

ПРЯМОЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОДНОФАЗНОЙ НАГРУЗКИ

В. А. Бошняга, В. М. Суслов

Институт энергетики Академии наук Молдовы

Аннотация. Предложен новый метод прямого расчета параметров двухэлементного симметрирующего устройства на основе схемы треугольника Штейнмеца без использования симметричных составляющих, поясняющий специфику работы схемы. С использованием этого метода также рассчитаны величины элементов схемы для варианта с конфигурацией звезда, построена векторная диаграмма напряжений и токов элементов устройства, иллюстрирующая особенности режима работы звезды по сравнению со схемой треугольника. Показано что нейтраль звезды находится под большим потенциалом, а напряжение на нагрузке втрое превышает фазное.

Ключевые слова: симметрирующая схема Штейнмеца в виде треугольника, эквивалентная звезда.

Введение

Одной из областей применения симметрирующих устройств является подключение к трехфазной сети мощных однофазных нагрузок с сохранением симметрии потребляемых от трехфазного источника токов. Данному направлению посвящено большое количество работ, можно отметить, например, работы [1-5], хотя, конечно, ими список далеко не исчерпывается, в упомянутых работах также приведена обширная библиография по симметрирующим устройствам. Данная работа посвящена одной из наиболее употребительных схем с двумя симметрирующими элементами, которая в литературе обычно именуется схемой Штейнмеца (см. рис.1). В принципе характеристики и расчет параметров для данной схемы рассмотрены, например в [1] с использованием метода симметричных составляющих. Здесь предлагается несколько иной подход - прямой метод расчета ее параметров с использованием законов Ома и Кирхгофа. Кроме того, на основе предлагаемого подхода рассмотрен более детально, чем в [1], вариант данного симметрирующего устройства, получаемый непосредственным преобразованием треугольника схемы Штейнмеца в эквивалентную звезду.

Прямой метод расчета параметров

На рис.1 приведена рассматриваемая схема и применяемые обозначения токов, напряжений и их положительные направления. Все токи и напряжения будем считать комплексными векторами, однако для простоты начертания точки над векторами ставить не будем, а при необходимости будем делать специальные оговорки.

Используя уравнения первого закона Кирхгофа для узлов 1,2 схемы рис.1, получим следующую систему уравнений (1):

$$\begin{cases} I_1 + I_{31} = I_{12} \\ I_2 + I_{12} = I_{23} \end{cases} \quad (1)$$

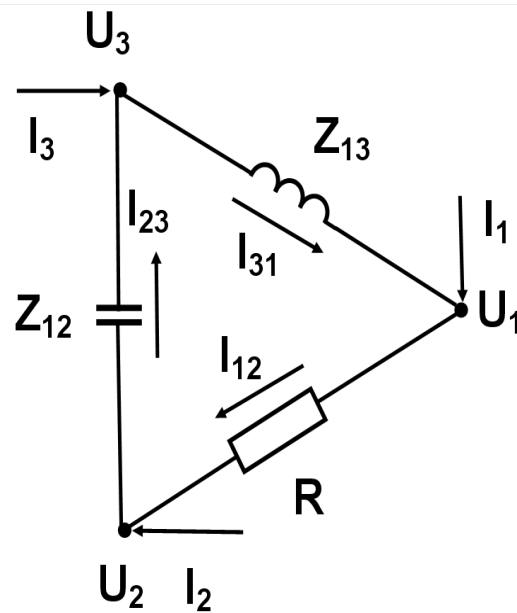


Рис.1. Схема Штейнмеца-треугольник.

Уравнение для узла 3 с током I_3 использовать не будем, так как в данном случае совокупность узлов 1,2,3 является обобщенным узлом. Сумма трех токов, подтекающих к нему равна нулю, поэтому уравнение для третьего тока является следствием первых двух.

Найдя из закона Ома токи ветвей треугольника I_{12} , I_{31} , I_{23} и используя систему уравнений

(1), получим систему уравнений (2) для токов от трехфазного источника питания:

$$\begin{cases} I_1 = I_{12} - I_{31} = \frac{U_1 - U_2}{R} - \frac{U_3 - U_1}{Z_{13}} \\ I_2 = I_{23} - I_{12} = \frac{U_2 - U_3}{Z_{23}} - \frac{U_1 - U_2}{R} \end{cases} \quad (2)$$

Выражение для тока I_3 является следствием данной системы уравнений на основании того, что сумма токов обобщенного узла, составленного из узлов 1,2,3 равна нулю. Поэтому здесь не будем его приводить. При симметричной системе приложенных напряжений, располагая вектор напряжения фазы U_1 на положительном направлении вещественной оси (см. рис.2), используя комплексный оператор поворота $a = -0,5 + j\sqrt{3}/2$ вектора напряжений фаз могут быть записаны в следующем виде: $U_1 = U$, $U_2 = Ua^2$, $U_3 = Ua$.

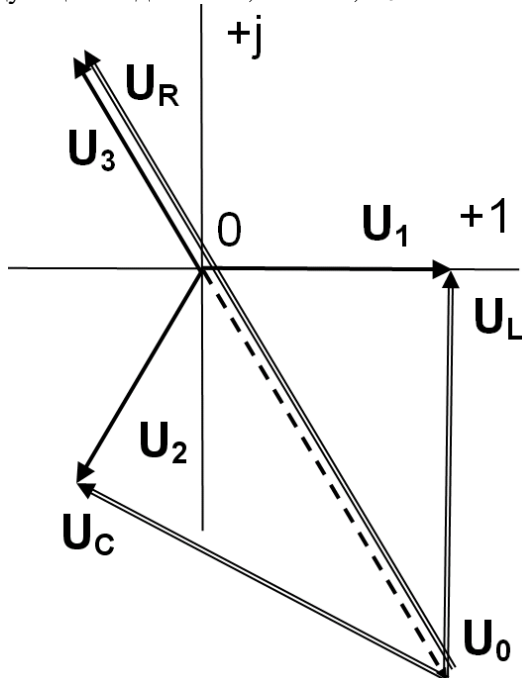


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений на элементах звезды

При этом величина активной мощности, поглощаемой на активном сопротивлении R (см схему рис. 1), равна $3U^2/R$. Далее, предположим, что для заданной симметричной исходной системы напряжений и заданного активного сопротивления нагрузки R в рассматриваемой схеме существуют такие значения комплексных сопротивлений Z_{13} , Z_{23} , при которых токи фаз источника I_1 , I_2 , I_3 будут равными по величине и чисто активными. Это означает, что мощности, отбираемые от каждой из трех фаз источника, тоже будут чисто активными и одинаковыми. Очевидно, что при этом и сумма реактивных мощностей реактивных элементов должна быть равна нулю, поскольку предполагается, что нагрузка является

чисто активной. При этом каждая из фаз источника должна отдавать $1/3$ часть полной мощности, которая равна U^2/R . Тогда, система уравнений, определяющая токи фаз источника при фазном напряжении U по закону Ома может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U}{R} \\ I_2 = \frac{U \cdot a^2}{R} \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя данные значения токов в левые части системы уравнений (2), получим систему уравнений (4) для определения искомым реактивных сопротивлений Z_{12} , Z_{23} . Разрешим данную систему уравнений (4) относительно искомым сопротивлений, путем элементарных преобразований и, таким простым способом, получим искомый результат, представленный соотношениями (5). Как и следовало ожидать, необходимые реактивные сопротивления имеют взаимно противоположный характер, Z_{13} - индуктивный,

$$\begin{cases} \frac{U}{R} = (1 - a^2) \cdot \frac{U}{R} - (a - 1) \cdot \frac{U}{Z_{13}} \\ \frac{U}{R} \cdot a^2 = \frac{U}{Z_{23}} \cdot (a^2 - a) - \frac{U}{R} \cdot (1 - a^2) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_{13} = (a - a^2) \cdot R = j\sqrt{3}R \\ Z_{23} = (a^2 - a) \cdot R = -Z_{13} \end{cases} \quad (5)$$

а Z_{23} - емкостной, и зависят только от значения активного сопротивления нагрузки, а их величина в $\sqrt{3}$ раз превышает активное сопротивление нагрузки. Важно, что при выбранном направлении вращения системы векторов против часовой стрелки, после активного сопротивления нагрузки в следующее плечо треугольника должна быть включена емкость. Если поменять реактивные элементы местами, сохраняя принятый порядок следования питающих фаз, то схема теряет свойство симметрирования. Интересно отметить, что с точки зрения величины отдаваемой источником мощности данная схема оказывается эквивалентной симметричной звезде, состоящей из трех одинаковых активных сопротивлений той же величины R . То есть, со стороны источника питания эти две различные схемы воспринимаются абсолютно одинаково как симметричная активная нагрузка, что само по себе неочевидно. В этом смысле их можно считать эквивалентными. Если звезду активных сопротивлений R преобразовать в соответствующий треугольник, то в его сторонах будут включены активные сопро-

тивлення $3R$. Если просто визуально сравнить треугольник, состоящий из активных сопротивлений $3R$ и схему Штейнмеца, то опять же, очевидно, что они будут нагружать источник абсолютно одинаково, тем не менее, расчеты показывают, что это так.

Попробуем, пользуясь известными соотношениями преобразования треугольника сопротивлений в звезду, найти параметры звезды, эквивалентной схеме Штейнмеца. Получим приведенные далее соотношения (6) для значений параметров звезды. Здесь сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 являются сопротивлениями лучей звезды. Видно, что параметры реактивных элементов получились такими же, как в схеме треугольника, а активное сопротивление нагрузки в три раза

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = j\sqrt{3}R \\ Z_2 = -j\sqrt{3}R \\ Z_3 = 3R \end{array} \right. \quad (6)$$

больше, при этом расположение элементов в схеме соответствует рис.3. Исходя из этого, уже можно предположить (как отмечено и в [1]), что при такой же суммарной активной мощности нагрузки напряжение на ней должно быть в 3 раза больше фазного напряжения.

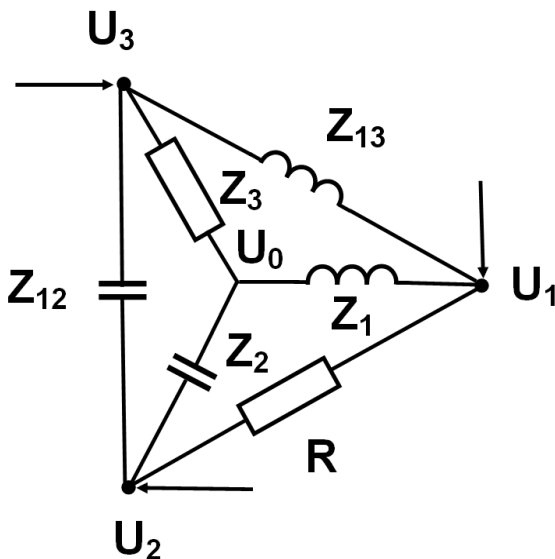


Рис. 3. Схема Штейнмеца в виде треугольника и эквивалентной звезды.

Найдем напряжение нейтрали для случая трехлучевой звезды по известному соотношению (7):

$$U_0 = \frac{U_1 \cdot Y_1 + U_2 \cdot Y_2 + U_3 \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (7)$$

Подставив значения проводимостей и симметричные напряжения фаз, получим величину напряжения в нулевой точке звезды:

$$U_0 = U \cdot (1 - j\sqrt{3}) \quad (8)$$

По полученному значению напряжения в нулевой точке и заданным векторам приложенных напряжений на рис.2 для $U=1$ построена векторная диаграмма напряжений на элементах схемы. Напряжение нулевой точки показано пунктирной линией, а напряжения на элементах звезды – двойной линией. Видно, что на реактивных элементах величина напряжения равна $\sqrt{3}$, а на активном сопротивлении нагрузки 3 единицам. Модуль напряжения U_0 в нейтральной точке звезды равен двойному фазному напряжению. При этом вектора токов от источника в элементах схемы совпадают по фазе с соответствующими приложенными напряжениями (поэтому на рис.2 не показаны) и сдвинуты по отношению к напряжениям на элементах соответственно их характеру - в активном сопротивлении ток совпадает с напряжением на этом элементе, а в реактивных - отстает или опережает. Пользуясь величинами полученных сопротивлений реактивных элементов и напряжениями на них, легко также проверить, что реактивная мощность элементов в обеих схемах одинакова. Таким образом, схему в виде эквивалентной звезды также можно использовать для того, чтобы симметрично нагрузить источник питания при использовании однофазной активной нагрузки, однако напряжение на нагрузке будет втрое больше фазного, т.е. данную схему можно одновременно рассматривать как бестрансформаторный утроитель напряжения.

Выводы

1. Предложен новый прямой метод расчета параметров двухэлементного симметрирующего устройства на основе схемы треугольника Штейнмеца без использования симметричных составляющих, поясняющий специфику работы схемы. Показано, что симметрирующие свойства схемы обеспечиваются только при определенном чередовании включения симметрирующих элементов при заданном направлении вращения векторов напряжений питающей системы.
2. Для варианта схемы с конфигурацией звезда построена векторная диаграмма напряжений устройства, наглядно иллюстрирующая особенности режима работы данной схемы по сравнению со схемой треугольника. Показано, что в нейтрали звезды напряжение равно двойному

фазному, а на нарузке – втрое превышает фазное напряжение питающей системы.

Список использованной литература

1. Милях, А. Н., Шидловский, А. К., Кузнецов, В. Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. [Текст]. Из-во Наукова Думка, Киев, 1973 г., 219 стр.
2. Шидловский, А. К., Мостовяк, И. В., Кузнецов, В. Г. Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей. [Текст]. Из-во Наукова Думка, Киев, 1979 г., 251 стр.
3. Шидловский, А. К., Кузнецов, В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. [Текст]. Из-во Наукова Думка, Киев, 1985 г., 267 стр.
4. Шидловский, А. К., Кузнецов, В. Г., Николаенко, В. Г. Оптимизация несимметричных режимов систем энергоснабжения. [Текст]. Из-во Наукова Думка, Киев, 1987 г., 175 стр.
5. Шидловский, А. К., Мостовяк, И. В., Москаленко, Г. А. Уравновешивание режимов многофазных цепей. [Текст]. Из-во Наукова Думка, Киев, 1990 г., 271 стр.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. [Текст]. Издание восьмое. Москва, Высшая школа, 1984 г. 559 стр.

References

1. Mileah, A. N., Shidlovski, A. K., Kuznetsov, V. G. (1973). Schemes for single-phase loads symmetrization in three-phase circuits. [Shemi simmetrirovania odnofaznih nagruzok v trehfaznih tsepeah.] Naukova Dumka, Kiev, 219 pp. (In Russian)
2. Shidlovski, A. K., Mostoveak, I. V., Kuznetsov, V. G. (1979). Analysis and synthesis of phase-converting circuits. [Analiz i sintez fazopreobrazovatelinih tsepei]. Naukova Dumka, Kiev, 251 pp. (In Russian)
3. Shidlovski, A. K., Kuznetsov, V. G. (1985). Improving of energy quality in electrical networks. [Povishenie kachestva energii v electricheskih seteah]. Naukova Dumka, Kiev, 267 pp. (In Russian)
4. Shidlovski, A. K., Kuznetsov, V. G., Nikolaenko, V. G. (1987). Optimization of power supply systems asymmetric modes. [Optimizatsia nesimmetrichnih rejimov sistem energosnabjenia]. Naukova Dumka, Kiev, 175 pp. (In Russian)
5. Shidlovski, A. K., Mostoveak, I. V., Moskalenko, G. A. (1990). Balancing of multiphase circuits modes. [Uravnoveshivanie rejimov mnogofaznih tsepei]. Naukova Dumka, Kiev, 271 pp. (In Russian)
6. Bessonov, L. A. (1984). Theoretical bases of electrical engineering. Electrical circuits. [Teoreticheskie osnovi electrotehniki. Electricheskie tsepi]. The eighth edition. Moscow, Vishaia shkola, 559 pp. (In Russian)

DIRECT METHOD OF PARAMETERS CALCULATION FOR TWO-ELEMENT SYMMETRIZATION DEVICE FOR SINGLE-PHASE LOAD

V. A. Bosneaga, V. M. Suslov.

Power engineering institute of Moldova Academy of sciences

Abstract. A new direct method was proposed for parameters calculation of two-element symmetrisation Steinmetz triangle scheme. This method does not use decomposition to symmetrical components and is based only on the first and second Kirchhoff's laws, is more simple and straightforward. Only active load was considered, taking into account, that reactive part of the load always could be compensated by additional reactive elements, connected parallel to load. It is emphasized, based on the results obtained, about the peculiarity of this scheme, consisting in the fact, that correct scheme operation with symmetrisation effect is achieved only at respective connection of the reactive elements, in accordance with direction of voltage vectors of supply system rotation. Only at this condition it is provided the balancing effect at active load. Using direct method the characteristics of equivalent star configuration of this scheme are also investigated. Values of voltages and currents in the circuit elements for equivalent star connection are calculated, which ensure symmetrisation effect at active load. It was demonstrated, that load voltage for equivalent star connection is three times larger, than for the triangle variant. Besides, the voltage of the neutral point of equivalent star is rather high and is twice bigger, than phase voltage. Based on the results obtained, a vector diagram of the voltages and currents of the equivalent star elements is constructed, illustrating the specific features of equivalent star configuration in comparison with the triangle scheme. It is shown, that this circuit can be used simultaneously as transformerless voltage multiplier.

Keywords: Steinmetz symmetrisation triangle scheme, direct method parameters calculation, equivalent star, vector diagram.

ПРЯМИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДВОЕЛЕМЕНТНОГО СІММЕТРИЮЮЩОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОДНОФАЗНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В. А. Бошняга, В. М. Суслов

Інститут енергетики Академії наук Молдови

Анотація. Запропоновано новий прямиий метод розрахунку параметрів двоелементного симетриуючого пристрою Штейнмеца за схемою трикутника. Цей метод не використовує розкладання на симетричні складові, а базується тільки на обох законах Кірхгофа, що є більш простим і зрозумілим. Враховувалася тільки активне навантаження з урахуванням того, що її реактивну частину завжди можна компенсувати. Отримані результати підкреслюють особливість цієї схеми, яка полягає у тому, що її симетриуючий ефект досягається тільки при відповідному з'єднанні реактивних елементів в залежності від чергування векторів напруги живильної системи. Тільки при такому стані забезпечується балансувальний ефект при активному навантаженні. Прямими методами також досліджуються характеристики цієї схеми в конфігурації еквівалентної зірки. Розраховуються значення напруг і струмів на елементах еквівалентної схеми для зоряного з'єднання, що забезпечують симетриуючий ефект при активному навантаженні. Тільки при такому стані забезпечується балансувальний ефект при активному навантаженні. Прямими методами також досліджуються характеристики цієї схеми в конфігурації еквівалентної зірки. Показано, що напруга навантаження для зоряного з'єднання втричі більша, ніж для варіанту трикутника. Крім того, напруга нейтральної точки в еквівалентній зірці досягає величини в два рази більше фазної напруги. На підставі отриманих результатів побудовані векторні діаграми напруг і струмів елементів двох різновидів схем, що ілюструють особливості конфігурації еквівалентної зірки в порівнянні з конфігурацією трикутника. Показано, що ця схема може бути використана як безтрансформаторний множник напруги у три рази.

Ключові слова: схема симетризації Штейнмеца, розрахунок параметрів прямого методу, еквівалентна зірка, векторна діаграма.

Получено 16.02.2018



Бошняга Валерій Анатольєвич. Ведущий научный сотрудник, к.т.н., Институт энергетики Академии наук Молдовы, ул. Академическая, 5, Кишинев, Молдова, 2028. E-mail: valeriu.bosneaga@gmail.com, тел.+37379438713

Bosneaga V.A. Senior scientific collaborator, Institute of Power Engineering of Moldova Academy of sciences, Academiei str.,5, Chisinau, rep. of Moldova, 2028. E-mail: valeriu.bosneaga@gmail.com., phone: +37322737494

ORCID ID: 0000-0002-1272-00860



Суслов Виктор Миронович. Научный сотрудник, Институт энергетики Академии наук Молдовы, ул. Академическая, 5, Кишинев, Молдова, 2028. E-mail: svictorm46@gmail.com., тел. +37322737494

Suslov V.M. Scientific collaborator, Institute of Power Engineering of Moldova Academy of sciences, Academiei str.,5, Chisinau, rep. of Moldova, 2028. E-mail: svictorm46@gmail.com., phone: +37322737494.

ORCID ID: 0000-0003-3036-1109