

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316.925

DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290941

М.В. Гребченко¹, д-р. техн. наук, ORCID: 0000-0003-0055-9042

І.І. Кирушок¹, магістерка, ORCID: 0009-0000-4693-1642

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ДЕФЕКТОМ ІЗОЛЯЦІЇ АБО З ОДНОФАЗНИМ ЗАМИКАННЯМ НА ЗЕМЛЮ

Запропоновано метод розв'язання системи рівнянь стану електричної мережі з ізольованою нейтраллю, яка створена за результатами вимірювання векторів струмів фаз присідання навантаження і напруг фаз по відношенню до землі, що дозволяє визначати виникнення дефектів ізоляції, в тому числі однофазні замикання на землю, а також визначати відстань до місця однофазного замикання на землю. У відомій системі рівнянь стану електричної мережі додатково враховано параметри подовженого опору фаз лінії, які складаються з опору до точки замикання й опору за точкою замикання фази на землю. За рахунок спрощення схема заміщення з додатковими опорними фазами лінії перетворюється у точно таку ж схему, як й схема без врахування опорів фаз лінії, завдяки чому визначення опору лінії до точки замикання виконується за допомогою відомого алгоритму. На математичній моделі вузла мережі проведена оцінка точності визначення відстані до точки замикання. Встановлено, що до основних факторів впливу на точність відносяться співвідношення значень ємнісної провідності лінії та мережі, відстань до місця замикання, а також опір в місці замикання. У разі використання автоматичної корекції похибка визначення відстані до точки замикання з опором 0,1 Ом не перевищує 0,9% майже на всій довжині лінії. Запропоновані аналітичні вирази для визначення провідності ізоляції та відстані до локального дефекту ізоляції. Наведено елементи алгоритму визначення відстані до місця локального дефекту ізоляції і результати оцінки точності метода для особового випадку замикання фази на землю, у якому не враховується перехідний опір у місці замикання. Автоматичний вибір замикань з низьким опором в місці замикання забезпечується за рахунок перевірки значення визначеного активного опору, а також перевірки напруги пошкодженої фази по відношенню до землі.

Ключові слова: система рівнянь стану, замикання на землю, розрахунок, відстань, параметри режиму

Часто стан електричного обладнання оцінюється за результатами вимірювання безпосередньо значень струмів, напруг та інших параметрів режиму тільки для однієї фази. Наявність значень векторів струмів та напруг для трьох фаз надає можливість створення більш повної моделі елемента електричної системи. Розв'язання такої системи рівнянь стану електричної мережі дозволяє одночасно визначати виникнення дефектів ізоляції, замикань фази на землю і відстані до локальних дефектів ізоляції, а також визначати виникнення міжфазних коротких замикань.

В мережі з ізольованою нейтраллю проблема забезпечення точності визначення відстані до точки замикання на землю обумовлена незначними значеннями струму замикання фази на землю, а також наявністю перехідного опору в місці замикання. Зазвичай відстань до місця замикання визначається за результатами розрахунку опору ділянки лінії до цього місця. Взагалі, із-за відсутності необхідності швидкого вимкнення обладнання із замиканням на землю, часу для відшукування місця пошкодження майже завжди достатньо.

Разом з тим для обмеження впливу перенапруг на ізоляцію мережі, які виникають на початковій стадії замикання фази, необхідно забезпечити швидке вимкнення пошкодженого присідання. В першу чергу це стосується мереж з кабелями із зшитого поліетилену, якщо відсутні інші заходи обмеження перенапруг.

Відомий метод [1] забезпечує визначення появи замикання та значення опору дефекту ізоляції на підставі розв'язання ітераційним методом системи рівнянь стану мережі, створеної за результатами вимірювання векторів параметрів режиму. Відповідно до методу на рис.1 наведена схема заміщення

приєднання навантаження. Вектори фазних струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ та напруг фаз $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ по відношенню до землі відповідають режиму роботи приєднання.

Для режиму роботи приєднання система струмів фаз:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AI} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AL} \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BI} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BL} \\ \dot{I}_C &= \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CI} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CL} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\underline{Y}_{AL}, \underline{Y}_{BL}, \underline{Y}_{CL}$ і $\underline{Y}_{AI}, \underline{Y}_{BI}, \underline{Y}_{CI}$ - відповідно поздовжні і поперечні провідності приєднання.

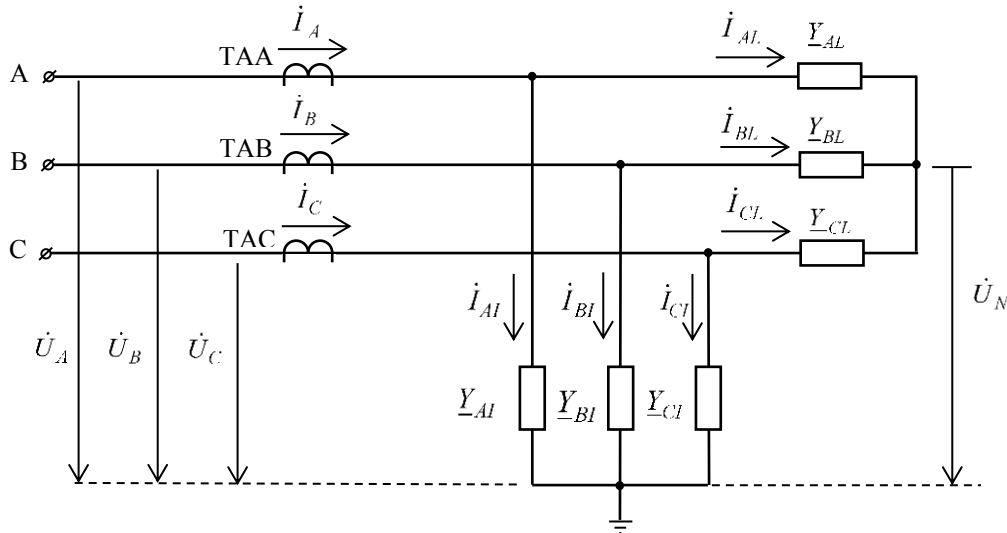


Рисунок 1 - схема заміщення приєднання навантаження

Наприклад у окремому випадку, у якому значення поздовжньої провідності трьох фаз навантаження рівні між собою $\underline{Y}_{AL} = \underline{Y}_{BL} = \underline{Y}_{CL}$, а провідності ізоляції двох фаз однакові $\underline{Y}_{AI} = \underline{Y}_{CI}$, із системи (1) для замикання фази B провідність ізоляції фази A:

$$\underline{Y}_{AI} = \frac{\dot{I}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)}{\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{U}_C \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)} \quad (2)$$

Але метод [1] не дозволяє визначати відстань до точки замикання, а у загальному випадку для розв'язання системи рівнянь стану ітераційними методами може знадобитись певний час.

В розглянутому в [2] способі пошуку пошкодження в електричній системі, яка розподілена на складові частини, використовуються фазові змінні, якими в момент пошуку є контрольовані параметри. Цей спосіб дозволяє визначати тільки елемент мережі, в якому виникло замикання, а в результаті обходу лінії визначається місце пошкодження. Дистанційний метод визначення відстані до місця замикання на землю [2] шляхом накладання на електричну мережу високочастотного сигналу застосовується тільки на відключеній лінії й в ньому виникає необхідність у застосуванні заходів з підвищення точності.

Спосіб [3], заснований на контролі стоячих хвиль, забезпечує визначення відстані до місця замикання з похибкою від 1% до 3,5%, але для його застосування необхідно вимикати повітряну лінію.

Способи [4-6] дозволяють визначати відстань до місця замикання, але в них або не враховуються параметри режиму [4,6] або не враховуються ємнісні провідності [5].

Спосіб визначення відстані до місця пошкодження [7], заснований на контролі параметрів режиму і параметрів мережі, призначений для активних розподільних мереж з відновлюваними джерелами, тобто для мережі з декількома джерелами живлення.

Таким чином, розглянуті відомі методи визначення відстані до точки однофазного замикання на землю не завжди забезпечують малий час, або призначені для використання тільки для певних електричних мереж.

Метою роботи є створення швидкодіючого методу визначення відстані до місця замикання на землю із низьким опором в місці замикання на підставі розв'язання системи рівнянь стану мережі.

Для розроблення методу запропоновано використовувати параметри режиму пошкодженого приєднання і схему заміщення цього приєднання (рис.1) з врахуванням поздовжнього опору лінії.

Вважається що будь яке приєднання складається з лінії (повітряної або кабельної) і навантаження.

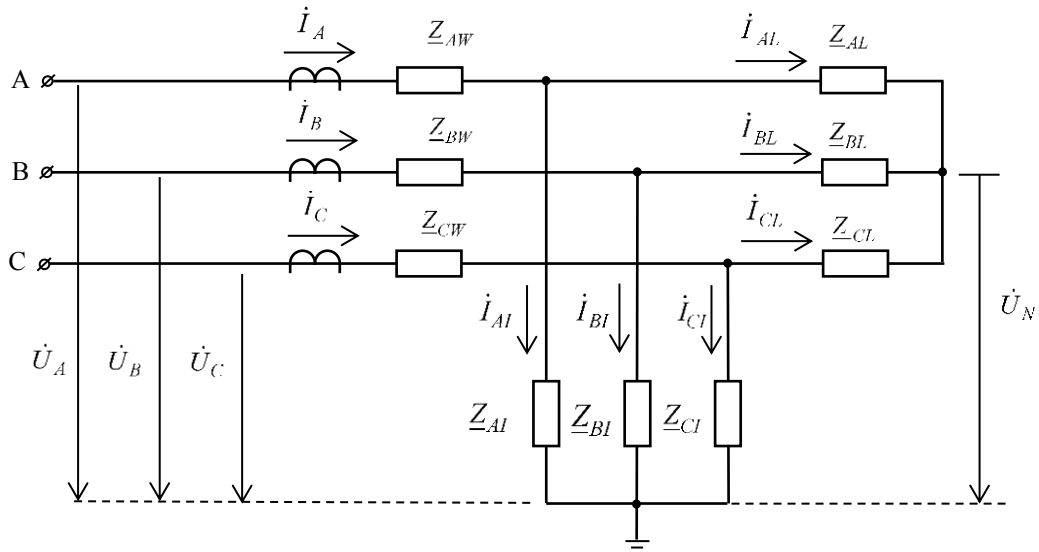


Рисунок 2 - схема заміщення приєднання навантаження з урахуванням параметрів лінії W

Розглянемо схему заміщення приєднання, яка складається з схеми заміщення лінії та навантаження. З метою спрощення схеми заміщення приєднання навантаження скористуємось для лінії Т-подібною схемою заміщення. Елементи схеми введені їх опорами.

Додавання в схему заміщення (рис.1) опору фаз ліній дає можливість визначати опір частини лінії – тобто опір до точки замикання, наприклад, Z_{AW}^* , у фазі A. У цьому випадку друга частина опору фази лінії Z_{AW}^{**} враховується в Z_{AL} :

$$Y_{AW} = \frac{1}{Z_{AW}^* + Z_{AI}} \quad , \quad (3) \qquad Y_{AL} = \frac{1}{Z_{AW}^{**} + Z_{AL}} \quad , \quad (6)$$

$$Y_{BW} = \frac{1}{Z_{BW}^* + Z_{BI}} \quad , \quad (4) \qquad Y_{BL} = \frac{1}{Z_{BW}^{**} + Z_{BL}} \quad , \quad (7)$$

$$Y_{CW} = \frac{1}{Z_{CW}^* + Z_{CI}} \quad , \quad (5) \qquad Y_{CL} = \frac{1}{Z_{CW}^{**} + Z_{CL}} \quad . \quad (8)$$

Врахування визначень (3) – (8) приводить схему заміщення рис.2 до схеми рис.1, а стан режиму описується тією ж системою рівнянь (1). Вказане перетворення штучне й має тільки часткове теоретичне обґрунтування. Результати перевірки припустимості перетворення наведені в цій статті.

Способи розв’язання системи рівнянь (1) для різних варіантів співвідношення параметрів елементів схеми наведені в [1]. Результатом розв’язання є провідності Y_{AW}, Y_{BW}, Y_{CW} . Для визначення відстані до точки замикання, наприклад, у фазі B треба з формули (4) визначити Z_{BW}^* .

Для окремого випадку, для якого визначена провідність Y_{AW} за формулою (2), провідність у пошкодженій фазі B, з урахуванням перетворень системи (1), отримаємо значення поздовжньої провідності фази B:

$$Y_{BW} = \frac{\dot{U}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot Y_{AW} - \dot{I}_A \cdot (\dot{U}_B - \dot{U}_N) + \dot{I}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)}{\dot{U}_B \cdot (\dot{U}_A - \dot{U}_N)} \quad (9)$$

Практичне значення має визначення відстані до так званих металевих замикань, тобто в формулі (4) Z_{BI} наближається до нуля. Такий розрахунок проведено на математичній моделі повітряної лінії 10 кВ

довжиною 37 км, смісна провідність якої в 10 разів менше за смісну провідність мережі. Результати визначення похибки по відношенню до всієї довжини лінії розрахунку відстані наведені на рис.3.

Недоліком є зростання похибки визначення у разі зростання значення перехідного опору.

Результати досліджень для замикань на землю через перехідний опір 0,1 Ом без корекції та з автоматичною корекцією результату розрахунку значення провідності ізоляції наведено на рис.4. Похибки у кожній точці визначались по відношенню до відстані цієї точки замикання. На першому етапі визначалась провідність за формулою (9), а далі – за формулою (4) визначалось значення активного опору до точки замикання (рис.4, крива -1).

Метод можна застосовувати для визначення відстані не тільки до металевих замикань, а ще у тих випадках, коли відоме значенням опору в місці замикання.

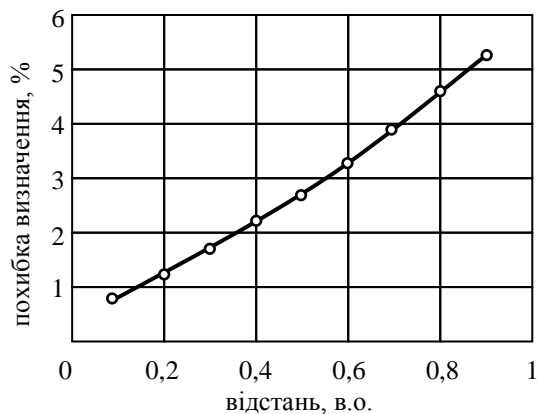


Рисунок 3 - похибка визначення відстані замикання на землю

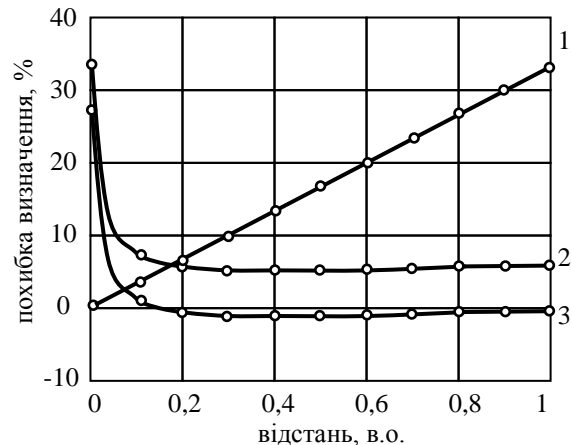


Рисунок 4 - похибка визначення відстані замикання на землю при опорі 0,1 Ом
1 - визначений активний опір лінії, Ом; 2 - похибка визначення відстані без корекції; 3 - похибка визначення відстані з корекцією

Корекція виконувалась з постійним коефіцієнтом незалежно від відстані до точки замикання. З метою зниження похибки при замиканнях на початку лінії необхідно застосувати нелінійну корекцію.

Для забезпечення визначення відстані тільки при замиканнях, які мають опір менше ніж 0,1 Ом, в алгоритмі розрахунків введено дві перевірки: за першою перевіряється не перевищення визначеним опором значення активного опору лінії, а за другою перевіряється не перевищення напругою пошкоджені фази значення максимальної напруги при замиканні в кінці лінії.

Висновки

1. Запропонований метод розв'язання системи рівнянь стану електричної мережі, записаної на підставі плинних значень параметрів режиму, дозволяє визначати відстань до точки замикання на землю з низьким перехідним опором. Введення автоматичної корекції забезпечує значення похибки визначення відстані, яке не перевищує 1% при замиканнях майже вздовж всієї лінії. Застосування методу також дозволяє визначати відстань до замикань з відомим значенням опору в місці замикання.

2. Метод відрізняється від відомих тим, що для його використання не потрібно визначати смісні провідності лінії та мережі або вимірювання струмів нульової послідовності.

3. Розглянуту систему рівнянь стану електричної мережі можна використовувати для визначення не тільки локальних дефектів ізоляції, а також для визначення однофазних замикань на землю і міжфазних коротких замикань.

Список використаної літератури

1. Гребченко М.В. Спосіб безперервного визначення комплексної провідності ізоляції фаз відносно землі електричного приєднання навантаження / Гребченко М.В., Гребченко В.М. Патент на винахід UA № 51177. Україна. №2002010644; Замовл.25.01.2002; надрук. 15.12.2004. Бюл. №12.
2. Кутін В.М. Методи та засоби пошуку пошкоджень в розподільчих мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6-35 кВ: монографія / В.М. Кутін, В.В. Луцяк. – Вінниця: ВНТУ, 2011–160 с.
3. Коваленко Л. Р. Удосконалення методів визначення місць однофазних замикань на землю в мережах 10 та 35 кВ/ Л.Р. Коваленко, О.І.Коваленко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. – 2015. – Вип.15, т. 2. – С. 223-229. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2015_15_2_32
4. Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення відстані до місць однофазних замикань на повітряних лініях. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 4. С. 83-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.083>

5. Гребченко М.В. Спосіб визначення відстані до місця виникнення локального дефекту ізоляції та опору цього дефекту у розподільчих мережах / Гребченко М.В., Бельчев І.В. Патент на винахід UA №100180. Україна. G01R31/08; №а2011 03318; Заявл. 21.03.2011; надрук. 26.11.2012. Бюл. № 22

6. Миронов О.С. Спосіб визначення відстані до місця однофазного замикання на землю або дефекту ізоляції в електричних мережах з ізольованою та компенсованою нейтраллю / Миронов О.С., Дяченко М.Д., Бурлака В.В., Бублик С.К. Пат. 94145 Україна, МПК G 01 R 31/08. Власник – Приазовський державний технічний університет. UA. – №а200908198; заявл. 03.08.2009; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 3.

7. Cesar Orozco-Henao, Arturo Suman Bretas, Juan Marin-Quintero, Andres Herrera-Orozco, Juan Diego Pulgarin-Rivera and Juan C. Velez. Adaptive Impedance-Based Fault Location Algorithm for Active Distribution Networks. Appl. Sci. 2018, 8, 1563; doi:10.3390/app8091563 www.mdpi.com/journal/applsci

M.Grebchenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID: 0000-0003-0055-9042

I. Kyrushok¹, student, ORCID: 0009-0000-4693-1642

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

SOLUTION OF THE SYSTEM OF STATE EQUATIONS OF AN ELECTRICAL NETWORK WITH AN INSULATION DEFECT OR WITH A SINGLE-PHASE GROUND FAULT

A method for solving the system of equations of the state of an electric network with an isolated neutral is proposed, which is created based on the results of measuring the current vectors of the load connection phases and the phase voltages in relation to the ground, which allows to determine the occurrence of insulation defects, including single-phase short circuits to the ground, and also to determine distance to the single-phase ground fault location. In the well-known system of equations of the state of the electrical network, the parameters of the longitudinal resistance of the line phases are additionally taken into account, which consist of the resistance to the shorting point and the resistance beyond the point of shorting the phase to the ground. Due to simplification, the replacement circuit with additional line phase resistances turns into exactly the same circuit as the circuit without taking into account the line phase resistances, due to which the determination of the line resistance to the closing point is performed using a known algorithm. The accuracy of determining the distance to the closing point was evaluated on the mathematical model of the network node. It was established that the main factors affecting accuracy include the ratio of the capacitance values of the line and the network, the distance to the shorting point, as well as the resistance at the shorting point. When using automatic correction, the error in determining the distance to the shorting point with a resistance of 0.1 Ohm does not exceed 0.9% over almost the entire length of the line. Analytical expressions for determining insulation conductivity and the distance to a local insulation defect are proposed. The elements of the algorithm for determining the distance to the location of a local insulation defect and the results of the accuracy assessment of the method for the specific case of a phase-to-ground fault, in which the transient resistance at the fault location is not taken into account, are given. Automatic selection of circuits with low resistance at the point of the circuit is ensured by checking the value of the determined active resistance, as well as checking the voltage of the damaged phase in relation to the ground.

Keywords: system of state equations, ground fault, calculation, distance, mode parameters

References

1. Grebchenko M.V. The method of continuous determination of the complex conductivity of the insulation of the phases relative to the ground of the electrical connection of the load / Grebchenko M.V., Grebchenko V.M. Patent UA No. 51177. Ukraine. No. 2002010644; Order 25.01.2002; imprint 15.12.2004. Bul. No. 12.

2. Kutin V.M. Methods and means of finding damage in distribution networks with overhead power lines with a voltage of 6-35 kV: monograph / V.M. Kutin, V.V. Lutsyak – Vinnytsia: VNTU, 2011–160 p.

3. Kovalenko L., Kovalenko A. Improvement of methods for determining the locations of single-phase earth faults in 10 and 35 kV networks. Bull. 15 Number 2. 2015. - p. 223-229 // Proceedings of the Tavri State Agro-Technological University. Technical sciences. – 2015. – Bull.15, Number 2. – p 223-229. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2015_15_2_32

4. Grebchenko N.V., Maximchuk V.F., Pilipenko J.V. Determination of the distance to the single-phase circuits on overhead lines *Tekhnichna Electrodynamika*, . 2016. - No. 4. – pp.83-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.04.083>

5. Grebchenko N.V. The method of determining the distance to the place of occurrence of a local insulation defect and the resistance of this defect in distribution networks / Grebchenko N.V., Belchev I.V. Patent UA No. 100180. Ukraine. G01R31/08; No. a2011 03318; order 21.03.2011; imprint 26.11.2012. Bul. No. 22

6. Pat. 94145 Ukraine, MPC G 01 R 31/08 (2011.01). Mironov O.S., Dyachenko M.D., Burlaka V.V., Bublik S.K. Azov State Technical University. U.A. - №а200908198; dec. 08/03/2009; publ. 10.02.2010, Bull. Number 3.

7. Cesar Orozco-Henao, Arturo Suman Bretas, Juan Marin-Quintero, Andres Herrera-Orozco, Juan Diego Pulgarin-Rivera and Juan C. Velez. Adaptive Impedance-Based Fault Location Algorithm for Active Distribution Networks. Appl. Sci. 2018, 8, 1563; doi:10.3390/app8091563 www.mdpi.com/journal/applsci

Надійшла: 16.06.2023

Received: 16.06.2023