

Силовая электроника

УДК 621.314

М. Ю. Артеменко, д-р.техн.наук, **Л. М. Батрак**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Стратегія управління паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної системи живлення з багатоваріантним пропорційно-векторним формуванням миттєвих струмів джерела

Показано, що більшість існуючих стратегій управління паралельними активними фільтрами чотирипровідної трифазної системи живлення еквівалентні формуванню вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційним вектору опорних напруг, що співпадає з вектором миттєвих значень фазних напруг або є його частиною з поліпшеним спектральним складом. Запропонована система управління ПАФ чотирипровідної трифазної мережі, що реалізовує стратегію багатоваріантного пропорційно-векторного формування миттєвих струмів джерела, в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається один із двадцяти методів управління, оптимальний за певним показником якості. Бібл. 9, рис. 1, табл. 2.

Ключові слова: паралельний активний фільтр, система управління, пропорційно-векторне формування миттєвих струмів трифазного джерела.

Вступ

Поява векторних підходів до управління пристроями активної фільтрації трифазної системи живлення, основаних на сучасних теоріях миттєвих потужностей, сприяла розв'язанню наступних задач:

- підвищення енергоефективності системи живлення шляхом швидкодіючої компенсації неактивних складових миттєвої потужності, споживаних нелінійним навантаженням;
- покращення гармонічного складу струму, споживаного від джерел живлення, за рахунок зменшення рівня вищих гармонік;
- симетрування мережеских фазних струмів і наближення їх форми до синусоїдної;
- рекуперація енергії навантаження в трифазну мережу живлення;
- зменшення втрат електроенергії в мережах електропостачання промислових підприємств -

ємств та поліпшення якості мережевої напруги.

Основні стратегії управління паралельними активними фільтрами (ПАФ) можуть бути розділені на дві групи: пропорційно-векторного формування струмів трифазного джерела, побудовані на теорії потужності С. Фрізе [1], кросс-векторній теорії [7] та векторній стратегії формування струмів компенсації [5, 6] та з матричним перетворенням координат (найпоширенішими є оригінальна та модифікована pq - теорії, а також перетворення в $\alpha\beta 0$, $dq0$, pqr системах координат [2, 3, 4]). Стратегії управління першої групи передбачають обчислення вектора миттєвих значень струмів трифазного джерела пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг чи його частини з поліпшеним спектральним складом та його віднімання від вектора струмів навантаження для формування вектора струмів компенсації. Стандартними процедурами при застосуванні стратегії управління другої групи є представлення миттєвих трьохфазних напруг та струмів навантаження в векторній формі, обчислення їх значень в стаціонарних чи обертових системах координат, отримання складових миттєвої потужності та їх селекція, формування перетворених сигналів компенсації та зворотний перехід до миттєвих значень струмів компенсації, які реалізуються силовою частиною ПАФ. Стратегії першої групи переважають стратегії другої групи за трудомісткістю обчислень, точністю та швидкодією, але залишається відкритим питання про повноту функціональних можливостей стратегій другої групи.

Метою статті є порівняння стратегій управління паралельними активними фільтрами першої та другої групи за функціональними можливостями, побудова системи багатоваріантного пропорційно-векторного управління паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної системи живлення та перевірка ефективності її роботи шляхом комп'ютерного моделювання.

Однією зі стратегій, що відносяться до першої групи, є стратегія формування вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційно вектору миттєвих значень фазних напруг, запропонована С.Фрізе, [1] у вигляді

$$\mathbf{i}_S = G_U \mathbf{u}, \quad (1)$$

де $\mathbf{i}_S = \begin{bmatrix} i_a^S \\ i_b^S \\ i_c^S \end{bmatrix}^T$ - вектор миттєвих струмів трифазного джерела, T - знак транспонування; $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}^T$ - вектор миттєвих значень фазних напруг. Коефіцієнт пропорційності G_U визначають з умови відсутності споживання енергії активним фільтром у вигляді

$$G_U = \frac{P}{U^2}, \quad (2)$$

де $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ - активна потужність навантаження; T - період мережної напруги; $p = \mathbf{u}^T \mathbf{i}_L = u_a i_a^L + u_b i_b^L + u_c i_c^L$ - миттєва активна потужність навантаження; $\mathbf{i}_L = \begin{bmatrix} i_a^L \\ i_b^L \\ i_c^L \end{bmatrix}^T$ - вектор миттєвих значень навантаження, $U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$; $u^2 = \mathbf{u}^T \mathbf{u} = u_a^2 + u_b^2 + u_c^2$. Ця стратегія забезпечує мінімальне при даному навантаженні середньоквадратичне значення струму трифазного джерела.

Пряма компенсація миттєвих складових неактивної потужності трифазного кола стала можливою при представленні будь-якого миттєвого значення трифазного струму, зокрема, струму навантаження, у вигляді [7]

$$\mathbf{i}_L = \frac{1}{U^2} (p \mathbf{u} + \mathbf{q} \times \mathbf{u}), \quad (3)$$

$$p' = u_x i_x + u_y i_y + u_z i_z = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} = (\mathbf{u}')^T \mathbf{i}' = (\mathbf{T} \mathbf{u})^T \mathbf{T} \mathbf{i}_L = \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{i}_L = \mathbf{u}'^T \mathbf{i}_L = p$$

та перетвореної векторної реактивної миттєвої потужності

$$\mathbf{q}' = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \mathbf{u}' \times \mathbf{i}' = \begin{bmatrix} u_y i_z - u_z i_y \\ u_z i_x - u_x i_z \\ u_x i_y - u_y i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} = \mathbf{U}' \mathbf{i}';$$

вираження зазначених складових миттєвої потужності через координати перетвореного вектора струму:

$$\begin{bmatrix} p' \\ q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix};$$

де \times - знак векторного добутку;

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \mathbf{u} \times \mathbf{i}_L = \begin{bmatrix} u_b i_c^L - u_c i_b^L \\ u_c i_a^L - u_a i_c^L \\ u_a i_b^L - u_b i_a^L \end{bmatrix} - \text{вектор миттєвої}$$

реактивної потужності навантаження. Стратегія компенсації полягає у виключенні з вектора струму джерела неактивних складових, пов'язаних з вектором \mathbf{q} :

$$\mathbf{i}_S = \frac{p}{u^2} \mathbf{u}. \quad (4)$$

Це забезпечує нульову миттєву потужність активного фільтра та можливість обійтися без накопичувального реактивного елемента в ньому.

Перетворення координат фазових струмів та напруг в рамках другої групи стратегій широко застосовується в сучасних теоріях миттєвої потужності для визначення її активної та реактивних складових і компенсації небажаних чинників. Чотирикоординатне перетворення складових миттєвої потужності (застосоване, наприклад, в [2] у вигляді модифікованої pq - теорії) може бути узагальнене для довільного перетворення координат наступною процедурою:

перетворення координат вектора фазних напруг $\mathbf{u}' = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix}^T = \mathbf{T} \mathbf{u}$ та вектора струму навантаження $\mathbf{i}' = \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \end{bmatrix}^T = \mathbf{T} \mathbf{i}_L$, де \mathbf{T} - матриця перетворення, що задовольняє властивості $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$, аналітичні вирази цих матриць для основних видів перетворення координат, зокрема, в системах pqr , $dq0$ наведено в [8];

визначення перетвореної скалярної активної миттєвої потужності

визначення перетворених струмів компенсації оберненим перетворенням небажаних

складових миттєвої потужності, що підлягають компенсації:

$$\mathbf{i}'_C = \begin{bmatrix} i'_x \\ i'_y \\ i'_z \end{bmatrix} = \frac{1}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \begin{bmatrix} u_x & 0 & u_z & -u_y \\ u_y & -u_z & 0 & u_x \\ u_z & u_y & -u_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^C \\ q_x^C \\ q_y^C \\ q_z^C \end{bmatrix};$$

визначення струмів компенсатора оберненим перетворенням координат $\mathbf{i}_C = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{i}'_C$.

Знайдемо вектор струмів трифазного дже -

рела при компенсації усіх складових миттєвої реактивної потужності та пульсуючої складової миттєвої активної потужності $\tilde{p} = p - P = p^C$.

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_S &= \mathbf{i} - \mathbf{i}_C = \mathbf{i} - \mathbf{T}^{-1} \frac{1}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \begin{bmatrix} u_x & 0 & u_z & -v_y \\ u_y & -u_z & 0 & v_x \\ u_z & u_y & -u_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \mathbf{i} - \frac{1}{(\mathbf{u}')^T \mathbf{u}'} \mathbf{T}^{-1} (\tilde{p} \mathbf{u}' - \mathbf{U}' \mathbf{q}') = \\ &= \mathbf{i} - \frac{1}{(\mathbf{T} \mathbf{u})^T \mathbf{T} \mathbf{u}} [\tilde{p} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{u}' - \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{u}' \times \mathbf{q}')] = \frac{1}{u^2} (\rho \mathbf{u} + \mathbf{q} \times \mathbf{u}) - \frac{1}{\mathbf{u}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{u}} [\tilde{p} \mathbf{u} - (\mathbf{T}^{-1} \mathbf{v}') \times (\mathbf{T}^{-1} \mathbf{q}')] = \\ &= \frac{1}{u^2} [(p - \tilde{p}) \mathbf{u} + \mathbf{q} \times \mathbf{u} + \mathbf{u} \times \mathbf{q}] = \frac{P}{u^2} \mathbf{u}. \end{aligned}$$

Таким чином, вектор струмів трифазного джерела пропорційний вектору фазних напруг, а чотирикратного перетворення координат в довільній системі можна уникнути, забезпечивши сталу величину споживаної потужності, якщо безпосередньо обчислити вектор струмів компенсатора за формулою

$$\mathbf{i}_C = \mathbf{i}_L - \mathbf{i}_S = \mathbf{i}_L - \frac{P}{u^2} \mathbf{u}. \quad (5)$$

Якщо компенсується лише складові миттєвої реактивної потужності, відповідний вектор компенсації потужностей записується як $\begin{bmatrix} 0 & q_x & q_y & q_z \end{bmatrix}^T$, а вектор струмів трифазного джерела набуває вигляду (4).

Однією з найперспективніших систем перетворення координат є здійснювана в рамках pqr -теорії [3], яка дозволяє сформулювати координати

перетвореного вектора струму пропорційними ненульовим складовим миттєвої потужності:

$$\mathbf{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix}.$$

Наявність двох розділених контурів регулювання за складовими реактивної миттєвої потужності дозволяє поряд з максимальною їх компенсацією виключати протікання струму в нульовому проводі [3]. Оскільки складова вектору струму i_q локалізована в $\alpha\beta$ -площині, її компенсують повністю, а зазначеного ефекту досягають частковим ослабленням (з коефіцієнтом k) складової вектору струму i_r . При цьому вектор струму джерела з урахуванням аналітичних виразів [8] для координат перетвореного вектора струмів та ортів має вигляд

$$\mathbf{i}_S = i_p \mathbf{p} + k i_r \mathbf{r} = \frac{p}{u} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + k \frac{u^2 i_+ - u_+ p}{\sqrt{3} u u_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} \frac{u^2 - u_a u_+}{\sqrt{3} u u_{\alpha\beta}} \\ \frac{u^2 - u_b u_+}{\sqrt{3} u u_{\alpha\beta}} \\ \frac{u^2 - u_c u_+}{\sqrt{3} u u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} = \frac{p}{u^2} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + k \frac{u^2 i_+ - u_+ p}{3 u^2 u_{\alpha\beta}^2} \left(u^2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - u_+ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \right),$$

де $u_+ = u_a + u_b + u_c$; $u_{\alpha\beta}^2 = u^2 - u_+^2 / 3$ – квадрат норми вектора $\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0$, що також розташований в $\alpha\beta$ -площині; $\mathbf{u}_0 = (u_+ / 3) \mathbf{j}$, $\mathbf{j}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$.

Значення коефіцієнта послаблення k отримуємо, помноживши останній вираз зліва на \mathbf{j}^T та прирівнявши до нуля утворену скалярну величину:

$$\frac{pu_+}{u^2} + k \frac{u^2 i_+ - u_+ p}{3u^2 u_{\alpha\beta}^2} (3u^2 - u_+^2) = 0.$$

$$k = \frac{pu_+}{u_+ p - u^2 i_+},$$

Після спрощення маємо

і вектор струму джерела набуває вигляду

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_S &= \frac{p}{u^2} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \frac{pu_+}{3u^2 u_{\alpha\beta}^2} \left(u_+ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - u^2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) = \frac{p}{u^2} \left(1 + \frac{u_+^2}{3u^2} \right) \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{pu_+}{3u^2 u_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \frac{p}{u^2 u_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{pu_+}{3u^2 u_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{p}{u^2 u_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} u_a - u_+ / 3 \\ u_b - u_+ / 3 \\ u_c - u_+ / 3 \end{bmatrix} = \frac{p}{u_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}. \quad (6) \end{aligned}$$

Таким чином, і у випадку розглянутої компенсації вектор струму джерела є пропорційним частині вектора фазних напруг. В роботі [5] показано, що аналогічний результат для вектора струму джерела дає векторна стратегія компенсації без перетворення координат [5, 6], при використанні якої для зазначених цілей вектор струмів компенсації еквівалентний такому, що утворюється в оригінальній pq -теорії [4]. Основне співвідношення векторної стратегії компенсації [5, 6]

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{u}_0^T \mathbf{i}}{\mathbf{u}_0^T \mathbf{u}_0} \mathbf{u}_0 + \frac{\mathbf{u}_{\alpha\beta}^T \mathbf{i}}{\mathbf{u}_{\alpha\beta}^T \mathbf{u}_{\alpha\beta}} \mathbf{u}_{\alpha\beta} + \frac{\mathbf{u}_q^T \mathbf{i}}{\mathbf{u}_q^T \mathbf{u}_q} \mathbf{u}_q$$

з вектором $\mathbf{u}_q = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} u_b - u_c \\ u_c - u_a \\ u_a - u_b \end{bmatrix}$ повністю еквівале-

нтне розкладанню цього вектора струму за осями координатної системи $dq0$

$$\mathbf{i} = (\mathbf{d}^T \mathbf{i}) \mathbf{d} + (\mathbf{q}^T \mathbf{i}) \mathbf{q} + (\mathbf{o}^T \mathbf{i}) \mathbf{o},$$

зі значеннями ортів [8]

$$\mathbf{o} = \mathbf{j} / \sqrt{3}; \mathbf{d} = \mathbf{u}_{\alpha\beta} / u_{\alpha\beta}; \mathbf{q} = \mathbf{o} \times \mathbf{d}.$$

За умов несиметрії та несинусоїдності вектора фазних напруг використання його в якості опорного для формування вектора миттєвих струмів трифазного джерела при живленні потужних нелінійних навантажень призводить до емісії в мережу складових напруги зворотної та нульової послідовності, а також вищих гармонік. Для запобігання цього явища пропонується використовувати [5, 6] як опорний вектор $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix}^T$ складову вектора \mathbf{u} з поліпшеним спектральним складом. Найчастіше це синусоїдна напруга мережевої частоти \mathbf{u}_1 (можливо, несиметрична), отримана шляхом фільтрації вищих гармонік вектора \mathbf{u} чи складова прямої послідовності \mathbf{u}_+ вектора \mathbf{u}_1 . Узагальнюючи розглянуті вище стратегії, отримаємо такі методи формування струму компенсації

$$\mathbf{i}_C = \mathbf{i}_L - \mathbf{i}_S = \mathbf{i}_L - G_V \mathbf{v}, \quad (7)$$

де коефіцієнт пропорційності G_V визначають з умови відсутності споживання енергії паралельним активним фільтром трьома різними способами

$$G_{V1} = \frac{p}{v^2}, \quad (8)$$

$$G_{V2} = \frac{P}{v^2}, \quad (9)$$

$$G_{V3} = \frac{P}{v^2}, \quad (10)$$

$$\text{а } v^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = v_a^2 + v_b^2 + v_c^2; V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt.$$

При першому значенні коефіцієнта G_{V1} маємо нульову миттєву потужність активного фільтра, і компенсація неактивних складових потужності навантаження може здійснюватись активним фільтром без накопичувального реактивного елемента, що зменшує його масу та габарити. При величині коефіцієнта G_{V2} від мережі споживається стала величина активної миттєвої потужності навіть при несиметричних фазних напругах та нелінійному навантаженні. Останнє значення коефіцієнта G_{V3} забезпечує мінімальне при даному навантаженні та векторі опорної напруги середньоквадратичне значення струму трифазного джерела

$$I_S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_S^T \mathbf{i}_S dt} = \sqrt{\frac{G_{V3}^2}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{v} dt} = G_{V3} V = \frac{P}{V} \quad (11)$$

та максимальне значення коефіцієнта потужності

$$\lambda = \frac{P}{U I_S} = \frac{V}{U}. \quad (12)$$

За умови несиметрії вектора \mathbf{v} можна виключити протікання струму в нульовому проводі [5, 6], видаливши з опорного вектора складову нульової послідовності, тобто формувати вектор струму джерела пропорційним опорному вектору $\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0; \mathbf{v}_0 = (v_+ / 3) \mathbf{j}; v_+ = v_a + v_b + v_c :$

$$\mathbf{i}_S = G_{\alpha\beta} \mathbf{v}_{\alpha\beta}. \quad (13)$$

При мінімізації потужності втрат в силовому кабелі вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела формують пропорційним вектору миттєвих значень фазних напруг з частково послабленою складовою нульової послідовності [9]

$$\mathbf{i}_S = G_{\sigma} \mathbf{v}_{\sigma}, \quad (14)$$

де коефіцієнт пропорційності G_{σ} визначають з умови відсутності споживання енергії паралельним активним фільтром трьома різними способами аналогічно формулам (8), (9), (10) з опорним вектором $\mathbf{v}_{\sigma} = \mathbf{v} - \sigma \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_{\alpha\beta} + (1 - \sigma) \mathbf{v}_0$; σ - скалярний коефіцієнт послаблення складової нульової послідовності вектора миттєвих значень фазних напруг, що лежить в межах $0 \leq \sigma \leq 1$, причому оптимальне значення цього коефіцієнта, що мінімізує потужність втрат в силовому кабелі, визначається співвідношенням

питомих активний опорів кожного з фазних проводів силового кабелю трифазної мережі r та r_n

$$\sigma_0 = r_n / (r_n + r / 3). \quad (15)$$

Надаючи величині σ одне з трьох дискретних значень 0; σ_0 ; 1 можна реалізувати значення струму джерела і відповідного струму компенсації за формулами (7), (13), (14).

Функціональна схема системи управління ПАФ, що реалізовує стратегію багатоваріантного пропорційно-векторного формування миттєвих струмів джерела представлено на рис.1. Трифазне джерело живлення через чотирипровідний кабель з'єднане з навантаженням. ПАФ складається з силової частини, що під'єднана паралельно нелінійному навантаженню, та системи керування. В останній вимірюються миттєві значення вектора фазних напруг \mathbf{u} та струмів навантаження \mathbf{i}_L , на основі яких розраховується миттєве значення активної потужності p .

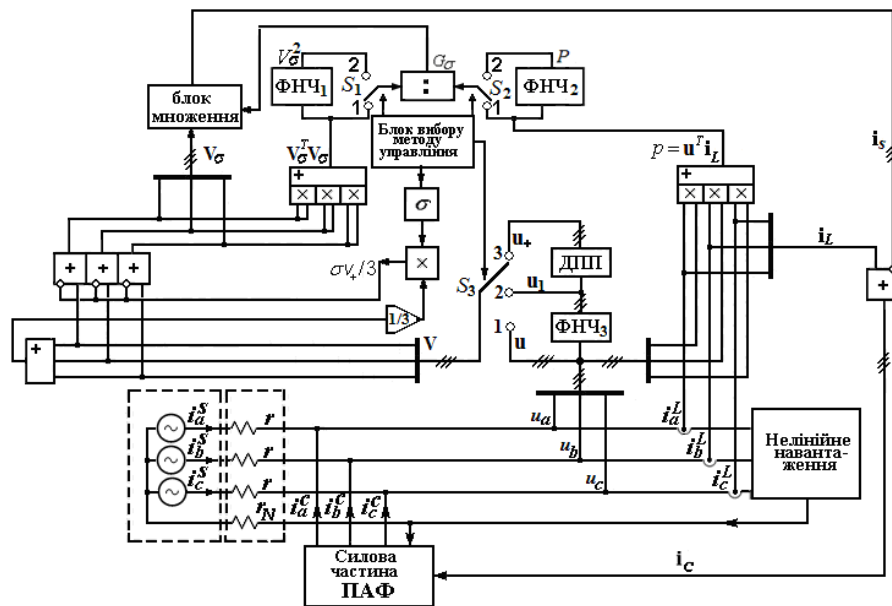


Рис. 1. Функціональна схема системи управління ПАФ

Вибір опорного вектора \mathbf{v} здійснюється перемиканням трипозиційного ключа S_3 , який в положенні 1 обирає вектор фазних напруг \mathbf{u} , в положенні 2 - синусоїдну напругу мережевої частоти \mathbf{u}_1 , що виділяється з вектора \mathbf{u} фільтром низьких частот ФНЧ₃ шляхом позбавлення вищих гармонік; в положенні 3 - складову прямої послідовності синусоїдної напруги \mathbf{u}_+ виділену з вектора \mathbf{u}_1 відповідним детектором прямої послідовності (ДПП). Для часткового послаблення складової нульової послідовності опорного век-

тора \mathbf{v} формується сума миттєвих значень його координат, ділиться на 3, множиться на коефіцієнт послаблення σ та отримана величина $\sigma \mathbf{v}_+ / 3$ віднімається від кожної координати вектора \mathbf{v} . Величина σ набуває одне з трьох можливих значень 0; σ_0 ; 1, кожне з яких забезпечує для заданих положень ключів відповідно мінімальне середньоквадратичне значення струму трифазного джерела, мінімальну потужність втрат в силовому кабелі чи відсутність струму в нульовому проводі. Для отриманого опорного

вектора \mathbf{v}_σ з частково послабленої складової нульової послідовності знаходиться квадрат норми миттєвого значення опорного вектора $\mathbf{v}_\sigma^T \mathbf{v}_\sigma$. Фільтри нижніх частот ФНЧ₁ та ФНЧ₂ з частотою зрізу $1/2T$ виділяють середні значення відповідних величин P та V_σ^2 . Двохпозиційні ключі S_1 та S_2 комутують входи чи виходи низькочастотних фільтрів зі входами дільника, реалізуючи для кожного опорного вектора \mathbf{v}_σ три значення коефіцієнта пропорційності G_σ за формулами (8), (9), (10), що відповідають нульовій миттєвій потужності ПАФ, споживанню сталої величини миттєвої активної миттєвої потужності чи мінімальне середньоквадратичне значення струму трифазного джерела. В блоці множення вектора на скаляр формується розрахункове значення вектора миттєвих значень струмів трифазного джерела \mathbf{i}_s . В блоці векторного до-

давання цей вектор віднімається від вектора фазних миттєвих значень струмів навантаження \mathbf{i}_L , утворюючи розрахункове значення вектора миттєвих значень струмів компенсації \mathbf{i}_C , які відносяться до силової частини ПАФ. Блок вибору методу управління, задаючи стан ключів S_1, S_2, S_3 та величину коефіцієнта послаблення σ , обирає один з 20 способів формування вектора струмів трифазного джерела, наведених в табл. 1. При використанні як опорного вектора складової прямої послідовності синусоїдної напруги \mathbf{u}_+ (ключ S в положенні 3) реалізується лише 2 різних способи формування вектора струмів трифазного джерела, оскільки $\mathbf{j}^T \mathbf{u}_+ = 0; \mathbf{u}_+^T \mathbf{u}_+ = U_+^2$. Тим самим реалізовується стратегія багатоваріантного управління ПАФ з пропорційно-векторним формуванням миттєвих струмів джерела.

Табл. 1

Положення ключів		S3-1			S3-2			S3-3
		$\sigma=0$	$\sigma=\sigma_0$	$\sigma=1$	$\sigma=0$	$\sigma=\sigma_0$	$\sigma=1$	$\sigma=0$
S1	1	$\frac{p}{u^2} \mathbf{u}$	$\frac{p}{u_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)u_0^2} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{p}{u_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$	$\frac{p}{u_1^2} \mathbf{u}_1$	$\frac{p}{u_{1\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)u_{10}^2} \mathbf{u}_{1\sigma}$	$\frac{p}{u_1^2} \mathbf{u}_{1\alpha\beta}$	$\frac{p}{\mathbf{u}_+^T \mathbf{u}_+} \mathbf{u}_+$
S2	1							
S1	2	$\frac{P}{u^2} \mathbf{u}$	$\frac{P}{u_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)u_0^2} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{P}{u_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$	$\frac{P}{u_1^2} \mathbf{u}_1$	$\frac{P}{u_{1\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)u_{10}^2} \mathbf{u}_{1\sigma}$	$\frac{P}{u_1^2} \mathbf{u}_{1\alpha\beta}$	$\frac{P}{U_+^2} \mathbf{u}_+$
S2	2							
S1	2	$\frac{P}{U^2} \mathbf{u}$	$\frac{P}{U_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)U_0^2} \mathbf{u}_\sigma$	$\frac{P}{U_{\alpha\beta}^2} \mathbf{u}_{\alpha\beta}$	$\frac{P}{U_1^2} \mathbf{u}_1$	$\frac{P}{U_{1\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)U_{10}^2} \mathbf{u}_{1\sigma}$	$\frac{P}{U_1^2} \mathbf{u}_{1\alpha\beta}$	
S2	2							

Для порівняння різних методів управління ПАФ, що реалізує система управління, в програмному середовищі Matlab/Simulink моделювався процес фільтрації струмів живлення неке-

рованого випрямляча за схемою Міткевича з активним навантаженням при несиметричній, не-синусоїдній напрузі живлення

$$\mathbf{u} = 100 \left\| \begin{matrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{matrix} \right\| + 10 \left\| \begin{matrix} \sin(\omega t + 60^\circ) \\ \sin(\omega t + 180^\circ) \\ \sin(\omega t - 60^\circ) \end{matrix} \right\| + 10 \left\| \begin{matrix} \sin(\omega t + 90^\circ) \\ \sin(\omega t + 90^\circ) \\ \sin(\omega t + 90^\circ) \end{matrix} \right\| + 20 \left\| \begin{matrix} \sin(5\omega t + 180^\circ) \\ \sin(5\omega t + 60^\circ) \\ \sin(5\omega t - 60^\circ) \end{matrix} \right\|$$

Без фільтра величина середньоквадратичного струму джерела складала $I_s = 8.55$ А, а значення цього струму при різних методах

управління ПАФ зведено до табл. 2. В дужках останнього рядка наведено середньоквадратичне значення опорної напруги V .

Табл. 2

Положення ключів		S3-1			S3-2			S3-3
		$\sigma=0$	$\sigma=\sigma_0$	$\sigma=1$	$\sigma=0$	$\sigma=\sigma_0$	$\sigma=1$	$\sigma=0$
S1	1	6,29	6,31	6,33	6,70	6,71	6,73	6,77
S2	1							
S1	2	6,15	6,17	6,19	6,04	6,06	6,07	6,04 (122,3)
S2	2							
S1	2	5,87	5,88	5,89	5,98	6,00	6,01	
S2	2	(125,9)	(125,5)	(125,3)	(123,5)	(123,1)	(122,9)	

Результати моделювання підтвердили, що в межах кожного обраного опорного вектора напруг найменше середньоквадратичне значення струму джерела обчислюється за формулою (11) та досягається при формуванні коефіцієнта пропорційності діленням активної потужності навантаження на осереднений на періоді мережі квадрат норми опорного вектора напруги. Будь-які додаткові позитивні властивості компенсації, що реалізується іншими методами управління, потребують відповідного збільшення значення середньоквадратичного струму джерела та електричної енергії, споживаної із мережі. Метод управління з формуванням вектора струмів джерела пропорційним будь-якому опорному вектору напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності за критерієм енергоефективності займає проміжне становище між методом управління з використанням повного опорного вектора та методом з опорним вектором, позбавленим складової нульової послідовності.

Висновки

Показано, що більшість існуючих стратегій управління ПАФ чотирипровідної трифазної системи живлення еквівалентні формуванню вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційним вектору опорних напруг, що співпадає з вектором миттєвих значень фазних напруг або є його частиною з поліпшеним спектральним складом.

Запропонована система управління ПАФ чотирипровідної трифазної мережі, що реалізовує стратегію багатоваріантного пропорційно-векторного формування миттєвих струмів джерела, в якій в залежності від конкретних умов застосування обирається один із двадцяти методів управління, оптимальний за певним показником якості.

Результати моделювання підтвердили, що в межах кожного обраного опорного вектора напруг найменше середньоквадратичне значення струму джерела обчислюється за формулою (11) та досягається при формуванні коефіцієнта пропорційності діленням активної потужності навантаження на осереднений на періоді мережі квадрат норми опорного вектора напруги. Будь-які додаткові позитивні властивості компенсації, що реалізується іншими методами управління, потребують відповідного збільшення значення середньоквадратичного струму джерела та електричної енергії, споживаної із мережі.

Список використаних джерел

1. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych. Monografii „Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki”, PWN, Warszawa – Wrocław 1966 c.250-256
2. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems // Proceeding of PCC'97 Conf. – Nagaoka (Japan). – Aug. 1997. – Vol. 1. – P. 361–366.
3. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p - q - r reference frames // Proceeding of Int. Power Electronics Conf. PEDS'99. – Hong Kong. – July 1999. – P. 422–427.
4. Kim H.S., Ogasawara S., Akagi H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems // Proceeding Annual Meeting of IEEC/IAS'99. – Oct. 1999. – P. 431–439.
5. Herrera R. S. and Patricio Salmeron. Instantaneous Reactive Power Theory: A Reference in the Nonlinear Loads Compensation // IEEE Trans. on Industrial Electronics – Vol. 56, No. 6, – June 2009 – P. 2015- 2022.
6. Herrera R. S. and Patricio Salmeron. Instantaneous reactive power theory: A Comparative Evaluation of different formulations // IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 595–604, January. 2007.
7. Peng F. Z., Lai J. S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45. – No. 1. – Pp. 293 - 297.
8. Поліщук С. Й., Артеменко М. Ю., Михальський В. М. Аналітична побудова координатних систем у теорії миттєвої потужності трифазних кіл для керування пристроями активної фільтрації// Технічна електродинаміка. – 2013. – Ч. 2. – С. 25–35.
9. Поліщук С. Й., Артеменко М. Ю., Михальський В. М., Батрак Л. М., Шаповал І. А. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі // Технічна електродинаміка. – 2013. – Ч. 3. – С. 12-19.

Поступила в редакцію 12 лютого 2014 г.

УДК 621.314

М.Ю. Артеменко, д-р.техн.наук, **Л.М. Батрак**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Стратегия управления параллельным активным фильтром четырехпроводной трехфазной системы питания с многовариантным пропорционально-векторным формированием мгновенных токов источника

Показано, что большинство существующих стратегий управления параллельными активными фильтрами (ПАФ) четырехпроводной трехфазной системы питания эквивалентны формированию вектора мгновенных токов трехфазного источника пропорциональным вектору опорных напряжений, совпадает с вектором мгновенных значений фазных напряжений или является его частью с улучшенным спектральным составом. Предложена система управления ПАФ, реализующая стратегию многовариантного пропорционально-векторного формирования мгновенных токов источника. В зависимости от конкретных условий применения в ней выбирается один из двадцати методов управления, оптимальный по определенным показателям качества. Библи. 9, рис. 1, табл. 2.

Ключевые слова: параллельный активный фильтр, система управления, пропорционально-векторное формирование мгновенных токов трехфазного источника.

UDC 621.314

M.Yu. Artemenko, Dr.Sc., **L. M. Batrak**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Peremogy pr, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Control strategy of shunt active filter for three-phase four-wire power system with multivariate proportional-vector formation of instantaneous source currents

It is shown that most of the existing control strategies of shunt active power filters (APF) for three-phase four-wire power system are equivalent to formation of instantaneous source current vector proportional to the referent voltages vector which coincides with the instantaneous vector of the phase voltages or is its part with improved spectral composition. Control system of APF was proposed that realize the multivariate proportional-vector formation of instantaneous source currents. Depending on the application conditions one of the twenty control methods optimal for certain quality characteristics can be selected. Reference 9, figures 1, tables 2.

Keywords: shunt active power filter, control strategy, multivariate proportional-vector formation of instantaneous source currents.

Reference

1. Fryze S. (1966) "Мощность, биенная и позорная уклада 3-фазового о одкшталоных преебегачх напееч фазовых и преедөө прееводовых." Монографии „Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki", PWN, Pp.250-256.
2. Kim H.S., Akagi H. (1997) "The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems". Proceeding of PCC'97 Conf. Vol. 1. Pp. 361–366.
3. Kim H.S., Akagi H. (1999) "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames" Proceeding of Int. Power Electronics Conf. PEDS'99. Pp. 422–427.
4. Kim H.S., Ogasawara S., Akagi H. (1999) "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems". Proceeding Annual Meeting of IEEC/IAS'99. Pp. 431–439.

5. *Herrera R.S. , Salmeron P.* (2007), "Instantaneous Reactive Power Theory: A Reference in the Nonlinear Loads Compensation". IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 56, no 6. Pp. 2015–2022.
6. *Herrera R.S., Herrera, Salmeron P.* (2007), "Instantaneous reactive power theory: A Comparative Evaluation of different formulations". IEEE Trans. Power Delivery. vol. 22, no. 1. Pp. 595–604.
7. *Peng F. Z., Lai J. S.* (1996), "Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems". IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 45. No. 1. Pp. 293-297.
8. *Polishchuk S.Y., Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M.* (2013) "Analytical construction of coordinate systems in theory of instantaneous powers of three-phase chains for management by devices of active filtration". Tekhnichna elektrodynamika. no. 2. pp. 25-35. (Ukr)
9. *Polishchuk S.Y., Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Batrak L. M., Shapoval I. A.* (2013). "Shunt active filter control strategy with partial decrease of zero-sequence component in three-phase four-wire system". Tekhnichna elektrodynamika. no.3. pp. 12-19. (Ukr).