

УДК 621.314

СТРАТЕГІЯ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ З
ЧАСТКОВИМ ПОСЛАБЛЕННЯМ СКЛАДОВОЇ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ НАПРУГ
ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ

С.Й.Поліщук¹, М.Ю.Артеменко², докт.техн.наук, В.М.Михальський¹, докт.техн.наук, Л.М.Батрак²,
І.А.Шаповал¹, канд.техн.наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Запропоновано стратегію керування паралельним активним фільтром, яка базується на формуванні вектора струму джерела пропорційним миттєвому вектору фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності, що дає переваги за величиною потужності втрат у силовому чотирипровідному кабелі у порівнянні з відомими стратегіями. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: система керування, складова нульової послідовності, активний фільтр.

Вступ. Збільшення гармонічних спотворень струмів та напруг у трифазних електричних мережах живлення за рахунок постійного зростання кількості нелінійних споживачів потребує застосування спеціальних засобів для покращення якості споживаного від мережі струму, компенсації реактивних струмів та зменшення втрат енергії в силових кабелях, що в цілому сприяє підвищенню сумарного ККД системи електропостачання [1].

Теорія миттєвої потужності, що розвинена в роботах [3–5,8,9], дозволяє розробити ефективні алгоритми компенсації миттєвої реактивної потужності та відповідних реактивних складових струмів у трифазних чотирипровідних мережах за допомогою активної фільтрації. Однак, в умовах несиметрії фазних напруг, яка призводить до появи складових нульової послідовності, виникає проблема компенсації струму в нейтралі, що викликає підвищені втрати енергії. Сьогодні сформувалися дві основні стратегії керування паралельними компенсаторами для мінімізації втрат у силових кабелях [6, 7].

При використанні першої стратегії максимально компенсується миттєвий реактивний струм у кожному фазному проводі, що не виключає протікання струму в нейтралі. При застосуванні такої стратегії керування вектор миттєвих струмів джерела формується пропорційним вектору миттєвих фазних напруг [8]. Друга стратегія керування [6] використовує для задавання струмів джерела вектор миттєвих значень фазних напруг, позбавлений складової нульової послідовності, що дозволяє повністю позбутися струму в нейтральному проводі. В [7] показано, що при другій стратегії керування середня потужність втрат у силовому чотирипровідному кабелі менша у порівнянні з втратами при керуванні за першою стратегією. Аналогічні результати отримано також при використанні критерію порівняння на основі середнього за період значення втрат [7].

Запропонована нижче стратегія керування паралельним компенсатором базується на формуванні вектора струму джерела пропорційним вектору миттєвої фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності, що дає переваги щодо зменшення потужності втрат у силовому чотирипровідному кабелі у порівнянні з обома вищезгаданими стратегіями, а також переважає другу відому стратегію керування за значенням такого показника, як миттєве значення коефіцієнта потужності або миттєвий коефіцієнт потужності (instantaneous power factor), запропонованого в [8].

Запропонована стратегія керування паралельним активним фільтром. Нехай вектор миттєвих значень фазних напруг має вигляд $\mathbf{v} = \|v_a \ v_b \ v_c\|^T$. Представимо його у вигляді двох векторних ортогональних складових (рис. 1)

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

де перший з доданків $\mathbf{v}_0 = (v_+ / 3)\mathbf{j} = (v_+ / \sqrt{3})\bar{\mathbf{o}}$; $v_+ = \mathbf{j}^T \mathbf{v} = v_a + v_b + v_c$; $\mathbf{j}^T = \|1 \ 1 \ 1\|$ – складова нульової послідовності, спрямована вздовж орта $\bar{\mathbf{o}} = (1 / \sqrt{3})\mathbf{j}$ $\alpha\beta$ -системи координат [4]; другий доданок

$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0 = \left\| \frac{v_a - v_+}{3} \mathbf{i}_a - \frac{v_b - v_+}{3} \mathbf{i}_b - \frac{v_c - v_+}{3} \mathbf{i}_c \right\|^T$ – векторна складова, локалізована в $\alpha\beta$ -площині, оскільки сума її координат дорівнює нулю. Скалярний добуток зазначених складових дорівнює нулю ($\mathbf{v}_0^T \mathbf{v}_{\alpha\beta} = \mathbf{v}_{\alpha\beta}^T \mathbf{v}_0 = 0$).

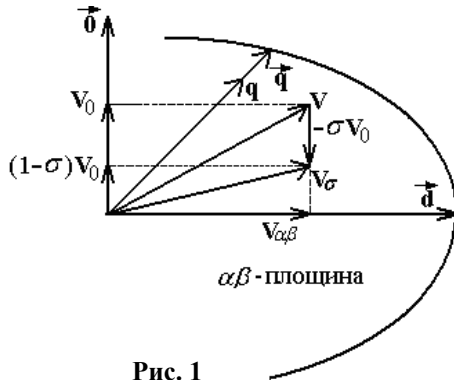


Рис. 1

Тоді вектор фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності задається виразом

$$\mathbf{v}_\sigma = \mathbf{v} - \sigma \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_{\alpha\beta} + (1 - \sigma) \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_{\alpha\beta} + (1 - \sigma) \frac{v_+}{3} \mathbf{j}, \quad (2)$$

де σ – скалярний коефіцієнт послаблення складової нульової послідовності вектора миттєвої фазної напруги, що лежить у межах $0 \leq \sigma \leq 1$. Відзначимо, що вектори \mathbf{v} , \mathbf{v}_σ мають по дві ненульові координати в координатній системі $dq0$ [9].

Стратегія керування паралельним активним фільтром, що пропонується, передбачає формування системою керування вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційним вектору \mathbf{v}_σ , причому значення коефіцієнта пропорційності

знаходиться з умови відсутності споживання енергії активним фільтром. При $\sigma = 0$ $\mathbf{v}_\sigma = \mathbf{v}$, тоді матимемо першу відому стратегію керування [8], коли вектор струму джерела пропорційний вектору миттєвих значень фазних напруг; при $\sigma = 1$ $\mathbf{v}_\sigma = \mathbf{v}_{\alpha\beta}$, тоді матимемо другу відому стратегію керування [6], яка використовує для формування вектора струму джерела вектор миттєвих значень фазних напруг, позбавлений складової нульової послідовності. Отже, стратегію керування з використанням вектора миттєвих значень фазних напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності можна розглядати як узагальнення відомих стратегій керування, кожна з яких можна отримати з запропонованої при крайніх значеннях параметра σ .

Існує два підходи до формування значення коефіцієнта пропорційності [6]. При першому (миттєвому) підході вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела

$$\mathbf{i}_d = \left\| i_a^d \ i_b^d \ i_c^d \right\|^T = g \mathbf{v}_\sigma, \quad (3)$$

де значення коефіцієнта g знаходиться з умови рівності нулю миттєвої активної потужності активного фільтра

$$\mathbf{v}^T \mathbf{i}_\phi = 0, \quad (4)$$

де $\mathbf{i}_\phi = \left\| i_a^\phi \ i_b^\phi \ i_c^\phi \right\|^T$ – вектор миттєвих значень струмів активного фільтра.

Представимо останній вектор як різницю векторів миттєвих значень струмів навантаження та джерела відповідно

$$\mathbf{i}_\phi = \mathbf{i}_H - \mathbf{i}_d, \quad (5)$$

тоді умова (4) з урахуванням співвідношень (2) та (3) перетворюється на рівність

$$\mathbf{v}^T \mathbf{i}_H = \mathbf{v}^T g \mathbf{v}_\sigma. \quad (6)$$

Із співвідношення (6) з урахуванням ортогональності складових $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, \mathbf{v}_0 отримаємо

$$g = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{i}_H}{\mathbf{v}^T \mathbf{v}_\sigma} = \frac{p}{(\mathbf{v}_{\alpha\beta} + \mathbf{v}_0)^T (\mathbf{v}_{\alpha\beta} + (1 - \sigma) \mathbf{v}_0)} = \frac{p}{v_{\alpha\beta}^2 + (1 - \sigma) v_0^2}, \quad (7)$$

де $p = \mathbf{v}^T \mathbf{i}_H$ – миттєва потужність навантаження; $v_{\alpha\beta}^2 = \mathbf{v}_{\alpha\beta}^T \mathbf{v}_{\alpha\beta}$ – квадрат модуля вектора $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$; $v_0^2 = v_+^2 / 3$ – квадрат модуля вектора \mathbf{v}_0 .

При другому (інтегральному) підході вектор миттєвих значень струмів трифазного джерела

$$\mathbf{i}_d = G \mathbf{v}_\sigma, \quad (8)$$

де значення коефіцієнта G знаходиться з умови рівності нулю середньої активної потужності активного фільтра

$$\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{i}_\phi dt = 0, \quad (9)$$

де T – період напруг мережі живлення.

Провівши аналогічні викладки з урахуванням вимоги (9), в кінцевому підсумку отримаємо

$$G = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{i}_H dt \right) \left(\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{v}_\sigma dt \right)^{-1} = \frac{P}{V_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)V_0^2}, \quad (10)$$

де $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{i}_H dt$ – середня потужність навантаження; $V_{\alpha\beta}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_{\alpha\beta}^2 dt$; $V_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0^2 dt = \frac{1}{3T} \int_0^T v_+^2 dt$.

Структурну схему паралельного активного фільтру (ПАФ) з системою керування, що реалізує запропоновану стратегію, показано на рис. 2.

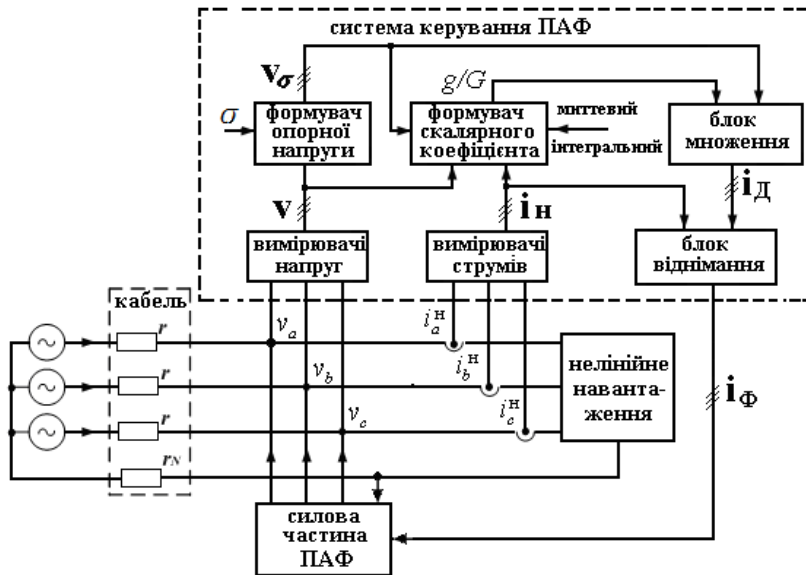


Рис. 2

Силову частину ПАФ під'єднано паралельно нелінійному навантаженню безпосередньо у точках його підключення до мережі живлення через чотирипровідний кабель. Система керування за допомогою датчиків струму та напруги в блоках відповідних вимірювачів формує сигнали узагальнених векторів миттєвих значень напруги та струму навантаження. На виході блоку формувача опорної напруги у відповідності до заданого значення коефіцієнта σ за виразом (2) формується вектор фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності і подається на один із входів формувача скалярного коефіцієнта пропорційності g або G , значення яких

розраховуються за формулами (7) або (10) при умові рівності нулю миттєвої або інтегральної потужності паралельного активного фільтру, в залежності від обраного режиму компенсації (миттєвий/інтегральний). З іншого боку, цей вектор як опорна напруга поступає на векторний вхід блоку множення, на скалярний вхід якого подається значення коефіцієнта пропорційності g або G . Сформований за формулами (3) або (8) на виході блоку множення вектор миттєвих значень струмів джерела віднімається від вектора миттєвих значень струмів навантаження з виходу відповідного вимірювача в блоці віднімання, і сформований вектор миттєвих значень струмів активного фільтру з виходу цього блока подається на керуючі входи силової частини.

Проаналізуємо ефективність запропонованої стратегії керування у порівнянні з відомими за такими показниками, як середня потужність втрат в силовому кабелі чотирипровідної мережі та величина миттєвої реактивної потужності трифазного джерела.

Порівняння стратегій керування за величиною середньої потужності втрат у силовому кабелі чотирипровідної мережі. Енергетичним критерієм ефективності паралельної активної фільтрації у випадку трипровідної трифазної мережі може слугувати мінімізація норми вектора струму, споживаного від трифазного джерела [4]. Саме застосування цього критерію обґрунтовує першу відому стратегію та забезпечує мінімізацію втрат енергії в трипровідному кабелі трифазної мережі. Специфікою чотирипровідної трифазної мережі є наявність нейтрального проводу, питомий опір якого може значно відрізнятись від питомих опорів фазних проводів, по якому протікає струм нейтралі за наявності складової нульової послідовності у вектора опорної напруги. Тому енергетичним критерієм ефективності паралельної активної фільтрації у випадку чотирипровідної трифазної мережі може бути мінімізація втрат енергії в чотирипровідному кабелі. При аналізі втрат у силовому кабелі застосовуватимемо другий підхід до визначення коефіцієнта пропорційності G за формулою (10), оскільки вимірюється лише середнє за період значення потужності втрат. При цьому вважатимемо, що падіння напруг на проводах кабелю значно менші за напруги джерела; активні опори фазних проводів кабелю однакові та дорівнюють r , активний опір нейтралі дорівнює r_n , іншими активними опорами та втратами активної потужності знехтуємо.

Миттєве значення потужності втрат у силовому кабелі

$$\begin{aligned} p_r &= [(i_a^{\Delta})^2 + (i_b^{\Delta})^2 + (i_c^{\Delta})^2]r + (i_a^{\Delta} + i_b^{\Delta} + i_c^{\Delta})^2 r_n = \mathbf{i}_d^T \mathbf{i}_d r + (\mathbf{i}_d^T \mathbf{j})^2 r_n = \\ &= G^2 \mathbf{v}_\sigma^T \mathbf{v}_\sigma r + (G \mathbf{v}_\sigma^T \mathbf{j})^2 r_n = G^2 (\mathbf{v}_{\alpha\beta}^T \mathbf{v}_{\alpha\beta} + (1-\sigma)^2 \mathbf{v}_0^T \mathbf{v}_0) r + G^2 [(1-\sigma)(v_+/3) \mathbf{j}^T \mathbf{j}]^2 r_n = \\ &= G^2 r [v_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)^2 v_0^2 \sigma_r^{-1}], \end{aligned} \quad (11)$$

де $\sigma_r = r / (3r_n + r)$ – параметр, що характеризує співвідношення між активними опорами фазних проводів та нейтралі.

Середня потужність втрат

$$P_r = \frac{1}{T} \int_0^T p_r dt = \frac{G^2 r}{T} \int_0^T [v_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)^2 v_0^2 \sigma_r^{-1}] dt = \frac{P^2 r [V_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)^2 V_0^2 \sigma_r^{-1}]}{[V_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma) V_0^2]^2}. \quad (12)$$

Дослідження виразу (12) на екстремум по σ дає оптимальне значення коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності за критерієм мінімізації втрат активної потужності в силовому кабелі:

$$\sigma_0 = 1 - \sigma_r = 1 - r / (3r_n + r) = 3r_n / (3r_n + r) = r_n / (r_n + r/3). \quad (13)$$

При цьому значенні коефіцієнта послаблення середня потужність втрат набуває мінімального значення

$$P_{rMIN} = \frac{P^2 r (V_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0)^2 V_0^2 \sigma_r^{-1})}{(V_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma_0) V_0^2)^2} = \frac{P^2 r}{V_{\alpha\beta}^2 + \sigma_r V_0^2}. \quad (14)$$

Аналіз виразу (13) показує, що оптимальне значення коефіцієнта послаблення σ_0 визначається лише співвідношенням питомих активних опорів фазних проводів та нейтралі, тобто для кожної марки чотирипровідного силового кабелю трифазної мережі існує своє оптимальне значення $\sigma_0 = 1 - \sigma_r$, що забезпечує мінімальну потужність активних втрат. Крім того, при будь-яких співвідношеннях між r та r_n $0 < \sigma_0 < 1$, тобто стратегія керування при частковому послабленні складової нульової послідовності дає переваги за потужністю втрат у порівнянні зі стратегіями керування як при повному збереженні складової нульової послідовності ($\sigma = 0$), так і при повному її видаленні ($\sigma = 1$).

Оцінимо кількісний вигравш у потужності втрат порівняно з першою відомою стратегією. Формула (12) при $\sigma = 0$ набуває вигляду

$$P_{r(\sigma=0)} = \frac{P^2 r (V_{\alpha\beta}^2 + V_0^2 \sigma_r^{-1})}{(V_{\alpha\beta}^2 + V_0^2)^2}.$$

Тоді кількісний вигравш від застосування запропонованої стратегії керування (при $\sigma = \sigma_0 = 1 - \sigma_r$) порівняно з першою стратегією

$$\frac{P_{r(\sigma=0)}}{P_{rMIN}} = \frac{(V_{\alpha\beta}^2 + \sigma_r V_0^2)(V_{\alpha\beta}^2 + \sigma_r^{-1} V_0^2)}{(V_{\alpha\beta}^2 + V_0^2)^2} = \frac{(1 + \sigma_r \Delta^2)(1 + \sigma_r^{-1} \Delta^2)}{(1 + \Delta^2)^2}, \quad (15)$$

де $\Delta = V_0 / V_{\alpha\beta}$ – коефіцієнт інтегральної несиметрії фазних напруг.

Формула (12) при $\sigma = 1$ набуває вигляду $P_{r(\sigma=1)} = P^2 r / V_{\alpha\beta}^2$. Тоді кількісний вигравш порівняно з другою відомою стратегією

$$\frac{P_{r(\sigma=1)}}{P_{rMIN}} = \frac{V_{\alpha\beta}^2 + \sigma_r V_0^2}{V_{\alpha\beta}^2} = 1 + \sigma_r \Delta^2. \quad (16)$$

Для визначення меж зміни коефіцієнта Δ виразимо його через величину номінальної амплітуди напруг трифазного джерела V_m та її нестабільність U . Максимальна величина складової нульової послідовності для синусоїдальних напруг джерела та заданій нестабільності амплітуди U буде спостерігатися при

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} (V_m + U) \sin \omega t \\ (V_m - U) \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ (V_m - U) \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

У цьому випадку усереднене на періоді значення квадрата модуля наведеного вектора

$$V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T \mathbf{v} dt = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{\alpha\beta}^2 + v_0^2) dt = V_{\alpha\beta}^2 + V_0^2 =$$

$$= 0,5[(V_m + U)^2 + (V_m - U)^2 + (V_m - U)^2] = 0,5(3V_m^2 - 2V_m U + 3U^2).$$

Сума миттєвих значень вектора фазних напруг $v_+ = 2U \sin \omega t$; знаходимо величини

$$V_0^2 = \frac{1}{3T} \int_0^T v_+^2 dt = \frac{1}{3T} \int_0^T (2U \sin \omega t)^2 dt = 2U^2 / 3;$$

$$V_{\alpha\beta}^2 = V^2 - V_0^2 = 0,5(3V_m^2 - 2V_m U + 3U^2 - 4U^2 / 3) = 0,5(3V_m^2 - 2V_m U + 5U^2 / 3).$$

Квадрат шуканого параметра

$$\Delta^2 = \frac{2U^2 / 3}{0,5(3V_m^2 - 2V_m U + 5U^2 / 3)} = \frac{4\eta^2}{9 - 6\eta + 5\eta^2}, \quad (18)$$

де $\eta = U / V_m$ – відносна нестабільність амплітуди.

Наприклад, при $\eta = 0,5$ $\Delta^2 = 4 / 29$, отже значення Δ в формулах (15), (16) доцільно обмежити величиною 0,4. Графіки, побудовані за цими формулами, показані на рис. 3. Параметр σ_r приймає наступні значення: $\sigma_r = 0,1(3r = r_n)$; $0,25(r = r_n)$; $0,5(r = 3r_n)$.

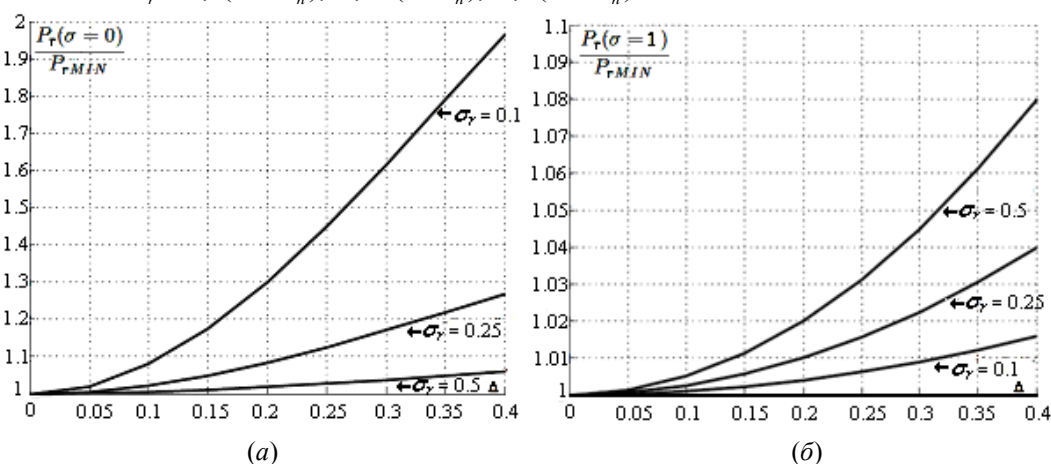


Рис. 3

Переваги стратегії керування при частковому послабленні складової нульової послідовності зростають при збільшенні інтегральної несиметрії фазних напруг (зростання Δ), при цьому середня потужність втрат може бути зменшена до 2 разів порівняно з першою стратегією при зменшенні σ_r і до 8% – у порівнянні з другою стратегією при зростанні σ_r .

Представимо залежність (12) у нормованому вигляді

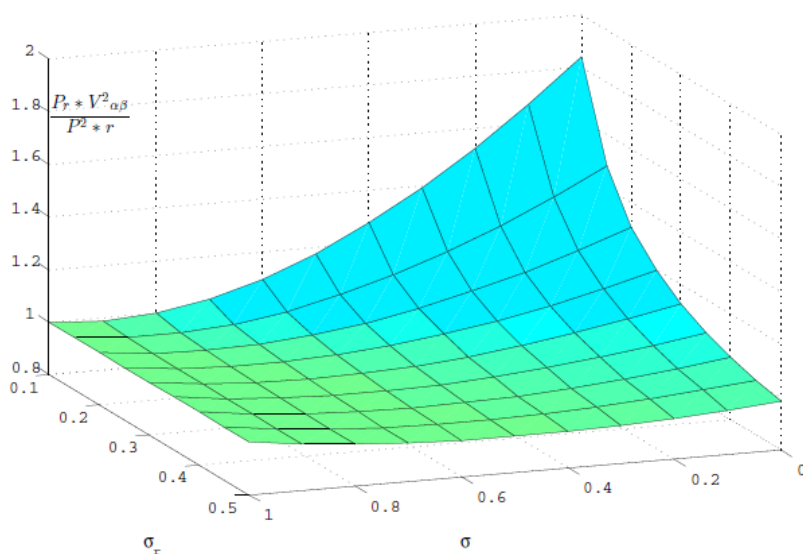


Рис. 4

$$\frac{P_r V_{\alpha\beta}^2}{P^2 r} = \frac{1 + (1 - \sigma)^2 \sigma_r^{-1} \Delta}{[1 + (1 - \sigma) \Delta]^2} \quad (19)$$

та побудуємо її тривимірний графік (рис. 4) при $\Delta^2 = 4 / 29$.

Наявність мінімумів у всіх кривих залежностей від σ , координати яких відповідають формулі (13), а значення мінімумів менші за одиницю, підтверджує зменшення потужності втрат у кабелі при запропонованій стратегії керування. Оскільки значення цих мінімумів відрізняються несуттєво, при невідомій марці кабелю, коли неможливо встановити точну величину

σ_r , доцільно прийняти $\sigma_0^* = 0,75$, що відповідає найпоширенішому випадку $r = r_n$. Тоді в блоці формування вектора опорної напруги структурної схеми системи керування паралельного активного фільтра (рис. 2), що враховує значення параметра σ відповідно до формули (2), $\sigma_0^*/3 = 1/4$, тобто значення кожної координати частково послабленої складової нульової послідовності дорівнює $v_+ / 4$.

Порівняння стратегій керування за величиною миттєвої реактивної потужності, що споживається від трифазного джерела. При формуванні вектора миттєвих значень струмів трифазного джерела \mathbf{i}_d за формулами (3), (8) його напрям не співпадатиме з напрямом вектора миттєвих значень фазних напруг \mathbf{v} , внаслідок чого відбувається споживання миттєвої реактивної потужності від джерела живлення.

Складові просторових векторів миттєвих значень напруги та струму будуть спрямовані вздовж ортів \vec{o} та \vec{d} (рис. 1) тривимірної системи координат dqo [2], тобто при застосуванні першого підходу до визначення коефіцієнта пропорційності g за формулою (7)

$$\mathbf{v}_{dqo} = \begin{Bmatrix} v_{\alpha\beta} \\ 0 \\ v_0 \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{i}_{dqo} = g\mathbf{v}_\sigma = g \begin{Bmatrix} v_{\alpha\beta} \\ 0 \\ (1-\sigma)v_0 \end{Bmatrix}.$$

Знайдемо вектор миттєвої реактивної потужності, що споживається від трифазного джерела, як векторний добуток зазначених векторів [8]

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} \times g\mathbf{v}_\sigma = g \begin{vmatrix} \vec{d} & \vec{q} & \vec{o} \\ v_{\alpha\beta} & 0 & v_0 \\ v_{\alpha\beta} & 0 & (1-\sigma)v_0 \end{vmatrix} = g[v_0 v_{\alpha\beta} - v_{\alpha\beta}(1-\sigma)v_0] \vec{q} = \sigma g v_{\alpha\beta} v_0 \vec{q}.$$

Таким чином, вектор миттєвої реактивної потужності \mathbf{q} має єдину ненульову координату, спрямовану вздовж орта \vec{q} dqo -системи координат. Знайдемо величину миттєвої реактивної потужності з урахуванням формули (7)

$$q = g v_0 v_{\alpha\beta} \sigma = \frac{\sigma p v_{\alpha\beta} v_0}{v_{\alpha\beta}^2 + (1-\sigma)v_0^2} = \frac{\sigma p \delta}{1 + (1-\sigma)\delta^2}, \quad (20)$$

де $\delta = v_0 / v_{\alpha\beta}$ – коефіцієнт миттєвої несиметрії вектора фазних напруг.

З формули (20) отримаємо вираз для величини миттєвого коефіцієнта потужності, визначеного відповідно до [8], при застосуванні запропонованої стратегії керування

$$\lambda = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (q/p)^2}} = \left(\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma\delta}{1 + (1-\sigma)\delta^2} \right]^2} \right)^{-1}. \quad (21)$$

Зауважимо, що даний термін побічно характеризує якість споживаного із мережі струму, хоча і не знайшов широкого застосування в сучасних публікаціях. Для визначення меж зміни коефіцієнта δ знайдемо значення квадрата модуля вектора миттєвих значень фазних напруг, що змінюється за формулою (17)

$$v^2 = (V_m + U)^2 \sin^2 \omega t + (V_m - U)^2 \sin^2 (\omega t - 2\pi/3) + (V_m - U)^2 \sin^2 (\omega t + 2\pi/3) = 1,5(V_m - U)^2 + 4V_m U \sin^2 \omega t.$$

Знаходимо

$$v_0^2 = v_+^2 / 3 = (4U^2 / 3) \sin^2 \omega t; \\ v_{\alpha\beta}^2 = v^2 - v_0^2 = 1,5(V_m - U)^2 + 4V_m U \sin^2 \omega t - (4U^2 / 3) \sin^2 \omega t = 1,5(V_m - U)^2 + 4U(V_m - U/3) \sin^2 \omega t.$$

Максимальне значення квадрат коефіцієнта миттєвої несиметрії набуває при $\sin^2 \omega t = 1$

$$\delta_{MAX}^2 = \frac{4U^2 / 3}{1,5(V_m - U)^2 + 4U(V_m - U/3)} = \frac{8U^2}{9V_m^2 + 6V_m U + U^2} = \frac{8\eta^2}{9 + 6\eta + \eta^2} = \frac{8\eta^2}{(\eta + 3)^2}. \quad (22)$$

Звідси максимальне значення коефіцієнта миттєвої несиметрії $\delta_{MAX} = 2\sqrt{2}\eta / (\eta + 3)$. При $\eta = 0,5$ $\delta_{MAX} = 0,403$, отже, значення δ в формулах (21) також доцільно обмежити величиною 0,4. Графіки залежностей за формулою (21) при різних значеннях параметра σ представлено на рис. 5.

Аналіз графіків показує, що при застосуванні першої відомої стратегії управління ($\sigma = 0$; $\mathbf{v}_\sigma = \mathbf{v}$) $\lambda = 1$ при будь-яких миттєвих несиметриях вектора фазних напруг, оскільки в цьому випадку відсутній фазовий зсув між векторами фазної напруги та споживаного струму. Однак при цьому, як

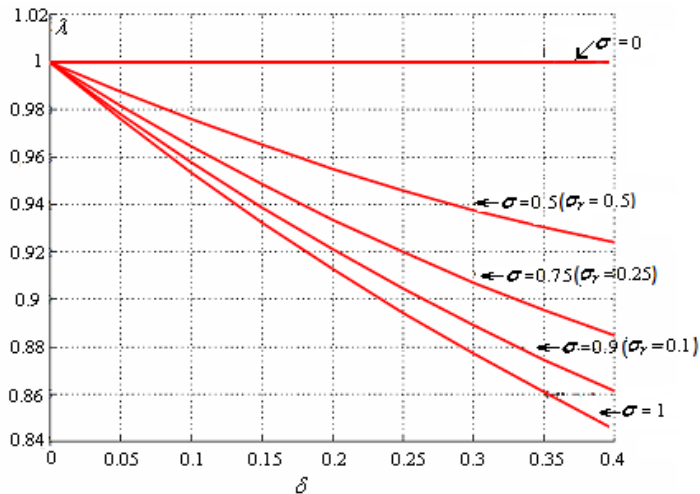


Рис. 5

Висновки. Запропоновано стратегію керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі, при якій вектор миттєвих струмів трифазного джерела пропорційний вектору миттєвих фазних напруг з частковим послабленням складової нульової послідовності. Її можна розглядати як узагальнення відомих стратегій керування, кожен з яких можна отримати з запропонованої при крайніх значеннях параметра σ .

При оптимальному значенні коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності та значній несиметрії фазних напруг ця стратегія дає переваги за потужністю втрат у силовому кабелі до 2 разів порівняно зі стратегією керування при повному збереженні складової нульової послідовності, та до 8% — у порівнянні зі стратегією керування при повному видаленні складової нульової послідовності.

Оптимальне значення коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності вектора фазних напруг визначається лише співвідношенням питомих активних опорів фазних проводів та нейтралі, тобто для кожної марки чотирипровідного силового кабелю трифазної мережі існує своє оптимальне значення $\sigma_0 = 1 - \sigma_r$, що забезпечує мінімум втрат енергії. При невідомій марці кабелю, коли неможливо встановити точну величину σ_r , доцільно прийняти $\sigma_0^* = 0,75$, що відповідає найпоширенішому випадку $r = r_n$, тоді значення кожної координати частково послабленої складової нульової послідовності дорівнює сумі миттєвих значень вектора фазних напруг, поділений на 4.

Запропонована стратегія при оптимальному керуванні з точки зору мінімізації втрат енергії ($\sigma = 1 - \sigma_r$; $\mathbf{v}_\sigma = \mathbf{v}_{\alpha\beta} + \sigma_r \mathbf{v}_0$) при будь-якому значенні параметра σ_r переважає відому стратегію з повним видаленням складової нульової послідовності за значенням миттєвого коефіцієнта потужності, дозволяючи при значних миттєвих несиметриях та $\sigma_r = 0,5$ збільшити значення λ з 0,85 до 0,92.

1. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В, Тугай Д.В. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения // Техн. электродинамика. Темат. выпуск "Силовая электроника та енергоефективність". — 2008. — Ч. 2. — С. 80–87.

2. Поліщук С.І., Артеменко М.Ю., Михальський В.М. Аналітична побудова координатних систем у теорії миттєвої потужності трифазних кіл для керування пристроями активної фільтрації // Техн. электродинамика. — 2013. — №2. — С. 25–35.

3. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceeding of Int. Power Electronics Conf. — Tokyo (Japan). — 1983. — Pp. 1375–1386.

4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 2007. – 379 p.
5. 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. – Pp. 361–366.
6. Montano Asquerino J.C. and Salmeron Revuelta P. Compensation in nonsinusoidal, unbalanced three-phase four-wire systems with active power-line conditioner // IEEE Trans. Power Delivery. – Oct. 2002. – Vol. 17. – No. 4. – Pp. 1079–1084.
7. Montano J.C., Salmeron P. and Thomas J.P. Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems // IEEE Trans. Power Electron. – July 2005. – Vol. 20. – No. 4. – Pp. 901–907.
8. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems // IEEE Trans. Instrum. Meas. – Feb. 1996. – Vol. 45. – No. 1. – Pp. 293–297.
9. Soares V. and Verdelho P. An instantaneous active and reactive current component method for active filters // IEEE Trans. on Power Electronics. – July 2000. – Vol. 15. – No. 4. – Pp. 660–669.

УДК 621.314

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ С ЧАСТИЧНЫМ ОСЛАБЛЕНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ
С.И.Полищук¹, М.Ю.Артемченко², докт.техн.наук, В.М.Михальский¹, докт.техн.наук, Л.М.Батрак², И.А.Шаповал¹, канд.техн.наук

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Предложена стратегия управления параллельным активным фильтром, которая базируется на формировании вектора тока источника пропорциональным мгновенному вектору фазного напряжения с частичным ослаблением составляющей нулевой последовательности, что дает преимущества по величине мощности потерь в силовом четырехпроводном кабеле по сравнению с известными стратегиями. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: система управления, составляющая нулевой последовательности, активный фильтр.

SHUNT ACTIVE FILTER CONTROL STRATEGY WITH PARTIAL DECREASE OF ZERO-SEQUENCE VOLTAGE IN THREE-PHASE FOUR-WIRE SYSTEM

S.Y.Polishchuk¹, M.Yu.Artemenko², V.M.Mykhalskyi¹, L.M.Batrak², I.A.Shapoval¹

¹ – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

² – National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", Peremohy pr., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

Control strategy of shunt active filter based on forming the network current vector proportional to the instantaneous phase voltage vector with partial decrease of zero-sequence component that gives advantages of power losses in the four-wire cables is proposed. The optimal coefficient of decrease is determined by the ratio of specific active resistance values of the phase and neutral conductors, i.e. for each brand of four-wire power cable of three-phase network is its optimal coefficient of decrease of zero-sequence component that provides a minimum of active power losses. Comparison of control strategies in value of instantaneous reactive power consumed by the three-phase source was performed. References 9, figures 5.

Key words: control strategy, zero-sequence component, active filter.

1. Zhemerov H.H., Ilina N.A., Ilina O.V., Tugai D.V. Reducing losses and improving power quality in municipal power supply systems // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2008. – Vol. 2. – Pp. 80–87. (Rus)

2. Polishchuk S.Y., Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M. Analytical construction of coordinate systems in the theory of instantaneous power of three-phase circuits to control the active filtering devices // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – No. 2. – Pp. 25–35. (Ukr)

3. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceeding of Int. Power Electronics Conf. – Tokyo (Japan). – 1983. – Pp. 1375–1386.

4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 2007. – 379 p.

5. 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. – Pp. 361–366.

6. Montano Asquerino J.C. and Salmeron Revuelta P. Compensation in nonsinusoidal, unbalanced three-phase four-wire systems with active power-line conditioner // IEEE Trans. Power Delivery. – Oct. 2002. – Vol. 17. – No. 4. – Pp. 1079–1084.

7. Montano J.C., Salmeron P. and Thomas J.P. Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems // IEEE Trans. Power Electron. – July 2005. – Vol. 20. – No. 4. – Pp. 901–907.

8. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems // IEEE Trans. Instrum. Meas. – Feb. 1996. – Vol. 45. – No. 1. – Pp. 293–297.

9. Soares V. and Verdelho P. An instantaneous active and reactive current component method for active filters // IEEE Trans. on Power Electronics. – July 2000. – Vol. 15. – No. 4. – Pp. 660–669.

Надійшла 12.12.2012

Received 12.12.2012