

## ОЦІНКА ВТРАТ НЕРОБОЧОГО ХОДУ В ТРАНСФОРМАТОРАХ З РЕГУЛЮВАННЯМ ПІД НАПРУГОЮ

Мірошник О. В., Мірошник О. О., Пазій В. Г., Котляр О. А.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

*Здійснена порівняльна оцінка зміни втрат активної потужності в повітряних лініях та втрат неробочого ходу в силових трансформаторах.*

**Постановка проблеми.** Проблема втрат електроенергії при її транспорті є досить гострою для електроенергетики. За статистикою саме в розподільних мережах (РМ) щорічно фактичні втрати сягають 15% від надходження електроенергії, що істотно впливає на тарифи на електроенергію. Тому особливої уваги заслуговує автоматизація керування режимами та моніторинг втрат електроенергії при її транспорті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для регулювання напруги під навантаженням в розподільних мережах найбільшого розповсюдження отримали трансформатори з автоматичним перемиканням відпайок під навантаженням. Регульовальні відпайки розташовують на обмотці вищої напруги, що дозволяє об'єднати струмове навантаження на апаратуру перемикання і зберегти, як правило, постійною виткову напругу, а відповідно, і магнітну індукцію в сталі трансформатора незалежно від зміни напруги в мережі. На сьогоднішній день завдяки розширенню функціональних можливостей АСКОЕ з'явилась можливість побудувати систему керування пристроями регулюванням під навантаженням (РПН) трансформаторів з урахуванням не тільки втрат напруги, але і втрат електроенергії в лінії.

В роботі [1] показане оперативне перемикання регульовальних відпайок трансформаторів з РПН в центрах живлення радіальної мережі з урахуванням рівнів напруг не тільки на шинах розподільчої трансформаторної підстанції (РТП), а і в характерних точках мережі для мінімізації втрат електроенергії в лінії.

**Мета статті.** Дослідження зміни втрат неробочого ходу трансформатора розподільної трансформаторної підстанції у разі вмикання регульовальної відпайки  $\delta U = +10\% U_H$ , яка видає максимальну напругу на нижчій стороні підстанції та порівняльна оцінка цієї величини з втратами активної потужності в повітряних лініях.

**Основні матеріали дослідження.** Втрати неробочого ходу трансформатора  $\Delta P_{нх}$  складаються із

- магнітних втрат – (втрат в сталі магнітної системи);
- втрат в сталених елементах конструкції остова трансформатора, викликаних частковим відгалуженням головного магнітного потоку;
- втрат в первинній обмотці, викликаних струмом неробочого ходу;
- діелектричних втрат в ізоляції.

Діелектричні втрати в ізоляції незначні (особливо для трансформаторів класу напруги до 110 кВ), і ними доцільно знехтувати.

Вважається [2], що втрати в первинній обмотці також можуть не враховуватись, оскільки, як правило, складають менше 1% від втрат неробочого ходу.

Втрати в елементах конструкції трансформатора на неробочому ході теж порівняно незначні і враховуються з іншими так званими добавочними втратами.

Основну частину втрат неробочого ходу складають магнітні втрати – втрати в активній сталі магнітопроводу. Їх можна розділити на втрати від гістерезису та втрати від вихрових струмів.

Для магнітопроводів із холоднокатаної сталі з товщиною листів 0,5 та 0,35 мм втрати від гістерезису складають до 25÷35%, і втрати від вихрових струмів – до 75÷65% повних втрат в сталі.

Для розрахунків використовують результати експериментальних досліджень, на основі яких виведена залежність питомих втрат потужності на одиницю маси від індукції та частоти

$$\Delta P \approx B^m f^n, \text{ Вт/кг}, \quad (1)$$

де  $B$  – індукція в сталі магнітопровода;

$f$  – частота струму мережі;

$m = 3$  при  $B = 1,5 \div 1,8$  Тл.

Індукція визначається виразом

$$B = \frac{U_B \cdot 10^4}{4,44 f \cdot \Pi}, \quad (2)$$

де  $U_B$  – виткова напруга,

$\Pi$  – площа перерізу магнітопроводу.

Виткова напруга визначається:

$$U_B = \frac{U_{мер}}{W}, \quad (3)$$

де  $U_{мер}$  – напруга мережі;

$W$  – число витків обмотки, підключеної до мережі з напругою  $U_{мер}$ .

Пристрій РПН з межами регулювання  $\pm 10\%$  від номінальної напруги змінює число витків на вищій стороні силового трансформатора. Розглянемо режим роботи трансформатора у разі підключення на вищій стороні мінімального числа витків, що має підвищити напругу на нижчій стороні на +10%.

Нехай  $W_1$  та  $W_2$  – число витків відповідно на вищій та нижчій стороні трансформатора, причому  $W_2 = const$ ,  $W_1 = var$ .

Виткова напруга на вищій стороні до перемикання пристрою РПН становила

$$U_{B1} = \frac{U_1}{W_1}, \quad (4)$$

при цьому виткова напруга на нижчій стороні складе

$$U_{B2} = \frac{U_2}{W_2}. \quad (5)$$

Якщо в результаті роботи РПН число витків на вищій стороні зменшилось на  $\Delta W_1$ , тоді нове значення виткової напруги складе

$$U'_{B1} = \frac{U_1}{W_1 - \Delta W_1}, \quad (6)$$

а отже  $U'_{B1} > U_{B1}$ .

Але при цьому, звичайно, зміниться і виткова напруга на нижчій стороні:

$$U'_{B2} > U_{B2}, \quad (7)$$

оскільки має виконуватись умова

$$U_{B1} = U_{B2} = U_B \text{ і } U'_{B1} = U'_{B2} = U'_B.$$

Оскільки межі регулювання напруги трансформатора складають

$$\delta U = \pm 10 U_n, \quad (8)$$

то під час його роботи на максимальному значенні напруги на нижчій стороні маємо:

$$U_2 = U_{H2} + 0,1 U_{H2} = 1,1 U_{H2}, \quad (9)$$

де  $U_{H2}$  – номінальна напруга нижчої сторони силового трансформатора.

Якщо на нижчій стороні на відпайці "0" виміряна номінальна напруга, то на відпайці +10 % виткова напруга, розрахована на нижчій стороні, складас:

$$U'_{B2} = \frac{U_2}{W_2} = \frac{1,1 U_{H2}}{W_2}. \quad (10)$$

Аналізуючи вирази (9), (10) і (2), знаходимо нове значення індукції в сталі після перемикання витків пристроєм РПН на відпайку +10%.

$$B' = B \frac{U'_B}{U_B} = 1,1 B. \quad (11)$$

Згідно (1) збільшення питомих втрат потужності в трансформаторі становитиме

$$\frac{\Delta P'}{\Delta P} = 1,1^m. \quad (12)$$

Задаючись значенням показника  $m = 3$ , знаходимо

$$\frac{\Delta P'}{\Delta P} = 1,33, \quad (13)$$

та враховуючи, що для трансформаторів ТМН напругою 35/10 кВ потужністю від 1000 кВА до 4000 кВА втрати неробочого ходу залежно від потужності змінюються в межах  $P_{нх} = 2,35 \div 5,7$  кВт, знаходимо для цих трансформаторів величини втрат неробочого ходу внаслідок перемикання відпайок з середнього (номінального) положення "0%" в положення максимального значення напруги на нижчій стороні "+10%" (табл. 1):

$$\Delta P_{нх} = \frac{\Delta P'}{\Delta P} \Delta P_{насн},$$

де  $\Delta P_{насн}$  – паспортне значення втрат неробочого ходу трансформатора.

Відносне зростання втрат неробочого ходу в трансформаторі внаслідок перемикання з відпайки 0 % на відпайку +10% розрахуємо за виразом

$$\delta P_{нх} = \frac{\Delta P_{нх} - \Delta P_{насн}}{\Delta P_{насн}} 100\%.$$

Для порівняння оцінимо втрати активної потужності в повітряних лініях (ПЛ) 10 кВ, для чого приймаємо, що довжина ПЛ 10 кВ знаходиться в межах

$$l_{10} = 10 \dots 25 \text{ км},$$

а коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = 0,8 \dots 0,9.$$

Граничне значення навантаження повітряної лінії в години максимуму навантаження можна визначити значеннями інтервалів економічних навантажень для відповідних марок проводів [3].

Втрати активної потужності ПЛ 10 кВ визначаються виразом

$$\Delta P_{10} = I^2 r_0 l_{10} = \frac{S^2}{3U \cos^2 \varphi} r_0 l_0, \text{ Вт} \quad (14)$$

де  $S$  – повна потужність, що пропускається по лінії, кВА;

$U$  – напруга в лінії, кВ;

$r_0$  – питомий опір проводів, Ом/км.

Таблиця 1 – Розрахункові значення

| Силовий трансформатор  |  |  | Повітряні лінії                       |                       |  |   |                                       |              |
|--|--|--|---------------------------------------|-----------------------|--|---|---------------------------------------|--------------|
| Номінальна потужність трансформатора РТП, S <sub>н</sub> , кВА | Паспортне значення втрат неробочого ходу трансформатора $\Delta P_{\text{пасп}}$ , кВт | Втрати неробочого ходу на відпайці +10%U <sub>н</sub> , $\Delta P_{\text{нх}}$ , кВт | Інтервал економічних навантажень, кВА | Рекомендований провід | Питомий активний опір провoda постійному струмові при 20° С, Ом/км | Втрати потужності в повітряних лініях $\Delta P_{\Sigma}$ , кВт |                                       |              |
|  |  |  |                                       |                       |  | на 1 км довжини лінії $\frac{\Delta P}{I_{10}}$ , Вт/км         | ПЛ довжиною I <sub>10</sub> =10/25 км |              |
|  |  |  |                                       |                       |  |   | на 1 ПЛ                               | на 6 ПЛ      |
| 1000   | 2,35   | 3,13   | 152,5                                 | АС-25                 | 1,146  | 166   | 1...2,5                               | 6...15       |
| 1600   | 3,1  | 4,12   | 312,5                                 | АС-35                 | 0,773  | 402,5   | 2,8...7                               | 16,8...42    |
| 2500   | 4,35   | 5,79   | 462,5                                 | АС-50                 | 0,592  | 615   | 4,7...11,7                            | 28,2...70,2  |
| 4000   | 5,70   | 7,58   | 670                                   | АС-50                 | 0,592  | 1270,5  | 9,9...24,6                            | 59,4...147,6 |

Скориставшись таблицею інтервалів економічних навантажень [3], візьмемо середні значення навантажень в цих інтервалах і розрахуємо за виразом (14) для цих навантажень орієнтовні величини втрат активної потужності в ПЛ 10 кВ в години максимальних навантажень. Дані розрахунку зведено в табл. 1.

Прийнявши значення коефіцієнта завантаження силового трансформатора  $K_z = 1$  порівняємо втрати неробочого ходу в трансформаторі 35/10 кВ та втрати потужності в повітряних лініях, які живляться від цього трансформатора. Як видно з табл. 1 величини втрат неробочого ходу в трансформаторі з ввімкненою РПН відпайкою +10% залишаються в середньому на порядок меншими, ніж втрати активної потужності в лініях, що живляться від даного трансформатора на підстанції. В той же час очікуване збільшення втрат неробочого ходу трансформатора внаслідок його роботи на "максимальний" відпайці складе, наприклад, не більше кількох відсотків від величини втрат активної потужності в повітряних лініях для розподільної мережі з шести повітряних ліній, що відходять від РТП 35/10 кВ.

**Висновки.** Оперативний моніторинг вимірювання відхилення напруги на шинах споживачів ТП 10(6)/0,4 кВ дає можливість оптимізувати режим роботи пристроїв РПН в ЦЖ з метою зменшення втрат активної енергії в ПЛ

Перемикання регульованих відпайок трансформатора з РПН на максимальні значення напруги на нижчій стороні призводить до збільшення втрат неробочого ходу трансформатора, але це збільшення втрат складає лише кілька відсотків від втрат активної енергії в ПЛ.

#### Список використаних джерел

1. Лут Н. Т. Расчет потерь электрической энергии в распределительных сетях в реальном времени с

учетом параметров окружающей среды / Н. Т. Лут, А. А. Мирошник // Энергетика і автоматика "Науковий журнал". – Київ № 2, 2010, [http://nbuv.gov.ua/e-journals/eia/2010\\_1/10lmtpro.pdf](http://nbuv.gov.ua/e-journals/eia/2010_1/10lmtpro.pdf)

2. Пиотровский Л. М. Электрические машины / Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия. – 1972. – 504 с.

3. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.

#### Аннотация

### ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА В ТРАНСФОРМАТОРАХ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Мирошник А. В., Мирошник А. А.,  
Пазий В. Г., Котляр А. А.

*Выполнена сравнительная оценка изменения потерь активной мощности в воздушных линиях и потерь холостого хода в силовых трансформаторах с РПН.*

#### Abstract

### DEFINITION OF LOSSES OF ELECTRICAL ENERGY IN CONDITIONS OF INCOMPLETENESS OF THE AUTHENTIC INFORMATION

O. Miroshnyk, O. Miroshnyk,  
V. Pazij, O. Kotliar

*Is executed comparative estimation of change of losses of active capacity in air lines and nomet single course in power(force) transformers with RUV.*