподіл потужності, коефіцієнти трансформації трансформаторів, поздовжня компенсація реактивного опору, втрати електроенергії, оптимізація режиму.

Работа посвящена оптимизации режимов работы трансформаторов понижающих подстанций с целью уменьшения потерь мощности и энергии в трансформаторах путем обеспечения экономического распределения мощности нагрузки в случае установки на подстанции трансформаторов разной номинальной мощности. Показано, что экономическое распределение мощности между трансформаторами, соответствующее минимуму потерь, отличается от натурального вследствие неоднородности схемы электрических соединений. Экономический режим параллельной работы трансформаторов разной номинальной мощности на понижающих подстанциях можна обеспечить изменением их коэффициентов трансформации. Вторым возможным способом оптимизации режима работы трансформаторов является применение продольной компенсации реактивного сопротивления одного из трансформаторов. Оптимизация режима изменением коэффициентов трансформации трансформаторов является одним из простых организационных мероприятий уменьшения потерь мощности, экономическая эффективность которого зависит от степени неоднородности схемы соединения.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, экономическое распределение мощности, коэффициенты трансформации трансформаторов, продольная компенсация реактивного сопротивления, потери электроэнергии, оптимизация режима.

The article deals with the step-down substation transformer operation modes to reduce their power and energy losses due to economical load power distribution in case when different capacity transformers are installed on the substation. It is shown that the economical load power distribution, which corresponds to the minimum power losses, differs from the natural one because of connection layout heterogeneity. The economical mode of simultaneous operation of the different capacity transformers can be achieved by changing their transformation ratio. Another possible way of transformer modes optimization is series reactance compensation of one of the transformers. The mode optimization by changing the transformation ratio is one of the simplest organizational arrangements to decrease power losses. Economic efficiency of this way of mode optimization depends on the connection layout heterogeneity degree.

Key words: transformer substation, economical power distribution, transformation ratio of transformers, series reactance compensation, power losses, mode optimization.

Вступ

Одним із важливих завдань експлуатації електропостачальних системах (ЕПС) є підвищення економічності їх режимів [1-4]. Оптимізація режимів передбачає забезпечення економічної ефективності роботи ЕПС при необхідній надійності та якості електропостачання споживачів. Втрати електроенергії в електричних мережах ЕПС помітно впливають на щорічні експлуатаційні витрати та собівартість передачі електроенергії. Зниження цих втрат є частиною загальної задачі підвищення економічності роботи електроенергетичної системи.

На підстанціях, від яких одержують живлення споживачі першої та другої категорій надійності, як правило, встановлюють два або більше трансформаторів, які можуть працювати окремо чи паралельно. Економічнішим, з огляду на оптимальний розподіл навантаження та зменшення втрат потужності, є режим паралельної роботи трансформаторів. Одним з поширених на практиці способів зменшення втрат потужності в ЕПС є забезпечення економічних режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій шляхом вимкнення частини трансформаторів при зменшенні навантаження [5-6]. У випадку роздільної роботи трансформаторів потужність навантаження між ними потрібно розподілити так, щоб втрати потужності були мінімальними. Ці та інші заходи дають можливість зменшити сумарні видатки на оплату електроенергії.

Актуальність і невирішені питання

Проблема енергозаощадження останнім часом є надзвичайно актуальною для України у зв'язку зі значним подорожчанням електроенергії. Одна з головних причин невиробничих витрат енергії в енергетиці – великі втрати в електричних мережах енергосистем та споживачів, які становлять в середньому близько 14%. Це в 1,5–2 рази більше порівняно з розвиненими країнами Західної Європи. Важливе місце займає пошук шляхів вирішення цієї актуальної наукової проблеми. Зменшення втрат електроенергії та підвищення ефективності роботи наших енергосистем не тільки дозволить зменшити сумарне електроспоживання, але й зменшить кількість необхідних енергоресурсів на виробництво електроенергії та знизить рівень забруднення навколишнього середовища. Тому запровадження широкомасштабної політики енергозбереження є життєво необхідною. Невирішеним питанням є забезпечення економічного розподілу потужності навантаження в трансформаторах знижувальних підстанцій нафтопромислових мереж, на яких встановлені трансформатори різної номінальної потужності

Постановка завдання

Метою цієї роботи є оптимізація режимів роботи силових трансформаторів знижувальних підстанцій з метою зменшення втрат потужності та електроенергії. Як показали дослідження, через неоднорідність схеми при паралельній роботі трансформаторів різної номінальної потужності, економічний розподіл навантаження між ними відрізняється від натурального. Основними завданнями досліджень є аналіз режимів роботи трансформаторів і способів забезпечення економічних режимів, які відповідають мінімуму втрат потужності, а також оцінка економічної ефективності оптимізації режимів.

Результати досліджень

Розглянемо випадок, коли на трансформаторній підстанції встановлено два трансформатори типу ТМ-1000/10 і ТМ-1600/10 з номінальними коефіцієнтами трансформації $K_{тном}$=10/0,4 кВ. Регулювання напруги трансформаторів здійснюється з перемиканням відгалужень без збудження в межах ±2х2,5%. Навантаження підстанції становить 2200 кВ·А, cosφ = 0,8. Режим роботи споживачів неперервний, графік навантаження рівномірний.

Технічні параметри трансформаторів вказані нижче.

ТМ – 1000/10: $S_{ном}$= 1000 кВ·А; $U_{вн}$ =10,5 кВ; $U_{нн}$=0,4 кВ; $\Delta P_х$ =2,1 кВт; $\Delta P_к$ =10,8 кВт; $U_к$% = 5,5 %; $I_х$ =1,4%.

ТМ – 1600/10: $S_{ном}$= 1600 кВ·А; $U_{вн}$=10,5 кВ; $U_{нн}$=0,4 кВ; $\Delta P_х$ =2,8 кВт; $\Delta P_к$ =16 кВт; $U_к$% =6%; $I_х$ =1,3%.

Активна і реактивна потужності навантаження відповідно дорівнюють:

$$P = S \cos\varphi = 2200 \cdot 0{,}8 = 1760 \text{ кВ·А};$$

$$Q = S \sin\varphi = 2200 \cdot 0{,}6 = 1320 \text{ кВ·А}.$$

На рисунку 1 зображені принципова схема і схема заміщення трансформаторів знижувальної підстанції.

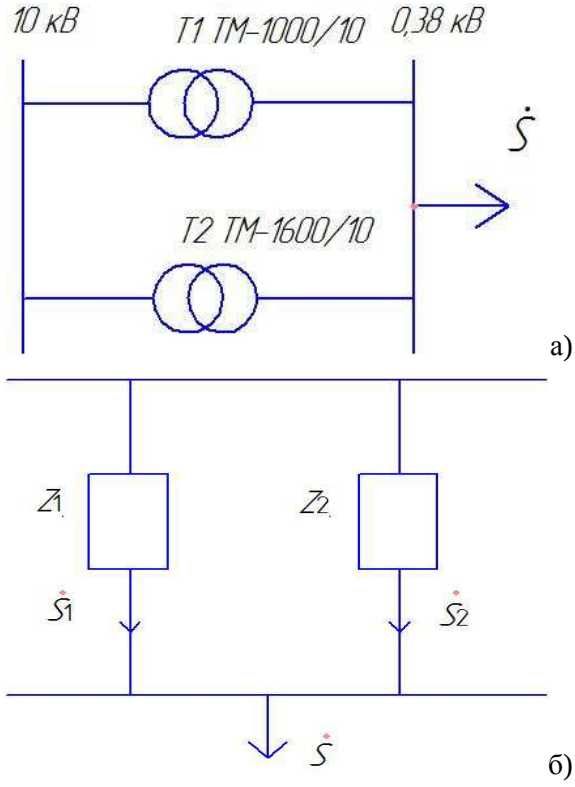


Рисунок 1 – Принципова схема (а) і схема заміщення (б) трансформаторів

1. Розрахунок натурального розподілу потужності між трансформаторами

Активний і реактивний опори трансформаторів визначимо за формулами:

$$r_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U^2_{\text{ном.т}}}{S^2_{\text{ном}}}; \quad (1)$$

$$x_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}}\% U^2_{\text{ном.т}}}{100 S_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

де $U_{\text{ном.т}}$ – номінальна напруга обмотки ВН трансформатора.

Обчислимо опори трансформаторів при їх роботі на основних виводах:

$$r_{\text{т1}} = \frac{10{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{1000^2} = 1{,}08 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{т1}} = \frac{5{,}5 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 1000} = 5{,}5 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{т2}} = \frac{16 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{1600^2} = 0{,}625 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{т2}} = \frac{6 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 1600} = 3{,}75 \text{ Ом}.$$

Розрахуємо *натуральний* (*фактичний*) розподіл потужності навантаження підстанції.

Потужність навантаження при паралельній роботі трансформаторів розподіляється між ними обернено пропорційно їх спряженим опорам:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}\frac{z_2^*}{z_1^* + z_2^*} = (1760 + \text{j}1320) =$$

$$= \frac{0{,}625 - \text{j}3{,}75}{1{,}08 - \text{j}5{,}5 + 0{,}625 - \text{j}3{,}75} = 720 + \text{j}521 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\dot{S}_2 = \dot{S}\frac{z_1^*}{z_1^* + z_2^*} = (1760 + \text{j}1320) =$$

$$= \frac{1{,}08 - \text{j}5{,}5}{1{,}08 - \text{j}5{,}5 + 0{,}625 - \text{j}3{,}75} = 1040 + \text{j}799 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Модулі повних потужностей навантаження трансформаторів відповідно дорівнюють: S_1=889 кВ·А; S_2=1311 кВ·А.

Коефіцієнти завантаження трансформаторів становлять:

$$\beta_1 = \frac{S_1}{S_{\text{ном1}}} = \frac{889}{1000} = 0{,}889;$$

$$\beta_2 = \frac{S_2}{S_{\text{ном2}}} = \frac{1311}{1600} = 0{,}82.$$

Такий самий результат можна одержати за правилом розподілу струмів при паралельному сполученні опорів $\underline{z}_1$, $\underline{z}_2$.

Визначимо коефіцієнти завантаження трансформаторів за умови розподілу потужності навантаження пропорційно номінальним потужностям трансформаторів. При цьому навантаження *i*-го трансформатора розрахуємо за формулою [2]

$$S_i = S\frac{S_{\text{ном}i}}{\sum S_{\text{ном}i}}. \quad (3)$$

Згідно з умовою (3) одержимо:

$$S_1 = \frac{S_{\text{ном1}}}{S_{\text{ном1}} + S_{\text{ном2}}} =$$

$$= 2200\frac{1000}{1000 + 1600} = 846 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_2 = \frac{S_{\text{ном2}}}{S_{\text{ном1}} + S_{\text{ном2}}} =$$

$$= 2200\frac{1600}{1000 + 1600} = 1354 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Коефіцієнти завантаження трансформаторів відповідно дорівнюють:

$$\beta_1 = \frac{S_1}{S_{\text{ном1}}} = \frac{846}{1000} = 0{,}846;$$

$$\beta_2 = \frac{S_2}{S_{\text{ном2}}} = \frac{1354}{1600} = 0{,}846.$$

Як бачимо з вище наведених розрахунків, розподіл потужності між трансформаторами, визначений за умовою (3), відрізняється від натурального.

2. Розрахунок економічного розподілу потужності між трансформаторами

Економічним розподілом потужності навантаження між трансформаторами називають такий розподіл, який відповідає мінімальним втратам потужності в трансформаторах.

Схема заміщення трансформаторів, зображена на рисунку 1, б, є неоднорідною, оскільки відношення індуктивних опорів трансформаторів до активних відрізняються між собою:

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{5{,}5}{1{,}08} = 5{,}09;$$

$$\frac{x_2}{r_2} = \frac{3{,}75}{0{,}625} = 6.$$

Отже, натуральний розподіл потужності навантаження між трансформаторами буде відрізнятися від економічного.

Економічний (*оптимальний*) розподіл потужності навантаження, який відповідає мінімальним втратам потужності в трансформаторах, можна визначити через активні опори трансформаторів:

$$\dot{S}_{1\text{e}} = \dot{S}\frac{r_2}{r_1 + r_2} = (1760 + \text{j}1320)\frac{0{,}625}{1{,}08 + 0{,}625} =$$

$$= 645 + \text{j}484 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S^{\cdot}_{2e} = S^{\cdot}\frac{r_1}{r_1+r_2} = (1760 + j1320)\frac{1,08}{1,08+0,625} =$$
$$= 1115 + j836 \ \text{кВ}\cdot\text{А}.$$

Модулі повних потужностей трансформаторів в економічному режимі роботи відповідно дорівнюють S_{1e}=807 кВ·А; S_{2e}=1393 кВ·А.

Коефіцієнти завантаження трансформаторів, які відповідають економічному розподілу потужностей, становлять:

$$\beta_{1e} = \frac{S_{1e}}{S_{\text{ном}}} = \frac{807}{1000} = 0,807;$$

$$\beta_{2e} = \frac{S_{2e}}{S_{\text{ном}}} = \frac{1393}{1600} = 0,87.$$

Як бачимо, економічний розподіл потужності навантаження між трансформаторами відрізняється від натурального. При паралельній роботі трансформаторів більшою мірою будуть завантажуватися трансформатори меншої потужності, а трансформатори більшої номінальної потужності будуть недовантажені порівняно з економічним розподілом навантаження [3]. Отже, оптимізація режиму роботи трансформаторів шляхом регулювання напруги може бути економічно вигідною.

На практиці для роздільно працюючих трансформаторів рекомендують розподіляти потужність навантаження підстанцій пропорційно до їх номінальних потужностей, що, в принципі, не правильно, оскільки він теж відрізняється від економічного розподілу.

3. Економічна ефективність оптимізації режиму роботи трансформаторів

Оцінимо економічний ефект, який можна одержати, забезпечивши оптимальний розподіл потужності навантаження між трансформаторами.

Річні втрати електроенергії в трансформаторах за рівномірного графіка навантаження визначимо за формулою

$$\Delta W_m = \sum[P_{xi} + \Delta P_{ki}(\frac{S_i}{S_{\text{ном}i}})^2]\cdot 8760, \quad (4)$$

де n – кількість паралельно працюючих трансформаторів;

$S_{\text{ном } i}$ – номінальна потужність i-го трансформатора.

Втрати електроенергії в трансформаторах за натурального розподілу потужності

$$\Delta W_{T1} = [2,1 + 2,8 + 10,8(\frac{889}{1000})^2 + 16(\frac{1311}{1600})^2 \cdot 8760 =$$
$$= 211,7 \ \text{тис. кВт}\cdot\text{год}.$$

Втрати електроенергії за економічного розподілу потужності

$$\Delta W_{T2} = [2,1 + 2,8 + 10,8(\frac{806,5}{1000})^2 + 16(\frac{1393}{1600})^2 \cdot 8760 =$$
$$= 210,6 \ \text{тис. кВт}\cdot\text{год}.$$

Річна економія електроенергії в трансформаторах рахунок зниження втрат

$$\delta W_T = \Delta W_{T1} - \Delta W_{T2} = 211,7 - 210,6 =$$
$$= 1,1 \ \text{тис. кВт}\cdot\text{год}.$$

Отже, у нашому випадку економія електроенергії за рахунок зниження втрат електроенергії при економічному розподілі потужності навантаження є незначною і становить приблизно 0,5%. Проте, аналогічні розрахунки показують, наприклад, що при паралельній роботі трансформаторів ТМ-400/10 і ТМ-630/10 при їх сумарному навантаженні 800 кВ·А економія електроенергії в оптимальному режимі роботи становитиме біля 2 %. Таким чином, забезпечивши економічний розподіл потужності навантаження між трансформаторами, можна суттєво зменшити сумарні втрати електроенергії та видатки на її оплату.

Нижче розглянемо можливі способи забезпечення економічного розподілу потужності між паралельно працюючими трансформаторами різної номінальної потужності.

4. Забезпечення економічного режиму паралельно працюючих трансформаторів різної номінальної потужності

За різкозмінного навантаження знижувальної підстанції виникають значні коливання напруги. При роздільній роботі трансформаторів частину найбільш потужних споживачів з різко змінним режимом роботи можна перевести на трансформатор більшої потужності, забезпечивши при цьому стабільніший режим роботи споживачів. Проте, такий режим може бути неекономічним, оскільки сумарні втрати потужності при цьому збільшаться, хоча якість електроенергії дещо поліпшиться.

Коливання напруги можна суттєво обмежити, збільшивши потужність джерела, тобто увімкнувши трансформатори на паралельну роботу за умови забезпечення термічної і динамічної стійкості комутуючих електричних апаратів. При цьому економічний режим роботи трансформаторів знижувальної підстанції можна забезпечити [2]:

а) поздовжньою компенсацією реактивного опору одного з трансформаторів;

б) зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів;

в) введенням у контур паралельно працюючих трансформаторів додаткової ЕРС.

Щодо останнього способу оптимізації режиму, то він пов'язаний із застосуванням вольтододатного трансформатора та значним збільшенням капітальних і експлуатаційних витрат, тому в подальшому цей спосіб не розглядається.

5. Забезпечення економічного режиму роботи паралельно працюючих трансформаторів поздовжньою компенсацією реактивного опору одного з трансформаторів

Оскільки схема заміщення, зображена на рисунку 1б, неоднорідна, то для забезпечення економічного розподілу потужності між трансформаторами Т1 і Т2 в коло трансформатора ТМ-1600/10 з боку високої напруги увімкнемо конденсатори.

При цьому неоднорідну схему зведемо до однорідної (рисунок 2), в якій встановлюється економічний розподіл потужності.

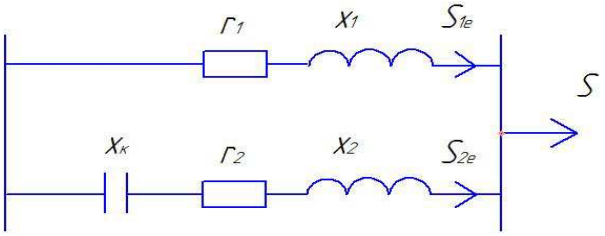


Рисунок 2 – Схема заміщення трансформаторів з поздовжньою компенсацією реактивного опору трансформатора Т2

Необхідний ємнісний опір конденсаторів $x_к$ поздовжньої компенсації визначимо із співвідношення

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{x_2 - x_к}{r_2}, \qquad (5)$$

звідки

$$x_к = x_2 - \frac{r_2 x_1}{r_1}. \qquad (6)$$

Після підставляння числових значень опорів трансформаторів у (6) маємо

$$x_К = 3,75 - \frac{0,625 \cdot 5,5}{1,08} = 0,567 \text{ Ом}.$$

Визначимо економічний розподіл потужності навантаження між трансформаторами Т1 і Т2 з врахуванням поздовжньої компенсації реактивного опору трансформатора Т2:

$$\dot{S}'_{1e} = \dot{S}\frac{\overset{*}{z'_2}}{\overset{*}{z_1} + \overset{*}{z'_2}} = (1760 + j1320) \times$$

$$\times \frac{0,625 - j(3,75 - j0,567)}{1,08 - j5,5 + 0,625 - j(3,75 - j0,567)} =$$

$$= 645 + j484 \quad кВ \cdot А;$$

$$\dot{S}'_{2e} = \dot{S}\frac{\overset{*}{z_1}}{\overset{*}{z_1} + \overset{*}{z'_2}} = (1760 + j1320) \times$$

$$\times \frac{1,08 - j5,5}{1,08 - j5,5 + 0,625 - j(3,75 - j0,567)} =$$

$$= 1115 + j836 \text{ кВ} \cdot А.$$

Одержані результати розрахунку економічного режиму роботи паралельно працюючих трансформаторів при поздовжній компенсації реактивного опору трансформатора Т2 відповідають оптимальному розподілу потужності між трансформаторами, визначеному вище через активні опори обмоток трансформаторів.

Розрахуємо необхідну для забезпечення економічного режиму роботи трансформаторів потужність батареї конденсаторів поздовжньої компенсації:

$$I_{2e} = \frac{S_{2e}}{\sqrt{3} U_{ном}} = \frac{1393}{\sqrt{3} \cdot 10} = 80,5 \text{ А};$$

$$Q_к = 3 I_{2e}^2 x_к = 3 \cdot 80,5^2 \cdot 0,567 \cdot 10^{-3} = 11,1 \text{ квар}.$$

Робоча напруга конденсаторної установки

$$U_р = \sqrt{3}\, I_{2e} x_к = \sqrt{3} \cdot 80,5 \cdot 0,567 = 79,1 \text{ В}.$$

Необхідна ємність конденсаторів

$$C = \frac{1}{w x_к} = \frac{10^6}{3,14 \cdot 50 \cdot 0,567} = 5617 \text{ мкФ}.$$

6. Забезпечення економічного розподілу потужності зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів

Визначимо розподіл струмів і коефіцієнти завантаження трансформаторів за різних коефіцієнтів трансформації трансформаторів.

Опори трансформатора Т2, зведені, наприклад, до робочої напруги відгалуження $U_В$=10,25 кВ, дорівнюють:

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{U_в}{U_{ном1}}\right)^2 = 0,625 \left(\frac{10,25}{10}\right)^2 = 0,657 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = x_2 \left(\frac{U_в}{U_{ном1}}\right)^2 = 3,75 \left(\frac{10,25}{10}\right)^2 = 3,94 \text{ Ом}.$$

Визначимо розподіл потужності навантаження між трансформаторами через спряжені опори трансформаторів за робочої напруги відгалуження трансформатора Т2 $U_в$=10,25 кВ і роботі трансформатора Т1 на основному виводі:

$$\dot{S}'_1 = \dot{S}\frac{\overset{*}{z'_2}}{\overset{*}{z_1} + \overset{*}{z'_2}} = (1760 + j1320) =$$

$$= \frac{0,657 - j3,94}{1,08 - j5,5 + 0,657 - j3,94} = 741 + j537 \text{ кВ} \cdot А;$$

$$\dot{S}'_2 = \dot{S}\frac{\overset{*}{z_1}}{\overset{*}{z_1} + \overset{*}{z'_2}} = (1760 + j1320) =$$

$$= \frac{1,08 - j5,5}{1,08 - j5,5 + 0,657 - j3,94} = 1019 + j783 \text{ кВ} \cdot А.$$

Коефіцієнти завантаження трансформаторів:

$$\beta_1 = \frac{S'_1}{S_{ном}} = \frac{871}{1000} = 0,915;$$

$$\beta_2 = \frac{S'_2}{S_{ном}} = \frac{1329}{1600} = 0,803.$$

Отже, результати розрахунків розподілу потужності навантаження через струми і спряжені опори збігаються.

Аналогічно можна визначити розподіл потужності між трансформаторами та коефіцієнти їх завантаження для інших регулювальних відгалужень трансформатора Т2. Результати розрахунку зведені в таблицю 1.

Проаналізувавши результати розрахунку, доходимо висновку, що найближчим до економічного відповідає розподіл потужності між трансформаторами при роботі трансформатора Т1 на основному виводі, а трансформатора Т2 – на відгалуженні з робочою напругою $U_В$ = 9,5 кВ,

Таблиця 1 – Розподіл потужності між трансформаторами при регулюванні напруги трансформатора Т2 в межах ±2х2,5%

Положення перемикача відгалужень обмотки ВН	Додаток витків обмотки ВН, %	$U_В$, кВ	r_2', Ом	x_2', Ом	S_1', кВ·А	S_2', кВ·А	β_1'.	β_2'.
I	+5	10,5	0,689	4,13	1063	1157	1,063	0,723
II	+2,5	10,25	0,657	3,94	915	1285	0,915	0,802
III	0	10	0,625	3,75	889	1311	0,889	0,82
IV	-2,5	9,75	0,594	3,56	862	1338	0,862	0,836
V	-5	9,5	0,564	3,38	834	1366	0,834	0,85

Таблиця 2 – Параметри трансформаторів та ступінь неоднорідності їх схеми заміщення

Тип трансформатора	$S_{ном}$, кВ·А	$\Delta P_к$, кВт	$U_к$,%	$r_т$, Ом	$x_т$, Ом	$x_т/r_т$,	Ступінь неоднорідності схеми, %
ТМ-100/10	100	1,97	4,5	19,7	45	2,28	18,98
ТМ-160/10	160	2,65	4,5	10,35	28,13	2,72	11,87
ТМ-250/10	250	3,7	4,5	5,92	18	3,04	7,56
ТМ-400/10	400	5,5	4,5	3,44	11,25	3,27	39,8
ТМ-630/10	630	7,6	5,5	1,91	8,73	4,57	11,4
ТМ-1000/10	1000	10,8	5,5	1,08	5,5	5,09	17,8
ТМ-1600/10	1600	16	6,0	0,625	3,75	6,0	5,33
ТМ-2500/10	2500	24	6,0	0,38	2,4	6,32	-

яка відповідає п'ятому положенню перемикача відгалужень (-5%).

Таким чином, регулювання напруги зміною їх коефіцієнтів трансформації є одним з найпростіших організаційних заходів забезпечення оптимального розподілу потужності між паралельно працюючими трансформаторами різної номінальної потужності, економічна ефективність якого залежить від ступеня неоднорідності схеми заміщення.

Ступінь неоднорідності схеми при паралельній роботі двох трансформаторів можна оцінити через співвідношення опорів схеми заміщення

$$\delta = (\frac{r_1 x_2}{r_2 x_1} - 1)100\% \ . \qquad (7)$$

У таблиці 2 наведені співвідношення опорів та ступінь неоднорідності схеми заміщення при паралельній роботі трансформаторів Т1 і Т2. Як видно з таблиці 2, ступінь неоднорідності схеми при паралельній роботі трансформаторів різної номінальної потужності змінюється в межах від 7 до 40%. Ця неоднорідність може бути ще більшою, коли на підстанції встановлені трансформатори з різними параметрами, наприклад, трансформатори, випущені в різний час.

7. Вибір оптимальних коефіцієнтів трансформації паралельно працюючих трансформаторів, які відповідають мінімальним втратам потужності

Для визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів складемо схему заміщення, в якій врахуємо трансформацію напруг між обмотками ВН і НН силових трансформаторів (рисунок 4, а).

Розрахуємо завантаження кожного трансформатора, коли, наприклад, з боку ВН трансформатора Т1 встановлене відгалуження з коефіцієнтом трансформації $K_{т1}$, а на трансформаторі Т2 – з коефіцієнтом трансформації $K_{т2} > K_{т1}$.

Напруги на виводах вторинних обмоток трансформаторів у режимі неробочого ходу при заданих коефіцієнтах трансформації і номінальній напрузі 10 кВ з боку ВН підстанції відповідно дорівнюватимуть:

$$U_{Н1} = \frac{U_{ном}}{K_{Т1}} \ ; \qquad U_{Н2} = \frac{U_{ном}}{K_{Т2}} \ . \qquad (8)$$

При паралельній роботі трансформаторів у схему заміщення потрібно ввести вирівнювальну ЕРС

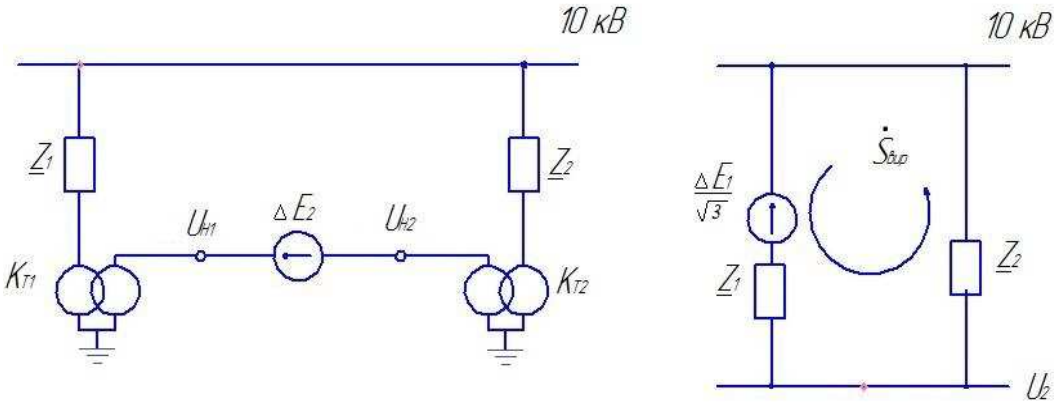
$$\Delta E_2 = U_{H1} - U_{H2}. \qquad (9)$$

Цю ЕРС зведемо до номінальної напруги обмотки ВН через номінальний коефіцієнт трансформації трансформатора Т1

$$\Delta E_1 = \Delta E_2 K_{T1}. \qquad (10)$$

Схема заміщення трансформаторів, які працюють паралельно з різними коефіцієнтами трансформації у режимі неробочого ходу, наведена на рисунку 4,б. У замкненому контурі цієї схеми протікає вирівнювальний струм

$$\dot{I}_В = \frac{\Delta E_1}{\sqrt{3}(\underline{z}_1 + \underline{z}_2)}, \qquad (11)$$



а – окрема робота; б – паралельна робота

Рисунок 4 – Схеми заміщення трансформаторів у режимі неробочого ходу

якому відповідає вирівнювальна потужність

$$\dot{S}_{\text{в}} = \sqrt{3}\dot{U}_{\text{ном}}\,\dot{I}^{\,*}_{\text{в.}} \qquad (12)$$

Просумувавши вирівнювальну потужність $\dot{S}_{\text{вир}}$ з потужностями навантаження трансформаторів, визначеними за однакових коефіцієнтів трансформації, одержимо:

$$\dot{S}_1' = \dot{S}_1 + \dot{S}_{\text{В}}; \qquad (13)$$

$$\dot{S}_2' = \dot{S}_2 - \dot{S}_{\text{В}}. \qquad (14)$$

Отже, паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації призводить до перерозподілу навантаження між ними. У наведеному прикладі при підвищенні коефіцієнта трансформації трансформатора Т2 його навантаження зменшується, а трансформатора Т1 – збільшується. Таким чином, зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів можна забезпечити економічний розподіл потужностей і зменшити втрати електроенергії в трансформаторах.

Визначимо, яку додаткову вирівнювальну ЕРС потрібно ввести в контур схеми заміщення трансформаторів для того, щоб забезпечити економічний розподіл потужності. Для цього розрахуємо вирівнювальну потужність з балансу потужностей

$$\dot{S}_{\text{в}} = \dot{S}_1 - \dot{S}_{1e} = 720 + \text{j}521 - 645 - \text{j}484 =$$

$$= 75 + \text{j}37 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Вирівнювальний струм у первинному контурі трансформаторів

$$\dot{I}_{\text{в}} = \frac{\dot{S}_{\text{в}}}{\sqrt{3}\dot{U}^{\,*}_{\text{ном}}} = \frac{75 - \text{j}37}{\sqrt{3}\cdot 10} = 4{,}34 - \text{j}2{,}14 \text{ А}.$$

Бажане значення вирівнювальної ЕРС в контурі повинна бути таким

$$\Delta\dot{E}_{1б} = \sqrt{3}\dot{I}_{\text{в}}(\underline{z}_1 + \underline{z}_2) =$$

$$= \sqrt{3}(4{,}34 - \text{j}2{,}14)(1{,}705 + \text{j}9{,}25) = 47 + \text{j}63{,}1 \text{ В}.$$

Таким чином, додаткова вирівнювальна ЕРС контура є комплексною величиною

$$\Delta\dot{E}_{1б} = \Delta\dot{E}'_{1б} + \text{j}\Delta\dot{E}''_{1б}, \qquad (15)$$

де $\Delta\dot{E}'_{1б}$ – поздовжня складова ЕРС, напрям якої збігається з вектором напруги $\dot{U}_{\text{ном}}$;

$\Delta\dot{E}''_{1б}$ - поперечна складова ЕРС, зміщена відносно вектора напруги $\dot{U}_{\text{ном}}$ на 90°.

Для того, щоб забезпечити економічний режим роботи трансформаторів, потрібно здійснити поздовжньо-поперечне регулювання напруги в замкненому контурі. Це можливо тільки за допомогою застосування вольтододатних трансформаторів. У зв'язку зі значним капіталовкладеннями на їх встановлення та щорічними витратами на експлуатацію цей спосіб оптимізації режиму роботи трансформаторів не розглядається.

Зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів можна здійснювати тільки поздовжнє регулювання напруги, тому оптимізація режиму їх роботи буде частковою.

Розрахуємо бажаний коефіцієнт трансформації трансформатора Т2 за умови забезпечення часткової оптимізації режиму роботи трансформаторів поздовжнім регулюванням напруги. При цьому додаткова ЕРС трансформатора, зведена до напруги вторинного контура,

$$\Delta\dot{E}_{2б} = \frac{\Delta E_{1б}}{K_{\text{T1}}} = \frac{44{,}86\cdot 0{,}4}{10} = 1{,}795 \text{ В}.$$

Для того, щоб забезпечити режим роботи близький до економічного, потрібно зменшити навантаження трансформатора Т1, збільшивши напругу $U_{\text{н2}}$ трансформатора Т2. При цьому напрям додаткової ЕРС $\Delta E_{2б}$ зміниться на протилежний

$$\Delta E_{2б} = U_{H2} - U_{H1} = \frac{U_{\text{ном}}}{K^{\text{б}}_{\text{T2}}} - U_{\text{н1}}, \qquad (16)$$

звідки

$$K^{\text{б}}_{\text{T2}} = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{Н1}} + \Delta E_{2б}}. \qquad (17)$$

З врахуванням числових значень величин одержимо

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів трансформації трансформаторів напругою 10/0,4 кВ

Положення перемикача відгалужень	Додаток витків обмотки ВН,%	Відносна кількість витків	Номінальна напруга відгалуження, кВ	Кт
I	+5	1,05	10,5	26,25
II	+2,5	1,025	10,25	25,63
III	0	1	10	25
IV	-2,5	0,975	9,75	24,38
V	-5	0,95	9,5	23,75

$$K_{T2}^{б} = \frac{10}{0,4 + 0,01795} = 23,93.$$

Значення коефіцієнтів трансформації трансформаторів з вищою напругою 10 кВ для різних положень перемикача відгалужень наведені у таблиці 3.

Згідно з таблицею 3 вибираємо найближчий до розрахункового значення коефіцієнт трансформації трансформатора Т2 $K_{T2} = 23,75$, який відповідає п'ятому положенню перемикача відгалужень (-5%). При цьому встановлюється розподіл потужності між трансформаторами, близький до оптимального.

Очевидно, що для забезпечення оптимального розподілу потужностей можна також знизити напругу U_{H1} на виводах трансформатори Т1, збільшивши його коефіцієнт трансформації. Тоді матимемо

$$K_{T1}^{б} = \frac{U_{ном}}{U_{H2} - \Delta E_{2б}}. \qquad (18)$$

Згідно з (18) бажане значення коефіцієнта трансформації трансформатора Т1 буде дорівнювати

$$K_{T1}^{б} = \frac{10}{0,4 - 0,01795} = 26,17,$$

що відповідає першому положенню перемикача відгалужень (+5%).

Як бачимо, економічний режим роботи трансформаторів (або близький до економічного) можна забезпечити зміною коефіцієнтів трансформації одного з паралельно увімкнених трансформаторів. При цьому напруга U_2 на виході трансформаторів буде залежати від напруги U_1 на вході і потужності навантаження підстанції. Цю напругу можна визначити розрахунковим шляхом з врахуванням вирівнювальної ЕРС ΔE_1.

Якщо фактична напруга U_2 значно відрізняється від бажаного значення $U_{2б}$, то можна здійснити регулювання напруги одночасно двома трансформаторами, відповідно змінивши їх коефіцієнти трансформації так, щоб забезпечити заданий рівень напруги $U_{2б}$ при оптимальному розподілі потужності навантаження. Оптимізацію режиму роботи трансформаторів зміною їх коефіцієнтів трансформації потрібно здійснювати так, щоб забезпечити необхідну якість електроенергії в споживачів.

Висновки

Економічний розподіл потужності навантаження між трансформаторами через неоднорідність схеми відрізняється від натурального.

Найкорисніше економічний режим роботи трансформаторів різної номінальної потужності на знижувальних підстанціях при їх паралельній роботі можна забезпечити зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів.

Можливим способом оптимізації режимів роботи трансформаторів різної номінальної потужності є застосування поздовжньої компенсації реактивного опору одного з трансформаторів (більшої потужності).

Оптимізацію режимів роботи трансформаторів потрібно здійснювати так, щоб забезпечити їх економічність, необхідну якість електроенергії та надійність електропостачання.

Література

1 Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей [Текст] / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.

2 Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

3 Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Поспелов Г. Е., Сыч Н. М. – М.: Энергоатомиздат,1981. – 216 с.

4 T. H. Harrisonand B. Richardson, "Transformer Loss Reduction," Session, Cigre 12-04, 1988.

5 Романюк Ю. Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник [Текст] / Ю. Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.

6 Суходоля О. М. Питання енергозбереження в трансформаторах [Текст] / О. М. Суходоля // Электропанорама. – 2002. – №12. – С.43-45.

Стаття надійшла до редакційної колегії 09.09.14
Рекомендована до друку професором ***Костишиним В.С.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Николайчуком Я.М.*** *(Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль)*