

Вареник Є.О., Омельченко О.М.

Український НДІ вибухозахищеного і рудникового електроустаткування, м. Донецьк

Шкрабець Ф.П., Ковальов О.І.

Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ

**Вступ.** В процесі експлуатації систем електропостачання з ряду причин і в першу чергу з метою прогнозування рівня електробезпеки і надійності електричних мереж і установок необхідно знати стан їх ізоляції. Для отримання більш достовірної інформації про стан ізоляції фаз мережі відносно землі необхідно проводити вимірювання під робочою напругою.

**Мета роботи.** Теоретичне обґрунтування непрямого способу визначення параметрів ізоляції відносно землі електричної мережі без зняття робочої напруги.

**Матеріали и результати досліджень.**

Визначення рівня повної провідності ізоляції та її складових (активної і ємності провідностей ізоляції) в трифазній електричній мережі з ізольованою нейтраллю напругою вище 1000 В пропонується здійснювати способом, який заснований на штучному отриманні величини напруги нульової послідовності шляхом включення додаткової активної провідності в одну з фаз електроустановки (рис. 1).

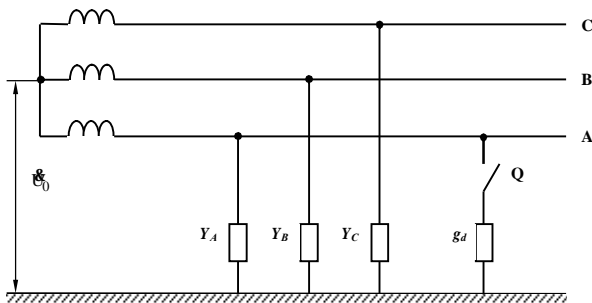


Рисунок 1 - Схема заміщення мережі для пояснення способу визначення параметрів ізоляції

В основу вказаного способу є встановлений відомі [1,2] співвідношення величини напруги нульової послідовності і величини напруги фази відносно землі через провідності ізоляції:

$$U_0 = U_\phi \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (1)$$

де  $U_\phi$  - напруга фази відносно землі, яка відповідає нормальному симетричному режиму роботи мережі;  $U_0$  - напруга нульової послідовності (зсуви нейтралі);  $Y_A, Y_B, Y_C$  - повні провідності ізоляції фаз відносно землі;  $Y_N$  - повна провідність ізоляції між

нейтраллю і землею;  $a = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$  - операторний множник.

Трифазну електричну мережу, де визначаються параметри ізоляції фаз мережі відносно землі, приймаємо симетричної; при цьому значення напруги нульової послідовності рівно нулю, а значення напруг фаз мережі відносно землі рівні між собою:

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi.$$

Тоді

$$Y_A = Y_B = Y_C = Y = g + j\omega C,$$

де  $Y, g, C$  - відповідно повна, активна і ємність провідності ізоляції фаз мережі відносно землі.

Для визначення параметрів ізоляції за запропонованим способом в одну з фаз (наприклад фазу "А"), електроустановки вводимо додаткову активну провідність  $g_d$  тоді

$$Y'_A = g + g_d + j\omega C. \quad (2)$$

Підставивши значення провідностей з рівняння (2) в рівняння (1), після перетворення отримаємо

$$U_0 = U_\phi \cdot \left(\frac{g_d}{3Y + g_d}\right) = U_\phi \cdot \left(\frac{g_d}{G + jB + g_d}\right) \quad (3)$$

де  $G = 3g, B = 3\omega C$  - відповідно повна, активна і ємність провідності всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі.

Оскільки формула для напруги нульової послідовності представлена в комплексній формі, то розкладемо її на активну і реактивну складові, для чого чисельник і знаменник рівняння (3) помножимо на  $G + g_d - jB$ .

Тоді рівняння (3) прийме вигляд:

$$U_0 = U_\phi \left[ \frac{g_d(G + g_d)}{(G + g_d)^2 + B^2} - j \frac{g_d B}{(G + g_d)^2 + B^2} \right]. \quad (4)$$

Позначимо першу складову формули (4) через

$$U_{0a} = U_0 \cos \alpha = \frac{U_\phi g_d (G + g_d)}{(G + g_d)^2 + B^2}, \quad (5)$$

де  $U_{0a}$  - активна складова напруги нульової послідовності.

Другу складову формули (4) позначимо:

$$U_{0p} = U_0 \sin \alpha = \frac{U_\phi g_d B}{(G + g_d)^2 + B^2}, \quad (6)$$

де  $U_{0p}$  - реактивна (ємність) складова напруги нульової послідовності;  $\alpha$  - кут між вектором напруги фази (до якої підключається додаткова провідність) відносно землі і вектором напруги нульової послідовності, який в загальному випадку може бути визначений по теоремі косинуса по змірних значеннях модулів напруг  $U_\phi$ ,  $U_{\phi 0}$ ,  $U_0$  (рис.2)

$$\cos \alpha = \frac{U_\phi^2 + U_0^2 - U_{\phi 0}^2}{2U_\phi U_0}, \quad (7)$$

де  $U_{\phi 0}$  - напруга фази електричної мережі відносно землі після підключення додаткової активної провідності між цією фазою і землею.

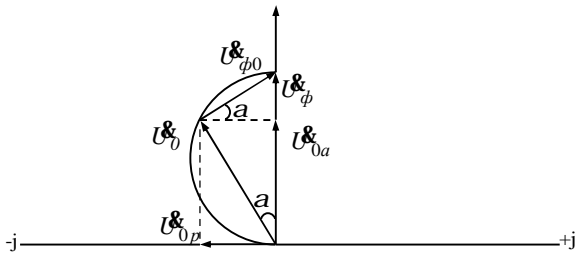


Рисунок 2 - Положення векторів напруг  $U_\phi$ ,  $U_{\phi 0}$ ,  $U_0$  при підключенні додаткової провідності

Діюче значення напруги нульової послідовності при підключенні до однієї з фаз додаткової провідності рівно:

$$U_0 = \sqrt{U_{0a}^2 + U_{0p}^2} = \frac{U_\phi g_d}{\sqrt{(G + g_d)^2 + B^2}}. \quad (8)$$

Вирішуючи спільно рівняння (6) і (7), і беручи до уваги, що для реальних параметрів розподільних мереж гірничо-збагачувальних комплексів напругою 6-35 кВ при повністю ізольованій нейтралі, вектори напруг утворюють прямокутний трикутник, а також враховуючи (відповідно до рис. 2) співвідношення

$$U_0 = U_\phi \cos \alpha; U_{\phi 0} = U_\phi \sin \alpha;$$

$$U_{\phi 0a} = U_{\phi 0} \sin \alpha; U_\phi = U_{0a} + U_{\phi 0a}.$$

визначаємо:

- активну провідність ізоляції всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі:

$$G = \frac{U_\phi^2 + \sqrt{U_\phi^4 - 4U_0^2 U_{\phi 0}^2}}{2U_0^2} g_d - g_d; \quad (9)$$

- активну провідність ізоляції однієї фази електрично зв'язаної мережі відносно землі:

$$g = \frac{U_\phi^2 + \sqrt{U_\phi^4 - 4U_0^2 U_{\phi 0}^2}}{6U_0^2} g_d - \frac{1}{3} g_d; \quad (10)$$

- провідність ємності ізоляції всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі:

$$B = \frac{U_{\phi 0}}{U_0} \cdot g_d. \quad (11)$$

- провідність ємності ізоляції однієї фази електрично зв'язаної мережі відносно землі:

$$b = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{\phi 0}}{U_0} \cdot g_d. \quad (12)$$

Для реальних параметрів розподільних мереж і рекомендованих значень додаткової провідності, що підключається, значенням підкорінного виразу у формулах (9) і (10) можна нехтувати, тоді отримаємо спрощені, але придатні для інженерних розрахунків, вирази для відповідних активних провідностей ізоляції:

$$G = \frac{U_\phi^2}{2U_0^2} \cdot g_d - g_d; \quad (13)$$

$$g = \frac{U_\phi^2}{6U_0^2} \cdot g_d - \frac{1}{3} g_d. \quad (14)$$

По геометричній сумі активної і ємнісної провідностей визначаємо повну провідність ізоляції фаз електричної мережі відносно землі:

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}. \quad (15)$$

Використовуючи вирази (10) і (12) і провівши необхідні перетворення, отримаємо:

$$Y = g_d \cdot \frac{\sqrt{U_\phi^2 (U_\phi^2 - 2U_0^2)^2 + (2U_{\phi 0} U_0^2)^2}}{6U_0^2 U_\phi}. \quad (16)$$

Рівняння (9) - (12) встановлені в основу фазочутливого способу визначення параметрів ізоляції щодо землі електричної мережі напругою вище 1000 В,

яка знаходиться під робочою напругою. Спосіб дозволяє здійснювати як періодичний оцінний розрахунок параметрів ізоляції, так і реалізувати безперервний контроль стану ізоляції.

За отриманими даними можуть бути також визначені:

- сміність однієї фази електричної мережі відносно землі

$$C = \frac{v}{2\pi f} = \frac{1}{6} \cdot \frac{g_d U_{\phi 0}}{\pi f U_0}; \quad (17)$$

- тангенс кута діелектричних втрат фазної ізоляції

$$\operatorname{tg} \delta = v g^{-1} = \frac{2U_{\phi 0} U_0}{U_{\phi}^2 - 2U_0^2}. \quad (18)$$

До основного недоліку запропонованого автором способу контролю параметрів ізоляції без зняття робочої напруги можна віднести те, що спосіб придатний для електричних мереж з симетричною (в нормальному режимі) ізоляцією фаз відносно землі. Дослідження показали, що при несиметрії ізоляції, яка перевищує 3 - 4 %, загальна похибка визначення параметрів ізоляції запропонованим способом перевищить 10 %.

Однією з основних вимог, що висуваються до методів і способів вимірювання або визначення технічних параметрів електричних мереж і установок, є точність.

При визначенні параметрів ізоляції в електричних мережах за наслідками вимірювань значень відповідних напруг з урахуванням величини, що вводиться, додаткової активної провідності між однією з фаз електричної мережі і землею, виникає необхідність в оцінці точності отриманих даних. Надалі вказані дані є підставою для обґрунтування практичних рекомендацій з методики вимірювання, що забезпечують необхідну точність, запропонованого способу визначення параметрів ізоляції, безпеки виконуваних робіт, а також забезпечення нормальної роботи електроприймачів при виробництві вимірювань.

В загальному випадку аналіз похибок кінцевого результату проводиться з застосуванням основних положень математичного аналізу, теорії помилок, теоретичних основ електротехніки [1]. Значення шуканої величини визначається виразом:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i), \quad (19)$$

де  $x_1, x_2, x_i$  - величини, визначальні  $y$  і що піддається прямим вимірюванням.

При цьому середньоквадратична похибка непрямого вимірювання визначатиметься згідно виразу в загальному вигляді:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2}, \quad (20)$$

де  $\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2}, \frac{\partial y}{\partial x_i}$  - приватні похідні функції  $y$ ;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_i$  - абсолютні похибки прямих вимірювань  $x_1, x_2, x_i$ .

Відносна середньоквадратична похибка шуканої величини визначається за формулою

$$\Delta y_* = \Delta y \cdot y^{-1}. \quad (21)$$

За формулами (19), (20), (21) в загальному випадку визначаються відносні і абсолютні похибки шуканих величин, значення яких визначаються декількома величинами, що вимірюються, і похибка їх вимірювання.

В нашому випадку відносна середньоквадратична похибка способу при визначенні сумарної активної провідності ізоляції фаз електроустановки щодо землі виходячи з формули (9) визначається з виразу:

$$\Delta G = G^{-1} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial U_{\phi}} \Delta U_{\phi}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial U_{\phi_0}} \Delta U_{\phi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial U_0} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial q_d} \Delta q_d\right)^2}, \quad (22)$$

де  $\frac{\partial G}{\partial U_{\phi}}, \frac{\partial G}{\partial U_{\phi_0}}, \frac{\partial G}{\partial U_0}, \frac{\partial G}{\partial q_d}$  - приватні похідні функції.

Відносна середньоквадратична похибка запропонованого способу визначення сумарної провідності ізоляції щодо землі всієї електрично зв'язаної мережі, виходячи з формули (11), може бути представлена у вигляді

$$\Delta B = B^{-1} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial U_{\phi_0}} \Delta U_{\phi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial U_0} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial q_d} \Delta q_d\right)^2}, \quad (23)$$

де  $\frac{\partial B}{\partial U_{\phi_0}}, \frac{\partial B}{\partial U_0}, \frac{\partial B}{\partial q_d}$  - приватні похідні функції

$B = f(U_{\phi_0}, U_0, q_d)$ ;

Відносна середньоквадратична похибка запропонованого способу визначення повної провідності ізоляції щодо землі електричної мережі виводиться з формули (16) і представлена у вигляді:

$$\Delta Y = Y^{-1} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial U_{\phi}} \Delta U_{\phi}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{\phi_0}} \Delta U_{\phi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_0} \Delta U_0\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial q_d} \Delta q_d\right)^2}, \quad (24)$$

де  $\frac{\partial Y}{\partial U_{\phi}}, \frac{\partial Y}{\partial U_{\phi_0}}, \frac{\partial Y}{\partial U_0}, \frac{\partial Y}{\partial q_d}, \frac{\partial Y}{\partial U_{\phi}}, \frac{\partial Y}{\partial U_{\phi_0}}, \frac{\partial Y}{\partial U_0}, \frac{\partial Y}{\partial q_d}$  - приватні похідні функції  $Y = f(U_{\phi}, U_{\phi_0}, U_0, q_d)$ .

У формулах (22), (23) і (24) величини  $\Delta U_{\phi}, \Delta U_{\phi_0}, \Delta U_0, \Delta q_d$ , це абсолютні похибки прямих вимірювань величин, які визначаються наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\phi} &= U_{\phi} \Delta U_{\phi*}; \\ \Delta U_{\phi_0} &= U_{\phi_0} \Delta U_{\phi_0*}; \\ \Delta U_0 &= U_0 \Delta U_{0*}; \\ \Delta q_d &= q_d \Delta q_{d*} \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Для визначення похибки вимірювальних приладів приймаємо, що

$$\Delta U_{\phi*} = \Delta U_{\phi_0*} = \Delta U_0 = \Delta U_*.$$

де  $\Delta U_*$  - відносна похибка вимірювальних кіл напруг;  $\Delta q_{d*} = \Delta R_*^{-1}$  - відносна похибка вимірювального приладу, що вимірює опір додаткової активної провідності, що вводиться.

Виконані дослідження з встановлення зміни величини випадкової відносно середньоквадратичної похибки параметрів ізоляції мережі, які визначаються, від значення тангенса кута діелектричних втрат, а також значення додаткової активної провідності, що вводиться, дозволили виділити межі значень додаткової активної провідності для забезпечення достатньої точності визначення параметрів ізоляції електричної мережі, з урахуванням забезпечення безпеки виробництва вимірювання відповідних напруг і виключення негативного впливу на надійність елементів системи електропостачання при виробництві робіт в електроустановках за визначенням параметрів ізоляції. По вимірюванню величини модуля напруги фази щодо землі при введенні між нею і землею активної додаткової провідності, при визначенні за виразами (9), (11) і (16) активної, ємнісної і повної провідностей ізоляції щодо землі електричної мережі встановлено, що мінімальна випадкова відносна середньоквадратична похибка відповідає умові  $U_{\phi_0} = 0,5 U_{\phi}$ .

За наслідками досліджень запропоновані наступні рекомендації при визначенні активної, ємнісної і

повної провідностей ізоляції електричної мережі щодо землі під робочою напругою:

- в діапазоні зміни, необхідно застосовувати значення додаткової активної провідності, що короткочасно підключається між однією з фаз електричної мережі і землею, в межах  $q_{d*} = 1-2$

- при діапазоні зміни  $\text{tg } \delta = 1,5-10,0$ , необхідно застосовувати значення додаткової активної провідності, що короткочасно підключається між однією з фаз електричної мережі і землею, в межах  $q_{d*} = 2-4$ .

При застосуванні вимірювального трансформатора напруги НТМІ і вольтметрів з класами точності 0,5, випадкова відносна середньоквадратична погрішність визначення активної, ємнісної і повної провідності ізоляції щодо землі електричної мережі не перевищить 5 %, якщо діапазон зміни значення напруги фази щодо землі знаходиться в межах  $U_{\phi_0} = (0,3-0,75) U_{\phi}$ .

Слід зазначити, що вказана точність запропонованого способу визначення параметрів ізоляції мережі щодо землі без зняття робочої напруги відповідає практично абсолютно симетричній системі. При несиметрії системи до 3%, випадкова відносна середньоквадратична погрішність визначення активної, ємнісної і повної провідності ізоляції щодо землі електричної мережі буде знаходитися в межах 10%.

#### Висновки.

1. Дано теоретичне обґрунтування і розроблений спосіб непрямого визначення параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі без зняття робочої напруги.

2. Визначення рівня повної провідності ізоляції і її складових в трифазній електричній мережі з ізолюваною нейтраллю напругою до і вище 1000 В пропонується здійснювати способом, заснованому на штучному отриманні величини напруги нульової послідовності шляхом короткочасного включення додаткової активної провідності в одну з фаз електроустановки.

3. Розроблений спосіб визначення провідності ізоляції мережі дозволяє визначити шукану величину з допустимою похибкою.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 10-е изд. М.: УИЦ "Гардарики", 2001. – 638 с.
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. – 192 с.
3. Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудаев В.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. -М.: Наука, 1985. -136 с.

Стаття надійшла 30.05.06 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф  
Бештою О.С.