

УДК 621.314

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗБІЛЬШЕННЯ ККД ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЗАСОБАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

М.Ю.Артеменко<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Л.М.Батрак<sup>1</sup>, В.М.Михальський<sup>2</sup>, докт.техн.наук, С.Й.Поліщук<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net),

<sup>2</sup> – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua)

*Запропоновано формулу визначення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення для несинусоїдного несиметричного режиму за заданим коефіцієнтом потужності навантаження, визначеним на періоді напруги живлення, та відомим співвідношенням потужності короткого замикання до активної потужності навантаження. Розглянуто потенційну можливість збільшення ККД системи живлення шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження за допомогою паралельного активного фільтра. Проаналізовано фактори, що обмежують можливості збільшення ККД системи електроживлення засобами паралельної активної фільтрації. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, паралельний активний фільтр, складова нульової послідовності.

**Вступ.** Інтенсивне зростання кількості нелінійних споживачів та збільшення їхньої одиничної потужності, наявність нелінійних потужних однофазних навантажень у трифазних електричних мережах призводить до погіршення якості електропостачання та збільшення втрат енергії, несиметрії фазних напруг, а часто і несинусоїдності напруги живлення. В чотирипровідних трифазних системах несиметрія фазних напруг навіть у синусоїдному режимі спричинює появу складової нульової послідовності [7,8], викликаючи підвищені втрати енергії та зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) системи електропостачання, в першу чергу за рахунок резистивного (омічного) опору лінії електропостачання. Оскільки доволі суттєва частина електроенергії від джерел до навантажень передається за допомогою саме таких систем, навіть незначне підвищення їхнього ККД дозволить зберегти значні матеріальні ресурси.

Так у роботах [2,3] розглянуто методи визначення максимально можливого та реального ККД системи електроживлення за графіками миттєвого струму та миттєвої реактивної потужності для синусоїдального джерела та асиметричного навантаження. Відзначено, що суттєвого підвищення ККД можна досягти шляхом підключення в систему паралельного активного фільтра (ПАФ) з накопичувачем енергії, якщо втрати енергії в ПАФ і накопичувачі менші від різниці між реальними та мінімальними можливими втратами в системі. Наявність у системі електропостачання ПАФ дозволяє забезпечити максимальну потужність навантаження з мінімальними втратами у лінії в залежності від обраної стратегії та алгоритмів керування [1,4,5]. У той же час залишилися без уваги мережі живлення з нульовим проводом з несиметричною, несинусоїдною напругою джерела і нелінійним навантаженням, а також вплив на величину ККД несиметрії напруги джерела та індуктивностей лінії передачі.

У даній статті з метою поглиблення аналізу енергетичних процесів у таких мережах живлення запропоновано формулу для розрахунку ККД трифазної чотирипровідної системи живлення для несинусоїдного несиметричного режиму за заданим коефіцієнтом потужності навантаження, визначеним на періоді напруги живлення, та відомим співвідношенням потужності короткого замикання до активної потужності навантаження. Розглянуто потенційну можливість збільшення ККД системи живлення шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження за допомогою паралельного активного фільтра. Проаналізовано фактори, що обмежують можливості збільшення ККД системи електроживлення засобами паралельної активної фільтрації.

**Визначення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення без паралельного активного фільтра (ПАФ).** Розглядаємо несинусоїдний несиметричний усталений з періодом  $T = 2\pi / \omega$

режим напруг вхідного джерела трифазної чотирипровідної системи живлення (рис. 1), який задається трикоординатними векторами миттєвих значень фазних напруг та струмів



Рис. 1

$$\mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{i}(t) = \begin{pmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix}.$$

З урахуванням співвідношення для струму нейтралі  $i_N(t) = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = \mathbf{j}^T \mathbf{i}(t)$ , де  $\mathbf{j}^T = \|1 \ 1 \ 1\|$ ;  $T$  – знак транспонування, вектор миттєвих значень фазних напруг навантаження визначається виразом

$$\mathbf{v}(t) = \begin{pmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_A(t) - r i_A(t) - r_N i_N(t) - v_{LA}(t) - v_{LN}(t) \\ u_B(t) - r i_B(t) - r_N i_N(t) - v_{LB}(t) - v_{LN}(t) \\ u_C(t) - r i_C(t) - r_N i_N(t) - v_{LC}(t) - v_{LN}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{u}(t) - \mathbf{r} \mathbf{i}(t) - r_N \mathbf{j} \mathbf{j}^T \mathbf{i}(t) - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} - L_N \frac{di_N(t)}{dt} \mathbf{j} = \mathbf{u}(t) - \mathbf{R} \mathbf{i}(t) - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $\begin{pmatrix} v_{LA}(t) \\ v_{LB}(t) \\ v_{LC}(t) \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \end{pmatrix}$  – вектор напруг на індуктивностях лінійних проводів кабельної лінії передачі;

$v_{LN}(t) = L_N di_N/dt$  – напруга на індуктивності нейтрального проводу;

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r + r_N & r_N & r_N \\ r_N & r + r_N & r_N \\ r_N & r_N & r + r_N \end{pmatrix} = r \mathbf{I} + r_N \mathbf{j} \mathbf{j}^T = \mathbf{R}^T; \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} L + L_N & L_N & L_N \\ L_N & L + L_N & L_N \\ L_N & L_N & L + L_N \end{pmatrix} =$$

$= L \mathbf{I} + L_N \mathbf{j} \mathbf{j}^T = \mathbf{L}^T$  – матриці опорів втрат та індуктивностей лінії передачі, симетричні відносно головної діагоналі;  $\mathbf{I}$  – одинична матриця;  $r, L$  – активний опір та індуктивність кожного лінійного проводу,  $r_N, L_N$  – активний опір та індуктивність нейтрального проводу. Будемо вважати, що між модулями введених векторів справедливе співвідношення  $|\mathbf{u}(t)| > |\mathbf{R} \mathbf{i}(t)| > |\mathbf{L} d\mathbf{i}(t)/dt|$ , а параметри елементів лінії передачі є подібними:  $L/L_N = r/r_N$ , тоді матриці цих параметрів є пропорційними:  $\mathbf{R} = (r/L) \mathbf{L}$ .

Баланс активних потужностей отримаємо, помноживши справа обидві частини транспонованої рівності (1) на вектор струмів та інтегруючи отримані добутки на періоді  $T$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{i}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} \right]^T \mathbf{L}^T \mathbf{i}(t) dt. \quad (2)$$

Інтегруючи частинами останній доданок виразу (2) з урахуванням того, що  $\mathbf{i}(T) = \mathbf{i}(0)$ , отримаємо

$$\int_0^T d\mathbf{i}^T(t) \mathbf{L}^T \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}^T(T) \mathbf{L}^T \mathbf{i}(T) - \mathbf{i}^T(0) \mathbf{L}^T \mathbf{i}(0) - \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{L}^T(t) d\mathbf{i}(t) = - \int_0^T d\mathbf{i}^T(t) \mathbf{L}^T \mathbf{i}(t) = 0.$$

Отже, потужність втрат визначається виразом

$$\Delta P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{i}(t) dt = P_S - P_L,$$

де  $P_S, P_L$  – активні потужності трифазного джерела та навантаження.

ККД системи живлення визначається як

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{P_L}{P_L + \Delta P} = \frac{1}{1 + \Delta P / P_L}. \quad (3)$$

Вважаючи, що коефіцієнт потужності навантаження не змінюється при врахуванні малих параметрів активно-індуктивних опорів лінії передачі, виразимо потужність втрат через повну потужність навантаження  $S_L$  та коефіцієнт потужності навантаження  $k_p = P_L / S_L$  відповідно до формули (7)

$$\Delta P = S_L^2 \left/ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt \right. = P_L^2 / k_p^2 P_V,$$

де  $P_V = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt$ . Підставивши вираз для потужності втрат у (3), матимемо

$$\eta = \left( 1 + P_L / k_p^2 P_V \right)^{-1}. \quad (4)$$

Скориставшись формулою (1), перетворимо вираз для  $P_V$

$$\begin{aligned} P_V &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{u}(t) - \mathbf{Ri}(t) - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt}]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{u}(t) - \mathbf{Ri}(t) - \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt}] dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Ri}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Ri}(t) dt + \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d\mathbf{i}^T}{dt} \mathbf{L}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} dt + \frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{Ri}(t)]^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} \right]^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Ri}(t) dt - \\ &- \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} dt - \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} \right]^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt = P_0 - P_S - P_S + \Delta P + P_{I'U} + P_{I'U} + P_{I'U} - P_{UI'} - P_{UI'}. \end{aligned} \quad (5)$$

З'ясуємо значення усіх доданків формули (5). При короткому замиканні правих затискачів активних опорів на рис. 1 вектор струмів короткого замикання трифазного джерела визначається виразом  $\mathbf{i}_0(t) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t)$ . Отже, першим доданком формули (5) є активна потужність короткого замикання

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt,$$

вперше введена як важливий чинник при дослідженні ККД систем живлення в роботах [2,3]. Доданки з другого по четвертий визначені раніше. П'ятий доданок містить інтеграл від добутку векторів напруг індуктивностей і є величиною вищого порядку малості порівняно з іншими доданками, якою можна знехтувати. Інтеграл з шостого та сьомого доданків, взяті частинами, з урахуванням періодичності  $\mathbf{i}(t)$  дорівнюють нулю. Восьмий та дев'ятий доданки є однаковими, і кожен з них може бути перетворений таким чином:

$$P_{UI'} = P_{I'U} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} dt = \frac{L}{r} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) d\mathbf{i}(t) = -\frac{L}{r} \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{d\mathbf{u}(t)}{dt} \right]^T \mathbf{i}(t) dt.$$

За умови симетричного синусоїдного трифазного джерела ці доданки дорівнюють нулю, якщо лінійні струми є парними функціями відносно моментів часу, що відповідають максимумам фазних напруг. Зокрема, цим умовам задовольняють лінійні струми випрямної схеми Міткевича при роботі на активне, активно-індуктивне ( $L_H \rightarrow \infty$ ) та активно-ємнісне навантаження. У подальшому розглядатимемо нелінійні навантаження, що задовольняють зазначеним умовам, тоді

$$P_V = P_0 - P_S - P_S + \Delta P = P_0 - P_S - P_S + P_S - P_L = P_0 - P_S - P_L,$$

а формула (4) набуває вигляду

$$\eta = \left( 1 + \frac{P_L}{k_p^2 (P_0 - P_S - P_L)} \right)^{-1} = \left( 1 + \frac{1}{k_p^2 (P_0 / P_L - 1 / \eta - 1)} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Після перетворень для визначення ККД маємо квадратне рівняння

$$\eta^{-2} - \eta^{-1}(P_0/P_L) + P_0/P_L - 1 + 1/k_p^2 = 0, \quad (7)$$

дискримінант якого

$$D = (P_0/2P_L)^2 - P_0/P_L + 1 - 1/k_p^2 = (P_0/2P_L - 1 - 1/k_p)(P_0/2P_L - 1 + 1/k_p).$$

Розв'язок квадратного рівняння (7) за умови  $P_0/P_L \geq 2 + 2/k_p$

$$\eta = \frac{1}{0.5(P_0/P_L) - \sqrt{0.25(P_0/P_L)^2 - (P_0/P_L) - a_k}}; \quad a_k = k_p^{-2} - 1. \quad (8)$$

Графіки залежностей ККД від відношення потужностей  $P_0/P_L$  при значеннях параметра  $a_k = 0, 1, 2$  показано на рис. 2. За умови  $a_k = 0$ , ( $k_p = 1$ ) рівняння (7) перетворюється на відоме з [3], що визначає максимальний ККД системи електроживлення постійної напруги за відсутності пульсацій струму в навантаженні  $P_L/P_0 - \eta + \eta^2 = 0$

з розв'язком  $\eta = 0,5 + \sqrt{0,25 - P_L/P_0}$ .

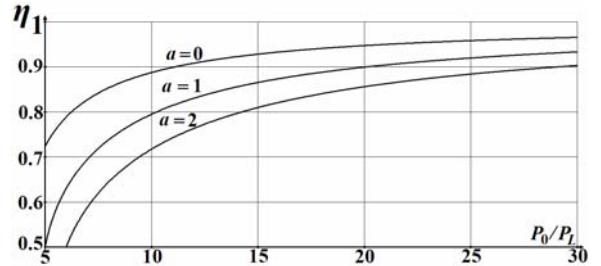


Рис. 2

Потенційну можливість збільшення ККД шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження, використовуючи паралельний активний фільтр, характеризує графік на рис. 3. З його аналізу випливає, що зі зменшенням відношення  $P_0/P_L$  ефективність застосування засобів ПАФ зростає.

**Визначення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром. Фактори, що обмежують підвищення ККД засобами ПАФ.** У роботі [1] показано, що за наявності ПАФ (рис. 1) вектор лінійних струмів трифазного джерела, який у несиметричному несинусоїдному режимі забезпечує постачання енергії в навантаження з одиничним коефіцієнтом потужності, визначається виразом

$$\mathbf{i}(t) = \frac{P_L}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{v}_\sigma(t) dt} \mathbf{v}_\sigma(t),$$

де  $\mathbf{v}_\sigma(t) = \mathbf{v}(t) - \sigma_0 \mathbf{v}_0(t)$  – вектор фазної напруги з частковим послабленням складової нульової послідовності  $\mathbf{v}_0(t)$ ,  $\sigma_0 = 3r_N / (r + 3r_N)$  – оптимальна величина коефіцієнта послаблення складовою нульової послідовності, що забезпечує мінімальні втрати енергії у силовому кабелі [5]. Таким чином, для забезпечення одиничного коефіцієнта потужності, що максимізує ККД, споживається активна потужність складових не тільки прямої, але і оберненої та нульової послідовностей частоти мережі та вищих гармонік. Це може бути корисним лише для резистивних навантажень [6], які, як правило, не є основними навантаженнями в енергосистемах, та призводить до емісії в трифазну мережу гармонік струму оберненої та нульової послідовностей основної та вищих гармонік. Тільки активна потужність напруги прямої послідовності і складова струму основної гармоніки є корисною потужністю в синхронному або асинхронному двигуні. Активна потужність оберненої послідовності і активна потужність вищих гармонік не може бути перетворена в механічну потужність на валу двигуна, а тільки підвищує температуру двигуна і / або механічну вібрацію.

При формуванні струмів джерела пропорційними складовій прямої послідовності основної гармоніки вектора фазних напруг навантаження  $\mathbf{v}_{1+}(t)$ , вектор струму  $\mathbf{i}(t) = \frac{P_L}{V_{1+}^2} \mathbf{v}_{1+}(t)$ , а квадрат повної потужності навантаження, визначений відповідно до [1]

$$\begin{aligned} S_L^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}^T(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{i}(t) dt = [V_{1+}^2 + V_{1-}^2 + (1 - \sigma_0)V_0^2 + V_H^2][I_{1+}^2 + I_{1-}^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0) + I_H^2] = \\ &= [V_{1+}^2 + V_{1-}^2 + (1 - \sigma_0)V_0^2 + V_H^2] \left( \frac{P_L}{V_{1+}^2} \right)^2 V_{1+}^2 = P_L^2 \left[ 1 + \frac{V_{1-}^2 + (1 - \sigma_0)V_0^2 + V_H^2}{V_{1+}^2} \right], \end{aligned}$$

де  $V_{1\pm}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}_{1\pm}^T(t) \mathbf{v}_{1\pm}(t) dt$  – діючі значення складових напруги прямої та оберненої послідовностей

основної гармоніки;  $V_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}_0^T(t) \mathbf{v}_0(t) dt$  – діюче значення складової напруги нульової послідов-

ності;  $V_H^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}_H^T(t) \mathbf{v}_H(t) dt$  – діюче значення вищих гармонік вектора фазних напруг навантажен-

ня. Звідси максимальний коефіцієнт потужності при зазначеному керуванні набуває значення

$$k'_p = \left[ 1 + \frac{V_{1-}^2 + (1 - \sigma_0) V_0^2 + V_H^2}{V_{1+}^2} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

Прийнявши припущення, що коефіцієнт несиметрії напруги за оберненою та нульовою послідовностями  $k_{n+} = k_{n0} = V_{1-} / V_{1+} = V_0 / V_{1+} = k_n$ , а коефіцієнт гармонік напруги (THDU)  $k_{GU} = V_H / V_{1+}$ , для оптимального значення  $\sigma_0 = 0,75$ , розрахованого в [5], отримуємо залежність  $k'_p = f(k_n)$  при різних значеннях THDU, представлену на рис. 4, яка обмежує збільшення ККД системи засобами ПАФ шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження.

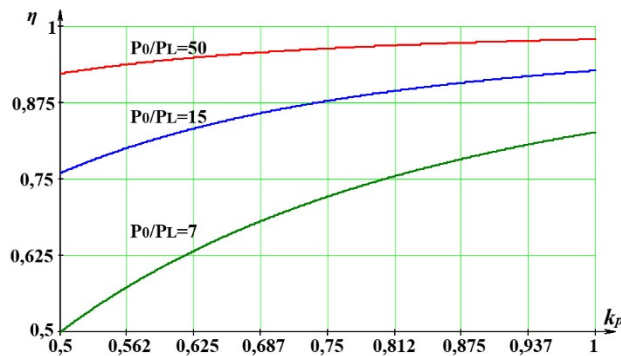


Рис. 3

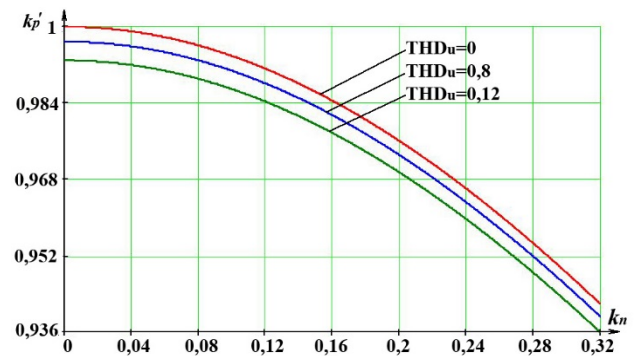


Рис. 4

Так, наприклад, для стандартних мереж живлення, відповідно до діючого стандарту ДСТУ 13109-97, коли коефіцієнт несиметрії напруги за оберненою та нульовою послідовностями обмежений 2% (значення) та 4% (максимально допустиме значення), коефіцієнт потужності становить 0,999 і, в першу, чергу залежить від значення коефіцієнта гармонік напруги мережі, який дорівнює відповідно 8% – нормально допустиме та 12% – максимально допустиме значення. Для інших нестандартних локальних мереж застосування активної фільтрації може бути набагато ефективніше.

Іншим обмежуючим фактором зростання ККД є потужність втрат  $P_F$  ПАФ. З урахуванням цієї потужності формула (6) модифікується до вигляду

$$\eta' = \left( 1 + 1/k'_p{}^2 (P_0/P'_L - 1/\eta' - 1) \right)^{-1},$$

де  $\eta' = \frac{P'_L}{P_S} = \frac{P_L + P_F}{P_S} = \frac{P_L}{P_S} \times \frac{P_L + P_F}{P_L} = \eta_F \frac{P_L + P_F}{P_L}$ ;  $k'_p > k_p$  – нове значення коефіцієнта потужності,

що досягається в системі з ПАФ. Звідси ККД трифазної системи з ПАФ

$$\eta_F = \frac{P_L/P'_L}{0,5(P_0/P'_L) - \sqrt{0,25(P_0/P'_L)^2 - (P_0/P'_L) - a'_k}}; \quad a'_k = (k'_p)^{-2} - 1 < a_k.$$

Умовою доцільності застосування ПАФ є нерівність  $\eta_F > \eta$  або

$$\frac{P_L/P'_L}{0,5(P_0/P'_L) - \sqrt{0,25(P_0/P'_L)^2 - (P_0/P'_L) - a'_k}} > \frac{1}{0,5(P_0/P_L) - \sqrt{0,25(P_0/P_L)^2 - (P_0/P_L) - a_k}},$$

що еквівалентно перетворюється до нерівності

$$P_L^2 a_k - P_L'^2 a_k' > P_0 P_L' - P_0 P_L,$$

розв'язок якої

$$P_F / P_L < a_k P_L / P_0, \text{ якщо } a_k' = 0$$

або

$$P_F / P_L < \sqrt{(1 + P_0 / 2 P_L a_k')^2 + (a_k / a_k' - 1)} - (1 + P_0 / 2 P_L a_k'), \text{ якщо } 0 < a_k' < a_k.$$

Отримані розрахункові формули дозволяють проаналізувати доцільність застосування паралельного активного фільтра шляхом визначення критичного значення відношення потужності втрат фільтра до активної потужності навантаження. Для цього має бути відома (розрахована) активна потужність короткого замикання системи живлення та визначені коефіцієнти потужності навантаження до та після підключення ПАФ. Для прикладу, при значенні відношення  $P_0 / P_L = 10$  та збільшенні коефіцієнта потужності навантаження завдяки використанню ПАФ на 1% (що відповідає підвищенню ККД  $\Delta\eta = 0,3\%$ ), значення  $P_F / P_L$  не повинно перевищувати 0,003. За аналогічних умов при збільшенні коефіцієнта потужності навантаження завдяки використанню ПАФ від значення 0,8 до 0,9 (що відповідає підвищенню ККД  $\Delta\eta = 3,1\%$ ) значення  $P_F / P_L$  не повинно перевищувати 0,103. Відзначимо також, що подальше підвищення ККД системи за умов живлення інших паралельно підключених споживачів можливе за рахунок покращення показників якості напруги живлення (в першу чергу  $\text{THD}_U$ ), що практично досягається застосуванням послідовної активної фільтрації.

#### Висновки.

1. Запропоновано формулу для розрахунку ККД трифазної чотирипровідної системи живлення для несинусоїдного несиметричного режиму за заданим коефіцієнтом потужності навантаження, визначеним на періоді напруги живлення, та відомим співвідношенням потужності короткого замикання до активної потужності навантаження.
2. Проаналізовано вплив на величину ККД несиметрії напруги джерела та індуктивних опорів лінії електропередачі.
3. Розглянуто потенційну можливість збільшення ККД системи живлення шляхом підвищення коефіцієнта потужності навантаження завдяки застосуванню паралельного активного фільтра.
4. Аналітично представлено фактори, що обмежують можливість збільшення ККД системи електроживлення засобами паралельної активної фільтрації та межі доцільності застосування ПАФ.

1. Артеменко М.Ю. Повна потужність трифазної системи живлення в несинусоїдному режимі та енергоефективність засобів паралельної активної фільтрації // Електроніка та зв'язок. – 2014. – №6. – С. 38–47.
2. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД систем электроснабжения постоянного напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч. 2. – С. 107–118.
3. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 22–31.
4. 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. – №2. – С. 25–35.
5. Поліщук С.Й., Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Шаповал І.А., Батрак Л.М. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 12–19.
6. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory // Przegląd Elektrotechniczny. – 2008. – No 6. – Pp. 28–37.
7. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation // IEEE Trans. Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. – No1. – Pp. 53–63.
8. 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.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КПД ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ СРЕДСТВАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

М.Е.Артеменко<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Л.М.Батрак<sup>1</sup>, В.М.Михальский<sup>2</sup>, докт.техн.наук,  
С.И.Полищук<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net),

<sup>2</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua)

*Предложена формула определения КПД трехфазной четырехпроводной системы питания для несинусоидального несимметричного режима по заданному коэффициенту мощности нагрузки, определенному на периоде напряжения питания, и известному отношению мощности короткого замыкания к активной мощности нагрузки. Рассмотрена потенциальная возможность увеличения КПД системы питания путем повышения коэффициента мощности нагрузки с помощью параллельного активного фильтра. Проанализированы факторы, ограничивающие возможности увеличения КПД системы электропитания средствами параллельной активной фильтрации. Библ. 8, рис. 4.*

**Ключевые слова:** полная мощность, коэффициент мощности, составляющая нулевой последовательности, активный фильтр.

## ANALYSIS OF POSSIBILITY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THREE-PHASE FOUR-WIRE POWER SYSTEM BY MEANS OF SHUNT ACTIVE FILTER

M.Yu.Artemenko<sup>1</sup>, L.M.Batrak<sup>1</sup>, V.M.Mykhalskyi<sup>2</sup>, S.Y.Polishchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – National Technical University of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", Peremohy pr., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

<sup>2</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: [artemenko\\_m\\_ju@ukr.net](mailto:artemenko_m_ju@ukr.net), [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua)

*The formula determining the efficiency of three-phase four-wire power system for non-sinusoidal unbalanced mode has been proposed. It is obtained under the specified load power factor, which defined on the supply voltage period, and under the known relation of the short circuit power to the active power of the load. The potential for increasing the efficiency of the power supply system by raising the power factor of the load using a parallel active filter has been considered. Factors limiting the possibility of increasing the efficiency of the power system by means of shunt active filters have been analyzed. References 8, figures 4.*

**Key words:** total power, power factor, zero sequence component, active filter.

1. Artemenko M.Yu. Apparent power of three-phase power system in nonsinusoidal mode and energy effectiveness of shunt active filters // *Elektronika ta Zviazok*. – 2014. – No 6. – Pp. 38–47. (Ukr)

2. Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Ilyina O.V., Kovalchuk O.I., Sokol E.I. Efficiency three-phase four-wire power supply system with an asymmetric load // *Tekhnichna Elektrodynamika "Sylova elektronika i enerhoefektyvnist"*. – 2010. – Part. 1. – Pp. 22–31. (Rus)

3. Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Ilyina O.V., Kovalchuk O.I., Sokol E.I. Efficiency of DC power supply systems and symmetrical three-phase system of sinusoidal voltage // *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2010. – Part 2. – Pp. 107–118. (Rus)

4. 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)

5. Polishchuk S.Y., Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Batrak L.M., Shapoval I.A. Shunt active filter control strategy with partial decrease of zero-sequence voltage in three-phase four-wire system // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2013. – No 3. – Pp. 12–19. (Ukr)

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

7. Czarniecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation // *IEEE Trans. Power Delivery*. – 2015. – Vol. 30. – No 1. – Pp. 53–63.

8. 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.

Надійшла 09.07.2015