

[Electric power quality at industrial enterprises]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 2005, 261 p. (Rus.)

7. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii sluchajnyh funkcij* [Applied methods of random functions theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p. (Rus.)
8. Bobnev M.P. *Generirovanie sluchajnyh signalov* [Generating random signals]. Moscow, Jenergija Publ., 1971. 240 p. (Rus.)

Рецензент: О.М. Холькін
д-р фіз.-мат. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.02.2019

УДК 621.316.7

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181432

© Бурбело М.Й.¹, Гадай А.В.², Степура О.В.³

УМОВНІ ПОТУЖНОСТІ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛІЮ

В статті проаналізовано несиметричні несинусоїдні режими трифазних мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що умовні потужності нульової послідовності q_β і q_α які є, відповідно, активною та реактивною умовними потужностями нульової послідовності, містять складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються, відповідно, постійною та змінною складовими q_β і q_α .

Ключові слова: електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, умовні потужності нульової послідовності.

Бурбело М.И., Гадай А.В., Степура А.В. Условные мощности нулевой последовательности в несимметричных несинусоидальных режимах трехфазных электрических сетей с заземленной нейтралью. В статье проанализированы несимметричные несинусоидальные режимы трехфазных сетей с заземленной нейтралью. Показано, что условные мощности нулевой последовательности q_β и q_α которые являются, соответственно, активной и реактивной условными мощностями нулевой последовательности, содержат составляющие, обусловленные несимметрией и несинусоидальностью, характеризующиеся, соответственно, постоянной и переменной составляющими q_β и q_α .

Ключевые слова: электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, условные мощности нулевой последовательности.

M.J. Burbelo, A.V. Hadaj, O.V. Stepura. Conductivity power of zero sequence for asymmetrical non-sinusoidal modes of three-phase electrical network with grounded neutral wire. The paper analyzes the work of a three-phase network with grounded neutral wire with nonlinear asymmetric consumers based on the theory of instantaneous power. In non-symmetric, non-sinusoidal modes of three-phase electric networks with grounded neutral wire, instantaneous reactive power contains three components. The regime's imbalance is characterized by instantaneous active and reactive conditional capacities of zero sequence q_β and q_α . Conditional powers of the zero sequence q_β and q_α contain components that are due to asymmetry and non-sinusoidal mode character,

¹ д-р техн. наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, burbelomj@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, hadaj@meta.ua

³ директор, ТОВ ІТЦ «Енергооблік», м. Вінниця, Stepura74@gmail.com

which are characterized by a constant q_β and q_α an alternating component respectively. Since the positive, negative and zero sequence of voltage and current in the asymmetric non-sinusoidal mode are defined as the sum of the symmetric components, respectively, of the positive sequence of the first and seventh harmonics, the negative sequence of the first and fifth harmonics, the zero sequence of the first and third harmonics, the presence of the first harmonic of current and the voltage of the zero sequence forms the constant component and the second harmonic of capacities q_β and q_ω and the presence of the third harmonic of current and voltage forms mainly the second and fourth harmonics of these capacities. It is expedient to divide instantaneous conditional power q_β and q_α into instantaneous conditional capacities $q_{\beta i_0}$, $q_{\alpha i_0}$, which are determined by the product of instantaneous positive and negative sequential stresses on the zero sequence current, and the instantaneous conditional capacities $q_{\beta u_0}$, $q_{\alpha u_0}$ that are determined by the product of instantaneous currents of the positive and negative sequences on the voltage of the zero sequence. The analytical expressions for the determination of the permanent components in the integral and complex forms of recording for the conditional capacities that characterize the imbalance of the current regime and the zero sequence voltage that can be used in the process of symmetry and compensation of higher harmonics have been obtained.

Keywords: electric networks, asymmetric non-sinusoidal modes, conditional capacities of zero sequence

Постановка проблеми. Особливої актуальності в останні роки набула проблема якості електроенергії в низьковольтних електричних мережах [1]. Це викликано, в першу чергу, широким поширенням однофазних електроприймачів, які істотно спотворюють напругу, таких як зварювальні апарати, комп'ютерна техніка, пральні машини і кондиціонери повітря з частотним приводом і безколекторними двигунами [2]. Особливістю таких споживачів є несиметрія та несинусоїдність напруг і струмів.

В [3-5] проаналізовано можливість визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах трифазних мереж за наявності канонічних гармонік. Показано, що пульсуюча потужність містить складники, що зумовлені несиметрією та несинусоїдністю, які характеризуються, відповідно, умовною потужністю зворотної послідовності та потужністю спотворення. Однак такий аналіз є неповним, оскільки струми з частотами гармонік, що кратні трьом, є струмами нульової послідовності, які не впливають на пульсуючу потужність. Водночас, вони підсумовуються в нейтральному проводі мережі, в результаті чого струм в нейтральному проводі може значно перевищувати фазні струми, що спричинює збільшення додаткових втрат електроенергії та значне перегрівання нейтрального провідника. Крім того, зазначені струми призводять до спотворень форми кривих напруг [2].

Симетрування навантажень за нульовою послідовністю з використанням тиристорно-керованих компенсуювальних пристроїв в умовах несинусоїдності вимагає виявлення інформативних величин, за якими здійснюється їх керування [6]. Основними вимогами до таких величин є простота і точність вимірювання та інваріантність до несинусоїдності усереднених напруг і струмів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з теорією миттєвої потужності за базову величину приймають миттєву повну потужність трифазної системи s , яку розкладають на ортогональні складники [7]:

$$s^2 = p^2 + q^2, \quad (1)$$

де p , q – миттєві активна та реактивна потужності.

У разі застосування системи $\alpha\beta 0$ -координат вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей, відповідно, будуть:

$$p = (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0); \quad (2)$$

$$q = \sqrt{\begin{vmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ u_\alpha & u_\beta \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_\beta & i_0 \\ u_\beta & u_0 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_0 & i_\alpha \\ u_0 & u_\alpha \end{vmatrix}^2}. \quad (3)$$

Для визначення квадрата повної потужності $s^2 = u^2 \cdot i^2$ використовують квадрати миттєвих трифазних напруги та струму $u^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2$; $i^2 = i_\alpha^2 + i_\beta^2 + i_0^2$.

З виразу (3) випливає, що в електричних мережах з заземленою нейтраллю миттєва реактивна потужність містить три складники [7]:

$$q_0 = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha; \quad (4)$$

$$q_\beta = i_0 u_\alpha - i_\alpha u_0; \quad q_\alpha = i_\beta u_0 - i_0 u_\beta. \quad (5)$$

Складник q_0 відповідає поняттю миттєвої реактивної потужності для мережі з ізольованою нейтраллю. Складники q_β і q_α характеризують появу напруги та струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю.

Встановлено, що потужності, які характеризують незрівноваженість режиму, можна виразити через симетричні складові напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей у вигляді [8]:

$$\sqrt{2}q_\beta = p_{31} + p_{32}; \quad \sqrt{2}q_\alpha = q_{31} + q_{32}, \quad (6)$$

де

$$p_{31} = 3(u_1 i_3 - u_3 i_1); \quad p_{32} = 3(u_2 i_3 - u_3 i_2); \quad (7)$$

$$q_{31} = 3(u'_1 i_3 - u_3 i'_1); \quad q_{32} = 3(u'_2 i_3 - u_3 i'_2), \quad (8)$$

де $u_1, i_1, u_2, i_2, u_3, i_3$ – напруги і струми прямої, зворотної та нульової послідовностей, причому $u_3 = u_0 / \sqrt{3}, i_3 = i_0 / \sqrt{3}$; u'_1, i'_1, u'_2, i'_2 – напруги і струми, які утворюють шляхом фазового зсуву на -90 ел. градусів кожної гармоніки напруг і струмів прямої та зворотної послідовностей.

Мета роботи – встановити закономірності формування умовних потужностей нульової послідовності за несиметричних несинусоїдних режимів.

Обґрунтування результатів дослідження. Розглянемо несиметричний несинусоїдний режим, за якого струм навантаження і напруга живлення, крім першої гармоніки, містять третю, п'яту та сьому гармоніки. У цьому випадку пряма, зворотна і нульова послідовності напруги та струму, відповідно, будуть:

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{2}(U_{11} \sin(\omega t + \psi_{u11}) + U_{17} \sin(7\omega t + \psi_{u17})); \\ u_2 &= \sqrt{2}(U_{21} \sin(\omega t + \psi_{u21}) + U_{25} \sin(5\omega t + \psi_{u25})); \\ u_3 &= \sqrt{2}(U_{31} \sin(\omega t + \psi_{u31}) + U_{33} \sin(3\omega t + \psi_{u33})); \\ i_1 &= \sqrt{2}(I_{11} \sin(\omega t + \psi_{i11}) + I_{17} \sin(7\omega t + \psi_{i17})); \\ i_2 &= \sqrt{2}(I_{21} \sin(\omega t + \psi_{i21}) + I_{25} \sin(5\omega t + \psi_{i25})); \\ i_3 &= \sqrt{2}(I_{31} \sin(\omega t + \psi_{i31}) + I_{33} \sin(3\omega t + \psi_{i33})), \end{aligned} \quad (9)$$

тут перші індекси 1, 2, 3 вказують, відповідно, на пряму, зворотну або нульову послідовність напруги і струму, а другий – на номер гармоніки. Наявність першої гармоніки в зворотній та нульовій послідовностях напруги і струму зумовлені, відповідно, несиметрією та незрівноваженістю режиму.

Миттєві умовні активні потужності нульової послідовності в розгорнутій формі запису:

$$\begin{aligned} p_{31} &= U_{11} I_{31} \cos(\psi_{u11} - \psi_{i31}) - U_{11} I_{31} \cos(2\omega t + \psi_{u11} + \psi_{i31}) - \\ &- U_{31} I_{11} \cos(\psi_{u31} - \psi_{i11}) + U_{31} I_{11} \cos(2\omega t + \psi_{u31} + \psi_{i11}) + \\ &+ U_{11} I_{33} \cos(2\omega t - \psi_{u11} + \psi_{i33}) - U_{11} I_{33} \cos(4\omega t + \psi_{u11} + \psi_{i33}) - \\ &- U_{33} I_{11} \cos(2\omega t + \psi_{u33} - \psi_{i11}) + U_{33} I_{11} \cos(4\omega t + \psi_{u33} + \psi_{i11}) + \\ &+ U_{17} I_{31} \cos(6\omega t + \psi_{u17} - \psi_{i31}) - U_{17} I_{31} \cos(8\omega t + \psi_{u17} + \psi_{i31}) - \\ &- U_{31} I_{17} \cos(6\omega t - \psi_{u31} + \psi_{i17}) + U_{31} I_{17} \cos(8\omega t + \psi_{u31} + \psi_{i17}) + \\ &+ U_{17} I_{33} \cos(4\omega t + \psi_{u17} - \psi_{i33}) - U_{17} I_{33} \cos(10\omega t + \psi_{u17} + \psi_{i33}) - \\ &- U_{33} I_{17} \cos(4\omega t - \psi_{u33} + \psi_{i17}) + U_{33} I_{17} \cos(10\omega t + \psi_{u33} + \psi_{i17}); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 p_{32} = & U_{21}I_{31} \cos(\psi_{u21} - \psi_{i31}) - U_{21}I_{31} \cos(2\omega t + \psi_{u21} + \psi_{i31}) - \\
 & - U_{31}I_{21} \cos(\psi_{u31} - \psi_{i21}) + U_{31}I_{21} \cos(2\omega t + \psi_{u31} + \psi_{i21}) + \\
 & + U_{21}I_{33} \cos(2\omega t - \psi_{u21} + \psi_{i33}) - U_{21}I_{33} \cos(4\omega t + \psi_{u21} + \psi_{i33}) - \\
 & - U_{33}I_{21} \cos(2\omega t + \psi_{u33} - \psi_{i21}) + U_{33}I_{21} \cos(4\omega t + \psi_{u33} + \psi_{i21}) + \\
 & + U_{25}I_{31} \cos(4\omega t + \psi_{u25} - \psi_{i31}) - U_{25}I_{31} \cos(6\omega t + \psi_{u25} + \psi_{i31}) - \\
 & - U_{31}I_{25} \cos(4\omega t - \psi_{u31} + \psi_{i25}) + U_{31}I_{25} \cos(6\omega t + \psi_{u31} + \psi_{i25}) + \\
 & + U_{25}I_{33} \cos(2\omega t + \psi_{u25} - \psi_{i33}) - U_{25}I_{33} \cos(8\omega t + \psi_{u25} + \psi_{i33}) - \\
 & - U_{33}I_{25} \cos(2\omega t - \psi_{u33} + \psi_{i25}) + U_{33}I_{25} \cos(8\omega t + \psi_{u33} + \psi_{i25}).
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

З виразів (10) та (11) випливає, що наявність першої гармоніки струму та напруги нульової послідовності формує постійну складову і другу гармоніку умовних активних потужностей, а наявність третьої гармоніки струму та напруги – переважно другу та четверту гармоніки цих потужностей.

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять, відповідно, 1%, 5% та 4% від амплітуди основної гармоніки струмів: $i_k = I_k (\sin \omega t + 0,01 \sin 3\omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$, що характерно для некеріваних випрямлячів. Потужність навантаження на основній гармоніці: $S_1 = 1318 + j761 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Навантаження живиться через трансформатор потужністю 1600 кВ·А зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем». В несиметричному режимі струм основної гармоніки фази С менший на 10% від значення струмів інших фаз.

Складники $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ мають постійні складові $\sqrt{2}Q_\beta = 0,6 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і $\sqrt{2}Q_\alpha = -52,8 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ (рис. 1), що зумовлені несиметрією струмів і напруг основної гармоніки. Пульсації $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ містять переважно другу і четверту гармоніки відносно частоти напруги живлення. Середньоквадратичні значення пульсацій відповідно становлять 34,7 кВ·А та 70,3 кВ·А, що зумовлено несиметрією режиму по основній гармоніці та наявністю третьої гармоніки напруг і струмів.

За відсутності несиметрії напруг і струмів основної гармоніки пульсації $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ різко зменшуються (рис. 2). Середньоквадратичні значення пульсацій обох величин становлять 15,1 кВ·А, що зумовлено наявністю третьої гармоніки напруг і струмів.

Умовні потужності q_β і q_α доцільно подати двома складниками

$$q_{\beta i_0} = i_0 u_\alpha; \quad q_{\beta u_0} = -i_\alpha u_0; \tag{12}$$

$$q_{\alpha i_0} = -i_0 u_\beta; \quad q_{\alpha u_0} = i_\beta u_0. \tag{13}$$

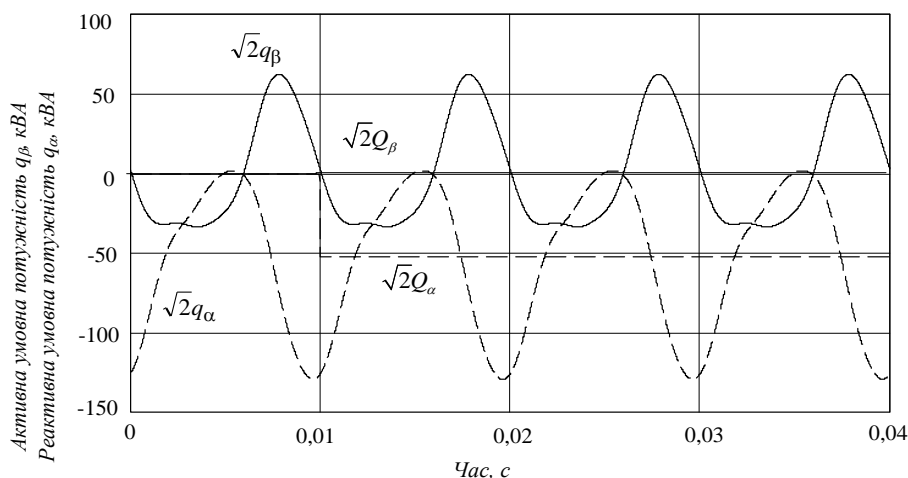


Рис. 1 – Залежності $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

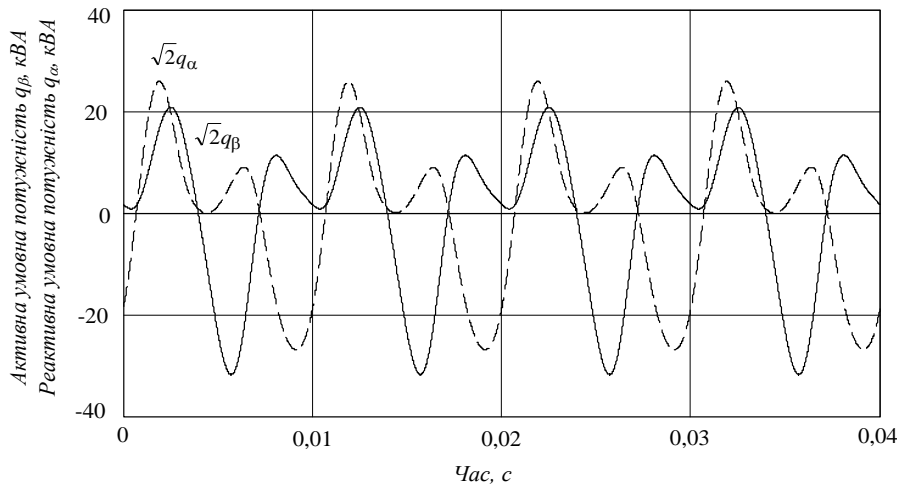


Рис. 2 – Залежності $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік за симетричного навантаження

Перші складники цих величин характеризують струм нульової послідовності, другі – напругу нульової послідовності. Цим складникам $\sqrt{2}q_\beta$ і $\sqrt{2}q_\alpha$ відповідають умовні потужності

$$p_{i_3} = 3(u_1 i_3 + u_2 i_3); \quad p_{u_3} = -3(u_3 i_1 + u_3 i_2); \quad (14)$$

$$q_{i_3} = -3(u_1' i_3 + u_2' i_3); \quad q_{u_3} = 3(u_3 i_1' + u_3 i_2'). \quad (15)$$

Для наведеного прикладу несиметричного несинусоїдного режиму складники $\sqrt{2}q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\beta u_0}$ мають середні значення, відповідно, $\sqrt{2}Q_{\beta i_0} = 0$ і $\sqrt{2}Q_{\beta u_0} = 0,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (рис. 3), а складники $\sqrt{2}q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha u_0}$ – середні значення $\sqrt{2}Q_{\alpha i_0} = -52,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ і $\sqrt{2}Q_{\alpha u_0} = -0,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (рис. 4).

Середні значення цих складників можна також отримати з використанням комплексних значень потужностей окремих послідовностей:

$$\sqrt{2}Q_{\beta i_0} = 3\text{Re}\left(\dot{U}_{11}^* I_{31} + \dot{U}_{21}^* I_{31}\right); \quad \sqrt{2}Q_{\beta u_0} = -3\text{Re}\left(\dot{U}_{31}^* I_{11} + \dot{U}_{31}^* I_{21}\right); \quad (16)$$

$$\sqrt{2}Q_{\alpha i_0} = 3\text{Im}\left(-\dot{U}_{11}^* I_{31} + \dot{U}_{21}^* I_{31}\right); \quad \sqrt{2}Q_{\alpha u_0} = 3\text{Im}\left(\dot{U}_{31}^* I_{11} - \dot{U}_{31}^* I_{21}\right), \quad (17)$$

тут перший індекс комплексних напруг і спряжених комплексних струмів вказує на використання комплексів напруг і струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, а другий – на номер гармоніки.

Для наведеного прикладу несиметричного несинусоїдного режиму

$$\begin{aligned} & 3\left(\dot{U}_{11}^* I_{31} + \dot{U}_{21}^* I_{31}\right) - 3\left(\dot{U}_{31}^* I_{11} + \dot{U}_{31}^* I_{21}\right) = \\ & = ((0 + j52,5) + (0,02 + j0,01)) - ((0,6 - j0,3) + (0 - j0,02)). \end{aligned}$$

З урахування зміни знаків уявних частин у виразах (17) останні значення повністю збігаються зі значеннями $\sqrt{2}Q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}Q_{\beta u_0}$ та $\sqrt{2}Q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}Q_{\alpha u_0}$.

Таким чином, складники $\sqrt{2}Q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}Q_{\beta u_0}$ та $\sqrt{2}Q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}Q_{\alpha u_0}$, які можна виміряти шляхом усереднення відповідних миттєвих величин, характеризують незрівноваженість режиму за струмом та напругою нульової послідовності, що можна використати в пристроях симетрування та активних фільтрах з двома інверторами, що мають різні частоти модуляції [9], причому низькочастотний інвертор використовується для симетрування навантажень, а високочастотний інвертор – для фільтрування вищих гармонічних складників струму.

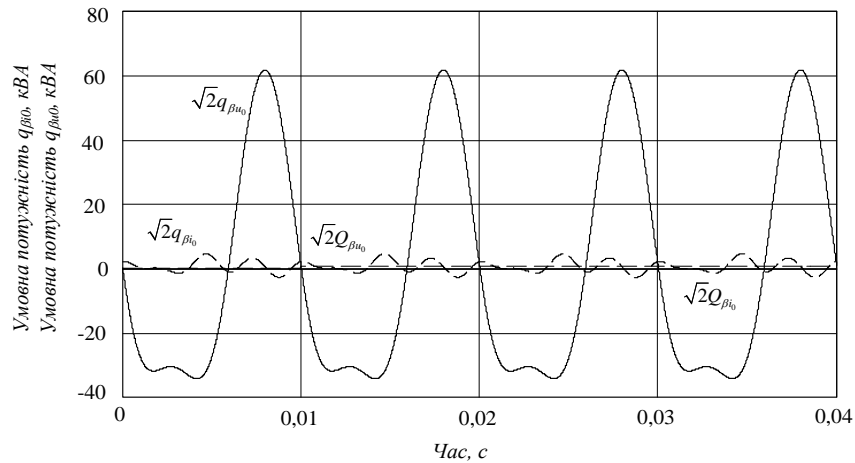


Рис. 3 – Залежності $\sqrt{2}q_{\beta i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\beta u_0}$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

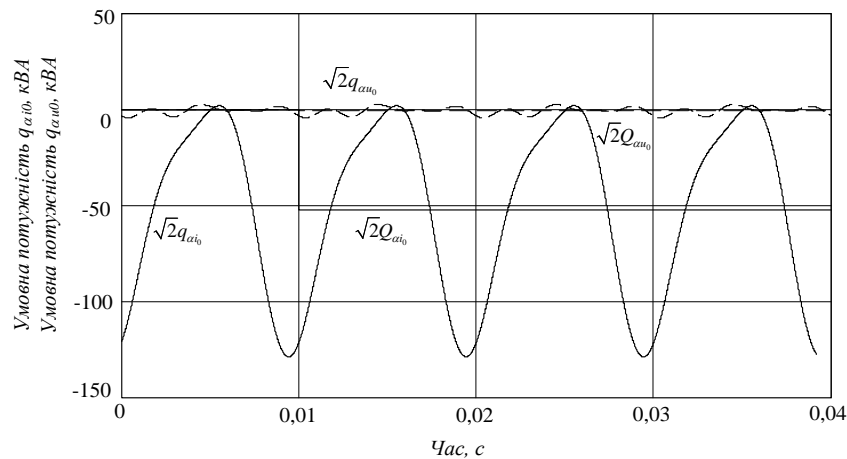


Рис. 4 – Залежності $\sqrt{2}q_{\alpha i_0}$ і $\sqrt{2}q_{\alpha u_0}$ за наявності першої, третьої, п'ятої та сьомої гармонік і несиметричного навантаження

Алгоритм формування вектора провідностей фаз симетрувального пристрою, увімкненого в зірку з нульовим проводом, має такий вигляд:

$$b_A = (b_1 - b_{ex})/3 + 2b_0; \quad b_B = (b_1 - b_{ex})/3 - b_0 - \sqrt{3}g_0; \quad b_C = (b_1 - b_{ex})/3 + b_0 + \sqrt{3}g_0, \quad (18)$$

де $b_{ex} = g_1 \operatorname{tg} \varphi_{ex}$ – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування, $g_1 = \operatorname{Re}(Y_1)$; $b_1 = -\operatorname{Im}(Y_1)$ – активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження, $Y_1 = \dot{I}_1 / \dot{U}_1$; $g_0 = \operatorname{Re}(Y_0)$; $b_0 = -\operatorname{Im}(Y_0)$ – активна та реактивна умовні провідності нульової послідовності навантаження, $Y_0 = \dot{I}_0 / \dot{U}_1$.

З використанням $\sqrt{2}Q_{\beta i_0}$ та $\sqrt{2}Q_{\alpha i_0}$ величина Y_0 сформована у вигляді: $Y_0 = \dot{I}_0 (\dot{U}_1 + \dot{U}_2) / |\dot{U}_1|^2$, що забезпечує похибку керування за збуренням (симетрування за нульовою послідовністю) на рівні 0,01% стосовно коефіцієнта напруги нульової послідовності.

Висновки

В несиметричних несинусоїдних режимах трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю миттєва реактивна потужність містить три складники. Складники, що зумовлені незрівноваженістю режиму, представлені миттєвими активною та реактивною умовними потуж-

ностями нульової послідовності q_{β} і q_{α} . Пряма, зворотна і нульова послідовності напруги та струму за несиметричного несинусоїдного режиму визначені як сума симетричних складових, відповідно, прямої послідовності першої та сьомої гармонік, зворотної послідовності першої та п'ятої гармонік, нульової послідовності першої та третьої гармонік. Отримано вирази для визначення миттєвих умовних потужностей прямої та зворотної послідовностей. У відповідності з цими виразами перша гармоніка струму та напруги нульової послідовності спричиняє появу постійної складової та другої гармоніки умовної активної потужності, а третя гармоніка – другу та четверту гармоніки вказаної потужності. Отримано вирази умовних потужностей, що характеризують незрівноваженість режиму окремо за струмом та напругою нульової послідовності, які можна використовувати в процесі вимірювання пристроїв симетрування.

Список використаних джерел:

1. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К. : Наукова думка, 2005. – 210 с.
2. Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів / А.Ф. Жаркін [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 1. – С. 69-77.
3. Бурбело М.Й. Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж / М.Й. Бурбело, А.В. Гадай // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2016. – № 24-25. – С. 61-67.
4. Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах / М.Й. Бурбело [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 51-56.
5. Бурбело М.Й. Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж / М.Й. Бурбело, А.В. Гадай, О.В. Степура // Технічна електродинаміка. – 2019. – № 1. – С. 42-49.
6. Учет и компенсация реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электроснабжения / Е.И. Сокол [и др.]. – Харьков : ФООП Панов А.Н., 2017. – 290 с.
7. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press ; Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
8. Бурбело М.Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М.Й. Бурбело, С.М. Мельничук // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 71-75.
9. Бурлака В.В. Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенна, С.В. Гулаков. – Маріуполь : ПДТУ, 2015. – 196 с.

References:

1. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F. *Vysshye garmonyky v nyzkovoltnyh elektrycheskyh setjah* [Higher harmonics in low-voltage electrical networks]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2005. 210 p. (Rus).
2. Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. *Kompleksne pokrashchennia yakosti elektroenerhii ta zabezpechennia elektrobezpeky v lokalnykh systemakh elektropostachannia pry zastosuvanni hibrydnykh filtrokompensuiuchykh peretvoriuvachiv* [Complex improvement of power quality and ensure electrical safety in local power supply systems when using hybrid filter compensating converters]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2018, no. 1, pp. 59-77. (Ukr.)
3. Burbelo M.J., Hadaj A.V. *Vyznachennja potuzhnostej nelinejnyh navantazhen' tryfaznyh elektrychnykh merezh* [Determination of three-phase nonlinear loads electric]. *Kompjuterno-intergovani tehnologii: osvita, nauka, vyrobnyctvo – Computer-integrated technologies: education, science and industry*, 2016, no. 24-25, pp. 61-67. (Ukr.)
4. Burbelo M.J., Hadaj A.V., Melnychuk S.M., Loboda Ju.V. *Vyznachennja potuzhnostej navantazhen' tryfaznyh elektrychnykh merezh v nesynusoi'dnyh ta nesymetrychnykh rezhymah* [Determination of capacities of loads of three-phase electric networks in non-sinusoidal and asymmetric modes]. *Visnyk Vinnyckogo politechnichnogo instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2017, no. 1, pp. 51-56. (Ukr.)

5. Burbelo M.J., Hadaj A.V., Stepura O.V. Vyznachennia pulsuiuchoi potuzhnosti v nesymetrychnykh nesynusoidnykh rezhymakh elektrychnykh merezh [Determination of the oscillating power in asymmetrical non-sinusoidal modes of electric networks]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2019, no. 1, pp. 42-49. (Ukr.)
6. Sokol E.I., Sirotin Ju.A., Grib O.G. *Uchet i kompensaciia reaktivnoi moshhnosti pri nesimetrychnykh rezhimakh raboty sistem elektrosnabzheniia* [Account and compensation of reactive power in asymmetrical modes of operation of power supply systems]. Khar'kov, FOP Panov A.N. Publ., 2017. 290 p. (Rus.)
7. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press, Wiley-Interscience Publ., 2007. 379 p.
8. Burbelo M.J., Melnychuk S.M. Vyznachennja potuzhnostej za nesymetrychnykh rezhymiv tryfaznykh merezh iz zazemlenoju nejtrallju [Determination powers at unsymmetrical modes of three-phase networks with grounded neutral]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2015, no. 4, pp. 71-75. (Ukr.)
9. Burlaka V.V., Podnebenna S.K., Gulakov S.V. *Suchasni sylovi aktyvni fil'try ta impul'sni dzhherela zhvyleniia z korektsiyeyu koefitsiyenta potuzhnosti: monografii* [Modern power active filters and pulsed power supplies with power factor correction: monograph]. Mariupol, PSTU Publ., 2015. 196 p. (Ukr.)

Рецензент: В.М. Кутін
д-р техн. наук, проф., ВНТУ

Стаття надійшла 08.02.2019

УДК 621.791.03, 621.314.2, 621.316.727

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181483

© Поднебenna С.К.¹, Бурлака В.В.², Гулаков С.В.³

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ МАШИН КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті досліджено роботу комплексу однофазних машин контактного зварювання з боку їх впливу на симетрію і коливання напруги живлення, особливо за умов «слабкої» мережі. Запропоновано метод зниження негативного впливу комплексу машин контактного зварювання на симетрію і коливання напруги мережі за рахунок встановлення технічних засобів вибору пари фаз, від яких живитиметься кожна контактна машина, та застосування централізованого керування їх системами управління. При цьому забезпечується розподіл навантаження по фазах, максимально наближений до симетричного, а вибір пари фаз для живлення кожної контактної машини комплексу здійснюється безпосередньо перед початком циклу зварювання (при нульовому струмі), що дає змогу значно підвищити строк служби комутаційної апаратури. Результати моделювання типового комплексу машин контактного зварювання з живленням від «слабкої» мережі (потужність машин становить близько 5% потужності КЗ мережі) показали, що запропонований підхід дає змогу зменшити коефіцієнт несиметрії напруги більш ніж в 2 рази.

Ключові слова: машина контактного зварювання, джерело живлення, несиметричне навантаження, пристрій синхронізації, коефіцієнт несиметрії.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, podsvet@gmail.com

² д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, vburlaka@rambler.ru

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, segul@ukr.net