

СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ ОПОРІВ ТРИФАЗНОГО ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ПОСТАЧАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД АКТИВНОГО ТРИПОЛЮСНИКА

О. В. Корощенко¹, О. М. Рак¹, О. В. Глазєва²

¹Донецький національний технічний університет

²Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація. Отримано умови постачання максимальної потужності у навантаження від активного триполюсника постійного і змінного струму, де триполюсниками змінного струму є трифазні джерела електричної енергії. Запропонований спосіб експериментального визначення внутрішніх опорів трифазного джерела електричної енергії який базується на вимірюванні максимальної активної потужності, що надходить до навантаження. По значенням резистивного та реактивного опорів навантаження при яких отримано максимальну потужність розраховується внутрішній опір трифазного джерела.

Ключові слова: активна потужність, активний триполюсник, пасивний триполюсник, ватметр, внутрішній опір, трифазне джерело, лінійне коло, постійний струм, змінний струм, магазин опорів, індуктивність, ємність.

Вступ.

Питання постачання електричної енергії від активного багатополюсника до пасивного (рис. 1) є важливими і в електроенергетиці, і в техніці зв'язку, а також у багатьох інших випадках.

Умови постачання максимальної потужності від активного двополюсника до пасивного відомі [1, с. 17; 2, с. 22, 129]. Але умови постачання максимальної потужності для випадку триполюсників в літературі не розглянуті.

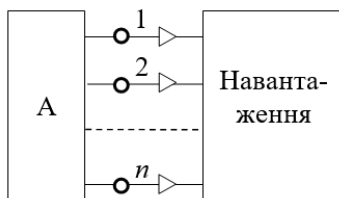


Рис. 1. Вихідна схема

1. Мета і задачі дослідження

Мета роботи - отримання умов постачання максимальної потужності для випадку лінійних триполюсників постійного та змінного струмів, а також обґрунтування способу експериментального визначення внутрішніх опорів трифазного джерела.

2. Матеріали дослідження.

Отримаємо бажані умови для випадку лінійних триполюсників постійного струму.

Будь-який лінійний активний або пасивний триполюсник можна подати еквівалентною схемою із з'єднанням елементів зіркою [3,4]. На рис. 2 показані з'єднані один з іншим активний та пасивний триполюсники постійного струму.

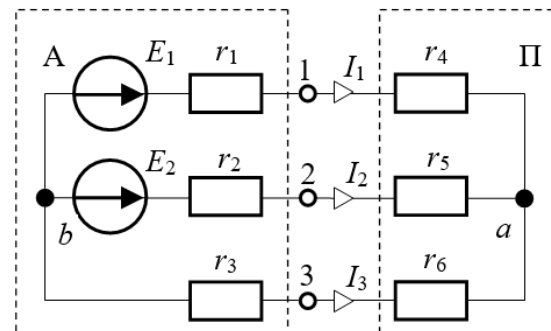


Рис. 2. Розрахункова схема постійного струму

Розрахунок схеми рис. 2 можна виконати методом накладання:

$$I_1 = \frac{E_1 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) - E_2 \cdot (r_3 + r_6)}{B},$$

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) - E_1 \cdot (r_3 + r_6)}{B},$$

$$I_3 = \frac{-E_1 \cdot (r_2 + r_5) - E_2 \cdot (r_1 + r_4)}{B},$$

де

$$B = (r_2 + r_5) \cdot (r_3 + r_6) + (r_1 + r_4) \cdot (r_2 + r_5) + (r_1 + r_4) \cdot (r_3 + r_6).$$

Потужність навантаження

$$P = r_4 \cdot I_1^2 + r_5 \cdot I_2^2 + r_6 \cdot I_3^2 = \frac{A}{B^2},$$

де

$$A = r_4 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) - E_2 \cdot (r_3 + r_6)]^2 + r_5 \cdot [E_2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) - E_1 \cdot (r_3 + r_6)]^2 + r_6 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5) + E_2 \cdot (r_1 + r_4)]^2.$$

Максимум потужності спостерігається за умови, що три часткові похідні дорівнюють нулю:

$$\frac{\partial P}{\partial r_4} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_5} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_6} = 0.$$

Виникає система з трьох рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & \{ [E_1 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) - E_2 \cdot (r_3 + r_6)]^2 + \\ & + 2 \cdot r_5 \cdot E_2 \cdot [E_2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) - E_1 \cdot (r_3 + r_6)] + \\ & + 2 \cdot r_6 \cdot E_2 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5) + E_2 \cdot (r_1 + r_4)] \} \cdot B - \\ & - A \cdot 2 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) = 0, \\ & \{ [E_2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) - E_1 \cdot (r_3 + r_6)]^2 + \\ & + 2 \cdot r_4 \cdot E_1 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) - E_2 \cdot (r_3 + r_6)] + \\ & + 2 \cdot r_6 \cdot E_1 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5) + E_2 \cdot (r_1 + r_4)] \} \cdot B - \\ & - A \cdot 2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) = 0, \\ & \{ 2 \cdot r_4 \cdot [E_1 \cdot (r_2 + r_5 + r_3 + r_6) - \\ & - E_2 \cdot (r_3 + r_6)] \cdot (E_1 - E_2) + \\ & + 2 \cdot r_5 \cdot [E_2 \cdot (r_1 + r_4 + r_3 + r_6) - \\ & - E_1 \cdot (r_3 + r_6)] \cdot (E_2 - E_1) + \\ & + [E_1 \cdot (r_2 + r_5) + E_2 \cdot (r_1 + r_4)]^2 \} \cdot B - \\ & - A \cdot 2 \cdot (r_2 + r_5 + r_1 + r_4) = 0. \end{aligned} \right.$$

Розв'язання системи рівнянь відносно опорів навантаження r_4, r_5, r_6 дає два комплекти відповідей:

$$r_4 = \pm r_1, \quad r_5 = \pm r_2, \quad r_6 = \pm r_3,$$

з яких потрібно залишити лише позитивні значення.

Оскільки опори навантаження дорівнюють внутрішнім опорам джерела, то під час постачання максимальної потужності у навантаження триполюсне джерело працює з ккд 50%. Можна стверджувати і зворотне, якщо джерело працює з ккд 50%, воно постачає у навантаження максимально можливу потужність, а опори віток навантаження дорівнюють опорам відповідних віток джерела.

Розглянемо роботу з навантаженням активного триполюсника змінного струму (рис.3). Тут комплексні опори навантаження дають вже шість

змінних:

$$\underline{z}_4 = r_4 + jx_4, \quad \underline{z}_5 = r_5 + jx_5, \quad \underline{z}_6 = r_6 + jx_6.$$

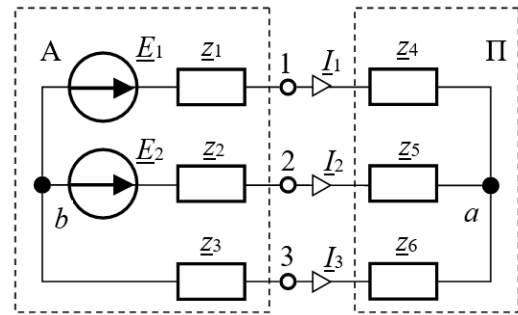


Рис. 3. Розрахункова схема змінного струму

Розрахунок схеми рис. 3 виконується аналогічно випадку, що передувало, але в комплексній формі. Значення активної потужності навантаження:

$$P(r_4, x_4, r_5, x_5, r_6, x_6) = r_4 \cdot I_1^2 + r_5 \cdot I_2^2 + r_6 \cdot I_3^2 = \frac{A}{B^2},$$

де

$$\begin{aligned} A &= r_4 \cdot | \underline{E}_1 \cdot (\underline{z}_2 + r_5 + jx_5 + \underline{z}_3 + r_6 + jx_6) - \\ & - \underline{E}_2 \cdot (\underline{z}_3 + r_6 + jx_6) |^2 + \\ & + r_5 \cdot | \underline{E}_2 \cdot (\underline{z}_1 + r_4 + jx_4 + \underline{z}_3 + r_6 + jx_6) - \\ & - \underline{E}_1 \cdot (\underline{z}_3 + r_6 + jx_6) |^2 + \\ & + r_6 \cdot | \underline{E}_1 \cdot (\underline{z}_2 + r_5 + jx_5) + \underline{E}_2 \cdot (\underline{z}_1 + r_4 + jx_4) |^2, \\ B &= | (\underline{z}_2 + r_5 + jx_5) \cdot (\underline{z}_3 + r_6 + jx_6) + \\ & + (\underline{z}_1 + r_4 + jx_4) \cdot (\underline{z}_2 + r_5 + jx_5) + \\ & + (\underline{z}_1 + r_4 + jx_4) \cdot (\underline{z}_3 + r_6 + jx_6) |. \end{aligned}$$

Значення опорів $r_4, x_4, r_5, x_5, r_6, x_6$, які задовольняють системі рівнянь:

$$\frac{\partial P}{\partial r_4} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_5} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r_6} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x_4} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x_5} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x_6} = 0,$$

були знайдені з використанням комп'ютерної математичної системи Mathcad підбиранням методом покоординатного спуску.

Комплексні опори віток навантаження дорівнюють спряженим значенням опорів відповідних віток джерела:

$$\underline{z}_4 = \underline{z}_1, \quad \underline{z}_5 = \underline{z}_2, \quad \underline{z}_6 = \underline{z}_3.$$

В останньому випадку джерело також працює з ккд 50%.

Розглянемо питання експериментального визначення внутрішніх опорів трифазного джерела, які у подальшому можуть бути використані під час формування еквівалентних схем. З використанням умов постачання максимальної поту-

жності від активного триполюсника змінного струму у навантаження може бути обґрунтований спосіб експериментального визначення внутрішніх опорів трифазного джерела, з'єднаного зіркою.

На рис. 4 подана відповідна схема. Тут $R_A-R_B-R_C$, $L_A-L_B-L_C$, $C_A-C_B-C_C$ – магазини, відповідно, резистивних, індуктивних і ємнісних опорів; W – трифазний двоелементний ватметр.

Задача полягає в тому, щоб, змінюючи параметри фазних опорів навантаження за допомогою відповідних магазинів, добитися максимально можливої активної потужності навантаження (максимум показу трифазного двоелементного ватметра).

Шукані внутрішні комплексні опори фаз джерела будуть дорівнювати спряженим комплексам опорів відповідних фаз навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= R_A + j \cdot (X_{CA} - X_{LA}), \\ \underline{Z}_B &= R_B + j \cdot (X_{CB} - X_{LB}), \\ \underline{Z}_C &= R_C + j \cdot (X_{CC} - X_{LC}). \end{aligned} \quad (1)$$

Пропонується наступний алгоритм підбирання опорів навантаження. Спочатку у кожній фазі кола по черзі за допомогою магазинів реактивних опорів L і C створюється резонанс напруг, виникнення якого визначається за максимумом показів відповідних амперметрів (рис. 4). Далі, регулюючи опір R_A дістають максимум показу ватметра, потім регулюють опір R_B і, нарешті, опір R_C . Повторенням регулювання по черзі опорів $R_A-R_B-R_C$ знов знаходять максимум показу ватметра. Ця операція повторюється, доки максимальне значення перестане збільшуватися. Зняті з магазинів значення опорів дозволяють по формулах (1) визначити шукані внутрішні опори фаз джерела.

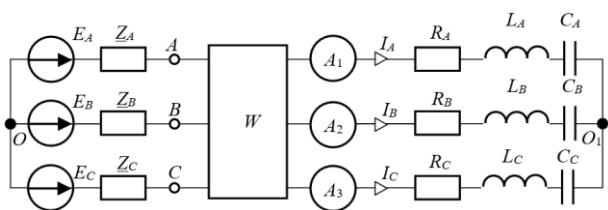


Рис.4. Схема для визначення внутрішніх опорів трифазного трипровідного джерела

Запропонована методика перевірена комп'ютерним моделюванням з використанням математичної системи Mathcad, а також на фізичній моделі, яка була складена на навчально-дослідницькому стенді УІЛС-2.

Комп'ютерне моделювання також підтвердило можливість використання зазначеної вище методики для визначення внутрішніх опорів чо-

типровідного трифазного джерела за схемою рис. 5. У цій схемі використовується трифазний триелементний ватметр.

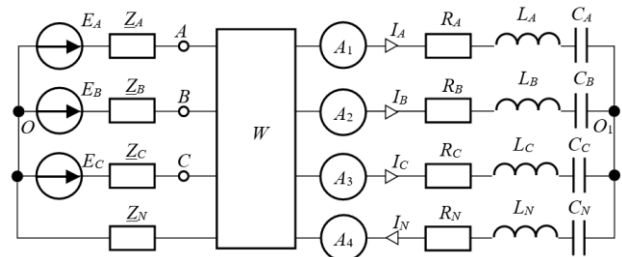


Рис.5. Схема для визначення внутрішніх опорів трифазного чотириввідного джерела

Реальне трифазне джерело має, зазвичай, порівняно малі внутрішні опори, тому під час настроювання фаз у резонанс (перший етап запропонованої методики) струми у колі можуть стати неприпустимо великими. У цьому випадку для обмеження струмів можна скористатися резисторами з відомими опорами R , які вмикаються у лінійні дроти послідовно з опорами $\underline{Z}_A-\underline{Z}_B-\underline{Z}_C$ (рис. 6).

Після експериментального визначення опорів \underline{Z}_A+R , \underline{Z}_B+R , \underline{Z}_C+R треба вирахувати R із отриманих відповідей.

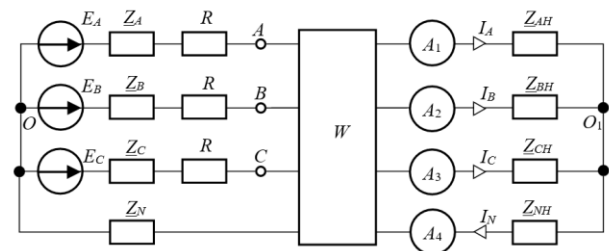


Рис.6. Схема з підключенням опорів струмообмеження

Висновки

Таким чином у роботі було розглянуто триполюсники постійного та змінного струму, де триполюсниками змінного струму є трифазні джерела електричної енергії. Отримані умови постачання максимальної потужності у навантаження від активного триполюсника постійного і змінного струму. У відповідності до отриманих результатів запропоновано новий спосіб експериментального визначення внутрішніх опорів трифазного джерела електричної енергії. Спосіб базується на вимірюванні активної потужності, що надходить до навантаження, причому резистивний і активний опори навантаження регулюються за допомогою магазину резисторів, індуктивностей та ємностей таким чином, щоб отримати максимальну потужність. За цих умов значення резистивного та реактивного опорів наван-

таження визначаються, а по їх значеннях розраховується внутрішній опір трифазного джерела. Надані рекомендації щодо дій у разі малого внутрішнього опору джерела. Порядок дій протягом визначення внутрішнього опору трифазного джерела розписаний у подробицях. Результати перевірені за допомогою комп'ютерного моделювання.

Список використаної літератури

1. Методические указания к выполнению лабораторных работ по теоретической электротехнике [Текст] Ч. I / В. Ф. Денник, В. А. Эсауленко, Н.П. Рыбалко и др. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – 72 с. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/5029>
2. Рыбалко, М. П. Теоретичні основи електротехніки: лінійні електричні кола [Текст]: підруч. / М. П. Рыбалко, В. О. Есауленко, В.І. Костенко – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513с.
3. Фёдоров, М. М. Эквивалентные схемы замещения активных трёхполюсников [Электронный ресурс] / М. М. Фёдоров, А. В. Корощенко, В. Е. Михайлов // Взрывозащищённое электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2011. С. 55–62. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/9095>
4. Фёдоров, М. М. Эквивалентные схемы замещения активных трёхполюсников с синусоидальными источниками питания [Электронный

ресурс] / М. М. Фёдоров, А. В. Корощенко, И. П. Кутковой // Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия «Електротехніка і енергетика» – 2012 – № 1(12)-2(13). С. 245–249. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/30502>

References

1. Methodical instructions for the performance of laboratory works on theoretical foundation of electrical engineering. Part. I / V. Dennik, V. Esaulenko, N. Rybalko – Donetsk; DonNTU, 2003. – 72 p. – available at: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/5029>
2. Rybalko, N., Esaulenko, V., Kostenko V. (2003) Theoretical foundation of electrical engineering: linear electric circuits: textbook. Noviy svet, Donetsk, 513 p.
3. Fedorov, M., Koroshchenko, A. and Mikhailov, V. (2011), «Equivalent circuits for the replacement of active three-poles», Vzryvozaschishchennoe elektrooborudovanie: sb. nauch.tr. UkrNIIVE. – Donetsk: Ltd. «AIR», pp. 55–62. – available at: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/9095>
4. Fedorov, M., Koroshchenko, A. and Kutkovoy, I. (2012), «Equivalent circuits for the replacement of active three-poles with sinusoidal power supplies», Naukovi pratsi Donetskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu. Seria «Elektrotehnika i energetika», № 1(12) – 2(13). pp. 245–249. – Mode of access: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/30502>

METHOD FOR DETERMINING THE INTERNAL RESISTANCES OF THE SOURCE FOR TRANSMITTING THE MAXIMUM POWER FROM THE ACTIVE THREE-POLES NETWORK

A. Koroshchenko¹, A. Rak¹, O. Glazeva²

¹Donetsk National Technical University

²National University «Odessa Maritime Academy»

Abstract. The article deals with DC as well as with AC linear three-pole networks a three-phase source of electric energy being of such kind. The problem of the maximum active power supply from the active three-pole network to the load is considered. The corresponding conditions for the maximum power supply are found for both DC and AC cases: in DC case, the load branch resistances are to be equal to the resistances of the corresponding source branches; in AC case the load branch complex impedances are to be equal to the conjugate complex impedances of the corresponding source branches. In accordance with the results obtained, new experimental way to determine the inner impedance of a three-phase source is proposed. It is based on the active power measurement, the load resistance and reactance being set at the same time in order to attain the load maximum active power. When such condition is realized the load resistance and reactance values are checked and the inner impedance of the three-phase source is obtained. The recommendations to do in case of little inner impedance are given. The procedure of the inner impedance determination is explained in detail. The results are verified with the aid of a computer modeling. It is possible to arrive at the same conclusion in case of a four-wire three-phase source (star-connection with neutral).

Key words: active power, active three-pole network, passive three-pole, inner impedance, three-phase

source, linear circuit, direct current, alternating current, resistance box, inductance, capacitance.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ОТ АКТИВНОГО ТРЕХПОЛЮСНИКА

А. В. Корощенко¹, А. Н. Рак¹, О. В. Глазева²

¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный университет «Одесская морская академия»

Аннотация. Получены условия передачи максимальной мощности в нагрузку от активного трехполюсника постоянного и переменного тока, где трехполюсниками переменного тока являются трехфазные источники электрической энергии. Предложен способ экспериментального определения внутренних сопротивлений трехфазного источника электрической энергии, основанный на измерении максимальной активной мощности, поступающей в нагрузку. По значениям резистивного и реактивного сопротивлений нагрузки, при которых получено максимальную мощность рассчитывается внутреннее сопротивление трехфазного источника.

Ключевые слова: активная мощность, активный трехполюсник, пассивный трехполюсник, ваттметр, внутреннее сопротивление, трехфазный источник, линейная цепь, постоянный ток, переменный ток, магазин сопротивлений, индуктивность, емкость.

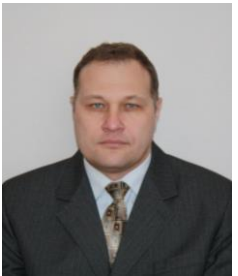
Отримано 24.04.2017



Корощенко Александр Владимирович, к.т.н., доц., кафедра электромеханики и ТОЭ Донецкого национального технического университета. Ул. Артема, 58, Донецк, Украина, E-mail: korosh_aleks@mail.ru, тел. +38-099-118-95-87

Alexandr Koroshchenko, Ph.D., Associate Professor of the Department of electromechanics and theoretical foundations of electrical engineering, Donetsk National Technical University, Artema street, 58, Donetsk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-7872-6210



Рак Александр Николаевич, к.т.н., доц., кафедра электромеханики и ТОЭ Донецкого национального технического университета. Ул. Артема, 58 Донецк, Украина, E-mail: lion15ua@rambler.ru тел. +38- 050-273-85-42

Alexandr Rak, Ph.D., Associate Professor of the Department of electromechanics and theoretical foundations of electrical engineering, Donetsk National Technical University, Artema street, 58, Donetsk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-2809-6529



Глазева Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры судовой электромеханики и электротехники Одесского национального университета «Национальная морская академия». Ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина, E-mail: Glazeva@bk.ru, тел. +38-067-994-03-42

Glazeva Oksana, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department Ship's electromechanics and electrical engineering, Odessa National University «Odessa Maritime Academy», Didrikhson str.,8, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-4992-7697