

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В ДВОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Запропоновано метод періодичного контролю ізоляції в двопровідних мережах постійного струму, який ґрунтується на комбінації статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту. Метод дозволяє підвищити точність вимірювання омичного опору полюсів відносно землі.

Предложен метод периодического контроля изоляции в двухпроводных сетях постоянного тока, который основывается на комбинации статической и динамической характеристики измерительного эксперимента. Метод позволяет повысить точность измерения омического сопротивления полюсов относительно земли.

ВСТУП

В електроенергетиці двопровідні мережі постійного струму використовуються в якості оперативних для живлення засобів релейного захисту, автоматики, аварійної та попереджувальної сигналізації, а також електропостачання особливо відповідальних механізмів власних потреб електричних станцій та підстанцій.

Пошкодження ізоляції в двопровідних мережах постійного струму призводить до виникнення перенапруг, пожежі, вибуху, враження людей електричним струмом, тому для забезпечення надійності. Правила влаштування електроустановок та технічної експлуатації [1] передбачають використання засобів безупинного та періодичного контролю технічного стану ізоляції полюсів мережі відносно землі та пристроїв захисного вимикання.

Для неперервного контролю ізоляції широке застосування знайшли методи, що ґрунтуються на використанні врівноваженого мосту, важелями якого є опори ізоляції [2, 3, 4]. Наприклад на рис. 1 зображена принципова схема пристрою за допомогою якого здійснюється сигналізація зниження рівня ізоляції полюса мережі відносно землі за допомогою двох реле KV1 та KV2. За допомогою кнопок SB1, SB2 здійснюють вимірювання струмів, за якими визначають опори полюсів за рівняннями

$$R_1 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2) \cdot R}{I_2};$$

$$R_2 = \frac{U_0 - (I_1 + I_2) \cdot R}{I_1};$$

де $R = R_D + R_p$; U_0 – напруга на шині; I_1, I_2 – струм в міліамперметрі при розриві кола відповідно кнопками SB1, SB2; R_p – опір обмотки реле; R_D – додатковий опір; C – ємність полюса відносно землі.

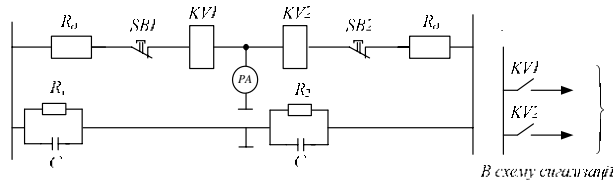


Рис. 1. Схема безупинного контролю ізоляції полюсів мережі постійного струму відносно землі

В сталому режимі, якщо гранична відносна похибка вимірювання напруги $\epsilon_u = \pm 5\%$, струму $\epsilon_I = \pm 2,5\%$, установлення опору R_D $\epsilon_R = \pm 5\%$ і

$R_D = 16$ кОм (УКІ – 1), то похибка визначення омичного опору полюса може досягти 40%.

Таким чином, не зважаючи на просту схему реалізації, мостові схеми мають відносно велику похибку при вимірюванні, штучно знижують омичний опір полюсів відносно землі, погіршують умови безпеки, не реагують на симетричне зниження опору ізоляції полюсів, реагують лише на ступінь несиметрії ізоляції полюсів відносно землі.

Крім мостових схем, широке розповсюдження отримали засоби контролю, які ґрунтуються на принципі накладання стороннього джерела живлення промислової та підвищеної частоти [5, 6] на контрольовану мережу. Недоліком цих схем контролю є суттєвий вплив ємностей мережі відносно землі, тому використовують різні методи компенсації цього впливу, що значно ускладнює пристрій і не дає бажаного результату.

МЕТА РОБОТИ

Підвищити точність визначення омичного опору полюсів відносно землі шляхом спрощення алгоритму визначення омичного опору, зменшення впливу ємності ізоляції мережі на результати вимірювання і дублювання вимірювального експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод періодичного контролю передбачає вимірювання напруги U_{xx} та струму $I_{к.з.}$ між загальною точкою дільником напруги та землею за результатами значень яких обчислюється загальний опір мережі відносно землі. Для визначення опору ізоляції полюса відносно землі використовується додатково режим введення між полюсом мережі і землею незарядженого конденсатора з ємністю C та вимірювання максимального значення струмів $i_1(0)$, $i_2(0)$ заряду конденсатора і напруги між полюсами контрольованої мережі U_0 . За відношенням цих величин визначають опір полюса мережі відносно землі. Розрахункова схема показана на рис. 2. Якщо знехтувати впливом внутрішнім опором амперметра і вольтметра на результати вимірювання, то напругу між загальною точкою дільника і землею визначають як (рис. 2)

$$U_0 = \frac{U_0}{2(R_1 + R_2)}(R_2 - R_1), \quad (1)$$

а струм

$$I = \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2R_1R_2 + R_D(R_1 + R_2)}, \quad (2)$$

тоді загальний опір між полюсами мережі і землею

$$R_{i3.B} = \frac{U_B}{I} = \frac{2R_1R_2 + R_D(R_1 + R_2)}{2(R_1 + R_2)} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_D}{2} = R_{i3} + \frac{R_D}{2},$$

де R_D – опір плеча дільника.

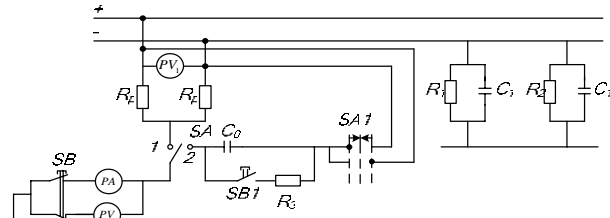


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення омичного опору полюсів мережі відносно землі

Таким чином

$$R_{i3} = \frac{U_B}{I} - \frac{R_D}{2} \quad (3)$$

Для визначення опору ізоляції кожного полюса відносно землі, визначимо перехідні струми $i_1(t)$, $i_2(t)$ при почерговому підключенні незарядженого конденсатора C_0 (рис. 1) між додатнім та від'ємним полюсом мережі за допомогою перемикача SA1

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U_0}{R_2(1 + 2C_0/C)^2} e^{-t/\tau} \\ i_2(t) &= \frac{U_0}{R_1(1 + 2C_0/C)^2} e^{-t/\tau} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $\tau = \frac{R_2R_1(C_0 + 2C)}{R_1 + R_2}$ – постійна часу.

Максимальне значення струму має в першій момент підмикання конденсатора до полюса мережі, тобто при $t = 0$. Із системи рівнянь (4) маємо:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{U_0}{i_1(0)(1 + 2C_1/C)^2} \\ R_1 &= \frac{U_0}{i_2(0)(1 + 2C_1/C)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В реальних умовах значення C_0 не обмежують, тому можна підібрати його значення так, щоб $2C/C_0 \rightarrow 0$, тоді

$$R_2 = \frac{U_0}{i_1(0)}; R_1 = \frac{U_0}{i_2(0)},$$

тобто алгоритм визначення загального опору R_{i3} і опору ізоляції окремих полюсів значно спрощується, а ємність мережі не впливає на результати вимірювань.

Алгоритм визначення опору ізоляції полюсів полягає в наступному (рис. 2). Після підключення пристрою між полюсами мережі і землею за допомогою кнопки SB1 розряджають конденсатор C_0 . Перемикач SA ставлять в положення 1. Вимірюють напругу U_B між загальною точкою дільника і землею. Якщо $U_B > 0$, то натискають на кнопку SB і вимірюють струм I . Потім перемикач SA перемикають в положення 2, SA1 ставлять в положення 1 і натискають на кнопку SB вимірюють величину струму $i_1(0)$, а в положенні SA1 – 2 при натисканні кнопки SB – $i_2(0)$,

напругу U_0 вимірюють за допомогою вольтметра PV1. При підключенні конденсатора C_0 між полюсом мережі і землею він попередньо повинен бути повністю розряджений (кнопка SB1, резистор R_3).

За результатами вимірювань по формулам (3), (5) визначають R_{i3} , R_1 , R_2 перевіряють чи співпадають результати $R_{i3} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. Якщо в результаті вимірювання $U_B = 0$, то це означає, що ізоляція симетрична, тобто $R_1 = R_2$ і достатньо виміряти $i_1(0)$, $i_2(0)$ і U_0 .

Проведемо дослідження методичної похибки вимірювання загального опору ізоляції R_{i3} і окремих полюсів відносно землі R_1 , R_2 .

Середньоквадратичну похибку визначення R_{i3} можна знайти із виразу

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Ri3} &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial U_B} \frac{dU_B}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial I} \frac{dI}{R_{i3}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{i3}}{\partial R_D} \frac{dR_D}{R_{i3}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\varepsilon_I^2 + \varepsilon_{U_B}^2 + \varepsilon_{R_D}^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

Із виразу (6) видно, що похибка визначення R_{i3} залежить від точності вимірювання, напруги U_B , струму I і установки R_D .

Враховуючи те, що внутрішній опір вимірювальних приладів має кінцеве значення визначимо величину U_B і I . Опускаючи проміжні перетворення отримуємо

$$\begin{aligned} U_{BX} &= \frac{U_0}{\left(\frac{R_D}{R_V} + \frac{2R_1}{R_V} + 2\right)} \cdot \frac{\left(R_2 - R_1\right) \left(\frac{R_D}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1R_2 - R_1^2}{R_V}}{\left(R_1 + R_2\right) \left(\frac{R_D}{2R_V} + 1\right) + \frac{R_1R_2}{R_V}} = \\ &= \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_D + 2R_{i3}}{2R_V} + 1\right)} = U_D \cdot k, \end{aligned} \quad (7)$$

де R_V – внутрішній опір вольтметра, а U_D – дійсне значення вимірювальної напруги: $U_D = \frac{U_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2} \cdot \frac{1}{R_1 + R_2}$;

$$k = \frac{1}{\left(\frac{R_D + 2R_{i3}}{2R_V} + 1\right)}.$$

Визначимо значення струму

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U_0}{(R_D + 2R_1 + 2R_a)} \cdot \left[1 - \frac{2R_1(R_D + R_1 + 2R_a)}{(R_1 + R_2)(R_D + 2R_a) + 2R_1R_2}\right] = \\ &= \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)(R_D + 2R_a) + 2R_1R_2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де R_a – внутрішній опір амперметра.

Використовуючи рівняння (7), (8), визначимо граничні відносні похибки, що виникають при вимірюванні напруги та струму

$$\begin{aligned} \varepsilon_U &= |\varepsilon_V| + \left|\frac{U_D - U_B}{U_B}\right| = |\varepsilon_V| + |1 - k_U|; \\ \varepsilon_i &= |\varepsilon_i| + \left|\frac{I_D - I_B}{I_D}\right| = |\varepsilon_i| + |1 - k_i|, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{U_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + R_2)R_D + 2R_1R_2}; \\ k_i &= \frac{I_B}{I_D} = \frac{R_D + 2R_{i3}}{R_D + 2R_{i3} + 2R_a} \end{aligned}$$

Для визначення числових величин похибки введемо обмеження. В широко розповсюдженому пристрої УКІ – 1 [2] $R_d = 15$ кОм. Критичне значення опору ізоляції полюсів відносно землі [1] визначимо виходячи з мінімально допустимого опору полюса відносно землі $R_{\Pi} = 30$ кОм, тоді при симетрії ізоляції $R_{i3} = 15$ кОм. Внутрішній опір цифрових вольтметрів визначаємо як $R_V \approx 10$ кОм/В, тоді для вимірювання максимального значення напруги $U_{v \max} = U_0 = 230$ В, $R_V \approx 2300$ кОм. Внутрішній опір цифрових амперметрів не перевищує $R_a \leq 100$ Ом. Виходячи з цих обмежень, методичною похибкою вимірювання струму можна знехтувати, так як в самому несприятливому випадку $R_{i3} \rightarrow 0$, $k_i = 0,006$. Методична похибка вимірювання напруги для граничного випадку $R_{i3} \leq 500$ кОм $\varepsilon_{U_M} \leq 0,18$ для критичного опору $\varepsilon_{U_M} = 0,01$, тобто в критичному випадку методична похибка вимірювання напруги не перевищує 1%. Якщо вибрати вимірювальну систему так, щоб $\varepsilon_V = \varepsilon_i = 1\%$, а похибку визначення R_d , як $\varepsilon_{R_d} = 5\%$, то загальна похибка визначення $\varepsilon_{R_{i3}}$ згідно (6) в критичному випадку $\varepsilon_{R_{i3}} = 5,4\%$.

Гранична відносна похибка – визначення опору ізоляції окремих полюсів:

$$\varepsilon_{R_1} = \frac{1}{R_1} \left[\left| \frac{R_1}{U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{R_1}{i_2(0)} di_2(0) \right| + \left| \frac{R_1}{C_0} dC_0 \right| \right];$$

$$\varepsilon_{R_2} = \frac{1}{R_2} \left[\left| \frac{R_2}{U_0} dU_0 \right| + \left| \frac{R_2}{i_1(0)} di_1(0) \right| + \left| \frac{R_2}{C_0} dC_0 \right| \right];$$

або враховуючи систему рівнянь (5)

$$\varepsilon_{R_1} = \varepsilon_{R_2} = \left| \varepsilon_{U_0} \right| + \left| \varepsilon_{i(0)} \right| + \left| \varepsilon_C \frac{2m^2}{1+m+m^2} \right|$$

де ε_{U_0} , $\varepsilon_{i(0)}$ – граничні відносні похибки вимірювання напруги та струму і визначаються класом точності вимірювальних пристроїв; ε_C – гранична відносна похибка установки додаткової ємності C : $m = 2C/C_0$.

Вибір величин ємностей не обмежений, наприклад при максимально можливому значенні $C \leq 20$ мкФ (оперативні мережі постійного струму атомних електричних станцій і $C_0 \leq 1000$ мкФ, $m = 0,04$ і впливом ємності C можна знехтувати. Похибка методу вимірювання буде залежати лише від класу точності вимірювальних систем напруги і струму.

ВИСНОВКИ

Для підвищення точності вимірювання омичного опору ізоляції полюсів в двопровідній мережі постійного струму доцільно використовувати комбінацію статичної і динамічної характеристики вимірювального експерименту і дублювання. Це дозволяє виключити вплив ємності мережі на результати вимірювань і похибку від не співпадаючих з часом вимірювань при коливанні напруги і зміні навантаження двопровідної мережі постійного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГДК 34.20.507 – 2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила: Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики", Київ, - 2003, - 329 с.
2. Цепенко Е.Ф. Контроль ізоляції в сетях до 1000 В. – М.: Энергия. 1972 – 130 с.
3. Беркович М.А., Основы техники релейной защиты/ Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А.: - 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат 1984 – 367 с. ил. – Библиогр. С. 369 - 373.
4. Трояновский В.А. Установка для непрерывного контроля изоляции в сетях постоянного тока // Промышленная энергетика. – 1962. - №6. – С. 14 – 15.
5. Шайн А.Д., Менакер Б.Ф., Стеркин И.С. Селективный контроль изоляции в сети оперативного тока // Промышленная энергетика. – 1975. - №1. – С. 61 – 63.
6. Кутин В.М. Диагностирование электрических распределительных сетей / В.М.Кутин, О.И.Кульматицкий – К.: Техніка, 1993 – 160 с. Библиография с. 160 – ISBN №5-335-00668-4.
7. Система діагностики розподільних мереж постійного струму станцій і підстанцій / Кутин В.М., Рубаненко О.С., Ештіба Алі Мусбах, Аль Нсур Мохамед. // Вісник Вінницького політехнічного інституту - 1994. - № 2. - С. 51-56.

Надійшла 20.08.2009

Добровольська Любов Наумівна, к.т.н., доц.
тел. 8 (050) 6717283, e-mail: lsobchuk@mail.ru

Романюк Микола Валентинович
тел. 8 (063) 8310564, e-mail: nickrom86@mail.ru
Луцький національний технічний університет
Кафедра електропостачання,
Україна, 43018, Луцьк, вул. Львівська, 75

L.N. Dobrovolska, M.V. Romanyuck

Insulation monitoring in dc two-wire networks

A periodic check technique for dc two-wire network insulation is introduced, the technique based on combination of static and dynamic characteristics obtained in a test experiment. The technique allows improving accuracy of poles ohmic resistance measurement about the ground.

Key words – dc two-wire networks, insulation monitoring, check technique, poles ohmic resistance measurement accuracy