

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СТРАТЕГІЇ СИЛОВОЇ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ,
ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ОПТИМАЛЬНИХ ДЕКОМПОЗИЦІЯХ СТРУМІВ
НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВІДПОВІДНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ВТРАТ**

М.Ю. Артеменко^{1*}, докт. техн. наук, **Ю.В. Кутафін**^{1**}, **В.М. Михальський**^{2***}, докт. техн. наук,
С.Й. Поліщук^{2****}, канд. техн. наук, **В.В. Чопик**^{2*****}, канд. техн. наук,
І.А. Шаповал^{2*****}, докт. техн. наук

¹НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

²Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Обґрунтовано оптимальні декомпозиції струмів навантаження та відповідних миттєвих та інтегральних потужностей втрат багатофазних систем електроживлення, що базуються на формулах визначення активного струму з урахуванням співвідношення резистивних параметрів в лінії передачі. Визначено мінімальні значення миттєвих та інтегральних потужностей втрат, що супроводжують передачу енергії з заданою величиною активної потужності. На основі оптимальних декомпозицій струмів навантаження побудовано чотири стратегії керування паралельним активним фільтром, що забезпечують екстремальні значення одного з параметрів якості. Бібл. 13.

Ключові слова: паралельний активний фільтр, активний струм, потужність втрат, коефіцієнт потужності

Вступ. Переважна більшість сучасних теорій потужності систем електроживлення [1-9] розглядають різні способи декомпозиції струмів навантаження на складові, пропорційні складовим повної потужності, причому однієї з компонент розкладання є так званий активний струм, пропорційний миттєвій чи інтегральній активній потужності навантаження. Причому, за винятком [4, 7, 9], не береться до уваги співвідношення резистивних параметрів лінійних та нейтрального проводів. У ряді авторських робіт [10-13] уточнено формули визначення активного струму системи електроживлення за концепцією С. Фрізе [1]. Нехай $\mathbf{u}^{\wedge}(t) = \|u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_m(t)\|$ – вектор фазних напруг, \wedge – знак транспонування, $\mathbf{i}^{\wedge}(t) = \|i_1(t) \ i_2(t) \ \dots \ i_m(t)\|$ – вектор струмів навантаження m -фазної системи електроживлення, опір кожного лінійного проводу якої дорівнює r , опір нейтрального проводу – r_N . Тоді вектор миттєвого активного струму, що забезпечує миттєву потужність навантаження $p(t) = \mathbf{u}^{\wedge}(t)\mathbf{i}(t)$ за мінімальної потужності миттєвих втрат в лінії передачі, визначається виразом [13]

$$\mathbf{i}_a(t) = \frac{\mathbf{u}^{\wedge}(t)\mathbf{i}(t)}{\mathbf{u}^{\wedge}(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t)} \mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t) = \frac{p(t)}{p_0(t)} \mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

де $p_0(t) = \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t)$ – миттєва потужність короткого замикання джерела; $\mathbf{R} = r\mathbf{E} + r_N\mathbf{jj}^T$ – матриця опорів втрат, симетрична відносно головної діагоналі, \mathbf{E} – одинична матриця розмірності m ; $\mathbf{j}^{\wedge} = \|1 \ 1 \ \dots \ 1\|$. Формула (1) на відміну від визначення [3, 6, 8] враховує співвідношення резистивних параметрів лінії передачі.

Метою роботи є подальше дослідження властивостей активного струму за формулою (1) та їхнє використання для розроблення стратегій керування паралельним активним фільтром (ПАФ) багатофазної системи живлення.

© Артеменко М.Ю., Кутафін Ю.В. Михальський В.М., Поліщук С.Й., Чопик В.В., Шаповал І.А., 2020
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0001-9341-9238>; **<https://orcid.org/0000-0002-8156-1277>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>; ****<https://orcid.org/0000-0002-6978-2747> ;
*****<https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>; *****<https://orcid.org/0000-0002-9107-5061>

Оптимальна декомпозиція потужностей втрат лінії передачі. Неактивний миттєвий струм, що підлягає компенсації у разі застосування активної фільтрації, визначається виразом

$$\mathbf{i}_n(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t). \quad (2)$$

Декомпозиція (2) вектора миттєвого струму навантаження зумовлює наступні складові миттєвої потужності втрат, що визначається за формулою [13]

$$\Delta p(t) = \mathbf{i}^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) + \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) + \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_n(t) + \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_n(t).$$

Специфічне визначення вектору миттєвого активного струму за формулою (1) породжує унікальну властивість рівності нулю взаємних миттєвих потужностей втрат, викликаних векторами струмів $\mathbf{i}_a(t)$ та $\mathbf{i}_n(t)$. Дійсно

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) &= \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_n(t) = \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} [\mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t)] = \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) = \\ &= \frac{p(t)}{p_0(t)} \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{i}(t) - \left[\frac{p(t)}{p_0(t)} \right]^2 \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) = \frac{p(t)}{p_0(t)} p(t) - \frac{p^2(t)}{p_0^2(t)} p_0(t) = 0. \end{aligned}$$

Таким чином, вектори $\mathbf{i}_a(t)$ та $\mathbf{i}_n(t)$ є ортогональними за миттєвою потужністю втрат, тобто дорівнює нулю не їхній скалярний добуток, а саме викликана ними взаємна миттєва потужність втрат, внаслідок чого має місце наступна декомпозиція потужностей миттєвих втрат в лінії передачі

$$\Delta p(t) = \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) + \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_n(t) = \Delta p_a(t) + \Delta p_n(t).$$

Мінімальна миттєва потужність втрат в лінії передачі за умови миттєвої потужності навантаження $p(t)$ складає $\Delta p_a(t) = \mathbf{i}_a^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) = p^2(t) / p_0(t)$; Будь-яка відмінність вектора струмів джерела від миттєвого активного струму за формулою (1) супроводжується додатковими миттєвими втратами $\Delta p_n(t) = \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_n(t) = \mathbf{i}_n^\wedge(t) \mathbf{i}_n(t) r + [\mathbf{j}^T \mathbf{i}_n(t)]^2 r_N$. В роботі [13] показано, що стратегія активної фільтрації з формуванням в лінії передачі вектора активного струму (1) переважає за потужністю миттєвих втрат інші способи формування вектора лінійних струмів, зокрема, такі, що ґрунтуються на ортогональних декомпозиціях струмів навантаження з використанням традиційного векторного скалярного добутку в рамках крос-векторної теорії [8], pqr -теорії миттєвої потужності [6] та її модифікації [9], пропорційно-векторної теорії з позбавленням складової нульової послідовності вектора фазних напруг [7], струмових фізичних компонент [3].

Енергоефективність процесу передачі енергії струмом $\mathbf{i}(t)$ в довільний момент часу характеризує миттєвий коефіцієнт потужності [13] $\lambda(t) = p(t) / \sqrt{p_0(t) \Delta p(t)}$, що набуває максимального значення, рівного одиниці, лише при $\Delta p(t) = \Delta p_a(t)$.

Для мінімізації втрат лінії передачі, осереднених на періоді фазних напруг T , вираз для вектору активного струму набуває форми [11] з іншим значенням скалярного коефіцієнта пропорційності

$$\mathbf{i}_A(t) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \right] / \left[\frac{1}{T} \int_0^T p_0(t) dt \right] \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) = \frac{P}{P_0} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t), \quad (3)$$

де $P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}(t) dt$, $P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt$ – активні потужності навантаження та резистивного короткого замикання відповідно.

В цьому випадку дорівнює нулю інтегральна взаємна потужність втрат вектору активного струму (3) й вектору неактивного струму $\mathbf{i}_N(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_A(t)$

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_N^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_A(t) dt &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_A^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_N(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_A^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_A^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_A(t) dt = \\ &= \frac{P}{P_0} \times \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}(t) dt - \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \times \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt = \frac{P}{P_0} \times P - \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \times P_0 = 0 \end{aligned}$$

та справедлива наступна декомпозиція інтегральних втрат в лінії передачі:

$$\Delta P = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{i}}^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{i}}_A^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_A(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{i}}_N^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_N(t) dt = \Delta P_A + \Delta P_N. \quad (4)$$

Мінімально можливі втрати $\Delta P_A = P^2 / P_0$, спричинені активним струмом (3), забезпечують максимальне значення інтегрального коефіцієнта потужності [11] $\lambda = P / \sqrt{\Delta P P_0}$.

Енергоефективні стратегії керування паралельним активним фільтром. У разі застосування ПАФ останній генерує небажані складові струмів навантаження безпосередньо на клеммах навантаження, позбавляючи від них багатофазне джерело та лінію передачі. Отже, вектори струмів фільтра та джерела пов'язані співвідношенням $\mathbf{i}_F(t) + \mathbf{i}_S(t) = \mathbf{i}(t)$. З розглянутих у попередньому розділі декомпозицій струму навантаження та відповідних потужностей випливають такі енергоефективні стратегії керування ПАФ, що відрізняються значеннями сформованого вектору $\mathbf{i}_F(t)$.

1. Стратегія забезпечення максимального значення миттєвого коефіцієнта потужності джерела досягається при $\mathbf{i}_{F1}(t) = \mathbf{i}_n(t)$. Дійсно, в цьому випадку $\mathbf{i}_{S1}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{F1}(t) = \mathbf{i}_a(t)$. Потужність втрат в лінії передачі $\Delta p_{S1}(t) = \mathbf{i}_a^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_a(t) = p^2(t) / p_0(t)$. Миттєвий коефіцієнт потужності джерела за наявності фільтрації $\lambda_{S1}(t) = p(t) / \sqrt{\Delta p_{S1}(t) p_0(t)} = 1$.

Відношення потужностей миттєвих втрат в лінії передачі за відсутності та наявності активної фільтрації $w(t) = \Delta p(t) / \Delta p_S(t)$ названо у [13] коефіцієнтом виграшу за потужністю миттєвих втрат. Для першої стратегії він обернено пропорційний квадрату коефіцієнта потужності навантаження

$$w_1(t) = \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_{S1}(t)} = \frac{\Delta p(t) p_0(t)}{p^2(t)} = \frac{s^2(t)}{p^2(t)} = \frac{1}{\lambda^2(t)},$$

Миттєва потужність ПАФ для цієї стратегії дорівнює нулю, оскільки

$$p_{F1}(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_{F1}(t) = \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t)] = p(t) - p(t) = 0,$$

що теоретично дає можливість побудувати ПАФ без накопичувачів енергії.

2. Друга стратегія забезпечує сталі значення миттєвої потужності багатофазного джерела та реалізується за $\mathbf{i}_{F2}(t) = \mathbf{i}(t) - [P / p_0(t)] \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t)$. У цьому випадку $\mathbf{i}_{S2}(t) = [P / p_0(t)] \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t)$, миттєва потужність джерела

$$p_{S2}(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_{S2}(t) = \frac{P}{p_0(t)} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) = P$$

не залежить від часу та дорівнює активній потужності навантаження. Потужність втрат в лінії передачі за наявності фільтрації

$$\Delta p_{S2}(t) = \hat{\mathbf{i}}_{S2}^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_{S2}(t) = [P / p_0(t)]^2 \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) = P^2 / p_0(t).$$

Миттєва потужність ПАФ для цієї стратегії

$$p_{F2}(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_{F2}(t) = \mathbf{u}^T(t) [\mathbf{i}(t) - [P / p_0(t)] \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t)] = p(t) - P = \tilde{p}(t)$$

дорівнює змінній складовій миттєвої потужності навантаження, що викликає необхідність накопичувача енергії. Коефіцієнт виграшу за потужністю миттєвих втрат

$$w_2(t) = \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_{S2}(t)} = \frac{\Delta p(t) p_0(t)}{P^2} = \frac{p^2(t)}{P^2 \lambda^2(t)} = \left[\frac{1 + \tilde{p}(t) / P}{\lambda(t)} \right]^2$$

збільшується порівняно з першою стратегією, але зменшується швидкодія за рахунок необхідності осереднення потужності навантаження.

3. Третя стратегія забезпечує максимальне значення інтегрального коефіцієнта потужності та досягається за $\mathbf{i}_{F3}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_A(t) = \mathbf{i}_N(t); \mathbf{i}_{S3}(t) = \mathbf{i}_A(t)$. Потужність втрат в лінії передачі за наявності фільтрації

$$\Delta P_{S3} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{i}}_A^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_A(t) dt = \left[\frac{P}{P_0} \right]^2 \times \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^{\wedge}(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt = \frac{P^2}{P_0}.$$

Отже, $\lambda_{S3}(t) = P / \sqrt{\Delta P_{S3} P_0} = 1$, а коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат для цієї

стратегії складає [10]

$$W_3 = \frac{\Delta P}{\Delta P_{S3}} = \frac{\Delta P P_0}{P^2} = \frac{S^2}{P^2} = \frac{1}{A^2}.$$

Вектор струмів активного фільтра забезпечує нульову активну потужність, оскільки

$$P_{F3} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge [\mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_A(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}(t) dt - \frac{P}{P_0} \times \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt = P - \frac{P}{P_0} \times P_0 = 0.$$

Третя стратегія забезпечує найменшу інтегральну потужність втрат в лінії передачі. Однак недоліком усіх трьох розглянутих стратегій є несиметрія та спектральні спотворення споживаних струмів в умовах несинусоїдних несиметричних фазних напруг.

4. Четверта стратегія позбавляє від цього недоліку, забезпечуючи мінімальне, нульове значення коефіцієнта гармонічних спотворень (ТНД) шляхом формування вектора споживаних струмів пропорційного вектору синусоїдних симетричних фазних напруг $\mathbf{u}_{1+}(t)$ прямої послідовності чергування фаз

$$\mathbf{i}_{S4}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{F4}(t) = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{u}_{1+}^\wedge(t) \mathbf{u}_{1+}(t) dt]} \mathbf{u}_{1+}(t) = \frac{P}{U_{1+}^2} \mathbf{u}_{1+}(t).$$

Це забезпечує нульову активну потужність ПАФ, оскільки

$$P_{F4} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) [\mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{S4}(t)] dt = P - \frac{P}{U_{1+}^2} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{u}_{1+}(t) dt = P - \frac{P}{U_{1+}^2} U_{1+}^2 = 0,$$

та дещо зменшений коефіцієнт виграшу за потужністю інтегральних втрат порівняно із третьою стратегією

$$W_4 = \frac{\Delta P}{\Delta P_{S4}} = \frac{S^2}{P_0} \div \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_{S4}^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_{S4}(t) dt = \frac{S^2}{P_0} \div \frac{r P^2}{U_{1+}^4} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_{1+}^\wedge(t) \mathbf{u}_{1+}(t) dt = \frac{S^2}{P^2 P_0} \div \frac{r}{U_{1+}^2} = \frac{U_{1+}^2}{r P_0 A^2}.$$

Четверту стратегію паралельної активної фільтрації слід розглядати як найперспективнішу в світлі сучасних вимог до електромагнітної сумісності компонентів систем електроживлення.

Висновки. Вперше обґрунтовано декомпозицію вектора струмів навантаження багатофазної системи електроживлення на активну та неактивну складові, що є ортогональними за миттєвою чи інтегральною потужністю втрат. Показано, що саме активна складова вектора струмів навантаження, яка враховує співвідношення резистивних параметрів лінії передачі, забезпечує мінімальні значення миттєвої чи інтегральної потужностей втрат. Встановлено залежності цих мінімальних потужностей втрат від потужності навантаження та потужності короткого замикання. На основі оптимальних декомпозицій векторів струмів навантаження побудовано чотири стратегії керування ПАФ, кожна з яких забезпечує екстремальне значення одного з наступних параметрів якості:

- максимальне значення миттєвого коефіцієнта потужності;
- сталі значення миттєвої потужності багатофазного джерела;
- максимальне значення інтегрального коефіцієнта потужності;
- мінімальне значення коефіцієнта гармонічних спотворень.

Роботу виконано за бюджетною темою: "Розробка та дослідження ефективних засобів і методів керування напівпровідниковими перетворювачами та електромеханічними системами для забезпечення електромагнітної сумісності джерел електроенергії та споживачів" ("Модулятор-2") №ДР 0115U002581 (2016-2020 рр.).

1. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych. Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki. Warszawa-Wrocław: PWN. 1966. Pp. 250-256.

2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway: Wiley –IEEE Press, 2017. 472 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119307181>

3. Czarniecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. Vol. 84. No 6. Pp. 28-37.

4. Garcesa A., Molinas M., Rodriguez P. A generalized compensation theory for active filters based on mathematical optimization in ABC frame. *Electric Power Systems Research*. 2012. Vol. 90. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.011>
5. Herrera R. S., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P., Pérez A. Generalized instantaneous reactive power theory in poly-phase power systems. Proceedings of 13th European Conference on *Power Electronics and Application* (EPE'2009). Spain, Barcelona, September 8-10, 2009. Pp. 1-10.
6. Kim H., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. IEEE International Conference on *Power Electronics and Drive Systems* (PEDS'99). Hong Kong. July, 1999. Pp. 422-427. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.1999.794600>
7. Montano J.C., Salmeron P., Thomas J.P. Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems. *IEEE Transaction on Power Electronscs*. 2005. Vol. 20. No 4. Pp. 901-907. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.850956>
8. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1996. Vol. 45. No 1. Pp. 293-297. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.481350>
9. Тугай Д.В., Жемеров Г.Г., Корнелюк С.І., Шкурпела О.О. Новий спосіб керування паралельним силовим активним фільтром на основі модифікованої P-Q-R теорії потужності. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2019. № 20 (1345). С. 173-181. DOI: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.22>
10. Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Поліщук С.Й. Визначення повної потужності трифазних систем електроживлення як теоретична основа для побудови енергоефективних засобів паралельної активної фільтрації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 25-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.025>
11. Artemenko M., Batrak L. and Polishchuk S. New definition formulas for apparent power and active current of three-phase power system. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. No 8. Pp. 81-85. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.08.20>
12. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A. The Effect of Load Power Factor on the Efficiency of Three-Phase Four-Wire Power System with Shunt Active Filter. Proceedings of IEEE 36th International Conference on *Electronics and Nanotechnology* (ELNANO 2016). Ukraine, Kyiv, April 19-21, 2016. Pp. 277-282. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2016.7493067>
13. Артеменко М.Ю., Кутафін Ю.В., Михальський В.М., Поліщук С.Й., Чопик В.В., Шаповал І.А. Теорія миттєвої потужності багатofазних систем електроживлення з урахуванням резистивних параметрів лінії передачі. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 12-22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.012>

УДК 621.314

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ СИЛОВОЙ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ОПТИМАЛЬНЫХ ДЕКОМПОЗИЦИЯХ ТОКОВ НАГРУЗКИ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ МОЩНОСТЯХ ПОТЕРЬ

М.Ю. Артеменко¹, докт.техн.наук, **Ю.В. Кутафін¹**, **В.М. Михальський²**, докт.техн.наук, **С.И. Полищук²**, канд.техн.наук, **В.В. Чопик²**, канд.техн.наук, **И.А. Шаповал²**, докт.техн.наук

¹Національний технічний університет України «ХПИ ім. І. Сикорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

²Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Обоснованы оптимальные декомпозиции векторов токов нагрузки и соответствующих мгновенных и интегральных мощностей потерь многофазных систем электропитания, основанные на формулах определения активного тока с учетом соотношения резистивных параметров в линии передачи. Определены минимальные значения мгновенных и интегральных мощностей потерь, сопровождающих передачу энергии с заданной величиной активной мощности. На основе оптимальных декомпозиций векторов токов нагрузки построено четыре стратегии управления параллельным активным фильтром, обеспечивающих экстремальные значения одного из параметров качества. Библ. 13.

Ключевые слова: параллельный активный фильтр, активный ток, мощность потерь, коэффициент мощности.

ENERGY EFFICIENT STRATEGIES OF POWER ACTIVE FILTRATION BASED ON OPTIMAL DECOMPOSITIONS OF LOAD CURRENTS AND CORRESPONDING POWER LOSSES

M.Yu. Artemenko¹, Y.V. Kutafin¹, V.M. Mikhalsky², S.Y. Polishchuk², V.V. Chopyk², I.A. Shapoval²

¹ National Technical University of Ukraine I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

² Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Optimal decompositions of load current vectors and the corresponding instantaneous and integral power losses of multiphase power supply systems based on the equations for determining the active current taking into account the ratio of resistive parameters in the transmission line are justified. The minimum values of instantaneous and integral power losses associated with the transfer of energy with a given value of active power are determined. Based on the optimal decomposition of the load current vectors, four control strategies for the shunt active filter are constructed each of which provides an extreme value to one of the quality parameters. References 13.

Key words: shunt active filter, active current, power loss, power factor.

1. Fryze S. Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych. Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki. Warszawa-Wrocław: PWN. 1966. Pp. 250-256.
2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Piscataway: Wiley –IEEE Press, 2017. 472 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119307181>
3. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. Vol. 84. No 6. Pp. 28-37.
4. Garcesa A., Molinas M., Rodriguez P. A generalized compensation theory for active filters based on mathematical optimization in ABC frame. *Electric Power Systems Research*. 2012. Vol. 90. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.011>
5. Herrera R. S., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P., Pérez A. Generalized instantaneous reactive power theory in poly-phase power systems. Proceedings of 13th European Conference on *Power Electronics and Application (EPE'2009)*. Spain, Barselona, September 8-10, 2009. Pp. 1-10.
6. Kim H., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. IEEE International Conference on *Power Electronics and Drive Systems (PEDS'99)*. Hong Kong. July, 1999. Pp. 422-427. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.1999.794600>
7. Montano J.C., Salmeron P., Thomas J.P. Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems. *IEEE Transaction on Power Electronscs*. 2005. Vol. 20. No 4. Pp. 901-907. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.850956>
8. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1996. Vol. 45. No 1. Pp. 293-297. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.481350>
9. Tugay D., Zhemerov G., Korneliuk I., Shkorpela A. Parallel power active filter new control technique based on modified p-q-r power theory. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universitetu Kharkivskiyi Politekhnichnyi Instytut*. Serija: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia energii. 2019. No 20 (1345). P. 173-181. DOI: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.22> (Ukr)
10. Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Polishchuk S.Y. Definition of apparent power of three-phase power supply systems as a theoretical basis for development of energy-efficient shunt active filters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No. 2. Pp. 25 –34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.025> (Ukr)
11. Artemenko M., Batrak L. and Polishchuk S. New definition formulas for apparent power and active current of three-phase power system. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. No 8. Pp. 81-85. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.08.20>
12. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y., Mykhalskyi V.M., Shapoval I.A. The Effect of Load Power Factor on the Efficiency of Three-Phase Four-Wire Power System with Shunt Active Filter. Proceedings of IEEE 36th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2016)*. Ukraine, Kyiv, April 19-21, 2016. Pp. 277-282. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2016.7493067>
13. Artemenko M.Yu., Kutafin Y.V., Mykhalskyi V.M., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Shapoval I.A. Instantaneous power theory of polyphase power systems with regard of transmission line resistive parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 4. Pp. 12-22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.012> (Ukr)

Надійшла 28.02.2020