

Метод визначення напруги нульової послідовності трифазної мережі з корекцією похибки

А.А. Щерба¹, Д.К. Маков², В.І. Чибеліс²

¹ Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, 03680, Київ-57, Україна
sh1ch@ied.org.ua

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр. Перемоги, 37, 03680, Київ-55, Україна
makodk47@gmail.com

Анотація

Подано новий метод аналого-цифрового визначення напруги симетричних складових по нульовій послідовності (ННП) основної частоти (ОЧ), який реалізовано використанням операцій підстроювання, кратного трьом, частоти вимірювання миттєвих значень трифазної напруги до ОЧ мережі електроживлення, аналого-цифровим перетворенням АЦП_А, АЦП_В, АВС_С миттєвих значень трифазної напруги із запам'ятовуванням отриманих кодів. Отримані коди в кожний період ОЧ заносять у відповідні регістри RA, RB, RC. При цьому обертаються по кільцю з фазним кроком 120° тільки складові похибки від розкиду параметрів фазних каналів А, В, С.

Після третього вимірювального періоду ОЧ використовується алгебраїчне складання кодів відповідних миттєвих значень трьох різних періодів послідовних однакових часових відліків, що корегує похибку від розкиду параметрів фазних каналів А, В, С, а шукані коди ННП ОЧ потроюються. Подальші складання послаблюють домінуючу неінформативну напругу симетричних складових по прямій послідовності (НПП) ОЧ, неінформативну напругу симетричних складових по зворотній послідовності (НЗП) ОЧ та більшість вищих гармонік, а шукані коди ННП ОЧ знову потроюють. Останньою операцією є виділення гармоніки ОЧ з послідовності сум отриманих кодів, що підвищує точність та спрощує реалізацію.

Ключові слова: напруга симетричних складових; пряма та нульова послідовності.

Отримано: 17.02.2020

Відредаговано: 05.03.2020

Схвалено до друку: 10.03.2020

Вступ

Використання в трифазних електричних мережах силових електротехнічних пристроїв з напівпровідниковими комутаторами для модуляції електричного струму [1], накопичувальними лінійними і нелінійними конденсаторами [2], стохастичними і нелінійними навантаженнями [3] та їх несиметричним розподілом по фазах [4] суттєво погіршує показники якості електроенергії. Відповідно до вимог нормативних документів [5, 6] у таких мережах необхідно покращувати такі статичні і динамічні показники якості електроенергії, як небаланси напруги (нормуються НЗП і ННП ОЧ) та швидкість і розмір їх змінення, які визначаються змінням лінійних (фазних) напруг ОЧ.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Серед важливих показників якості електроенергії (ПЯЕ) трифазних електромереж, нормованих у нормативних документах [5, 6], є 4 показники, які характеризуються напругами симетричних складових: один по зворотній послідовності (НЗП), один по нульовій послідовності (ННП) і два – по

прямій послідовності (НПП). Чотири перших статичні, останній – динамічний. Визначати ці ПЯЕ практично кожного періоду напруги основної частоти (ОЧ) можуть тільки спеціалізовані аналого-цифрові прилади (САЦП).

В САЦП для визначення показників якості електроенергії використовують методи з аналого-цифровим перетворенням миттєвих значень фазних напруг трифазної мережі й наступною математичною обробкою отриманих кодів. Таким чином, доводиться використовувати досить складні розрахунки з великою розрядністю, що є недоліком для реалізації високої точності. Це опосередковані методи вимірювання.

У [5] запропоновано використовувати теж опосередкований достатньо складний метод вимірювання.

Відомий спосіб розкладання напруги багатофазного кола на ортогональні складові симетричних послідовностей є також складним, так як при середньоквадратичному значенні похибки γ , виміру кожного миттєвого значення фазної напруги і припущенні незалежності цих вимірів (найкра-

ший для точності випадок для ННП) сумарна похибка виміру миттєвого значення $v_0(t_i)$ дорівнює $\sqrt{3} \gamma_i$. Сумарна похибка виміру миттєвого значення $\delta_0(t_i)$ дорівнює $\sqrt{3} \gamma_i$, а сумарна похибка вимірювання миттєвого значення результату вимірювання ННП дорівнює $\sqrt{6} \gamma_i$. Алгоритм вимірювання ускладнюється необхідністю попереднього виділення $b_0(t_i), c_0(t_i)$ та виділенням 6 разів кодів основної гармоніки [7]. Крім цього використання опосередкованого вимірювання з обробкою домінуючих неінформативних лінійних і фазних напруг НПП ОЧ ускладнює отримання високої точності й потребує значної розрядності цифрових блоків.

Задача визначення ННП ОЧ значно спрощується, якщо після підстроювання частоти вимірювання миттєвих значень спочатку алгебраїчним складанням відповідних кодів миттєвих значень фазних напруг трифазної мережі значно

послаблюють домінуючу неінформативну НПП ОЧ, також НЗП ОЧ, більшість напруг вищих гармонічних складових. А потім виділяють ННП ОЧ.

Саме таку послідовність операцій запропоновано в способі [8], в якому використовують аналого-цифрове перетворення миттєвих значень фазних напруг U_A, U_B, U_C у моменти часу t_i , з наступним запам'ятовуванням отриманих кодів $u_A(t_i), u_B(t_i), u_C(t_i)$:

$$u_A(t_i) = U_{m1(1)} \sin \omega t_i + U_{m0(1)} \sin \omega t_i,$$

$$u_B(t_i) = U_{m1(1)} \sin(\omega t_i - 120^\circ) + U_{m0(1)} \sin \omega t_i,$$

$$u_C(t_i) = U_{m1(1)} \sin(\omega t_i + 120^\circ) + U_{m0(1)} \sin \omega t_i,$$

де $U_{m1(1)}, U_{m0(1)}$ – максимальні значення відповідно НПП і ННП ОЧ фазних напруг U_A, U_B, U_C .

Після складання відповідних кодів миттєвих значень трьох фазних напруг отримують:

$$u_{A(1)}(t_i) + u_{B(1)}(t_i) + u_{C(1)}(t_i) = U_{m1(1)} \sin \omega t_i + U_{m1(1)} \sin(\omega t_i - 240^\circ) + U_{m1(1)} \sin(\omega t_i - 120^\circ) + 3U_{m0(1)} \sin \omega t_i = 3U_{m0(1)} \sin \omega t_i.$$

При цьому втричі збільшуються коди миттєвих значень шуканої ННП ОЧ трифазної напруги. Потім послаблюють напругу вищих гармонічних складових. Результати заносять у реєстри RA, RB, RC. Далі виділяють ННП ОЧ. Це є пряме вимірювання ННП ОЧ.

Недоліком цього способу, як і інших розглянутих вище, є те, що при їх реалізації перед АЦП необхідно включати три каскадно з'єднані аналогові блоки – для виконання гальванічної розв'язки, масштабного перетворення і фільтрації (виділення) низьких частот для обмеження похибки від дискретизації. Причому вимоги до сумарного розкиду параметрів коефіцієнтів передачі цих блоків і АЦП досить високі – порядку 0,1 %, які складно досягти тільки покращенням параметрів кожного блоку. Тому необхідна корекція цієї похибки.

Метою статті є розробка методу визначення напруги нульової послідовності з корекцією похибки від розкиду параметрів фазних каналів. Суть методу пояснюється рис. 1 – рис. 6. Мета досягається використанням трьох вимірювальних тактів, під час яких одночасно переключують по кільцю входи і виходи аналого-цифрових фазних каналів із фазним кутом додатково відповідно 120° і -120° . При цьому обертаються по кільцю з фазним кроком 120° тільки складові похибки від

розкиду параметрів фазних каналів А, В, С. Після третього вимірювального періоду ОЧ виконується алгебраїчне складання кодів відповідних миттєвих значень трьох різних періодів поспіль, що корегує складові похибки від розкиду параметрів фазних каналів А, В, С та підвищує точність вимірювання ННП ОЧ.

Кожний із трьох каналів вимірювача ННП містить каскадно з'єднані аналогові вхідні блоки: аналоговий комутатор ($K1 \div 3$), схему гальванічної розв'язки ($СГР1 \div 3$), схему масштабного перетворення ($СМП1 \div 3$), фільтр низьких частот ($ФНЧ1 \div 3$) і аналого-цифровий перетворювач (АЦП 1-3), цифровий комутатор ($K4 \div K6$).

Такі трифазні блоки разом слід розглядати як лінійний шестиполіусник із трьома входами і трьома виходами. В загальному випадку до вхідних затискачів а, в, с трифазного блока з розкидом параметрів фазних каналів включається несиметрична трифазна напруга основної частоти, яку можна подати у вигляді суми симетричних систем

$$\text{НПП ОЧ} - \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \text{ і ННП ОЧ} - \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$a = \exp(j2\pi/3), \quad j = \sqrt{-1}.$$

Використовуючи принцип накладання в зв'язку з лінійністю схеми, вираз для напруги на виходах такого трифазного блока можна записати як

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix} = \dot{\alpha}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{k}_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де: $\dot{\alpha}_\Sigma$ – коефіцієнт передачі трифазним блоком відповідно НПП ОЧ $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$, $|\dot{\alpha}_\Sigma| \ll 1$, $\dot{\gamma}_\Sigma$ – коефіцієнт перетворення трифазним блоком НПП ОЧ $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ у відповідно НЗП ОЧ $\dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$, $|\dot{\gamma}_\Sigma| \ll 1$, $|\dot{U}_{1(1)}| \gg |\dot{U}_{0(1)}|$ за наявності розкиду параметрів фазних каналів, \dot{k}_0 – коефіцієнт передачі трифазним блоком НПП.

Жорсткі вимоги до розкиду параметрів трифазного блока виникають при визначенні НПП ОЧ, тому цей випадок розглянемо більш детально. Перший доданок у (1) показує, у скільки разів (у $1/|\dot{\alpha}_\Sigma|$ разів) зменшується НПП ОЧ, а другий – у скільки разів (у $1/|\dot{\gamma}_\Sigma|$ разів) зменшується НПП ОЧ і внаслідок розкиду параметрів частково перетворюється на НЗП ОЧ. Найбільший внесок у похибку від розкиду параметрів вносить другий доданок $\dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$, який за модулем може бути

сумірним або навіть більшим за третій і єдиний інформативний доданок $\dot{k}_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ у (1).

Другий доданок має однакову частоту з корисним сигналом, і при подальшому перетворенні відокремити цю складову похибки і зменшити її вплив на результат буде складно.

При використанні цього методу частота вимірювання f_B миттєвих значень фазних напруг підстроюється до ОЧ f_{50} електромережі: $f_B = 3nf_{50}$ (число вимірювань миттєвих значень дорівнює $3n$, $n \geq 64$).

Протягом трьох періодів напруги ОЧ (перші три такти) коди миттєвих значень трьох фазних напруг записують у регістри пам'яті.

1-й такт. Через аналогові комутатори $K1 \div 3$ до фазних входів а, в, с відповідно схем гальванічної розв'язки $СГР1 \div 3$ протягом першого періоду підключають фазні напруги електромережі відповідно А, В, С (рис. 1).

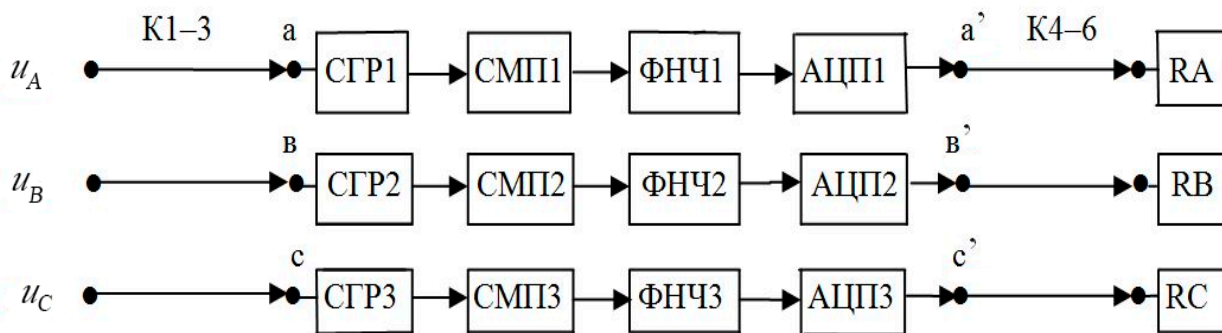


Рис. 1. Блок-схема першого вимірювального періоду

Коди миттєвих значень з виходів а', в', с' відповідно аналого-цифрових перетворювачів АЦП1 ÷ 3 через цифрові комутатори $K4 \div K6$ заносять у регістри пам'яті відповідно RA, RB, RC. Результат вимірювання для вектора (рис. 2) однофазної напруги \dot{U}_{1out} дорівнює:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_1 = \dot{\alpha}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{k}_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

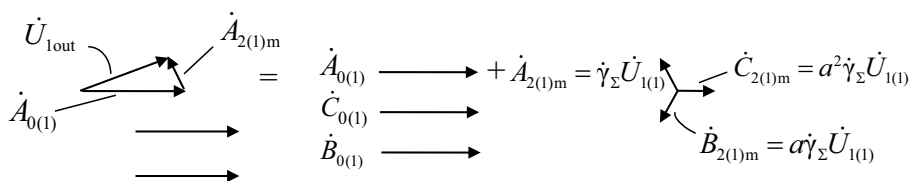


Рис. 2. Векторна діаграма першого вимірювального періоду

2-й такт. Через комутатори К1÷3 до фазних входів а, в, с схем гальванічної розв'язки СГР1÷3 протягом другого періоду підключають фазні напруги електромережі відповідно С, А, В.

Коди миттєвих значень з виходів а', в', с' відповідно аналого-цифрових перетворювачів АЦП1÷3 через цифрові комутатори К4÷К6 заносять у регістри пам'яті відповідно RC, RA, RB (рис. 3).

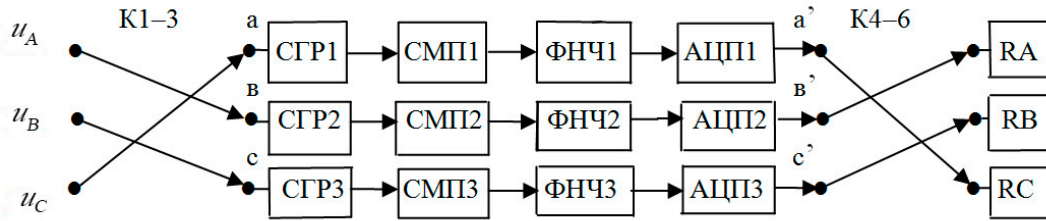


Рис. 3. Блок-схема другого вимірювального періоду

Результат вимірювання для вектора (рис. 4) однофазної напруги \dot{U}_{2out} дорівнює:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_2 = \dot{\alpha}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + a \cdot \dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{k}_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

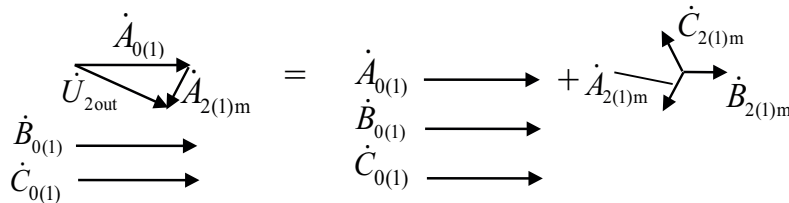


Рис. 4. Векторна діаграма другого вимірювального періоду

3-й такт. Через комутатори К1÷3 до фазних входів а, в, с схем гальванічної розв'язки СГР1÷3 протягом третього періоду підключають фазні напруги електромережі відповідно В, С, А. Коди миттєвих значень з виходів а', в', с'

відповідно аналого-цифрових перетворювачів АЦП1÷3 через цифрові комутатори К4÷К6 заносять у регістри пам'яті відповідно RB, RC, RA (рис. 5). Результат вимірювання для вектора (рис. 6) однофазної напруги \dot{U}_{3out} дорівнює:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_3 = \dot{\alpha}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + a^2 \dot{\gamma}_\Sigma \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} + \dot{k}_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

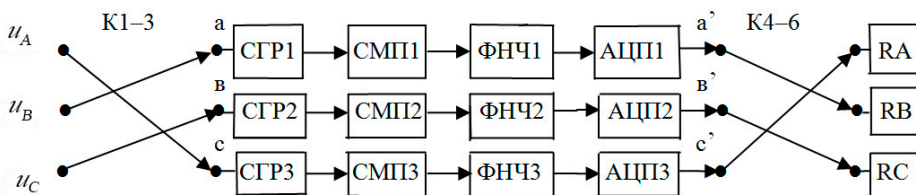


Рис. 5. Блок-схема третього вимірювального періоду

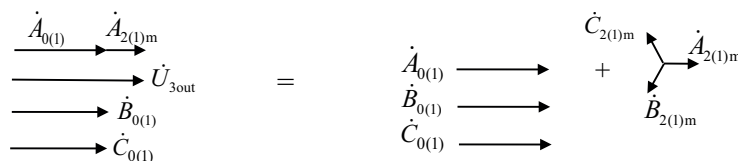


Рис. 6. Векторна діаграма третього вимірювального періоду

Такою комутацією фазних каналів досягається обертання по кільцю (з кроком по 120°) векторної похибки від розкиду параметрів фазних каналів. А вектори ННП ОЧ електромережі не обертаються. При складанні трьох векторів, які обертаються з кроком по 120°, їх сума дорівнює 0.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_{\Sigma} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_1 + \begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_2 + \begin{pmatrix} \dot{U}_{a\Sigma} \\ \dot{U}_{b\Sigma} \\ \dot{U}_{c\Sigma} \end{pmatrix}_3 = 3 \left(\dot{\alpha}_{\Sigma} \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + k_0 \dot{U}_{0(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right).$$

Отриманий результат містить потроєне значення шуканої ННП ОЧ, похибка від розкиду параметрів фазних каналів практично повністю корегується.

5-й такт. Складають відповідні коди напруг трьох фаз:

$$\dot{U}_{\Sigma 1} \approx 3(\dot{\alpha}_{\Sigma} \dot{U}_{1(1)}(1+a+a^2) + 3k_0 \dot{U}_0) \approx 9k_0 \dot{U}_0.$$

6-й такт. Далі виділяється напруга ОЧ.

Отриманий розмір ННП ОЧ майже на порядок більший від вхідного. Вплив ННП ОЧ і НЗП ОЧ практично відсутній.

4-й такт. Складають по три миттєві значення відповідних часових відліків, які накопичені в регістрах RA, RB, RC протягом трьох попередніх періодів ОЧ від фазних напруг відповідно А, В, С окремо. Результати складань зберігаються у регістрах результату фаз відповідно PPA, PPB, PPC:

Висновки

Отримано основні співвідношення для аналого-цифрового визначення ННП ОЧ, яка характеризує нормований нормативними документами [5, 6] небаланс напруги нульової послідовності. Розроблений метод корекції похибки від розкиду параметрів аналого-цифрових фазних каналів дозволяє скорегувати цю одну з домінуючих похибок, потім подавити домінуючу НПП ОЧ, НЗП ОЧ, більшість вищих гармонік, збільшити майже на порядок ННП ОЧ, далі виділяє ННП ОЧ. Отримані співвідношення повністю підтверджуються теорією трифазних кіл змінного струму.

Метод определения напряжения нулевой последовательности трехфазной сети с коррекцией погрешности

А.А. Щерба¹, Д.К. Маков², В.И. Чибелис²

¹ Інститут електродинамики НАН України, пр. Перемоги, 56, 03680, Київ-57, Україна
sh1ch@jed.org.ua

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського", пр. Перемоги, 37, 03680, Київ-55, Україна
takodk47@gmail.com

Анотация

Представлен новый метод аналого-цифрового определения ННП ОЧ, реализованный использованием следующих операций: подстройкой, кратной трем, частоты измерения мгновенных значений трехфазного напряжения к ОЧ электросети; аналого-цифровым преобразованием АЦП_А, АЦП_В, АВС_С мгновенных значений трехфазного напряжения с запоминанием полученных кодов. Полученные коды в каждый период ОЧ заносят в соответствующие регистры RA, RB, RC. При этом вращаются по кольцу с фазным шагом 120° только составляющие погрешности от разброса параметров фазных каналов А, В, С.

После третьего измерительного периода ОЧ используется алгебраическое сложение кодов соответствующих мгновенных значений трех фазных напряжений одинаковых временных отсчетов. Эта операция корректирует погрешность от разброса параметров фазных каналов А, В, С. Искомые коды ННП ОЧ улавливаются. Далее складывают коды мгновенных значений одинаковых временных отсчетов трех фазных напряжений для получения последовательности сумм кодов с существенным

ослаблением доминирующего неинформативного напряжения симметричных составляющих по прямой последовательности (НПП) ОЧ, неинформативного напряжения симметричных составляющих по обратной последовательности (НОП) ОЧ и большинства высших гармоник. Результат заносит в регистр R_{Σ} . Искомые коды НПП ОЧ снова утраиваются. Последняя операция – выделение гармоники ОЧ из последовательности сумм полученных кодов.

Ключевые слова: напряжение симметричных составляющих; прямая и нулевая последовательности.

Method for determining the zero-sequence voltage of a three-phase network with error correction

A. Shcherba¹, D. Makov², V. Chybelis²

¹ Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences, Peremohy Ave., 56, 03680, Kyiv-57, Ukraine
sh1ch@jed.org.ua

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, 03680, Kyiv-55, Ukraine
makodk47@gmail.com

Abstract

Voltage of symmetric components on zero sequence (ZSV) of the fundamental frequency (FF) describes one of important quality indexes of three-phase power mains – the unbalance of ZSV FF. A new method of analog-digital determination of ZSV FF is presented in the paper. It was realized by using the following operations: tuning the multiple three frequency of measuring instantaneous values of the three-phase voltage to FF of electrical voltage; analog-digital transformation of three-phase voltage instantaneous values and memorizing codes received. Every period of FF received codes are being entered into respective registers RA, RB and RC. At that, only error components caused by the dispersion of phase A, B and C channels parameters are being rotated on the ring with the phase step of 120°. After the third measurement period of FF, the next operation is the algebraic adding of codes of respective instantaneous values which belong to three different periods in succession of the same time countdowns. One enters the results of such adding into results registers RRA, RRB and RRC. This operation corrects the error caused by the dispersion of phase channels A, B and C parameters. The sought codes of ZSV FF are being tripled. Then one adds codes of three-phase voltage instantaneous values of the same time countdowns for getting the sequence of codes sums with substantial reducing the dominant non-informative voltage of symmetric components on the positive sequence voltage (PSV) FF, non-informative voltage of symmetric components on the negative sequence voltage (NSV) FF and the majority of high-order harmonics. The result is being entered into the register R_{Σ} . The sought codes of ZSV FF are being tripled again. The last operation is the selection of the FF harmonic from the sum of codes received. The proposed method differs in higher accuracy and simpler realization.

Keywords: voltage of symmetrical components; direct and zero sequences.

Список літератури

1. Xing Li, Mei Su, Yao Sun, Handbing Dan, Wenjing Xiong. Modulation strategies based on mathematical constraction method for matrix converter extending the input reactive power range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 654–664. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256929>
2. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицин В.К., Ивашенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 9–10.
3. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Ивашенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 3–11.
4. Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A. Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth (PEDES '96)*. New Dehli, India, January 8–11, 1996. Vol. II, pp. 794–800.
5. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 1999.

6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Київ, 2014. 27 с.
7. Шидловский А.К., Таранов С.Г., Брайко В.В., Гринберг И.П., Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф., Хусид Р.Б. Способ разложения напряжений многофазной цепи на ортогональные составляющие симметричных последовательностей. А.с. СССР № 1117541. Оpubл. в бюлл. 1984. № 37.
8. Щерба А.А., Маков Д.К. Спосіб цифрового виміру напруги нульової послідовності трифазної мережі: пат. UA № 88863 Україна, 2014.
9. Маков Д.К., Щерба А.А. Спосіб цифрового визначення напруги нульової послідовності трифазної системи напруг. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 14–16.
4. Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A. Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth (PEDES '96)*. New Dehli, India, January 8–11, 1996, vol. II, pp. 794–800.
5. Interstate standard GOST 13109-97. Electric Energy. Standards for the quality of electric energy ingeneral-purpose power networks. 1999. (in Russian).
6. State standard of Ukraine EN 50160:2014 (EN 50160:2010.IDT). Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Kyiv, 2014. 27 p. (in Ukrainian).
7. Shidlovskiy A.K., Taranov S.G., Brajko V.V., Grinberg I.P., Karasinskiy O.L., Tesik J.F., Husid P.B. Sposob razlozheniya napryazhenij mnogofaznoj cepi na ortogonalnye sostavlyayushie simmetrichnyh posledovatel'nostej [Method for decomposing multiphase circuit voltages into orthogonal components of symmetric sequences]. Certificate of authorship USSR № 1117541. Publ. in Bul. 1984, no. 37 (in Russian).
8. Shcherba A.A., Makov D.K. Sposib cifrovogo vimiru naprugi nulovoyi poslidovnosti trifaznoyi merezhi [Method for digital measurement of zero sequence voltage of three-phase network]. Patent UA, 88863, 2014 (in Ukrainian).
9. Makov D.K., Shcherba A.A. Sposib cifrovogo viznachennya naprugi nulovoyi poslidovnosti trifaznoyi sistemi naprug [Method for digital measurement of zero sequence voltage of three-phase network]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no. 4, pp. 14–16 (in Ukrainian).

References

1. Xing Li, Mei Su, Yao Sun, Handbing Dan, Wenjing Xiong. Modulation strategies based on mathematical constraction method for matrix converter extending the input reactive power range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 654–664. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256929>
2. Shcherba A.A., Suprunovskaja N.I., Synytsyn V.K., Ivashchenko D.S. Aperiodicheskie i kolebatelnye processy razryada kondensatora pri prinuditel'nom ogranichenii dlitel'nosti tokov v nagruzke [Aperiodic and Oscillatory Processes of Capacitor Discharge at Forced Limitation of Duration]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, no. 3, pp. 9–10 (in Russian).
3. Suprunovskaja N.I., Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Beletsky O.A. Processy obmena energiej mezhdou nelinejnymi i linejnymi zvenyami elektricheskoy shemy zamesheniya superkondensatorov [Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors].