

3. Kojovic, L.A. Coordination of Distributed Generation and Step Voltage Regulator Operations for Improved Distribution System Voltage Regulation. [Abstracts of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting], Montreal, 2006, pp. 122-127.
4. Agalgaonkar Y.P., Pal B.C., Jabr R.A. Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 182-192.
5. Viawan, F.A., Karlsson D. Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation. [Abstracts of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting «Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century»]. Pittsburgh, 2008, pp. 231-236.
6. Nagendra Rao P.S., Deekshit R.S. Radial Load Flow for Systems Having Distributed Generation and Controlled Q Sources. *Electric Power Components and Systems*, 2005, vol. 33, iss. 6, pp. 641-655.
7. Senjyu T., Miyazato Y., Yona A., Urasaki N., Funabashi T. Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, iss. 2, pp. 1236-1242.
8. Yandulskyy A.S., Trunina G.O. Vyznachennja zon efektyvnogo reguljuvannja naprugy dzherelamy rozoseredzhenoi' generacii' z invertornym pryjednannjam u rozpodil'nij elektrychnij merezhi [Identifying areas of effective regulation voltage source inverter of distributed generation from joining in the electrical distribution network]. *Naukovi praci Vinnyts'kogo nacional'nogo tehnic'nogo universytetu – Collected works of Vinnytsia National Technical University*, 2014, no.4. Available at: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/422/420> (Accessed 20 June 2017).
9. Trunina A.A. Zony efektyvnogo reguljuvannja naprugy dzherelamy rozoseredzhenoi' generacii' z invertornym pryjednannjam v rozpodil'nij elektrychnij merezhi [Areas of effective voltage control of distributed generation sources with inverter connecting to the electrical distribution network]. *Tehnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 54-56. (Ukr.)

Рецензент: С.О. Кудря
д-р техн. наук, проф., «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Стаття надійшла 21.06.2017

УДК 621.317.1:621.3.015

© Зиновченко А.Н.¹, Гаркуша Г.Г.²

ИЗМЕРЕНИЕ АРГУМЕНТА НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В МЕТОДЕ МНОГОФАЗНОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Приведен краткий анализ известных способов измерения параметров несимметрии трёхфазной системы напряжений. Наибольшей точностью обладает метод многофазного выпрямления, и в этом методе аргумент напряжения обратной последовательности можно измерить как фазовый сдвиг между напряжением второй гармоники выпрямленного линейного напряжения и напряжением второй гармоники выходного сигнала многофазного выпрямителя, питаемого от исследуемой системы напряжений. Показано, что введение корректирующего сигнала позволяет существенно повысить точность измерений.

Ключевые слова: несимметрия напряжений, напряжение прямой последовательности, напряжение обратной последовательности, аргумент напряжения обратной последовательности, преобразователь числа фаз, многофазный выпрямитель.

¹ канд. техн. наук, доцент, Азовский морской институт национального университета Одесская морская академия, г. Мариуполь, zynovchenko@gmail.com

² канд. техн. наук, профессор, Азовский морской институт национального университета Одесская морская академия, г. Мариуполь, garkushash@gmail.com

Зиновченко О.М. Гаркуша Г.Г. Вимірювання аргументу напруги зворотної послідовності в методі багатофазного випрямлення. Проведено скорочений аналіз відомих способів вимірювання параметрів несиметрії трифазної системи напруг. Найбільшою точністю володіє метод багатофазного випрямлення і в цьому методі аргумент напруги зворотної послідовності можна виміряти як фазовий зсув між напругою другої гармоніки випрямленої лінійної напруги і напругою другої гармоніки вихідного сигналу багатофазного випрямляча, що живиться від досліджуваної системи напруг. Показано, що введення коригуючого сигналу дозволяє істотно підвищити точність вимірювань.

Ключові слова: несиметрія напруг, напруга прямої послідовності, напруга зворотної послідовності, аргумент напруги зворотної послідовності, перетворювач числа фаз, багатофазний випрямляч.

O.M. Zynovchenko, G.G. Garkusha. Measurement of negative sequence voltage argument in multi-phase rectification method. Powerful single-phase electrical energy consumers distort the voltages of three-phase networks. The use of adjustable symmetric devices assumes measuring the asymmetry of voltages. Since the asymmetry of voltages in three-phase networks is limited by the level of 2%, an accurate measurement of its parameters, and especially the argument of negative sequence voltage, is complex. A brief analysis of the known methods for measuring the parameters of asymmetry of a three-phase voltage system is given. The multi-phase rectification method has the highest accuracy. In this method the investigated three-phase system of voltages is converted into a multi-phase voltage system that feeds the multi-phase rectifier and the output voltage of this rectifier is analyzed. The constant component of the output voltage of the rectifier gives information as to the direct sequence voltage. The second harmonic of the output voltage of the rectifier gives information as to the negative sequence voltage. It is shown that the negative sequence voltage argument can be measured as a phase shift between the second harmonic voltage of the rectified line voltage and the second harmonic voltage of the output signal of the multi-phase rectifier fed from the voltage system that is being studied. But the accuracy of such measurement is low. It is shown that the introduction of a correcting signal significantly improves the accuracy of the measurements. The correcting signal is formed from the measurement results of the asymmetry voltages factor and the phase shift between the second harmonics. Introduction of the correction will reduce the absolute maximum methodical measurement error, by a factor of 20 for 10% asymmetry of voltages.

Keywords: voltage asymmetry, direct sequence voltage, negative sequence voltage, negative sequence voltage argument, phase number converter, multi-phase rectifier.

Постановка проблеми. Установка мощных однофазных потребителей электрической энергии может приводить к появлению несимметрии напряжений питающих трёхфазных сетей, что неблагоприятно сказывается на трёхфазном электрооборудовании, приводя к его перегреву и дополнительным потерям энергии [1]. В этой ситуации целесообразно применение регулируемых симметрирующих устройств, что предполагает измерение параметров несимметрии напряжений – модуля напряжения прямой последовательности (НПП), модуля и аргумента напряжения обратной последовательности (НОП). Поскольку несимметрия напряжений в трёхфазных сетях ограничивается уровнем 2% (коэффициент несимметрии $\varepsilon = 0,02$), точное измерение параметров несимметрии, и особенно аргумента НОП, является проблематичным.

Анализ последних исследований и публикаций. Параметры несимметрии напряжений можно определять с помощью фильтров симметричных составляющих [2] или по результатам измерения линейных напряжений [3], однако точность таких измерений невысокая [4]. Более точным является метод оценки симметричных составляющих трёхфазной системы напряжений по выходному напряжению многофазного выпрямителя МВ (рис. 1), питающегося от преобразователя числа фаз ПЧФ, который преобразует исследуемую трёхфазную систему напряжений в многофазную [5]. Выходное напряжение многофазного выпрямителя u несёт полную информацию о симметричных составляющих исследуемой трёхфазной системы напряжений – посто-

янная составляющая напряжения u соответствует НПП, а вторая гармоника напряжения u соответствует НОП [6]. Поскольку эти сигналы, соответствующие симметричным составляющим, имеют разную форму представления, прямое измерение аргумента НОП по отношению к НПП является невозможным. Однако в работе [7] предложено решение, позволяющее определять по выходному напряжению многофазного выпрямителя аргумент симметричной составляющей обратной последовательности.

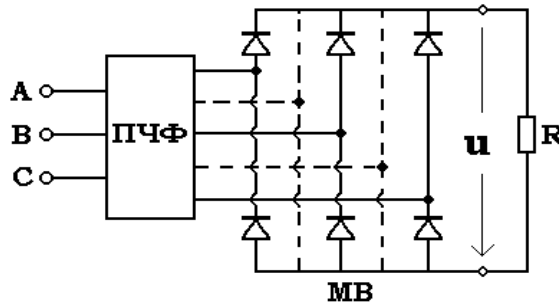


Рис. 1 – Многофазное выпрямление: ПЧФ – преобразователь числа фаз; МВ – многофазный выпрямитель

Целью данной работы является оценка погрешности определения аргумента НОП несимметричной трёхфазной системы напряжений по выходному напряжению многофазного выпрямителя [7].

Изложение основного материала. В работе [6] показано, что выходное напряжение МВ при условии бесконечно большого числа фаз ПЧФ описывается выражением:

$$u = KU_{m1} \left[\sqrt{1 + \varepsilon^2} \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{4(1 + \varepsilon^2)^2} - \frac{0,1765\varepsilon^4}{(1 + \varepsilon^2)^4} \right) - \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \cdot \left(1 + \frac{0,375\varepsilon^2}{(1 + \varepsilon^2)^2} \right) \cdot \cos(2\omega t + \alpha) - \right. \\ \left. - \frac{\varepsilon^2}{\sqrt{(1 + \varepsilon^2)^3}} \cdot \left(0,25 + \frac{0,2353\varepsilon^2}{(1 + \varepsilon^2)^2} \right) \cdot \cos(4\omega t + 2\alpha) - \frac{\varepsilon^3}{8(1 + \varepsilon^2)^3} \cdot \cos(6\omega t + 3\alpha) - \right. \\ \left. - \frac{0,0588\varepsilon^4}{(1 + \varepsilon^2)^4} \cdot \cos(8\omega t + 4\alpha) \right], \quad (1)$$

где K – коэффициент пропорциональности для каждого конкретного ПЧФ; U_{m1} – амплитуда симметричной составляющей прямой последовательности исследуемой трёхфазной системы напряжений; $\varepsilon = U_{m2}/U_{m1}$ – коэффициент несимметрии трёхфазной системы напряжений; U_{m2} – амплитуда симметричной составляющей обратной последовательности; α – аргумент НОП по отношению к НПП (рис. 2).

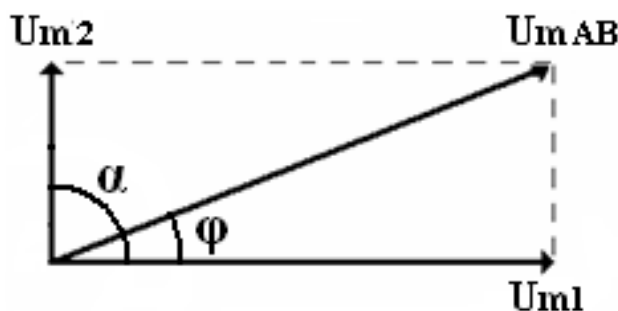


Рис. 2 – Векторная диаграмма симметричных составляющих линейного напряжения АВ

Пусть аргумент НОП измеряется относительно симметричной составляющей прямой последовательности линейного напряжения U_{AB} . На векторной диаграмме (рис. 2) показаны симметричные составляющие линейного напряжения U_{AB} , где φ – его начальная фаза.

Так как на выходе МВ составляющая прямой последовательности представляется постоянным напряжением [6], непосредственно измерить угол α невозможно. Однако можно измерить угол, близкий по своему значению к углу α . Для этого за базу измерения принимается двухполупериодное выпрямленное линейное напряжение U_{dAB} , разложение которого в ряд Фурье даёт

$$u_{dAB} = \frac{4}{\pi} U_{mAB} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cos(2\omega t + 2\varphi) - \frac{1}{15} \cos(4\omega t + 4\varphi) - \dots \right]. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что сдвиг по фазе между вторыми гармониками выходного напряжения МВ и двухполупериодного выпрямленного напряжения фазы АВ близок к искомому углу α (измеренное значение):

$$\alpha' = \alpha - 2\varphi. \quad (3)$$

Однако в этом случае абсолютная методическая погрешность измерения угла α весьма велика:

$$\Delta' = \alpha' - \alpha = -2\varphi. \quad (4)$$

Анализ векторной диаграммы показывает, что, например, при $\varepsilon = 0,1$ максимальная погрешность составляет 12° . Снижение методической погрешности достигается путем введения корректирующего сигнала. Из векторной диаграммы, принимая во внимание, что $\varepsilon = U_{m2}/U_{m1}$, следует

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi = \frac{\varepsilon \sin \alpha}{1 + \varepsilon \cos \alpha}; \\ \sin \varphi = \frac{\varepsilon \sin \alpha}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \alpha}}; \\ \cos \varphi = \frac{1 + \varepsilon \cos \alpha}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \alpha}}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда уравнение (3) с учётом (5) принимает вид:

$$\alpha' = \alpha - 2 \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \sin \alpha}{1 + \varepsilon \cos \alpha}, \quad (6)$$

где для встречающихся на практике значений несимметрии ($\varepsilon < 0,1$) можно принять:

$$(1 + \varepsilon \cos \alpha) \approx 1; \quad \operatorname{arctg} X \approx X; \quad \sin \alpha \approx \sin \alpha'.$$

Тогда с учётом принятого допущения выражение (6) принимает вид:

$$\alpha' \approx \alpha - 2\varepsilon \sin \alpha', \quad (7)$$

где $2\varepsilon \sin \alpha'$ – корректирующий сигнал.

Замена здесь, с учётом (3), приближенного равенства абсолютным предполагает также замену α на α'' , где последнее – измеренное значение угла с коррекцией:

$$\alpha'' = \alpha' + 2\varepsilon \sin \alpha' = \alpha - 2\varphi + 2\varepsilon \sin \alpha'. \quad (8)$$

Абсолютная методическая погрешность измерения при введении коррекции с учетом (3), (5) и (8) определяется выражением:

$$\Delta'' = \alpha'' - \alpha = \frac{2\varepsilon(1 - \varepsilon^2) \sin \alpha}{1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \alpha} - 2 \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \sin \alpha}{1 + \varepsilon \cos \alpha}. \quad (9)$$

Максимальное значение этой погрешности определяется из условия $d\Delta''/d\alpha = 0$, которое с учетом выражений (5) после ряда преобразований принимает вид:

$$2 \cos^2 \alpha + \varepsilon(3 + \varepsilon^2) \cos \alpha - (1 - 3\varepsilon^2) = 0 \quad (10)$$

и решение этого уравнения:

$$\cos \alpha = \pm 0,25 \sqrt{8 - 15\varepsilon^2 + 6\varepsilon^4 + \varepsilon^6} - 0,75\varepsilon - 0,25\varepsilon^3. \quad (11)$$

Таким образом, подстановка полученного выражения для $\cos \alpha$ в выражение (9) позволяет получить максимальное значение абсолютной методической погрешности измерения аргумента НОП при наличии коррекции.

Характер зависимости модуля этой погрешности от коэффициента несимметрии исследуемой системы напряжений приведен на рис. 3. Из расчётов и графиков следует, что введение коррекции значительно снижает погрешность измерения. Так, при $\varepsilon = 0,1$ модуль абсолютной максимальной методической погрешности снижается с $|\Delta'_{\max}| = 12^\circ$ без коррекции до $|\Delta''_{\max}| = 0,6^\circ$ с коррекцией, то есть в 20 раз. Для нормированного допустимого в сетях уровня несимметрии $\varepsilon = 0,02$ указанная погрешность снижается с $|\Delta'_{\max}| = 2,4^\circ$ без коррекции до $|\Delta''_{\max}| = 0,023^\circ$ с коррекцией, то есть приблизительно в 100 раз. Очевидно, что со снижением уровня несимметрии исследуемых напряжений эффективность коррекции повышается. Таким образом, приведенная методическая погрешность при максимальном уровне измеряемой несимметрии исследуемых напряжений $\varepsilon = 0,1$ и пределе измерения 180° не превышает 0,33%, что вполне допустимо.

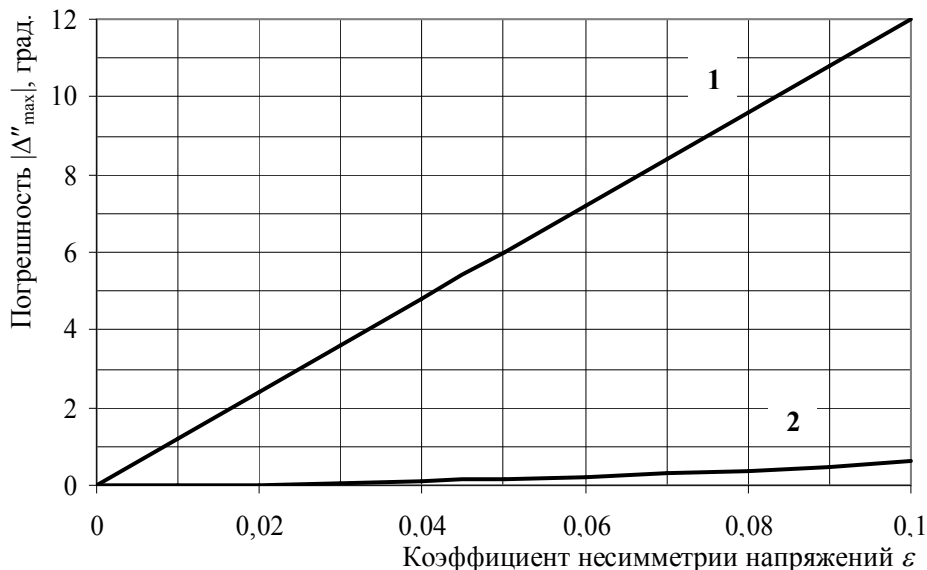


Рис. 3 – Зависимость модуля максимальной абсолютной методической погрешности измерения аргумента напряжения обратной последовательности от коэффициента несимметрии: 1 – без коррекции; 2 – с коррекцией

Выводы

Показана возможность измерения аргумента симметричной составляющей обратной последовательности в методе многофазного выпрямления. Предложено измерять аргумент НОП как фазовый сдвиг между напряжением второй гармоники выпрямленного линейного напряжения исследуемой трёхфазной системы напряжений и напряжением второй гармоники выходного сигнала многофазного выпрямителя. Для снижения погрешности измерения аргумента НОП рекомендуется использовать корректирующий сигнал, пропорциональный коэффициенту несимметрии исследуемой системы и синусу угла, полученного как результат предварительного измерения. В этом случае искомая величина определяется как сумма предварительного результата измерения и корректирующего сигнала. Введение корректирующего сигнала позволяет значительно снизить погрешность конечного результата измерения. Погрешность также зависит от уровня несимметрии – при снижении несимметрии исследуемых напряжений погрешность измерения аргумента НОП снижается.

Список использованных источников:

1. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М. : Энергия, 1977. – 137 с.
2. Тесик Ю.Ф. Имплементация дифференциального метода в средствах измерения параметров трёхфазных сетей / Ю.Ф. Тесик, О.Л. Карасинский, С.Ю. Пронзалева // Праці Інституту електродинаміки національної академії наук України. – 2015. – № 41. – С. 90-95.
3. Шидловский А.К. Таблицы симметричных составляющих / А.К. Шидловский, А.Д. Музыченко. – Киев : Наукова думка, 1976. – 204 с.
4. Леонов В.В. Погрешность обыкновенного косвенного измерения напряжения обратной последовательности / В.В. Леонов, А.Н. Зиновченко // Известия вузов СССР. Энергетика. – 1982. – № 6. – С. 25-29.
5. Будённый В.Ф. Измеритель несимметрии трёхфазных напряжений ИНН-2 / В.Ф. Будённый, В.А. Витковский, А.Д. Музыченко // Проблемы технической электродинамики. – 1977. – № 62. – С. 80-83.
6. Зиновченко А.Н. Оценка погрешности измерения несимметрии трёхфазных напряжений / А.Н. Зиновченко, Г.Г. Гаркуша, И.В. Сагиров // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. – Херсон : 8-а Міжнародна науково-практична конференція. – 2017. – С. 77-81.
7. А.с. 1218341 СССР, МПК G 01 R 29/16. Способ измерения фазового угла симметричной составляющей обратной последовательности несимметричной системы напряжений / А.Н. Зиновченко. – № 3487899/24-21; заявл.02.09.82; опубл. 15.03.86, Бюл. № 10. – 3 с.

References:

1. Zhezhelenko I.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii na promyshlennykh predpriiatiakh* [Indicators of the quality of electricity in industrial enterprises]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 137 p. (Rus.)
2. Tesik Yu.F., Karasinskii O.L., Pronzeleva S.Iu. Implementatsiia differentsial'nogo metoda v sredstvakh izmereniia parametrov trekhfaznykh setei [Implementation of differential method in facilities of measuring of parameters of three-phase networks]. *Praci Instytutu elektrodynamiky nacional'noi akademii nauk Ukrainy – Proceedings of the Institute of electrodynamics national academy of sciences of Ukraine*, 2015, no.41, pp. 90-95. (Rus.)
3. Shidlovskii A.K., Muzychenko A.D. *Tablitsy simmetrichnykh sostavliaiushchikh* [Tables of symmetric components]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 204 p. (Rus.)
4. Leonov V.V., Zinovchenko A.N. Pogreshnost' obyknovennogo kosvennogo izmereniia napriazheniia obratnoi posledovatel'nosti [Accuracy of an ordinary indirect measurement of the voltage of an inverse sequence]. *Izvestiia vuzov SSSR. Energetika – News of Universities of the USSR. Power engineering*, 1982, no.6, pp. 25-29. (Rus.)
5. Budennyi V.F. Vitkovskii V.A., Muzychenko A.D. Izmeritel' nesimmetrii trekhfaznykh napriazhenii INN-2 [Meter of an asymmetry of the three-phase voltages INN-2]. *Problemy tekhnicheskoi elektrodinamiki – Problems of Technical Electrodynamics*, 1977, no.62, pp. 80-83. (Rus.)
6. Zynovchenko A.N., Garkusha G.G., Sagirov I.V. *Otsenka pogreshnosti izmereniia nesimmetrii trekhfaznykh napriazhenii. Anotatsii dopovidei 8 Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Suchasni energetichni ustanovki na transporti, tekhnologii ta obladnannia dlia ikh obslugovuvannia»* [Estimation of the measurement error of asymmetry of three-phase voltages. Abstracts of 8th Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern power plants in transport and technologies and maintenance equipment»]. Kherson, 2017, pp. 77-81. (Rus.)
7. Zynovchenko A.N. *Sposob izmereniia fazovogo ugla simmetrichnoi sostavliaiushchei obratnoi posledovatel'nosti nesimmetrichnoi sistemy napriazhenii* [Method of the measuring the phase angle of a symmetric constituent of negative sequence of an asymmetric voltage system]. Patent USSR, no.1218341, 1986. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 02.10.2017