

УДК 621.316.925

## ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ВІД ОБРИВУ ПРОВОДУ

**В.І. Кошман**, канд. техн. наук, **Л.Р. Сабарно**, канд. техн. наук, **І.М. Севастюк**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Розглянуто розподіл напруг на первинній та вторинній обмотках силових трансформаторів у розподільній мережі при з'єднанні обмоток за схемами “зірка/зірка” з нульовим проводом і “трикутник/зірка” з нульовим проводом у випадку обриву проводу. Сформульовано ознаку обриву проводу, на основі якої запропоновано принцип захисту. Наведено схему та описано роботу системи захисту. Бібл. 2, рис. 3.*

**Ключові слова:** обрив проводу в розподільній мережі, пристрій захисту.

Протяжність повітряних розподільних електричних мереж напругою 6...36 кВ становить в Україні більше 300 тис. км, що складає приблизно третину всіх мереж. Вони розгалужені, розподілені по території і зазнають значного впливу зовнішніх чинників, тобто є найбільш ненадійним елементом систем електропостачання. Аварійний режим обриву проводу в цих мережах є дуже небезпечним і призводить до однофазного замикання на землю, що створює небезпечне поле розтікання струму, потрапляння в яке людей чи тварин може призвести до їх загибелі.

Процес пошуку цього пошкодження може тривати декілька годин, впродовж яких у місці падіння проводу відбувається “спікання” ґрунту, що супроводжується значним зростанням перехідного опору. Все це призводить до відмови роботи сигналізації однофазного замикання на землю, у результаті чого складається хибне враження про усунення однофазного замикання на землю і час існування небезпечного поля розтікання струму на землю значно збільшується.

Існуючі пристрої захисту від несиметричних режимів, що базуються на виділенні струму зворотної послідовності, внаслідок їх низької чутливості у більшості випадків не реагують на обрив проводу. Пристрої захисту від обриву проводу, які реагують на значення струмів у фазах електричної мережі, можуть надійно працювати тільки на тупикових лініях [1].

Один з більш досконалих пристроїв захисту електричної мережі від обриву проводу представлено у роботі [2]. Цей прилад забезпечує вимірювання струму зворотної послідовності протягом часу з моменту обриву проводу і до його падіння на землю та напруги нульової послідовності після падіння проводу на землю, що і є ознакою виникнення однофазного замикання на землю внаслідок обриву проводу. Суттєвим недоліком цього пристрою є його низька чутливість при обриві проводу в кінці лінії, особливо при малих навантаженнях після місця обриву. В таких випадках значення струму зворотної послідовності найчастіше буде нижчим гранично допустимого в нормальному режимі й пристрій не буде нормально працювати. У зв'язку з цим розробка нових більш досконалих пристроїв захисту розгалужених електричних мереж від обриву проводу є актуальною задачею.

Існуючі пристрої захисту від обриву проводу розміщуються на живлячій підстанції, від шин якої відходять лінії електропостачання. У той же час існує можливість встановлення факту обриву проводу за допомогою пристроїв, встановлених у кінці розгалуженої лінії з подальшою передачею сигналу про обрив проводу в її початок. Це дасть змогу суттєво підвищити чутливість захисту.

Розглянемо режим напруг на обмотках силового трансформатора, до вторинної обмотки якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу. При з'єднанні обмоток вказаного трансформатора за схемою “зірка/зірка” з нульовим проводом у випадку обриву проводу однієї з фаз, наприклад, фази  $A$ , на фази  $B$  та  $C$  трансформатора буде подана лінійна напруга  $U_{BC}$ , яка за умови симетричного навантаження розподілиться між фазами  $B$  та  $C$  навпіл. Роз-

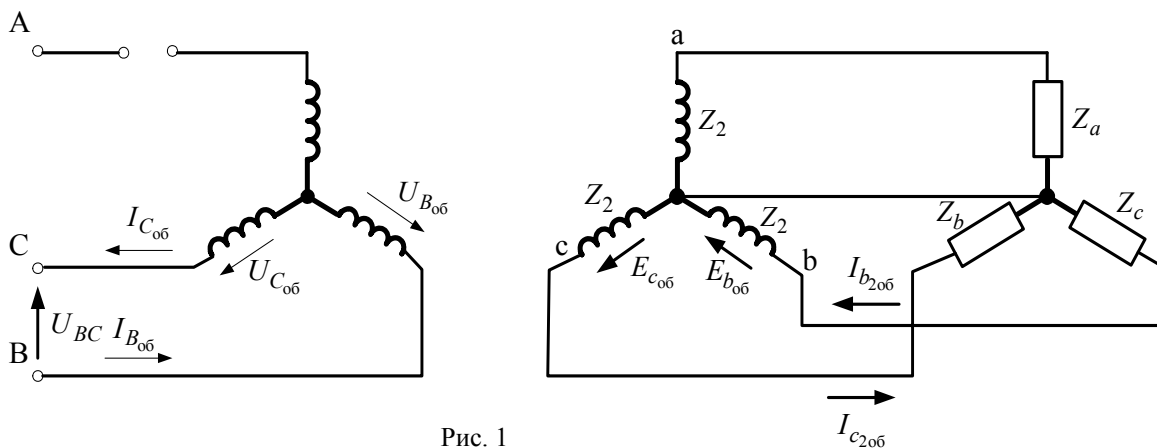


Рис. 1

поділ струмів та напруг на обмотках трансформатора наведено на рис. 1. Фазні напруги при цьому дорівнюватимуть  $U_{B_{об}} = -\frac{U_{BC}}{2}$ ;  $U_{C_{об}} = \frac{U_{BC}}{2}$ . Звідси  $U_{B_{об}} = -U_{C_{об}}$ , де  $U_{B_{об}}$  та  $U_{C_{об}}$  – діючі значення напруг на фазах B та C після обриву проводу на фазі A відповідно. Таким чином, геометрична сума напруг двох сусідніх фаз при обриві на третій буде дорівнювати нулю. Аналогічно розподіляться електрорушійні сили на вторинних обмотках силового трансформатора. Тобто  $E_{b_{об}} = -E_{c_{об}}$ .

Відповідно до цього напруга на фазах становитиме  $U_{b_{об}} = E_{b_{об}} - \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_b}$ ,  $U_{c_{об}} = E_{c_{об}} - \frac{E_{c_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c} = -E_{b_{об}} + \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c}$ , де  $E_{b_{об}}$ ,  $E_{c_{об}}$  – електрорушійна сила на фазах B та C відповідно;  $Z_2$  – опір фаз вторинної обмотки трансформатора;  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  – опір навантаження фаз A, B та C відповідно.

Як зазначалось, при рівних навантаженнях фаз напруги будуть однакові:  $U_{b_{об}} = -U_{c_{об}}$ . Різниця напруг буде найбільшою, якщо навантаження однієї з фаз, наприклад, фази B, мінімальне, а навантаження фази C має найбільше значення, тобто  $Z_b = \infty$  і  $Z_c = Z_{c_{min}}$  відповідно. У цьому випадку напруги у фазах будуть такі:

$$U_{b_{об}} = E_{b_{об}}; \tag{1}$$

$$U_{c_{об}} = -E_{b_{об}} + \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_{c_{min}}}. \tag{2}$$

Сума напруг становитиме

$$U_{b_{об}} + U_{c_{об}} = \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_{c_{min}}}. \tag{3}$$

Таким чином, сума напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу буде дорівнювати падінню напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні. Якщо ж обмотки силового трансформатора, до вторинної сторони якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу, з'єднані за схемою “трикутник/зірка” з нульовим проводом, то при обриві проводу однієї з фаз, наприклад фази A, на первинну обмотку цього трансформатора, що приєднана до фази B та C, буде подана лінійна напруга  $U_{BC}$ , тобто  $U_{BC_{об}} = U_{BC}$ , а на інших двох обмотках ця лінійна напруга розділиться навпіл. Причому напрямок цих напруг буде протифазним напрузі  $U_{BC}$ . Таким чином, на обмотці, приєднаній до фаз A та B, буде напруга  $U_{AB_{об}} = -\frac{U_{BC}}{2}$ , а на обмотці, приєднаній до фаз C та A, так само  $U_{CA_{об}} = -\frac{U_{BC}}{2}$ . Розподіл напруг на обмотках трансформатора представлено на рис. 2.

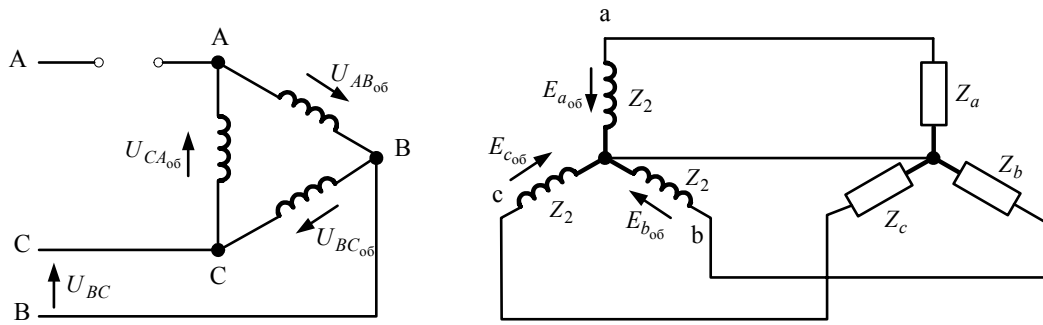


Рис. 2

Аналогічно розподіляться й електрорушійні сили на вторинних обмотках силового трансформатора, тобто  $E_{a_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2}$ ,  $E_{b_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2}$ .

Напряга на фазах трансформатора становитиме

$$U_{c_{06}} = E_{c_{06}} - \frac{E_{c_{06}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c}; \quad U_{a_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2} + \frac{E_{c_{06}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_a)}; \quad U_{b_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2} + \frac{E_{c_{06}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_b)}.$$

При рівних навантаженнях фаз  $U_{a_{06}} = U_{b_{06}}$ .

Різниця напруг буде найбільшою, якщо навантаження однієї з фаз, наприклад, фази  $A$ , мінімальне, а навантаження фази  $B$  має найбільше значення, тобто  $Z_a = \infty$  і  $Z_c = Z_{c_{\min}}$  відповідно. Напряги у фазах будуть

$$U_{a_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2}; \quad (4)$$

$$U_{b_{06}} = -\frac{E_{c_{06}}}{2} + \frac{E_{c_{06}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_{b_{\min}})}. \quad (5)$$

Різниця напруг становитиме

$$U_{a_{06}} - U_{b_{06}} = -\frac{E_{c_{06}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_{b_{\min}})}. \quad (6)$$

Таким чином, різниця напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу дорівнюватиме половині падіння напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні.

На відміну від обриву проводу на стороні високої напруги, при обриві на стороні низької напруги, що можливо при перегоранні запобіжника однієї з фаз, на двох інших фазах буде фазна напруга, зсунута одна відносно іншої на  $120^\circ$ .

У результаті цього можна зробити висновок, що однією з ознак обриву проводу на стороні високої напруги може бути:

- рівність напруг за модулем і зсув фаз на  $180^\circ$ , якщо обмотки силового трансформатора з'єднані за схемою "зірка/зірка" з нульовим проводом;
- рівність напруг на двох фазах як за модулем, так і за фазою при з'єднанні обмоток силового трансформатора за схемою "трикутник/зірка" з нульовим проводом.

На цьому принципі розроблено захист електричної мережі від обриву проводу. Цей захист містить у собі пристрій контролю обриву проводу, схема якого зображена на рис. 3, та блок передачі інформації про пошкодження лінії. Пристрій контролю обриву проводу приєднується по кінцях відгалужень та в кінці розгалуженої лінії 6...10 кВ на стороні 0,4 кВ понижуючої підстанції 10/0,4 кВ. Він складається з трьох трансформаторів 1-3, трьох перетворювачів змінної напруги у постійну 4, 5, 6, трьох компараторів 7, 8, 9, трьох схем НІ 10, 11, 12, трьох схем 3 ТАК-НІ 13, 14, 15 та схеми ЗАБО-НІ. Первинні обмотки трьох однофазних трансформаторів блока контролю проводу приєднані до різних фаз трифазної електричної мережі, а вторинні обмотки з'єднуються попарно послідовно або зустрічно залежно від схеми з'єднання силового трансформатора 10/0,4 кВ.

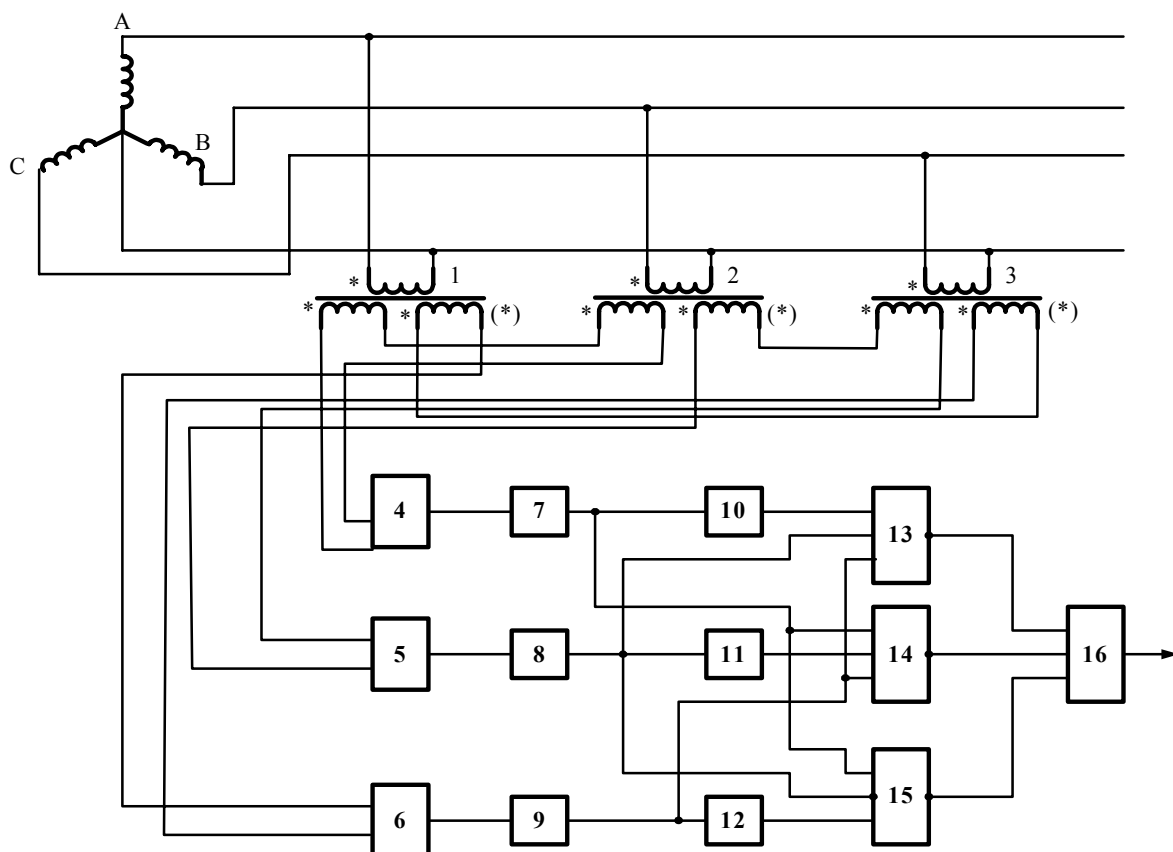


Рис. 3

Якщо обмотки силового трансформатора з'єднані за схемою “зірка/зірка” з нульовим проводом, то вторинні обмотки трансформаторів 1-3 з'єднані послідовно, як показано на рис. 3. У результаті цього на їх виходах будують сигнали  $U_a + U_b$ ,  $U_b + U_c$ ,  $U_c + U_a$ . Якщо ж ці обмотки з'єднані за схемою “трикутник/зірка” з нульовим проводом, то вторинні обмотки з'єднані по дві зустрічно (див. рис. 3). Для других вторинних обмоток треба використовувати знак початку обмотки у дужках (\*). У цьому випадку на їх виходах будуть сигнали  $U_a - U_b$ ,  $U_b - U_c$ ,  $U_c - U_a$ .

Пристрій працює таким чином. У нормальному режимі електричної мережі при відсутності обриву проводу на високій стороні силового трансформатора є трифазна напруга, яка відповідно передається на вторинну сторону і до якої приєднаний блок контролю обриву проводу. В цьому випадку при схемі з'єднання обмоток силового трансформатора “зірка/зірка” з нульовим проводом діючі значення сумарних сигналів напруг  $U_A + U_B$ ,  $U_B + U_C$ ,  $U_C + U_A$  на виходах вторинних обмоток трансформаторів 1-3 будуть дорівнювати  $U_\phi$ .

У випадку з'єднання обмоток силового трансформатора за схемою “трикутник/зірка” з нульовим проводом діючі значення різницевих сигналів напруг  $U_A - U_B$ ,  $U_B - U_C$ ,  $U_C - U_A$  на виходах вторинних обмоток трансформаторів 1-3 будуть дорівнювати  $1,73 U_\phi$ .

Ця напруга буде подана на входи перетворювачів змінної напруги у постійну 4, 5, 6 і далі у вигляді постійної напруги на входи компараторів 7, 8, 9. Уставка компаратора повинна бути значно менша, ніж значення випрямленої напруги на вході компаратора при режимі мінімальної напруги на виході силового трансформатора. В результаті цього на виході компараторів будуть додатні сигнали, які подаватимуться на два з трьох входів кожної зі схем ЗТАК-НІ 13, 14, 15, а на один із виходів цих схем надійде цей же сигнал після проходження кожної зі схем НІ 10, 11, 12 у вигляді від'ємного сигналу. В результаті цього на виходах схем ЗТАК-НІ 13, 14, 15 будуть додатні сигнали, які подаватимуться на схему ЗАБО-НІ 16. На виході цієї схеми має місце від'ємний сигнал.

При обриві проводу на стороні 6...10 кВ на вторинних обмотках силового трансформатора напруга розподілиться відповідно до виразів (1)...(4). Вона буде подана на трансформатори 1, 2, 3, і в результаті цього на одному з входів перетворювачів змінної напруги в постійну буде нульовий сигнал. Цей сигнал надійде на вхід свого компаратора і далі у вигляді нульового сигналу прийде на вхід своєї схеми НІ. Компаратор має бути настроєний на найбільший рівень випрямленої напруги, яка може бути на його вході у випадку, коли навантаження однієї з фаз буде мінімальним, а навантаження іншої фази матиме найбільше значення, згідно з (3), (6). З виходу цієї схеми НІ додатний сигнал надійде на один з входів однієї з схем ЗТАК-НІ 13, 14, 15, а на два інших входи будуть подані додатні сигнали з інших двох компараторів.

Таким чином, на трьох входах однієї зі схем ЗТАК-НІ буде додатний сигнал, після чого на її виході з'явиться від'ємний сигнал, який надійде на один з входів схеми ЗТАК-НІ 16. Ця схема спрацює, і на її виході з'явиться додатний сигнал, який буде означати обрив проводу на лінії 6, 10 кВ. Цей сигнал буде подано на блок передачі інформації при пошкодженні лінії. Він може використовувати різні канали зв'язку, як то радіоканал, мобільний зв'язок, або електричну мережу. В останньому випадку інформація про пошкодження лінії може передаватися з кінця лінії в її початок по двох непошкоджених проводах за допомогою субгармонічних сигналів, наприклад 25 Гц.

Розроблений пристрій захисту електричної мережі від обриву проводу дає змогу виявити обрив проводу в усіх випадках незалежно від навантаження та конфігурації лінії.

1. Комаров Д.Т. Автоматизация электрических сетей 0,38-35 кВ в сельских районах. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 111 с.
2. Кутіна М.В. Система захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільних мережах напругою 6-35 кВ // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 46–48.

УДК 621.316.925

**В.І. Кошман**, канд. техн. наук, **Л.Р. Сабарно**, канд. техн. наук, **І.М. Севастюк**, инж.

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

#### **Устройство защиты распределительной электрической сети от обрыва провода**

*Рассмотрено распределение напряжений на первичной и вторичной обмотках силовых трансформаторов в распределительной сети при соединении обмоток по схемам "звезда/звезда" с нулевым проводом и "треугольник/звезда" с нулевым проводом в случае обрыва провода. Показано, что одним из признаков обрыва провода на стороне высшего напряжения являются равенство напряжений по модулю и сдвиг фаз на  $180^\circ$ , если обмотки соединены по схеме "звезда/звезда" с нулевым проводом, и равенство напряжений двух фаз как по модулю, так и по фазе, если обмотки соединены по схеме "треугольник/звезда" с нулевым проводом. На основании этого предложен принцип защиты. Приведена схема и описана работа системы защиты. Библи. 2, рис. 3.*

**Ключевые слова:** обрыв провода в распределительной сети, устройство защиты.

**V.I. Koshman, L.R. Sabarno, I.M. Sevastjuk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Protection against wire break in the electrical distribution network**

*The voltage distribution in the primary and secondary windings of power transformers in the distribution network when connecting the windings in a "star / star" with neutral and "delta/star" with the neutral wire in the case of a wire break reviewed. It is shown that one of the signs of a broken wire on the high voltage side is the equality of the two phases of voltage in magnitude and angle difference of  $180^\circ$ , if the windings are connected in a "star / star" with the neutral wire, and the equality of the voltage (magnitude and phase) of two phases, if the windings are connected in a "delta / star" with the neutral wire. The principle of protection is provided based on this. Scheme is given and work protection system is described. References 2, figures 3.*

**Key words:** wire break in the distribution network, the protection system.

Надійшла 27.01.2015

Received 27.01.2015