

УДК 621.316.1.027.

В. М. Кутін, д. т. н., проф.;

С. В. Матвієнко, асп.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6—10 КВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ

Викладено результати дослідження впливу несиметрії параметрів ізоляції повітряних мереж напругою 6—10 кВ відносно землі на виконання умов працездатності ізоляції. Показано, що окрім умов працездатності, сформованих з вимогами електробезпеки, можна також використовувати для визначення технічного стану ізоляції умови працездатності, основані на визначенні потужності втрат в ізоляції від струмів стікання на землю. Результати досліджень наводяться для двох випадків стану навколишнього середовища – погоди без опадів і вологої погоди. Також показано, що для сухої погоди обидві умови працездатності є рівноцінними і можуть одночасно використовуватись для визначення технічного стану ізоляції мережі. Обґрунтовано недоцільність використання умов працездатності, основаних на визначенні потужності втрат в ізоляції від струмів стікання на землю у випадку вологої погоди, оскільки ці умови висувають значно занижені вимоги до технічного стану ізоляції і є недостатніми для виконання вимог електробезпеки.

Досвід експлуатації розподільних мереж (РМ) з ізольованою нейтраллю доводить [1], що рівень надійності і безпеки експлуатації РМ суттєво залежить від технічного стану (ТС) ізоляції. Тому, визначення працездатності ізоляції шляхом діагностування її ТС може значно підвищити безпеку експлуатації, надійність та якість обслуговування обладнання РМ.

Для розв'язання задачі діагностування ТС ізоляції пропонується використовувати комбінований метод пофазного контролю ізоляції, оснований на принципі зміщення нейтралі на середину вектора лінійної напруги та одночасному вирівнюванні провідностей фаз відносно землі шляхом введення в відповідні фази додаткових провідностей [2]. Даний метод дозволяє визначати параметри ізоляції за будь-якої можливої їх несиметрії.

При проведенні досліджень були зроблені такі допущення і обмеження:

- ємності окремих фаз мережі відносно землі відрізняються не більше ніж на 5—7%;
- виникнення пошкодження ізоляції (утворення шунтувальних зв'язків із землею) може відбуватись одночасно максимум у двох фазах мережі, що з перебігом часу переростає у двофазне замикання через землю.

На наступному етапі діагностування, після визначення параметрів ізоляції фаз мережі відносно землі, постає задача формування умов працездатності ізоляції, які пропонується визначати виходячи з вимог до безпеки експлуатації електроустановок [3], [4].

Для визначення умов працездатності пропонується моделювати виникнення пошкодження в мережі (наприклад, в фазі А) відносно землі; при цьому утворюється шунтувальний зв'язок, через який починає протікати струм стікання на землю, який в свою чергу викликає окислення і підгоряння елементів заземлювального пристрою та спікання ґрунту в місці стікання струму на землю через заземлення. Це призводить до виникнення додаткового перехідного опору в заземленні та появи на заземлених металевих частинах обладнання (корпуси, арматура) потенціалу. На наступному етапі моделюється дотик людини до заземлених частин електроустановки. Внаслідок цього через тіло людини починає протікати струм, який згідно з вимог електробезпеки не повинен перевищувати 6 мА. Це і є основним критерієм для формування умов працездатності:

$$I_{зА} = U_A \frac{g_{шА} g_{л}}{g_{шА} + g_{л} + g_{з}} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \quad I_{зВ} = U_B \frac{g_{шВ} g_{л}}{g_{шВ} + g_{л} + g_{з}} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$I_{3C} = U_C \frac{g_{шC} g_L}{g_{шC} + g_L + g_3} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ A}, \quad (1)$$

де U_A, U_B, U_C – напруги фаз А, В і С, відповідно, відносно землі; $g_{шA}, g_{шB}, g_{шC}$ — провідності шунтувальних зв'язків при виникненні пошкодження у відповідних фазах; g_L — провідність тіла людини, рівна $g_L = 1/r_L = 1/(6 \cdot 10^3)$ См; g_3 — провідність заземлення, що визначається як різниця $g_3 = 1/R_3 + 1/r_d$, де R_3 — номінальний опір заземлювального пристрою, який для даного типу мереж не повинен перевищувати 10 Ом, r_d – додатковий перехідний опір заземлення, викликаний окисленням або підгорянням з'єднувальних контактів в заземлювальному пристрої та спікання ґрунту в місці стікання струму на землю через заземлення внаслідок тривалої дії струмів ОЗЗ, що обмежується, виходячи з початкових умов дослідження та імовірністю виявлення пошкодження за іншими ознаками (до 100 Ом). Провідності шунтувальних зв'язків для різних варіантів їх виникнення у відповідних фазах $g_{шA}, g_{шB}, g_{шC}$ можна визначити шляхом вимірювання активного опору ізоляції фаз в початковий момент часу (r_{A0}, r_{B0}, r_{C0}), наприклад, після введення в експлуатацію електроустановки або її поточного ремонту, а також визначення цих опорів в будь-який момент часу (r_A, r_B, r_C) і подальшого їх порівняння з початковими значеннями за формулами:

$$g_{шA} = 1/r_A - 1/r_{A0} - g_{sym}; \quad g_{шB} = 1/r_B - 1/r_{B0} - g_{sym}; \quad g_{шC} = 1/r_C - 1/r_{C0} - g_{sym}. \quad (2)$$

Також, при визначенні працездатності ізоляції необхідно враховувати випадки, коли шунтувальні зв'язки виникають в кількох місцях мережі в різних фазах, що призводить до поступового переростання ОЗЗ в двофазне замикання через землю. Під час атмосферних опадів спостерігається поступове симетричне зниження опору ізоляції, яке в даному випадку теж необхідно враховувати шляхом визначення фази, де спостерігається мінімальна зміна активної провідності ізоляції відносно землі. Величину цієї зміни, згідно з початковими умовами досліджень, і можна вважати рівнем симетричного підвищення провідності ізоляції відносно землі g_{sym} :

$$g_{sym} = \text{Min}((g_a - g_{a0}); (g_b - g_{b0}); (g_c - g_{c0})). \quad (3)$$

На величини напруг фаз відносно землі і провідності шунтувальних зв'язків, а також, відповідно, на виконання умов працездатності (1) впливають лише параметри ізоляції мережі (активні провідності та ємності фаз мережі відносно землі). Тому, основною метою даних досліджень є визначення впливу несиметрії параметрів ізоляції відносно землі на виконання умов працездатності ізоляції.

Для цього розглядається і аналізується вся множина можливих станів, що виникають в результаті зміни параметрів ізоляції. Основні причини цих змін можна розділити на 3 групи: 1) зміна конфігурації мережі через оперативні перемикання; 2) вплив на ТС ізоляції глобальних збурювальних факторів, таких як погодні умови, навколишнє середовище, механічні впливи людини; 3) виникнення пошкоджень через виникнення шунтувальних зв'язків, в тому числі в кількох місцях мережі одночасно (або в кількох фазах).

Авторами були проведені теоретичні дослідження, в результаті яких були отримані співвідношення для визначення діючих значень напруг в фазах мережі відносно землі за відомими параметрами ізоляції

$$U_A = \frac{1,5U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2}} \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) \right]^2};$$

$$U_B = \frac{1,5U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2}} \sqrt{\left[g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_a - C_c) \right]^2 + \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) \right]^2}; \quad (4)$$

$$U_C = \frac{1,5U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2}} \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_b - C_a) \right]^2 + \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_b) \right]^2},$$

де U_f – фазна напруга джерела, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, C_a, C_b, C_c – ємності фаз мережі відносно землі, g_a, g_b, g_c – активні провідності фаз мережі відносно землі.

Визначимо потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю

$$\Delta P_{i3\Sigma} = \Delta P_{i3A} + \Delta P_{i3B} + \Delta P_{i3C} = U_A^2 g_a + U_B^2 g_b + U_C^2 g_c. \quad (5)$$

З урахуванням співвідношень (4) отримаємо співвідношення для визначення втрат потужності від струмів стікання на землю в окремих фазах

$$\begin{aligned} \Delta P_{i3A} &= \frac{2,25U_f^2 g_a}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2} \left[\left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) \right]^2 \right]; \\ \Delta P_{i3B} &= \frac{2,25U_f^2 g_b}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2} \left[\left[g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_a - C_c) \right]^2 + \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) \right]^2 \right]; \quad (6) \\ \Delta P_{i3C} &= \frac{2,25U_f^2 g_c}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 (C_a + C_b + C_c)^2} \left[\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_b - C_a) \right]^2 + \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_b) \right]^2 \right]. \end{aligned}$$

Потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю теж можна використовувати як діагностичний параметр для визначення працездатності ізоляції мережі. Для цього необхідно провести вимірювання параметрів ізоляції мережі і визначити $\Delta P_{i3\Sigma}$ та порівняти його величину з нормативним значенням потужності втрат в ізоляції $\Delta P_{i3}^{\text{норм}}$, яке можна отримати, маючи технічні дані про мережу, такі як тип (ПЛ чи КЛ) загальну довжину L , клас напруги та переважаючу марку кабелів, згідно з методикою, описаною в [5].

$$\Delta P_{i3}^{\text{понаднорм}} = \Delta P_{i3\Sigma} - \Delta P_{i3}^{\text{норм}} \leq 0. \quad (7)$$

Слід також зауважити, що при додатковому використанні потужності втрат в ізоляції як діагностичного параметра, можуть виникати двозначні оцінки технічного стану ізоляції, коли за умов працездатності (1) ізоляція непрацездатна, а умова працездатності (7) буде виконуватись, особливо це характерно при виникненні пошкодження в суху погоду. Тому, даний діагностичний параметр найдоцільніше використовувати для визначення граничного зниження загального активного опору ізоляції під час зволоження (опадів).

Проведено дослідження впливу різного роду факторів на працездатність ізоляції за таких початкових умов:

1. Розглядається повітряна мережа напругою 10 кВ.
2. Ємності крайніх фаз мережі більші від ємності середньої фази на 5 % ($C_a = C_c = 0,5$ мкФ, $C_b = 0,475$ мкФ).
3. Загальна довжина всіх ПЛ мережі складає 70 км, нормативне значення потужності втрат в ізоляції від струмів стікання на землю, розраховане за методикою [5], складає: для опадів — 23,377 кВт, для сухої погоди — 6,642 кВт.
4. Початкові значення активних опорів ізоляції відносно землі — $r_{A0} = r_{B0} = r_{C0} = 100$ кОм.
5. В результаті розвитку пошкодження в суху погоду шунтувальні зв'язки за умовами дослідження одночасно виникають у двох фазах мережі (наприклад, А і В), але з різною інтенсивністю (найтиповіший випадок в повітряних мережах — 90 % від усіх випадків).
6. Для випадку впливу опадів на ТС ізоляції активний опір ізоляції фаз відносно землі через зволоження ізоляторів знижується симетрично до величини $r_{A0} = r_{B0} = r_{C0} = 20$ кОм, при цьому теж одночасно виникають пошкодження у двох фазах мережі (теж, наприклад, А і В) з різною інтенсивністю розвитку.

В результаті аналізу початкових умов і множини можливих технічних станів ізоляції для обробки результатів дослідження і графічного їх представлення сформовано в ППП «MathCAD» математичну модель для тривимірного простору і побудови об'ємних залежностей виконання умов працездатності (1) і (7) від зміни параметрів ізоляції мережі відносно землі.

Таким чином, були побудовані такі залежності:

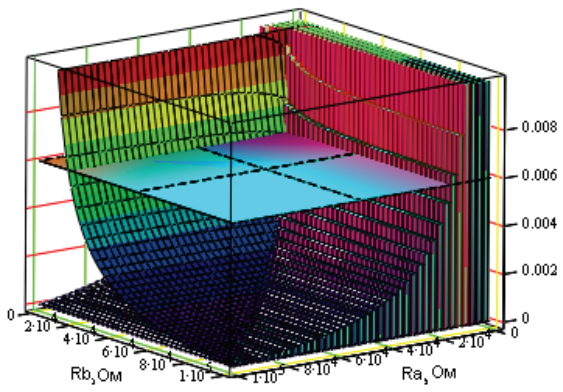


Рис. 1. Суміщені поверхні залежностей струмів через шунтувальний зв'язок і тіло людини у фазах, де виникають пошкодження, від параметрів ізоляції (активних опорів) даних фаз (фази А і В) для сухої погоди (площина — межа працездатності ізоляції)

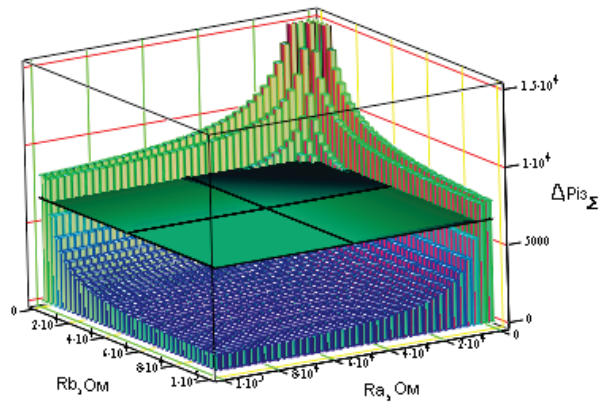


Рис. 2. Поверхня залежності потужності втрат в ізоляції через струми стікання на землю від параметрів ізоляції пошкоджених фаз для сухої погоди (площина — межа працездатності)

1. Залежності (суміщені поверхні) $I_{3A} = F(r_a, r_b)$, $I_{3B} = F(r_a, r_b)$ та окремо залежність $\Delta P_{i3\Sigma} = F(r_a, r_b)$ для сухої погоди, коли симетричного зниження активного опору ізоляції фаз не спостерігається.

2. Аналогічні залежності для вологої погоди з опадами, коли спостерігається симетричне зниження активного опору ізоляції фаз відносно землі.

Проаналізувавши отримані поверхні, зображені на рис. 1 і рис. 2, можна прийти до висновку, що для визначення технічного стану ізоляції мережі відносно землі для сухої погоди можна використовувати як умови працездатності (1), так і умови працездатності (7).

Розглянемо аналогічні залежності за умов вологої погоди.

З рис. 3 і 4 видно, що для вологої погоди зручніше використовувати умови працездатності (1).

В подальших дослідженнях було встановлено, що оперативні перемикання і пов'язані з цим зміни

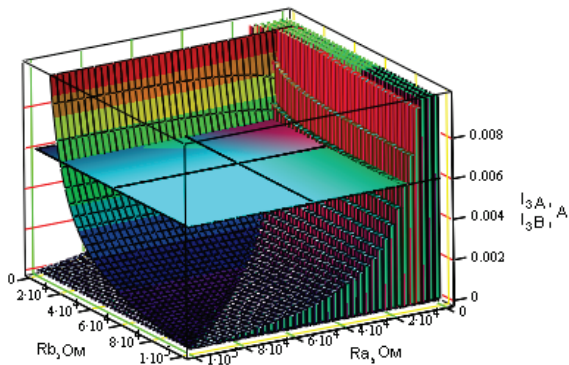


Рис. 3. Залежності струмів через шунтувальний зв'язок і тіло людини у фазах, де виникають пошкодження, від параметрів ізоляції (активних опорів) даних фаз (фази А і В) для вологої погоди

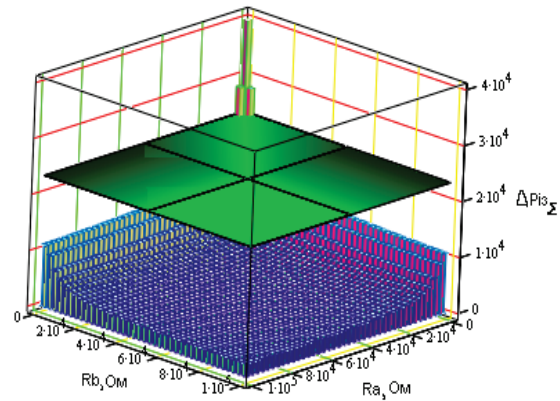


Рис. 4. Залежність потужності втрат в ізоляції від активних опорів пошкоджених фаз (волога погода)

параметрів ізоляції суттєво не впливають на виконання умов працездатності (7), оскільки всі величини перераховуються для нових параметрів мережі, які встановились в результаті перемикань. Що ж до умов працездатності (1), то зміну схеми мережі можна врахувати шляхом аналізу зміни ємності мережі відносно землі, яка і буде викликана перемиканнями, оскільки змінюється конфігурація і протяжність ЛЕП. Через зміну ємності мережі відносно землі можна вирахувати наближено зміну початкових значень активних опорів ізоляції відносно землі і таким чином врахувати в умовах працездатності оперативні перемикання.

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено:

1. В якості умов працездатності для визначення ТС ізоляції повітряних мереж напругою 6—10 кВ можна використовувати як умови (1), так і умови (7), але лише за умов проведення вимірювань параметрів ізоляції в суху погоду.

2. У випадку проведення вимірювань параметрів ізоляції під час опадів доцільніше використовувати умови працездатності (1), які пред'являють до ТС ізоляції мережі жорсткіші вимоги, які ґрунтовані на виконанні вимог електробезпеки.

3. На виконання умов працездатності (7) оперативні перемикачів не впливають, а у випадку використання умов працездатності (1) цей вплив можна врахувати шляхом контролю за зміною ємності мережі відносно землі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кутін В. М., Кульматицький О. И. Диагностирование электрических распределительных сетей. — К.: Техніка, 1993. — 160 с.
2. Кутін В. М., Матвієнко С. В. Система контролю працездатності ізоляції розподільної мережі напругою 6-10 кВ // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості-2005».
3. ГОСТ 12.1038-82. Предельно допустимые уровни напряжения и токов. Введ. 01.01.85. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 6 с.
4. Правила устройств электроустановок — М: Энергоатомиздат, 1985. — 640 с.
5. «Структура балансу електроенергії в електричних мережах 0,38—154 кВ», Методики складання, аналізу складових та нормування технологічних витрат електроенергії. — Київ., 2003. — 71 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05
Рекомендована до друку 22.11.05

Кутін Василь Михайлович — професор, **Матвієнко Сергій Валерійович** — аспірант.
Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет