

СИГНАТУРА ДВОФАЗНИХ НЕБАЛАНСНИХ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В статті запропоновано підхід до ідентифікації двофазних небалансних провалів напруги в трифазній електричній мережі. На першому етапі, за рахунок застосування вейвлет-перетворення до сигналу напруги електричної мережі, визначається наявність спотворення якості електричної енергії, його тривалість та час його початку та закінчення. На другому етапі проводиться аналіз сигнатури векторів напруги в комплексній площині за методологією просторового вектору та напруги нульової послідовності. Сигнатура просторового вектору складається з позитивних та негативних векторів кутової частоти, а потім слідує за еліпсом у комплексній площині. Показано, що різні типи провалів ідентифікуються за допомогою характеристик еліпсу та напруги нульової послідовності. Досліджено вплив глибини провалу напруги на характеристики просторового вектору для провалів напруги типу C, E, G.

Ключові слова: *якість електричної енергії, двофазні провали напруги, просторовий вектор.*

Вступ. Якість електричної енергії (ЯЕЕ) – це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначення. Відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), «... параметри ЯЕЕ в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2014: Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (далі – ДСТУ EN 50160:2014)» [1].

Насичення різного роду пристроїв силової електроніки в Енергосистемі призводить до необхідності впровадження методів та засобів не тільки виявлення наявності спотворень, а і ліквідації їх впливу на електрообладнання.

Одним із параметрів ЯЕЕ є провали напруги, які мають найбільший вплив на таке обладнання. Для підтримання показників ЯЕЕ (провалів напруги) належного рівня необхідне впровадження системи їх моніторингу, яка б включала в собі методи їх виявлення, ідентифікації та класифікації. Завдяки своєчасній ідентифікації провалів напруги обслуговуючий персонал отримує інформацію про причини провалу, місце несправності в електричній мережі.

Огляд наукових досліджень. Проведений огляд наукових публікацій для визначення наявності спотворень ЯЕЕ показав наступне. Використання скритих марківських моделей потребує знання статистичних властивостей сигналів. Метод опорних векторів використовується в основному для вирішення задач класифікації та регресійного аналізу, а нейромережеві експертні системи, зазвичай, призначені для розв'язання задач діагностики та прогнозування. При цьому слід враховувати, що навчання та перенавчання штучних нейронних мереж є багатопараметричною задачею нелінійної оптимізації та вимагає багато часу [2 – 6].

Відносно провалів напруги розглядалися наступні методи: швидке перетворення Фурє, метод фазового автопідстроювання частоти (PLL), техніка векторного керування (SPLL), метод подачі пікового значення та метод вейвлетного перетворення (WT) [9], [10]. Оцінка кожного методу базувалася на швидкості виявлення провалу (його тривалості) та точності визначення його глибини. Враховувалась також вартість реалізації та складність кожного методу [7 – 12]. Застосування одного із зазначених методів для виявлення наявності провалів напруги, обчислення їх початку та закінчення (тривалості) та ідентифікації типу провалу є недостатньо ефективним. Тобто, необхідна розробка нового методу, або модифікація існуючих.

Мета та завдання дослідження. Розробка модифікованого методу виявлення та ідентифікації типів провалу напруги з розрахунком їх основних характеристик.

Матеріал і результати досліджень. Модифікований метод виявлення та ідентифікації складається із двох етапів. На першому етапі за допомогою методу вейвлет-перетворення напруги електричної мережі [13] визначається наявність провалу напруги, час його початку та закінчення. Ідентифікація типу провалу проводиться на другому етапі за методологією просторового вектору (методу Кларка) [14]. Даний метод використовується для спрощення розрахунків у трифазних електричних мережах. Перетворення Кларка –

це перехід від трифазної системи електричної мережі в двофазну. Тобто, миттєве значення трьох фаз представляється вектором напруги або струму. Потім даний вектор представляється в ортогональному стаціонарному відліку. Вектор напруги складається із двох векторів, один з яких обертається в прямому напрямку (1), а інший – в зворотному напрямку (2) [14]:

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(U_A - \frac{1}{2} U_B - \frac{1}{2} U_C \right) \quad (1)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} U_B - \frac{\sqrt{3}}{2} U_C \right) \quad (2)$$

Для незбалансованих електричних мереж обчислюється додатково іще напруга нульової послідовності:

$$U_{\gamma} = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} U_A + \frac{1}{2} U_B + \frac{1}{2} U_C \right) \quad (3)$$

Двофазні провали напруги в трифазних електричних мережах. До даних типів провалів напруги відносяться провали типу С, Е, Г.

Провал типу С. Провал типу С призводить до того, що дві фазні напруги змінюються лише вздовж уявної осі (як за величиною, так і за кутом).

На рис. 1 представлений провал типу С з рівняннями напруг та векторною діаграмою.

$$u_A(t) = U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$u_B(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)\right)$$

$$u_C(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)\right)$$

$$R_{\max} = U, r_{\min} = (1-h) \cdot U$$

а

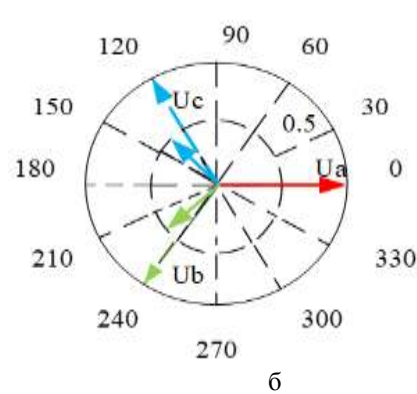


Рисунок 1 - Тип провалу напруги С: а – рівняння напруг; б – векторна діаграма, $h = 0,5$

Провал типу Е. Провал типу Е – це двофазне замикання яке виникає при навантаженні що підключається, так званим, шлейфом. Характеризується провалами напруги у двох фазах та наявністю напруги нульової послідовності.

Провал типу Г. Тип провалу напруги Г – це двофазне замикання (виникає через навантаження, підключене через незаземлений трансформатор, видаляючи компонент нульової послідовності). Характеризується наявністю провалів у всіх трьох фазах.

Проведемо дослідження залежності просторового вектору (його характеристик) від типу провалу та для різних фаз даного провалу (двофазні типи провалів напруги С, Е, F).

Як слідує із рис. 3, мала вісь еліпса залежить від глибини провалу напруги при $h = 0.85$ значення $r_{\min} = 0.15$, а при $h = 0.2$ значення $r_{\min} = 0.8$ для всіх фаз. Кут нахилу еліпса фази А – $\Theta_A = 0^\circ$, фази В – $\Theta_B = -60^\circ$ і фази С – $\Theta_C = -120^\circ$. Із рис. 3 ясно слідує, що R_{\max} для всіх фаз електричної мережі залежить від глибини провалу напруги.

Як слідує із рис. 4, мала вісь еліпса залежить від глибини провалу напруги при $h = 0.85$ значення $r_{\min} = 0.15$, а при $h = 0.2$ значення $r_{\min} = 0.8$ для всіх фаз. Кут нахилу еліпса фази А – $\Theta_A = 0^\circ$, фази В – $\Theta_B = -60^\circ$ і фази С – $\Theta_C = -120^\circ$. Із рис. 4 ясно слідує, що R_{\max} для всіх фаз електричної мережі залежить від глибини провалу напруги.

Результати проведених досліджень залежності характеристик просторового вектору від глибини провалів напруги двофазних небалансних провалів напруги в електричній мережі показали наступне.

Три типи двофазних провалів напруги в електричній мережі (С, Е, G) можна ідентифікувати завдяки двом параметрам:

- напруга нульової послідовності, яка дорівнює $u_0(t) = \frac{h}{3} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ для провалу типу Е і $u_0(t) = 0$ для провалів типу С і G;

• велика вісь еліпса, $R_{\max} = U_{\text{ном}}$ для провалу типу С і $R_{\max} < U_{\text{ном}}$ для двох інших типів провалу напруги – Е, G.

Провал напруги типу С (рис. 2).

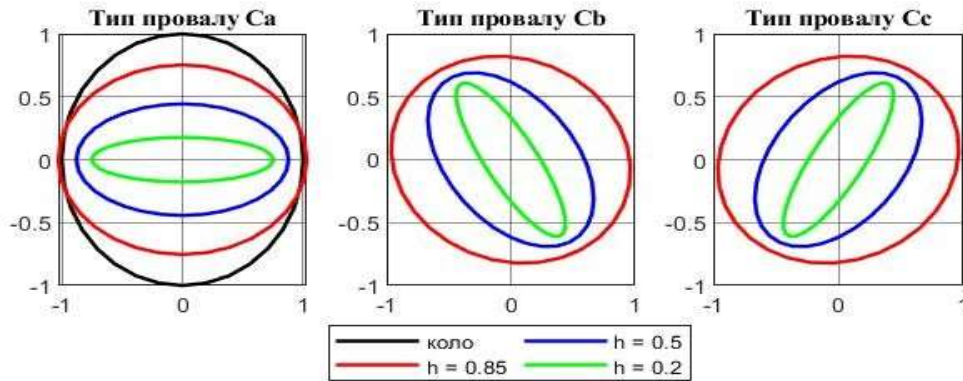


Рисунок 2 - Залежність характеристик просторового вектору провалу типу С від значення глибини провалу

Провал напруги типу Е (рис. 3).

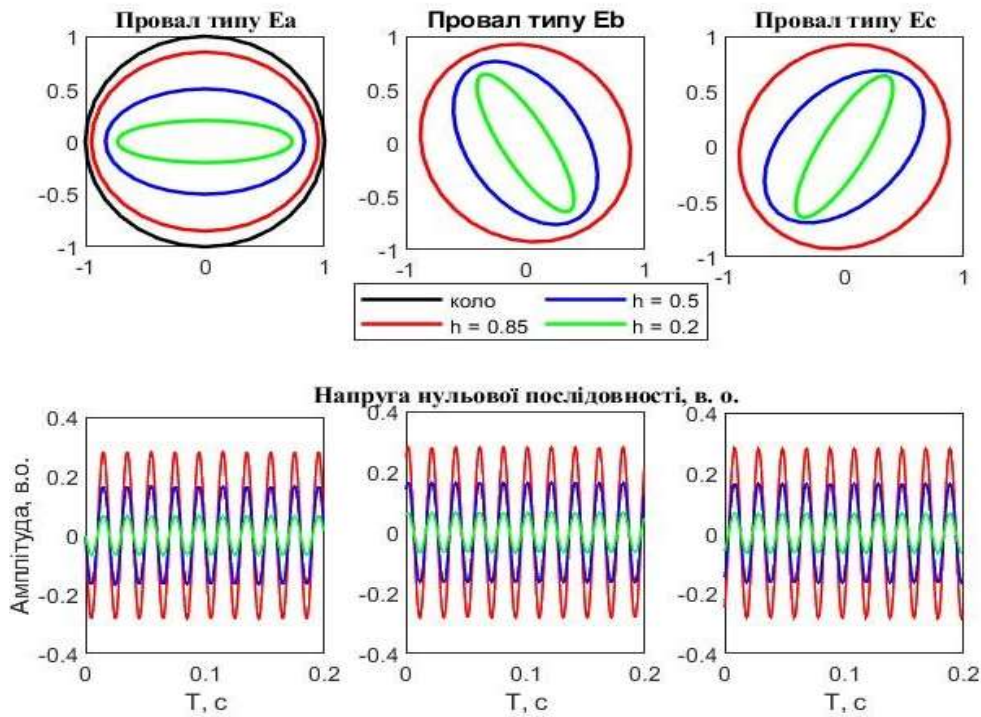


Рисунок 3 - Просторові вектори провалу типу Е: E_a – фаза А, E_b – фаза В, E_c – фаза С

Провал напруги типу G (рис. 4).

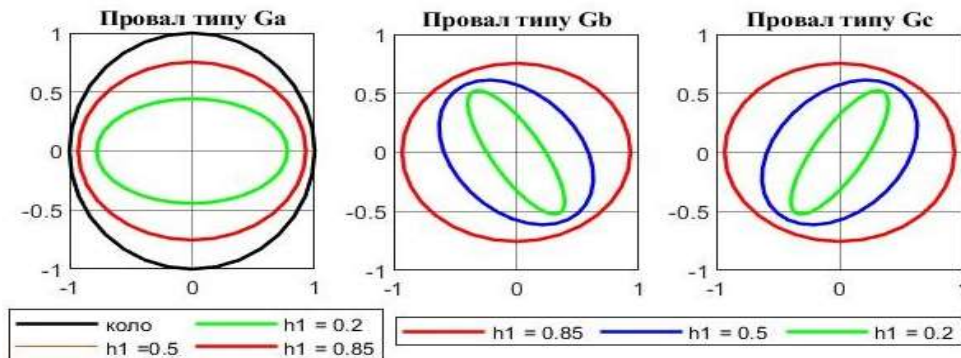


Рисунок 4 - Просторові вектори провалу типу G: G_a – фаза А, G_b – фаза В, G_c – фаза С

Висновки:

1. Для двофазних провалів напруги типу C та G перемінна h є функцією зсуву фазового кута та падіння фаз напруги в місці несправності. Що означає невірне відображення глибини провалу.
2. Для невеликих значень провалів напруги можна враховувати значення h тотожно глибині провалу.
3. Просторовий вектор і напруга нульової послідовності можуть бути застосовані для ідентифікації провалів напруги. Крім того, можна відзначити, що малу вісь еліпса r_{\min} і величину напруги нульової послідовності можна використовувати для виявлення виникнення провалу напруги (мала вісь еліпса менша за номінальну напруги для всіх типів провалів від A до G).
4. Просторовий вектор і напруга нульової послідовності також можуть використовуватися для сегментації записаних форм сигналу напруги та визначення області часу падіння. Вони також можуть бути корисними для оцінки тяжкості провалу напруги, оскільки вони безпосередньо залежать від глибини провалу h .

Список використаної літератури

1. ДСТУ EN 50160:2014 “Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності” (EN 50160:2010, IDT).
2. Zwe-Lee Gaing. “Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 19, № 4, pp. 1560–1567, 2004.
3. Emmanouil Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. “Expert system for classification and analysis of Power system events”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 17, № 2, pp. 423–428, 2002.
4. B. Bizjak, P. Planinsic. “Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic”, *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1356–1360, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778591>
5. P. G. V. Axelberg; I. Y.-H. Gu; M. H. J. Bollen. “Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, № 3, pp. 1297–1303, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900065>
6. P. Janik, T. Lobos. “Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 21, № 3, pp. 1663–1669, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874114>
7. M. V. K. Perera, *Control of a Dynamic Voltage Restorer to Compensate Single Phase Voltage Sags*, Stockholm University, 2007.
8. C. Fitzer, M. Barnes and P. Green, “Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan./Feb. 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821801>
9. V. A. Skolota & G. S. Zinovev, “Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag”, *IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, pp. 606–611, 2018.
10. J. R. Camarillo-Peñaranda and G. Ramos, “Characterization of voltage sags due to faults in radial systems using three-phase voltage ellipse parameters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2032–2040, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101878>
11. J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, “Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at medium voltage level”, *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806–813, May 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826504>
12. A. R. Diwan, K. M. Abdulhassan, F. M. Alnahwi. “A Fast and Accurate Method for Power System Voltage Sag Detection”, *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 16, Issue 1, pp. 78–84. June 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.37917/ijeee.16.1.10>
13. Волошко А. В. “Узагальнений ідентифікатор наявності спотворень якості електричної енергії”, *Технічна електродинаміка*, 2022, №6, с. 72–76, 2022. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.072>
14. V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha. “Space vector method for voltage dips and swells analysis”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 2054–2061, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028787>

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0009-0004-2113-3600

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3576-3633

K. Liakhova¹, student

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF ASCA TO SOLVE THE PROBLEMS OF HARMONIC DISTORTIONS SOURCES IDENTIFICATION

The article proposes an approach to identifying two-phase unbalanced voltage sags in a three-phase electrical network. At the first stage, by applying wavelet transform to the electrical network voltage signal, the presence of electrical energy quality distortion, its duration and the time of its beginning and end are determined. At the second stage, the signature of voltage vectors in the complex plane is analyzed using the methodology of the space vector and zero-sequence voltage. The space vector signature consists of positive and negative angular frequency vectors, and then follows an ellipse in the complex plane. It is shown that different types of sags are identified using the characteristics of the ellipse and zero-sequence voltage. The influence of the voltage dip depth on the characteristics of the space vector for voltage sags of types C, E, G is studied.

Keywords: power quality, two-phase voltage sags, spatial vector.

References

1. ДСТУ EN 50160:2014 "Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності" (EN 50160:2010, IDT).
2. Zwe-Lee Gaing. "Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 19, № 4, pp. 1560–1567, 2004.
3. Emmanouil Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. "Expert system for classification and analysis of Power system events", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 17, № 2, pp. 423–428, 2002.
4. B. Bizjak, P. Planinsic. "Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic", *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1356–1360, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778591>
5. P. G. V. Axelberg; I. Y.-H. Gu; M. H. J. Bollen. "Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, № 3, pp. 1297–1303, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900065>
6. P. Janik, T. Lobos. "Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 21, № 3, pp. 1663–1669, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874114>
7. M. V. K. Perera, *Control of a Dynamic Voltage Restorer to Compensate Single Phase Voltage Sags*, Stockholm University, 2007.
8. C. Fitzer, M. Barnes and P. Green, "Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan./Feb. 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821801>
9. V. A. Skolota & G. S. Zinovev, "Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag", *IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, pp. 606–611, 2018.
10. J. R. Camarillo-Peñaranda and G. Ramos, "Characterization of voltage sags due to faults in radial systems using three-phase voltage ellipse parameters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2032–2040, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101878>
11. J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, "Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at medium voltage level", *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806–813, May 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826504>
12. A. R. Diwan, K. M. Abdulhassan, F. M. Alnahwi. "A Fast and Accurate Method for Power System Voltage Sag Detection", *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 16, Issue 1, pp. 78–84. June 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.37917/ijeee.16.1.10>
13. A.V. Voloshko. "Generalized identifier of the presence of distortions of quality of electricity", *Technical Electrodynamics*, 2022, №6, pp. 72–76, 2022. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.072>
14. V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha. "Space vector method for voltage dips and swells analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 2054–2061, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028787>

Надійшла: 08.12.2024

Received: 08.12.2024