

# КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ І КОМПОНЕНТИ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.314

**О. П. Левандовський**, старший викладач,

**А. М. Петренко**, асистент

Черкаський державний технологічний університет

бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

[oguru2@ukr.net](mailto:oguru2@ukr.net)

[petrenko1969@ukr.net](mailto:petrenko1969@ukr.net)

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

*В статті представлено один із способів підвищення якості роботи силових трансформаторів. Основні втрати електроенергії приходяться на мережі напругою 0,4 кВ при несимметричних навантаженнях внаслідок появи потоків нульової послідовності в робочих обмотках трансформаторів. Для усунення цих потоків пропонується розроблене симметризуюче пристрій, який своїм напрямленим потоком нульової послідовності повністю компенсує перекося фаз, який є причиною несиметрії.*

**Ключові слова:** несиметрія, перекося фаз, симметризуюче пристрій, потік нульової послідовності, втрати електроенергії.

**Постановка проблеми.** Несиметричне навантаження фаз – одна з головних причин втрат електроенергії в силових трансформаторах. Вона позначається й у зниженні якості електроенергії, що постачається споживачам, які від них живляться [1]. Підвищенню якості вихідних напруг розподільних трансформаторів при різних режимах їх роботи, а також вирішенню цього завдання з мінімальними витратами присвячений матеріал авторів.

**Аналіз останніх джерел.** Огляд літератури показує, що підвищення роботи силових трансформаторів шляхом цілеспрямованого усунення явища перекося фаз в електричних мережах напругою 0,4 кВ за допомогою спеціально розроблених пристроїв ще не здійснювалося.

**Метою статті** є підвищення ефективності роботи силових трансформаторів за рахунок компенсації потоків нульової послідовності, що виникають при несиметричному навантаженні фаз.

**Виклад основного матеріалу.** У чотирипровідних електричних мережах 0,4 кВ України в основному використовуються трансформатори зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка-нуль» ( $Y/Y_n$ ). Однак ці, найдешевші у виготовленні, трансформатори в експлуатації економічні лише при симетричному навантаженні фаз. Реально ж у мережах з великою питомою вагою однофазних навантажень рівномірність їх підключення в часі пофазно порушується і втрати електричної енергії в таких

трансформаторах і лініях різко зростають. Краща ситуація при застосуванні трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зігзаг-нуль» ( $Y/Z_n$ ), але вони значно дорожчі.

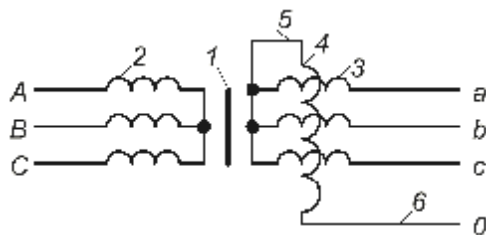
Втрати короткого замикання  $R_k$  трансформатора зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  залежать від величини струму в нульовому проводі і з його збільшенням різко зростають. Це зростання обумовлене появою потоків нульової послідовності ( $F_0$ ) в магнітних системах трифазних трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$ , створюваних струмами небалансу  $I_{нб}$ , які проходять в нульовому проводі мережі [2]. Потіки  $F_0$  мають характер потоків розсіювання, аналогічних потокам короткого замикання  $F_{кз}$ , але за величиною вони значно більші, про що, зокрема, дозволяють судити співвідношення повних опорів  $Z_0$  і  $Z_{кз}$ . Експериментальні дані показують, що  $Z_0$  більше  $Z_{кз}$  в 5-8 разів, а для деяких конструкцій трансформаторів – в 12 і більше разів.

Звідси неминучим наслідком нерівномірності навантаження фаз у мережах з трансформаторами зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  є різке спотворення системи фазних напруг (на практиці це називають зміщенням нульової точки). Як результат – збільшення втрат і в лініях 0,4 кВ. Спотворення фазних напруг у реальних умовах експлуатації нерідко викликає їх відхилення, яке вже на низьковольтних вводах трансформатора значно перевищує норми ДСТУ [3]. Наприкінці ліній, за даними досліджень, це відхилення напруг при-

близно в два рази більше. При зазначеній якості живлення споживачів підвищення в них рівня втрат електроенергії та відмов у роботі цілком природно. На жаль, до теперішнього часу цілеспрямованих робіт з цих питань проводилося недостатньо, хоча, як показує практика, економічна втрата від спотворення напруг у споживачів досить значна. Завищення встановленої потужності трансформаторів  $Y/Y_n$  понад необхідної з розрахунку (для зниження несиметрії напруги) дає незначний ефект, але разом з тим при цьому різко підвищується рівень втрат електроенергії в мережі. Крім того, струми нульової послідовності при несиметрії навантаження в магнітній системі трансформатора  $Y/Y_n$  створюють потоки нульової послідовності, які, замикаючись через його бак, дно, кришку, розігрівають їх, погіршуючи охолодження активної частини. Це підвищує температуру ізоляції обмоток понад норму, і трансформатор, при сумарному навантаженні нижче номінального, виявляється перевантаженим. Такий стан об'єктивно викликає необхідність збільшення номінальної потужності трансформатора на один, а іноді і на два шаблі більше розрахункової з усіма впливаючими наслідками.

Для усунення зазначених недоліків розроблено спеціальний симетрувальний пристрій (СП), який вбудовується в трансформатор зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$ .

Симетрувальний пристрій являє собою окрему обмотку, накладену у вигляді бандажа поверх обмоток високої напруги трансформатора зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  (рис. 1). Обмотка симетрувального пристрою розрахована на тривале прозодження номінального струму трансформатора, тобто на повне номінальне однофазне навантаження.

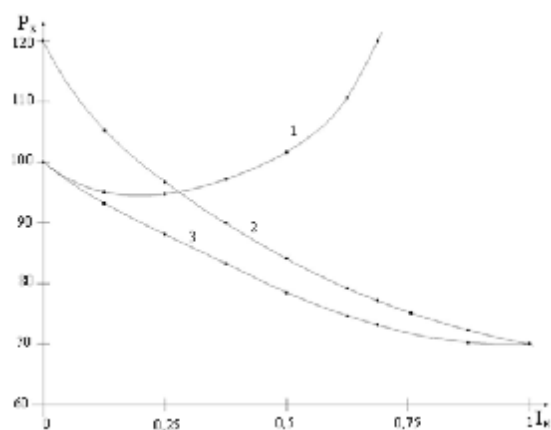


**Рис. 1. Схеми включення основних і додаткових обмоток трансформатора:**

1 – тристрижньовий магнітопровід трансформатора; 2 – обмотка високої напруги (ВН); 3 – обмотка низької напруги (НН); 4 – обмотка компенсаційна; 5 – кінець компенсаційної обмотки, яка підключається до нейтралі обмоток низької напруги; 6 – кінець компенсаційної обмотки, який виводиться назовні

Обмотка симетрувального пристрою включена у розтин нульового проводу трансформатора  $Y/Y_n$  з розрахунку на те, що при несиметричному навантаженні і появі струму в нульовому проводі створювані в магнітопроводі потоки нульової послідовності в робочих обмотках  $F_{op}$  трансформатора  $Y/Y_n$  повністю компенсуються протилежно спрямованими потоками нульової послідовності  $F_{op}$  від симетрувального пристрою. Тим самим, у кінцевому рахунку, усувається перекіс фазних напруг.

На рис. 2 показані залежності втрат короткого замикання  $P_k$  трансформатора ТМ 100/10 від величини струму в нульовому проводі при  $I_0=I_c=I_a$  і  $I_n$  від нуля до  $I_n$  при різних схемах з'єднання обмоток.



**Рис. 2. Залежність втрат короткого замикання трансформатора ТМ 100/10 від схем з'єднання обмоток і величини струму в нульовому проводі:**  
1 – трансформатор зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$ ; 2 – трансформатор зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Z_n$ ; 3 – Трансформатор зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  з СП

Енергетичні характеристики трансформаторів  $Y/Y_n$  (втрати короткого замикання, холостого ходу та ін.) від накладання симетрувального пристрою практично не змінюються, але при цьому значно скорочуються втрати електроенергії в мережі. Система фазних напруг при нерівномірному навантаженні фаз симетрується так само, як і при схемі з'єднання обмоток  $Y/Z_n$ .

Може виникнути побоювання, що при проходженні значного струму нульової послідовності через додаткову обмотку, включену в нейтраль сторони НН, виникне значна напруга на нейтралі НН та, як наслідок, підвищення напруги на фазах. Розрахунки й експерименти показали, що напруга на обмотці компенсаційних витків трансформатора з симетрувальним пристроєм при струмі в нульо-

Таблиця 1

**Розрахунки втрат електроенергії в трансформаторах за рахунок несиметрії навантаження**

| $S_n$ , кВА | Марка і переріз проводу | $I_{нб}$ , в.о. | $P_k$ , Вт       |                  |                       | $W$ , кВт·год         |                  |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
|             |                         |                 | Y/Y <sub>n</sub> | Y/Z <sub>n</sub> | Y/Y <sub>n</sub> з СП | Y/Y <sub>n</sub> з СП | Y/Y <sub>n</sub> |
| 25          | A35                     | 0,25            | 633              | 599              | 530                   | 233                   | 139              |
| 40          | A35                     | 0,25            | 979              | 878              | 777                   | 501                   | 203              |
| 63          | A35                     | 0,25            | 1450             | 1278             | 1130                  | 871                   | 296              |
| 100         | A35                     | 0,1             | 1941             | 2127             | 1854                  | 729                   | 546              |
| 100         | A35                     | 0,2             | 2125             | 2014             | 1770                  | 1026                  | 488              |
| 100         | A35                     | 0,25            | 2278             | 1967             | 1739                  | 1693                  | 454              |
| 100         | A35                     | 0,3             | 2492             | 1926             | 1716                  | 2569                  | 418              |
| 100         | A35                     | 0,4             | 3073             | 1863             | 1693                  | 5037                  | 335              |
| 100         | A35                     | 0,5             | 3857             | 1825             | 1702                  | 8609                  | 238              |
| 160         | A35                     | 0,25            | 3272             | 2645             | 2339                  | 3521                  | 611              |
| 250         | A35                     | 0,25            | 4665             | 3694             | 3266                  | 6196                  | 852              |

вому проводі, рівному номінальному, досягає величини номінальної фазної напруги і врівноважує на нейтралі обмоток низької напруги електрорушійну силу нульової послідовності від робочих обмоток до нульового значення, звичайно, за умови правильного узгодження витків робочих обмоток та компенсаційних.

Розроблена конструкція значно знижує опір нульової послідовності силового трансформатора. Це означає істотне збільшення струмів однофазного короткого замикання і є однією з переваг трансформаторів Y/Y<sub>n</sub> з СП, тому що забезпечує легке і надійне налагодження релейного захисту та його чітку роботу при КЗ. Крім того, руйнівний вплив збільшеного струму однофазного КЗ на обмотки трансформатора Y/Y<sub>n</sub> з СП значно нижчий, ніж від струму КЗ при відсутності компенсаційної обмотки, тому що потужний несиметричний руйнуючий потік нульової послідовності повністю компенсується.

Проведений аналіз мереж України дозволив визначити середньостатистичну мережу 0,4 кВ. Вона має такі параметри: потужність трансформатора – 100 кВА (з урахуванням комунально-побутових споживачів у містах та міських селищах); довжина лінії – 0,8 км: кількість ліній на одній ТП – 2,5; переріз проводу лінії – 35 мм<sup>2</sup>. Навантаження лінії 0,4 кВ прийняте пропорційно потужності трансформатора, від якого вона живиться, і вважається рівномірно розподіленим по всій довжині лінії. Час використання максимуму навантаження в році – 2000 годин. Величина струму в нульовому проводі – 0,25 від номінального фазного. Розрахунки додаткових втрат електричної енергії за рахунок несиметрії навантаження були виконані за відомими формулами із застосуванням методу симетричних складових [2]. Вони проводилися залежно від величини струму в нульовому проводі, значення якого змінювалося від 0 до 0,5 номінального фазного для трансформаторів потужністю від 25 до 250 кВА. Переріз нульового проводу приймався рівним перерізу фазних проводів.

Результати розрахунків наведено в табл. 1 ( $S_n$  – номінальна потужність трансформатора, кВА;  $I_{нб}$  – струм у нульовому проводі (у відносних одиницях);  $P_k$  – втрати короткого замикання, Вт;  $W$  – річна економія електроенергії в мережах з трансформаторами Y/Y<sub>n</sub> з СП порівняно з мережами з трансформаторами Y/Y<sub>n</sub>).

Зіставлення втрат у середньостатистичній електричній мережі при нерівномірному навантаженні з трансформаторами з різними схемами з'єднання обмоток показує, що найбільш економічною з них є схема Y/Y<sub>n</sub> з СП. Можна додати й інші позитивні сторони цієї схеми порівняно з Y/Y<sub>n</sub>:

- відсутність додаткового нагрівання бака потоками  $F_0$ ;
- підвищення стійкості до однофазних струмів КЗ;
- надійність роботи тощо.

Природно, що установка в трансформаторах навіть такого простого симетрувального пристрою, який запропоновано, вимагає додаткових витрат на матеріали та виготовлення. Виконані розрахунки термінів його окупності залежно від величини струму в нульовому проводі дали результати, наведені в табл. 2 (струм небалансу зазначений у відносних одиницях).

Таблиця 2

**Термін окупності трансформатора Y/Y<sub>n</sub> з СП**

| $I_{нб}$ , в.о. | Номінальна потужність трансформатора Y/Y <sub>n</sub> з СП ( $S_n$ ), кВА |     |     |     |     |     |
|-----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 25  | 40  | 63  | 100 | 160 | 250 |
|                 | Термін окупності, рік   |     |     |     |     |     |
| 0,1             | 13,5  | 7   | 5,1 | 4,7 | 2,9 | 1,9 |
| 0,2             | 3,2   | 1,7 | 1,2 | 1,0 | 0,6 | 0,4 |
| 0,25            | 2,0   | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,2 |
| 0,3             | 1,4   | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,2 |
| 0,4             | 0,7   | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| 0,5             | 0,4   | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

З таблиці випливає, що при середньостатистичному струмі в нульовому проводі 0,25

від номінального фазного симетрична обмотка тільки у трансформаторів  $S_n = 25$  кВА окупатиметься протягом двох років і у  $S_n = 40$  кВА – протягом одного року, для всіх інших потужностей окупність менша року.

**Висновки.** Трансформатори в середньому працюють близько 40 років, тому нескладно визначити підсумковий прибуток підприємства, що встановило в мережах 0,4 кВ з несиметричним навантаженням фаз трансформатори зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  з СП. Причому, значний економічний ефект відбувається тільки за рахунок скорочення нічим не виправданих втрат електроенергії в трансформаторах і в лініях.

#### Список літератури

1. Иванов В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987, с. 171.
2. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях : руководство для практических расчетов / Железко Ю. С., Артемьев А. В.,

Савченко О.В. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – с. 25, 254.

3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

#### References

1. Ivanov, V. S. and Sokolov, V. I. (1987) Modes of consumption and quality of electric power of the systems of power supply of industrial enterprises. Moscow: Energoatomizdat, p. 171 [in Russian].
2. Zhelezko, Ju. S., Artem'ev, A. V. and Savchenko, O. V. (2004) A calculation, analysis and setting of norms of electric power losses in electric networks: Guidance for practical calculations. Moscow: Izd-vo NC ENAS, pp. 25, 254 [in Russian].
3. GOST 13109-97. Electric energy. Hardware compatibility is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in the systems of power supply of general setting [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 07.04.2014.

**O. P. Levandovskiy**, senior lecturer,  
**A. N. Petrenko**, assistant  
 Cherkasy State Technological University  
 Schevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
[oguru2@ukr.net](mailto:oguru2@ukr.net)  
[petrenko1969@ukr.net](mailto:petrenko1969@ukr.net)

#### INCREASE OF THE EFFICIENCY OF WORK OF POWER TRANSFORMERS

*The problem of losses of electric power which is actual for Ukrainian energy system is examined in the article. Basic losses are on networks of 0,4 kV, the slowness of which only in Cherkasy region makes over 20 thousand kilometres. Considerable losses of electric power appear due to unbalance, caused by plenty of monophasic users. Working transformers with the charts of a «star-star-zero» connection of windings ( $Y/Y_n$ ), which are most widespread, have perceptible enough losses. In addition, in the case of unbalance of network of 0.4 kV, they create yet greater additional unbalance. Setting of transformers with the charts of «star-zigzag-zero» connection of windings ( $Y/Z_n$ ) or a «triangle» settles this problem, but such equipment is more expensive, that is why it is not widely used. For the increase of the efficiency of power transformers work due to indemnification of streams of a zero sequence the special balancing device (SD) which is built into a transformer with the chart of connection of windings of  $Y/Y_n$  is developed. Power descriptions of transformers of  $Y/Y_n$  (losses of short circuit, idling, but other) from imposition of balancing devices do not change practically, but here considerable losses of electric power grow short in a network. The system of phase power at uneven loading of phases of balance is the same as at the chart of  $Y/Z_n$ .*

**Key words:** unbalance, defect of phases, balancing device, stream of a zero sequence, losses of electric power.