

СПОСІБ ЦИФРОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГ

Д.К. Маков, канд.техн.наук, А.А. Щерба, чл.-кор. НАН України
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
 пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
makov47@freenet.com.ua

Представлено спосіб цифрового визначення напруги нульової послідовності трифазної системи напруг. Запропоновано використовувати наступну послідовність операцій: вибрати частоту вимірювання миттєвих значень фазних напруг в $3n$ раз більшу (де n – ціле число, більше 64) від основної частоти напруги мережі; виконати аналого-цифрове перетворення миттєвих значень фазних напруг та запам'ятати отримані коди; послабити напруги прямої і зворотної послідовностей складанням отриманих кодів; виділити коди напруги основної частоти. Реалізація способу націлена на підвищення точності вимірювання і простоту реалізації. Бібл. 4.

Ключові слова: якість електроенергії, трифазна напруга, симетричні складові, нульова послідовність, вимірювання.

Задача забезпечення необхідної якості електроенергії є однією з найбільш важливих проблем сучасної електроенергетики. Тому розробка нових більш ефективних способів вимірювання показників якості електроенергії є важливим і актуальним електротехнічним напрямком.

Відповідно до Держстандарту України № 13109-97 [3] одним із показників якості електроенергії є коефіцієнт асиметрії напруг по нульовій послідовності. Цей показник визначається напругою нульової послідовності (ННП) основної частоти трифазної системи напруг. Згідно зі стандартом нормально допустиме значення цього показника складає до 2% (при абсолютній похибці до $\pm 0,5\%$). Тобто при наявності 220 В напруги прямої послідовності (НПП) основної частоти необхідно виділити 4,4 В ННП з абсолютною похибкою до $\pm 1,1$ В. Причому ННП і НПП мають однакову частоту і відрізняються тільки послідовністю фаз.

Для визначення показників якості електроенергії використовують методи з аналого-цифровим перетворенням миттєвих значень фазних напруг трифазної мережі і наступною математичною обробкою отриманих кодів. При використанні таких методів першою операцією є підстроювання частоти аналого-цифрового перетворення миттєвих значень трифазної напруги до основної частоти електричної напруги мережі. Після цього треба виконати дві лінійні операції: виділити фазні напруги основної частоти та виділити ННП. Внаслідок лінійності цих операцій послідовність їхнього виконання може бути довільною, але використання послідовності операцій, наведеної вище, слід вважати менш вдалим. При попередньому цифровому виділенні основної гармонічної складової фазних і міжфазних напруг для отримання ННП має місце непряме вимірювання. При цьому вимоги до точності виділення фазних напруг основної частоти повинні бути досить високими. В той же час в роботах [1,2] пропонується використання саме такої послідовності операцій. Для визначення ННП з необхідною точністю треба використовувати третю операцію (цифрове виділення ННП), яка перетворює коди з великими неінформативними складовими НПП, більшими в 25–50 разів за інформативні значення ННП. Таким чином, доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю, що є недоліком для реалізації високої точності.

У роботі [3] запропоновано ННП розраховувати за формулою

$$U_{0(1)} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right]^2 + [E - 3F]^2},$$

$$E = \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(U_{AB(1)} - \frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2}; \quad F = \sqrt{4U_{B(1)}^2 - \left(U_{AB(1)} - \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2},$$

де $U_{0(1)}$ – ННП основної частоти, $U_{AB(1)}$, $U_{BC(1)}$, $U_{CA(1)}$ – міжфазні напруги основної частоти, $U_{A(1)}$, $U_{B(1)}$ – фазні напруги основної частоти.

Таким чином, необхідно з високою точністю виділити напруги основної частоти трьох міжфазних і двох фазних напруг, які містять домінуючу неінформативну НПП; виконати розрахунки по досить складному алгоритму.

У роботі [1] описано спосіб з використанням представленої вище послідовності дій для непрямого вимірювання ННП основної частоти і додатковим розкладанням напруг трифазного кола на ортогональні складові симетричних послідовностей. Для цього способу характерні ті самі особливості, описані вище.

У випадку визначення ННП основної частоти домінуючою неінформативною складовою є не просто напруга основної частоти, а саме НПП основної частоти. Тому необхідно послабляти не напругу основної частоти, а НПП основної частоти. При цьому визначення ННП суттєво полегшується.

У статті пропонується новий спосіб цифрового визначення ННП трифазної системи напруг з високою точністю. Після вибору та підстроювання частоти вимірювання виконується аналого-цифрове перетворення трьох фазних напруг із запам'ятовуванням визначених кодів [4]. Наступним складанням кодів практично повністю усувається домінуюча неінформативна НПП основної частоти і збільшуються втричі ННП основної частоти. Потім виділяються коди напруги основної частоти.

Розглянемо загальний випадок наявності в трифазній мережі ННП, НПП та напруги зворотної послідовності (НЗП) k -ої гармонічної складової. Фазні напруги мають однакову форму. Миттєві значення $u_{A(k)}, u_{B(k)}, u_{C(k)}$ фазних напруг A, B, C k -ої гармонічної складової можна відповідно записати

$$\begin{aligned} u_{A(k)} &= U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin k\omega t + U_{2(k)m} \sin k\omega t, \\ u_{B(k)} &= U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k), \\ u_{C(k)} &= U_{0(k)m} \sin k\omega t + U_{1(k)m} \sin(k\omega t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(k\omega t - 120^\circ \times k), \end{aligned}$$

де $U_{0(k)m}, U_{1(k)m}, U_{2(k)m}$ – максимальні значення симетричних складових відповідно ННП, НПП, НЗП k -ої гармонічної складової.

Частота f_g вимірювань кодів миттєвих значень фазних напруг A, B, C підстроюється блоком підстроювання частоти БПЧ до основної частоти f_m напруги електричної мережі: $f_g = 3nf_m$, де n – ціле число, наприклад, $n = 120$. Період напруги основної частоти $T_m = 1/f_m = 3n/f_g = 3n\Delta t$. Фазні напруги A, B, C подаються через вхідні блоки на входи АЦП. На виходах АЦП отримуються А-, В-, С- послідовності кодів миттєвих значень фазних напруг трифазної електричної мережі. Ці коди запам'ятовуються поспіль у комірки пам'яті відповідного для кожної напруги регістру РА, РВ, РС. Вміст i -ої комірки регістрів РА, РВ, РС від напруги k -ої гармонічної складової можна представити виразами

$$\begin{aligned} N_A(ik\Delta t) &= K_{1k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t), \\ N_B(ik\Delta t) &= K_{2k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k)), \\ N_C(ik\Delta t) &= K_{3k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k)), \end{aligned}$$

де K_{1k}, K_{2k}, K_{3k} – коефіцієнти передачі вхідних каскадів і АЦП відповідно фазних напруг A, B, C для напруги k -ої гармонічної складової.

У цьому способі широко використовується особливість трифазних напруг

$$U_{1(1)m} \sin \omega i\Delta t + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 240^\circ) + U_{1(1)m} \sin(\omega i\Delta t - 120^\circ) = 0.$$

Саме тому в цифровому вигляді усуваються НПП, НЗП основної частоти і більшості вищих гармонічних складових. Для цього коди з перших комірок пам'яті регістрів РА, РВ, РС складаються в суматорі С_{м1}. Записуємо отриманий результат в першу комірку пам'яті регістра сум РС_м. Переходимо до других комірок пам'яті регістрів РА, РВ, РС і повторюємо пропонувані дії. Результат записуємо в другу комірку пам'яті регістра сум РС_м т.п. В регістрі сум РС_м накопичується послідовність $3n$ кодів результатів складань. Це коди миттєвих значень отриманої в результаті складання результуючої напруги. Від напруги k -ої гармонічної складової ($K_{1k} = K_{2k} = K_{3k}$) в i -ій комірці регістра сум РС_м отримаємо

$$\begin{aligned} N(ik\Delta t) &= N_A(ik\Delta t) + N_B(ik\Delta t) + N_C(ik\Delta t) = K_{1k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{2(k)m} \sin \omega ik\Delta t) + \\ &+ K_{2k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k)) + \\ &+ K_{3k}(U_{0(k)m} \sin \omega ik\Delta t + U_{1(k)m} \sin(\omega ik\Delta t + 120^\circ \times k) + U_{2(k)m} \sin(\omega ik\Delta t - 120^\circ \times k)). \end{aligned} \quad (1)$$

Тоді результат в i -ій комірці регістра сум РС_м від напруг k_1 -ої та k_2 -ої гармонічних складових ($k_1 = 3s + 1; k_2 = 3s + 2, s = 0, 1, 2, 3, \dots$), $N(ik_1\Delta t) = 3K_{1k_1} U_{0(k_1)m} \sin \omega ik_1\Delta t; N(ik_2\Delta t) = 3K_{1k_2} U_{0(k_2)m} \sin \omega ik_2\Delta t$; від напруг k_3 -ої гармонічної складової ($k_3 = 3s + 3, s = 0, 1, 2, 3, \dots$) буде

$$N(ik_3\Delta t) = 3K_{1k_3}(U_{0(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t + U_{1(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t + U_{2(k_3)m} \sin \omega ik_3\Delta t).$$

Таким чином, виміряна результуюча напруга стає «чистішою». Без використання традиційної частотної фільтрації отримано ННП основної частоти зі зменшенням багатьох вищих гармонік та усуненням НПП і НЗП основної частоти і більшості вищих гармонік. Причому НПП основної частоти є домінуючою (в 30–50 раз більшою від ННП) і неінформативною. Для отримання ННП основної частоти з виразу (1) треба виділити коди напруги основної частоти. При необхідності можливо знайти ННП гармонічних складових з номерами 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11 і т.п.

Подальші дослідження планується зосередити на розробці найбільш вдалих методів коригування похибок від неідентичності каналів фазних напруг для підвищення точності цифрового виділення симетричних

складових трифазної напруги, які характеризують найбільш важливі показники якості електроенергії трифазної електромережі.

1. А.С. СССР № 1117541. Способ разложения напряжений многофазной цепи на ортогональные составляющие симметричных последовательностей / А.К.Шидловский, С.Г.Таранов, В.В.Брайко, И.П.Гринберг, О.Л.Карасинский, Ю.Ф.Тесик, Р.Б.Хусид. – Бюлл. изобретений № 37. – 1984.

2. А.С. СССР № 737882. Измеритель симметричных составляющих трехфазной сети / В.П.Гапченко, О.Г.Гриб, М.Я.Мици, В.Н.Чинков. – Бюлл. изобретений № 20. – 1980.

3. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – 35 с.

4. Патент України UA №72534. Спосіб цифрового виміру симетричних складових напруг трифазної мережі / А.А.Щерба, К.Л.Серпілін, Д.К.Маков // Промислова власність. – 2012. – Бюлл. №16.

УДК 621.317.789

СПОСОБ ЦИФРОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Д.К. Маков, канд.техн.наук, А.А. Щерба, чл.-кор. НАН України,
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. makov47@freenet.com.ua

Представлен способ цифрового определения напряжения нулевой последовательности трехфазной системы напряжений. Предложено использовать следующую последовательность операций: выбрать частоту измерения мгновенных значений фазных напряжений в $3n$ раз большую (где n – целое число, больше 64), чем основная частота напряжения сети; выполнить аналого-цифровое преобразование мгновенных значений фазных напряжений и запомнить полученные коды; ослабить наращения прямой и обратной последовательностей сложением полученных кодов; выделить коды напряжения основной частоты. Реализация способа направлена на повышение точности измерения и простоту реализации. Библ. 4.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, симметричные составляющие трехфазной системы напряжений, напряжение нулевой последовательности.

METHOD OF DIGITAL DETERMINATION OF A ZERO PHASE-SEQUENCE VOLTAGE OF THREE-PHASE SYSTEM OF VOLTAGES

D.K. Makov, A.A. Shcherba
The National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. makov47@freenet.com.ua

Presented method of digital determination of voltage of a zero phase-sequence of the three-phase system of voltages uses the following steps: tuning the frequency of reading (aliquot 3) instantaneous values of phase voltages to the network's fundamental frequency; analog-digital conversion of instantaneous values of network's three phase voltages; selection of codes containing the desired symmetric sequence; selection of fundamental frequency voltage's codes. This method is simpler and more precise comparing to those well-known. References 4.

Keywords: indexes of quality of electric power, symmetric components of the three-phase system of voltages, voltage of a zero phase-sequence.

1. Patent of USSR № 1117541. Method of decomposition of voltages of multiphase network on ortogonal constituents of symmetric sequences / A.K. Shidlovskii, S.G. Taranov, V.V. Braiko, I.P. Grinberg, O.L. Karasinskii, Yu.F. Tesik, R.B. Husid // Bulletin izobretenii. – 1984. – №37. (Rus)

2. Patent of USSR № 737882. Measuring device of symmetric sequences of three-phase network / V.P.Gapchenko, O.G.Grib, M.Ya.Mints, V.N.Chinkov // Bulletin izobretenii. – 1980. – №20. (Rus)

3. Standart of Ukraine 13109-97 “Norms of quality of electric energy are in the systems of power supply of generalpurpose”. – 35 p. (Rus)

4. Patent of Ukraine UA № 72534. Method of the digital measuring of symmetric sequences of voltage of three-phase network / A.A. Shcherba, K.L. Serpilin, D.K. Makov // Promyslova vlasnist. – 2012. – №16. (Ukr)

Надійшла 07.02.2014