

Денисюк С.П., д-р. техн. наук, проф., тел.: 0504406989, e-mail: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net), ORCID 0000-0002-6299-3680  
 Омельчук А.О., канд. техн. наук, доцент, тел.: 0506274552, e-mail: [omelchuk\\_anatoli@ukr.net](mailto:omelchuk_anatoli@ukr.net), ORCID 0009-0007-3964-497X

Дерев'янюк Д.Г., канд. техн. наук, доцент, тел.: 0992018266, e-mail: [zavkafe@lil.kpi.ua](mailto:zavkafe@lil.kpi.ua), ORCID 0000-0002-4877-5601

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

**Анотація.** У статті досліджені параметри дистанційних захистів з залежною від опору петлі короткого замикання витримкою часу для розподільчих ліній з резервуванням та джерелами розподіленої генерації (ДРГ), де враховуються особливості параметрів цих ліній та режимів їх роботи і умов експлуатації. Отримані характеристики пристроїв захисту, котрі рекомендуються при налагодженні дистанційного захисту таких ліній напругою 6...20 кВ. Обґрунтовано переваги використання схеми приєднання дистанційного захисту на міжфазні напруги і різницю фазних струмів, а також використання окремого захисту від подвійних замикань на землю, а при їх відсутності - схеми приєднання на лінійні напруги і фазні струми. Надійність роботи дистанційного захисту повного опору доцільно оцінювати за величиною максимальної довжини дуги, котра визначається при заданому коефіцієнті чутливості дистанційного захисту зниженням напруги в місці встановлення захисту при короткому замиканні.

**Ключові слова:** розгалужені мережі, дистанційний захист, коротке замикання, джерела розподіленої генерації, надійність, селективність.

Denysyuk S.P., dr. technical Sciences, prof., phone: 0504406989, e-mail: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net), ORCID 0000-0002-6299-3680

Omelchuk A.O., candidate technical of Sciences, associate professor, phone: 0506274552, e-mail: [omelchuk\\_anatoli@ukr.net](mailto:omelchuk_anatoli@ukr.net), ORCID 0009-0007-3964-497X

Derevyanko D.G., candidate technical Sciences, associate professor, phone: 0992018266, e-mail: [zavkafe@lil.kpi.ua](mailto:zavkafe@lil.kpi.ua), ORCID 0000-0002-4877-5601

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## PROTECTION OF ELECTRICAL TRANSMISSION LINES WITH SOURCES OF DISTRIBUTED GENERATION

**Abstract.** The article examines the parameters of remote protections with a time delay dependent on the resistance of the short-circuit loop for distribution lines with redundancy and sources of distributed generation (DRG), taking into account the peculiarities of the parameters of these lines and their modes of operation and operating conditions. Obtained characteristics of protection devices, which are recommended when setting up remote protection of such lines with a voltage of 6...20 kV. The advantages of using a remote protection connection scheme for interphase voltages and phase current differences, as well as the use of separate protection against double earth faults, and in their absence - connection schemes for line voltages and phase currents, are justified. The reliability of the remote protection of full resistance should be evaluated by the value of the maximum length of the arc, which is determined at a given coefficient of sensitivity of the remote protection by the voltage drop at the place of installation of the protection in the event of a short circuit.

**Keywords:** branched networks, remote protection, short circuit, sources of distributed generation, reliability, selectivity.

**Вступ.** За результатами досліджень [1,2] умов узгодження суміжних дистанційних захистів з урахуванням параметрів та режимів роботи ліній електропередавання з джерелами розподіленої генерації, актуальним є вибір схем дистанційного захисту для забезпечення селективної і надійної його роботи при різних видах коротких замикань. На сучасному етапі це реалізують мікропроцесорні системи захисту і управління такими мережами з ДРГ.

Тому необхідно дослідити способи вимірювання опору пошкодженої ділянки лінії дистанційними захистами при різних видах коротких замикань з урахуванням впливу струмів навантаження цих ліній і перехідного опору в місці замикання та пов'язаний з цим вибір схеми дистанційних захистів в розподільних лініях напругою 10 кВ з ДРГ.

Налаштування дистанційних захистів ускладнюється тим, що для забезпечення однозначного вимірювання петлі короткого замикання при міжфазних пошкодженнях і при подвійних замиканнях на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю в колах струму і напруги, котрі живлять захист, виконують перемикання з вимірювання лінійних величин струмів ( $I_L$ ) і напруги ( $U_L$ ) на фазні струми і напруги з застосуванням в колах струму компенсації струму нульової послідовності  $I_0$  на ділянках, де  $I_0 \neq 0$ .

**Мета та завдання.** Зміни в параметрах і режимах роботи розподільчих мереж, обумовлених джерелами розподіленої генерації потребують визначення їх впливу на показники роботи пристроїв релейного захисту таких мереж і, зокрема, ліній електропередавання [1,2].

При міжфазних замиканнях вимірювання опору петлі короткого замикання забезпечується підведенням до реагуючого органу дистанційного реле напруги, пропорційній напрузі між пошкодженими фазами  $U_L$  та різниці струмів пошкоджених фаз –  $I_L$ . У цьому випадку опір на входних клеммах реле при двофазних  $Z^{(2)}$  і трифазних  $Z^{(3)}$  коротких замиканнях пропорційний опору прямої послідовності лінії до місця замикання:

$$(2) = (3) \frac{U_L}{I_L} \quad 1l, \quad (1)$$

де  $Z_1$  - питомий опір прямої послідовності лінії електропередавання, Ом/км;  $l$  - довжина лінії електропередавання до місця замикання, км.

Нажаль вказаний спосіб підключення не забезпечує аналогічних вимірів в режимі подвійного замикання фаз на землю - при такому замиканні на одній лінії пристроєм захисту I (рис. 1), в місці встановлення якого  $I_0=0$ , вимірюється опір, пропорційний відстані до найбільш віддаленої точки замикання. Це пояснюється виразом напруги (2) між пошкодженими фазами ( $U_{BC}$ ) і різниці струмів (3) пошкоджених фаз ( $I_{BC}$ ):

$$U_{BC}=U_B-U_C=I_B \cdot Z_1 \cdot l_2 + I_B \cdot X_L \cdot (l_1 + l) - I_C \cdot Z_1 \cdot l_2 \approx 2 \cdot Z_1 \cdot I_B \cdot (l_2+l_1+l), \quad (2)$$

де  $X_L$  - питомий індуктивний опір петлі "фаза-земля" (для ліній без грозозахисних тросів  $X_L = 1,83 \cdot Z_1$ ).

$$I_{BC}=I_B-I_C=2I_B, \quad (3)$$

$$Z_{z1} = \frac{U_{BC}}{I_{BC}} = Z_1 \cdot (l_2 + l_1 + l). \quad (4)$$

Напруга, що підводиться до пристрою захисту 2, встановленому на

пункті резервування (де  $I_0 \neq 0$ ), визначається виразом:

$$U_{BC} = I_B \cdot Z_l \cdot l + I_B \cdot X_M \cdot l_1 = 1,83 \cdot I_B \cdot Z_l \cdot (l + 0,45 \cdot l_1), \quad (5)$$

де  $X_M$  - питомий опір взаємодукції між фазами (для ліній без грозозахисних тросів  $X_M = 0,83 \cdot Z_l$ ).

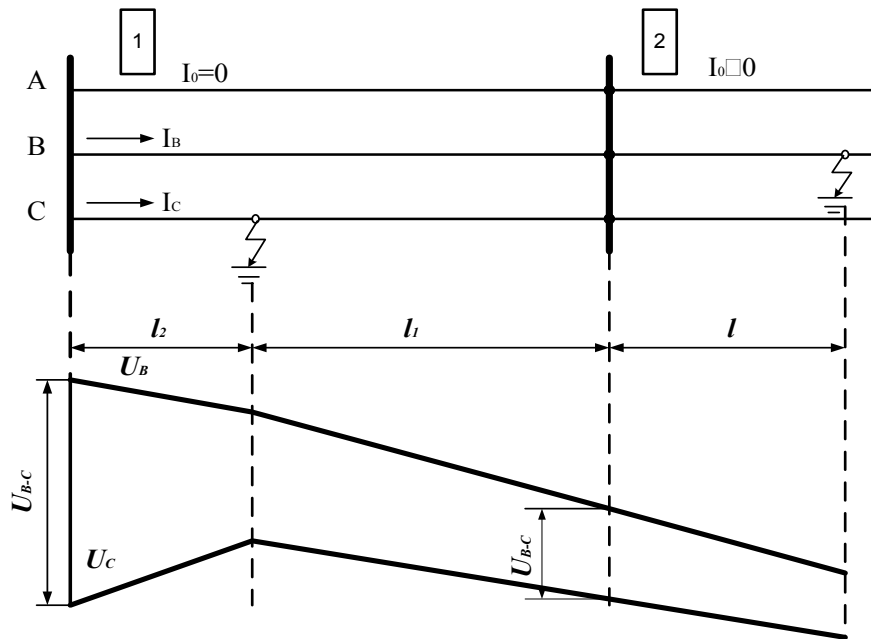


Рис.1. Зміна напруги вздовж лінії електропередавання при подвійному замиканні на землю (1, 2 – комплекти захисту лінії).

Опір на ввіді пристрою захисту 2  $Z_{Z2}$  визначається згідно виразу:

$$Z_{Z2} = \frac{U_{BC}}{I_{BC}} = 1,83 \cdot Z_l \cdot (l + 0,45 \cdot l_1). \quad (6)$$

Вирази (4) і (6) свідчать про те, що селективна робота захисту можлива при умові  $(l_2 + 0,17 \cdot l_1) > 0,83 \cdot l$ .

При подвійному замиканні на землю на різних відхідних лініях однієї підстанції (рис. 2), опір на вході пристрою захисту 1 і 2 визначається виразом (7):

$$Z_{Z1} = Z_{Z2} = \frac{U_{BC}}{I_{BC}} = 1,83 \cdot Z_l \cdot (l_1 + l_2). \quad (7)$$

Опори, котрі фіксуються пристроєм захисту при такому замиканні відповідають сумарній відстані до місць замикання на обох лініях, збільшеній в 1,83 рази.

Отже, при контролюванні дистанційним захистом лінійних напруг і різниці струмів пошкоджених фаз пристрої захисту, встановлені в місцях, де

при подвійних замиканнях на землю  $I_0 \neq 0$ , виміряють опір більший, ніж опір петлі короткого замикання на захищеній ділянці, і часто більший, ніж опір спрацювання цього пристрою захисту.

В таких випадках, для забезпечення вимірювання достовірного опору, виконуються перемикання в колах струму і напруги пристрою захисту, котрі забезпечують підключення пристрою до фазної напруги  $U_F$  і до фазного струму, скомпенсованого струмом нульової послідовності ( $I_F + \kappa \cdot I_0$ ).

Виконання таких перемикань можливо при наявності на відхідних лініях трьох трансформаторів струму і трьох однофазних (або одного трифазного) трансформаторів напруги. Тому використання таких способів підключення пристроїв дистанційного захисту ліній з резервуванням та джерелами розподіленої генерації призвело б до значного ускладнення самого захисту та первинних схем пунктів резервування і комірок підключення ДРГ, обумовленого необхідністю встановлення додаткових трансформаторів струму і напруги.

**Матеріали і методи дослідження.** Проведемо дослідження вимірювання опорів при всіх видах замикань при використанні схеми захисту:

- з підключенням пристрою захисту на напруги, пропорційні напрузі між пошкодженими фазами  $U_L$  і струму пошкодженої фази  $I_F$  в режимах (коли відсутній струм нульової послідовності в місці установалення пристрою захисту  $I_0=0$ );

- та з перемиканням напруги з лінійної на фазну  $U_F$  при наявності струму нульової послідовності в місці установалення захисту.

Проведені дослідження направлені на отримання більш простого способу вимірювання опорів при всіх видах замикань в досліджуваних лініях електропередавання. В режимі трифазного короткого замикання вимірюваний опір визначається згідно виразу (8):

$$Z^{(3)} = \frac{U_L}{I_L} = 1,73 \cdot Z_1 \cdot l. \quad (8)$$

У режимі двофазного короткого замикання – виразом (9)

$$Z^{(2)} = \frac{U_L}{I_L} = 2 \cdot Z_1 \cdot l. \quad (9)$$

В режимі подвійного короткого замикання на землю на одній лінії (рис.1) пристроєм захисту 1 вимірюється опір:

$$Z_{Z1} = 1,83 \cdot Z_1 \cdot (l_2 + l_1 + l), \quad (10)$$

а пристроєм захисту 2 при підключенні на напругу фази В – вимірюється опір:

$$Z_{Z2} = \frac{U_B}{I_B} = \frac{I_B \cdot Z_1 \cdot l}{I_B} = 1,83 \cdot Z_1 \cdot l \quad (11)$$

Оскільки  $Z_{Z1} > Z_{Z2}$ , то завжди забезпечується селективна робота пристроїв захисту 1 і 2.

При подвійному замиканні на землю на різних відхідних лініях однієї підстанції (рис. 2) обидва пристрої захисту 1 і 2 підключаються до напруги, пропорційної струму і напрузі пошкодженої фази, оскільки в місці встановлення обох пристроїв протікає струм  $I_0$ . При цьому кожним з пристроїв вимірюється опір, пропорційний опору прямої послідовності лінії до місця замикання:

$$\begin{aligned} Z_{Z1} &= 1,83 \cdot Z_1 \cdot l_1, \\ Z_{Z2} &= 1,83 \cdot Z_1 \cdot l_2. \end{aligned} \quad (12)$$

В цьому випадку першою відключається лінія, на котрій точка замикання розташована ближче до підстанції.

Співвідношення вимірів опорів при різних видах замикань наступне:

$$Z^{(3)} : Z^{(2)} : Z^{(1,1)} = 1,73 : 2 : 1,83.$$

Застосування такої схеми захисту також вимагає контролю та вимірювання фазної напруги лінії.

Тому в лініях 10 кВ з джерелами розподіленої генерації доцільно використовувати дистанційний захист, що однозначно реагує на міжфазні короткі замикання в одній точці і виконується за схемою підключення до напруг і струмів між пошкодженими фазами  $U_L$  і  $I_L$ , а для захисту від подвійних замикань на землю використовувати окремі пристрої, що реагують на величину струму нульової послідовності.

Таке виконання пристроїв дистанційного захисту є доцільним ще й тому, що навіть поширені максимальні струмові захисти радіальних ліній не завжди забезпечують необхідну чутливість при подвійних замиканнях на землю. Наприклад, у разі подвійного замикання на землю на різних відхідних лініях однієї підстанції через великий опір петлі короткого замикання чутливість струмових захистів виявляється недостатньою.

Співвідношення струмів при двофазному короткому замиканні в точці  $K_1$  на лінії 1 і при подвійному замиканні на землю в точках  $K_1$  лінії 1 і  $K_2$  лінії 2 (рис.2) становить:

$$m = \frac{I_{к.з.}^{(2)}}{I_{к.з.}^{(1,1)}} = \left[ \frac{\sqrt{3} \cdot E_a \cdot (2X_1 \cdot L_1 + 2 \cdot X_1 \cdot L_2 + 3,5 X_1 \cdot L_1 + 3,5 X_2 \cdot L_2)}{2X_1 \cdot L_1 \cdot 3 \cdot (a^2 - a) \cdot E_a} \right] = 0,92 \frac{L_1 + L_2}{L_1} \quad (13)$$

При рівності відстаней до місць замикання ( $l_2 = l_1$ ) зменшується чутливість захисту при подвійному замиканні на землю в 1,84 рази.

При відсутності на лініях електропередавання захисту від замикань на землю доцільним буде підключення дистанційного захисту на напруги, пропорційні струму пошкодженої фази  $I_F$  і напрузі між пошкодженими фазами  $U_L$ . В цьому випадку у разі подвійного замикання на землю і наявності  $I_0$  в місці його встановлення «загрубляти» захист необхідно в меншій мірі, ніж при підключенні на лінійні струми і різницю струмів пошкоджених фаз.

При підключенні пристрою захисту на напруги, пропорційні струму пошкодженої фази  $I_F$  і напрузі між пошкодженими фазами  $U_L$  вимірюється опір:

- при трифазному короткому замиканні  $Z_Z^{(3)} = 1,73 \cdot Z_1 \cdot l$ ).
- при двофазному короткому замиканні  $Z_Z^{(2)} = 2 \cdot Z_1 \cdot l$ ).

При подвійному замиканні на землю в різних точках однієї лінії електропередавання опір на вході пристрою захисту 1 відповідає

$$Z_{Z1} = \frac{U_{BC}}{I_B} = 2 \cdot Z_1(l + l_1 + l_2). \quad (14)$$

а на вході пристрою захисту 2

$$Z_{Z2} = \frac{U_{BC}}{I_C} = 1,83 \cdot Z_1(l + 0,45 \cdot l_1). \quad (15)$$

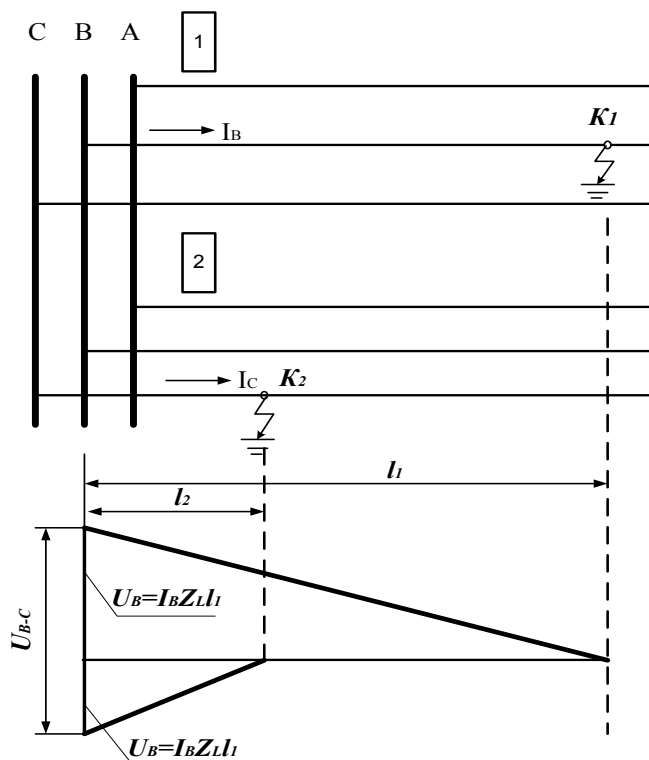


Рис.2. Зміни залишкової напруги вздовж ліній електропередавання при подвійному замиканні на землю в різних лініях.

Оскільки  $Z_{Z2} > Z_{Z1}$ , то завжди забезпечується селективна дія захисту.

При розташуванні місць подвійного замикання на землю на різних відхідних однієї підстанції, пристрої захисту 1 і 2 вимірюють:

$$Z_{Z1} = Z_{Z2} = \frac{U_{BC}}{I_B} = 1,83 \cdot Z_1(l_1 + l_2). \quad (16)$$

Збільшення опору, вимірюваного пристроєм захисту однієї лінії при подвійному замиканні на землю, визначається відстанню до місця замикання на іншій лінії ( $l_2$ ), що аналогічно закрубленню максимальних струмових захистів при цьому виді пошкодження.

Отримані співвідношення опорів, що вимірюються дистанційними пристроями захисту з різними схемами підключення при міжфазних коротких замиканнях показують, що для розподільних ліній 10 кВ з ДРГ найбільш прийнятними можливі наступні способи підключення дистанційних захистів:

- 1) на лінійні напруги і різницю струмів між пошкодженими фазами при виконанні окремого захисту від подвійних замикань на землю;
- 2) на лінійні напруги і струми пошкоджених фаз при відсутності захисту від подвійних замикань на землю.

Для обох зазначених способів проаналізуємо вплив струмів навантаження і величини перехідних опорів на вимірюванням дистанційним пристроєм повного опору при міжфазних коротких замиканнях.

При підключенні на лінійні напруги ( $U_L$ ) і різницю фазних струмів ( $I_L$ ) дистанційний пристрій в режимі трифазного короткого замикання реагує на опір (рис.3).

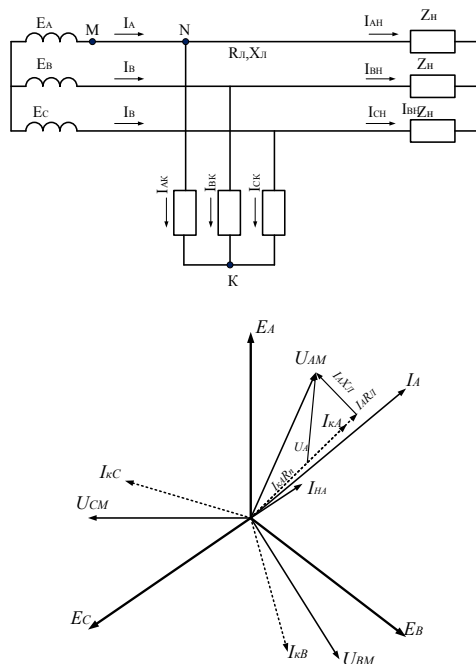


Рис.3. Пояснювальна схема до симетричного короткого замикання в трифазній мережі.

$$Z_{z1} = \frac{U_L}{I_L} = \frac{(I_B - I_C) \cdot Z_L + (I_{Bk} - I_{Ck}) \cdot R_p}{I_B - I_C} = Z_L + R_p \frac{(I_{Bk} - I_{Ck})}{I_B - I_C}. \quad (17)$$

де  $Z_L$  – повний опір прямої послідовності лінії, Ом;

$R_p$  - перехідний опір в місці замикання, Ом.

Значення струмів у фазах В і С відповідно рівні:

$$\begin{aligned} I_B &= I_{Bk} - I_{BN}, \\ I_C &= I_{Ck} - I_{CN}, \end{aligned} \quad (18)$$

де  $I_{Bk}$ ,  $I_{Ck}$  і  $I_{BN}$ ,  $I_{CN}$  – фазні струми короткого замикання і навантаження в фазах В і С.

З урахуванням величин  $I_B$  і  $I_C$  (18) після перетворень вираз (17) матиме вигляд:

$$Z_{z1}^{(3)} = Z_L + R_p \frac{I_k}{I_k - I_N}. \quad (19)$$

З виразу (19) випливає, що при металевому короткому замиканні ( $R_p = 0$ ) на результати вимірювання пристрою захисту не впливатимуть струми навантаження, що є перевагою такої схеми вимірювання. Наявність струму навантаження при замиканні через перехідний опір ( $R_p \neq 0$ ) зменшує вплив останнього на вимірювання пристроєм захисту опору пошкодженої ділянки.

В свою чергу, значення перехідного опор при міжфазних коротких замиканнях визначається, переважно, опором електричної дуги:

$$R_p = R_d \frac{1050 \cdot l_d}{I_d}, \quad (20)$$

де  $l_d$  - довжина електричної дуги, м;

$I_d$  - діючі значення струму через електричну дугу, А.

Значення фазного струму ( $I_k + I_N$ ) можна визначити з виразу фазної напруги  $U_F$  в точці М при симетричному трифазному короткому замиканні (рис. 3):

$$U_\phi = (I_k + I_N) \cdot Z_L + I_k \cdot R_p. \quad (21)$$

Підставляючи в (19) значення перехідного опор (20) і фазного струму (21), отримаємо вираз опор на вході пристрою захисту:



$$z_1 = Z_L \frac{U_\phi}{U_\phi - 1050 l_d} \quad (22)$$

Звідси відношення вимірюваного пристроєм захисту опору до опору уставки цього пристрою визначається виразом:

$$\frac{z_z^{(3)}}{z_{уст.}} = \frac{1}{K_{ch} \left( 1 - \frac{1050 \cdot l_d}{U_\phi} \right)} \quad (23)$$

де  $K_{ch}$  - коефіцієнт чутливості дистанційного захисту.

З виразу (23) визначаємо довжину електричної дуги, при якій опір на вході пристрою захисту не перевищує опір уставки пристрою захисту за нерівністю:

$$z_{z1}^{(3)} \leq z_{уст.}$$

$$\text{при } L_g \leq \frac{(K_{ch} - 1) U_\phi}{1050 K_{ch}} \quad (24)$$

або для лінії електропередавання 10 кВ при  $K_{ch} = 1,5$ :

$$l_g \leq 1,93 K_u$$

де  $K_u \leq \frac{U_\phi}{U_{ФН}}$  - відношення фазної напруги в місці встановлення пристрою захисту при короткому замиканні до номінального.

Похибка, що вноситься у вимірювання пристроєм захисту перехідним опором дуги з урахуванням (22) рівна:

$$\delta_{g1}^{(3)} \% = \frac{z_z - z_l}{z_l} \times 100 = \frac{1050 - L_g}{U_\phi - 1050 L_g} \times 100, \quad (25)$$

Для ліній електропередавання 10 кВ вираз (25) може мати вигляд:

$$\delta_{g1}^{(3)} \% = \frac{l_g}{\frac{10}{\sqrt{3}} K_u - l_g} 100. \quad (26)$$

Вираз (26) визначає похибку вимірювання опору дистанційним пристроєм захисту, підключеним на  $U_L$  і  $I_L$ , котра вноситься перехідним опором при трифазному короткому замиканні в залежності від довжини дуги і відносної величини зниження напруги в місці встановлення пристрою захисту (рис.4).

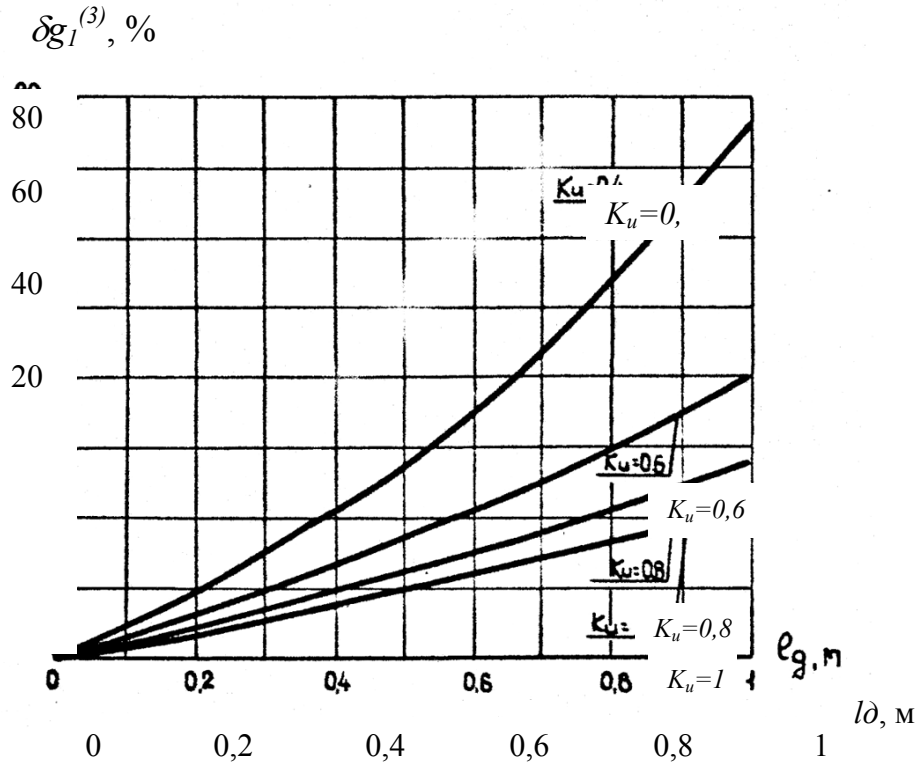


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання опору електричної дуги пристроєм захисту від довжини цієї дуги  $l_d$  і відносного зниження напруги  $K_u$ .

При  $l_d=1$  м і зміні  $K_u$  від 0,6 до 0,9 похибка вимірювання опору становить від 24% до 41%.

Довжина електричної дуги в момент спрацьовування дистанційного захисту з витримкою часу може бути визначена з емпіричної формули:

$$t = -\ln 0.25 \left( 5 - \frac{l}{l_0} \right), \quad (27)$$

де  $t$  - час досягнення дугою довжини  $l$ ;

$l_0$  - початкова довжина дуги (або відстань між електродами).

З виразу (27) видно, що гранична кратність довжини дуги може становити  $l/l_0=5$ . Відповідно до результатів експериментального дослідження відкритої електричної дуги, до моменту її гасіння кратність подовження дуги по відношенню до відстані між електродами змінюється в межах 3...6.

Для ліній електропередавання 10 кВ, виконаних на залізобетонних опорах, в найбільш небезпечних і частих перекриттях ізоляції на опорі, максимальна довжина дуги може досягати 1 м. Тому в таких лініях для оцінки величини похибки від впливу перехідного опору ( $\delta_1^{(3)}$ ) доцільно приймати довжину дуги в межах  $l_d=0...1$  м.

Пониження напруги відносно номінальної в місці встановлення захисту ( $K_U$ ) при «металевому» короткому замиканні визначається співвідношенням

опорів попередньої  $Z_p$  і захищеної  $Z_z$  ділянок:

$$K_U = \frac{1}{\frac{Z_p}{Z_z + R_p + 1}}. \quad (28)$$

За даними [1,2], відношення опорів  $Z_p/Z_z$  для найбільш віддаленої точки більшості ліній електропередавання знаходяться в межах 0,16...0,9 - для захистів головної ділянки і в межах 0,26...1,24 - для захистів, встановлених на пунктах резервування. Цим значенням відповідає  $K_U=0,5...0,9$ .

З виразу (28) очевидно, що наявність перехідного опору в місці пошкодження впливає на величину  $K_U$  в бік збільшення, тому для оцінки похибки вимірювання опору дистанційного пристрою захисту величину  $K_U$  слід приймати в межах  $K_U=0,6...0,9$ .

Відповідно виразу (26), при  $l_d=1$  м і зміні  $K_U$  в межах 0,6...0,9 похибка вимірювання опору знаходиться в межах 24...41%.

З виразу (23) можна визначити коефіцієнт чутливості, при якому забезпечується спрацювання дистанційного захист при максимальній довжині електричної дуги:

$$K_{ч1} \geq \frac{U_\phi}{U_\phi - I_{g\max} \times 1050'} \quad (29)$$

Для ліній електропередавання 10 кВ:

$$K_{ч1}^{(3)} \geq \frac{K_u}{K_u - \frac{\sqrt{3}}{10} \times I_{g\max}} \quad (30)$$

У режимі двофазного короткого замикання захистом, яка підключається на лінійну напругу і різницю струмів пошкоджених фаз, вимірюється опір (рис.3):

$$Z_{z1}^{(2)} = \frac{(I_b - I_c)Z_L + I_{bk}2}{(I_b - I_c)} R_p = Z_L + 2R_p \frac{I_{bk}}{I_b - I_c}, \quad (31)$$

або

$$Z_{z1}^{(2)} = Z_L + 2R_p \frac{I_{bk}}{2I_{bk} + (I_{bn} - I_{cn})}, \quad (32)$$

При  $R_n = 0$   $Z_{z1}^{(2)} = Z_L$

При  $I_{bH} = I_{cH} = 0$

$$Z_{z1}^{(2)} = Z_L + R_p \quad (2-42)$$

**Висновки.** Науковою цінністю дослідження є отримані співвідношення для оцінювання величин основних параметрів, котрі характеризують точність і надійність вимірювання опору пошкодженої ділянки лінії пристроями дистанційного захисту при підключенні їх за обома схемами:

- похибку вимірювання;
- мінімальне значення коефіцієнта чутливості і максимальну довжину дуги, при котрих  $Z_{vum} < Z_{ust}$ .

При змінах  $K_u$  в межах 0,6...0,9, максимальна довжина електричної дуги, при котрій забезпечується спрацювання захисту, перевищує 1 м, що трапляється найчастіше і це небезпечно для ліній 10 кВ на залізобетонних опорах. Це підтверджує доцільність застосування в розгалужених, резервованих лініях та в лініях з РДГ мережах дистанційного захисту повного опору.

Отримані результати дослідження показали наступне:

- похибки вимірювання опору пристроями дистанційного захисту для віддалених коротких замикань при  $l_d=1$  м і  $K_u=0,6...0,9$  знаходяться в межах 24...41% при трифазному короткому замиканні для обох розглядуваних схем;

- при віддалених симетричних замиканнях через перехідний опір і  $K_{ch}=1,5$  забезпечується спрацювання дистанційного захисту.

Струми навантаження ліній електропередавання зменшують величину опору вимірювану пристроєм дистанційного захисту, компенсуючи збільшення вимірювання, що обумовлене перехідним опором. Тому для останньої схеми вплив струмів навантаження призводить до зменшення додатної похибки вимірювання і появи від'ємної похибки при певних співвідношеннях  $l_d$ ,  $K_u$  та відносній величині струму навантаження  $\alpha$ .

Особливості параметрів, режимів роботи і умов експлуатації розгалужених секціонованих ліній з джерелами розподіленої генерації обумовлюють необхідність розробки для цих ліній спеціальних дистанційних захистів з дистанційним пуском і залежною від опору петлі короткого замикання витримкою часу.

Практичною цінністю роботи є виконаний аналіз параметрів і режимів роботи таких ліній і визначення характеристики захисту, зокрема:

- межі регулювання опору спрацювання - (0,1...8) Ом;
- межі регулювання часу спрацювання в кінці зони захисту – 1...6 с;
- струм точного спрацювання - 4 А при уставці 0,4 Ом/фазу;
- вимоги до лінійності часових характеристик та межі невизначеності характеристик захисту.

Отримані результати рекомендується використовувати при налагодженні дистанційного захисту ліній 6...20 кВ з джерелами розподіленої генерації та резервним живленням.

Аналіз роботи дистанційного захисту при різних видах замикань показав, що в електричних мережах з джерелами розподіленої генерації доцільно застосовувати схеми дистанційного захисту з контролем лінійних напруг і різниці фазних струмів. Для захисту таких ліній від подвійних замикань на землю застосовувати окремий захист, а у разі його відсутності - приєднання основного захисту на лінійні напруги і фазні струми.

Ефективність роботи дистанційного захисту повного опору доцільно оцінювати за максимальною довжиною електричної дуги, котра визначається зниженням напруги в місці встановлення захисту при відповідному коефіцієнті чутливості захисту.

В розглянутих лініях електропередавання максимальна довжина дуги, при котрій спрацьовує захист при віддалених замиканнях, перевищує величину 1 м, що підтверджує ефективність дистанційних захистів повного опору.

Слід зазначити, що струми навантаження дещо зменшують «додатну» похибку вимірювання опору, обумовлену перехідним опором дуги, і можуть збільшити «від'ємну» похибку і, як наслідок, викликати неселективне спрацювання захисту.

#### Список використаної літератури:

1. Voloshyn Semen, Omelchuk Anatolii, Tarasiuk Oleh, Titova Liudmyla and Gumenyuk Yuriy. Simulation of criteria for selection of remote protection settings with remote starting in lines with distributed sources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1030, Issue 1. P. 012179. doi: 10.1088/1757-899X/1030/1/012179.
2. Omelchuk A. O., Voloshin S. M., Tarasyuk O. I. Vdoskonalennya sposobiv vikonannya zahistiv linii zv'yazku z pidstantsiyami rozoseredzhenih dzherel generatsiyi. *Energetika I avtomatika*. 5. 2019. P. 107-115.
3. Grebchenko M. V., Eromenko E. V. Shvidkodiyuchiy adaptivniy zahist vid korotkih zamikan v elektrichnih merezhah microgrid z rozpodilenoju generatsiyu. *Tehnichna elektrodinamika*. 2021. 1.
4. Kirilenko O. V., Pavlovskiy V. V., Luk'yanenko L. M. Tehnichni aspekti vprovadzhennya dzherel rozpodilenoju generatsiyi v elektrichnih merezhah. *Tehnichna elektrodinamika*. 2011. 1. P. 46-53.

#### Referenses:

1. Voloshyn S., Omelchuk A., Tarasiuk O., Titova L. and Gumenyuk Y. Simulation of criteria for selection of remote protection settings with remote starting in lines with distributed sources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1030, Issue 1. P. 012179. doi: 10.1088/1757-899X/1030/1/012179.
2. Omelchuk A. O., Voloshin S. M., Tarasyuk O. I. Vdoskonalennya sposobiv vikonannya zahistiv linii zv'yazku z pidstantsiyami rozoseredzhenih dzherel generatsiyi. *Energetika I avtomatika*. 5. 2019. P. 107-115.
3. Grebchenko M. V., Eromenko E. V. Shvidkodiyuchiy adaptivniy zahist vid korotkih zamikan v elektrichnih merezhah microgrid z rozpodilenoju generatsiyu. *Tehnichna elektrodinamika*. 2021. 1.
4. Kirilenko O. V., Pavlovskiy V. V., Luk'yanenko L. M. Tehnichni aspekti vprovadzhennya dzherel rozpodilenoju generatsiyi v elektrichnih merezhah. *Tehnichna elektrodinamika*. 2011. 1. P. 46-53.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2022 р.