УДК 621.315.17

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ДО МІСЦЬ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ

М.В.Гребченко[1], докт.техн.наук, **В.Ф.Максимчук**[2], **Ю.В.Пилипенко**[3], канд.техн.наук
[1]**Національний університет біоресурсів і природокористування,**
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна **e-mail: grebchenko@nubip.edu.ua**
[2]**ПАТ Укрзалізниця,**
вул. Тверська, 5, Київ-150, 03680, Україна.
[3]**Інститут електродинаміки НАН України,**
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розроблено метод визначення відстані до місця замикання фази на землю та значення опору в місці замикання повітряних ліній у нерозгалужених мережах з ізольованою нейтраллю. В основу методу покладено співвідношення падіння напруги на дільниці фази лінії та напруги між точкою замикання фази й землею та розрахунок вектора струму, який проходить через місце замикання. При практичній реалізації методу між кожною фазою і землею включаються ємності, які автоматично відключаються у разі виникнення замикання фази на землю. Проведено математичне моделювання режимів замикання та промислові випробування. Бібл. 6, рис. 3.
Ключові слова: метод, повітряна лінія, замикання на землю, моделювання, експеримент.

Замикання однієї фази на землю є одним з розповсюджених пошкоджень повітряних ліній незалежно від рівня напруги та режиму заземлення нейтралі. Але у мережі з заземленою нейтраллю не виникає значних проблем у разі визначення місця виникнення пошкодження [2]. В основному це пов'язано з тим, що значення струмів пошкодження на декілька порядків перевищують значення струмів нормального режиму. Навіть у кабельних мережах з ізольованою нейтраллю у більшості випадків проблема пошуку місця замикання знаходить рішення завдяки тому, що струми нульової послідовності пошкодженої лінії значно перевищують ці самі струми у нормальному режимі [1]. Інформативною складовою також є наявність у струмі нульової послідовності вищих гармонік [3]. Найскладніше визначати місце замикання у повітряних лініях з ізольованою нейтраллю. Крім величини струму на розв'язання цієї задачі у більшості випадків впливає наявність перехідного опору у місті замикання, а також наявність навантаження лінії й несиметрія напруг фаз джерела живлення або вплив напруги ліній, що близько проходять. Прийнятну точність для повітряних ліній з ізольованою нейтраллю забезпечують методи, засновані на короткочасному відключенні пошкодженої лінії [5]. Для відповідальних споживачів таке рішення не може використовуватися. Достатню точність забезпечує метод короткочасного з'єднання нейтралі лінії з замиканням фази із землею [4]. Недоліками цього методу є небезпека переходу замикання у багатофазне коротке замикання та деякі інші.

Мета роботи полягає у розробці методу визначення місця замикання фази на землю на повітряних лініях у нерозгалуженій мережі з ізольованою нейтраллю без створення небезпечних режимів.

Виникнення замикань на землю призводить до появи струмів нульової послідовності. Значна кількість методів визначення місця замикання на землю засновується на вимірюванні цих струмів. У зв'язку з тим, що у повітряних ліній напругою до 110 кВ незначна ємність фаз, струми нульової послідовності невеликі, забезпечити необхідну точність їхнього вимірювання дуже важко. На величину струмів також впливає кількість ліній, які підключені до збірних шин.

Для збільшення струмів нульової послідовності або для їхнього створення у разі підключення до шин однієї лінії авторами пропонується включити на початку лінії ємності між кожною фазою і землею. Завдяки використанню реактивного опору виключаються активні втрати електричної енергії.

Основа алгоритму визначення місця замикання полягає у тому, що при величині опору всієї лінії $\underline{z}_{Л}$ визначається опір дільниці лінії від початку лінії (місце встановлення трансформаторів струму) до місця замикання $\underline{z}^{*}_{Л} = r^{*}_{Л} + jx^{*}_{Л}$. Потім необхідно розділити отримане значення $\underline{z}^{*}_{Л}$ на питомі параметри лінії й таким чином визначити відстань $l_з$ до місця замикання.

Опір $\underline{z}^{*}_{Л}$ розраховується шляхом ділення падіння напруги на цьому опорі $\dot{U}^{*}_{Л}$ на струм лінії у пошкодженій фазі $\dot{I}_{A}$. Схема заміщення, яка відповідає цьому випадку, наведена на рис. 1 (активні опори ємностей не враховані). Відповідно до цієї схеми на підставі закону Кірхгофу рівняння для напруги пошкодженої фази лінії на початку лінії (без врахування зміни значення струму $\dot{I}_A$ впродовж лінії через наявності на ній розподіленого навантаження) запишеться так:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{I}_{A} \cdot \underline{z}^{*}_{л} + \dot{I}_{з} \cdot R_{з}. \qquad (1)$$

У рівнянні (1) є дві невідомі величини: $\underline{z}^{*}_{л}$ та $R_з$. Але завдяки тому, що у рівняння входять комплексні величини, воно може бути розв'язано.

© Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В., 2016

Для розв'язання рівняння (1) необхідно знати не тільки напругу $\dot{U}_{A0}$ та струм $\dot{I}_A$, які безпосередньо вимірюються за допомогою вимірювального трансформатора напруги та вимірювального трансформатора струму, а ще й струм $\dot{I}_з$, який проходить через перехідний опір $R_з$ у місці замикання. Цілком зрозуміло, що безпосередньо струм $\dot{I}_з$ неможливо вимірювати.

Згідно з класичним підходом вважається, що через місце замикання проходить струм нульової послідовності $3\dot{I}_0$ [6], який може бути визначений шляхом підсумовування векторів струмів трьох фаз

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \qquad (2)$$

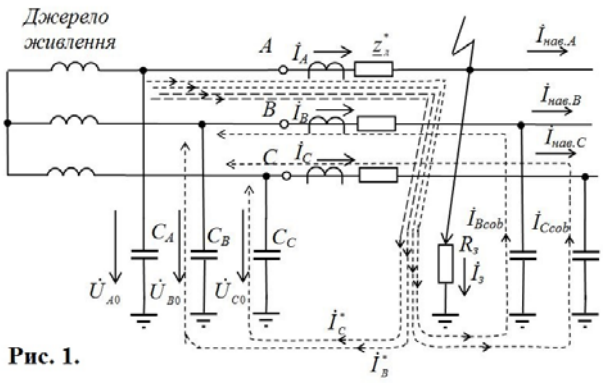

Рис. 1.

Але з іншого боку це не зовсім відповідає дійсності. Необхідно уточнити (2). Розглянемо складові струму замикання за допомогою схеми заміщення, наведеної на рис. 1 (без врахування впливу власної ємності фази *A* лінії), де місця вимірювання струмів фаз відповідають місцям встановлення трансформаторів струму.

Вектор струму фази *A* складається з наступних складових: векторів струмів $\dot{I}^*_B$ та $\dot{I}^*_C$, що обумовлені зосередженими (додатковими) ємностями відповідно C_B та C_C; векторів струмів $\dot{I}_{Bcob}$ та $\dot{I}_{Ccob}$, що обумовлені власними ємностями фаз *B* та *C* лінії по відношенню до землі, та вектора струму навантаження фази $\dot{I}_{нав.A}$.

Вектор струму, що проходить через місце замикання, на підставі аналізу схеми заміщення і розподілу струмів (рис. 1) дорівнює

$$\dot{I}_З = \dot{I}^*_B + \dot{I}^*_C + \dot{I}_{Bcob} + \dot{I}_{Ccob} \qquad (3)$$

При цьому струми фаз визначаються наступним чином:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{нав.A} + \dot{I}^*_B + \dot{I}^*_C + \dot{I}_{Bcob} + \dot{I}_{Ccob}\,, \qquad \dot{I}_B = \dot{I}_{нав.B} - \dot{I}_{Bcob}\,, \qquad \dot{I}_C = \dot{I}_{нав.C} - \dot{I}_{Ccob} \qquad (4\text{-}6)$$

Підставимо (4) – (6) у (2)

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_{нав.A} + \dot{I}_{нав.B} + \dot{I}_{нав.C} + \dot{I}^*_B + \dot{I}^*_C\,. \qquad (7)$$

Навантаження лінії не зв'язане з землею, а тому не створює струмів нульової послідовності і сума струмів навантаження фаз в (7) дорівнює нулю. Тоді з (7) отримаємо

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}^*_B + \dot{I}^*_C\,. \qquad (8)$$

Порівняння (8) з (3) показує, що для визначення струму, що проходить через перехідний опір $R_з$, до струму $3\dot{I}_0$ необхідно додати струми $\dot{I}_{Bcob}$ та $\dot{I}_{Ccob}$, тобто рівняння (3) слід записати у такому вигляді:

$$\dot{I}_З = 3\dot{I}_0 + \dot{I}_{Bcob} + \dot{I}_{Ccob}\,. \qquad (9)$$

Ємнісні струми, що обумовлені власною ємністю фаз *B* і *C* по відношенню до землі, визначаються з урахуванням реальних напруг відповідних фаз, які збільшуються при замиканні однієї з фаз

$$\dot{I}_{Bcob} = \dot{U}_{B0}\cdot(-j\omega C_{Bcob}),\ \dot{I}_{Ccob} = \dot{U}_{C0}\cdot(-j\omega C_{Ccob}).$$

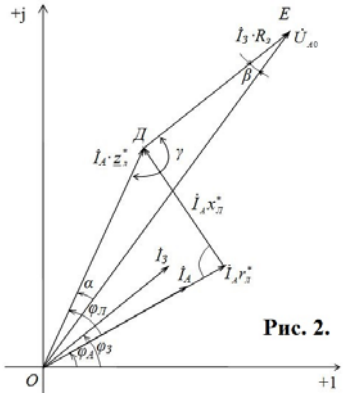

Рис. 2.

Розглянемо один з варіантів розв'язання рівняння (1). При цьому враховується, що перехідний опір $R_з$ − активний, а тому напрямок напруги на ньому збігається з напрямком вектору струму $\dot{I}_З$. Напрямок падіння напруги на опорі лінії визначається напрямком вектору струму фази *A*, а також кутом лінії $\varphi_л$. Значення кута $\varphi_л$ може бути однаковим впродовж всієї лінії, або змінюватися на окремих ділянках. У будь-якому випадку цей кут визначається з виразу $tg\,\varphi_л = X_л / R_л$.

Зобразимо на комплексній площині (рис. 2) векторну діаграму, що відповідає рівнянню (1) та рис.1. Розрахунок відстані до точки замикання полягає у визначенні кутів трикутника ОДЕ, з якого знаходиться сторона ОД і далі опір дільниці лінії до точки замикання. У разі необхідності перехідний опір у місці замикання знаходиться з (1): $R_З = (\dot{U}_{A0} - \dot{I}_A \dot{z}^*_л)/\dot{I}_З$.

На рис. 3 наведено результати розрахунків на математичній моделі похибки Δb визначення місця замикання на землю при різних режимах роботи лінії у залежності від відстані *l* при опорі у місці замикання $R_З = 10$ Ом: *1* − ізольована нейтраль (існуюча схема); *2* − нейтраль ізольована, включені ємності 0,64 мкФ; *3* − нейтраль ізольована, включені ємності 2·0,64 мкФ; *4* − заземлена нейтраль. Аналіз результатів показує, що у разі використання ємностей 2·0,64 мкФ похибка не перевищує 1%. У разі наявності несиметрії напруг фаз по відношенню до землі використання ємностей забезпечує майже симетричні напруги фаз.

Випробування у промислових умовах проведені на повітряній лінії 10 кВ довжиною більш 30 км: виконувалися металеві замикання на землю на різній відстані, фіксувалися параметри режимів і на цій підставі роз-

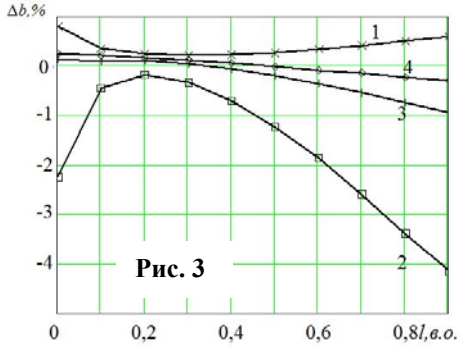

Рис. 3

раховувалися відстані до місця замикання. Похибка визначення відстані у восьми проведених дослідах не перевищила 4% (у разі підбору значення напруги компенсації).

Висновки. Запропоновано метод визначення відстані до точки замикання на землю для повітряних ліній у нерозгалуженій мережі з ізольованою нейтраллю. Метод заснований на використанні параметрів режиму (струми та напруги фаз по відношенню до землі) і не потребує відключення лінії. Точність визначення місця замикання на землю значно підвищується при наявності ємностей, що підключені до кожної фази та землі. Підключення ємностей позитивно впливає на вирівнювання значень напруг фаз лінії у нормальному режимі. За наявності розгалуженої мережі ці ємності можна не використовувати.

1. *Баран П.М., Кідиба В.П., Равлик О.М.* Визначення виду та місця пошкодження на лініях з відгалуженням // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2008. – № 615. – С. 8-13.
2. *Гребченко М.В., Бельчев І.В.* Спосіб визначення відстані до місця виникнення локального дефекту ізоляції та опору цього дефекту у розподільних мережах. Патент України. № 100180. G01R31/08, 2012.
3. *Кузнецов А.П.* Определение мест повреждения на воздушных линях электропередачи. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.
4. *Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Стасюк О.І., Тутик В.Л., Щербакова І.О., Железняк А.Л., Гончарова Л.Л., Подлєсних Є.Г.* Комп'ютерна система моніторингу і визначення місця аварії силових мереж СЦБ. Патент України № 41967, МПК G06F 11/00/; 2009.
5.*Фигурнов Е.П., Бодров П.А.* Определение места однофазного замыкания на землю в высоковольтных линиях электроснабжения автоблокировки железных дорог // Релейная защита и автоматика энергосистем. – ВВЦ. Москва, 2004. – С. 88-93.
6. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

УДК 621.315.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАЛЕННОСТИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

Н.В.Гребченко[1], докт.техн.наук, В.Ф.Максимчук[2], Ю.В.Пилипенко[3], канд.техн.наук
[1]Национальный университет биоресурсов и природопользования, ул. Героев Обороны, 15, Киев, 03041, Украина
[2]ПАТ Укрзализныця, ул. Тверская, 5, Киев-150, 03680, Украина
Институт электродинамики НАН Украины, пр.Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Приведены результаты разработки метода определения расстояния до места замыкания фазы на землю и значения сопротивления в месте замыкания воздушных линий в неразветвленных сетях с изолированной нейтралью. В основу метода положено соотношение падения напряжения на участке фазы линии и напряжения между точкой замыкания фазы и землей. При этом выполняется расчет вектора тока, который проходит через место замыкания. При практической реализации метода между каждой фазой и землей включаются емкости, которые автоматически отключаются при возникновении замыкания фазы на землю. Проведено математическое моделирование режимов замыкания и промышленные испытания. Библ. 6, рис. 3.

Ключевые слова: метод, воздушная линия, замыкание на землю, моделирование, эксперимент

DETERMINATION OF THE DISTANCE TO THE SINGLE-PHASE CIRCUITS ON OVERHEAD LINES

N.V.Grebchenko[1], V.F. Maximchuk[2], J.V.Pilipenko[3]
[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv 03041, Ukraine. e-mail: grebchenko@nubip.edu.ua
[2]Ukrzaliznytsia,
Tverska str., 5, MSP Kyiv-150, 03680, Ukraine.
[3]Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Pr. Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Results of developing a method of determining the distance to the phase-to-ground and the resistance value in the place of circuit overhead lines in networks with isolated unbranched her trawls. The method is based on the ratio of the voltage drop on the plot line phase voltage and phase-circuit between the point and the ground. This takes account of the current vector, which runs through the site closure. In the practice of the method between each phase and earth are containers that are automatically disabled when a phase-to-ground. Mathematical modeling and industrial loopback test. References 6, figures 3.

Key words: *method, air line, ground fault, simulation, experiment*

1. *Baran P.M., Kidyba V.P., Ravlyk O.M.* Determining the type and location of the damage on the lines with a branch // Elektroenergetychni ta Elektromechanichni systemy. – 2008. – No 615. – Pp. 8-13. (Ukr.)
2. *Grebchenko M.V., Belchev I.V* The method of determining the distance to the place of occurrence of local defect isolation and resistance of this defect in the distribution networks. Patent Ukraine. No 100180, G01R31/08; 2012(Ukr).
3. *Kuznetsov A.P.* Fault location on overhead power lines. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 94 p. (Rus.)
4. *Stognii B.S., Sopel M.F., Stasuik O.I., Tutik V.L., Shcherbakova O.I., Zhelezniak A.L., Goncharova L.L., Podlesnych E.G.* The computer system of monitoring and the accident power networks. Patent Ukraine. No 41967, G06F 11/00 SCB, 2009. (Ukr.)
5. *Figurnov E.P., Bodrov P.A.* Determination of the place of single-phase ground fault in the high voltage power lines of automatic block system of railways // Protection and automation of power systems. – VVC. Moskva, 2004. – Pp. 88-93. (Rus.)
6. *Chernobrovov N.V.* Relay protection. – Moskva: Energiia, 1971. – 624 p. (Rus.)

Надійшла 20.01.2016
Остаточний варіант 29.03.2016