

Силова електроніка

УДК 621.314

DOI [10.20535/2312-1807.2017.22.3.103102](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.3.103102)

Порівняння енергоефективності стратегій керування паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення

Артеменко М. Ю., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)e-mail artemenko_m_ju@ukr.netБатрак Л. М., к.т.н., ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)e-mail batrakln5@gmail.com

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—На основі запропонованої формули повної потужності отримана нова розрахункова формула для експериментального визначення коефіцієнта потужності. Доведено, що лише пропорційно-векторна стратегія керування паралельним активним фільтром (ПАФ), що використовує опорний вектор фазних напруг з оптимально послабленою складовою нульової послідовності, забезпечує одиничний коефіцієнт потужності та мінімально можливу потужність втрат, переважаючи за цими показниками інші можливі стратегії. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили перевагу запропонованого алгоритму керування ПАФ за величиною коефіцієнта потужності порівняно з алгоритмом S. Fryze з повним збереженням складової нульової послідовності до 7% та порівняно з алгоритмом P. Salmeron, J. Montano з повним придушенням складової нульової послідовності до 0.5 %.

Бібл. 9, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова — повна потужність; коефіцієнт потужності; паралельний активний фільтр.

I. ВСТУП

На сучасному етапі розвитку електроенергетики інтенсивно зростає кількість нелінійних споживачів та збільшується їх одинична потужність, внаслідок чого в трифазних електричних мережах живлення настає полігармонічний несиметричний режим, що призводить до погіршення якості електропостачання та збільшення втрат енергії.

Сучасна теорія потужності, розвинена в [1-5] та багатьох інших роботах, дозволяє розробити ефективні алгоритми компенсації неактивних складових струмів в трифазних мережах за допомогою засобів активної фільтрації.

Однак в чотири провідних трифазних системах живлення несиметрія фазних напруг призводить до появи складової нульової послідовності, що викликає підвищені втрати активної потужності за рахунок протікання струму в нейтральному проводі. Цей факт має бути врахованим при коректному визначенні поняття повної потужності трифазної чотирипровідної

системи живлення як максимальної активної потужності навантаження, що може бути досягнута в процесі передачі енергії від трифазного джерела при заданих її втратах на активних опорах силового кабелю [4]. В зв'язку з цим в даній статті уточнені значення складових повної потужності трифазної чотирипровідної системи живлення для несинусоїдного несиметричного режиму, умова досягнення одиничного значення коефіцієнта потужності та мінімальне значення потужності втрат. Отримані результати застосовані для порівняння за енергоефективністю паралельних активних фільтрів (ПАФ), що використовують різні стратегії керування.

II. ФОРМУЛА ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА СТРАТЕГІЯ КЕРУВАННЯ ПАФ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ОДИНИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

Кількісною мірою ефективності споживання електроенергії трифазної системи живлення є коефіцієнт потужності, що дорівнює відношенню активної потужності до повної. Коефіцієнт потужності λ несинусо-



їдного з періодом T процесу трифазної чотирипровідної системи живлення, що характеризується вектором фазних напруг $\mathbf{u}(t)$, вектором лінійних струмів $\mathbf{i}(t)$ та матрицею опорів втрат $\mathbf{R} = r\mathbf{E} + r_N\mathbf{j}\mathbf{j}^T$, де \mathbf{E} – одинична матриця; $\mathbf{j}^T = \|\mathbf{1} \ 1 \ 1\|$; r, r_N – опори лінійного та нейтрального проводів; T – знак транспонування, визначається виразом [9]

$$\lambda = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt}}. \quad (1)$$

Формула (1) відрізняється від відомих розглядом узагальненого випадку несинусоїдних напруг та наявності матричного множника у вигляді оберненої матриці втрат при векторі фазних напруг. В роботі [8] показана її адекватність формулі повної потужності, наведеній в стандарті IEEE Std 1459-2010. В силу своєї структури матриця \mathbf{R} впливає на величину оптимального струму за наявності складової нульової послідовності векторів фазних напруг та лінійних струмів. Виділимо у векторі миттєвих значень фазних напруг навантаження ортогональні складові

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_\perp(t) + \mathbf{u}_0(t), \quad (2)$$

де $\mathbf{u}_0(t) = \frac{1}{3} \mathbf{j}\mathbf{j}^T \mathbf{u}(t) = \mathbf{A}_0 \mathbf{u}(t)$ – складова нульової послідовності, колінеарна орту $\mathbf{j}/\sqrt{3}$; $\mathbf{A}_0 = \frac{1}{3} \mathbf{j}\mathbf{j}^T$; $\mathbf{u}_\perp(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_0(t) = (\mathbf{E} - \mathbf{A}_0) \mathbf{u}(t) = \mathbf{A}_\perp \mathbf{u}(t)$ – складова, що локалізується в $\alpha\beta$ – площині, яка перпендикулярна орту $\mathbf{j}/\sqrt{3}$.

Значення оберненої матриці опорів втрат

$$\mathbf{R}^{-1} = (r\mathbf{E} + r_N\mathbf{j}\mathbf{j}^T)^{-1} = \frac{1}{r}(\mathbf{E} - \sigma_0\mathbf{A}_0), \quad (3)$$

де коефіцієнт $\sigma_0 = 3r_N / (r + 3r_N)$ є величиною оптимального послаблення складової нульової послідовності вектора фазних напругах, при якій спостерігається мінімум потужності втрат в силовому кабелі [7].

З урахуванням розкладання (2) інтеграл напруг з виразу (1) набуває вигляду

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt = \\ & = \frac{1}{Tr} \int_0^T [\mathbf{u}_\perp(t) + \mathbf{u}_0(t)]^T [\mathbf{u}_\perp(t) + (1 - \sigma_0)\mathbf{u}_0(t)] dt = (4) \\ & = \frac{1}{r} [U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2], \end{aligned}$$

$$\text{де } U_\perp^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_\perp^T(t) \mathbf{u}_\perp(t) dt; U_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_0^T(t) \mathbf{u}_0(t) dt.$$

Аналогічно може бути розкладений на ортогональні складові довільний вектор лінійних струмів:

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_\perp(t) + \mathbf{i}_0(t) = \mathbf{A}_\perp \mathbf{i}(t) + \mathbf{A}_0 \mathbf{i}(t), \quad (5)$$

тоді потужність втрат або інтеграл струмів з (1) визначається виразом

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt = \\ &= \frac{r}{T} \int_0^T [\mathbf{i}_\perp(t) + \mathbf{i}_0(t)]^T \times \\ & \times [\mathbf{A}_\perp + (1 + 3r_N/r)\mathbf{A}_0] \times \\ & \times [\mathbf{i}_\perp(t) + \mathbf{i}_0(t)] dt \\ &= r \left(I_\perp^2 + \frac{1}{1 - \sigma_0} I_0^2 \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{де } I_\perp^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_\perp^T(t) \mathbf{i}_\perp(t) dt; I_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_0^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt.$$

Підстановка співвідношень (4), (6) у відповідний вираз формули (1) дає модифікацію формули повної потужності у вигляді

$$S = \sqrt{[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2][I_\perp^2 + (1 - \sigma_0)^{-1}I_0^2]}. \quad (7)$$

На відміну від формули Бухгольца, в формулі (7) за наявності складових нульової послідовності фазних напруг чи лінійних струмів чітко проглядається залежність повної потужності від співвідношення опорів силового кабелю, що задає коефіцієнт σ_0 .

Активна потужність може бути виражена через розглянуті ортогональні складові струмів та напруг таким чином:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_\perp^T(t) \mathbf{i}_\perp(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_0^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt = P_\perp + P_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Коефіцієнт потужності чотирипровідної системи, виражений через інтеграли від ортогональних складових, дорівнює

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P_\perp + P_0}{\sqrt{[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2][I_\perp^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0)]}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт потужності за виразом (9) набуває однозначного значення лише за умови формування вектора лінійних струмів пропорційним вектору фазних напруг з оптимально послабленою складовою нульової послідовності $\mathbf{u}_\sigma(t) = r\mathbf{R}^{-1}\mathbf{u}(t)$:

$$\mathbf{i}(t) = G\mathbf{u}_\sigma(t) = G[\mathbf{u}_\perp(t) + (1 - \sigma_0)\mathbf{u}_0(t)], \quad (10)$$

де G – довільна дійсна константа, оскільки в цьому випадку в формулі (9)

$$\begin{aligned} P_\perp + P_0 &= G[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; \\ I_\perp^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0) &= G^2[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2]; \lambda = 1. \end{aligned}$$



За наявності ПАФ вектор лінійних струмів трифазного джерела, який у несиметричному несинусоїдному режимі забезпечує постачання енергії в навантаження з одиничним коефіцієнтом потужності, визначається виразом

$$\mathbf{i}_\sigma(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_C(t) = G_\sigma \mathbf{u}_\sigma(t), \quad (11)$$

причому значення коефіцієнта пропорційності G_σ знаходиться з умови відсутності споживання енергії активним фільтром за період мережної напруги [7]:

$$G_\sigma = \frac{P}{U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2}. \quad (12)$$

Мінімально можлива величина потужності втрат при оптимальному керуванні ПАФ

$$\begin{aligned} \Delta P_{MIN} &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_\sigma^T(t) \mathbf{Ri}_\sigma(t) dt = \\ &= r G_\sigma P = \frac{P^2 r}{U_\perp^2 + (1 - \sigma)U_0^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Виграш за потужністю втрат при застосуванні ПАФ та нехтуванні його власними втратами

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{MIN}} = \frac{S^2 r}{[U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2] \Delta P_{MIN}} = \frac{S^2}{P^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (14)$$

Останнє співвідношення може бути використане для розрахункової формули експериментального визначення коефіцієнта потужності:

$$\lambda = \sqrt{\Delta P_{MIN} / \Delta P}. \quad (15)$$

III. ПОРІВНЯННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОТУЖНОСТІ ПРИ РІЗНИХ АЛГОРИТМАХ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ.

Покажемо, що інші відомі пропорційно-векторні алгоритми формування струмів трифазного джерела

з інтегральним значенням коефіцієнта пропорційності не забезпечують одиничного значення коефіцієнта потужності.

За алгоритмом S. Fryze [1] вектор струмів джерела формується як активний струм трифазного кола за формулою:

$$\mathbf{i}_F(t) = \frac{P}{U^2} \mathbf{u}(t) = \frac{P}{U_\perp^2 + U_0^2} [\mathbf{u}_\perp(t) + \mathbf{u}_0(t)]. \quad (16)$$

При цьому відповідно до формули (7) квадрат повної потужності

$$\begin{aligned} S_F^2 &= [U_\perp^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2] \left[\left(\frac{P}{U^2} \right)^2 \times \right. \\ &\times [U_\perp^2 + U_0^2 / (1 - \sigma_0)] = \\ &= P^2 [1 + \sigma_0^2 (1 - \sigma_0)^{-1} \Delta^2 (1 - \Delta^2)], \end{aligned} \quad (17)$$

де $\Delta^2 = U_0^2 / U^2$ - коефіцієнт відносного значення складової нульової послідовності.

Коефіцієнт потужності за формулою (9) при використанні алгоритму S. Fryze за умови $\Delta^2 \neq 0$ не досягає одиничного значення:

$$\lambda_F = \left[1 + \frac{\sigma_0^2}{1 - \sigma_0} \Delta^2 (1 - \Delta^2) \right]^{-1/2} < 1. \quad (18)$$

Так само коефіцієнт потужності не досягає одиничного значення при компенсації струму нейтралі шляхом пропорційно-векторного формування фазних струмів з опорним вектором фазних напруг, повністю позбавленим складової нульової послідовності відповідно до алгоритму P. Salmeron, J. Montano [5, 6]. В цьому випадку вектор струмів трифазного джерела

$$\mathbf{i}_S(t) = \frac{P}{U_\perp^2} \mathbf{u}_\perp(t); \quad (19)$$

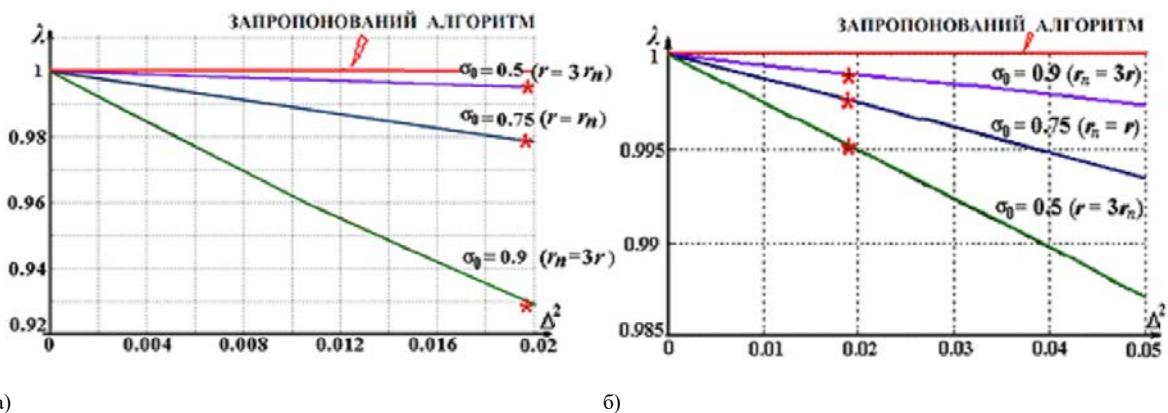


Рис. 11 Графіки залежності коефіцієнту потужності від коефіцієнту відносного значення складової нульової послідовності для різних значень коефіцієнта σ_0 , а) алгоритм S. Fryze, б) алгоритм P. Salmeron, J. Montano.

Квадрат повної потужності за формулою (7)

$$S_S^2 = [U_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2] \left(\frac{P}{U_{\perp}^2} \right)^2 U_{\perp}^2 = P^2 \left[1 + (1 - \sigma_0) \frac{\Delta^2}{1 - \Delta^2} \right]; \quad (20)$$

коефіцієнт потужності за формулою (9)

$$\lambda_S = \left[1 + (1 - \sigma_0) \frac{\Delta^2}{1 - \Delta^2} \right]^{-1/2} < 1. \quad (21)$$

Графіки, побудовані за формулами (18), (21) для різних значень коефіцієнта σ_0 , наведені на рис. 1 під індексами а) та б) відповідно.

Вони ілюструють переваги запропонованого алгоритму керування ПАФ з оптимально послабленою складовою нульової послідовності за величиною коефіцієнта потужності порівняно з алгоритмом S. Fryze з повним збереженням складової нульової послідовності (рис. 1а) до 7% та порівняно з алгоритмом P. Salmeron, J.Montano з повним придушення складової нульової послідовності (рис. 1б) до 1.5 %.

IV. РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ ПОТУЖНОСТІ ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ ВТРАТ ПРИ РІЗНИХ АЛГОРИТМАХ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ

Для підтвердження енергоефективності запропонованого алгоритму керування ПАФ у програмному середовищі MathWorks® Simulink® 2012a досліджувалась модель трифазної чотирипровідної системи живлення з ПАФ та нелінійним навантаженням у вигляді трифазного випрямляча з нульовим виводом за схемою Міткевича, що працює на активний опір (рис.2).

Моделювався несиметричний режим роботи системи живлення з вектором фазних напруг

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} (U_m + \Delta U) \sin \omega t \\ (U_m - \Delta U) \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ (U_m - \Delta U) \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

В роботі [7] показано, що для такого вектора параметр $\Delta_{\perp}^2 = U_0^2 / U_{\perp}^2$ пов'язаний з відносною нестабільністю амплітуди $\delta = \Delta U / U_m$ співвідношенням

$$\Delta_{\perp}^2 = \frac{4\delta^2}{9 - 6\delta + 5\delta^2}. \quad (23)$$

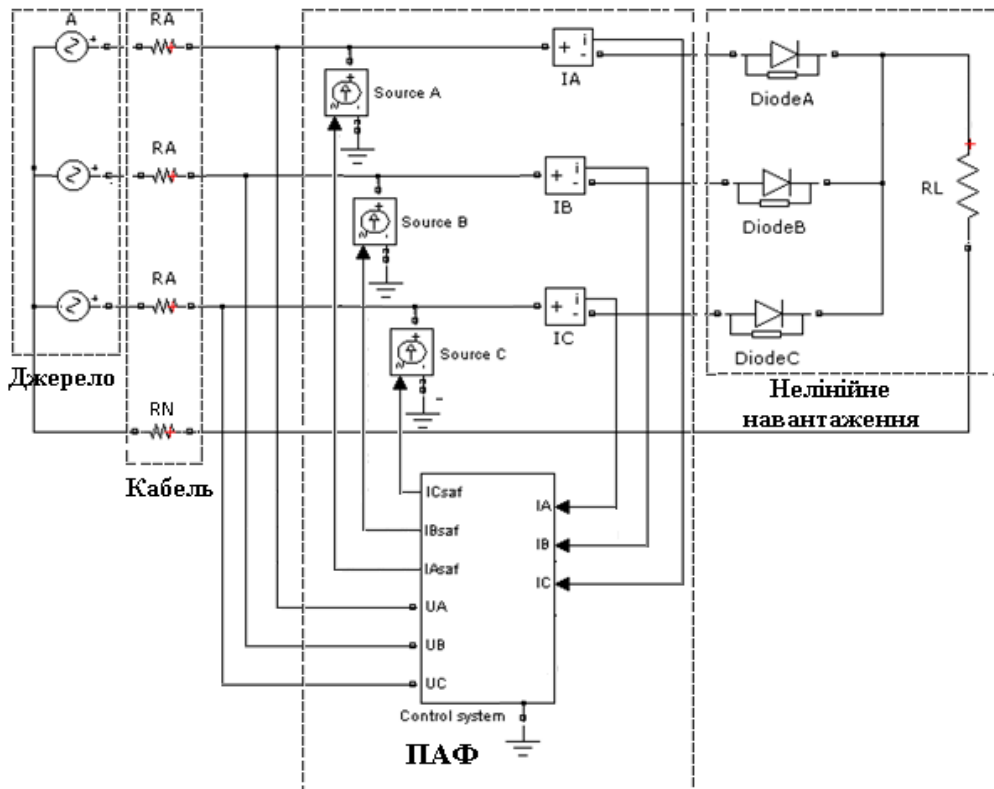


Рис. 12 Модель трифазної чотирипровідної системи живлення з ПАФ

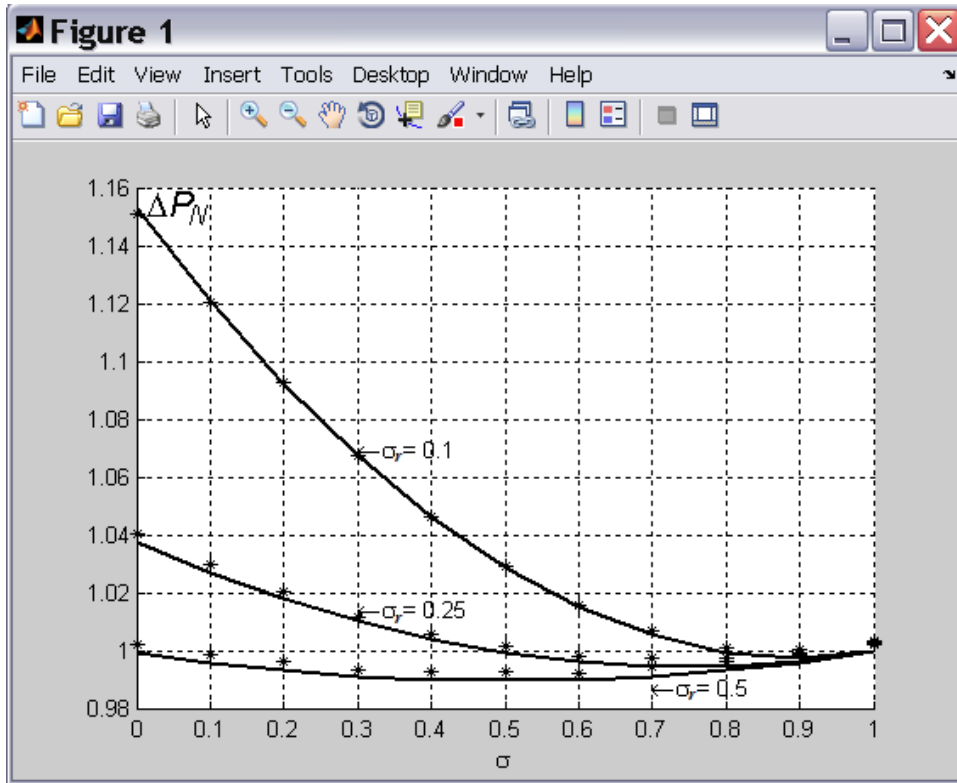


Рис. 13 Результати моделювання при $\delta = 0.2$ ($\Delta^2 = 0.196$)

Відносній амплітудній нестабільності джерела $\delta = 0.2$ відповідає значення параметра $\Delta_{\perp}^2 = 0.02$, при цьому

$$\Delta^2 = \frac{U_0^2}{U^2} = \frac{\Delta_{\perp}^2}{1 + \Delta_{\perp}^2} = \frac{0.02}{1 + 0.02} = \frac{1}{51} \approx 0.196.$$

Нормована аналітична залежність потужності втрат в силовому кабелі чотирипровідної трифазної системи з ПАФ від величини коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності σ має вигляд [7]:

$$\Delta P_N = \frac{\Delta P U_{\perp}^2}{P^2 r} = \frac{1 + (1 - \sigma)^2 \sigma_r^{-1} \Delta_{\perp}^2}{[1 + (1 - \sigma) \Delta_{\perp}^2]^2}. \quad (24)$$

де $\sigma_r = r / (3r_n + r) = 1 - \sigma_0$ - параметр, що характеризує співвідношення опорів силового кабелю. Експерименти проводилися з можливістю дискретної зміни коефіцієнта σ з кроком 0.1. Комп'ютерна програма складається з двох незалежних частин. Одна з них буде графік теоретичної залежності за формулою (24), а друга знімає показання роботи комп'ютерної моделі системи живлення та обчислює відносну потужність втрат ΔP_N і наносить відповідні точки у вигляді позначок * на координатне поле з побудованим раніше графіком. При цьому задавалися три значення параметра

$$\sigma_r = 0.1(3r = r_n); \sigma_r = 0.25(r = r_n); \sigma_r = 0.5(r = 3r_n).$$

ТАБЛИЦЯ 1

	$\sigma_r = 0.1 (3r = r_n)$	$\sigma_r = 0.25 (r = r_n)$	$\sigma_r = 0.5 (r = 3r_n)$
$\Delta P_{NMIN} (\sigma = \sigma_0)$	0.9980	0.9950	0.9900
$\Delta P_{NF} (\sigma = 0)$	1.15	1.04	1
$\Delta P_{NS} (\sigma = 1)$	1	1	1
$\lambda_F = \sqrt{\Delta P_{NMIN} / \Delta P_{NF}}$	0.9315	0.9781	0.9949
$\lambda_S = \sqrt{\Delta P_{NMIN} / \Delta P_{NS}}$	0.9989	0.9975	0.9949



Результати моделювання при $\delta = 0.2$ ($\Delta^2 = 0.196$) наведено на рис. 3. Стратегія керування при оптимальному послабленні складової нульової послідовності за формулою (11) реалізовувалась при $\sigma = \sigma_0$, стратегія керування за алгоритмом S. Fryze при $\sigma = 0$, стратегія P. Salmeron, J. Montano – при $\sigma = 1$.

Результати експериментів підтверджують, що координати мінімумів потужностей втрат визначаються за формулою

$$\sigma_0 = 1 - \sigma_r = r_n / (r_n + r/3),$$

яка в точності відповідає оптимальній величині коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності вектора фазних напруг за формулою (11) для запропонованого алгоритму керування. Значення відносних потужностей втрат, отримані за даними роботи комп'ютерної моделі (рис. 3): мінімальні, за алгоритмом S. Fryze та за алгоритмом P. Salmeron, J. Montano промарковані відповідними індексами та зведені в табл. 1. Там же наведені значення коефіцієнтів потужності, розраховані відповідно до формули (15). Ці ж самі значення коефіцієнтів потужності нанесені на графіки отриманих раніше теоретичних залежностей (рис. 1) позначками * при значенні ординати $\Delta^2 = 0.196$.

Хороший збіг теоретичних та експериментальних даних в зазначених точках свідчить про коректність виразів (18), (21). Таким чином, результати моделювання підтвердили перевагу запропонованого алгоритму керування ПАФ за величиною коефіцієнта потужності порівняно з алгоритмами S. Fryze та P. Salmeron, J. Montano.

ВИСНОВКИ

- 1) На основі формули повної потужності (7) отримана нова розрахункова формула (15) для експериментального визначення коефіцієнта потужності.
- 2) Показано, що лише пропорційно-векторна стратегія керування ПАФ з опорним вектором фазних напруг з оптимально послабленою складовою нульової послідовності за формулою (11) забезпечує одиничний коефіцієнт потужності та мінімально можливу потужність втрат за формулою (13), переважаючи за цими показниками інші можливі стратегії.
- 3) Результати комп'ютерного моделювання підтвердили перевагу запропонованого алгоритму

керування ПАФ за величиною коефіцієнта порівняно з алгоритмом S. Fryze з повним збереженням складової нульової послідовності до 7% та порівняно з алгоритмом P. Salmeron, J. Montano з повним придушення складової нульової послідовності до 0.5%.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] S. Fryze, "Artykuł „Moc czynna, bierna i pozorna układu 3-fazowego o odkształconych przebiegach napięć fazowych i prądów przewodowych” (tekst zeskanowany z monografii Wybrane zagadnienia teoretycznych podstaw elektrotechniki, PWN, Warszawa – Wrocław 1966),” in *Profesor dr inż. Stanisław Fryze (1885-1964) : pionier elektrotechniki, nauczyciel i wychowawca wielu pokoleń polskiej młodzieży akademickiej*, T. E. Kołakowski and e. al., Eds., Katowice, COSiW SEP. Oficyna Wydawnicza Energia, 2010, pp. 111-120. **ISBN:** [978-83-929759-0-8](#)
- [2] Hirofumi Akagi; Edson Hirokazu Watanabe; Mauricio Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley-IEEE Press, 2007, p. 379. **ISBN:** [978-0-470-10761-4](#)
- [3] L. S. Czarnecki, "Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 84, no. 6, p. 28–37, June 2008. **URL:** http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=1574
- [4] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*, John Wiley & Sons, Inc., 2010, p. 274. **ISBN:** [9780470660744](#), **e-ISBN:** [9780470667149](#). **DOI:** [10.1002/9780470667149](#)
- [5] Patricio Salmerón Revuelta; Salvador Pérez Litrán; Jaime Prieto Thomas, *Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality*, 1st Edition ed., Elsevier Inc., Academic Press, 2015, p. 436. **ISBN:** [978-0128032169](#)
- [6] J.-C. Montano; P. Salmeron; J.P. Thomas, "Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, p. 901–907, 5 July 2005. **DOI:** [10.1109/TPEL.2005.850956](#)
- [7] Polishchuk, S. Y.; Artemenko, M. Yu.; Mykhalskyi; V. M.; Batrak, L. M.; Shapoval, I. A., «Shunt aktivnoy strategii upravleniya fil'trom s chastichnym umen'sheniyem napryazheniya nulevoy posledovatel'nosti v trekhfaznoy chetyrekh[Shunt active filter control strategy with partial decrease of zero-sequence voltage in three-phase four-wire system],» *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 3, p. 12–19, 2013.
- [8] Artemenko, M. Yu.; Batrak, L. M., "The new formula for apparent power and power losses of three-phase four-wire system," in *IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2017. **DOI:** [10.1109/ELNANO.2017.7939784](#)
- [9] M. Y. Artemenko, *Potuzhnist' system elektrozhyvlennya ta enerhoefektyvnist' sylovykh fil'triv* [Power of supply systems and energy efficiency of power filters], Kyiv: Avers, 2016, p. 216. **ISBN:** [978-966-8777-09-7](#)

УДК 621.314

Сравнение энергоэффективности стратегий управления параллельным активным



фильтром трехфазной четырехпроводной СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Артеменко М. Ю., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)

e-mail artemenko_m_ju@ukr.net

Батрак Л. Н., к.т.н., ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

e-mail batrakln5@gmail.com

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—На основе предложенной формулы полной мощности получена новая расчетная формула для экспериментального определения коэффициента мощности. Доказано, что только пропорционально-векторная стратегия управления ПАФ, которая использует опорный вектор фазных напряжений с оптимально ослабленной составляющей нулевой последовательности, обеспечивает единичный коэффициент мощности и минимально возможную мощность потерь, превосходя по этим показателям другие возможные стратегии. Результаты компьютерного моделирования подтвердили преимущество предложенного алгоритма управления ПАФ по величине коэффициента мощности до 7% по сравнению с алгоритмом S. Fryze с полным сохранением составляющей нулевой последовательности и до 0.5% по сравнению с алгоритмом P. Salmeron, J. Montano с полным подавления составляющей нулевой последовательности.

Библ. 9, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова —полная мощность; коэффициент мощности; параллельный активный фильтр.

UDC 621.314

Energy efficiency comparison of shunt active filter's control strategies for three phase four-wire power system

M. Yu. Artemenko, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0001-9341-9238](https://orcid.org/0000-0001-9341-9238)

e-mail artemenko_m_ju@ukr.net

L. M. Batrak, PhD, ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

e-mail batrakln5@gmail.com

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In the presented article, the values of the components of the total power of the three-phase four-wire power supply system for non-sinusoidal asymmetric modes, the condition for achieving a unit value of the power factor and the minimum value of the power losses were clarified. The obtained results were applied to compare the energy efficiency of shunt active filters (SAF) using different control strategies. Based on the proposed apparent power formula, a new calculation formula for the experimental determination of the power factor has been obtained. It is proved that only the proportional-vector control strategy of the, which uses a reference vector of phase voltages with the optimally weakened zero sequence component, provides a unit power factor and the minimum possible power losses, exceeding other possible strategies in these indicators. It was shown that other known proportional-vector algorithms for forming the source currents of a three-phase four-wire power system with an integral value of the proportionality factor do not provide a unit value of the power factor. To confirm the energy efficiency of the proposed control algorithm for SAF in the MathWorks® Simulink® 2012a computer simulation was carried out. The model of a three-phase four-wire power system with a shunt active filter and a nonlinear load in the form of a three-phase rectifier with zero output, assembled according to the Mitkevich scheme and operating on the active resistance was investigated. The results of computer simulation confirmed the advantage of the proposed SAF control algorithm in value of power factor up to 7% in comparison with the algorithm of S. Fryze with full



preservation of the zero-sequence component and up to 0.5% in comparison with the algorithm of P. Salmeron, J. Montono with complete suppression of the zero-sequence component.

Ref. 9, fig. 3, tabl. 1.

Keywords—*apparent power; power factor; shunt active filter.*