

УДК 621.314.213.08

Б. Оробчук, канд. техн. наук; І. Сисак; С. Бабюк

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

Резюме. Наведено алгоритм, що використовує значення амплітуди вектора початкового нульового струму приєднання з пошкодженням і кута між цим вектором і вектором міжфазної напруги для відомого режиму розподільної мережі. Він дозволяє однозначно визначити відстань до місця пошкодження ізоляції і значення опору цього пошкодження.

Ключові слова: пошкодження ізоляції, розподільна мережа, однофазне замикання на землю, комплексна провідність ізоляції, автоматизована система.

B. Orobchuk, I. Sysak, S. Babyuk

AUTOMATIC SYSTEM FOR RELAY PROTECTION FROM GROUND FAULTS

The summary. The algorithm which uses the value of the damaged connection initial zero current vector amplitude and the angle between this vector and the vector of the interphase voltage for the given mode of distribution network is given in the article. It allows to find the distance to the place of the isolation damage and the value of this damage resistance.

The most typical type of damages in these networks are monophasе ground faults which result in the isolation break down in its weakened places. Similar damages are caused by the isolation ageing, that is why the problem of providing efficient continuous control of the isolation, its detection in proper time and trouble clearing is still very actual.

The purpose of our work is to improve the method of finding the distance to the place of the local isolation damage and this damage resistance in the distribution networks, which would allow to find not only the distance to the ground faults, but to the local isolation damages, as well as to find the resistance of the isolation local damage. It is possible due to the determination of the initial zero currents vector amplitude and the angle between the vector of this current and the vector of the interphase voltage. Experimental data are compared with those obtained on the mathematic model of the network while calculating step-by-step change of the place of the predictable isolation damage along the damaged connection and the change on each step the value of resistance in the place of the isolation damage from a zero to the maximum possible.

Automatic system controls continuously the amplitude of the initial zero currents of all connections. Exceeding of the given value in one of the connections is treated as appearance of the isolation damage, being a ground fault in particular. As a result according to the change of place and the damage resistance value, the cyclic process of finding the mathematic model parameters, which are equal to those of displacement of the predicted place of the isolation damage, starts. Besides, in every stage of calculation the cycle of the predicted damage value change from zero to the maximum possible is carried out. The calculated results of the initial zero current vector in every step is compared with the actual vector of the initial zero current of the damaged connection. When the actual and calculated vectors of the initial zero current coincide, calculated values are provided in the distance, which were used in this step of calculation.

The change of the network configuration is taken into mathematical model automatically while including and excluding of the corresponding element of the network. To simplify the external connections of the system hand-operated correction of the network model under change of its configuration is used.

Initial zero currents phase is found according to the relation to the vector of the interphase voltage. This voltage vector does not change the amplitude, when the isolation damages of different size of the transition resistance up to the ground faults, appear. Besides, the change of phases between the vector of voltage and the initial zero currents practically does not depend on the place and the size of the isolation damage.

Key words: *isolation damage, distribution network, onephase ground fault, isolation complex conductivity, automatic system.*

Постановка проблеми. Розподільні мережі 6-35 кВ займають значну частину в інфраструктурі передавання й розподілу електроенергії, надійність їх роботи великою мірою визначають підсумковий показник безперебійності постачання електроенергії споживачеві й витрати на її передавання [1].

Найпоширенішим видом пошкоджень у цих мережах є однофазні замикання на землю, які закінчуються пробоем ізоляції в її ослаблених місцях. Подібні пошкодження відбуваються через старіння ізоляції, тому й досі залишається актуальним завдання забезпечення ефективного безперервного контролю стану ізоляції і на його основі своєчасного виявлення та усунення пошкоджень ізоляції [2].

Для подальшого підвищення надійності функціонування електричних систем необхідно впроваджувати експлуатаційний моніторинг, технічну діагностику та прогнозування залишкового ресурсу енергетичного устаткування. Значна кількість пошкоджень у вузлах електричних систем з двигунами і трансформаторами виникає внаслідок розвитку локальних або розподілених пошкоджень ізоляції кабелів та обмоток електродвигунів і трансформаторів. Запобігти виникненню таких пошкоджень можна завдяки своєчасному виявленню дефектів і їх усуненню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість існуючих методів і засобів контролю ізоляції реагують на виникле пошкодження і не дозволяють виявити можливе (передбачуване) зниження рівня ізоляції та визначити місце цього зниження [2]. Для оцінювання стану кабелів і прогнозування їх працездатності використовують різні методи, основним недоліком яких є необхідність від'єднання устаткування [3].

Відомі методи визначення комплексної провідності ізоляції мають недоліки, які не дозволяють застосовувати їх для безперервного контролю, а також вони не придатні для приєднань *кабель–двигун* і *кабель–трансформатор*. Наприклад, способи визначення параметрів ізоляції фаз мережі відносно землі [4] засновані на створенні тимчасової несиметрії шляхом під'єднання ємності між однією із фаз та землею. Для реалізації цих способів необхідно вимкнути приєднання на час виконання вимірів. У [5] запропоновано спосіб визначення провідності ізоляції відносно землі за результатами виміру поточних значень режимних параметрів на початку і кінці лінії. Спосіб застосовно для транзитних ліній. При його застосуванні на приєднаннях типу *кабель–двигун* або *кабель–трансформатор* можна контролювати стан ізоляції тільки кабеля. Але і в цьому випадку потрібне додаткове встановлення вимірювальних трансформаторів напруги або від'єднання приєднання для виконання вимірів.

Традиційне визначення відстані до місця виниклого замикання виконується локаційним способом, який базується на вимірювання часу між моментом посилання в

лінію зондуючого електричного імпульсу (струму або напруги) і моментом приходу в початок лінії імпульсу, відбитого від місця замикання [1]. Використання методу в робочому режимі мережі є надзвичайно складним через багатократне віддзеркалення зондуючого імпульсу від непошкоджених приєднань, а також через складність отримання необхідної інформації, що можливо тільки в той дуже короткий час, коли в місці ушкодження існує електрична дуга (долі мілісекунди).

Найбільш близьким аналогом є спосіб [6], згідно з яким визначають напругу на шині джерела живлення і струм пошкодженого приєднання з частотою вільних коливань. Потім визначені параметри режиму використовують у розрахунках в еквівалентній схемі заміщення мережі при послідовній зміні передбачуваного місця пошкодження уздовж усього приєднання, в результаті чого отримують значення відстані до місця замикання у вигляді коренів рівняння мережі. Визначення струму з частотою вільних коливань перехідного процесу ускладнене через значне загасання, а при швидкому зникненні дуги є неможливим. При виникненні замикання на землю через опір, який виникає при місцевих пошкодженнях ізоляції, цей спосіб не може забезпечити визначення відстані до місця дефекту.

Спільними ознаками методу, розглянутому в [6], і методу, який запропоновано в нашій роботі, є такі: в них виконується визначення параметрів режиму (напруга на шині джерела живлення і струм пошкодженого приєднання з частотою вільних коливань) та використовуються розрахунки в схемі заміщення мережі при послідовній зміні допустимого місця пошкодження уздовж усього приєднання.

Метою роботи є створення автоматизованої системи для виявлення дефектів ізоляції без вимкнення устаткування й зміни параметрів робочого режиму електроустаткування.

Постановка завдання. Удосконалити спосіб визначення відстані до місця локального пошкодження ізоляції й опору цього пошкодження в розподільних мережах, що дозволило б визначати відстань не лише до замикань на землю, але й до локальних пошкоджень ізоляції, а також визначати опір локального пошкодження ізоляції. Це можна досягти за рахунок визначення амплітуди початкового нульового струму і кута між вектором цього струму і вектором напруги між двома фазами. При цьому порівнюються дані, отримані експериментальним шляхом, зі значеннями, отриманими на математичній моделі мережі в процесі розрахунку при покроковій зміні місця передбачуваного пошкодження ізоляції вздовж пошкодженого приєднання і зміни на кожному кроці величини опору в місці пошкодження ізоляції від нуля до максимально допустимого.

Розглянемо приєднання навантаження, схема заміщення якого була розроблена в пакеті WorkBench і наведена на рисунку 1. При складанні схеми заміщення приєднання навантаження (двигуна або трансформатора) в мережі з ізолюваною нейтраллю було прийнято наступні допущення:

- 1) елементи схеми заміщення симетричні, тобто відповідні поздовжні (Z) і поперечні опори різних фаз рівні між собою;
- 2) ємності фаз відносно землі усієї електрично пов'язаної мережі (X_M), у тому числі й ємності контрольованого приєднання, враховуються сумарною величиною, що зосереджена на початку приєднання;

- 3) активна провідність ізоляції фаз відносно землі не враховується. За необхідності їх урахування не викликає труднощів і виконується шляхом під'єднання активного опору паралельно ємностям фаз мережі;
- 4) локальне пошкодження моделюється активним опором $R_{\text{ПОШК}}$ на відстані $f_{\text{ПОШК}}$ від початку приєднання.

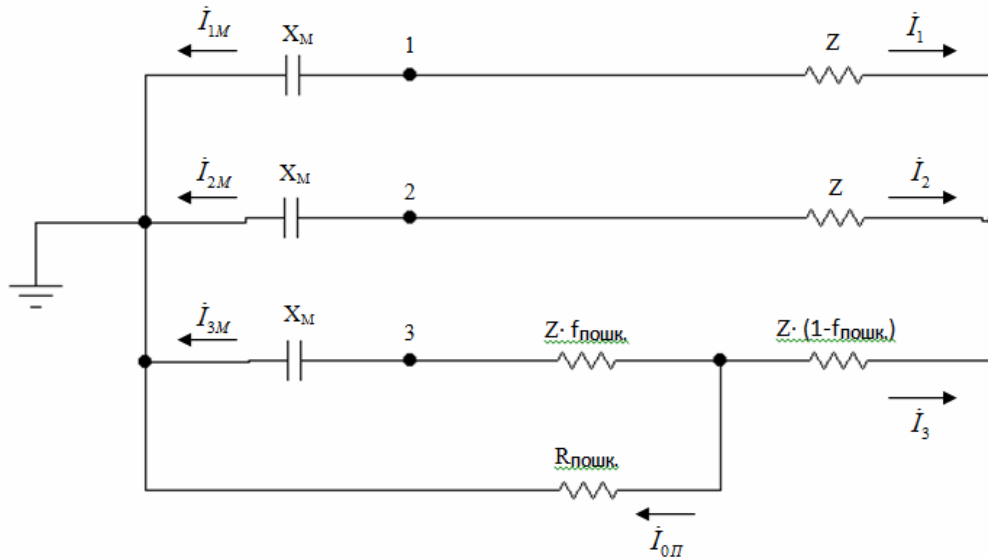


Рисунок 1. Схема заміщення приєднання навантаження при появі локального пошкодження ізоляції
 Figure 1. Chart of substituting for joining of loading at appearance of local damage of isolation

На схемі заміщення прийнято такі позначення:

$\dot{I}_{1M}, \dot{I}_{2M}, \dot{I}_{3M}$ – струми відповідно через поперечну провідність фаз 1, 2, 3 мережі відносно землі;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ – струми відповідно через поздовжню провідність фаз 1, 2, 3 навантаження приєднання;

$\dot{I}_{0П}$ – початковий нульовий струм, який проходить через місце пошкодження ізоляції (замикання на землю).

Запишемо рівняння, які описують робочий режим приєднання у разі виникнення дефекту ізоляції з опором $R_{\text{ПОШК}}$ в одній із фаз.

$$-\dot{I}_{1M} \cdot X_M + \dot{I}_1 \cdot Z - \dot{I}_3(1 - f_{\text{ПОШК}}) \cdot Z + \dot{I}_{0П} \cdot R_{\text{ПОШК}} = 0$$

$$-\dot{I}_{2M} \cdot X_M + \dot{I}_2 \cdot Z - \dot{I}_3(1 - f_{\text{ПОШК}}) \cdot Z + \dot{I}_{0П} \cdot R_{\text{ПОШК}} = 0$$

$$-\dot{I}_{3M} \cdot X_M + \dot{I}_3 \cdot Z - \dot{I}_{0П} \cdot Z + \dot{I}_{0П} \cdot R_{\text{ПОШК}} = 0$$

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_1 \cdot Z - \dot{I}_2 \cdot Z$$

$$\dot{U}_{23} = \dot{I}_2 \cdot Z - \dot{I}_{0П} \cdot Z - \dot{I}_3 \cdot Z$$

$$\dot{U}_{31} = \dot{I}_{0П} \cdot Z + \dot{I}_3 \cdot Z - \dot{I}_1 \cdot Z$$

$$\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{3M} = 0$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$$

Напруги між фазами U_{12}, U_{23}, U_{31} не змінюються при виникненні дефекту ізоляції і тому приймаються такими, що їх значення відомі й дорівнюють напрузі джерела живлення. Після перетворення системи рівнянь отримаємо математичну модель

$$\dot{I}_{0П} = \frac{(1 - f_{ПОШК})(\dot{U}_{31} - \dot{U}_{23})}{X_M + f_{ПОШК}(3 - 2f_{ПОШК}) \cdot Z + 3R_{ПОШК}}$$

Аналіз отриманої моделі показує, що вектор початкового нульового струму (амплітуда і його фаза) залежить від відстані до місця пошкодження $f_{ПОШК}$ і опору в місці дефекту $R_{ПОШК}$. Поздовжній опір фази приєднання Z є незмінною величиною. Значення X_M залежить від режиму (конфігурації) мережі, а тому для забезпечення відповідності між дійсним і розрахованим значенням початкового нульового струму в розрахунках необхідно враховувати реальне значення X_M .

Алгоритм методу визначення відстані до локального пошкодження ізоляції й визначення значення опору в місці пошкодження ізоляції наведено на рисунку 2.

Автоматизована система, яка працює на базі наведеного алгоритму, складається з:

- 1) блока визначення амплітуди вектора початкового нульового струму й кута φ між вектором початкового нульового струму, і вектором напруги між двома фазами, один із входів якого з'єднаний з виходом трансформатора початкового нульового струму, встановленим на приєднанні з пошкодженням ізоляції. Другий вхід блока з'єднаний з виходом трансформатора напруги, що під'єднаний до початку пошкодженого приєднання;
- 2) блока порівняння амплітуди вектора початкового нульового струму з допустимим значенням;
- 3) блока покрокової зміни Δf відстані від початку приєднання до передбачуваного місця локального пошкодження;
- 4) блока виконання циклу покрокової зміни ΔR величини опору в місці локального пошкодження ізоляції від нуля до максимально допустимого значення;
- 5) блока розрахунків на математичній моделі мережі вектора початкового нульового струму і кута φ між цим вектором струму і вектором напруги між двома фазами;
- 6) блока введення змін конфігурації мережі;
- 7) блока порівняння амплітуди розрахованого вектора початкового нульового струму $I_{0П\text{ РОЗРАХ}}$ з амплітудою виміряного вектора дійсного початкового нульового струму $I_{0П\text{ ДІЙСН}}$ і порівняння між собою кутів розрахованого $\varphi_{\text{РОЗРАХ}}$ та виміряного $\varphi_{\text{ДІЙСН}}$ векторів початкового нульового струму відносно відповідно розрахованого і виміряного векторів напруги між двома фазами;

8) блока індикації певних значень відстані до місця локального пошкодження ізоляції і значення опору в місці пошкодження ізоляції.

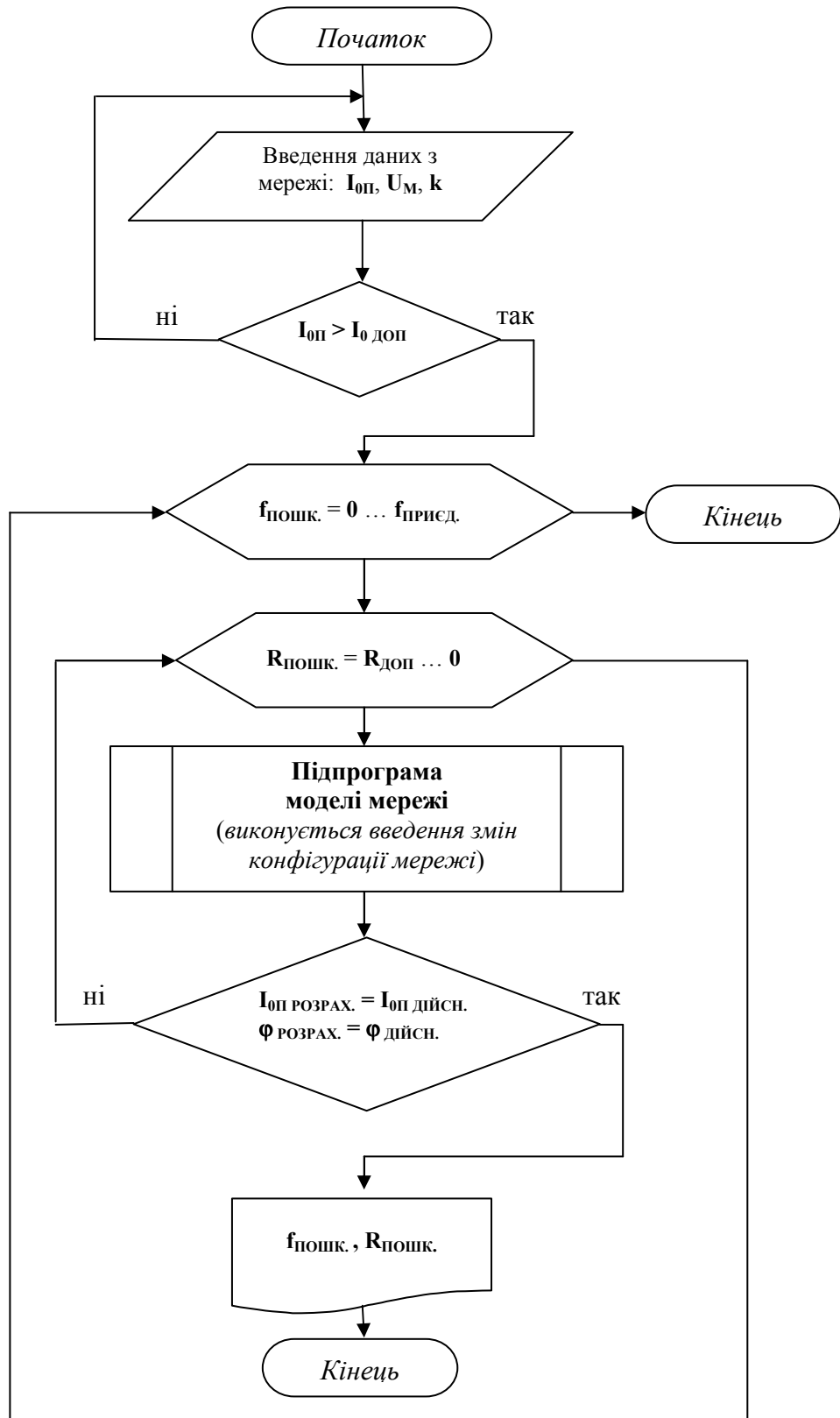


Рисунок 2. Алгоритм визначення відстані до місця локального пошкодження ізоляції й опору цього пошкодження

Figure 2. Algorithm of distance-finding to the site of local damage of isolation

and resistance of this damage

Автоматизована система безперервно контролює амплітуду початкових нульових струмів усіх приєднань. Перевищення по одному з приєднань заданого значення розцінюється як поява пошкодження ізоляції, у тому числі це може бути й замикання на землю. За фактом перевищення блок зміни місця і величини опору пошкодження починає циклічний процес задавання параметрів математичної моделі, які відповідають переміщенню точки передбачуваного місця пошкодження ізоляції. При цьому на кожному кроці розрахунку виконується цикл зміни величини передбачуваного пошкодження від нуля до максимально допустимого значення. Результати розрахунку вектора початкового нульового струму на кожному кроці розрахунку порівнюються з дійсним вектором початкового нульового струму пошкодженого приєднання. При збігу дійсного і розрахункового векторів початкового нульового струму на індикацію подаються розрахункові значення на відстані $r_{\text{пошк.}}$ і $R_{\text{пошк.}}$, які використовувалися на цьому кроці розрахунку.

Зміна конфігурації мережі автоматично враховується в математичній моделі мережі шляхом урахування і виключення параметрів відповідного елемента мережі. З метою спрощення зовнішніх зв'язків системи передбачена ручна корекція моделі мережі при зміні її конфігурації.

Фаза початкового нульового струму визначається відносно вектора міжфазної напруги. Цей вектор напруги не змінює амплітуди при виникненні дефектів ізоляції з різною величиною перехідного опору аж до замикання на землю. Крім того, зсув фаз між векторами напруги і початкового нульового струму практично не залежить від місця і ступеня дефекту ізоляції.

Автоматизована система була випробувана на віртуальній лабораторній установці в пакеті WorkBench. На лабораторній установці задавалися різні місця виникнення дефекту ізоляції в кабелі приєднання і в навантаженні приєднання. У кожній точці задавалися різні пошкодження ізоляції. Результати віртуальних лабораторних досліджень співпадають з розрахунковими даними на математичній моделі, тобто модель є адекватною.

Згідно з отриманою залежністю вектора (амплітуди і фази) початкового нульового струму приєднання з пошкодженням від відстані до місця пошкодження ізоляції й опору цього пошкодження можна отримати її графічне зображення, яке показано на рис. 3. У пакеті MathCAD на базі отриманої математичної моделі було побудовано графік дійсної частини функції над комплексною площиною.

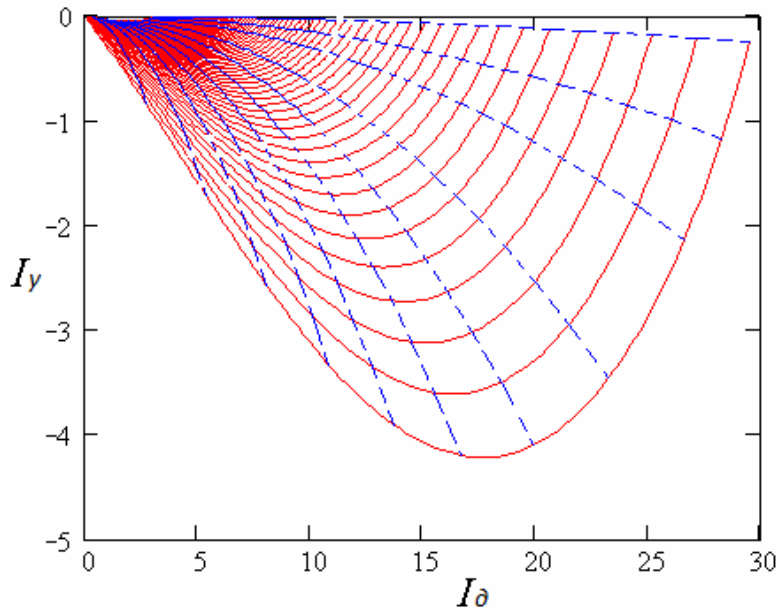


Рисунок 3. Залежність вектора початкового нульового струму від місця локального пошкодження ізоляції й опору цього пошкодження

Figure 3. Dependence of initial zero current vector on the site of local damage of isolation and resistance of this damage

Для побудови графічної залежності у якості початкових даних були прийняті такі:

- 1) поздовжній опір фази навантаження – кабелю і двигуна (трансформатора) – $Z=2+j100$;
- 2) номінальна напруга мережі $U_{НОМ} = 6$ кВ;
- 3) з трикутника лінійної напруги отримаємо $U_{31} - U_{23} = 10.38$ кВ;
- 4) ємності фаз відносно землі усієї електрично пов'язаної мережі $C = 10$ мкФ.

Значення вектора початкового нульового струму приєднання з пошкодженням представлені на комплексній площині (по горизонтальній осі показана активна, а по вертикальній осі – реактивна складові). За необхідності за цими даними без особливої складності можна отримати амплітуду і кут між вектором початкового нульового струму і вектором міжфазної напруги.

На рисунку залежність вектора початкового нульового струму від відстані до місця дефекту ізоляції представлена суцільними кривими. Вздовж цих кривих опір пошкодження постійний. На графіку показано значення опорів від 10 до 10000 Ом з кроком 10 Ом. Найбільше значення струму по амплітуді виходить при мінімальному (в даному випадку 10 Ом), а найменше – при максимальному опорі.

Залежність вектора початкового нульового струму від ступеня (опору) пошкодження ізоляції представлена штрих-пунктирними кривими. Вздовж цих кривих відстань до місця дефекту ізоляції постійна. На графіку прийняті значення відстаней у відносних одиницях відповідно зліва направо: 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,01. З графіків бачимо, що при малих відстанях зменшення опорі пошкодження ізоляції призводить до збільшення активної складової струму, а при великих – до збільшення реактивної складової.

Аналіз графічної залежності показав, що зменшення опорі пошкодження ізоляції викликає практично пропорційне збільшення амплітуди вектора початкового нульового

струму, а зміна відстані до місця пошкодження ізоляції призводить, головним чином, до зміни кута між цим вектором і вектором міжфазної напруги.

Динаміка зміни наочно показує зміну амплітуди і фази вектора початкового нульового струму при зменшенні відстані до місця пошкодження ізоляції, починаючи від кінця приєднання до його початку для різних значень опору (ступеня) цього пошкодження.

Висновки. Розроблено спосіб визначення відстані до місця локального пошкодження ізоляції й опору цього пошкодження в розподільних мережах, який дозволяє визначати відстань не лише до замикань на землю, але й до локальних пошкоджень ізоляції, а також визначати опір локального пошкодження ізоляції. Зроблено первинний аналіз результатів, отриманих при використанні розглянутого методу, і віртуальні лабораторні дослідження. Надалі планується зробити глибший аналіз методу, розробити реальну діючу лабораторну установку, дати найбільш достовірну й остаточну оцінку роботи цього методу, у тому числі й похибку отримуваних результатів, а також створити програмний продукт як для експериментального, так і повсюдного впровадження в системи релейного захисту і автоматики.

Conclusions. Method of finding the distance to the place of the local isolation damage and the resistance of this damage in the distribution networks, which allows to find the distance not only to the ground faults, but to the local isolation damage as well as to find the resistance of the local isolation damage, has been developed. The initial analysis of results obtained while applying this method and the virtual laboratory investigations have been carried out.

Profound analysis of the method is to be carried out in the future, real operating laboratory installation is to be developed. The most reliable and final estimation of this method, the error of the obtained results in particular, as well as the development of the software for both experimental and general introductions in the systems of relay protection and automation are to be carried out.

Список використаної літератури

1. Лебедев, Д.Е. Методы диагностики воздушных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений [Текст] / Д.Е. Лебедев, В.Е. Качесов // МНТК «Электроэнергетика глазами молодежи». – Самара, 2011. – С. 230–237.
2. Качесов, В.Е. Распознавание однофазных замыканий на землю в распределительных сетях [Текст] / В.Е. Качесов, Л.В. Квривишвили // Электричество. – 2010. – № 12. – С. 8–18.
3. Лебедев, Г.М. Математическое моделирование локальных дефектов изоляции силовых кабелей 6–10 кВ [Текст] / Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский // Электричество. – 1998. – №12. – С. 23–27.
4. Шалин, А. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ [Текст] / А. Шалин // Новости электротехники. – С.-Петербург, 2009. – №1(55). – С. 43–47.
5. Сидоров, А.И. Определение проводимости изоляции по отношению к земле для сетей напряжением 6–35 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Электричество. – 2001. – № 5. – С. 12–18.
6. T. Welfonder, V. Leitloff, R. Fenillet, S. Vitet: Location strategies and evaluation of detection algorithms for earth faults in compensated MV distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, No. 4. – PP. 123–129.

Отримано 14.02.2012