

Козловський Є. В., аспірант, ORCID 0009-0009-2753-3900,
науковий керівник: д-р техн. наук, професор **А. В. Волошко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ ВІДНОСНО МЕЖІ БАЛАНСОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ

DETERMINATION OF THE VOLTAGE DIP SOURCE RELATIVE TO THE BORDER OF RESPONSIBILITY

Анотація. Представлено спосіб визначення розташування провалу напруги відносно межі балансової належності. Напрямок пошкодження визначається розробленим направляючим елементом повного опору зворотної послідовності напруги. При прямому напрямку пошкодження повний опір зворотної послідовності завжди негативний, а при зворотному – завжди позитивний. Бібл. 2, рис. 2.

Ключові слова: симетричні послідовності напруги, полярні координати, типи провалів напруги.

Abstract. A method for determining the location of a voltage dip relative border of responsibility is described in this article. The direction of the damage is determined by the developed directional element of the negative sequence impedance. In the case of a direct damage direction, the negative sequence impedance is always negative, and in the case of a reverse damage direction, it is always positive. Ref. 2, Fig. 2.

Keywords: symmetrical voltage sequences, polar coordinates, types of voltage dips.

Вступ. Провали напруги є дуже важливим показником якості електричної енергії (ЯЕЕ) для сучасного виробництва, насиченого електронними системами керування. Вони можуть спричиняти серйозні порушення в роботі чутливих приладів, таких як комп'ютери, програмовані логічні контролери (ПЛК), системи автоматизації, електроприводи з частотними перетворювачами та інше обладнання. Вплив провалів напруги на обладнання може проявлятися у вигляді його тимчасового відключення, втрати даних, помилок у роботі контролерів, збою в роботі електронних систем, або навіть пошкодження обладнання. Це може призводити до простоїв виробництва, втрат продуктивності та додаткових витрат на обслуговування та ремонт.

Причиною появи провалів напруги є різкі зміни режиму – короткі замикання, пускові струми при включенні потужних асинхронних двигунів, підключення потужних однофазних навантажень.

Для будь-якого підприємства причини виникнення провалів напруги можна розділити на зовнішні та внутрішні. Визначення приналежності провалу напруги до будь-якої групи має істотне значення при оцінці відповідальності за виникнення збитків від порушення технологічного циклу. Невизначеність розташування провалу напруги призводить до правових суперечок між споживачами електричної енергії та її постачальниками.

Метою досліджень є розробка методики визначення місця розташування джерела провалу напруги відносно межі балансової належності шляхом аналізу повного опору зворотної послідовності напруги. Це дозволить точно визначати напрямок пошкодження, зменшити кількість правових суперечок між споживачами та постачальниками електроенергії, а також покращити надійність електропостачання за рахунок оперативного виявлення та усунення причин провалів напруги.

Матеріал і результати досліджень. Одними із небагатьох вітчизняних вчених, які попрабували вирішити це питання – хто винуватець в появі провалу напруги – споживач електричної енергії або постачальник, були О. Г. Гриб та Г. А. Сендерович [1]. Вони запропонували метод автоматичного визначення положення джерела провалу напруги відносно межі балансової належності.

При визначенні місця розташування короткого замикання на живильній лінії чи у споживача можна скористатися кутовими характеристиками струму.

Якщо направити вектор фазної напруги на шинах прийомної підстанції по уявній осі комплексної площині, то вектор фазного струму лінії буде розташовуватися в IV квадранті (для лінії 110 кВ кут складе $\varphi = 70^\circ$). При розташуванні точки короткого замикання у споживача, якщо допустити, що характер мережі практично той же, струм буде мати протилежний напрямок. При цьому кут зміниться на 180° ($\varphi = 70^\circ + 180^\circ$). Автори в [1] роблять висновок: коротке замикання розташоване з боку лінії, якщо $\cos\varphi > 0$ ($|\varphi| < \pi/2$).

Коротке замикання розташовано з боку підприємства, якщо $\cos\varphi < 0$ ($|\varphi| < \pi/2$).

Відмічаючи той факт, що кутові характеристики при коротких замиканнях у внутрішній мережі підприємства можуть істотно відрізнятися від кутових характеристик при коротких замиканнях у зовнішніх мережах у силу неоднорідності мереж різних ступіней номінальних напруг, це може вплинути на кутові характеристики і привести до суттєвих похибок.

В зв'язку з цим, в даній роботі напрямок пошкодження визначається розробленим направляючим елементом повного опору зворотної послідовності напруги.

Розглянемо типове замикання на землю, провал типу В. Основні характеристики змодельованої системи в полярних координатах:

$$\begin{aligned} u_a &= h \cdot U \angle 0^\circ \\ u_b &= U \angle -120^\circ, \\ u_c &= U \angle 120^\circ, \end{aligned} \tag{1}$$

при цьому $h = 0,8$ – глибина провалу, $U = 220$ В.

Визначимо пряму та зворотну послідовності напруг.

Пряма послідовність:

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ) =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ) = 205 \angle 0^\circ \text{ В.} \quad (2)$$

Зворотна послідовність:

$$U_{\text{зв}} = \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ) =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle 240^\circ) = 15 \angle 180^\circ \text{ В.} \quad (3)$$

Висновок. При замиканні фази А на землю (тип провалу напруги В):

- пряма послідовність напруги зменшується до $205 \angle 0^\circ$;
- зворотна послідовність напруги становить $15 \angle 180^\circ$, тобто відстає на $\angle 180^\circ$ від прямої послідовності.

На рис. 1 наведено трифазну незбалансовану напругу електричної мережі, пряма, зворотна та нульова послідовності.

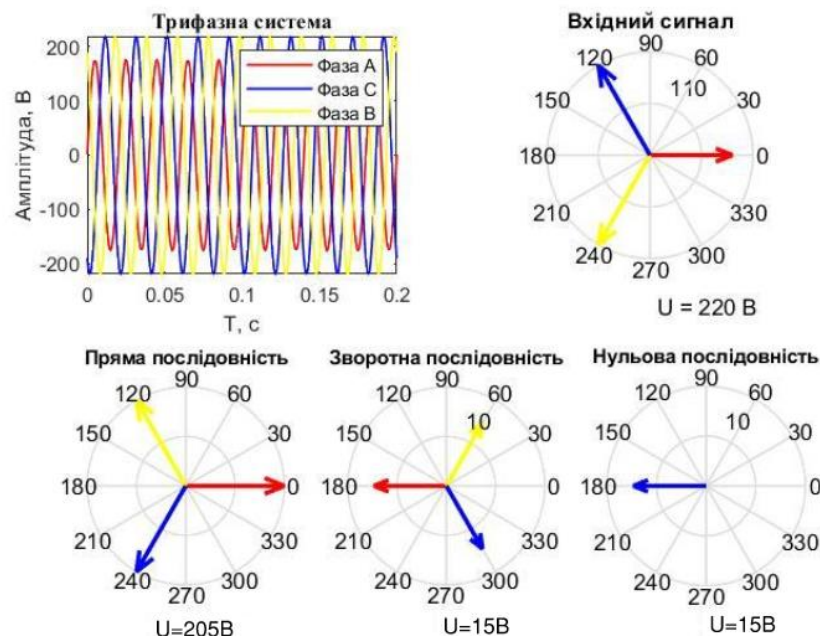


Рисунок 1. Трифазна напруга (провал типу В), пряма, зворотна та нульова послідовності

Як відомо, зворотна послідовність є однією з трьох складових, що використовуються в аналізі симетричних послідовностей трифазних енергосистем. Метод симетричних послідовностей дозволяє визначати

небалансні режими у трифазній системі, використовуючи лише однофазні розрахунки. Це значно спрощує процес визначення струмів і напруг під час міжфазних, однофазних та двофазних замикань на землю в енергосистемах.

Оскільки зворотна та нульова послідовності виникають у значних випадках лише при аварійних режимах, вони часто використовуються для визначення наявності пошкодження в енергосистемі. Зворотна послідовність використовується для виявлення міжфазних, однофазних та двофазних замикань на землю. Нульова послідовність використовується для виявлення однофазних та двофазних замикань на землю.

В загальному вигляді для розрахунку прямої та зворотної послідовностей застосовуються наступні формули:

$$U_{\text{пр}} = 1/3 \cdot (U_A + aU_B + a^2U_C), \quad (4)$$

$$U_{\text{зв}} = 1/3 \cdot (U_A + a^2U_B + aU_C), \quad (5)$$

$$a = -1/2 + j\sqrt{3}/2.$$

Множення вектору на “а” обертає цей вектор на 120° проти годинникової стрілки. Якщо оператор “а” в квадраті, він стає $1 \angle 240^\circ$, що відповідає обертанню вектору на 240° проти годинникової стрілки.

Для визначення напрямку пошкодження використовується так званий направляючий елемент зворотної послідовності – мається на увазі елемент, який аналізує напругу $U_{\text{зв}}$ послідовності на лінії електропередачі та струм зворотної послідовності, що протікає через цю лінію. Далі ці величини порівнюються за їх відносними фазовими кутами.

Умови визначення пошкодження при цьому наступні. Пошкодження в прямому напрямку фіксується тільки тоді, коли струм зворотної послідовності випереджає напругу зворотної послідовності на 180° мінус характеристичний кут лінії [2]:

$$T_{32Q} = |U_{\text{зв}}| \cdot |I_{\text{зв}}| \cdot \cos (\angle(-U_{\text{зв}}) - (\angle I_{\text{зв}} + MTA)), \quad (6)$$

де T_{32Q} – крутний момент направляючого елемента зворотної послідовності, ВА;

MTA – характеристичний кут лінії електропередачі, град.

Якщо T_{32Q} – додатне, то пошкодження знаходиться в прямому напрямку.

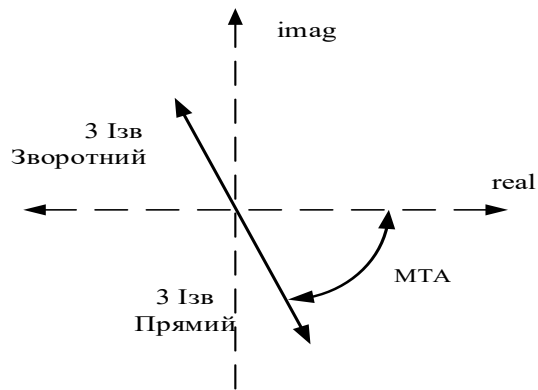


Рисунок 2. Характеристики традиційного направляючого елементу зворотної послідовності [2]

Приймаємо, що струм фази А буде відставати від напруги фази А на МТА. При цьому приймемо спрощення, що $МТА = 90^\circ$. Отже струм фази А з кутом $\angle -90^\circ$. Тобто, струм фази А буде відставати від напруги фази А на $\angle -90^\circ$ з амплітудою 12 А.

У зв'язку з цим обчислюємо струм зворотної послідовності для короткого замикання.

Дані: $I_a = 12\angle 90^\circ \text{ A}$, $I_b = 0 \text{ A}$, $I_c = 0 \text{ A}$,

$$\begin{aligned} I_{зв} &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + 1\angle 240^\circ \cdot I_b + 1\angle 120^\circ \cdot I_c) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (12\angle -90^\circ + 1\angle 240^\circ \cdot 0 + 1\angle 120^\circ \cdot 0) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (12\angle -90^\circ) = 4\angle 90^\circ \text{ A}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким чином отримали, що струм зворотної послідовності становить третину струму фази А і має той самий фазовий кут.

Ми отримали всі необхідні дані для визначення крутного моменту для традиційного направляючого елементу зворотної послідовності.

Вихідні дані: $U_{зв} = 15\angle 180^\circ \text{ В}$; $I_{зв} = 4\angle -90^\circ \text{ А}$.

Обчислимо за формулою:

$$\begin{aligned} T_{32Q} &= |U_{зв}| \cdot |I_{зв}| \cdot \cos(\angle(-U_{зв}) - (\angle I_{зв} + МТА)) = \\ &= |15\angle 180^\circ| \cdot |4\angle -90^\circ| \cdot \cos(\angle(-180^\circ) - (-90^\circ + 90^\circ)) = -60 \text{ ВА}. \end{aligned} \quad (8)$$

Висновок. Крутний момент від'ємний – пошкодження в зворотному напрямку.

Примітка. Розрахунок для прямого замикання аналогічний зворотному замиканню. Усі параметри мережі залишаються незмінними, окрім струму

фази А, який буде зміщений на 180° відносно попереднього випадку. Це призведе до позитивного моменту, що означатиме прямий напрямок пошкодження.

Формула для обчислення повного опору зворотної послідовності:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B}. \quad (9)$$

Як ми бачили раніше, напруга зворотної послідовності при пошкодженні завжди зворотня (у нашому прикладі $U_{3B} = 15 \angle 180^\circ$, або -15 В).

При пошкодженні у прямому напрямку струм зворотної послідовності відстає від напруги на характеристичний кут лінії МТА і вважається додатним. Наприклад, при прямому замиканні $I_{3B} = 4 \angle -90^\circ$. При пошкодженні у зворотному напрямку струм зворотної послідовності зміщується на 180° відносно випадку прямого замикання і вважається від'ємним. При зворотному замиканні $I_{3B} = 4 \angle 90^\circ$.

Оскільки U_{3B} завжди негативне, а I_{3B} позитивне при прямому замиканні та негативне при зворотному, можна зробити висновок: при прямому пошкодженні $Z_2 = Z_{3B}$ завжди негативне, при зворотному – завжди позитивне.

Приклади розрахунків повного опору.

Прямий напрямок:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B} = 15 \angle 180^\circ / 4 \angle -90^\circ = 3.75 \angle 270^\circ \text{ Ом}; \quad Z_2 = -3.75 \text{ Ом}. \quad (10)$$

Зворотній напрямок:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B} = 15 \angle 180^\circ / 4 \angle 90^\circ = 3.75 \angle 90^\circ \text{ Ом}; \quad Z_2 = +3.75 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Висновки.

1. Розроблений підхід до визначення місця розташування провалів напруги відносно межі балансової належності показав свою ефективність і незалежність від кутових характеристик як зі сторони постачальника електроенергії, так і її споживача.

2. Застосування даного способу визначення місця розташування джерела провалу дозволить зменшити кількість правових суперечок між споживачами і постачальником електроенергії.

Список використаних джерел

1. Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Щербакова П. Г., Яров Х. Автоматичне визначення місця розташування джерела провалу напруги.
2. Bill Fleming. Negative-Sequence Impedance Directional Element. 10th Annual ProTest User Group Meeting Pasadena, California February 24–26, 1998. URL: <https://selinc.com/api/download/2475?id=2475> (дата звернення 04.03.2025).

References

1. Hryb O. H., Senderovych H. A., Shcherbakova P. H., Yarov Kh. Automatic Determination of Voltage Sag Source Location. (Ukr).
2. Bill Fleming. Negative-Sequence Impedance Directional Element. 10th Annual ProTest User Group Meeting, Pasadena, California, February 24–26, 1998. URL: <https://selinc.com/api/download/2475?id=2475> (accessed 04.03.2025).

УДК 681.5

Бу Дзя Вей, магістрант, ORCID 0009-0000-0582-9836,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **А. В. Торопов**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ТИПУ FLY-BY-WIRE НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛІННЯ

DESIGN OF A FLY-BY-WIRE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM BASED ON A PREDICTIVE CONTROL MODEL

Анотація. Система fly-by-wire відіграє ключову роль у сучасних літаках і технології автономного водіння, а її характеристики керування безпосередньо впливають на стабільність і безпеку літака. З огляду на недоліки традиційних методів управління при роботі з обмеженнями і динамічними реакціями, в даній роботі запропонована розрахункова схема системи fly-by-wire на основі моделі прогнозного управління. Встановлено модель поздовжньої динаміки літального апарату, а для моделювання системи використовується метод “стан-простір”. Вводиться модель стратегії прогнозного керування, побудована цільова функція оптимізації, а для вирішення оптимального входу керування використовується метод квадратичного програмування. З метою перевірки ефективності запропонованого методу на базі MATLAB Simulink побудована математична модель, а експериментальне дослідження здійснюється у порівнянні із ПД – регулятором. Результати показують, що модель прогнозного керування може підвищити точність керування та здатність динамічного реагування системи fly-by-wire, і в той же час відповідати вимогам до вхідних обмежень, що забезпечує теоретичну та інженерну підтримку інтелектуального управління літальними апаратами. Бібл. 5.

Ключові слова: Модель прогнозного керування (MPC), дротова система керування, поздовжнє керування літальними апаратами, імітаційне дослідження.

Abstract. The fly-by-wire control system plays a key role in modern aircraft and autonomous driving technology, and its control performance directly affects the stability and safety of aircraft. In view of the shortcomings of traditional control methods in dealing with constraints and dynamic responses, this paper proposes a design scheme for fly-by-wire control system