

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.317.7

М. Й. Бурбело¹
А. В. Гадай²
С. М. Мельничук³
Ю. В. Лобода¹

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ НАВАНТАЖЕНЬ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В НЕСИНУСОЇДНИХ ТА НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Луцький національний технічний університет;

³ДП «НЕК «Укренерго» ВП Південно-Західна ЕС

Проаналізовано можливість визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах. Введено поняття ефективних на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей, а також їх середньоквадратичних відхилень. Показано, що останні є потужностями пульсацій, а ті, в свою чергу, є сумою потужностей небалансу та гармонічних спотворень. Запропоновано для визначення потужності гармонічних спотворень використовувати середньоквадратичні значення різниці потужностей пульсацій та небалансу. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення. Запропоновано формули для визначення цієї потужності з використанням миттєвих потужностей.

Ключові слова: електричні мережі, несинусоїдні та несиметричні режими, визначення потужностей навантажень.

Вступ

Наявність на промислових підприємствах потужних споживачів з різкозмінними нелінійними та несиметричними навантаженнями спричиняє певні проблеми з електромагнітною сумісністю, обліком електроенергії, компенсацією реактивної потужності. Це пов'язано з тим, що такі споживачі створюють в електричних мережах коливання, несинусоїдність та несиметрію напруги.

Активну та реактивну потужності вимірюють шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення [1]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt. \quad (1)$$

Класичний підхід полягає у формуванні миттєвих активної та реактивної потужностей як скалярного добутку векторів трифазних миттєвих напруг і струмів [2, 3]:

$$p = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{I}) = (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C); \quad (2)$$

$$q = (\mathbf{U}' \mathbf{I}) = (u'_A i_A + u'_B i_B + u'_C i_C), \quad (3)$$

де \mathbf{U} , \mathbf{U}' , \mathbf{I} — вектори напруг і струмів в фазних координатах, відповідно: $[u_A, u_B, u_C]^T$, $[u'_A, u'_B, u'_C]^T$, $[i_A, i_B, i_C]^T$, штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів. За умов несинусоїдності фазовий зсув усіх гармонік напруги забезпечується за допомогою перетворення Гільберта. Однак реалізація такого перетворення є достатньо складною [4].

За умов несинусоїдності класичний підхід відповідає теорії потужності К. Будяну, згідно з якою активна та реактивна потужності дорівнюють сумі, відповідно, активних та реактивних по-

тужностей окремих гармонік

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n ; Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n , \quad (4)$$

а для виконання умови ортогональності вводиться поняття потужності спотворення D як третьої складової, зумовленої гармонічними спотвореннями напруг і струмів

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 . \quad (5)$$

Поряд з класичним визначенням реактивної потужності використовують поняття реактивної потужності за С. Фрізе, яка включає в себе потужність спотворення

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} , \quad (6)$$

де $S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$ — повна потужність; $U_A, I_A; U_B, I_B; U_C, I_C$ — діючі значення напруг та струмів відповідних фаз, які за несинусоїдних напруг і струмів визначають за формулами, наприклад, для фази A

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_A^2 dt} , \quad I_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_A^2 dt} . \quad (7)$$

З (5), (6) випливає що $\sqrt{Q_F^2 - Q^2}$ за умов несинусоїдності характеризує потужність спотворення D .

Мета роботи полягає у визначенні потужності спотворення за несинусоїдності та несиметрії в трифазних електричних мережах.

Обґрунтування результатів дослідження

Розглянемо несинусоїдний несиметричний режим, який виникає в мережах живлення випрямлячів, за якого струм навантаження, крім першої гармоніки, містить п'яту та сьому гармоніки, що становлять відповідно 20 % та 14,3 % від основної гармоніки, а п'ята та сьома гармоніки напруги становлять 2 % від основної гармоніки (вказаний рівень напруги вищих гармонік відповідає відносному опору мережі, що визначається як відношення повних потужностей навантаження і короткого замикання, рівному 0,02), і одночасно напруга фази C менша на 10 % від значення напруг інших фаз.

Потужність навантаження окремих гармонік становить: $\underline{S}_1 = 1405 e^{j30^\circ} = 1217 + j702,5$ кВ·А; $\underline{S}_5 = -5,6 e^{j30^\circ} = -4,9 - j2,8$ кВ·А; $\underline{S}_7 = -4,0 e^{j30^\circ} = -3,5 - j2,0$ кВ·А. Активна та реактивна потужності навантаження з урахуванням усіх гармонік, відповідно будуть: $P \approx 1208$ кВт, $Q \approx 697,7$ квар.

На рис. 1 показано залежності миттєвих активної та реактивної потужностей p, q , які характеризуються пульсаціями протягом півперіоду зі змінним коливним процесом, що зумовлено несиметрією та несинусоїдністю. Пульсації з частотою в шість разів вищою від частоти напруги живлення зумовлені наявністю гармонічних спотворень. Обвідні цих потужностей характеризують пульсації, зумовлені несиметрією режиму за зворотною послідовністю. Амплітуда коливань реактивної потужності у цьому випадку більша від амплітуди коливань активної потужності.

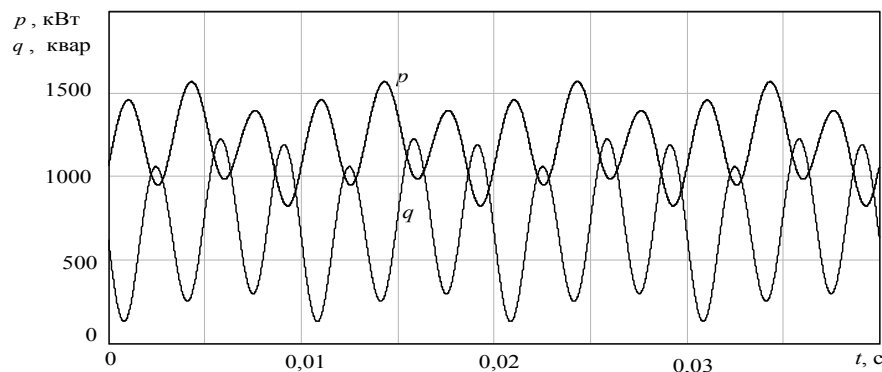


Рис. 1. Залежності миттєвих активної та реактивної потужностей за несиметрії та несинусоїдності

Для оцінювання рівня пульсацій активної та реактивної потужностей $n_p = (p - P)$; $n_q = (q - Q)$ доцільно використати середньоквадратичне значення потужностей пульсацій на періоді T напруги живлення

$$N_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_p^2(t) dt}; \quad N_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T n_q^2(t) dt}; \quad N_s = \sqrt{N_p^2 + N_q^2}. \quad (8)$$

Розраховані за формулами (8) значення потужностей пульсацій активної, реактивної та повної потужностей для цього вузла електричної мережі будуть: $N_p = 208,5$ кВт; $N_q = 338,0$ квар; $N_s = 397,2$ кВ·А.

Для визначення потужності пульсацій можна також використати поняття ефективних активної та реактивної потужностей, визначених на періоді напруги живлення:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}; \quad Q_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt}, \quad (9)$$

а також середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей на періоді напруги живлення

$$\sigma_p = \sqrt{P_e^2 - P^2}; \quad \sigma_q = \sqrt{Q_e^2 - Q^2}; \quad \sigma_s = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_q^2}. \quad (10)$$

Значення середньоквадратичних відхилень активної, реактивної та повної потужностей відповідають складникам потужності пульсацій: $\sigma_p = 208,4$ кВт; $\sigma_q = 337,9$ квар; $\sigma_s = 397,0$ кВ·А.

Пропонується потужність пульсацій подати сумою потужностей, зумовлених несинусоїдністю та несиметрією напруг і струмів за зворотною послідовністю

$$n_p = s_p + (p_2 - P_2); \quad n_q = s_q + (q_2 - Q_2), \quad (11)$$

де s_p, s_q — миттєві потужності гармонічних спотворень, відповідно, активної та реактивної потужностей; p_2, q_2 — миттєві потужності небалансу активної та реактивної потужностей, відповідно.

Складники потужності небалансу, зумовлені несиметрією напруг і струмів за зворотною послідовністю, представимо миттєвими умовними потужностями зворотної послідовності [6, 7]

$$p_2 = u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta; \quad q_2 = u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta, \quad (12)$$

де $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ — миттєві напруги та струми в системі $\alpha\beta$ -координат; штрихом позначено фазовий зсув миттєвих величин на -90 ел. градусів.

Несинусоїдний характер цих потужностей (рис. 2) свідчить про наявність комбінаційних складників, зумовлених взаємовпливом основної та вищих гармонік різних послідовностей.

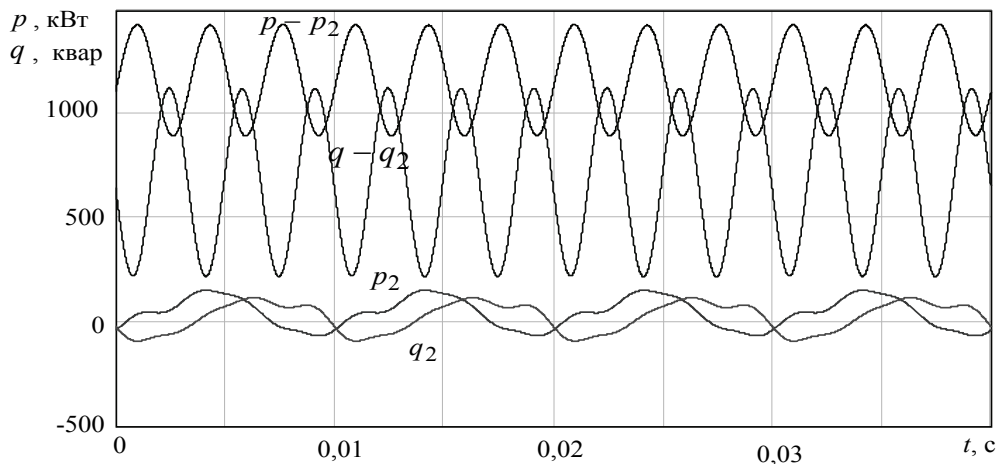


Рис. 2. Залежності миттєвих умовної потужності несиметрії та потужності спотворення

Умовні потужності зворотної послідовності визначають шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_2(t) dt; \quad Q_2 = \frac{1}{T} \int_0^T q_2(t) dt. \quad (13)$$

Після усереднення миттєвих величин для наведеного прикладу за формулами (13) отримано такі значення: $P_2 = 42$ квар, $Q_2 = 24$ квар.

З (11) випливає, що миттєві потужності гармонічних спотворень можна подати у такому вигляді:

$$s_p = n_p - (p_2 - P_2); \quad s_q = n_q - (q_2 - Q_2), \quad (14)$$

а значення потужностей спотворень можна визначити як середньоквадратичні значення їх миттєвих потужностей на періоді T напруги живлення

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_p^2(t) dt}; \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s_q^2(t) dt}. \quad (15)$$

Розраховані за формулами (15) значення потужностей гармонічних спотворень будуть: $S_p = 189,9$ кВт; $S_q = 319,5$ квар.

Складники комплексної потужності спотворення можна визначити шляхом інтегрування виділеної шостої гармоніки миттєвих потужностей гармонічних спотворень на періоді T напруги живлення [8]

$$\operatorname{Re} \underline{S}_p = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_p \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_p = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_p \cos 6\omega t dt; \quad (16)$$

$$\operatorname{Re} \underline{S}_q = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_q \sin 6\omega t dt; \quad \operatorname{Im} \underline{S}_q = \frac{1}{\sqrt{2T}} \int_0^T s_q \cos 6\omega t dt. \quad (17)$$

Комплексні значення потужностей спотворень, що визначені за миттєвими значеннями на частоті шостої гармоніки напруги, будуть: $\underline{S}_p = 189,9e^{-j14,5^\circ}$ кВт·А, $\underline{S}_q = 319,5e^{-j175^\circ}$ кВт·А.

Отже, за усіх трьох запропонованих способів оцінювання потужності гармонічних спотворень результат однаковий.

Зазначимо, що за наявності несинусоїдності та несиметрії напруг і струмів вираз $\sqrt{Q_F^2 - Q^2} = 385,4$ квар не несе інформації ні про потужність пульсацій, ні про потужність спотворень.

Висновки

Проаналізовано можливості визначення потужності спотворень в трифазних електричних мережах за умов несинусоїдності та несиметрії напруг і струмів. Введено поняття ефективних на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей, а також середньоквадратичних відхилень на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей. Показано, що для визначення потужності спотворень можна використовувати середньоквадратичні відхилення на періоді напруги живлення активної, реактивної та повної потужностей. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основы теории цепей : учебник для вузов / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов] — [5-е изд., перераб.]. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
2. Баланс энергий в электрических цепях / [И. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др.]; — К. : Наукова Думка, 1992. — 312 с.
3. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевец, Э. П. Трейманис, Я. К. Шинка. — Рига : Физ.-энерг. инст. Латв.АН, 1993. — 294 с.
4. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Г. А. Штамбергер ; под ред. К. Б. Карандеева. — Новосибирск: Наука, 1975. — 164 с.

5. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. — IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. — 379 p.
6. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 2. — С. 54—56.
7. Бурбело М. Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 4. — С. 71—75.
8. Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral // M. J. Burbelo, P. Pijarski, V. Zavadskiy, A. Koczorowska-Gazda, L. M. Melnychuk, Yu. V. Loboda // Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. — 2016. — 100311X (September 28, 2016). — Режим доступу : <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860> .

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 6. 01.17

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Лобода Юрій Васильович — асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Гадай Андрій Валентинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропостачання, e-mail: haday@meta.ua .

Луцький національний технічний університет;

Мельничук Сергій Миколайович — канд. техн. наук, інженер, e-mail: melnychuk7sm@gmail.com .

Південно-Західна електроенергетична система ДП НЕК «Укренерго»

M. Yo. Burbelo¹
A. V. Hadai²
S. M. Melnychuk³
Yu. V. Loboda¹

Determination of Load Capacity of Three-Phase Electrical Networks in Non-Sinusoidal and Unbalanced Modes

¹Vinnitsia National Technical University;

²Lutsk National Technical University;

³State Enterprise «NPC Ukrenergo» SU Southwestern Electric Power System

The article analyzes the possibility of determining the load capacity of the three-phase electrical networks in non-sinusoidal and unbalanced modes. There have been presented the concepts of effective period on the supply voltage of the active, reactive and apparent power, as well as their standard deviations. It has been shown that the latter has the power fluctuations, and those, in turn, are the sum of power unbalance and harmonic distortion. It has been proposed to determine the harmonic power to use RMS difference of capacity fluctuations and unbalance. There has been shown that the power of the distortion due to the presence of harmonics canonical enough to measure the sixth harmonic frequency of the supply voltage. Formulas for determining this power with instant facilities have been offered.

Keywords: electrical networks, non-sinusoidal and unbalanced modes, determining load capacity.

Burbelo Mykhailo Yo. — Dr. Sc (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Hadai Andrii V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electric Power Supply, e-mail: haday@meta.ua ;

Melnychuk Sergii M. — Cand. Sc. (Eng.), Engineer, e-mail: melnychuk7sm@gmail.com .

Loboda Yurii V. — Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management

М. И. Бурбело¹
А. В. Гадай²
С. Н. Мельничук³
Ю. В. Лобода¹

Определение мощностей нагрузок трехфазных электрических сетей в несинусоидальных и несимметричных режимах

¹Винницкий национальный технический университет;

²Луцкий национальный технический университет;

³ГП «НЭК «Укрэнерго» ОП Юго-Западная ЭС

Проанализирована возможность определения мощностей нагрузок трехфазных электрических сетей в несинусоидальных и несимметричных режимах. Введены понятия эффективных на периоде напряжения питания активной, реактивной и полной мощностей, а также их среднеквадратических отклонений. Показано, что последние являются мощностями пульсаций, а те, в свою очередь, — суммой мощностей небаланса и гармонических искажений. Предложено для определения мощности гармонических искажений использовать среднеквадратические значения разности мощностей пульсаций и небаланса. Показано, что мощность искажения, вызванную наличием канонических гармоник, достаточно измерять на частоте шестой гармоники напряжения питания. Предложены формулы для определения этой мощности с использованием мгновенных мощностей.

Ключевые слова: электрические сети, несинусоидальные и несимметричные режимы, определение мощностей нагрузок.

Бурбело Михаил Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Гадай Андрей Валентинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения, e-mail: haday@meta.ua ;

Мельничук Сергей Николаевич — канд. техн. наук, инженер, e-mail: melnichuk7sm@gmail.com ;

Лобода Юрий Васильевич — аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, ассистент