

УДК 621.314

АРТЕМЕНКО М.Ю., БАТРАК Л.М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ
РЕАКТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПАРАЛЕЛЬНОГО
ГІБРИДНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ВИПАДКОВОЇ
ДИСКРЕТНО ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ НАВАНТАЖЕННЯ**

Мета. Метою статті є розробка методики розрахунку параметрів реактивного компенсатора паралельного гібридного фільтра для випадкової дискретно лінійної моделі навантаження.

Методика. Використані сучасні методи досліджень, прийняті в теорії електричних кіл; елементи матричного комплексного числення та векторної алгебри, а також теорії імовірності. Розрахункові співвідношення отримані шляхом компенсації неактивних складових струмів трифазного джерела для математичного сподівання параметрів навантаження.

Результати. При увімкненні реактивного компенсатора, параметри якого розраховані за запропонованою методикою, до дискретно змінюваного за випадковим законом навантаження математичне сподівання встановленої потужності паралельного активного фільтра зменшується не менше, ніж на 29%.

Наукова новизна. Встановлені нові залежності визначення параметрів реактивного компенсатора, з'єднаного трикутником, що дозволяє розраховувати їх незалежно від розрахунку елементів компенсатора, з'єднаного зіркою.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані при оптимальному проектуванні паралельного гібридного фільтра для підвищення коефіцієнта корисної дії трифазної чотирипровідної системи електроживлення.

Ключові слова: гібридний силовий фільтр, гармоніки струму, нелінійне навантаження, коефіцієнт гармонік.

Вступ. Для вирішення завдання підвищення якості електроенергії широке застосування отримали пристрої активної фільтрації, зокрема, паралельні активні фільтри (ПАФ), які дозволяють компенсувати неактивні складові потужності та пульсації миттєвої активної потужності шляхом симетрування струмів трифазного джерела. Однак енергетичною умовою доцільності застосування ПАФ є підвищення коефіцієнта корисної дії системи електропостачання в цілому, тобто економія потужності втрат в силовому кабелю за рахунок підвищення коефіцієнта потужності має перевищувати власну потужність втрат інвертора ПАФ, що пропорційні його встановленій потужності. Застосування паралельних гібридних фільтрів (ПГФ) - комбінації пасивних і активних фільтрів - дозволяє істотно знизити встановлену потужність активного фільтра та підвищити якість фільтрації гармонік на частоті резонансу.

Незважаючи на велику увагу, яка приділяється в останні роки в зарубіжній і вітчизняній науково-технічній літературі дослідженню ефективності функціонування мережевих фільтруючих пристроїв, основна частина досліджень [2-5] присвячена питанням окремого функціонування пасивних і активних фільтрів в умовах детермінованого навантаження.

Постановка задачі. Враховуючи актуальність питання забезпечення якості електроенергії в живильних мережах в умовах нестационарного не детермінованого навантаження, в роботі розроблюється методика розрахунку параметрів реактивного

компенсатора в складі паралельного гібридного фільтра для випадкової дискретно лінійної моделі навантаження.

Результати дослідження. Розглянемо умови врівноваженості лінійного навантаження трифазної чотирипровідної системи живлення, що складається з симетричного трифазного джерела напруги синусоїдної форми, лінійного детермінованого навантаження, увімкнутого трикутником, та компенсатора з реактивних елементів, увімкнутого зіркою (рис.). Іншими словами, знайдемо умови, яким мають задовольняти параметри провідностей $\bar{Y}_A, \bar{Y}_B, \bar{Y}_C, \bar{Y}_{AB}, \bar{Y}_{BC}, \bar{Y}_{CA}$ для споживання від трифазного джерела активного струму за Фрізе, що забезпечує одиничний коефіцієнт потужності [1], та незмінну в часі величину миттєвої потужності джерела [3].

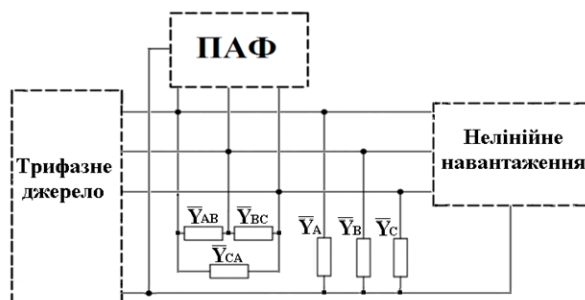


Рис. Трифазна чотирипровідна система живлення з ПГФ

Відповідно до символічного методу розрахунку представимо вектор фазних напруг трифазного джерела за формулою

$$\mathbf{u}_\phi(t) = \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} U_\phi \cos(\omega t) \\ U_\phi \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ U_\phi \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}_\phi e^{j\omega t}), \quad (1)$$

де $\bar{\mathbf{u}}_\phi = U_\phi \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \tilde{a}^T \end{bmatrix}$; $\tilde{a} = e^{j2\pi/3}$; $\tilde{a}^T = (\tilde{a})^* = e^{-j2\pi/3}$; U_ϕ – дійсне значення фазної напруги, T – знак транспонування.

Тоді вектор лінійних напруг трифазного джерела описується виразом

$$\mathbf{u}_L(t) = \begin{bmatrix} u_{AB}(t) \\ u_{BC}(t) \\ u_{CA}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} U_L \cos(\omega t + \pi/6) \\ U_L \cos(\omega t - \pi/2) \\ U_L \cos(\omega t + 5\pi/6) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}_L e^{j\omega t}), \quad (2)$$

Де

$$\bar{\mathbf{u}}_L = \begin{bmatrix} \dot{U}_{AB} \\ \dot{U}_{BC} \\ \dot{U}_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_L e^{j\pi/6} \\ U_L e^{-j\pi/2} \\ U_L e^{5\pi/6} \end{bmatrix} = \sqrt{3} U_\phi e^{j\pi/6} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \tilde{a} \end{bmatrix}.$$

Вектор комплексних струмів, споживаних лінійним навантаженням від трифазного джерела, має дві складові, що розподіляються між провідностями, з'єднаними, відповідно, зіркою та трикутником:

$$\bar{\mathbf{i}} = \bar{\mathbf{i}}_Y + \bar{\mathbf{i}}_\Delta = \begin{bmatrix} \bar{Y}_A & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_B & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_C \end{bmatrix} \bar{\mathbf{u}}_\phi + \begin{bmatrix} \dot{U}_{AB} \bar{Y}_{AB} - \dot{U}_{CA} \bar{Y}_{CA} \\ \dot{U}_{BC} \bar{Y}_{BC} - \dot{U}_{AB} \bar{Y}_{AB} \\ \dot{U}_{CA} \bar{Y}_{CA} - \dot{U}_{BC} \bar{Y}_{BC} \end{bmatrix} = U_\phi \left(\begin{bmatrix} \bar{Y}_A \\ \bar{Y}_B \tilde{a} \\ \bar{Y}_C \tilde{a} \end{bmatrix} + \sqrt{3} e^{j\pi/6} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{AB} - \tilde{a} \bar{Y}_{CA} \\ \bar{Y}_{BC} \tilde{a} - \bar{Y}_{AB} \\ \bar{Y}_{CA} \tilde{a} - \bar{Y}_{BC} \tilde{a} \end{bmatrix} \right). \quad (3)$$

Комплексний вектор активного струму навантаження визначається за формулою Фрізе [1] з урахуванням того, що активна потужність виділяється лише в провідностях, з'єднаних зіркою:

$$\bar{\mathbf{i}}_p = \text{Re} \left(\frac{\tilde{S}}{\bar{\mathbf{u}}_\phi^T \bar{\mathbf{u}}_\phi^*} \right) \bar{\mathbf{u}}_\phi = \text{Re} \left(\frac{\bar{y}_A U_A^2 + \bar{y}_B U_B^2 + \bar{y}_C U_C^2}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \right) \bar{\mathbf{u}}_\phi = U_\phi \text{Re} \left(\frac{\bar{y}_A + \bar{y}_B + \bar{y}_C}{3} \right) \left\| \frac{1}{\dot{a}} \right\|. \quad (4)$$

Перейшовши до рівності комплексних векторів симетричних складових $\mathbf{i} = \mathbf{F}^{-1} \bar{\mathbf{i}}$ та $\mathbf{i}_p = \mathbf{F}^{-1} \bar{\mathbf{i}}_p$, отриманих шляхом множення виразів (3), (4) на модифіковану обернену матрицю Fortesque [4], одержимо умову компенсації у вигляді

$$U_\phi \left\| \begin{array}{c} \bar{y}_+ \\ \bar{y}_0 + \sqrt{3} e^{j30^\circ} (1 - \dot{a}) \bar{y}_{20} \\ \bar{y}_- + \sqrt{3} e^{j30^\circ} (1 - \tilde{a}) \bar{y}_{2-} \end{array} \right\| = U_\phi \left\| \begin{array}{c} 0 \\ \text{Re}(\bar{y}_0) \\ 0 \end{array} \right\|, \quad (5)$$

де $\bar{y}_0 = (\bar{y}_A + \bar{y}_B + \bar{y}_C) / \sqrt{3}$; $\bar{y}_+ = (\bar{y}_A + \tilde{a}\bar{y}_B + \dot{a}\bar{y}_C) / \sqrt{3}$; $\bar{y}_- = (\bar{y}_A + \dot{a}\bar{y}_B + \tilde{a}\bar{y}_C) / \sqrt{3}$;

$$\bar{y}_{20} = (\bar{y}_{AB} + \bar{y}_{BC} + \bar{y}_{CA}) / \sqrt{3}; \bar{y}_{2-} = (\bar{y}_{AB} + \dot{a}\bar{y}_{BC} + \tilde{a}\bar{y}_{CA}) / \sqrt{3}.$$

З прирівнювання елементів векторів виразу (5) випливають умови компенсації неактивних складових струмів трифазного джерела:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_+ = 0; \\ \text{Im}(\bar{y}_0) = 0; \\ \bar{y}_- + \sqrt{3} e^{j30^\circ} (1 - \tilde{a}) \bar{y}_{2-} = 0; \\ \bar{y}_{20} = 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

У випадку, коли з'єднане зіркою детерміноване несиметричне навантаження, що задається комплексними провідностями $\bar{y}_A, \bar{y}_B, \bar{y}_C$, має бути врівноважене реактивним компенсатором, елементи якого з'єднані зіркою (параметри реактивних провідностей b_A, b_B, b_C) та трикутником (параметри реактивних провідностей b_{AB}, b_{BC}, b_{CA}), загальні умови компенсації (6) модифікуються до вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_+ + j\dot{b}_+ = 0; \\ \text{Im}(\bar{y}_0) + b_0 = 0; \\ \bar{y}_- + j\dot{b}_- + e^{j30^\circ} \sqrt{3} j(1 - \tilde{a}) \dot{b}_{2-} = 0; \\ \dot{b}_{20} = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

де $b_0 = (b_A + b_B + b_C) / \sqrt{3}$; $\dot{b}_+ = (b_A + \tilde{a}b_B + \dot{a}b_C) / \sqrt{3}$; $\dot{b}_{20} = (b_{AB} + b_{BC} + b_{CA}) / \sqrt{3}$; $\dot{b}_{2-} = (b_{AB} + \dot{a}b_{BC} + \tilde{a}b_{CA}) / \sqrt{3}$.

З першого рівняння системи (7) випливає, що $\dot{b}_+ = j\bar{y}_+$. Оскільки реактивні провідності елементів компенсатора є дійсними числами, то

$$\dot{b}_- = (b_A + b_B \dot{a} + b_C \tilde{a}) / \sqrt{3} = (\dot{b}_+)^* = -j\bar{y}_+. \quad (8)$$

Для розрахунку параметрів елементів компенсатора, з'єднаних зіркою, маємо систему рівнянь, отриманих з перших двох рівнянь системи (7) та виразу (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} (b_A + b_B + b_C) / \sqrt{3} = -\text{Im}(\bar{y}_0); \\ (b_A + b_B \tilde{a} + b_C \dot{a}) / \sqrt{3} = j\bar{y}_+; \\ (b_A + b_B \dot{a} + b_C \tilde{a}) / \sqrt{3} = -j\bar{y}_+. \end{array} \right. \quad (9)$$

Розв'язок системи (9) знайдемо, застосувавши модифіковану обернену матрицю Fortesque:

$$\begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \ddot{a} \\ 1 & \ddot{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\text{Im}(\bar{y}_0) \\ j\bar{y}_+ \\ -j\bar{y}_+ \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -\text{Im}(\bar{y}_0) + j(\bar{y}_+ - \dot{\bar{y}}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) + j(\dot{\bar{a}}\bar{y}_+ - \ddot{\bar{a}}\dot{\bar{y}}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) + j(\ddot{\bar{a}}\bar{y}_+ - \dot{\bar{a}}\dot{\bar{y}}_+) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -\text{Im}(\bar{y}_0) - 2\text{Im}(\bar{y}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) - \sqrt{3}\text{Re}(\bar{y}_+) + \text{Im}(\bar{y}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) + \sqrt{3}\text{Re}(\bar{y}_+) + \text{Im}(\bar{y}_+) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для розрахунку параметрів елементів компенсатора, з'єднаних трикутником, попередньо знайдемо з третього рівняння системи (7)

$$\dot{b}_{2-} = -\frac{\bar{y}_- + j\dot{\bar{b}}_-}{e^{j30^\circ} \sqrt{3} j(1 - \ddot{a})} = \frac{\bar{y}_- + \dot{\bar{y}}_+}{(e^{-j60^\circ} - e^{-j180^\circ})\sqrt{3}} = \frac{2e^{j30^\circ}}{3\sqrt{3}} [\text{Re}(\bar{y}_A) + \dot{a}\text{Re}(\bar{y}_B) + \ddot{a}\text{Re}(\bar{y}_C)]. \quad (11)$$

Визначаємо вектор реактивних провідностей трикутного компенсатора:

$$\begin{pmatrix} b_{AB} \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \ddot{a} \\ 1 & \ddot{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{b}_{2-} \\ \dot{b}_{2-} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \dot{b}_{2-} + \dot{b}_{2-} \\ \dot{a}\dot{b}_{2-} + \dot{a}\dot{b}_{2-} \\ \dot{a}\dot{b}_{2-} + \dot{a}\dot{b}_{2-} \end{pmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \text{Re}(\dot{b}_{2-}) \\ \text{Re}(\dot{a}\dot{b}_{2-}) \\ \text{Re}(\dot{a}\dot{b}_{2-}) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Формула (12) зі значенням параметра \dot{b}_{2-} за формулою (11) дозволяє на відміну від [2] розраховувати параметри компенсатора, з'єданого трикутником, незалежно від розрахунку елементів компенсатора, з'єданого зіркою.

Якщо нелінійне навантаження має випадковий характер, доцільно врівноважувати величину його математичного сподівання [3], зменшуючи математичне сподівання встановленої потужності інвертора ПАФ. Для випадкової дискретно лінійної моделі навантаження, комплексні провідності якого приймають n значень $\bar{y}_{Ai}, \bar{y}_{Bi}, \bar{y}_{Ci}$ з ймовірностями $p_i, \sum_{i=1}^n p_i = 1$, математичні сподівання провідностей фаз знаходять за

формулами $\bar{y}_{MA} = \sum_{i=1}^n p_i \bar{y}_{Ai}; \bar{y}_{MB} = \sum_{i=1}^n p_i \bar{y}_{Bi}; \bar{y}_{MC} = \sum_{i=1}^n p_i \bar{y}_{Ci}$ та розраховують для цих значень праві частини виразів (10)-(12).

Як приклад, розрахуємо реактивний компенсатор гібридного фільтра для навантаження, що описується комплексною провідністю $\bar{y} = (1 + j)^{-1}$, підключеною з імовірністю p до фази C та з імовірністю $1-p$ до фази B .

Знаходимо математичні сподівання провідностей фаз:

$$\bar{y}_{MC} = \frac{p}{1+j} = \frac{p}{2} - j\frac{p}{2} = \frac{p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ}; \bar{y}_{MB} = \frac{1-p}{1+j} = \frac{1-p}{2} - j\frac{1-p}{2} = \frac{1-p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ}; \bar{y}_{MA} = 0.$$

Розрахуємо визначальні величини правих частин виразу (10):

$$\frac{\bar{y}_0}{\sqrt{3}} = \frac{\bar{y}_{MA} + \bar{y}_{MB} + \bar{y}_{MC}}{3} = \frac{1}{3} \left(\frac{p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} + \frac{1-p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} \right) = \frac{1}{3\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} = \frac{1}{6} - j\frac{1}{6};$$

$$\frac{\bar{y}_+}{\sqrt{3}} = \frac{\bar{y}_{MA} + \dot{\bar{a}}\bar{y}_{MB} + \dot{\bar{a}}\bar{y}_{MC}}{3} = \frac{1}{3} \left(\frac{p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} + \dot{\bar{a}} \frac{1-p}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ} \right) = \frac{-1 - (1-2p)\sqrt{3} + j - j(1-2p)\sqrt{3}}{12}.$$

Реактивні провідності частини компенсатора, з'єднаної зіркою

$$\begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -\text{Im}(\bar{y}_0) - 2\text{Im}(\bar{y}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) - \sqrt{3}\text{Re}(\bar{y}_+) + \text{Im}(\bar{y}_+) \\ -\text{Im}(\bar{y}_0) + \sqrt{3}\text{Re}(\bar{y}_+) + \text{Im}(\bar{y}_+) \end{pmatrix} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} \sqrt{3} - 2p\sqrt{3} \\ 3 + p\sqrt{3} - 3p \\ -\sqrt{3} + p\sqrt{3} + 3p \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Розраховуємо визначальні величини правих частин виразу (12), що задають параметри частини реактивного компенсатора, з'єднаної трикутником:

$$\bar{b}_{2-} = \frac{2e^{j30^\circ}}{3\sqrt{3}} [\operatorname{Re}(\bar{y}_{MA}) + a \operatorname{Re}(\bar{y}_{MB}) + \tilde{a} \operatorname{Re}(\bar{y}_{MC})] = \frac{1}{6\sqrt{3}} [-(1-p)\sqrt{3} + j(1-3p)];$$

$$\operatorname{Re}(\bar{b}_{2-}) = -\frac{(1-p)\sqrt{3}}{6\sqrt{3}} = -\frac{(1-p)}{6};$$

$$\operatorname{Re}(\tilde{a}\bar{b}_{2-}) = \operatorname{Re}\left\{\frac{e^{-j120^\circ}}{6\sqrt{3}} [-(1-p)\sqrt{3} + j(1-3p)]\right\} = \frac{1-2p}{6};$$

$$\operatorname{Re}(a\bar{b}_{2-}) = \operatorname{Re}\left\{\frac{e^{j120^\circ}}{6\sqrt{3}} [-(1-p)\sqrt{3} + j(1-3p)]\right\} = \frac{p}{6}.$$

Реактивні провідності частини компенсатора, з'єднаної зіркою

$$\begin{aligned} \left\| \begin{matrix} b_{AB} \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{matrix} \right\| &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} \operatorname{Re}(\bar{b}_{2-}) \\ \operatorname{Re}(\tilde{a}\bar{b}_{2-}) \\ \operatorname{Re}(a\bar{b}_{2-}) \end{matrix} \right\| = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} -(1-p)/6 \\ (1-2p)/6 \\ p/6 \end{matrix} \right\| = \frac{1}{3\sqrt{3}} \left\| \begin{matrix} -(1-p) \\ 1-2p \\ p \end{matrix} \right\|. \end{aligned} \quad (14)$$

При встановленні реактивного компенсатора гібридного фільтра, параметри якого розраховані за осередненими імовірнісними характеристиками навантаження, кожна конкретна реалізація навантаження супроводжується постачанням активного струму від трифазного джерела та неактивних складових струму від ПАФ.

Зокрема, при підключенні навантаження з комплексною провідністю \bar{y} попереднього прикладу до фази C з формули (5) впливає вираз для вектора комплексних струмів симетричних складових ПАФ

$$\mathbf{i}_c = U_+ \left\| \begin{matrix} \bar{y}a / \sqrt{3} + j\bar{b}_+ \\ j \operatorname{Im}(\bar{y}) / \sqrt{3} + j\bar{b}_0 \\ \bar{y}\tilde{a} / \sqrt{3} + j\bar{b}_- + \sqrt{3}e^{j30^\circ} \bar{b}_{2-} (1-\tilde{a}) \end{matrix} \right\| = U_+ \left\| \begin{matrix} \bar{y}a / \sqrt{3} - \bar{y}_+ \\ j \operatorname{Im}(\bar{y}) / \sqrt{3} - j \operatorname{Im}(\bar{y}_0) \\ \bar{y}\tilde{a} / \sqrt{3} - \bar{y}_- \end{matrix} \right\| = U_+ (1-p) \left\| \begin{matrix} \bar{y} \\ 0 \\ -\bar{y} \end{matrix} \right\|.$$

Аналогічно, при підключенні навантаження \bar{y} до фази B вектор комплексних струмів симетричних складових ПАФ

$$\mathbf{i}_b = U_+ \left\| \begin{matrix} \bar{y}\tilde{a} / \sqrt{3} + j\bar{b}_+ \\ j \operatorname{Im}(\bar{y}) / \sqrt{3} + j\bar{b}_0 \\ \bar{y}a / \sqrt{3} + j\bar{b}_- + \sqrt{3}e^{j30^\circ} \bar{b}_{2-} (1-\tilde{a}) \end{matrix} \right\| = U_+ \left\| \begin{matrix} \bar{y}\tilde{a} / \sqrt{3} - \bar{y}_+ \\ j \operatorname{Im}(\bar{y}) / \sqrt{3} - j \operatorname{Im}(\bar{y}_0) \\ \bar{y}a / \sqrt{3} - \bar{y}_- \end{matrix} \right\| = U_+ p \left\| \begin{matrix} -\bar{y} \\ 0 \\ \bar{y} \end{matrix} \right\|.$$

Встановлену потужність ПАФ знайдемо як математичне сподівання потужностей небалансу, зумовлених струмами \mathbf{i}_c та \mathbf{i}_b :

$$N_G = \sqrt{3}U_+ [p\sqrt{\mathbf{i}_c^T \mathbf{i}_c^*} + (1-p)\sqrt{\mathbf{i}_b^T \mathbf{i}_b^*}] = 2\sqrt{3}U_+^2 p(1-p)\sqrt{2}y = 2\sqrt{3}U_+^2 p(1-p).$$

За відсутності реактивного компенсатора ПАФ компенсує усі неактивні складові потужності, при цьому його встановлена потужність

$$N_0 = \sqrt{S^2 - P^2} = P\sqrt{\lambda^{-2} - 1},$$

де $\lambda = P/S$ – коефіцієнт потужності, що для даного навантаження з комплексною провідністю \bar{y} приймає значення $1/\sqrt{6} \approx 0.408$ [2] при підключенні до будь-якої фази. При цьому активна потужність $P = U_+^2 \operatorname{Re}(\bar{y}) = U_+^2 / 2$.

Таким чином, при увімкненні реактивного компенсатора, параметри якого розраховані за формулами (13) та (14), встановлена потужність ПАФ зменшується відповідно до відношення $N_0 / N_G = \sqrt{5} / 4\sqrt{3}p(1-p)$, тобто не менше, ніж в $\sqrt{5/3} \approx 1.29$ разів, або на 29%.

Висновки. Формула (12) зі значенням параметра b_2 за формулою (11) дозволяє на відміну від [2] розраховувати параметри компенсатора, з'єднаного трикутником, незалежно від розрахунку елементів компенсатора, з'єднаного зіркою.

Запропонована методика розрахунку параметрів реактивного компенсатора гібридного фільтра для випадкової дискретно лінійної моделі навантаження.

Показано, що при увімкненні реактивного компенсатора, параметри якого розраховані за формулами (13) та (14), встановлена потужність ПАФ зменшується не менше, ніж на 29%.

Список використаних джерел

1. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with non-sinusoidal voltage and current // *Przeglad Elektrotechniczny*. –1931. – № 7-8. – Pp. 193-203.
2. Czarnecki, L.S., Haley, P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation // *IEEE Trans. Power Delivery* – 2014 – Vol.30. – No.1.– Pp.53 – 63.
3. Шидловский А.К., Мостовяк И.В., Москаленко Г.А. Уравновешивание режимов многофазных цепей/ *Ин-т электродинамики АН УССР*. – Киев: Наукова думка, 1990.–272 с.
4. Сиротин Ю.А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – №6. –С.57–65.
5. Артеменко М. Ю., Батрак Л. М. Стратегії управління паралельним активним фільтром, що збільшують коефіцієнт корисної дії трифазної чотирипровідної системи живлення // *V міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і негаусівських процесів»*. – 2015. – С.74-77.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ СЛУЧАЙНОЙ ДИСКРЕТНО ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ

АРТЕМЕНКО М.Ю., БАТРАК Л.М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Цель. Целью статьи является разработка методики расчета параметров реактивного компенсатора параллельного гибридного фильтра для случайной дискретно линейной модели нагрузки.

Методика. Используются современные методы исследований, принятые в теории электрических цепей; элементы матричного комплексного исчисления и векторной алгебры, а также теории вероятности. Расчетные соотношения получены путем компенсации неактивных составляющих токов трехфазного источника для математического ожидания параметров нагрузки.

Результаты. При включении реактивного компенсатора, параметры которого рассчитаны по предложенной методике, к дискретно изменяемой по случайному закону

нагрузки математическое ожидание установленной мощности ПАФ уменьшается не менее чем на 29%.

Научная новизна. Установлены новые зависимости определения параметров реактивного компенсатора, соединенного треугольником, что позволяет рассчитывать их независимо от расчета элементов компенсатора, соединенного звездой.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при оптимальном проектировании параллельного гибридного фильтра для повышения коэффициента полезного действия трехфазной четырехпроводной системы питания.

Ключевые слова: *гибридный силовой фильтр, гармоники тока, нелинейная нагрузка, коэффициент гармоник.*

THE CALCULATING METHODOLOGY FOR REACTIVE COMPENSATOR'S PARAMETERS OF SHUNT HYBRID ACTIVE POWER FILTER FOR RANDOM DISCRETE LINEAR LOAD MODEL

ARTEMENKO M.Yu., BATRAK L.M.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

Purpose. The aim of the article is to develop a methodology for calculating the parameters of the reactive compensator shunt hybrid active power filter for random discrete linear loads model.

Methodology. We use modern research methods adopted in the theory of electrical circuits; matrix elements of integral calculus and vector algebra and probability theory. The calculated ratio obtained by compensation of reactive components of the current three-phase power for the expectation of the load parameters.

Findings. When the reactive compensator whose parameters are calculated by the proposed method, a discrete variable randomly load expectation installed capacity shunt active filter reduced to not less than 29%.

Originality. New formulas to determine the parameters of the delta connected compensator were derived. This allows the calculation the delta compensator, regardless of the calculation of the elements of the star compensator.

Practical value. The results obtained can be used in the optimal design of a shunt hybrid filter to improve the efficiency of the three-phase four-wire power supply system.

Keywords: *shunt hybrid active power filter, harmonic current, non-linear load, harmonic distortion.*