

ВИМІРЮВАННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ ПОТУЖНОСТЕЙ НЕБАЛАСУ В СИСТЕМІ КООРДИНАТ МЕТОДУ ДВОХ ВАТМЕТРІВ

Михайло Артеменко

професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, artemenko_m_ju@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9341-9238

Юрій Кутафін

аспірант кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, yurkut@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8156-1277

Розроблено математичний апарат ідентифікації складових потужності небалансу трифазної трипровідної системи електроживлення, спрямований на їх вимірювання та розподілену компенсацію в системі координат методу двох ватметрів. Показано, що синусоїдний режим трифазної трипровідної системи живлення за умови симетричного джерела можна однозначно ідентифікувати чотирма скалярними потужностями: активною й реактивною потужностями, а також уведеними двома ортогональними складовими потужності небалансу. Для представлення неактивних складових потужності та компенсаційних струмів у системі координат методу двох ватметрів використано елементи матричної алгебри та комплексного числення. Продемонстровано, що кожна з неактивних потужностей може бути представлена в системі координат методу двох ватметрів як зважена сума показань чотирьох ватметрів. Вперше отримано значення коефіцієнтів зваженої суми показань чотирьох ватметрів для визначення трьох неактивних потужностей. Представлена нова структура схеми зворотного зв'язку для вибіркової компенсації неактивних потужностей. Перехід в систему координат методу двох ватметрів, що традиційно використовувалася для вимірювання активної потужності, дозволив збільшити кількість вимірюваних потужностей до зазначених чотирьох шляхом додавання лише двох ватметрів та обробки їх показань за встановленими формулами. Дані комп'ютерного експерименту підтвердили адекватність запропонованих формул визначення чотирьох скалярних потужностей за показаннями чотирьох ватметрів та ефективність дії ланцюга зворотного зв'язку для керування вибірковою активною фільтрацією неактивних складових потужності. Результати роботи можуть бути використані для вимірювання та вибіркової розподіленої компенсації неактивних потужностей у системі координат двох методів ватметрів, зокрема, в сучасних локальних мікромережах для керування активною фільтрацією споживаних струмів.

Ключові слова: потужність небалансу, паралельний активний фільтр, система координат методу двох ватметрів, розподілена компенсація.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Діючий стандарт [1] визначає квадрат потужності небалансу (unbalance power) трифазної системи електроживлення як різницю між квадратами повної потужності та квадратами активної й реактивної потужностей. Її наявність зумовлена, в першу чергу, несиметрією навантажень фаз, що викликає додаткові струми та відповідні потужності втрат в лінії передачі, несиметрію напруг в точках загального підключення та пульсації миттєвих значень активної та реактивної потужностей [2]. Особливо гостро ця проблема стоїть в сучасних локальних мікромережах розподіленої генерації (microgrid) [3], що потребують балансів активної та реактивної потужностей в реальному масштабі часу на первинному рівні ієрархічного керування [4]. Напівпровідникові паралельні

активні фільтри (ПАФ) є ефективним засобом компенсації неактивних складових потужностей на шинах трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ [5], але їх установка у вигляді окремого пристрою в мікромережах не виправдано збільшує загальну вартість забезпечення якості електроенергії. Наявність у складі microgrid декількох джерел розосередженої енергії зумовила появу ідеї розподіленої активної фільтрації, відповідно до якої функції компенсації небажаних складових потужності та вищих гармонік покладаються на напівпровідникові інвертори перетворювачів відновлюваної енергії, що мають резерви повної потужності [6,7]. Для зручності розподіленої компенсації в трифазній чотирипровідній мікромережі потужність небалансу представлена чотирма ортогональними складовими

вими [8], що мають окремі внески у потужність втрат лінії передачі та повну потужність. Разом з тим в трифазній трипровідній мережі лінійно залежними є як миттєві значення лінійних струмів, так і фазних напруг, що відраховуються від точки штучного заземлення [9], внаслідок чого електромагнітні процеси можуть бути описані двокоординатними векторами незалежних змінних струмів та напруг. Найвідомішим способом скорочення розмірності векторів струмів та напруг в трифазній трипровідній мережі з метою спрощення процесу керування активною фільтрацією є перехід до $\alpha\beta$ системи координат в рамках теорії миттєвої потужності [10]. Інша двокоординатна система, що притаманна методу двох ватметрів для вимірювання активної потужності [11], успішно використовується для енергоефективного керування активним фільтром та має ряд переваг порівняно з теорії миттєвої потужності [12], тому актуальною задачею є розробка вибіркової компенсації складових потужності небалансу саме в цій системі координат.

Метою статті є розроблення математичного апарату ідентифікації складових потужності небалансу трифазної трипровідної системи електроживлення в системі координат методу двох ватметрів, спрямованого на їх вимірювання та розподілену компенсацію відповідних струмів напівпровідниковими перетворювачами джерел відновлюваної енергії.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

В стаціонарному процесі зміни вектора $\mathbf{i}(t)$ лінійних струмів трифазної трипровідної системи електроживлення з періодом $T = 2\pi/\omega$ комплексний вектор діючих значень першої гармоніки для несиметричного навантаження може бути представлений сумою симетричних складових прямої та зворотної послідовностей [9]

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{i}} &= \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \\ &= \dot{I}_+ \bar{\mathbf{e}}_+ + \dot{I}_- \bar{\mathbf{e}}_- = \frac{\dot{I}_+}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{bmatrix} + \frac{\dot{I}_-}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$\bar{\mathbf{e}}_+ = \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \tilde{a} \end{bmatrix} / \sqrt{3} = \bar{\mathbf{e}}_+^*$ – орт зворотної послідовності; $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$; $\tilde{a} = e^{-j2\pi/3}$; $\wedge, *$ – символи транспонування та комплексного спряження; $\dot{I}_+ = I_{R+} + jI_{I+}$; $\dot{I}_- = I_{R-} + jI_{I-}$ – комплексні коефіцієнти, що залежать від конкретного виду навантаження. За умов симетричних синусоїдних напруг $\mathbf{u}(t)$ трифазного джерела з діючим значенням фаз-

ної напруги відносно штучної точки заземлення U_ϕ справедливе їх представлення в комплексній області

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}} &= \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt = \\ &= \begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\phi e^{-j2\pi/3} \\ U_\phi e^{j2\pi/3} \end{bmatrix} = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi/3} \\ e^{j2\pi/3} \end{bmatrix} = U_\phi \bar{\mathbf{e}}_+, \end{aligned} \quad (2)$$

де $U_\phi = \sqrt{3}U_\phi$ – діюче значення лінійної напруги.

Комплексні коефіцієнти з (1), що мають розмірність струмів, можуть бути виражені через потужності та лінійну напругу:

$$\begin{aligned} \dot{I}_+ &= \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{e}}_- = (\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}}^*) / U_\phi = (P - jQ) / U_\phi; \\ \dot{I}_- &= \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{e}}_+ = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}^* / U_\phi = (D_R - jD_I) / U_\phi. \end{aligned} \quad (3)$$

В отриманих виразах $\bar{\mathbf{u}}_- = \bar{\mathbf{u}}^* = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_C \\ \dot{U}_B \end{bmatrix}$; P, Q – активна та реактивна потужності, D_R, D_I – скалярні коефіцієнти розкладання потужності небалансу на ортогональні складові. З (3) можна отримати значення уведених скалярних коефіцієнтів

$$\begin{aligned} I_{R+} &= P / U_\phi; I_{I+} = -Q / U_\phi; \\ I_{R-} &= D_R / U_\phi; I_{I-} = -D_I / U_\phi \end{aligned} \quad (4)$$

й представити декомпозицію вектора струму за скалярними складовими потужності та комплексними опорними векторами:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{i}} &= \frac{P - jQ}{U_\phi} \bar{\mathbf{e}}_+ + \frac{D_R - jD_I}{U_\phi} \bar{\mathbf{e}}_- = \\ &= \frac{P}{\sqrt{3}U_\phi} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{bmatrix} + \frac{Q}{\sqrt{3}U_\phi} \begin{bmatrix} -j \\ -j\tilde{a} \\ -j\dot{a} \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{D_R}{\sqrt{3}U_\phi} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \tilde{a} \end{bmatrix} + \frac{D_I}{\sqrt{3}U_\phi} \begin{bmatrix} -j \\ -j\dot{a} \\ -j\tilde{a} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Енергетичні процеси в системі координат методу двох ватметрів (СКМДВ) повністю визначаються двома лінійними напругами, що відраховуються відносно спільної точки, наприклад, C , та двома відповідними лінійними струмами

$$\mathbf{u}_{2W}(t) = \begin{bmatrix} u_{AC} \\ u_{BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_A - u_C \\ u_B - u_C \end{bmatrix}; \mathbf{i}_{2W}(t) = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Саме через ці змінні розраховується активна потужність методом двох ватметрів [11]:

$$\begin{aligned} P &= T^{-1} \int_T (u_{AC} i_A + u_{BC} i_B) dt = \\ &= T^{-1} \int_T \mathbf{u}_{2W} \wedge \mathbf{i}_{2W}(t) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Розглядаючи основну гармоніку струмів, знайдемо вираз для повної потужності за Бухголь-

цем в заданій системі координат. Квадрат діючого значення лінійних струмів

$$I_1^2 = \bar{\mathbf{i}}_1^{\wedge} \bar{\mathbf{i}}_1^* = \left\| \begin{matrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{matrix} \right\|^* \quad (8)$$

$$\cdot \left\| \begin{matrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \end{matrix} \right\|^* = \left\| \begin{matrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \end{matrix} \right\|^* = \underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{i}}_{2W}^*,$$

де $\bar{\mathbf{R}} = \frac{1}{r} \mathbf{R} = \mathbf{I} + \mathbf{jj}^{\wedge} = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{matrix} \right\|$ – нормована матриця опорів втрат лінії передачі за умови їх однакової величини ($r_A = r_B = r_C = r$) [12].

Обернена нормована матриця опорів втрат

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}^{-1} &= \left\| \begin{matrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{matrix} \right\|^{-1} = \frac{1}{3} \left\| \begin{matrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{matrix} \right\| = \\ &= \frac{1}{3} \left(\left\| \begin{matrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{matrix} \right\| - \left\| \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{matrix} \right\| \right) = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{jj}^{\wedge}. \end{aligned} \quad (9)$$

Квадрат множника напруг повної потужності в СКМДВ має вигляд

$$\begin{aligned} T^{-1} \int_T (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2) dt &= U^2 = \\ &= \left\| \begin{matrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{matrix} \right\|^* = \frac{1}{3} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{matrix} \right\|^{\wedge} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|^* = \\ &= \underline{\mathbf{u}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \underline{\mathbf{u}}_{2W}^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким чином, квадрат повної потужності основної гармоніки в СКМДВ має вигляд

$$S_1^2 = \underline{\mathbf{u}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \underline{\mathbf{u}}_{2W}^* \times \underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{i}}_{2W}^*. \quad (11)$$

Перепишемо (5), видаливши третю координату струмових векторів

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{i}}_{2W} &= \left\| \begin{matrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \end{matrix} \right\| = \frac{P}{\sqrt{3}U_L} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| + \frac{Q}{\sqrt{3}U_L} \left\| \begin{matrix} -j \\ -j\tilde{a} \end{matrix} \right\| \\ &+ \frac{D_R}{\sqrt{3}U_L} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| + \frac{D_I}{\sqrt{3}U_L} \left\| \begin{matrix} -j \\ -j\tilde{a} \end{matrix} \right\| = \\ &= (P\underline{\mathbf{v}}_P + Q\underline{\mathbf{v}}_Q + D_R\underline{\mathbf{v}}_{DR} + D_I\underline{\mathbf{v}}_{DI})U_L^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Між двокоординатними опорними векторами з (12) мають місце наступні зв'язки

$$\underline{\mathbf{v}}_Q = -j\underline{\mathbf{v}}_P; \underline{\mathbf{v}}_{DR} = \underline{\mathbf{v}}_P^*; \underline{\mathbf{v}}_{DI} = -j\underline{\mathbf{v}}_P^*,$$

причому

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{v}}_P^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_P^* &= \underline{\mathbf{v}}_P^{\wedge} (\mathbf{I} + \mathbf{jj}^{\wedge}) \underline{\mathbf{v}}_P^* = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\|^{\wedge} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\|^* + \\ &+ \frac{(1 + \tilde{a})(1 + \tilde{a})^*}{3} = \frac{2+1}{3} = 1, \end{aligned}$$

внаслідок чого справедливі співвідношення

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{v}}_m^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_n^*) &= \begin{cases} 1, m = n; \\ 0, m \neq n, \end{cases} \quad (13) \\ m, n &= P, Q, DR, DI. \end{aligned}$$

Кожен з опорних векторів (12) може бути виражений через напруги симетричного трифазного джерела та координати вектора напруг СКМДВ

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{v}}_P &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| = \frac{1}{\sqrt{3}U_\phi} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \end{matrix} \right\| = \frac{1}{U_L} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|; \\ \underline{\mathbf{v}}_Q &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} -j \\ -j\tilde{a} \end{matrix} \right\| = \frac{1}{U_L \sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|; \\ \underline{\mathbf{v}}_{DR} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 1 \\ \tilde{a} \end{matrix} \right\| = \frac{1}{3U_L} \left\| \begin{matrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|; \\ \underline{\mathbf{v}}_{DI} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} -j \\ -j\tilde{a} \end{matrix} \right\| = \frac{1}{U_L \sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{matrix} \right\|. \end{aligned} \quad (14)$$

Спільно використовуючи (12), (13) та (14), отримуємо вирази для чотирьох скалярних потужностей першої гармоніки в СКМДВ

$$\begin{aligned} P &= U_L \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_P^*) = \\ &= \operatorname{Re}(\dot{i}_A \dot{U}_{AC}^* + \dot{i}_B \dot{U}_{BC}^*) = W_{AC,A} + W_{BC,B}; \\ Q &= U_L \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_Q^*) = \\ &= \frac{-W_{AC,A} - 2W_{AC,B} + 2W_{BC,A} + W_{BC,B}}{\sqrt{3}}; \\ D_R &= U_L \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_{DR}^*) = \\ &= W_{AC,A} - W_{BC,A} - W_{BC,B}; \\ D_I &= U_L \operatorname{Re}(\underline{\mathbf{i}}_{2W}^{\wedge} \bar{\mathbf{R}} \underline{\mathbf{v}}_{DI}^*) = \\ &= \frac{W_{AC,A} + 2W_{AC,B} + W_{BC,A} - W_{BC,B}}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Як і слід було очікувати, вираз для активної потужності визначається класичним виразом [11] суми показань двох ватметрів $W_{AC,A} + W_{BC,B}$, де в нижньому індексі позначені фази лінійної напруги та струму, що подаються на відповідний ватметр, а неактивні потужності вперше ідентифікуються зваженими сумами показань чотирьох ватметрів $W_{AC,A}; W_{AC,B}; W_{BC,A}; W_{BC,B}$, на які подаються електричні змінні СКМДВ.

Комп'ютерний експеримент здійснювалася в програмному середовищі PLECS, де була змодельована симетрична трифазна трипровідна система живлення (рис. 1) з параметрами джерела $U_\phi = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}$ та навантаження

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{AB} &= R_{AB} = 5 \text{ Ом}; \\ \bar{Z}_{BC} &= R_{BC} + jX_{BC} = (4 - j5) \text{ Ом}; \\ \bar{Z}_{CA} &= R_{CA} + jX_{CA} = (4 + j3) \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Для верифікації формул (15) порівнювались значення чотирьох скалярних потужностей,

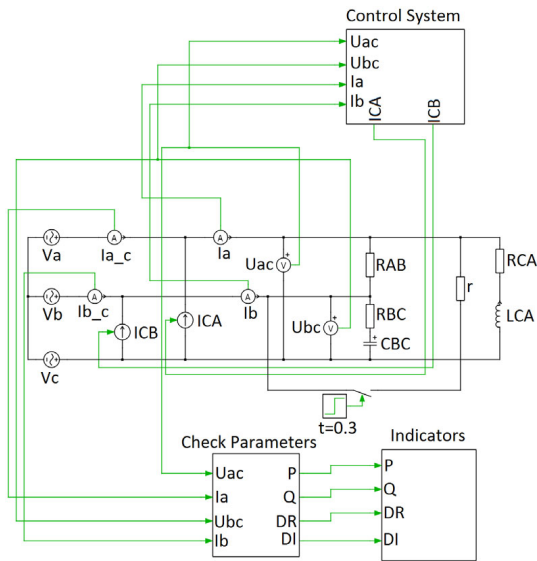


Рис. 1. Схема комп'ютерної моделі трифазної трипровідної системи живлення

отримані для заданого навантаження аналітично та експериментально. При аналітичному підході [13] на першій стадії розраховуються комплексні провідності

$$\begin{aligned} \bar{Y}_0 &= Y_0^R + jY_0^I = \frac{1}{\bar{Z}_{AB}} + \frac{1}{\bar{Z}_{BC}} + \frac{1}{\bar{Z}_{CA}} = \\ &= (0.45756 + 0.0019512j) \text{ С.м.}; \\ \bar{Y}_- &= Y_-^R + jY_-^I = \frac{e^{j\pi/3}}{\bar{Z}_{AB}} - \frac{1}{\bar{Z}_{BC}} + \frac{e^{-j\pi/3}}{\bar{Z}_{CA}} = \\ &= (-0.021484 - 0.14731j) \text{ С.м.} \end{aligned}$$

На другій стадії безпосередньо розраховуються скалярні потужності:

$$\begin{aligned} P &= U^2 Y_0^R = 66071.8 \text{ Вт}; \\ Q &= -U^2 Y_0^I = -281.756 \text{ ВАр}; \\ D_R &= U^2 \cdot Y_-^R = -3102.2 \text{ ВА}; \\ D_I &= -U^2 \cdot Y_-^I = 21271.5 \text{ ВА}. \end{aligned}$$

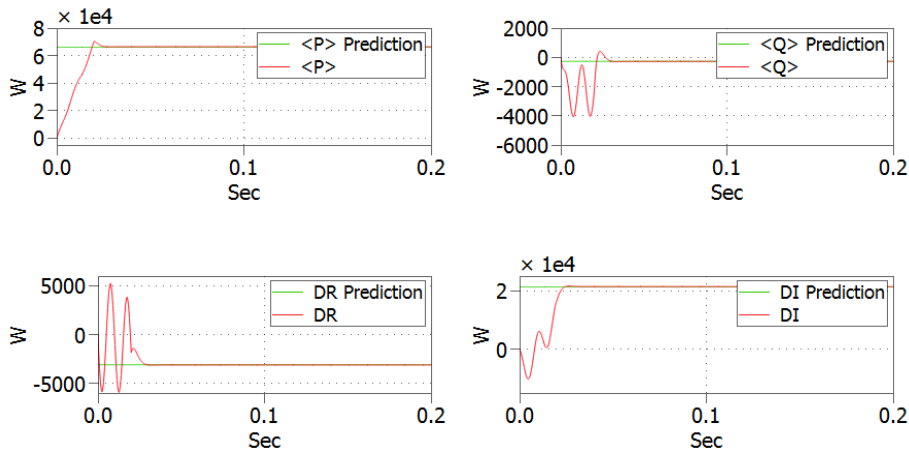


Рис. 2. Експериментальні дані вимірювання скалярних потужностей

Експериментальні дані, отримані як зважені суми за формулою (15) показань ватметрів комп'ютерної моделі (рис. 1), представлені на рис. 2 та повністю збігаються з розрахунковими.

Напівпровідниковий ПАФ, схема якого наведена в [12], представлений в комп'ютерній моделі залежними джерелами струму ICA та ICB. Сигнали керування ними для забезпечення компенсації струмів потужностей небалансу отримаємо з (12) та (14) у вигляді

$$\begin{aligned} \underline{i}_W^C &= \begin{bmatrix} i_A^C \\ i_B^C \end{bmatrix} = (D_R \underline{v}_{DR} + D_I \underline{v}_{DI}) U_{JI}^{-1} = \\ &= \left(\frac{D_R}{3U_{JI}^2} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} + \frac{D_I}{\sqrt{3}U_{JI}^2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{AC} \\ \dot{U}_{BC} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Цьому рівнянню відповідають часові залежності струмів компенсації

$$\begin{bmatrix} i_A^C \\ i_B^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{AC} \\ u_{BC} \end{bmatrix},$$

$$\text{де } \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \frac{D_R}{3U_{JI}^2} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} + \frac{D_I}{\sqrt{3}U_{JI}^2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix};$$

значення потужностей небалансу D_R , D_I формуються за вимірними та осередненими значення потужностей ватметрів відповідно до (15). Використана в моделі структура ланцюга зворотного зв'язку представлена на рис. 3.

На рис. 4 наведено результати моделювання чотирьох скалярних потужностей трифазної трипровідної мережі з увімкненою з запізненням системою компенсації та змінним навантаженням. Після завершення перехідного процесу усі потужності набувають розрахованих середніх значень. В момент часу $t=0.2 \text{ sec}$ вмикається механізм компенсації, в результаті чого зникають пульсації миттєвих значень активної та реактив-

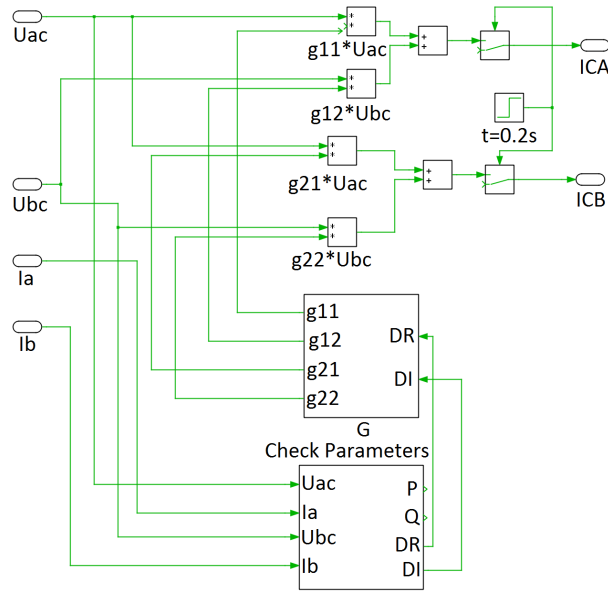


Рис. 3. Структура ланцюга зворотного зв'язку для компенсації потужностей небалансу

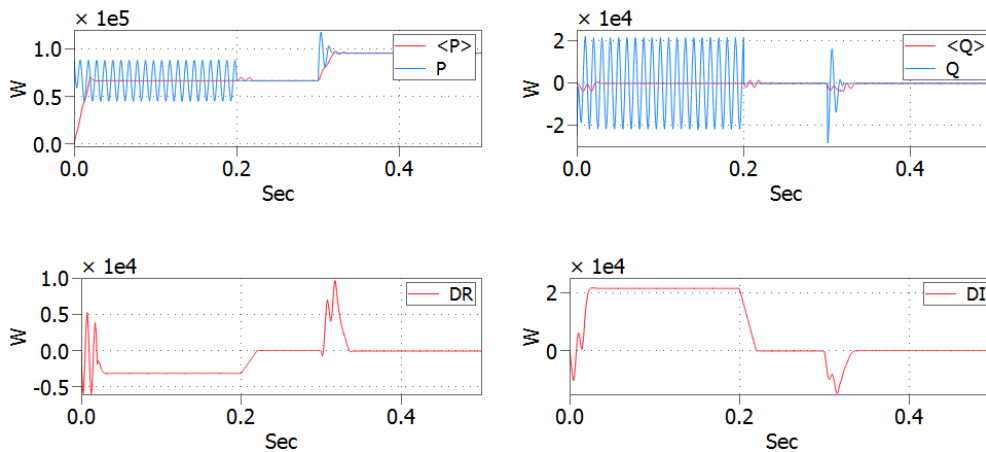


Рис. 4

ної потужностей, а осереднені значення потужностей небалансу стають нульовими.

В момент часу $t = 0.3 \text{ sec}$ змінюється резистивне навантаження фази АВ приєднанням паралельно до R_{AB} додаткового резистора r через ключ S1 на рис. 1. Як і слід було очікувати, по завершенні перехідного процесу приріст отримує тільки постійна складова миттєвої активної потужності, інші величини потужностей залишаються без змін, що підтверджує ефективність дії ланцюга зворотного зв'язку для керування вибірковою активної фільтрацією неактивних складових потужності.

Висновки. Показано, що синусоїдний режим трифазної трипровідної системи живлення за умови симетричного джерела можна однозначно ідентифікувати чотирма скалярними потужнос-

тями: активною й реактивною потужностями, а також уведеними ортогональними складовими потужності небалансу. Сукупність цих скалярних потужностей може бути використана в сучасних локальних мікромережах для керування вибірковою розподіленою активною фільтрацією. Перехід в систему координат методу двох ватметрів, що традиційно використовувалася для вимірювання активної потужності, дозволив збільшити кількість вимірюваних потужностей до зазначених чотирьох шляхом додавання лише двох ватметрів та обробки їх показань за встановленими формулами. Дані комп'ютерного експерименту підтвердили адекватність запропонованих формул визначення чотирьох скалярних потужностей за показаннями чотирьох ватметрів

та ефективність дії ланцюга зворотного зв'язку для керування вибірковою активної фільтрацією неактивних складових потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. IEEE Std. 1459-2010, Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. 2010.
2. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф., Васильченко В.И. и др. Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии. Харьков: ПП «Граф-Ікс». 2014. 292 с.
3. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників microgrid на локальних ринках електроенергії *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37–46.
4. Guerrero J. M., Vasquez J. C., Matas J., De Vicuña L. G., and Castilla M., “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
5. В. Ю. Ноженко, О. В. Бялобржеський, А. І. Гладир. Економічна доцільність встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв на шинах трансформаторних підстанцій. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 5/2021 (130). С. 103–108.
6. Vijay A.S. Vijay, Doolla Suryanarayana Doolla, Chandorkar Mukul C. Chandorkar. Unbalance mitigation strategies in microgrids. *IET Power Electron.*, 2020, Vol. 13. Iss. 9, pp. 1687–1710.
7. Augusto Matheus dos Santos Alonso, Danilo Iglesias Brandao, Elisabetta Tedeschi, Fernando Pinhabel Marafão. Distributed selective harmonic mitigation and decoupled unbalance compensation by coordinated inverters in three-phase four-wire low-voltage networks. *Electric Power Systems Research*. Vol. 186, Sept. 2020, pp. 1–14.
8. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 12–20.
9. Сиротин Ю.А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 6. С. 57–65.
10. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway, NJ: IEEE Press. 2007, 379 p.
11. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. Курило І.А., Шеховцов В.І., Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки: Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. 272 с.
12. Artemenko M.Yu. Кутафін Ю.В., Михальський В.М., Поліщук С.Й., Чопик В.В., Шаповал І.А. Керування паралельним активним фільтром трифазної трипровідної мережі в системі координат методу двох ватметрів. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 11–20.
13. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*, Vol. XII, No. 1, 2006, pp. 3–13.

MEASUREMENT AND COMPENSATION OF INACTIVE POWERS IN THE COORDINATE SYSTEM OF THE TWO WATTMETER METHOD

Mykhailo Artemenko

Professor at the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, artemenko_m_ju@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9341-9238

Yurii Kutafin

Postgraduate Student at the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, yurkut@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8156-1277

The **purpose** of the article is to develop a mathematical apparatus for identifying the unbalance power components of a three-phase three-wire power supply system in the coordinate system of the two wattmeter method, aimed at their measurement and distributed compensation by semiconductor converters of renewable energy sources. **Methodology.** The decomposition of the vector of linear currents into active and inactive power components was based on the representation of the vector of asymmetric sinusoidal line currents by symmetrical components. Elements of matrix algebra and complex calculus were used to represent inactive components of power and compensation currents in the coordinate system of the two wattmeter method. **The results.** The mathematical apparatus for identifying the unbalance power components of a three-phase three-wire power supply system and their corresponding currents in the coordinate system of the two

wattmeter method was developed. It is shown that the sinusoidal mode of a three-phase three-wire power supply system under the condition of a symmetrical source can be uniquely identified by four scalar powers: active and reactive powers, as well as two introduced orthogonal components of the unbalance power. It is demonstrated that each of the inactive powers can be represented in the coordinate system of the two wattmeter method as a weighted sum of the four wattmeter readings. **Originality.** For the first time, the values of the weighted sum coefficients of four wattmeter readings were obtained for the determination of inactive powers. A new structure of the feedback circuit for selective compensation of inactive powers is presented. **Practical value.** The results of the work can be used for measurement and selective distributed compensation of inactive powers in the coordinate system of two the wattmeter method, in particular, in modern local microgrids for managing active filtering of consumed currents.

Key words: shunt active filter, coordinate system of the two wattmeter method, unbalance power, distributed compensation.

REFERENCES

1. IEEE Std. 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions.
2. Hryb, O.H., et al. (2014). Kachestvo elektricheskoi energii. Tom 3. Metody i sredstva povysheniya kachestva elektricheskoi energii [Quality of electrical energy. Volume 3. Methods and means of improving the quality of electrical power]. Hraf-X: Kharkiv, 292 p. [in Russian]
3. Kyrylenko, O., Zhuikov, V., Denysiuk, S. (2022). Vykorystannya dynamichnoi taryfikatsii dlya optymizatsii tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv microgrid na lokalnykh runkakh elektroenergii [Use of dynamic tariffication for optimization microgrid technical and economic indicators in local electricity markets]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 3. pp 37–46. [in Ukrainian]
4. Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J. et al (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization,"*IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 58. No. 1. pp. 158–172.
5. Nozhenko, V., Bialobrzheskyi, O., Gladyr, A. (2021). Ekonomichna dotsilnist vstanovlennya filtrokompensuyuchykh prystroyiv na shynah transformatornykh pidstantsiy [Economic viability of filter compensating devices installation at transformers substations' busbars]. *Transaction of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. Vol. 1 (130). pp. 103–108. [in Ukrainian]
6. Vijay, A.S., Doolla Suryanarayana, Chandorkar Mukul, C. (2020). Unbalance mitigation strategies in microgrids. *IET Power Electron.* Vol. 13. Iss. 9. pp. 1687–1710.
7. Augusto Matheus dos Santos Alonso, Danilo Iglesias Brandao, Elisabetta Tedeschi, Fernando Pinhabel Marafão (2020). Distributed selective harmonic mitigation and decoupled unbalance compensation by coordinated inverters in three-phase four-wire low-voltage networks. *Electric Power Systems Research*. Vol. 186. pp. 1–14.
8. Artemenko, M., Chopyk, V., Mikhalsky, M. et al. (2022). The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 2. pp. 12–20.
9. Sirotin, Yu. (2013) Vektornaya mgnovennaya moschnost' i energeticheskie rezhimy trekhfaznykh tsepei [Vectorial instantaneous power and energetic modes of three-phase circuits]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 6. pp. 57–65. [in Russian]
10. Akagi, H., Watanabe, E.H., Aredes, M. (2007). Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway, NJ: IEEE Press. 379 p.
11. Boiko, V.S., Boiko, V.V., Vydolob, Yu.F. et al. (2004). Teoretychni osnovy elektronekhniki: Tom 1: ustaleni rezhymy elektrychnykh kil iz zoseredzhenymy parametramy [Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering: Vol. 1. Steady-state modes of linear electric circles with lumped parameters]. Kyiv: Polytechnic Publishing House. 272 p. [in Ukrainian]
12. Artemenko, M., Kutafin, Yu., Mikhalsky, M. et al. (2021). Keruvannya parallel'nym aktyvnym fil'trom v systemi koordynat metodu dvokh vatmetriv [Shunt active filter control in the reference frame of two wattmeter method]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 5. pp. 11–20. [in Ukrainian]
13. Czarnecki, L.S. (2006). Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents. Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. Vol. XII. No. 1. pp. 3–13.

Стаття надійшла 05.10.2022