

КУТИН В. М.

<https://orcid.org/0000-0002-2438-7065>e-mail: vmkytin@gmail.com

КУТИНА М. В.

e-mail: vmkytin@gmail.com

КОВАЛЬОВ А. І.

<https://orcid.org/0000-0002-2212-7577>e-mail: kovallowartem@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ З НАПРУГОЮ 6- 35 КВ

Запропоновано принцип визначення роботоздатності ізоляції розподільної мережі відносно землі, який ґрунтується на використанні критерія електробезпеки і мінімуму струму стікання на землю. Умови роботоздатності ізоляції розподільної мережі визначають у вигляді обмежень на зміну показників роботоздатності ізоляції відповідно до нормативних документів і стандартів. Розроблено метод визначення параметрів ізоляції фази мережі відносно землі шляхом неперервного контролю загального активного опору ізоляції і напруги фаз відносно землі і обробки результатів за допомогою спеціальної діагностичної моделі, яка відображає залежність параметрів ізоляції від контрольованих показників. Для обробки даних вимірювань і визначення роботоздатності ізоляції РМ відносно землі розроблено структуру і алгоритми функціонування діагностичного комплексу який складається із підсистеми неперервного і періодичного контролю, а також алгоритмічного програмного забезпечення на основі мікроконтролера.

Ключові слова: розподільна мережа, контроль ізоляції, визначення умов роботоздатності, діагностичний комплекс.

VASYL KUTIN, MARINA KUTINA, ARTEM KOVALOV

Vinnytsia National Technical University

WORKABILITY CONDITIONS DETERMINATION OF NETWORK DISTRIBUTION WITH OVERHEAD LINES POWER TRANSMISSION WITH THE 6-35 KV

The principal of identification of isolation workability in relation to a ground was proposed. It is based on the electrosafety criteria usage and a minimum current flow to a ground. The conditions of workability of isolation of distribution network is calculated in look of changes of isolation workability restrictions in relation to regulations and standards. The Method of parameters of isolation phase calculation was developed in relation to a ground by continuous of common active isolation resistance and voltage phase in relation to a ground and results analysis with the help of special diagnostic model which shows the dependence of parameters of isolation from controllable items. For the calculation of data work and determination of isolation workability DN in relation to a ground was made a structure and algorithms of diagnostic complex functioning that contains the subsistence of constant and periodic control and algorithmical program software on the base of microcontroller. The main cause of insulation damage is the formation of shunt connections between the conductive part and the ground in electrical distribution networks with a voltage of 6-10 kV. In this case, there are two processes - a smooth symmetrical decrease in the active resistance of the insulation phases due to the action of moisture on the surface of the insulators and an asymmetric sharp decrease in the active resistance of the insulation of individual phases relative to the ground due to shunt connections. Determining the conditions of insulation performance of the distribution network in the form of restrictions on changes in insulation performance in relation to the ground, in accordance with regulations and standards, it is necessary to limit the amount of current through shunting minimum electricity losses.

Keywords: distribution network, isolation control, workability conditions determination, diagnostical complex

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Визначення роботоздатності ізоляції розподільної мережі в умовах експлуатації ускладнюється тим, що не існує достатньо точних кількісних методів оцінювання впливу факторів, що погіршують стан ізоляції. До таких факторів належать процес старіння ізоляції, вологість, забруднення, механічні впливи, перенапруга, корозія і т.п. Тому для контролю ТС ізоляції на практиці використовують опосередковані електричні показники: напругу зміщення нейтралі, тангенс кута діелектричних втрат, загальний активний опір мережі відносно землі, струм і напругу нульової послідовності, провідність фаз відносно землі [1-12].

Для вирішення задачі визначення роботоздатності ізоляції РМ пропонується обрати чіткі і зрозумілі критерії для визначення роботоздатності ізоляції РМ і, таким чином, розмежувати роботоздатний і нероботоздатний стани ізоляції РМ. В якості таких критеріїв необхідно використовувати умови безпеки експлуатації ізоляційного обладнання РМ і мінімум втрат електроенергії в ізоляції РМ від струмів стікання на землю, що виникають через дефекти і пошкодження ізоляції.

Метою роботи є визначення умов роботоздатності ізоляції розподільної мережі відносно землі шляхом оцінювання технічного стану ізоляції за критеріями безпеки і мінімуму втрат електроенергії від струмів стікання на землю.

Результати досліджень

Для досягнення поставленої мети пропонується такий алгоритм. На першому кроці обґрунтовуються критерії для визначення умов роботоздатності ізоляції які повинні множині ТС ізоляції $\{S\}$ розділити на дві підмножини $\{S_1\}$ роботоздатних станів і $\{S_2\}$ нероботоздатного стану. В якості таких критеріїв пропонується використати умови безпеки експлуатації електрообладнання розподільних мереж і мінімуму втрат електроенергії в ізоляції РМ від струмів стікання на землю, що виникають через дефекти і пошкодження ізоляції.

На другому етапі визначаються умови роботоздатності. Ізоляція РМ відносно землі розглядається як єдиний інтегральний об'єкт технічний стан якого описується зміною групи параметрів – активних провідностей фаз РМ відносно землі. Вибір показників технічного стану ізоляції має ґрунтуватись на аналізі відповідності усієї сукупності показників, що тим чи іншим чином характеризують процеси зміни технічного стану ізоляції, вибраним критеріям оцінки ТС ізоляції: безпека експлуатації РМ і економічність її функціонування [13].

Основною причиною зміни ТС ізоляції РМ з ізолюваною нейтраллю є її пошкодження відносно землі, тому вважають, що технічний стан міжфазної ізоляції не суттєво впливає на її загальний ТС. Його впливом можна знехтувати. Ємність фаз мережі відносно землі C_a, C_b, C_c залежить від конструктивних параметрів мережі і тому їх величини вважають постійними. Незначне зростання загальної ємності спостерігається лише при зволоженні поверхні ізоляторів. Активні провідності ізоляції відносно землі q_a, q_b, q_c , можуть змінюватись в досить широкому діапазоні значень. Ці зміни характеризують процес виникнення пошкоджень ізоляції. Основною причиною якого є виникнення шунтувальних зв'язків між фазами мережі і землею. При цьому розрізняють два граничних процеса зміни ТС ізоляції:

1. Симетричне підвищення активних провідностей ізоляції фаз відносно землі внаслідок старіння, зволоження і забруднення поверхні ізоляторів;
2. Несиметричне значне підвищення активної провідності окремих фаз відносно землі, внаслідок появи в них шунтувальних зв'язків із землею.

Як відомо [14] в Україні діє стандарт, згідно з яким обмежується струм, що може протікати через тіло людини при частоті 50 Гц, величиною не більше 6 мА в межах тривалої дії захисту від однофазних замикань на землю (ОЗЗ), що не перевищує 1 с. При вимірюванні напруги і струму через тіло людини, воно модулюється в електричному ланцюзі резистором з опором при тривалості дії захисту від ОЗЗ до 1с – 1кОм, більше 1с – 6кОм. Отже для обґрунтування критерію безпеки експлуатації необхідно ввести показник технічного стану, який має зв'язок із процесом пошкодження ізоляції і струмом через тіло людини, що виникає при цьому. Таким показником може бути струм в шунтувальному зв'язку, утворений людиною при її дотику до струмопровідної частини електрообладнання. Для обґрунтування вибору цього показника необхідно побудувати і розглянути спеціальну модель виникнення пошкодження ізоляції [15].

Відносно іншого критерія, очевидним є те, що основною мірою економічності функціонування розподільних мереж є втрати при передачі електроенергії. Миттєвою характеристикою є активна потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю ΔP_{iz} . Її можна вважати мірою економічності функціонування ізоляції РМ і, відповідно, показником роботоздатності при застосуванні цього критерію.

Для обґрунтування критерія електробезпеки розглянемо випадок коли дотик людини відбувається до заземлених частин електроустановки (корпус, арматура, металеві конструкції). Заступна схема мережі зображена на рисунку 1, де r_a, r_b, r_c активні опори ізоляції фаз РМ; C_a, C_b, C_c – ємності окремих фаз відносно землі; r_1, L_1 – параметри заступної схеми трансформатора напруги (ТН) контролю ізоляції; Z_N – еквівалентний опір навантаження; r_h – опір тіла людини, $r_h = 6\text{кОм}$ [16], R_z – опір заземлюючого пристрою (згідно [16] не повинен перевищувати 10 Ом для мережі 6-10 кВ), r_d – додатковий перехідний опір.

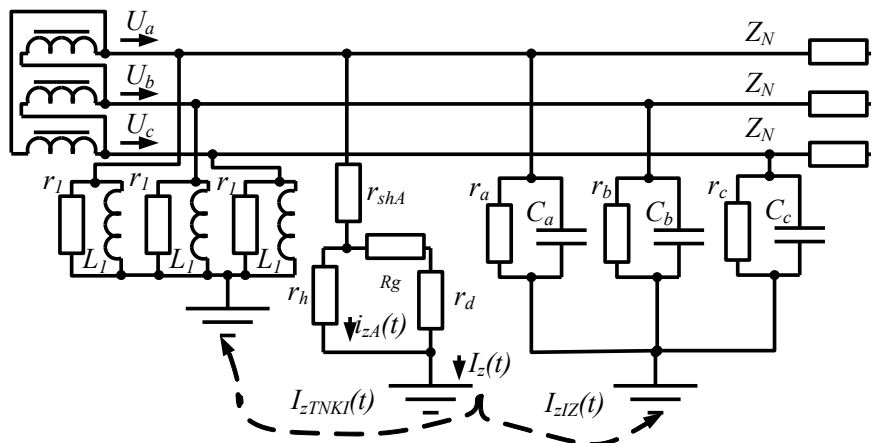


Рис. 1. Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки

Для моделювання найнесприятливішого випадку будемо вважати, що пошкодження ізоляції відбувається в електроустановці з найпростішим варіантом заземлення, при цьому вважається, що додатковий перехідний опір струму розтікання на землю є приблизно таким же, як і для проводу, що впав на землю [17], який в місці розтікання на землю приблизно дорівнює 100 Ом для сирової землі. Для найнесприятливішого випадку будемо вважати, що пошкодження виникає одночасно в 2-х різних фазах мережі, а дотик людини відбувається в місці найбільшого пошкодження ізоляції і по тілу людини протікає струм $i_{zA}(t)$, який не повинен перевищувати 6 мА. Для цих умов граничні значення умов роботоздатності ізоляції можна визначити як:

$$\begin{cases} I_{zA} = U_A \frac{g_{shA} \cdot g_h}{g_{shA} + g_h + g_g} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ A}; \\ I_{zB} = U_B \frac{g_{shB} \cdot g_h}{g_{shB} + g_h + g_g} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ A}; \\ I_{zC} = U_C \frac{g_{shC} \cdot g_h}{g_{shC} + g_h + g_g} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ A}. \end{cases} \quad (1)$$

де U_A, U_B, U_C – напруги фаз А, В, С відносно землі (діючі значення);
 $g_{shA}, g_{shB}, g_{shC}$ – провідності шунтувальних зв'язків при виникненні пошкодження у відповідних фазах;

g_h – провідність тіла людини, яка дорівнює $g_h = 1/r_h = 1/(6 \cdot 10^3)$ См;

g_q – провідність заземлення, що визначається як $g_q = 1/R_z + 1/r_d$, де R_z – номінальний опір заземлювального пристрою, який для цього типу мереж не повинен перевищувати 10 Ом;

r_d – додатковий перехідний опір заземлення (обмежений величиною 100 Ом). Провідності шунтувальних зв'язків для різних варіантів їх виникнення у відповідних фазах $g_{shA}, g_{shB}, g_{shC}$ можна визначити шляхом вимірювання активного опору ізоляції фаз відносно землі 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 :

$$\begin{cases} g_{shA} = 1/r_a - 1/r_{a0} - 1/r_s; \\ g_{shB} = 1/r_b - 1/r_{b0} - 1/r_s; \\ g_{shC} = 1/r_c - 1/r_{c0} - 1/r_s. \end{cases} \quad (2)$$

де r_s – симетричне зниження опору ізоляції відносно землі внаслідок зволоження поверхні ізоляторів під час атмосферних опадів, яке можна визначити як

$$r_s = \text{Min}(r_{a0} - r_a) (r_{b0} - r_b) (r_{c0} - r_c). \quad (3)$$

Використання струму в шунтувальному зв'язку в якості показника технічного стану ізоляції дозволяє обмежити множину роботоздатних станів ізоляції, виходячи з умов безпечної експлуатації обладнання.

Величини напруг в фазах відносно землі також залежить від параметрів ізоляції:

$$\begin{cases} U_A = I'' \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + N}; \\ U_B = I'' \sqrt{\left[g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_a - C_c) \right]^2 + M}; \\ U_C = I'' \sqrt{\left[g_b + g_a + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_b - C_a) \right]^2 + K}; \\ I'' = \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}}; \\ N = \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ M = \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ K = \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_a) - \frac{2B_L}{3} \right]^2, \end{cases} \quad (4)$$

де U_f – фазна напруга розподільної мережі;

ω – кутова частота РМ;

C_A, C_B, C_C – ємності окремих фаз відносно землі;

g_A, g_B, g_C – активні провідності фаз мережі відносно землі;

B_L – сумарна реактивна провідність всіх індуктивних елементів, підключених до РМ відносно землі (обмоток трансформаторів напруги для контролю ізоляції типу ЗНОМ і НТМИ, а також дугогасильних

реакторів ДГР і пристроїв для резонансного заземлення нейтралі):

$B_L = 3/\omega(L_{TNKI\Sigma 1} + L_{DGR} + L_{PRZN})$. Тут слід зауважити, що індуктивності обмоток ТН вважаються лінійними величинами (для усталених режимів роботи мережі.)

Підставивши (4) в вираз (1) отримуємо вираз для математичної моделі визначення роботоздатності при застосуванні вище зазначених критеріїв.

При застосуванні критерію безпеки експлуатації математична модель для визначення роботоздатності ізоляції має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{gA} = I'' \cdot g_{shA} \cdot g_h / (g_{shA} + g_h + g_g) \cdot \sqrt{G_{A'} + G_{A''}}; \\ I_{gB} = I'' \cdot \frac{g_{shB} \cdot g_h}{g_{shB} + g_h + g_g} \cdot \sqrt{G_{B'} + G_{B''}}; \\ I_{gC} = I'' \cdot \frac{g_{shC} \cdot g_h}{g_{shC} + g_h + g_g} \cdot \sqrt{G_{C'} + G_{C''}}; \\ G_{A'} = \left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2; \\ G_{A''} = \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ G_{B'} = \left[g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_a - C_c) \right]^2; \\ G_{B''} = \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_a + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ G_{C'} = \left[g_b + g_a + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_b - C_a) \right]^2; \\ G_{C''} = \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_a) - \frac{2B_L}{3} \right]^2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю можна визначити, маючи інформацію про напруги і активні провідності фаз мережі відносно землі

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{is\Sigma} = \Delta P_{isA} + \Delta P_{isB} + \Delta P_{isC}; \\ \Delta P_{is\Sigma} = U_A^2 \cdot g_a + U_B^2 \cdot g_b + U_C^2 \cdot g_c. \end{array} \right. \quad (6)$$

Отримане значення потужності втрат в ізоляції $\Delta P_{is\Sigma}$ порівнюють з нормативним ΔP_{iz}^{norm} , яке можна розрахувати, маючи такі технічні дані про мережу, як тип (ПЛ чи КЛ) загальну довжину L, номінальну напругу та переважну марку кабелів, згідно з методикою описаною в [18]

$$\Delta P_{is\Sigma} \leq \Delta P_{iz}^{norm}. \quad (7)$$

Таким чином, можна визначити понаднормативну потужність втрат ізоляції і накладання на її величину обмеження для формування умов роботоздатності.

Також, обмеження можна накладати для кожної фази окремо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{izA} \leq \Delta P_{iz}^{norm} / 3; \\ \Delta P_{izB} \leq \Delta P_{iz}^{norm} / 3; \\ \Delta P_{izC} \leq \Delta P_{iz}^{norm} / 3. \end{array} \right.$$

Згідно з методикою [18], виділяються декілька станів навколишнього середовища, для яких були проведені дослідження (Львів ОРГ-РЕС) і отримані для розрахунку нормативної потужності втрат ізоляції. Це такі: 1) дощ, мокрий сніг, мряка; 2) туман; 3) роса, погода без опадів. Тому, для визначення роботоздатності ізоляції РМ потрібно спочатку визначити нормативну потужність втрат в ізоляції для всіх трьох станів навколишнього середовища, і лише потім порівнювати фактичну величину потужності втрат в ізоляції з нормативною для відповідного рівня вологості навколишнього середовища, який необхідно контролювати.

При застосуванні критерію економічності функціонування математична модель для визначення роботоздатності ізоляції матиме такий вигляд:

$$I''' = \left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{izA} = I'''(N' + M'); \\ \Delta P_{izB} = I'''(N'' + M''); \\ \Delta P_{izC} = I'''(N''' + M'''); \\ \frac{2,25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}; \\ N' = \left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2; \\ M' = \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ N'' = \left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_a - C_c) \right]^2; \\ M'' = \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2; \\ N''' = \left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_b - C_a) \right]^2; \\ M''' = \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b + C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2. \end{array} \right. \quad (8)$$

Як бачимо, основну роль у відображенні процесу зміни технічного стану ізоляції РМ будуть відігравати активні провідності фаз мережі відносно землі g_a, g_b, g_c . Вони є єдиними величинами у співвідношеннях (7) і (8), що змінюються в процесі розвитку пошкодження, тому їх надалі і будемо вважати діагностичними показниками для визначення роботоздатності ізоляції.

З врахуванням вище наведеного, діагностичну модель для методу визначення роботоздатності ізоляції можна представити у вигляді чотириполюсника з вхідним сигналом – фазними напругами РМ, і вихідним: в першому випадку (при застосуванні критерію безпеки експлуатації) – струмами стікання на землю через шунтувальний зв'язок (рис.2.а); в другому випадку (при застосуванні критерію економічності функціонування) – потужністю втрат електроенергії від струмів стікання на землю (рис. 2.б).

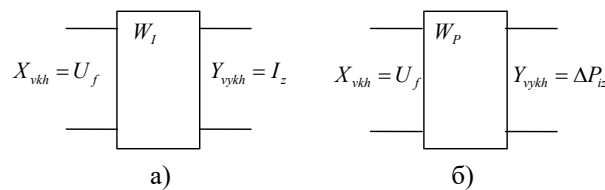


Рис. 2. Діагностична модель для визначення роботоздатності ізоляції

а) – при застосуванні критерію безпеки експлуатації; б) – при застосуванні критерію економічності функціонування; на схемі W_I – передатна функція при застосуванні в якості вихідного сигналу струму в шунтувальному зв'язку, W_P – передатна функція при застосуванні в якості вихідного сигналу потужності втрат електроенергії від струмів стікання на землю.

Визначення роботоздатності, можна отримати із співвідношення між передатними функціями W_I та W_P , оскільки і струми в шунтувальному зв'язку, і потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю залежать від напруг фаз мережі відносно землі:

$$\begin{aligned} W_I &= |W(i\omega)| \cdot \frac{g_{shx} \cdot g_l}{g_{shx} + g_l + g_z}; \\ W_P &= |W(i\omega)|^2 \cdot g_x \end{aligned} \quad (9)$$

де x – індекс відповідної фази мережі; $W(i\omega)$ – комплекс передатної функції, коли в якості вихідного сигналу використовується напруга фази x мережі відносно землі.

Як бачимо, обидві передатні функції мають спільну складову – комплекс передатної функції $W(i\omega)$. Для спрощення задачі побудови характеристичного рівняння будемо надалі використовувати саме її в якості діагностичної моделі.

Визначимо передатну функцію для отриманої діагностичної моделі і характеристичне рівняння для проведення перевірки правильності вибору показників роботоздатності ізоляції.

Визначимо комплекси передатних функцій при розгляді різних фаз мережі за формулою:

$$W_x(i\omega) = \frac{U_x}{U_f}$$

Для спрощення розрахунків при подальших дослідженнях будемо розглядати лише мережі з ізолюваною нейтраллю, в яких відсутні індуктивні елементи, що мають зв'язок із землею, тобто $B_L=0$.

Отже,

$$W_A(i\omega) = \frac{\sqrt{3}[(g_b + i\omega C_b)e^{i30^\circ} + (g_c + i\omega C_c)e^{-i30^\circ}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega(C_a + C_b + C_c)};$$

$$W_B(i\omega) = \frac{\sqrt{3}[(g_c + i\omega C_c)e^{i30^\circ} + (g_a + i\omega C_a)e^{-i30^\circ}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega(C_a + C_b + C_c)};$$

$$W_C(i\omega) = \frac{\sqrt{3}[(g_a + i\omega C_a)e^{i30^\circ} + (g_b + i\omega C_b)e^{-i30^\circ}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega(C_a + C_b + C_c)}. \quad (10)$$

У співвідношеннях (10) вирази для комплексів напруг фаз мережі відносно землі були отримані шляхом використання формули для напруги зміщення нейтралі U_0 у комплексному вигляді і аналізу заступної схеми трифазної мережі з ізольованою нейтраллю, зображеної на рис.2.

Для переходу від комплексної до операторної форми запису (використовуємо операторний метод: $i\omega \rightarrow p$) розкриємо комплекси в чисельнику виразів (10) і помножимо чисельник і знаменник на спряжений знаменнику комплекс. В результаті отримаємо:

$$W(p) = \frac{\sqrt{3}(a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2(C_a + C_b + C_c)^2} \quad (11)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти характеристичного рівняння.

Для отримання характеристичного рівняння необхідно прирівняти чисельник виразу (11) до нуля.

$$a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0 \quad (12)$$

Для фази А коефіцієнти характеристичного рівняння

$$\left\{ \begin{array}{l} a_3 = - \left[\frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (C_b - C_c) \right]; \\ a_2 = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (C_b - C_c) \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \left[\frac{1}{2 \cdot \omega} (g_b - g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} (C_b + C_c) \right] (C_a + C_b + C_c); \\ a_1 = - \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b - g_c) (C_a + C_b + C_c) - \\ - \left[\frac{1}{2 \cdot \omega} (g_b - g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} (C_b + C_c) \right] (g_a + g_b + g_c); \\ a_0 = \frac{1.5}{\sqrt{3}} (g_b + g_c) (g_a + g_b + g_c); \end{array} \right. \quad (13)$$

Для фаз В і С коефіцієнти характеристичного рівняння є аналогічними виразам (13) з тією лише різницею, що замість множників $(q_b \pm q_c)$ і $(C_b \pm C_c)$ для фази В будуть множники $(q_c \pm q_a)$ і $(C_c \pm C_a)$, а для фази С – $(q_a \pm q_b)$ і $(C_a \pm C_b)$.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В переважній більшості випадків основною причиною пошкодження ізоляції є утворення шунтувальних зв'язків між струмопровідною частиною і землею в електричних розподільних мережах напругою 6-35 кВ. В цьому випадку відбувається два процеси – плавне симетричне зниження активного опору ізоляції фаз внаслідок дії вологи на поверхні ізоляторів та несиметричне різке зниження активного опору ізоляції окремих фаз відносно землі внаслідок появи шунтувальних зв'язків. В разі визначення умов роботоздатності ізоляції розподільної мережі у вигляді обмежень на зміну показників роботоздатності ізоляції відносно землі, узгоджених із нормативними документами і стандартами, необхідно здійснювати обмеження величини струму через шунтувальний зв'язок за критеріями електробезпеки і активної потужності втрат в ізоляції від струмів стікання на землю за економічним критерієм мінімуму втрат електроенергії

Література

1. Кутін В. М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник / В. М. Кутін, М. О. Люхін, М. В. Кутіна. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 161 с.
2. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг «Відкрите засідання НКРЕКП 29 березня 2019 року. «Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році (постанова від 29. 03. 2019 № 440)» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.nerc.gov.ua/data/filesearch/Catalog3/Richnyi_zvit_NKREKP_2018.pdf.
3. Кизим Н. А. Аналіз стану електроенергетичного сектора України / Н. А. Кизим, А. В. Лелюк // SPIN. – № 7616. – 2019. – С. 1550
4. ГДК 34.20.507-2003 «Правила Технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Правила» [Чинний від 2007-04-15]. – Львів : ЛьвівОРГРЕС, 2003. – 597 с.
5. Норми випробування електрообладнання СООУ–ІЕЕ 20.302: 2007. – Офіц. вид. – КГРІФЕ: Мін-

во палива та енергетики України, 2007. – II 262 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Норми).

6. Опорные полимерные изоляторы ЗАО «Феникс 88», изготовление, испытание, опыт [Электронный ресурс] / Данилов Г., Власов В. Сухар В., Сяков В. // Новости электротехники. – 2002. – № 2 (14) – С. 23. – Режим доступа : <http://www.news.elten.ru/arh/2002/14/22php>

7. Кувайцев В. И. Высоковольтные изоляторы: Методические указания к лабораторному практикуму по ЭЧС / Кувайцев В. И. – Оренбург : ГОУОГУ, 2004. – 24 с.

8. Изоляторы керамические опорные на напряжение свыше 1000В. Общие технические условия ГОСТ Р 52034-2003. [Дата введения 2004-01-01]. – М. : ФГУП Стандартиформ, 2005. – 24 с.

9. Лабзун М. П. Механизмы возникновения та оцінка теплових аномалій опорно-стрижневих изоляторів / М. П. Лабзун // Новини енергетики. – 2009. – № 12. – С. 40–45.

10. Леонтьев В. О. Электротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтьев, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ 2013. – 122 с.

11. Кухарчук В. В. Основы метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 522 с.

12. Loos, Single Phase to Ground Fault in Compensated Network. Saarbrücken, Germany, Lambert Academic Publishing, 2014, 228 p.

13. Кутін В. М. Визначення умов роботоздатності розподільних мереж : монографія / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 148 с.

14. ГОСТ 12.1038 – 82. Предельно допустимые уровни напряжения и токов. Внедр. 01.01.85. М. : Изд-во стандартов, 1988.

15. Дубовой В. М. Моделювання та оптимізація систем : підручник / В. М. Дубовой, Р. Н. Кветний, О. І. Михайлов, А. В. Усов. – Вінниця : ПП «ТД Едельвейс», 2017. – 804 с.

16. Справочник по проектированию электрических сетей / под. ред. Д. Л. Файбисовича. – 3-е изд., перерах. и доп. – М. : ЭНАС, 2009. – 392 с.

17. Лежнюк П. Д. Методи і засоби захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільній мережі зі складною топологією напругою 6–35 кВ : монографія / П. Д. Лежнюк, М. В. Кутіна ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 151 с.

18. Структура балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-154 кВ: меродики складання, аналізу скадових та нормування технологічних витрат електроенергії. України – К., 2003. – 71 с.

References

1. Kutin V. M. Diahnastyka elektroobladnannia : navchalnyi posibnyk / V. M. Kutin, M. O. Pliukhin, M. V. Kutina. – Vinnytsia : VNTU, 2014. – 161 s.

2. Natsionalna komisiiia, shcho zdiisniue derzhavne rehulivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh «Vidkryte zasidannia NKREKP 29 bereznia 2019 roku. «Zvit pro rezultaty diialnosti Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehulivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh, u 2018 rotsi (postanova vid 29. 03. 2019 № 440)» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_NKREKP_2018.pdf.

3. Kyzym N. A. Analiz stanu elektroenerhetychnoho sektora Ukrainy / N. A. Kyzym, A. V. Leliuk // SPIN. – № 7616. – 2019. – S. 1550

4. HDK 34.20.507-2003 «Pravyla Tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla» [Chynnyi vid 2007-04-15]. – Lviv : LvivORHRES, 2003. – 597 s.

5. Normy vyprovuvannia elektroobladnannia SOOU–Y EE 20.302: 2007. – Ofits. vyd. – KHRIFE: Min-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, 2007. – II 262 s. – (Normatyvnyi dokument Minpalyvenerho Ukrainy. Normy).

6. Opornye polimernye izoljatory ZAO «Feniks 88», izgotovlenie, ispytanie, opyt [Elektronnyj resurs] / Danilov G., Vlasov V. Suhar V., Sjakov V. // Novosti jelektrotehniki. – 2002. – № 2 (14) – S. 23. – Rezhim dostupu : <http://www.news.elten.ru/arh/2002/14/22php>

7. Kuvajcev V. I. Vysokovol'tnye izoljatory: Metodicheskie ukazanija k laboratornomu praktikumu po JeChS / Kuvajcev V. I. – Orenburg : GOUUGU, 2004. – 24 s.

8. Izoljatory keramicheskie opome na naprjazhenie svyshe 1000V. Obshhie tehicheskie uslovija GOST R 52034-2003. [Data vvvedennja 2004-01-01]. – M. : FGUP Standartinform, 2005. – 24 s.

9. Labzun M. P. Mehanyzmi viniknennja ta ocinka teplovih anomalij oporno-strizhnevih yzoljatoryv / M. P. Labzun // Novini energetiki. – 2009. – № 12. – S. 40–45.

10. Leontv V. O. Elektrotekhnichni materialy : navchalnyi posibnyk / V. O. Leontiev, S. V. Bevz, V. A. Vydmysh. – Vinnytsia : VNTU 2013. – 122 s.

11. Kukharchuk V. V. Osnovy metrolohii ta elektrychnykh vymiriuvan : pidruchnyk / V. V. Kukharchuk, V. Yu. Kucheruk, Ye. T. Volodarskyi, V. V. Hrabko. – Vinnytsia : VNTU, 2012. – 522 s.

12. Loos, Single Phase to Ground Fault in Compensated Network. Saarbrücken, Germany, Lambert Academic Publishing, 2014, 228 p.

13. Kutin V. M. Vyznachennia umov robotozdatnosti rozpodilnykh merezh : monohrafiia / V. M. Kutin, S. V. Matviienko. – Vinnytsia : VNTU, 2015. – 148 s.

14. ГОСТ 12.1038 – 82. Predel'no dopustimye urovni naprjazhenija i tokov. Vnedr. 01.01.85. M. : Izd-vo standartov, 1988.

15. Dubovoi V. M. Modeliuvannia ta optymizatsiia system : pidruchnyk / V. M. Dubovoi, R. N. Kvietnyi, O. I. Mykhailov, A. V. Usov. – Vinnytsia : PP «TD Edelveis», 2017. – 804 s.

16. Spravochnyk po proektyrovanyiu elektrycheskykh setei / pod. red. D. L. Faibysovycha. – 3-e yzd., pererakh. y dop. – M. : ЭНАС, 2009. – 392 s.

17. Lezhniuk P. D. Metody i zasoby zakhystu vid obryvu provodu ta poshuk mistisia poshkodzhennia v rozpodilnii merezhi zi skladnoiu topolohiieiu napruboiu 6–35 kV : monohrafiia / P. D. Lezhniuk, M. V. Kutina ; Vinnyts. nats. tekhn. un-t. – Vinnytsia : VNTU, 2014. – 151 s.

18. Struktura balansu elektroenerhii v elektrychnykh merezhakh 0,38-154 kV: merodyky skadannia, analizu skadovykh ta normuvannia tekhnolohichnykh vytrat elektroenerhii. Ukrainy – K., 2003. – 71 s.