

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯМ КІЛЬКОСТІ ВИРОБНИЧИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

На виробництвах для живлення певних технологічних установок звичайно використовують окремі автономні трансформатори. У випадках, коли споживання активної потужності такими установками коливається у досить широкому діапазоні, доцільно встановлювати відповідну автономну групу паралельно з'єднаних трансформаторів. При зниженні споживання активної потужності традиційно використовували вимикання одного або декількох трансформаторів для зниження

споживання ними реактивної потужності з мережі.

Такі традиційні методи були виправдані у попередні десятиліття, коли існували штрафні санкції щодо виробництв з відносно низьким $\cos\varphi$. В ті часи вартість спожитої активної енергії була низькою і для системи всіх загальнодержавних виробництв досить умовною. Але за останні роки, в умовах ринкової економіки, ситуація докорінно змінилася. Виробництва, як і побутові споживачі, тепер

сплачують за споживання активної електроенергії за досить високими тарифами, які складають приблизно 0,25 грн/кВт·год. Вони також здійснюють сплату за споживану реактивну енергію.

Проведені аналізи показують, що за певних умов і в сучасних взаємовідносинах постачальників та споживачів електроенергії регулювання кількості трансформаторів в автономній групі технологічного призначення може бути використаним для зменшення сумарних витрат активної і реактивної потужностей, тобто зниження фінансових витрат за спожиту активну і реактивну електроенергії.

Також звертає на себе увагу ще ряд нових важливих обставин. Тепер виробництва чим раз ширше використовують новітні електрофізико-хімічні технології та тиристорне енергетичне обладнання, застосування яких спричиняє суттєве підвищення споживання реактивних струмів. При застосуванні електроприводних механічних технологій $\cos \varphi = 0,9 \dots 0,8$, а при використанні сучасних електрофізикохімічних технологій цей показник знижується до $0,8 \dots 0,7$, а іноді і до суттєво нижчих значень. До того ж слід також взяти до уваги і те, що на виробництвах рівень споживання активної потужності визначається не сумою випадкових обставин, як у мережах загального користування, а відповідними технологічними програмами використання механічного обладнання та електрофізикохімічних установок.

Тобто, технологічно потрібний рівень споживання технологічною установкою активної потужності $P_{2\beta}$ спричиняє появу відповідних активних струмів на вторинному боці автономної трансформаторної групи. Разом з цим застосування нових технологій, електромеханічних перетворювачів енергії та електронних засобів призводить до додаткового споживання реактивної потужності, що збільшує загальний споживаний струм до

$$I_{2\beta k} = \frac{I_{2\beta}}{\cos \varphi_2} = \frac{I_{2\beta}}{k} \quad (1)$$

Цей струм $I_{2\beta k}$ при проходженні обмотками трансформаторів та кабелями, що з'єднують групу з n паралельно ввімкнених трансформаторів з первинною електричною мережею та технологічною установкою, викликає в них втрати активної потужності,

пропорційні квадратам таких повних струмів.

Загальна спроможність n трансформаторів в групі та відповідних кабельних ліній визначається максимальними потребами технологічної установки. Якщо вважати всі трансформатори в групі однаковими, то їх сумарна потужність $nS_{2ном}$ при певних рівнях $\cos \varphi_2$ мусить забезпечити максимальні потреби технологічної установки.

При зниженні цих потреб кількості ввімкнених трансформаторів можна зменшити до $d < n$. Але таке регулювання доцільно робити лише тоді, коли сумарні втрати активної енергії в трансформаторах після регулювання стануть меншими, ніж до регулювання. Подальші аналізи дозволяють визначити такі межі та можливе енергозбереження в абсолютних вимірах та грошових еквівалентах.

Сумарні втрати активної потужності в одному трансформаторі технологічного призначення:

$$\sum p = a + \left(\frac{\beta}{k} \right)^2 \cdot \epsilon, \quad (2)$$

де a – це втрати активної потужності у магнітопроводі трансформатора при $U_1 = U_{1ном}$, у випадку, що розглядається, будемо вважати ці втрати сталими;

ϵ – це втрати активної потужності в обмотках трансформатора при номінальному струмі, тобто:

$$\epsilon = m \cdot I_{2ном}^2 \cdot r_k, \quad (3)$$

де r_k – сумарний розрахунковий активний опір обмоток трансформатора (активний опір короткого замикання).

Величина β визначає відносний рівень навантаження активною потужністю одного трансформатора, тобто:

$$\beta = \frac{P_{2\beta}}{n \cdot S_{2ном}} \quad (4)$$

Величина $\left(\frac{\beta}{k} \right) = \beta_i$ визначає відносний рівень струмового навантаження трансформа-

торів при $\kappa = \cos \varphi_2$. Тоді сумарні втрати активної потужності в d паралельно з'єднаних трансформаторах:

$$\sum \sum p_{Tp} = d \cdot \left[a + \left(\frac{\beta}{\kappa} \right)^2 \cdot \epsilon \right] \quad (5)$$

Сумарні втрати активної потужності у первинному і вторинному кабелях також можна визначити узагальнено з певним рівнем наближення, який можна уточнити при відомих конкретних виробничих умовах. У порівнянні з поодиноким автономним трансформатором з відповідними кабелями в кабелях для n паралельно з'єднаних трансформаторів площа перерізу жил мусить збільшитись в n разів, а її активний опір зменшиться в n разів, тобто:

$$r_{\text{каб}} = \frac{r_{\text{каб}}}{n} \quad (6)$$

Залежність площ перерізів обмоток і кабелів, а разом з тим і їх активних опорів r_{κ} і $r_{\text{каб}}$ від значення $I_{2\text{ном}}$ та $I_{1\text{ном}}$ цього трансформатора дозволяє встановити між їхніми значеннями пропорційну залежність.

$$r_{\text{каб}} = c \cdot r_{\kappa} \quad (7)$$

Статистичні оцінки перерізів обмоток та жил кабелів, а також їх довжин свідчать, що значення коефіцієнту c у більшості випадків є близьким до одиниці. Тому в подальших аналізах доцільно вважати $c=1$, тобто $r_{\text{каб}} = r_{\kappa}$, а в конкретних розрахунках при наявності відповідних даних враховувати реальні значення.

При таких узагальненнях, з врахуванням (3), (6) та (7), сумарні втрати активної потужності в кабелях для групи з n трансформаторів при ввімкнених d трансформаторах:

$$\begin{aligned} \sum \sum p_{\text{каб}} &= m \cdot \left(\frac{\beta \cdot I_{2\text{ном}} \cdot n}{\kappa} \right)^2 \cdot \frac{r_{\kappa}}{d} = \\ &= \frac{n^2}{d} \cdot \left(\frac{\beta}{\kappa} \right)^2 \cdot \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

Сумарні втрати активної потужності в d трансформаторах за (5) та кабелях за (8):

$$\begin{aligned} \sum \sum p &= \sum \sum p_{Tp} + \sum \sum p_{\text{каб}} = \\ &= d \cdot \left[a + \left(1 + \frac{d}{n} \right) \cdot \left(\frac{\beta}{\kappa} \right)^2 \cdot \epsilon \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Припустимо, що зараз ввімкнено d трансформаторів і споживана технологічною установкою активна потужність $P_{2\beta}$ зменшується. При цьому вважаємо, що $\kappa = \cos \varphi_2 = \text{const}$. За зазначених умов знайдемо такий граничний рівень навантаження трансформаторів активною потужністю $\beta_{\text{вим}}$, нижче якого вже є економічно доцільним вимикати ще один трансформатор. Для цього необхідно визначити і порівняти втрати активної потужності у трансформаторі до і після операції вимикання.

Оскільки загальний струм $I_{2\beta}$, який діє в кабельних лініях, при цьому не змінюється, то втрати активної потужності в d або $(d-1)$ трансформаторах визначаються за (5). При цьому навантаження в $(d-1)$ трансформаторах збільшується, відповідно змінюються і втрати активної потужності:

$$\begin{aligned} \sum \sum p_{Tp2} &= (d-1) \cdot \left[a + \left(\frac{\beta + \frac{\beta}{d-1}}{\kappa} \right) \cdot b \right] = \\ &= (d-1) \cdot \left[a + \left(\frac{d}{d-1} \right)^2 \cdot \left(\frac{\beta}{\kappa} \right)^2 \cdot b \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Вимикання ще одного трансформатора буде економічно доцільним за умови $\sum \sum p_{Tp2} < \sum \sum p_{Tp}$. Після підстановки відповідних виразів за (5) та (10) і впорядкування:

$$\beta_{\text{вим}} < \kappa \sqrt{\frac{a}{b} \cdot \left(1 - \frac{1}{d} \right)} \quad (11)$$

При переході до відносних рівнів

навантаження загальним струмом:

$$\beta_{ik_{\text{вим}}} = \frac{\beta_{\text{вим}}}{k} < \sqrt{\frac{a}{b} \cdot \left(1 - \frac{1}{d}\right)}. \quad (12)$$

Подібним же аналізом можна показати, що при зростанні споживання технологічної установкою активної потужності $P_{2\beta}$ умова економічно доцільного вмикання додаткового трансформатора визначається:

$$\beta_{ik_{\text{вим}}} = \frac{\beta_{\text{вим}}}{k} > \sqrt{\frac{a}{b} \cdot \left(1 + \frac{1}{d}\right)}. \quad (13)$$

Знайдені нові критерії можна застосувати для знаходження додаткових ресурсів енергозбереження. Такі можливості краще розглянути на конкретному прикладі. Виробнича технологічна установка живиться від автономної групи однакових трансформаторів типу ТМ-630/10 з $U_{2\text{ном}}=0,23$ кВ, $I_{2\text{ном}}=1570$ А, $a=1,56$ кВт, $b=7,6$ кВт. Установа споживає активну потужність циклічно при п'ятих значеннях $P_{2\beta}$: 600 кВт, 400 кВт, 180 кВт, 90 кВт, 0 кВт. При сталому $\cos\varphi_2=0,7$ зручніше ці величини відобразити їх струмовими еквівалентами. Терміни дії відповідних значень $I_{2\beta k}$ в середньому за 8-годинну робочу зміну становлять: струм 3750 А протягом 0,5 год; струм 2500 А – 0,5 год; струм 1000 А – 1 год; струм 500 А – 4 год; струм $I_{2\beta k}=0$ А – 2 год.

Необхідна кількість трансформаторів d визначається за найвищим потрібним рівнем струму $I_{2\beta k} = 3750$ А. Для забезпечення роботи достатньо застосувати 3 трансформатори. При

цьому можливі принаймні два варіанти їх використання:

1 – простіший в експлуатації і найбільш розповсюджений в сучасних умовах, коли протягом кожного циклу і зміни в цілому всі 3 трансформатори залишаються ввімкненими;

2 – економічніший, але складніший в експлуатації, коли для кожного рівня навантаження за визначеними критеріями обирається економічно доцільна кількість трансформаторів.

За критеріями (12) та (13) визначаємо економічно доцільні кількості трансформаторів: для струму 2500 А – три трансформатори; для струму 1000 А – два трансформатори; для струму 500 А – один трансформатор; при $I_{2\beta k} = 0$ краще вимкнути всі трансформатори. Результати розрахунків втрат активної електричної енергії для першого і другого варіантів експлуатації зведені в таблицю.

При першому варіанті експлуатації сумарні втрати активної енергії становлять $\Sigma W_1=47$ кВт·год; відповідно при другому варіанті $\Sigma W_2=27$ кВт·год. Різниця між ними складає 20 кВт·год. Вона визначає можливу економію електроенергії при застосуванні другого варіанту. В грошовому еквіваленті економія становить 5 грн. за одну зміну або при 300 робочих днів на рік: при однозмінній роботі – 1500 грн.; двозмінній – 3000 грн.; тримінній – 4500 грн. Така економія коштів створює передумови до застосування систем автоматичної комутації трансформаторів відповідно до критеріїв (12) та (13).

Висновки

Проведені аналізи показують, що в умовах промислових виробництв, де використовують економічні спеціалізовані трансформатори для сучасних електрофізикотехнічних технологій,

Таблиця

Результати розрахунків втрат активної електричної енергії для першого і другого варіантів експлуатації

| $I_{2\beta k}$ (А) | T (год) | Варіант 1 | | | Варіант 2 | | |
|-----------------------|--------------|-----------|-----------------------|---------------------------|-----------|-----------------------|---------------------------|
| | | d_1 | Σp_1 (кВт) | ΣW_1 (кВт·год) | d_2 | Σp_2 (кВт) | ΣW_2 (кВт·год) |
| 3750 | 0,5 | 3 | 16,2 | 8,1 | 3 | 16,2 | 8,1 |
| 2500 | 0,5 | 3 | 11,4 | 5,7 | 3 | 11,4 | 5,7 |
| 1000 | 1 | 3 | 5,7 | 5,7 | 2 | 4,6 | 4,6 |
| 500 | 4 | 3 | 4,8 | 19,2 | 1 | 2,3 | 9,3 |
| 0 | 2 | 3 | 4,7 | 9,4 | 0 | 0 | 0 |
| Сумарні втрати | | | | 47,1 | | 26,7 | |

можна досягти помітного енергозбереження в трансформаторах та живильних кабельних лініях шляхом доцільного регулювання кількості таких трансформаторів для певних рівнів навантаження за допомогою нових визначених критеріїв.

Література

1. Красников В.М. Електромеханіка промислових комплексів. - К.: НМКВО, 1991. - 275 с.
2. Красников В.М., Новиков А.В. Електромеханіка. - К.: Вища школа, 1994. - 488 с.
3. Шинкаренко В.Ф., Красников В.М. Вступ до електромеханіки.-К.: Політехніка, 2002. - 94 с.