

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

Д. В. Філянін, канд. техн. наук., асист., ORCID 0000-0003-3576-3633
А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Наявність нелінійних навантажень і зростання числа систем розподіленої генерації електроенергії призводять до спотворення форми кривих напруги і струму в системах електропостачання, тобто до появи гармонік струму і напруги. При цьому енергосистема зобов'язана поставляти електроенергію тільки основної частоти 50Гц з постійною амплітудою. Енергопостачальні організації зазвичай знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік, вводячи стандарти або рекомендації щодо обмеження рівнів гармонійних складових в точках загального приєднання споживачів. Ці документи не враховують склад обладнання систем електропостачання і, відповідно, збитки, яких можуть завдати гармоніки мережевому обладнанню та устаткуванню споживача. Актуальність роботи обумовлена необхідністю достовірного визначення джерел гармонічних спотворень в системі електропостачання для ефективного функціонування системи штрафів і санкцій і більш ефективного визначення списку технічних заходів щодо підвищення якості електроенергії. У статті проведено огляд існуючих методів визначення джерел спотворення в системах електропостачання. Розглянуто їх основні принципи та особливості застосування.

Ключові слова: *якість електроенергії, гармоніки, джерела гармонічних спотворень, методи визначення джерел гармонічних спотворень.*

Вступ. Усі електроприймачі призначені для роботи при номінальних параметрах електричної енергії: частоті, напрузі і струмі. Тому для їх роботи має бути забезпечено необхідну якість електроенергії (ЯЕ).

Серед параметрів, що визначають ЯЕ, одне з найважливіших місць займають вищі гармоніки. Споживачі з нелінійним навантаженням перетворюють частину електроенергії синусоїдального струму в енергію несинусоїдального струму і повертають її в мережу. Ця енергія поширюється по мережах і потрапляє до інших споживачів, що призводить до економічних збитків, які в свою чергу поділяються на дві складові: електромагнітну і технологічну. За експертними оцінками значення технологічного збитку перевищує значення електромагнітного на порядок [1].

Збитки, які несуть суб'єкти процесу розподілу електричної енергії від погіршення її якості, повинні оплачуватися винуватцями. Для цього необхідно визначити джерела гармонік, оцінити ступінь участі кожного елемента електричної мережі і споживача в порушенні синусоїдальності.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження методів визначення джерел гармонічних спотворень в електричній мережі.

Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести літературний огляд основних існуючих методів визначення джерел гармонічних спотворень;
- проаналізувати особливості використання цих методів;
- по результатам оглядового дослідження зробити висновки.

Матеріал і результати досліджень. На сьогодні немає загальноприйнятого методу для виявлення винуватців порушення синусоїдальності напруги [2]. Єдиним діючим нормативним документом, який регламентує процедуру оцінки вкладу споживачів гармонічне спотворення електроенергії, є методичні вказівки [3], що затверджені Держенергонаглядом Міненерго РФ.

У джерелах [4–8] можна виділити дві групи підходів до визначення джерел гармонічних спотворень в точці загального підключення (ТЗП) [9]:

- 1) група, що базується на вимірах в ТЗП з відомим або невідомим опором мережі і споживача;

© Д. В. Філянін, А. В. Волошко, 2020

2) група, що базується на вимірах, взятих в різних точках системи електропостачання, з використанням методик оцінки стану системи [10].

Друга група підходів щодо визначення джерела гармонік використовується для системоутворюючих мереж і передбачає складні алгоритми оптимізації розташування датчиків по всій системі енергопостачання для оцінки джерел спотворень (наприклад [11]).

Розглянемо найбільш поширені методи визначення джерел гармонічних спотворень.

1. Метод включення/відключення споживача.

Метод розрахунку фактичного внеску споживача в спотворення параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) по їх зміні при його вмиканні і вимиканні описано в [12–14]. Фактичний внесок споживача (ФВС) в спотворення ПЯЕ визначається, як різниця між значеннями ПЯЕ при увімкненому і при відключеному споживачеві

$$\text{ФВС} = (\Pi_{\text{в}}^{\text{а}} - \Pi_{\text{в}}^{\text{б}})^{1/\alpha},$$

де $\Pi_{\text{в}}$ – значення ПЯЕ в точці контролю при увімкненому і працюючому в нормальному режимі споживачеві; $\Pi_{\text{в}}^{\text{б}}$ – значення ПЯЕ в точці контролю при відключеному споживачеві; α – показник ступеня, який визначається типом спотворюючого обладнання [12].

Виміри $\Pi_{\text{в}}$ рекомендовано проводити протягом тижня. Тому цей метод рекомендовано застосовувати під час приймальних випробувань, а також в умовах експлуатації для споживачів, тривале відключення яких не є проблемою. Також цей метод не враховує векторний характер параметрів схеми заміщення розподільчої мережі і, як наслідок, некоректне визначення джерел спотворень напруги [15].

2. Метод побудови залежності ПЯЕ від потужності навантаження.

Метод заснований на визначенні статистичної залежності ПЯЕ від потужності $S_{\text{нав}}$ ввімкненого обладнання споживача. Для цього за результатами тривалих вимірювань знаходиться статистична, ймовірно лінійна, залежність між зміною ПЯЕ та навантаженням споживача: $\text{ПЯЕ} = f(S_{\text{нав}})$ [16].

Отримана залежність дозволяє оцінити фактичний внесок енергосистеми, як деяку постійну величину (так званий фон системи), при потужності навантаження, що дорівнює нулю. Ця постійна величина прирівнюється вкладу системи $\text{ПЯЕ}_{\text{с}} = f(0)$ в спотворення ПЯЕ. Фактичний внесок споживача в порушення ПЯЕ визначається виразом

$$\text{ПЯЕ}_{\text{сп}} = \text{ПЯЕ}_{\text{пот}} - \text{ПЯЕ}_{\text{с}},$$

де $\text{ПЯЕ}_{\text{пот}}$ – поточне значення ПЯЕ в ТЗП.

Враховуючи, що якість електроенергії в ТЗП визначається взаємним впливом всіх приєднань, то адекватність $\text{ПЯЕ} = f(S_{\text{нав}})$, як характеристики впливу одного конкретного приєднання на ПЯЕ, буде залежати від рівня внесених завад кожного приєднання. Саме тому застосування даного методу обмежується випадками, коли інші джерела спотворень і резонансні явища в електричній мережі не роблять значного впливу на аналізований процес, а спостережуваний споживач надає домінуючий вплив на якість електроенергії в ТЗП [17].

3. Метод визначення величини і знаку потужності спотворення.

Метод оцінки впливу нелінійного навантаження на спотворення ПЯЕ за величиною і напрямком активної потужності гармонік було запропоновано в [18, 19] і отримав свій подальший розвиток в [20–23]. Вважається, що цей метод є найбільш поширеним для визначення винуватця спотворення ПЯЕ. Суть його полягає у визначенні величини і знаку спотворюючої потужності в ТЗП

$$P_h = \frac{U_{hc} I_{hc} + U_{hs} I_{hs}}{2}; \quad Q_h = \frac{U_{hc} I_{hs} - U_{hs} I_{hc}}{2},$$

де P_h, Q_h – активна та реактивна потужності h -ї гармоніки; U_{hs}, U_{hc} – синусна та косинусна складові амплітуди напруги h -ї гармоніки; I_{hs}, I_{hc} – синусна та косинусна складові амплітуди струму h -ї гармоніки.

Винуватець спотворення визначається за знаком активної потужності гармоніки P_h щодо направлення потужності першої гармоніки в ТЗП:

- $P_h > 0$, джерело спотворення знаходиться в енергосистемі;
- $P_h < 0$, джерело спотворення знаходиться у споживача.

Далі, розраховуються різноманітні індекси, що дозволяють визначити фактичний внесок джерела спотворення в порушення синусоїдальності.

Метод рекомендовано до розрахунків стандартом IEEE 1459-2010 [2].

Недоліком цього методу є відсутність обліку взаємних потоків спотворюючої потужності, що можуть виникати при наявності декількох джерел спотворення в електричній мережі [24].

4. Розрахунково-аналітичний метод.

За цим методом для визначення фактичного внеску споживача складається баланс спотворюючих потужностей для ділянки системи, яку представляють у вигляді схеми заміщення, і наводиться розрахунок системи вищих гармонік в електричній мережі [25, 26]. Метод дозволяє оцінити можливий діапазон впливу споживача, за умови, що відомі фактичні значення та фази джерел спотворення або закони їх розподілу.

В [27] представлено метод, який також відноситься до розрахунково-аналітичних. У зв'язку з різними механізмами підсумовування спотворень від різних електроприймачів, нелінійне навантаження подається у вигляді набору груп однотипних елементів. Розрахункові вирази фактичного вкладу кожного l -го споживача в спотворення кривої напруги в точці загального підключення мають вигляд:

$$K_{U(v)_{\text{факт}}}^{(l)} = \frac{100}{\sqrt{3}S_{\text{кз}}} \cdot \beta \sqrt{\sum_{j=1}^{k_l} \left(\sum_{i=1}^{M_l} S_{(\text{ннл}i)l}^{\alpha} N_{(\text{ннл}i)l} \right)^{\beta/\alpha}} v_j^{\beta(1-p)};$$

$$K_{\text{нс}U_{\text{факт}}}^{(l)} = \frac{100}{\sqrt{3}S_{\text{кз}}} \sqrt{\sum_{j=1}^{k_l} \left(\sum_{i=1}^{M_l} S_{(\text{ннл}i)l}^{\alpha} N_{(\text{ннл}i)l} \right)^{2/\alpha} \left(\sum_{v=2}^n v^{2(1-p)} \right)},$$

де $S_{(\text{ннл}i)l}$ та $N_{(\text{ннл}i)l}$ – встановлена потужність і число спотворюючого обладнання в i -й групі однотипних елементів; M_l – кількість розглянутих груп однотипних елементів; α – показник ступеня, що враховує механізм підсумовування будь-якого виду спотворення, створюваного i -ми групами однотипних елементів; k_l – число розглянутих груп різнотипних елементів [28–32]; β – показник ступеня, що характеризує механізм підсумовування будь-якого виду спотворення, створюваного різними типами обладнання [29–33]; v – порядок гармоніки; n – кількість врахованих гармонік; p – для різних типів обладнання визначають за таблицею [27]; $S_{\text{кз}}$ – потужність трифазного короткого замикання мережі в точці, де проводиться розрахунок або вимір рівнів вищих гармонік і несинусоїдальності напруги.

Розрахунково-аналітичні методи можуть бути застосовані в проектних завданнях для вирішення питань про припустимість підключення нелінійних навантажень до діючих мереж або для прогнозування можливого впливу споживача на якість електроенергії в точці його приєднання [27, 34].

5. Гібридні методи.

Сутність цих методів полягає у визначенні параметрів еквівалентного лінійного навантаження за вимірюваннями в точці загального підключення:

5.1. Метод деформуючого та недеформуючого навантаження [35].

Відповідно до цього методу вимірний струм $i(t)$ є сума недеформуючого $i_n(t)$ і деформуючого $i_d(t)$ струмів:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1));$$

$$i_d(t) = i(t) - i_n(t),$$

де U_1, I_1 – діючі значення напруги і струму першої гармоніки; θ_1, ϕ_1 – фази струму та напруги першої гармоніки; θ_k – фаза k -ї гармоніки напруги.

Вплив навантаження на спотворення напруги визначає коефіцієнт не колінеарності (%)

$$NC = \frac{I_d}{I} 100,$$

де I_d – середньоквадратичне значення спотворюючого струму $i_d(t)$; I – середньоквадратичне значення вимірюваного струму $i(t)$.

5.2. Метод спотворюючого і неспотворюючого струму [36].

Навантаження представляється у вигляді еквівалентного лінійного опору першій гармоніці

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1},$$

де U_1, I_1 – діючі значення напруги та струму першої гармоніки, що виміряні в ТЗП.

Тоді

$$R = |Z_1| \cos \varphi_1; \quad X_1 = |Z_1| \sin \varphi_1; \quad L = \frac{X_1}{2\pi f_1},$$

де R – активна складова опору навантаження; X_1 – реактивний складова опору навантаження першій гармоніці; φ_1 – різниця фаз між векторами напруги і струму першої гармоніки; f_1 – частота мережі (50Гц); L – розрахункова індуктивність навантаження.

Розрахунковий опір навантаження гармонікам

$$X_k = 2\pi k f_1 L,$$

де k – порядок гармоніки.

Припускаючи, що R не залежить від частоти і без урахування поверхневого ефекту

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X_k^2}; \quad \varphi_k = \text{tg}^{-1} \frac{X_k}{R}.$$

Струм, споживаний ідеальним лінійним навантаженням

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{|Z_k|} \sqrt{2} \sin(2\pi k f_1 t + (\theta_k - \varphi_k)),$$

де θ_k – фаза вектору напруги k -ї гармоніки; φ_k – різниця фаз між векторами напруги та струму k -ї гармоніки. Різниця між вимірним струмом та розрахунковим ідеальним струмом називається нелінійним струмом

$$i_{nL}(t) = i(t) - i_L(t),$$

де $i(t)$ – вимірний струм.

Вплив навантаження на спотворення кривої напруги визначається коефіцієнтом нелінійності (%)

$$NL = \frac{I_{nL}}{I} 100,$$

де I_{nL} – середньоквадратичне значення нелінійного струму $i_{nL}(t)$; I – середньоквадратичне значення виміряного струму $i(t)$.

В основу цих методів покладено припущення про лінійність опору навантаження всім гармонічним складовим.

6. Метод еквівалентних джерел струму.

Метод еквівалентних джерел струму було представлено в [37]. Подальший розвиток метод отримав в [38–45]. Відповідно до цього методу електрична система і споживач щодо ТЗП подаються еквівалентними джерелами струмів спотворення і опорами (рис. 1).

Фактичний внесок споживача $\underline{U}_{\text{ФВСП}}$ і системи $\underline{U}_{\text{ФВС}}$ по напрузі для схеми заміщення визначаються за виразами:

$$\underline{U}_{\text{ФВСП}} = \frac{Z_C Z_{\text{СП}}}{Z_C + Z_{\text{СП}}} I_{\text{СП}}$$

$$\underline{U}_{\text{ФВС}} = \frac{Z_C Z_{\text{СП}}}{Z_C + Z_{\text{СП}}} I_C$$

У ТЗП можна виміряти тільки I_T і U_T . Невідомими залишаються значення I_C , Z_C , $I_{\text{СП}}$, $Z_{\text{СП}}$.

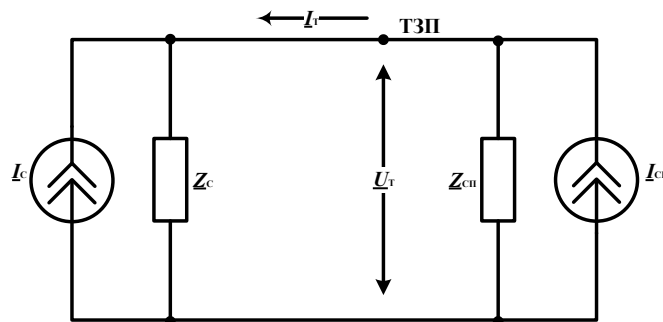


Рисунок 1. Схема заміщення системи електропостачання

Для визначення фактичного внеску застосовуються тривалі дискретні, з кроком Δt , виміри струму та напруги відносно розглянутого споживача. На кожному кроці вимірювання напруга гармонічної складової в ТЗП

$$U_T = Z_C (I_C + I_T) = Z_{\text{СП}} (I_{\text{СП}} - I_T).$$

При цьому допускається, що на етапі вимірювання величини Z_C , $Z_{\text{СП}}$ і фазовий кут основної гармоніки є незмінними. Тоді фактичний внесок в спотворення можна визначити по відношенню приросту ΔU_T і ΔI_T в ТЗП, допускаючи, що цей приріст викликаний змінами режиму або з боку енергосистеми, або з боку споживача.

При зміні струму з боку енергосистеми на величину ΔI_C відбудеться зміна струму і напруги в ТЗП на величини ΔI_T і ΔU_T , відповідно. Тоді опір лінійної частини навантаження має вигляд

$$Z_{\text{СП}} = -\frac{\Delta U_T}{\Delta I_T}.$$

Аналогічно, при зміні струму з боку споживача на величину $\Delta I_{\text{СП}}$ відбудеться зміна струму і напруги в ТЗП на величини ΔI_T і ΔU_T , відповідно. Тоді опір енергосистеми складе

$$Z_C = \frac{\Delta U_T}{\Delta I_T}.$$

Таким чином, збільшення напруги ΔU_T та струму ΔI_T на k -му інтервалі часу дозволяють визначити комплексну величину Z_k

$$Z_k = \frac{\Delta U_{Tk}}{\Delta I_{Tk}},$$

де ΔI_{Tk} – приріст струму в ТЗП на k -му інтервалі вимірювання; ΔU_{Tk} – збільшення напруги в ТЗП на k -му інтервалі вимірювання.

Дійсна частина будь-якого опору – величина позитивна. За знаком дійсної частини $\text{Re}(Z_k)$ визначається, яке з двох значень Z_C або $Z_{СП}$ знайдено на k -му кроці вимірювання

$$Z_k = \begin{cases} Z_C & \text{якщо } \text{Re}(Z_k) < 0; \\ Z_{СП} & \text{якщо } \text{Re}(Z_k) \geq 0. \end{cases}$$

Далі визначаються фактичні внески споживача і енергосистеми в спотворення напруги:

$$\begin{aligned} U_{\text{ФВСП}} &= \frac{Z_C Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}} I_{СП} = (U_T + Z_{СП} I_T) \frac{Z_C}{Z_C + Z_{СП}}; \\ U_{\text{ФВС}} &= \frac{Z_C Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}} I_C = (U_T - Z_C I_T) \frac{Z_{СП}}{Z_C + Z_{СП}}. \end{aligned}$$

Цей метод потребує мінімальну кількість вихідних даних і дозволяє визначити фактичний внесок в спотворення кривої напруги на тривалих інтервалах часу. До недоліків слід віднести неможливість визначення фактичного вкладу, коли до ТЗП підключене тільки одне джерело спотворення, та високу похибку визначення $Z_{СП}$ і Z_C при одночасній зміні струмів $I_{СП}$ і I_C .

Методи визначення джерела гармонічних спотворень, що представлено в [46–53], не знайшли широкого застосування.

Висновки:

- наявність гармонічних спотворень в системі електропостачання є актуальною проблемою, яка потребує вирішення;
- присутність вищих гармонік в електричній мережі істотно впливає на якість електропостачання;
- одним з напрямків щодо вирішення завдання підвищення якості електропостачання є визначення винуватців гармонічних спотворень;
- існують розробки низки методів визначення джерел гармонічних спотворень;
- існуючі методи визначення джерел гармонічних спотворень не дозволяють достовірно визначити всі джерела гармонік і ступінь їх участі в порушенні синусоїдальності напруги та струму.

Список використаної літератури

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г., Николаенко В. Г. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. К.: Препринт 253 ИЭД АН УССР, 1981. 48 с.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
3. РД 153-34.0-15.501-01. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. [Введ. 2003-05-01]. М.: Энергосервис, 2003. 63 с.
4. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. European Transactions on Electric Power. 1996. V. 6. № 6. P. 401–406.
5. Czarnecki L. S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. IEEE Trans. Instrum. Measur. 1990. V. 39. № 2. P. 340–345.
6. Emanuel A. E. On the Assessment of Harmonic Pollution. IEEE Transaction on Power Delivery. 1995. V. 10. № 3. P. 1693–1698.
7. Rens P. J., Swart P. H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. ETEP. 2001. V. 11. № 5. P. 317–322.
8. Swart P. H., Case M. J., Van Wyk J. D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. ETEP. 1994. V. 4. № 6. P. 485–490.
9. Herrera R. S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата звернення: 20.01.2016).
10. Heydt G. T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. IEEE Trans. On Power Delivery. 1989. V. 4. № 1. P. 569–576.
11. Beites L. F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). Cordoba, Spain, April 8–10, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата звернення: 26.10.2020).
12. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

13. Железко Ю. С. Присоединение потребителей к электрическим сетям общего назначения и договорные условия в части качества электроэнергии. Технологии электромагнитной совместимости. 2003. №1. С. 22–30.
14. Thunberg E., Söder L. A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies. IEEE Trans. On Power Delivery. 1999. V. 14. №1. P. 272–277.
15. Федосов Д. С. Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети: дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 195 с.
16. Тульский В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 134 с.
17. Саенко Ю. Л., Калужный Д. Н. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжения. Електрифікація транспорту. 2015. №9. С. 123–133
18. Cristaldi L., Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. V. 14. №3. P. 683–685.
19. Зыкин Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии. Электричество. 1992. №11. С. 13–19.
20. Chang G. W., Chen C. I., Teng Y. F. An application of radial basis function neural network for harmonics detection. 2008 Harmonics and Quality of Power 13th International Conference. Wollongong, Australia. 2008. P. 124–129
21. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
22. Xu W., Liu X., Liu Y. An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination. IEEE Trans. Power Delivery. 2003. V. 18. №1. P. 214–219.
23. Tanak T., Akagi H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits. IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. V. 10. №4. P. 1737–1742.
24. Сендерович Г. А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений. Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2011. №11(186). С. 330–335.
25. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети. Электричество. 1996. №1. С. 58–64.
26. Смирнов С. С. Вероятностный расчет уровней напряжений высших гармоник в сети 110–220 кВ, питающей крупные нелинейные нагрузки. Электричество. 2000. №10. С. 25–30.
27. Майер В. Я., Зения, Ткач А. Н. Методика определения расчетного вклада потребителя в значение показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения к энергосистеме. Электричество. 1993. №10. С. 14–18.
28. Ribeiro P. F. et all. Equipment Producing Harmonics and the Conditions Governing their Connection to the Main Power Supply. CIGRE – Electra. 1989. №123. P. 20–37.
29. Жежеленко И. Б., Рабинович М. Л., Божко В. М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К: Техніка, 1981. 160 с.
30. Липский А. М. Качество электроснабжения промышленных предприятий. К: Вища шк., 1985. 160 с.
31. Иванов В. С. Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
32. Железко Ю. С., Кордюков Е. И., Курбацкий В. Г. и др. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии. Промышленная энергетика. 1990. №11. С. 52–55.
33. Abramovich B. J. Harmonics filters for the Sellinge converter station. GEC J. Sci. Tech. 1982. V. 48. P. 35–38.
34. Башкиров О. В., Першенков П. П., Тюрин Е. А. Определение вклада потребителя в изменение показателей качества электроэнергии. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2009. Т. 2. №1. С. 77–79.
35. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. V. 11. №2. P. 1003–1012.
36. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V. G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №3. P. 1284–1290.
37. Yang H. Assessment for Harmonics Emission Level from one particular customer. University of Liege, 1992. 8 p.
38. Майер В. Я., Зения. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии. Электричество. 1994. №9. С. 19–24.

39. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети. *Электричество*. 1996. №1. С. 56–64.
40. Курбацкий В. Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. Брянск: БрГТУ, 1999. 220 с.
41. Карташев И. И., Пономаренко И. С., Сыромятников С. Ю. Определение виновника ухудшения качества электроэнергии при расчетах за электроэнергию. *АСЭМ*. 2000. №19. С. 10–12.
42. Карташев И. И., Пономаренко И. С. Определение виновника искажений напряжения путем приборного контроля качества электроэнергии. Efficiency and power quality of electrical supply of industrial enterprises: Тез. докл. Международной научной конференции. Донецк, 2000. С. 337–340.
43. Гамазин С. И., Пётрович В. А. К вопросу об определении фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии. *Электрика*. 2002. №7. С. 47–50.
44. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
45. Farhoodnea M., Mohamed Azah, Shareef H., Jabbar Khan R. A. An Improved Method for Determining Contribution of Utility and Customer Harmonic Distortions In A Power Distribution System. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2010. V. 2. №3. P. 204–215.
46. Chaoying C., Xiuling L., Koval D., Xu W., Tayjasant T. Critical Impedance Method – a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2004. V. 19. №1. P. 288–297.
47. Li C., Xu W., Tayjasant T. A “critical impedance” – based method for identifying harmonic sources. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2004. V. 19. №2. P. 671–678.
48. Fernandez F. M., Chandramohan Nair P. S. Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2013. V. 7. №4. P. 374–381.
49. Васильев И. Е., Ключев Р. В., Васильев Е. И. Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения предприятий цветной металлургии на основе активного эксперимента – включения трансформаторов на параллельную работу. Аудит и финансовый анализ. *Вычислительная техника и информатика*. 2011. №4. С. 0–4.
50. Abdullah A. R., Peng G. Z., Ghani S. A., Jopri M. H. A New Vector Draft Method for Harmonic Source Detection at Point of Common Coupling. *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*. Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia. 2014. P. 110–114.
51. Адалеев А. С., Коровкин Н. В. Метод локализации источника помехи в электрической схеме. *Известия РАН. Энергетика*. 2009. №4. С. 98–107.
52. Коровкин Н. В., Приходченко Р. В., Тухас В. А. Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2011. №1(36). С. 50–58.
53. Коровкин Н. В., Лысенко Г. С. Технология локализации источников помех в энергосистемах. *Известия РАН. Энергетика*. 2013. №2. С. 121–130.

УДК 621.311

Д. В. Филянин, канд. техн. наук., асс., ORCID 0000-0003-3576-3633
А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения, то есть к появлению гармоник тока и напряжения. При этом энергосистема обязана поставлять электроэнергию только основной частоты 50 Гц с постоянной амплитудой. Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей. Эти документы не учитывают состав оборудования системы электроснабжения и, соответственно, убытки, которые могут нанести гармоники сетевому оборудованию и оборудованию потребителя. Актуальность работы обусловлена необходимостью достоверного определения источников гармонических искажений в системах электроснабжения для эффективного функционирования системы штрафов и санкций и более эффективного определения списка технических мероприятий по повышению качества электроэнергии. В статье проведен обзор существующих методов определения источников

гармонических искажений в системах электроснабжения. Рассмотрены их основные принципы и особенности применения.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, гармоники, источники гармонических искажений, методы определения источников гармонических искажений.*

D. Filyanin, PhD, assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633

A. Voloshko, Dr. Sci., Professor

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF HARMONIC DISTORTION SOURCES IDENTIFICATION METHODS IN DISTRIBUTION SYSTEMS

The presence of non-linear loads and the increase in the number of systems of distributed generation of electricity lead to a distortion of the voltage and current waveform in distribution systems (DS), that is, to the appearance of harmonics of current and voltage. In this case, the power system is obliged to supply electricity only to the fundamental frequency of 50 Hz with constant amplitude. Power supply organizations usually disclaim responsibility for the causes of harmonics by introducing standards or recommendations for limiting the levels of harmonic components in the points of common connection of consumers. These documents do not take into account the composition of DS equipment and, accordingly, the damage from these harmonics for network equipment and consumer equipment. The urgency of the work is due to the need to reliably identify the sources of harmonic distortion in the supply system for the effective functioning of the system of penalties and fines and to more effectively determine the list of measures to improve the electric power quality. The paper reviews the existing methods for distortion sources identification in supply systems. Their basic principles and application features are considered.

Keywords: *power quality, harmonics, harmonics sources, harmonic distortion sources identification methods.*

REFERENCES

1. Shidlovsky A. K., Kuznetsov V. G., Nikolaenko V. G. Economic evaluation of the effects of reducing the power quality in modern power systems. K.: Preprint 253 IED AS Ukrainian SSR, 1981. 48 p.
2. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
3. RD 153-34.0-15.501-01. Methodological guidelines for monitoring and analysis of quality of electric energy in general purpose power supply systems. Part 2. Analysis of the power quality. [Approved 2003-05-01]. M.: Energoservice, 2003. 63 p.
4. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. European Transactions on Electric Power. 1996. V. 6. № 6. P. 401–406.
5. Czarnecki L. S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. IEEE Trans. Instrum. Measur. 1990. V. 39. № 2. P. 340–345.
6. Emanuel A. E. On the Assessment of Harmonic Pollution. IEEE Transaction on Power Delivery. 1995. V. 10. № 3. P. 1693–1698.
7. Rens P. J., Swart P. H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. ETEP. 2001. V. 11. № 5. P. 317–322.
8. Swart P. H., Case M. J., Van Wyk J. D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. ETEP. 1994. V. 4. № 6. P. 485–490.
9. Herrera R. S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J. R., Litrán S. P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата звернення: 20.01.2016).
10. Heydt G. T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. IEEE Trans. On Power Delivery. 1989. V. 4. № 1. P. 569–576.
11. Beites L. F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'14). Cordoba, Spain, April 8–10, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата звернення: 26.10.2020).
12. Zhelezko Yu. S. Power losses. Reactive power. Power Quality: A Guide to Practical Calculations. M.: ENAS, 2009. 456 p.
13. Zhelezko Yu. S. Connection of consumers to general-purpose power grids and contractual conditions in terms of power quality. Electromagnetic Compatibility Technologies. 2003. №1. P. 22–30.

14. Thunberg E., Söder L. A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies. IEEE Trans. On Power Delivery. 1999. V. 14. №1. P. 272–277.
15. Fedosov D. S. Development of a method for assessing the impact of consumers on nonsinusoidality and asymmetry of voltages in the electrical network: diss. ... PhD. Irkutsk, 2014. 195 p.
16. Tulsy V. N. Development of the methodology for detection the actual contribution in assessing the quality of electrical energy at the point of common connection: dis PhD. M., 2004. 134 p.
17. Saenko Yu. L., Kalyuzhny D. N. Analysis of methods for detection the actual contributions to the decrease of power quality by unbalance and non-sinusoidal voltage. Electrification of transport. 2015. №9. P. 123–133
18. Cristaldi L., Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1995. V. 14. №3. P. 683–685.
19. Zykin F. A. Detection of the degree of participation of loads in reducing of power quality. Electricity. 1992. №11. P. 13–19.
20. Chang G. W., Chen C. I., Teng Y. F. An application of radial basis function neural network for harmonics detection. 2008 Harmonics and Quality of Power 13th International Conference. Wollongong, Australia. 2008. P. 124–129
21. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
22. Xu W., Liu X., Liu Y. An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination. IEEE Trans. Power Delivery. 2003. V. 18. №1. P. 214–219.
23. Tanak T., Akagi H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits. IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. V. 10. №4. P. 1737–1742.
24. Senderovich G. A. Determination of the share participation of subjects in responsibility for violation of voltage balance. Scientific works of Donetsk National Technical University. 2011. №11(186). P. 330–335.
25. Smirnov S. S., Kovernikova L. I. Consumer's contribution to the voltage levels of higher harmonics in the nodes of the distribution systems. Electricity. 1996. №1. P. 58–64.
26. Smirnov S. S. Probabilistic calculation of voltage levels of higher harmonics in a 110–220 kV network feeding large nonlinear loads. Electricity. 2000. №10. P. 25–30.
27. Mayer V. Ya., Zenia, Tkach A. N. Methods for determining the estimated consumer contribution to the value of power quality indicators at the point of common connection to the power system. Electricity. 1993. №10. P. 14–18.
28. Ribeiro P. F. et all. Equipment Producing Harmonics and the Conditions Governing their Connection to the Main Power Supply. CIGRE – Electra. 1989. №123. P. 20–37.
29. Zhezhenko I.B., Rabinovich M.L., Bozhko V.M. Power quality at industrial enterprises. K: Technics, 1981. 160 p.
30. Lipsky A. M. The quality of power supply of industrial enterprises. K: K: High school., 1985. 160 p.
31. Ivanov B. C. Sokolov V. I. Modes of consumption and power quality of power supply systems of industrial enterprises. M.: Energoatomizdat, 1987. 336 p.
32. Zhelezko Yu. S., Kordyukov E. I., Kurbatskii V. G., ets. Application rules discounts and surcharges to tariffs for power quality. Industrial energy. 1990. №11. P. 52–55.
33. Abramovich B. J. Harmonics filters for the Sellenge converter station. GEC J. Sci. Tech. 1982. V. 48. P. 35–38.
34. Bashkirov O. V., Pershenkov P. P., Tyurin E. A. Detection of the consumer's contribution to the change in power quality indicators. Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality". 2009. Vol. 2. №1. P. 77–79.
35. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. V. 11. №2. P. 1003–1012.
36. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V. G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №3. P. 1284–1290.
37. Yang H. Assessment for Harmonics Emission Level from one particular customer. University of Liege, 1992. 8 p.
38. Mayer V. Ya., Zenia. Methodology for detection the share contributions of the consumer and the energy supplying organization in decrease of power quality. Electricity. 1994. №9. P. 19–24.
39. Smirnov S. S., Kovernikova L. I. Consumer's contribution to the voltage levels of higher harmonics in the nodes of the electrical network. Electricity. 1996. №1. P. 56–64.
40. Kurbatskii V.G Power quality and electromagnetic compatibility of technical equipment in power grids. Bryansk: BrSTU, 1999. 220 p.
41. Kartashev I. I., Ponomarenko I. S., Syromyatnikov S. Yu. Detection of the culprit for the decreasing of power quality in payments for electricity. EMAS. 2000. №19. P. 10–12.

42. Kartashev I. I., Ponomarenko I. S. Detection of the culprit of voltage distortions by instrumental control of power quality. Efficiency and power quality of electrical supply of industrial enterprises: Abstracts report International Scientific Conference. Donetsk, 2000. P. 337–340.
43. Gamazin S. I., Pétrovich V. A. On the question of determining the actual contribution of the consumer to the distortion of power quality parameters. Electrician. 2002. №7. C. 47–50.
44. Xu W., Liu Y. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling. IEEE Trans. on Power Delivery. 2000. V. 15. №2. P. 804–811.
45. Farhoodnea M., Mohamed Azah, Shareef H., Jabbar Khan R. A. An Improved Method for Determining Contribution of Utility and Customer Harmonic Distortions In A Power Distribution System. International Journal on Electrical Engineering and Informatics. 2010. V. 2. №3. P. 204–215.
46. Chaoying C., Xiuling L., Koval D., Xu W., Tayjasanant T. Critical Impedance Method – a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №1. P. 288–297.
47. Li C., Xu W., Tayjasanant T. A “critical impedance” – based method for identifying harmonic sources. IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. V. 19. №2. P. 671–678.
48. Fernandez F. M., Chandramohan Nair P. S. Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling. IET Generation, Transmission & Distribution. 2013. V. 7. №4. P. 374–381.
49. Vasiliev I. E., Klyuev R. V., Vasiliev E. I. Detection of the actual contribution of the consumer and the system to the non-sinusoidality voltage of non-ferrous metallurgy enterprises on the basis of an active experiment - connecting transformers for parallel operation. Audit and financial analysis. Computer Science and Informatics. 2011. №4. P. 0–4.
50. Abdullah A. R., Peng G. Z., Ghani S. A., Jopri M. H. A New Vector Draft Method for Harmonic Source Detection at Point of Common Coupling. IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014). Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia. 2014. P. 110–114.
51. Adaleev A. S., Korovkin N. V. Method of localization of the source of interference in the electrical circuit. Izvestiya RAN. Energetics. 2009. №4. P. 98–107.
52. Korovkin N. V., Prihodchenko R. V., Tukhas V. A. Problems of searching a source of interference in general-purpose power grids. Electromagnetic Compatibility Technologies. 2011. №1(36). P. 50–58.
53. Korovkin N.V., Lysenko G.S. Technology of localization of sources of interference in power systems. Izvestiya RAN. Energetics. 2013. №2. P. 121–130.

Надійшла 28.06.2020
Received 28.06.2020