

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/04>**Артеменко М.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Каплун В.В.**

Національний університет біоресурсів та природокористування України

Бобровник В.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗА ВІДОМИМИ АКТИВНИМИ ТА РЕАКТИВНИМИ ПОТУЖНОСТЯМИ ОКРЕМИХ ФАЗ

Споживачі трифазних систем електроживлення з нелінійним та несиметричним характером навантаження погіршують електромагнітну сумісність електричних мереж та збільшують втрати електроенергії. Нормативна методика розрахунку втрат електроенергії враховує лише активну та реактивну складові частини, які пропорційні відповідним потужностям, не обліковуючи належним чином потужності несиметрії (небалансу) та спотворення. Метою даної роботи є одержання аналітичних виразів для кожної зі складових частин повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, що формують загальні втрати електроенергії, за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз. Методами теорії електричних кіл одержані нові аналітичні вирази для складової частини повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, що зумовлена основною гармонікою струму нейтралі та потужністю спотворення за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, які можуть бути використані для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в електричних мережах без зміни метрологічної бази споживача. У наведеному прикладі з несиметричним лінійним навантаженням показано, що складова частина повної потужності першої гармоніки струму нейтралі перевищує потужність небалансу в усьому діапазоні зміни параметра навантаження. Приклад з несиметричним нелінійним навантаженням проілюстрував, що зазначені складові частини повної потужності та потужність спотворення можуть перевищувати активну потужність навантаження, чим суттєво знижують коефіцієнт потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення. Врахування усіх складових частин повної потужності в нормативно-правовій базі обліку витрат електричної енергії стимулюватиме споживачів до вживання організаційних та технічних заходів щодо покращення електромагнітної сумісності системи електроспоживання.

Ключові слова: складові частини повної потужності, втрати електроенергії, трифазна чотирипровідна система електроживлення, електромагнітна сумісність, коефіцієнт потужності.

Постановка проблеми. З розвитком електроенергетики та широкого впровадження засобів напівпровідникової техніки зростає кількість споживачів трифазних систем електроживлення з нелінійним та несиметричним характером навантаження, що знижує електромагнітну сумісність трифазних систем та веде до зростання втрат енергії в електричних мережах [1; 2]. Однак, згідно з

чинними нормативними актами [3; 4], методика розрахунку витрат електроенергії враховує лише покази засобів обліку про спожиту активну та реактивну енергії, які пропорційні відповідним потужностям. На цій поза увагою та оплатою залишаються потужності несиметрії (небалансу) та спотворення. Особливої гостроти проблема врахування додаткових витрат електроенергії

набуває в трифазних чотирипровідних системах електроживлення, де несиметрія навантаження та поява вищих гармонік струмів лінійних проводів збільшує сумарні витрати внаслідок зростання струму та теплового навантаження нейтралі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори дослідження [5] запропонували часткове розв'язання проблеми врахування складових частин повної потужності, які не вимірюються, обґрунтувавши аналітичні вирази для потужності небалансу через значення активних та реактивних потужностей окремих фаз. Це розв'язує завдання врахування додаткових втрат електроенергії для трифазної трипровідної системи електроживлення з лінійним навантаженням, оскільки дозволяє без зміни метрологічної бази на стороні споживачів визначати розрахунковим шляхом потужність небалансу та враховувати усі складові частини втрат електроенергії з боку споживачів; шляхом зміни нормативної бази обліку витрат. Наявність таких змін стимулюватиме споживачів до вжиття організаційних та технічних заходів щодо вирівнювання навантаження фаз. Водночас залишається проблема визначення потужності спотворення та складової частини повної потужності, викликані струмом нейтралі трифазної чотирипровідної системи електроживлення.

Постановка завдання. Метою даної роботи є одержання аналітичних виразів для кожної зі складових частин повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення, що формують загальні втрати електроенергії, за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до [6], що погоджується з сучасним стандартом [7], квадрат повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за умов симетричної синусоїдної напруги та несиметричного в загальному випадку нелінійного навантаження визначається виразом

$$S^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r), \quad (1)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги; I_A, I_B, I_C, I_N – діючі значення лінійних струмів та струму в нейтралі; r_N / r – відношення активних опорів нейтрального та кожного з лінійних проводів.

Покази ватметрів та результати вимірювань реактивної потужності адекватно відбивають енергетичні процеси трифазної чотирипровідної системи лише за умови синусоїдності струмів, коли останні можна представити комплексним вектором діючих значень основної гармоніки

$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix}^T$ та перейти до комплексного вектора діючих значень симетричних складових частин нульової (0), прямої (+) та зворотної (-) послідовностей:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{де } \mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a} \end{bmatrix} -$$

модифікована матриця Фортеск'ю [8], що задовольняє умовам $\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}^*$; $\mathbf{F}^T = \mathbf{F}$; $\dot{a} = e^{j2\pi/3}$; $\dot{a} = (\dot{a})^*$; T та $*$ – знаки транспонування та комплексного спряження відповідно.

Декомпозиція квадрату повної потужності трифазної чотирипровідної системи на квадратичні складові частини за умов симетричної синусоїдної напруги та несиметричного лінійного навантаження має вигляд [6]:

$$S_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + T^2, \quad (3)$$

де P, Q – активна й реактивна потужності трифазної системи; $R^2 = 3U_\phi^2 I_0^2$ – квадрат потужності пульсацій; $T^2 = 3U_\phi^2 I_0^2 (1 + 3r_N / r)$ – квадрат так званої прихованої потужності.

За результатами вимірювання на частоті основної гармоніки активних P_{A1}, P_{B1}, P_{C1} та реактивних Q_{A1}, Q_{B1}, Q_{C1} потужностей окремих фаз навантаження безпосередньо можуть бути визначені відповідно до [6] лише перші дві складові частини формули (3):

$$P = P_{A1} + P_{B1} + P_{C1}; Q = Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1}. \quad (4)$$

З урахуванням співвідношення $P^2 + Q^2 = 3U_\phi^2 I_+^2$ [8], перегрупуємо доданки формули (3):

$$S_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + 3U_\phi^2 I_0^2 (1 + 3r_N / r) = L_1^2 + N_1^2, \quad (5)$$

де $L_1^2 = P^2 + Q^2 + R^2 + 3U_\phi^2 I_0^2 = 3U_\phi^2 (I_+^2 + I_-^2 + I_0^2)$ – частина квадрату повної потужності основної гармоніки струму, зумовлена струмами у лінійних проводах; $N_1^2 = 9U_\phi^2 I_0^2 r_N / r$ – частина квадрату повної потужності основної гармоніки струму, зумовлена струмом у нейтралі.

На основі властивостей матриці \mathbf{F}

$$I_0^2 + I_+^2 + I_-^2 = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix}^T \left(\mathbf{F}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix} \right)^* = \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{F} \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \end{bmatrix} =$$

$= I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2 \square I_0^2 = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} \square \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} \square = I_0^2 \square$ тому після відповідного підставлення матимемо вирази для введених складових частин повної потужності:

$$L_1^2 = 3U_\phi^2 (I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2) = 3(S_{A1}^2 + S_{B1}^2 + S_{C1}^2); \quad (6)$$

$$N_1^2 = 3U_\phi^2 I_{N1}^2 r_N / r,$$

де $S_{n1}^2 = P_{n1}^2 + Q_{n1}^2$; $n = A, B, C$ – квадрати повних потужностей окремих фаз.

З використанням формули Лагранжа [9] можна довести, що

$$3(P_{A1}^2 + P_{B1}^2 + P_{C1}^2) = (P_{A1} + P_{B1} + P_{C1})^2 + (P_{A1} - P_{B1})^2 + (P_{A1} - P_{C1})^2 + (P_{B1} - P_{C1})^2,$$

аналогічна формула справедлива для реактивних потужностей, тому відбувається декомпозиція:

$$I_1^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (7)$$

де

$$D^2 = (P_{A1} - P_{B1})^2 + (P_{A1} - P_{C1})^2 + (P_{B1} - P_{C1})^2 + (Q_{A1} - Q_{B1})^2 + (Q_{A1} - Q_{C1})^2 + (Q_{B1} - Q_{C1})^2 -$$

квадрат потужності небалансу, величина якої повністю збігається з результатами роботи [5].

Для скорочення обчислень квадрат потужності небалансу може бути обчислений за формулою

$$D^2 = 3(S_{A1}^2 + S_{B1}^2 + S_{C1}^2) - (P^2 + Q^2), \quad (8)$$

що випливає з формул (6) та (7).

Відмінність даного дослідження полягає у врахуванні квадратичної складової частини повної потужності N_1^2 , зумовленої струмом першої гармоніки нейтралі. Для її визначення через показання приладів вимірювання потужностей знайдемо еквівалентну комплексну провідність кожної фази лінійного навантаження:

$$\bar{y}_n = \dot{I}_{n1} / \dot{U}_n = \dot{I}_{n1}(\dot{U}_n)^* / \dot{U}_n(\dot{U}_n)^* = (P_{n1} - jQ_{n1}) / U_\phi^2, \quad (9)$$

Комплекс діючого значення струму нейтралі можна записати через потужності:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{N1} &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = \dot{U}_A \bar{y}_A + \dot{U}_B \bar{y}_B + \dot{U}_C \bar{y}_C = \\ &= [(P_{A1} - jQ_{A1}) + a^2(P_{B1} - jQ_{B1}) + a(P_{C1} - jQ_{C1})] / U_\phi = \\ &= \{ [P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2}] + j[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2}] \} / U_\phi. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставлення квадрата модуля струму нейтралі в другу формулу (6) дає вираз для квадратичної складової частини повної потужності трифазної чотирипровідної системи електропостачання, зумовленою основною гармонікою струму нейтралі:

$$N_1^2 = 3 \left\{ \left[P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2} \right]^2 + \left[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2} \right]^2 \right\} r_N / r, \quad (11)$$

Відношення опорів проводів лінії електроживлення r_N / r може бути визначене експериментальним шляхом за методикою [10].

Для ілюстрації як приклад розглянемо визначення квадратичних складових частин повної потужності трифазної чотирипровідної системи за наявності лінійного несиметричного навантаження, яке задано комплексними провідностями

$\bar{y}_A = G$; $\bar{y}_B = Ge^{j\varphi}$; $\bar{y}_C = Ge^{-j\varphi}$. Відповідно до формули (9) розраховуємо комплексні потужності:

$$\begin{aligned} P_{A1} - jQ_{A1} &= U_\phi^2 G; \\ P_{B1} - jQ_{B1} &= U_\phi^2 Ge^{j\varphi} = U_\phi^2 G \cos \varphi + jU_\phi^2 G \sin \varphi; \\ P_{C1} - jQ_{C1} &= GU_\phi^2 e^{-j\varphi} = U_\phi^2 G \cos \varphi - jU_\phi^2 G \sin \varphi. \end{aligned}$$

Визначаємо квадрати повних потужностей окремих фаз $S_{A1}^2 = S_{B1}^2 = S_{C1}^2 = U_\phi^4 G^2$, активну та реактивну потужності трифазної системи

$$P = P_{A1} + P_{B1} + P_{C1} = U_\phi^2 G(1 + 2 \cos \varphi); Q = Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1} = 0.$$

Квадрат потужності небалансу визначаємо за спрощеною формулою (8) та переконуємось у її адекватності підставленням різницевих значень потужностей в опис формули (7):

$$\begin{aligned} D^2 &= I_1^2 - (P^2 + Q^2) = 9U_\phi^4 G^2 - U_\phi^4 G^2(1 + 2 \cos \varphi)^2 = \\ &= U_\phi^4 G^2(8 - 4 \cos \varphi - 4 \cos^2 \varphi). \end{aligned}$$

Для визначення квадрату повної потужності першої гармоніки струму нейтралі при заданому навантаженні спочатку доречно знайти комплексний струм нейтралі:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{N1} &= \dot{U}_A \bar{y}_A + \dot{U}_B \bar{y}_B + \dot{U}_C \bar{y}_C = U_\phi G [1 + e^{-j(2\pi/3-\varphi)} + \\ &e^{j(2\pi/3-\varphi)}] = U_\phi G [1 + 2 \cos(2\pi/3 - \varphi)] \end{aligned}$$

та другою скористатися другою формулою (6):

$$N_1^2 = 3U_\phi^2 I_{N1}^2 r_N / r = 3U_\phi^4 G^2 [1 + 2 \cos(2\pi/3 - \varphi)]^2 r_N / r.$$

Введемо відносні коефіцієнти складових частин повної потужності:

$$\begin{aligned} k_D &= \frac{D}{P} = \frac{2\sqrt{2 - \cos(\varphi) - \cos^2(\varphi)}}{1 + 2 \cos(\varphi)}; \\ k_N &= \frac{N_1}{P} = \frac{\sqrt{3}[1 + 2 \cos(2\pi/3 - \varphi)]}{1 + 2 \cos(\varphi)} \end{aligned}$$

та побудуємо графіки їхньої залежностей від параметра φ при $r_N = r$ (рис. 1).

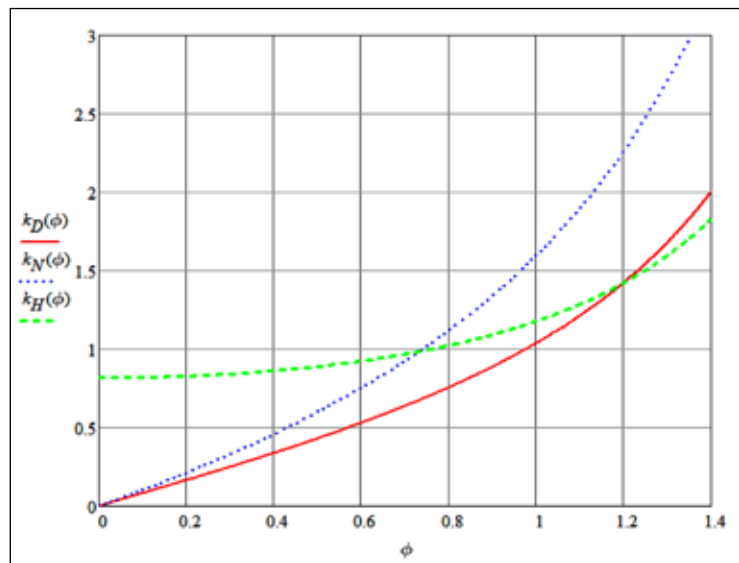


Рис. 1

Початкові значення зазначених коефіцієнтів є нульовими, оскільки за $\varphi = 0$ маємо симетричне навантаження. Складова частина повної потужності першої гармоніки струму нейтралі перевищує потужність небалансу в усьому діапазоні зміни параметра навантаження φ , причому за деякого його значення обидві досліджувані складові частини повної потужності перевищують активну потужність, що свідчить про важливість їхнього врахування під час визначення витрат електроенергії.

За нелінійного навантаження трифазної системи через наявність вищих гармонік збільшуються діючі значення струмів лінійних та нейтрального проводів, повна потужність обчислюється за формулою (1) і її декомпозиція містить додаткову складову частину у вигляді квадрата потужності спотворення [6].

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 r_N / r) - S_1^2. \quad (12)$$

З урахуванням ортогональності струмів основної та вищих гармонік $I_n^2 = I_{n1}^2 + I_{nH}^2$, так само розкладається і квадрат діючого значення струму нейтралі, тому розрахункова формула для квадрата потужності спотворення набуває вигляду:

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_{AH}^2 + I_{BH}^2 + I_{CH}^2 + I_{NH}^2 r_N / r). \quad (13)$$

Квадрати діючих значень струмів вищих гармонік, що входять до формули (13), можуть бути визначені за результатами вимірювання діючих значень відповідних струмів, потужностей та напруг за формулами

$$I_{nH}^2 = I_n^2 - (P_{n1}^2 + Q_{n1}^2) / U_\phi^2; \\ I_{NH}^2 = I_N^2 - \left\{ \left[P_{A1} - \frac{P_{B1} + P_{C1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(Q_{C1} - Q_{B1})}{2} \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[-Q_{A1} + \frac{Q_{C1} + Q_{B1}}{2} + \frac{\sqrt{3}(P_{C1} - P_{B1})}{2} \right]^2 \right\} / U_\phi^2. \quad (14)$$

Зауважимо, що для визначення потужності спотворення вимірювальний комплекс має містити високочастотні вимірювачі діючих значень як лінійних струмів, так і струму нейтралі.

Розглянемо другий ілюстративний приклад, який відрізняється від першого наявністю ідеального діода в колі активного навантаження фази A , причому для збереження такого самого струму основної гармоніки цієї фази провідність навантаження обрана рівною $2G$. Таким чином, миттєве значення струму лінійного проводу фази A визначається виразом:

$$i_A(t) = \sqrt{2}U_\phi G[\cos(\omega t) + |\cos(\omega t)|] = i_{A1}(t) + i_{AH}(t), \quad (15)$$

Оскільки перебіг енергетичного процесу трифазної системи на частоті основної гармоніки не змінився, маємо ті ж самі значення $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}, P, S_1$, що і в першому прикладі. Як впливає з орто-

гонального розкладання струмів (15), діюче значення струму $i_{AH}(t)$ складає $I_{AH} = I_{A1} = UG$. в інших фазах навантаження вищих гармонік струму немає ($I_{BH} = I_{CH} = 0$), отже, в нейтралі маємо $I_{NH} = I_{AH} = UG$. За формулою (13)

$$H^2 = 3U_\phi^2(I_{AH}^2 + I_{AH}^2 r_N / r) = 3U_\phi^4 G^2 (1 + r_N / r). \quad (16)$$

Коефіцієнт відносної потужності спотворення має вигляд

$$k_H = \frac{H}{P} = \frac{\sqrt{3(1 + r_N / r)}}{1 + 2 \cos(\varphi)},$$

графік його залежності від параметра φ при $r_N = r$ наведений на рис.1. На відміну від коефіцієнтів, що характеризують інші складові частини повної потужності, k_H набуває ненульового початкового значення, оскільки в даному прикладі вищі гармоніки струму діють в фазі навантаження A та нейтралі навіть за симетричного режиму на основній частоті.

Інтегральним показником енергоефективності процесу споживання електроенергії в частині відбиття енерговитрат є коефіцієнт потужності [6]

$$\lambda = P / S = 1 / \sqrt{1 + k_Q^2(\varphi) + k_D^2(\varphi) + k_N^2(\varphi) + k_H^2(\varphi)}, \quad (17)$$

У розглянутих прикладах $Q = 0; k_Q = Q / P = 0$, тому розрахунок коефіцієнта потужності лише за показниками активної та реактивної потужності веде до хибного оцінювання енергоефективності процесу як ідеального ($\lambda_Q = 1$). Поступове прийняття до уваги відносних коефіцієнтів складових частин потужностей в розрахунковій формулі (17) породжує низку таких формул для часткових коефіцієнтів потужності:

$$\lambda_L = \frac{P}{L_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_D^2(\varphi)}} -$$

як повної потужності враховується лише її частина, зумовлена струмами основної гармоніки лінійних проводів;

$$\lambda_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_D^2(\varphi) + k_N^2(\varphi)}} -$$

враховує лише повну потужність першої гармоніки усіх струмів;

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + k_D^2(\varphi) + k_N^2(\varphi) + k_H^2(\varphi)}} -$$

враховує всі складові частини повної потужності.

Графіки зазначених часткових коефіцієнтів потужності наведені на рис. 2.

Їхній аналіз демонструє суттєву відмінність фактичного коефіцієнта потужності від ідеального. Наприклад, при $\varphi = 1$ рад $\lambda \approx 0.4$, що означає перевищення фактичних витрат в $1 / \lambda^2 \approx 6$ разів як порівняти з мінімально можливими при $\lambda = 1$.

Висновки. Отже, отримані нові аналітичні вирази для складової частини повної потужності

трифазної чотирипровідної системи електроживлення, яка зумовлена основною гармонікою струму нейтралі та потужністю спотворення за відомими значеннями активних та реактивних потужностей окремих фаз, які можуть бути використані для розрахунку додаткових витрат електричної енергії в лініях електроживлення без зміни метрологічної бази на стороні споживачів. Ілюстративний приклад з використанням одержаних формул показав, що зазначені складові частини повної потужності можуть перевищувати як активну потужність, так і потужність небалансу, внаслідок чого суттєво знижується коефіцієнт потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення. Врахування зазначених складових частин повної потужності в нормативній базі обліку витрат електричної енергії сприятиме стимулюванню споживачів до впровадження організаційних та технічних заходів щодо покращення електромагнітної сумісності систем електроспоживання.

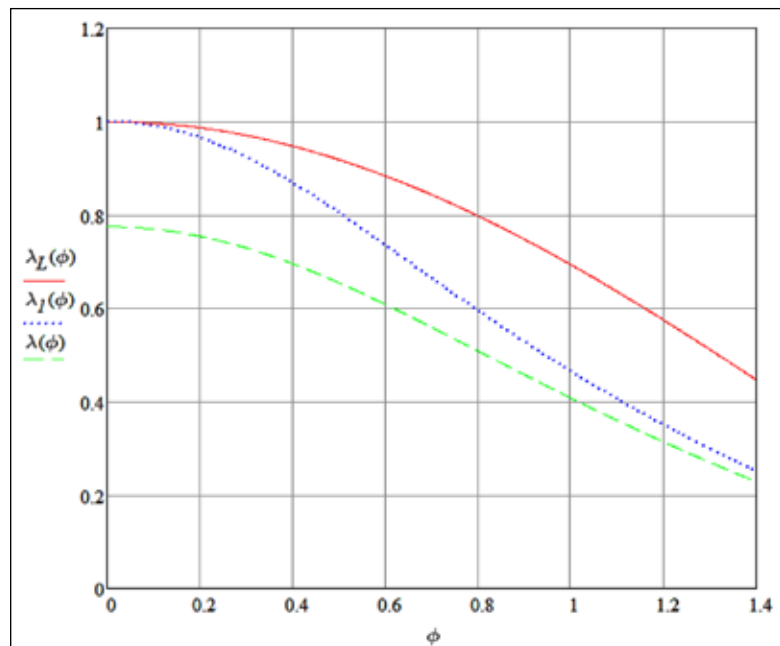


Рис. 2

Список літератури:

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. Москва : Энергоатомиздат, 2004. 254 с.
2. Гриб О.Г. Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии : монография. ПП «Граф-Ікс». Харьков. 2014. 292 с.
3. Жаркин А.Ф., Новский В.А., Палачев С.А. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. *Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов*. Киев. Ин-т электродинамики НАН Украины, 2010. 167 с.
4. Про методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання : Наказ № 399 Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21 червня 2013 р. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#n850> (дата звернення: 22.07.2019).
5. Сиротин Ю.А., Гриб О.Г., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С., Швец С.В. Учет неактивных составляющих полной мощности. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків. 2017. № 42 (948). С. 71–76.
6. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / пер. с чешск. А. Окина. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
7. IEEE standart definitions for the measurements of electrical power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced and nonbalanced conditions. IEEE Std 1459-2010.
8. Каплун В.В., Артеменко М.Ю., Полішук С.Й., Бобровник В.М. Розрахунок енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних активних фільтрів в трифазній чотирипровідній системі електропостачання при збільшенні інтервалу осереднення вимірюваних величин. *«Електроніка та зв'язок»*. 2017. № 4 (22). С. 18–24.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике : для научных работников и инженеров. Москва : Наука. 1978. 832 с.
10. Бобровник В.М., Каплун В.В., Артеменко М.Ю. Методика розрахунку енергозберігаючого ефекту від застосування паралельного активного фільтра в трифазній чотирипровідній системі електроживлення з урахуванням його власних втрат. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2018. № 6 (128). С. 9–19.

Artemenko M.Yu., Kaplun V.V., Bobrovnik V.M. DETERMINATION OF THE APPARENT POWER COMPONENTS OF A THREE-PHASE FOUR-WIRE POWER SUPPLY SYSTEM BY KNOWN REAL AND REACTIVE POWERS OF SEPARATE PHASES

Nonlinear and asymmetric consumers of three-phase four-wire power supply system impair the electromagnetic compatibility of power grids and increase electrical energy losses. The regulatory methodology for calculating electrical energy losses takes into account only active and reactive energies that are proportional to the respective powers, without proper considering remain unbalanced and distortion ones. The goal of this work is to obtain analytical expressions for each of the apparent power components of the three-phase four-wire power supply system, which form the total electricity losses, according to the known values of the active and reactive powers of the individual phases. The new analytical expressions for two apparent power components were obtained by methods of electric circuit theory. One of them is caused by the basic harmonic of the neutral current and second is the distortion power. They can be calculating by the known values of the active and reactive powers of the individual phases that can be used for the calculation of electric energy losses without changing of the consumer metrological base. In the first example with asymmetrical linear load it was shown that the apparent power component of the neutral current first harmonic exceeds the unbalance power in the whole range of load parameter changing. The second example with non-symmetric nonlinear load illustrated that the specified apparent power components and distortion power can exceed the load active power that significantly reduces the power factor of power supply system. Taking into account of all apparent power components in the regulatory framework of electrical energy losses determination will stimulate consumers to take organizational and technical measures to improve the electromagnetic compatibility of the electricity consumption system.

Key words: *apparent power components, electrical energy loss, three-phase four-wire power system, electromagnetic compatibility, power factor.*