

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕУ НА ВЕЛИЧИНУ СТРУМУ МІЖФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ЧЕРЕЗ ЕКРАНИ КАБЕЛІВ МЕРЕЖІ ВЕС НАПРУГОЮ 10–35 кВ

Р.О.Буйний^{1*}, канд.техн.наук, І.В. Діхтярук^{1**}, канд.техн.наук, А.В. Красножон¹, канд.техн.наук, А.О.Квицинський², канд.техн.наук

¹Чернігівський національний технологічний університет,

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна,

e-mail: buinyroman@gmail.com,

²НПЦР ОЕС України НЕК «Укренерго»,

вул. Дорогожицька, 11/8, Київ, 04112, Україна

Розглянуто принцип розрахунку струмів подвійного короткого замикання на землю на ділянці кабельної лінії електропередавання, що з'єднує два джерела електричної енергії, одним з яких може бути генератор або група генераторів вітрової електричної станції, а другим – енергосистема. Показано, що в екранах кабелів під час подвійного короткого замикання на землю, яке є розрахунковим видом замикання, за яким мають вибиратися перерізи екранів, буде спостерігатися накладання струмів від обох джерел. Це свідчить про необхідність обов'язкового врахування усіх джерел живлення під час розрахунку струму подвійного короткого замикання на землю з метою подальшого вибору перерізів екранів. Досліджено вплив параметрів електричної мережі на величину струму подвійного короткого замикання на землю та встановлено, що він вплив є незначним, окрім співвідношення надперехідних струмів трифазного короткого замикання з обох боків кабельної лінії. У випадку заземлення екранів кабелів з одного боку кабельної лінії весь струм подвійного короткого замикання на землю буде протікати через екран однієї жили, що викличе необхідність суттєвого збільшення перерізу екранів. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: кабельна лінія, екран кабелю, струм подвійного короткого замикання на землю.

Вступ. Останнім часом в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України зростає кількість вітрових електростанцій (ВЕС). Це пов'язано з тим, що на державному рівні запроваджено так звані «зелені» тарифи на електричну енергію, вироблену електростанціями, що використовують поновлювані види енергоресурсів. Особливий інтерес у інвесторів викликають потужні ВЕС, які складаються з вітроенергетичних установок (ВЕУ) одиничної потужності 1,5-5,5 МВт. Такі ВЕУ зазвичай збираються у групи та приєднуються до шин 10-35 кВ підвищувальних підстанцій в ОЕС України, а кожна група складається з послідовно з'єднаних у мережу ВЕУ.

Для забезпечення максимально можливої генерації електричної енергії генератори ВЕУ розташовують на висоті понад 80 м за відстані між баштами понад 200 м, що вимагає значної території, здебільшого сільськогосподарського призначення. Для можливості використання території за своїм прямим призначенням ВЕУ мають з'єднуватися в мережу кабельними лініями (КЛ).

Вирішенню ряду проблем, пов'язаних з улаштуванням КЛ з ізоляцією зі зшитого поліетилену, присвячено багато робіт, зокрема [1-5], проте жодна з них не розглядає КЛ, що зв'язують декілька джерел електричної енергії.

Мета статті. Вирішення проблеми вибору перерізів екранів кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, які з'єднують потужні ВЕУ в мережі ВЕС та приєднують їх до енергосистеми.

Основні матеріали дослідження. Вибір перерізів жил кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену та їх екранів має виконуватися відповідно до вимог діючих нормативних

документів. Зазвичай проблем з вибором перерізів жил кабелів, що з'єднують ВЕУ, не виникає. Проте під час вибору перерізу струмовідного екрана кабелю на напругу 10-35 кВ необхідно враховувати струм подвійного короткого замикання (КЗ) на землю, яке відбувається у двох місцях: 1) у з'єднувальній (кінцевій) муфті з одного боку ділянки КЛ (в одній фазі); 2) та з'єднувальній (кінцевій) муфті з іншого боку ділянки КЛ (в іншій фазі). Вихідна розрахункова однолінійна схема зі вказаними точками замикання на землю зображена на рис. 1, обидва джерела живлення представлено генераторами з нескінченно великими потужностями та внутрішніми опорами Z_{ki} та Z_{kj} , що еквівалентно

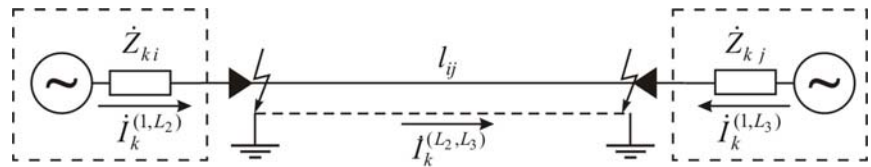


Рис. 1

представленню симетричними потужностями S''_{ki} та S''_{kj} , або струмами I''_{ki} та I''_{kj} трифазного КЗ. Замикання відбувається у фазі В зліва – струм від джерела $I_k^{(1,L_2)}$, та у

фазі С справа – струм від джерела $I_k^{(1,L_3)}$. Оскільки опір мідного екрана кабелю, що з'єднує ВЕУ, набагато менший, ніж сумарний опір розтікання двох заземлюючих пристроїв, то під час подальших міркувань прийнято, що увесь струм подвійного замикання $I_k^{(L_2,L_3)}$ протікає через екран кабелю.

Внутрішні опори джерел живлення можуть бути розраховані за формулами:

$$\left. \begin{aligned} Z_{ki} &= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} I''_{ki}} = \sqrt{r_{ki}^2 + x_{ki}^2} = \sqrt{r_{ki}^2 + (n_i \cdot x_{ki})^2} = r_{ki} \cdot \sqrt{1 + n_i^2}; \\ Z_{kj} &= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} I''_{kj}} = \sqrt{r_{kj}^2 + x_{kj}^2} = \sqrt{r_{kj}^2 + (n_j \cdot x_{kj})^2} = r_{kj} \cdot \sqrt{1 + n_j^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де c – коефіцієнт напруги (визначається відповідно до ДСТУ ІЕС 60909:2007); U_n – номінальна лінійна напруга; r_{ki} , r_{kj} , x_{ki} , x_{kj} – еквівалентні активні та реактивні опори i -го та j -го джерел живлення; n_i , n_j – співвідношення між реактивним та активним опорами еквівалентних джерел.

Величину струму подвійного КЗ на землю $I_k^{(L_2,L_3)}$ (через екран кабелю) у схемі, зображеній на рис. 1, можна розрахувати методом контурних струмів, представивши її у вигляді, зображеному на рис. 2. КЛ на схемі представлена активним r_{ij} та індуктивним x_{ij} опорами жили та активним опором екрана r_{scrij} , а еквівалентні джерела мають симетричні синфазні фазні ЕРС прямої послідовності: E_{iL_1} , E_{iL_2} , E_{iL_3} та E_{jL_1} , E_{jL_2} , E_{jL_3} .

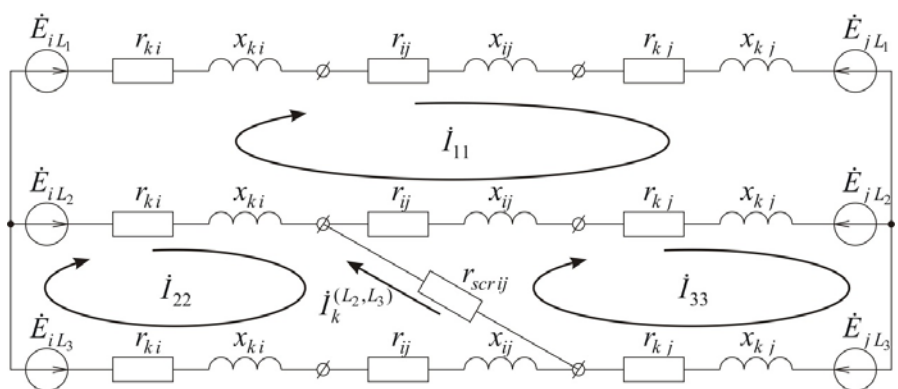


Рис. 2

Для спрощення подальших міркувань прийнято, що номінальні лінійні напруги джерел рівні $U_{ni} = U_{nj} = U_n$, тобто $E_{iL_1} = E_{jL_1}$, $E_{iL_2} = E_{jL_2}$, $E_{iL_3} = E_{jL_3}$.

Для вибору перерізу екрана кабелю необхідно знати величину струму подвійного КЗ на землю, а для розрахунку струму – опір (переріз) екрана, який ще не вибраний. Тому дану задачу можна розв'язати як мінімум за дві ітерації: 1) за мінімально можливого перерізу

екрана для вибраного раніше перерізу жили розраховується величина струму КЗ та вибирається необхідний переріз екрана; 2) за вибраним перерізом екрана розраховується уточнена величина струму КЗ та вибраний переріз перевіряється на термічну стійкість.

Опір екрана трижильних кабелів r_{scrij} визначається довжиною ділянки КЛ та погонним значенням опору, яке наводиться в каталогах заводів-виробників кабельної продукції. Для випадку застосування одножильних кабелів, у яких екрани заземлено з двох боків, як r_{scrij} у розрахункові формули слід підставляти еквівалентний опір трьох екранів кабелів, включених паралельно, тобто $r_{scrij}/3$.

Контурні струми I_{11} , I_{22} , та I_{33} , зображені на рис. 2, можуть бути отримані як розв'язок системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} I_{11} \cdot 2 \cdot (Z_{ki} + Z_{kj} + Z_{ij}) - I_{22} \cdot Z_{ki} - I_{33} \cdot (Z_{kj} + Z_{ij}) &= E_{iL_1} - E_{iL_2} - E_{jL_1} + E_{jL_2}; \\ -I_{11} \cdot Z_{ki} + I_{22} \cdot (2 \cdot Z_{ki} + Z_{ij} + r_{scrij}) - I_{33} \cdot r_{scrij} &= E_{iL_2} - E_{iL_3}; \\ -I_{11} \cdot (Z_{kj} + Z_{ij}) - I_{22} \cdot r_{scrij} + I_{33} \cdot (2 \cdot Z_{kj} + Z_{ij} + r_{scrij}) &= -E_{jL_2} + E_{jL_3}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а струм подвійного замикання на землю розрахований за формулою:

$$I_k^{(L_2, L_3)} = I_{33} - I_{22}. \quad (3)$$

Для випадку застосування одножильних кабелів, у яких екрани заземлені з обох боків, струм через екран одного кабелю буде дорівнювати:

$$I_{scrij} = \frac{I_k^{(L_2, L_3)}}{3}. \quad (4)$$

Для прикладу був розрахований струм подвійного замикання на землю через екрани трьох одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену 1×400/35, довжиною 1 км ($Z_{ij} = 0,033 + j0,046$ Ом, $r_{scrij} = 0,223/3$ Ом). Прийнято, що ЕРС у однойменних фазах обох еквівалентних джерел живлення синфазні та складають $35/\sqrt{3}$ кВ, а внутрішні опори джерел представлено тільки індуктивними опорами $Z_{ki} = j1,622$ Ом і $Z_{kj} = j8,3$ Ом. Підставивши величини параметрів кабелю і джерел у систему рівнянь (2), можна отримати:

$$\begin{cases} I_{11} = 0,02012 - j0,01328 \text{ кА}; \\ I_{22} = -10,61409 - j0,40050 \text{ кА}; \\ I_{33} = 2,11053 + j0,05431 \text{ кА}. \end{cases}$$

Згідно з (3) струм подвійного замикання на землю буде складати

$$I_k^{(L_2, L_3)} = 12,72462 + j0,45482 \text{ кА},$$

а його модуль – $I_k^{(L_2, L_3)} = 12,73$ кА. Відповідно до (4) струм в екрані кожного кабелю КЛ буде складати 4,24 кА.

У разі неврахування одного з джерел під час розрахунку, зазвичай менш потужного, еквівалентний струм подвійного замикання на землю буде складати 10,63 кА, а струм через екран кожної фази – 3,54 кА, що менше за точне значення в 1,2 раза (за вихідних даних, наведених у прикладі).

З вищенаведеного випливає, що контурні струми, викликані еквівалентними джерелами з обох боків КЛ, будуть накладатися в екрані кабелю, що вказує на необхідність обов'язкового врахування другого джерела під час розрахунку струмів подвійного КЗ задля подальшого вибору екрана кабелів.

Отримані аналітично величини було перевірено шляхом моделювання в пакеті MATLAB Simulink. Для приведення моделі в MATLAB Simulink до прийнятого припущення про те, що весь струм подвійного замикання буде протікати через екран кабелю, опір їх заземлюючих пристроїв був прийнятий рівним 100 кОм (див. рис. 3).

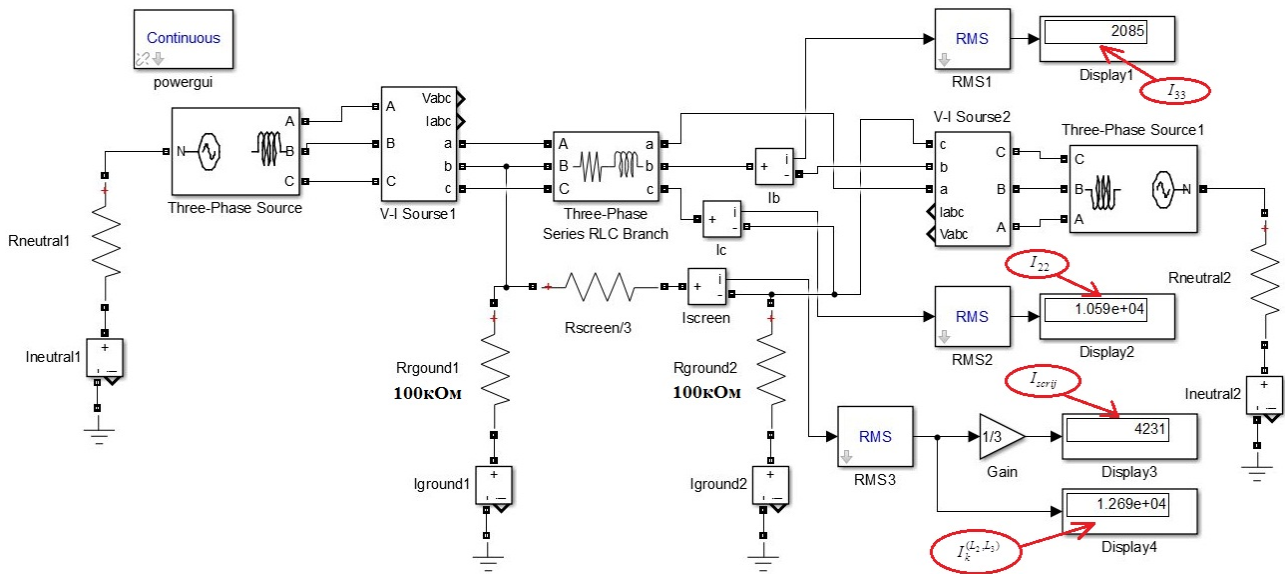


Рис. 3

З рис. 3 видно, що струм через екран кабелю майже співпадає з отриманим аналітично, що підтверджує адекватність запропонованого принципу аналітичного розрахунку струму подвійного КЗ через екран (екрани) кабелів.

Шляхом моделювання також була отримана величина струму через екран (екрани) кабелів у випадку, коли опір розтікання їх заземлюючих пристроїв складає 10 Ом – 4,216 кА. З вищезазначеного випливає, що величина струму подвійного замикання на землю практично не залежить від опорів заземлюючих пристроїв.

Оскільки розрахунок струмів подвійного КЗ на землю з урахуванням двох джерел живлення суттєво ускладнює розрахунки, проведено дослідження впливу параметрів електричної мережі на величини струмів, отриманих з урахуванням двох джерел живлення (з обох боків КЛ) і тільки одного – більш потужного.

Відносна похибка δ між точним діючим значенням струму через екран кабелю $I_{scr ij}$ та розрахованим наближено (без урахування менш потужного джерела) $I'_{scr ij}$ буде визначатися:

$$\delta = \frac{I_{scr ij}}{I'_{scr ij}} \tag{5}$$

Величини струмів $I_{scr ij}$ та $I'_{scr ij}$ є функціями багатьох змінних, зокрема

$$\left. \begin{aligned} I_{scr ij} &= f(I''_{ki}, n_i, I''_{kj}, n_j, F, F_{scr}, l); \\ I'_{scr ij} &= f(I''_{ki}, n_i, F, F_{scr}, l), \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

де F, F_{scr} – перерізи жили та екрана кабелю відповідно; l – довжина ділянки КЛ між двома еквівалентними джерелами живлення.

Дослідження впливу параметрів електричної мережі на величину похибки δ показали, що вона практично не залежить від перерізів жил та екранів кабелів, а також від співвідношення між реактивним та активним внутрішніми опорами основного джерела живлення та довжини ділянки КЛ.

Найбільший вплив на величину похибки δ має співвідношення діючих симетричних струмів трифазного КЗ на шинах кожної із еквівалентних систем – I''_{ki} та I''_{kj} . Залежності такого виду зображено на рис. 4.

Аналіз діючих значень струмів трифазного КЗ на шинах 10-35кВ електричних мереж операторів систем передачі та систем розподілу в Україні, а також аналогічних струмів КЗ на шинах груп ВЕУ потенціально можливих ВЕС показав, що співвідношення струмів k може змінюватися в діапазоні від 3 до 10. За такої зміни відносна похибка розрахунку струму подвійного КЗ через екрани кабелів δ_k буде змінюватися в діапазоні від 1,33 до 1,1 (рис. 4).

Аналіз вищенаведеного дає змогу зробити такі висновки:

1. Під час подвійних КЗ на землю в екранах кабелів на ділянках КЛ, які з'єднують два джерела електричної енергії, спостерігається накладання струмів від обох джерел. Це свідчить про необхідність урахування всіх джерел живлення під час розрахунку струму подвійного КЗ на землю для подальшого вибору перерізу екранів кабелів.

2. У випадку заземлення екранів кабелів з одного боку весь струм подвійного замикання на землю буде протікати через екран однієї жили, що викличе необхідність суттєвого збільшення перерізу екранів.

3. Для спрощення розрахунків величини струму подвійного КЗ на землю в КЛ мережі ВЕС дозволяється його розраховувати тільки від основного джерела (більш потужного) з подальшим його множенням на коригувальний коефіцієнт, що визначається співвідношенням надперехідних струмів трифазного КЗ з обох боків ділянки КЛ (див. рис. 4).

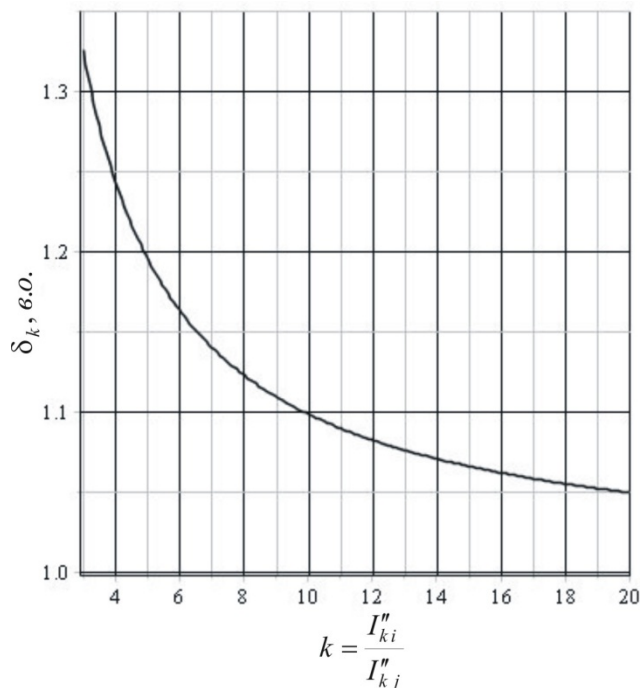


Рис. 4

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Завод энергозащитных устройств, 2008. 54с.
2. Буйний Р.О., Зорін В.В., Квицинський А.О. Щодо визначення критичної довжини кабельної лінії електропередавання. Коментарі та зауваження до глави 2.3 ПУЕ. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2010. №36. С.19–26.
3. Буйний Р.О., Зорін В.В., Квицинський А.О. Розрахунок теплового режиму кабельних ліній, виконаних одножильним кабелем з ізоляцією зі зшитого поліетилену. *Енергетика та електрифікація*. 2011. № 4. С.45–50.
4. Гринченко В.С., Ткаченко А.О., Гринченко Н.В. Повышение точности расчета токов в экранах кабелей при двустороннем замыкании трехфазной кабельной линии. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 2. С.39–42. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.06>
5. Розов В.Ю., Ткаченко А.О., Ерисов А.В., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С.13–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013>

УДК 621.316.11

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЭУ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА МЕЖФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЧЕРЕЗ ЭКРАНЫ КАБЕЛЕЙ СЕТИ ВЭС НАПРЯЖЕНИЕМ 10–35 кВ

Р.А. Буйный¹, канд.техн.наук, И.В. Дихтярук¹, канд.техн.наук, А.В. Красножон¹, канд.техн.наук, А.А. Квицинский², канд.техн.наук

¹Черниговский национальный технологический университет, ул. Шевченка, 95, Чернигов, 14035, Украина, e-mail: buinyroman@gmail.com,

²НПЦР ОЭС Украины НЭК «Укрэнерго», ул. Дорогожицкая, 11/8, Киев, 04112, Украина

Рассмотрен принцип расчета токов двойного короткого замыкания на землю на участке кабельной линии электропередачи, соединяющей два источника электрической энергии, одним из которых может быть

генератор или группа генераторов ветровой электрической станции, а вторым – энергосистема. Показано, что в экранах кабелей во время двойного короткого замыкания на землю, которое является расчетным видом замыкания, по которому должны выбираться сечения экранов, будет наблюдаться наложение токов от обоих источников. Это свидетельствует о необходимости обязательного учета всех источников питания при расчете тока двойного короткого замыкания на землю с целью дальнейшего выбора сечений экранов. Исследовано влияние параметров электрической сети на величину тока двойного короткого замыкания на землю и установлено, что их влияние незначительно, кроме соотношения сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания с обеих сторон кабельной линии. В случае заземления экранов кабелей с одной стороны кабельной линии весь ток двойного короткого замыкания на землю будет протекать через экран одной жилы, что повлечет за собой необходимость существенного увеличения сечения экранов. Библ. 5, рис. 4.

Ключевые слова: кабельная линия, экран кабеля, ток двойного короткого замыкания на землю.

INFLUENCE OF WIND TURBINE GENERATOR ON THE SHORT-CIRCUIT CURRENT BETWEEN PHASES THROUGH CABLE SCREENS OF A WIND FARM IN 10-35 kV POWER NETWORKS

R.O.Buinyi¹, I.V. Dihtyaruk¹, A.V.Krasnozhan¹, A.O.Kvytsynskyi²

¹Chernihiv National University of Technology,
str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine,
e-mail: buinyroman@gmail.com.

²Research & design center for development of the United Energy System of Ukraine PJSC NPC UKRENERGO,
str. Dorohozhytska, 11/8, Kyiv, 04111, Ukraine

Shown the principle for calculation of double-fault ground current on a branch of electric power network with two sources (one of the sources can be a wind electric plant while the other source can be a power line). In cable shields with double ground fault the currents will be from the two sources. Thus, all the sources should be taken into account for calculation the ground fault currents and selection of the cable's shield cross-section. Analyzed the influence of power network specifications on double-fault ground current and shown that such an influence is small, except the correspondence between subtransient currents of triple faults on both sides of the cable power line. In case of grounding the cable shields from one side of the power line, the full current of the double fault will flow through the single-core cable. So, it will require using cables with substantially larger cross-sections. It is found that the dissipation resistance of electric ground of cable shields does not significantly affect the double-fault ground current. References 5, figures 4.

Keywords: cable power line, cable shield, double earth fault current.

1. Dmytryev M.V. Grounding of the shields of single-phase power cables with the voltage 6-500kV. SPb.: Zavod energozashitnyh ustrojstv, 2008. 54 p. (Rus)
2. Buinyi R.O., Zorin V.V., Kvytsynskyi A.O. About definition of critical length of a cable electric power line. Comments and remarks to chapter 2.3 of rules of electric installations. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu Harkivskij politehnicnij institut*. 2010. No 36. Pp.19–26. (Ukr)
3. Buinyi R.O., Zorin V.V., Kvytsynskyi A.O. Calculation of thermal mode of cable lines made by single-core cable with insulation from cross-linked polyethylene. *Energetika ta elektrifikaciya*. 2011. No 4. Pp.45–50. (Ukr)
4. Grinchenko V.S., Tkachenko A.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2017. No 2. Pp.39–42. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.06> (Rus)
5. Rozov V.Yu., Tkachenko A.O., Erysov A.V., Hrynchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tehnicna elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp.13–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013> (Rus)

Надійшла: 28.02.2020

Received: 28.02.2020