

УДК 621.316

В.Г. ЯГУП¹ (д-р техн. наук, проф.), Е.В. ЯГУП² (канд. техн. наук, доц.)¹ Харьковская национальная академия городского хозяйства² Украинская государственная академия железнодорожного транспортаyagup_walery@rambler.ru

К АНАЛИТИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЕМКОСТЕЙ СИММЕТРИРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Предложен системный подход к проблеме аналитического расчета величин емкостей конденсаторов, которые симметрируют токи в трехфазной системе электроснабжения с несимметричной активно-индуктивной нагрузкой. Проанализирована точность аналитического метода, разработана программа на MathCAD, позволяющая найти величины параметров симметрирующих элементов и места их подключений.

Ключевые слова: несимметричный режим, реактивная мощность, симметрирующие конденсаторы, поисковая оптимизация.

Постановка проблемы. Несимметричные режимы электропитания в трехфазных системах возникают естественным образом в связи со стохастическим характером подключений потребителей, в том числе и однофазных. В большинстве случаев нагрузка носит индуктивный характер, что приводит к циркуляции реактивной мощности. Неравномерность загрузки линий электропитания и наличие реактивных составляющих в линейных токах вызывает дополнительные потери электроэнергии, а перекос фаз и неравенство амплитуд линейных напряжений ухудшает условия работы нагрузок [1, 2]. Поэтому симметрирование токов и напряжений в трехфазных системах электроснабжения представляет собой весьма актуальную задачу в плане повышения энергоэффективности во всех сферах, где используется электрическая энергия.

Постановка задачи исследования. Целью настоящей статьи является анализ известных методов аналитического расчета емкостей симметрирующих конденсаторов для оценки их точности и сравнения с предложенным методом на основе поисковой оптимизации [3].

Материалы исследования. Рассматривается случай трехфазной трехпроводной системы электроснабжения (рис. 1).

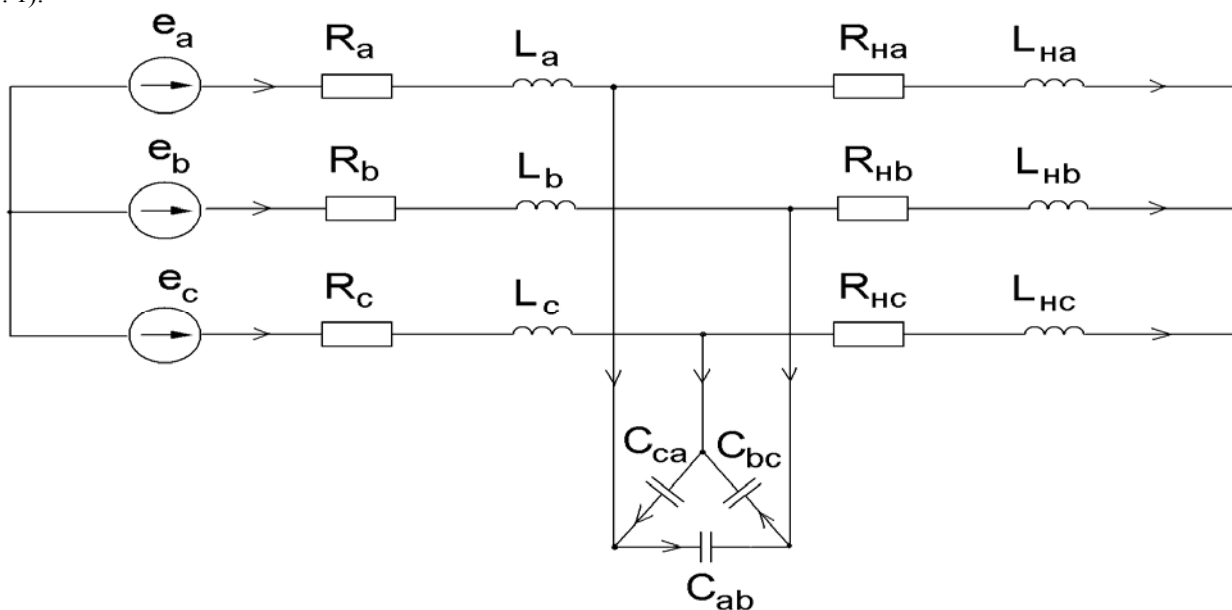


Рисунок 1 – Расчетная схема системы электроснабжения.

e_a, e_b, e_c – трехфазная система источников питания неограниченной мощности; $R_a = R_b = R_c$ – активные сопротивления линии электропередачи; $L_a = L_b = L_c$ – индуктивности линии электропередачи; $R_{на}, R_{нб}, R_{нc}$ – активные сопротивления нагрузки; $L_{на}, L_{нб}, L_{нc}$ – индуктивности нагрузки; C_{ab}, C_{bc}, C_{ca} – компенсирующие конденсаторы.

Ввиду несимметрии для компенсирующих конденсаторов справедливо неравенство:

$$C_{ab} \neq C_{bc}, C_{bc} \neq C_{ca}, C_{ca} \neq C_{ab}.$$

© Ягуп В.Г., Ягуп Е.В., 2013

Обозначим

$$\begin{aligned} z_a &= R_a + j\omega L_a; \quad z_b = R_b + j\omega L_b; \quad z_c = R_c + j\omega L_c; \\ z_{na} &= R_{na} + j\omega L_{na}; \quad z_{nb} = R_{nb} + j\omega L_{nb}; \quad z_{nc} = R_{nc} + j\omega L_{nc}; \\ z_{ab} &= \frac{1}{j\omega c_{ab}}; \quad z_{bc} = \frac{1}{j\omega c_{bc}}; \quad z_{ca} = \frac{1}{j\omega c_{ca}}. \end{aligned}$$

Выражая напряжения на пассивных элементах по закону Ома, можно записать следующую систему топологических уравнений [4] для системы особых контуров:

$$\begin{aligned} e_a - e_b - z_a i_a + z_b i_b - z_{ab} i_{ab} &= 0, \\ e_b - e_c - z_b i_b + z_c i_c - z_{bc} i_{bc} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c - z_{ca} i_{ca} &= 0, \\ e_b - e_a + z_a i_a - z_b i_b + z_{na} i_{na} - z_{nb} i_{nb} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c + z_{na} i_{na} - z_{nc} i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Дополним полученные уравнения системой уравнений для токов особых сечений:

$$\begin{aligned} i_{ab} - i_{ca} - i_{nb} - i_{nc} - i_a &= 0, \\ i_{bc} - i_{ab} + i_{nb} - i_b &= 0, \\ i_{ca} - i_{bc} + i_{nc} - i_c &= 0, \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Полная система уравнений состоит из систем (1) и (2), образующих 9 уравнений для девяти неизвестных токов: фазных i_a, i_b, i_c ; нагрузочных i_{na}, i_{nb}, i_{nc} ; токов компенсирующих элементов i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} . Эти уравнения записаны для мгновенных значений токов, однако они сохраняют силу при записи уравнений для комплексных токов при синусоидальном режиме питания системы. Воспользуемся приведенными уравнениями для анализа несимметричного режима средствами MathCAD на примере системы с параметрами, заданными в [3]. По приведенной системе уравнений (1) и (2) проведен анализ несимметричного режима с помощью пакета MathCAD [5] аналогично методике, изложенной в [3].

В результате решения получены следующие значения амплитуд линейных токов, необходимые для аналитического расчета сопротивлений симметрирующих элементов:

$$|ia| = 31.494 \quad |ib| = 30.995 \quad |ic| = 10.342$$

Эти токи примерно в (1,5-4) раза превосходят линейные токи при точной компенсации реактивной мощности, решение для случая которой приведено в [3], где амплитуды каждого из линейных токов составляют величину лишь 7,754. Точная компенсация позволяет в (2-16) раз снизить потери передачи электроэнергии.

Описанный в [5] метод определения параметров симметрирующих элементов реализован в программе, приведенной на рис.2.

```

lab := 1  lbc := 1  lca := 1  j = i
Given
lob =  $\frac{j}{\sqrt{3}} \cdot (lbc + a \cdot lca + a^2 \cdot lab)$ 
Im ( lab ) = 0  Im ( lbc ) = 0  Im ( lca ) = 0  Re ( lab ) > 0  Re ( lbc ) > 0  Re ( lca ) > 0
T := Find ( lab , lbc , lca )
lab = 24.48  lbc = 6.858  lca = 2.474 × 10-9
Cab :=  $\frac{1}{|zab| \cdot w}$   Cab = 4.499 × 10-4  zbc :=  $\frac{|eb - ec|}{lbc \cdot j}$   Cbc :=  $\frac{1}{|zbc| \cdot w}$ 
Cbc = 1.26 × 10-4  zbc = -25.256i  zca = 1 × 107
zab :=  $\frac{|ea - eb|}{lab \cdot j}$   zab = -7.075i

```

Рисунок 2 – Расчет параметров симметрирующих элементов

Здесь предварительно по амплитудам несимметричных токов найден ток обратной последовательности, а затем, согласно методике [5] – амплитуды токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} , которые должны протекать в ветвях симметрирующих элементов для подавления тока обратной последовательности. Это и должно обеспечивать симметрирование токов в линиях электропередачи. Заметим, что в приведенном расчете предложено численное решение задачи, позволяющее отойти от необходимости рассмотрения трех вариантов расположения вектора тока компенсируемой обратной последовательности, как это предлагается в [5]. Получаемое решение, получаемое с помощью оператора “*given-find*”, дает вариант симметрирования двумя конденсаторами, о чем свидетельствует малый ток I_{ca} в полученном решении. Сопротивления конденсаторов найдены по закону Ома, после чего с учетом частоты питающих источников найдены их емкости.

На рис.3 приведены результаты расчета режима в симметрированной системе электроснабжения.

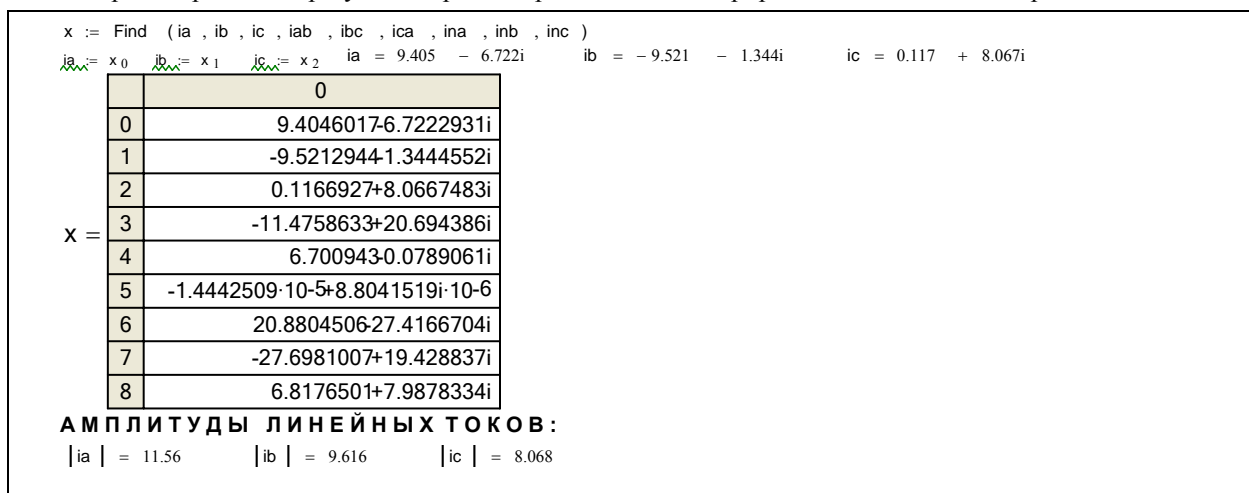


Рисунок 3 – Расчет параметров режима симметрированной системы электроснабжения

Как видно из полученного решения, токи в линиях существенно снизились, однако полное симметрирование не достигнуто. Это объясняется, с одной стороны, принятым допущением о том, что при симметрировании напряжения на нагрузке весьма близки к номинальным напряжениям [5]. Однако, это не вполне корректно, так как даже при полной компенсации реактивной мощности [3] на линии будут оставаться некоторые потери напряжения. С другой стороны, в аналитической методике не учитывается реактивная мощность, обусловленная индуктивным характером сопротивления самих линий передач. При точном решении [3] задачи конденсаторы компенсируют и эту реактивную мощность.

Выводы. Проведенные исследования и расчеты показывают, что аналитический метод не обеспечивает точного симметрирования режима в трехфазной системе. Это объясняется неточностями в определении напряжений симметрированного режима при расчетах величин симметрирующих элементов, а также неучетом реактивных потерь в линиях электропередачи. Режим точной компенсации реактивной мощности во всей системе, произведенный на основе численных оптимизационных методов, приводит к оптимальному решению. Следует заметить, однако, что аналитический расчет рационально использовать для определения начального приближения численного расчета, что может сократить затраты компьютерного времени для достижения оптимального решения полного симметрирования и компенсации реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка.- 1985. – 324 с.
2. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия.- 1977. – 128 с.
3. Ягуп В.Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк.- 2011. – вип. 11 (186).- С. 449-454
4. Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем / В.Г. Ягуп. –Х: Вища школа, 1986. – 160 с.
5. Веников В.А. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др. – М.: Высшая школа.- 1971. – 438 с.

REFERENCES

1. Shidlovskiy A. K., Kuznetsov V.G. Improvement of energy quality in power networks. – Kiev: Naukova dumka, 1985. 324 p.
2. Zhezhelhenko I. V. Quality indexes of electric power at industrial plants. – Moscow: Energia, 1977. 128 p.

3. Yagup V.G., Yagup K.V. The calculation of mode of reactive power compensation in asymmetrical system of power supply with searching optimization method. – Scientific works of the Donetsk national technical university. Series «Electrical and power engineering».- Donetsk. 2011; v. 11 (186): 449-454
4. Yagup V.G. Computer-aided design of thyristor circuits. –Kharkov: Vyscha shkola, 1986. 160 p.
5. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. and oth. Power networks. Moscow: Vysshaia shkola, 1971. 438 p.

Надійшла до редакції 11.03.2013

Рецензент: М.М. Федоров

В.Г. ЯГУП¹, К.В. ЯГУП²

¹ Харківська національна академія міського господарства

² Українська державна академія залізничного транспорту

До аналітичного визначення ємностей симетрувальних конденсаторів. У статті запропоновано системний підхід до проблеми аналітичного розрахунку величин ємностей конденсаторів, що симетрують струми в трифазній трипроводній системі електропостачання з несиметричним активно-індуктивним навантаженням.

Ключові слова: несиметричний режим, реактивна потужність, симетрувальні конденсатори, пошукова оптимізація.

V. YAGUP¹, K. YAGUP²

¹ Kharkov National Academy of Municipal Economy

² Ukrainian State Academy of Railway Transport

To Analytical Evaluation Of Symmetrizing Capacitors. System approach to the problem of analytical evaluation of capacitors, which are symmetrizing currents in three-phase system of power supply with the asymmetrical active-inductive load is offered in the article. Sources of electric energy are supposed absolutely symmetrical and to have infinite power supply. The parameters of the asymmetrical mode were found with the package of software MATHCAD. This package was chosen because of ability to execute operations with complex variables. Graph method was appealed to form the system of mathematical equations of power-supply system for computer model. This equations were written in complex form for all main loops of oriented graph of power-supply system. To solve the system of the equations was used method of searching optimization in MATHCAD with operator “given-find”. This information allowed estimating the current of negative phase-sequence which must be balanced for achievement of the symmetric mode. Amplitudes of currents of balance capacitors and values of their capacitances were calculated. In method which is known to calculate parameters of simmetrizing elements they used geometrical calculations. Calculating formulas are depended on location of the negative phase-sequence current vector. Proposed method allowed to calculate this parameters without geometrical solving. For the purpose MATHCAD operator “given-find” was used too. Then the parameters of the symmetrical mode were found with the package of software MATHCAD to test results of symmetrization. The computer experience has shown that such method does not provide an exact symmetrization. The linear currents are different yet because a number of factors were not taken into account here. In particular reactive power of transmission line are not were disregarded. The method of searching optimization calculates exact result and provides complete compensation of reactive power in all system and its work in the optimal condition with minimum of loss. The transmission line currents are absolutely equal and minimal in this case.

Key words: asymmetrical mode, reactive power, compensating capacitors, searching optimization.