

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ОДНОФАЗНИХ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ ЗА МЕТОДОЛОГІЄЮ ПРОСТОРОВОГО ВЕКТОРУ КУТОВОЇ ЧАСТОТИ

Представлено новий метод ідентифікації та класифікації провалів напруги в трифазній електричній мережі. Метод заснований на представленні напруг електричної мережі однією комплексною змінною – просторовим вектором кутової частоти. Основними характеристиками просторового вектору, які використовуються для ідентифікації та класифікації провалів, є велика та мала напівосі, кут повороту сформованого еліпсу. Для збалансованих провалів просторовий вектор прямує по колу в комплексній площині з радіусом рівним напрузі. Для незбалансованих провалів просторовий вектор є еліпсом із параметрами, що залежать від фази падіння напруги, величини провалу та зсуву фазового кута.

Даний метод вводить новий рівень точності та надійності при аналізі та класифікації провалів напруги, створюючи його інструментом для покращення якості електропостачання та підвищення стабільності електричних систем. Застосування цього методу може сприяти зменшенню впливу незапланованих перерв у подачі електроенергії на підприємство та вдома, що стає ключовим завданням у сучасному електроенергетичному секторі.

Ключові слова: провали напруги, перевищення напруги, просторовий вектор кутової частоти, рівень напруги, якість електричної напруги, метод Кларка.

Вступ. Насичення протягом останніх років промислових підприємств потужним обладнанням, нелінійними навантаженнями, засобами відновлювальної енергетики, стають більш чутливими до провалів напруги в результаті удосконалення технології та збільшення використання пристроїв силової електроніки [1]. Таким чином, автоматизована ідентифікація, визначення характеристик провалів напруги стає актуальною вимогою для моніторингу якості електричної енергії.

Дослідження щодо ідентифікації та класифікації однофазних провалів напруги за методологією просторового вектора кутової частоти є дуже актуальним для ефективного управління електрообладнанням та мережами на промислових об'єктах. Ці дослідження допомагають забезпечити надійність електропостачання, підвищити ефективність обслуговування, зменшити витрати та ризики, а також підвищити якість електропостачання. Крім того, вони можуть ефективно вирішувати екстрені ситуації, такі як короткі замкнення або випадкові надзвичайні ситуації.

Для визначення типів провалу, їх класифікації в науковій літературі запропоновано ряд методів. Найбільш зрозумілим і простим підходом є безпосереднє використання вимірних форм сигналів напруги для класифікації провалів напруги [2]. Метод простий, але з його допомогою не можна виділити характеристики вимірювання провалів, в зв'язку з чим він не підходить для автоматизованого аналізу провалів напруги.

Також запропоновано метод класифікації провалів напруг SCA [3] на основі аналізу симетричних компонентів, який базується на розкладанні трифазних напруг на симетричні компоненти. З використанням напруг прямої та зворотної сторони збільшується загальна величина подій, а також інша характеристика, яка серед інших аспектів впливає на навантаження на напругу. Даний метод не дає інформації про фазу та не може забезпечити повну характеристику провалу, що не дає можливості для проведення його класифікації. В [4] пропонується новий алгоритм для класифікації провалів напруги на основі попередньо визначених моделей. Алгоритм розроблений для критерію класифікації ABC і, на відміну від інших алгоритмів, що базуються на цьому ж критерії, він базується на адаптивних порогах класифікації, що дозволяє зменшити помилки класифікації за наявності змін у параметрах електричної мережі (імпеданс, попередня несправність, напруга, тощо).

В оглядових роботах [5 - 6] методів класифікації провалів напруги відзначається, що застосування даних методів проблематично за наявності різних збурень. Таких як фазові стрибки та повороти фаз через різні характеристики повного опору електричної мережі, а також повного опору навантаження. Також великий вплив має використання довільних порогів класифікації, коли передаварійна напруга відрізняється від номінального значення

Мета роботи. Розробка методу ідентифікації та класифікації провалів напруги в трифазній електричній мережі для системи автоматизованого моніторингу якості електричної енергії.

Результати досліджень. Останнім часом широке застосування до аналізу якісних параметрів режимів електроспоживання набули так звані методи формування просторового вектору [7]. Основна їх ідея полягає в переході трифазної симетричної системи до двофазної, або, точніше, до однофазної системи з двома проєкціями α - β для трьох основних ліній і додатково нульова складова 0 (її також позначають як « γ ») для чотирьохпроводних. Як зазначено в роботі [8], зв'язок між трифазною симетричною системою A - B - C і системою α - β встановлюється за умови, що вісь α розташована на векторі фази A , а вісь β розташована перпендикулярно до α , спрямованому до вектору фази B .

Проєкції кожного вектору на вісь підсумовуються з урахуванням напрямку:

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

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(0U_A - \frac{\sqrt{3}}{2}U_B - \frac{\sqrt{3}}{2}U_C \right) \quad (2)$$

Нульовий компонент в системі α - β -0 обчислюється так само, як нульова послідовність у системі 1-2-0, тобто:

$$U_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2}U_A - \frac{1}{2}U_B - \frac{1}{2}U_C \right) \quad (3)$$

Проєкції кожного вектору в системі α - β -0 буде мати наступний вигляд:

$$U_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0}^{abc} U_{abc} \rightarrow \begin{bmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

З точки зору першої гармоніки, три системні напруги можна розглядати як синусоїдальні величини до, під час і після несправності. Згідно з цим припущенням і використовуючи формулу Ейлера, їх можна представити у вигляді суми двох векторів, що обертаються протилежно, з кутовою частотою ω [3, 9].

$$u_a(t) = U \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \frac{U}{2} (e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)}) \quad (5)$$

Просторовий вектор виводиться з попередніх напруг і отже, описується як сума позитивних і негативних векторів кутової частоти, які представляють собою комплексні величини.

Основними характеристиками простого вектору, які використовуються для ідентифікації та класифікації провалів та коротких замикань, є велика R_{max} та мала R_{min} напівосі, кут повороту сформованого еліпсу θ . Для збалансованих провалів просторовий вектор складається тільки з додатного вектору кутової частоти і слідує по колу в комплексній площині з радіусом рівним напрузі (рис. 1, крива 1). Для незбалансованих провалів просторовий вектор є еліпсом із параметрами, що залежать від фази падіння напруги, величини провалу та зсуву фазового кута (рис. 1, крива 2).



Рисунок 1 - Просторовий вектор трифазної системи з наявністю однофазної несправності де Бета (β) – уявна вісь Im , Альфа (α) – дійсна вісь Re , кут просторового вектору θ - кут нахилу еліпса

Розглянемо ідентифікацію та класифікацію незбалансованих типів провалів на прикладі провалу напруги в одній фазі (однофазний провал). Як слідує із попередніх досліджень, сигнатура (унікальний ідентифікатор) провалів напруги залежить від кількох параметрів: місця пошкодження та вимірювання, заземлення мережі та трансформаторів і типу вимірювань (фаза-фаза або фаза-нейтраль). Існує три типи однофазних провалів, які позначаються відповідно літерами B , D та F [10].

Розглянемо просторові вектори однофазного провалу типу *B*, фази *A*, *B* та *C*. Щоб розрізнити різні типи незбалансованих провалів напруги, використовуємо параметри еліпса (R_{max} , R_{min}) і напругу нульової послідовності.

Для провалу напруги типу *B*, фази *A* трифазна система напруги буде симетричною із зменшеною амплітудою у фазі *A* на величину провалу $-h$ ($0 \leq h \leq 1$).

$$u_A(t) = h \cdot U \cos(\omega t + \varphi) \tag{6}$$

При цьому, R_{min} для еліпса визначається як, $R_{min} = \left(1 - \frac{2}{3}h\right) \cdot U$, а для кола $R_{min} = U$. Напруга нульової послідовності для даного типу провалу обчислюється наступним чином:

$$u_0(t) = \frac{h}{3} \cos\left(\omega t + \varphi - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) \tag{7}$$

де n – фаза в якій відбувається провал напруги ($n=1, 2, 3$ для трифазної системи)

На рисунках 2,а; 2,б та 2,в представлені трифазні симетричні системи фазних напруг та відповідні просторові вектори кутової частоти.

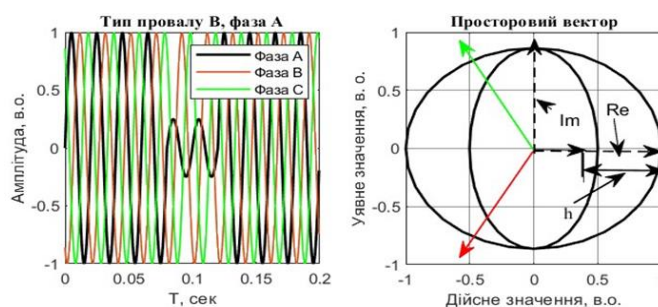


Рисунок 2,а – просторовий вектор однофазного провалу типу *B*, фаза *A*

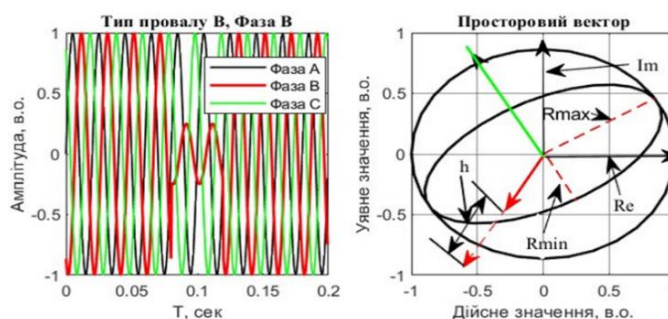


Рисунок 2,б – просторовий вектор однофазного провалу типу *B*, фаза *B*

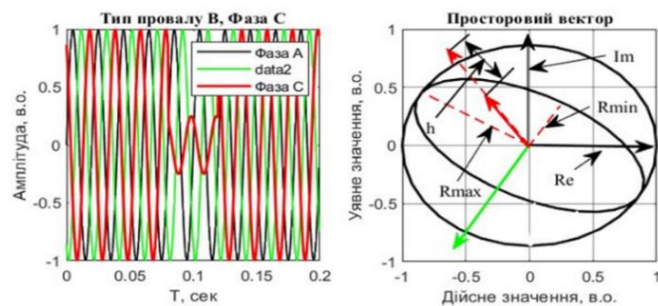


Рисунок 2,в – просторовий вектор однофазного провалу типу *B*, фаза *C*

В загальному вигляді кут нахилу еліпса для однофазних провалів в трифазній електричній мережі визначається наступним чином

$$\theta = \frac{5\pi}{6} - \alpha \frac{\pi}{3} \quad (8)$$

Тобто, для провалу фази А $\theta_A = \frac{\pi}{2}$, фази В $\theta_B = \frac{\pi}{6}$, фази С $\theta_C = \frac{5\pi}{6}$.

Як слідує із аналізу досліджень (рис.2), ідентифікація та класифікація провалу типу В в залежності від фази, відбувається за допомогою обчислення напруги нульової послідовності та великої вісі еліпса ($2 \cdot R_{max}$).

Висновки

- Запропонований в роботі метод ідентифікації та класифікації однофазних провалів в трифазній електричній мережі, на відміну від інших відомих методів, базується на обчисленні характеристик просторового вектору: кутової частоти та напруги нульової послідовності.

- Дослідження показали, що даний метод у поєднанні додатковими методами визначення параметрів якості електричної енергії може бути використаний для моніторингу якості електричної енергії в реальному часі.

- У окремому випадку провалів із зростанням напруги в непошкодженій фазі (фазах) просторовий вектор прямує по колу в комплексній площині з радіусом, рівним номінальній напрузі, як у випадку непошкоджених систем. У цьому випадку для аналізу провалів напруги використовується лише напруга послідовності.

-

Список використаної літератури

1. М.В. Суржиков, «Підвищення точності визначення показників якості електричної енергії», магістерська робота, Електронний ресурс. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27348/1/Surzhykov_magistr.pdf. (DOI - 621.314)

2. О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович, П.Г. Щербакова, Х. Яров, «Автоматичне визначення положення джерела провалу напруги». Електронний ресурс. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3bf42e02-76e1-4599-9d65-dfa0c58559de/content>.

3. Ignatova, Vanya, Pierre Granjon, and Seddik Bacha. "Space Vector Method for Voltage Dips and Swells Analysis." IEEE Transactions on Power Delivery 24, no. 4 (October 2009): pp. 2054 - 2061. <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2009.2028787>.

4. Leake Enquay Weldemariam, Vladimir Cuk, Sjeff Cobben. «Regulation and classification of voltage dips». CIREN - Open Access Proceedings Journal 2017 (1) Vol. 2017, Iss. 1, pp. 832-836. DOI:10.1049/oap-cired.2017.0734.

5. Jorge L. Strack, Ignacio Carugati, Carlos M. Orallo, Sebastián O. Maestri, Patricio G. Donato, Marcos A. Funes. Three-phase voltage events classification algorithm based on an adaptive threshold. Electric Power Systems Research Volume 172, July 2019, Pages 167-176. (doi - 10.1016/j.epsr.2019.03.012)

6. M.H.J. Bollen, L.D. Zhang. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. Electric Power Systems Research Volume 66, Issue 1, July 2003, Pages 59-69 (doi-10.1016/S0378-7796(03)00072-5)

7. Ali Asif Malak, Ghulam Mustafa Bhutto, Mohsin Ali Koonthar. Mathematical Analysis of Voltage Dip propagation in CIGRE Low Voltage Distribution Test Network. Journal of Applied and Emerging Science. 2020. Vol (10). Issue (02). Pp. 109 – 116. (DOI - 10.36785/BUITEMS.JAES.401).

8. Lucien Duclos Ndoumbe, Samuel Eke, Charles Hubert Kom, Aurélien Tamtsia Yeremou, Arnaud Nanfak, Gildas Martial Ngaleu. Power Quality Problems, Signature Method for Voltage Dips and Swells Detection, Classification and Characterization. European Journal of Electrical Engineering Vol. 23, No. 3, June, 2021, pp. 185-195. (DOI:10.18280/ejee.230303).

9. Bollen, M.H., Zhang, L.D. (2003). Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. Electric Power Systems Research, 66(1): 59-69. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00072-5). (DOI:10.1016/S0378-7796(03)00072-5)

10. M. McGranaghan; D. Mueller; M. Samotyj, Voltage sags in industrial systems, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 29, No.2, pp. 397-403, March/April 1993 (DOI:10.24084/repqj03.278).

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-6867-2060

V. Shevchuk¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0003-0535-2630

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

IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF SINGLE-PHASE VOLTAGE DIPS USING THE METHODOLOGY OF THE SPATIAL VECTOR OF ANGULAR FREQUENCY

A new method of identification and classification of voltage dips in a three-phase electric network is presented. The method is based on the representation of voltages of the electrical network by one complex variable - a spatial vector of the angular frequency. The main characteristics of the spatial vector, which are used to identify and classify dips, are the major and minor semi-axes, the angle of rotation of the formed ellipse. For balanced dips, the space vector goes in a circle in the complex plane with a radius equal to the voltage. For unbalanced dips, the spatial vector is an ellipse with parameters that depend on the phase of the voltage drop, the magnitude of the dip, and the phase angle shift.

This method introduces a new level of accuracy and reliability in the analysis and classification of voltage dips, making it a tool for improving the quality of power supply and increasing the stability of electrical systems. The use of this method can help reduce the impact of unplanned interruptions in the supply of electricity to the enterprise and home, which is becoming a key task in the modern electricity sector.

Keywords: *voltage dips, voltage overvoltage, spatial vector of angular frequency, voltage level, quality of electric voltage, Clarke's method.*

References

1. M.V. Surzhikov, "Increasing the accuracy of determining the quality indicators of electric energy", master's thesis, electronic resource. Access mode: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27348/1/Surzhikov_magistr.pdf. (DOI - 621.314)
2. O.G. Hryb, G.A. Senderovych, P.G. Shcherbakova, H. Yarov, "Automatic determination of the position of the voltage drop source". Electronic resource. Access mode: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3bf42e02-76e1-4599-9d65-dfa0c58559de/content>.
3. Ignatova, Vanya, Pierre Granjon, and Seddik Bacha. "Space Vector Method for Voltage Dips and Swells Analysis." *IEEE Transactions on Power Delivery* 24, no. 4 (October 2009): pp. 2054 - 2061. <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2009.2028787>.
4. Leake Enquay Weldemariam, Vladimir Cuk, Sjeff Cobben. «Regulation and classification of voltage dips». *CIREN - Open Access Proceedings Journal* 2017 (1) Vol. 2017, Iss. 1, pp. 832–836. DOI:10.1049/oap-cired.2017.0734.
5. Jorge L. Strack, Ignacio Carugati, Carlos M. Orallo, Sebastián O. Maestri, Patricio G. Donato, Marcos A. Funes. Three-phase voltage events classification algorithm based on an adaptive threshold. *Electric Power Systems Research* Volume 172, July 2019, Pages 167-176. (doi - 10.1016/j.epsr.2019.03.012)
6. M.H.J. Bollen, L.D. Zhang. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. *Electric Power Systems Research* Volume 66, Issue 1, July 2003, Pages 59-69 (doi-10.1016/S0378-7796(03)00072-5)
7. Ali Asif Malak, Ghulam Mustafa Bhutto, Mohsin Ali Koondhar. Mathematical Analysis of Voltage Dip propagation in CIGRE Low Voltage Distribution Test Network. *Journal of Applied and Emerging Science*. 2020. Vol (10). Issue (02). Pp. 109 – 116. (DOI - 10.36785/BUITEMS.JAES.401).
8. Lucien Duclos Ndoumbe, Samuel Eke, Charles Hubert Kom, Aurélien Tamtsia Yeremou, Arnaud Nanfak, Gildas Martial Ngaleu. Power Quality Problems, Signature Method for Voltage Dips and Swells Detection, Classification and Characterization. *European Journal of Electrical Engineering* Vol. 23, No. 3, June, 2021, pp. 185-195. (DOI:10.18280/ejee.230303).
9. Bollen, M.H., Zhang, L.D. (2003). Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. *Electric Power Systems Research*, 66(1): 59-69. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00072-5)
10. M. McGranaghan; D. Mueller; M. Samotyj, Voltage sags in industrial systems, *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 29, No.2, pp. 397-403, March/April 1993 (DOI:10.24084/repqj03.278).

Надійшла: 18.10.2023

Received: 18.10.2023