

СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ ВІДНОСНО МЕЖІ БАЛАНСОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Невизначеність розташування джерела провалу напруги на межі балансової належності ускладнює своєчасне реагування відповідного обслуговувального персоналу на пошкодження в електричній мережі і також призводить до частих правових суперечок між споживачами електричної енергії та її постачальниками. Визначення напрямку пошкодження в сторону споживача чи постачальника електричної енергії проводиться шляхом аналізу напруги зворотної послідовності на лінії електропередачі та струму зворотної послідовності, що протікає через цю лінію, з подальшим їх порівнянням за їхніми відносними фазовими кутами. Зважаючи на те, що кутові характеристики у разі провалів напруги у внутрішній мережі підприємства можуть істотно відрізнятися від кутових характеристик у зовнішніх мережах через неоднорідність мереж різних ступенів номінальних напруг, це може вплинути на кутові характеристики і призвести до суттєвих похибок. Також дослідження показали, що визначення крутного моменту для традиційного напрямного елемента зворотної послідовності має низку обмежень: напруга зворотної послідовності обернено пропорційна потужності джерела живлення; опір у місці пошкодження знижує рівень струму зворотної послідовності; значення традиційного напрямного моменту зворотної послідовності безпосередньо залежать від рівня струму та напруги зворотної послідовності, що обмежує можливості виявити напрям пошкодження. У роботі запропоновано спосіб визначення розташування джерела провалу напруги відносно межі балансової належності в трифазній електричній мережі шляхом розробки напрямного елемента повного опору зворотної послідовності. Разом з цим, за прямого напрямку пошкодження повний опір зворотної послідовності завжди негативний, а за зворотного — завжди позитивний. Дієвість цього визначення напрямку пошкодження перевірено шляхом моделювання провалу напруги типу В (зниження напруги на двох з трьох фаз трифазної мережі, зазвичай внаслідок двофазного короткого замикання або міжфазного пошкодження). Результати перевірки виявилися задовільними.

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

Вступ

Провали напруги є дуже важливим показником якості електричної енергії (ЯЕЕ) для сучасного виробництва, насиченого електронними системами керування. Причиною появи провалів напруги є різкі зміни режиму: короткі замикання, пускові струми у разі увімкнення потужних асинхронних двигунів, підключення потужних однофазних навантажень.

Для будь-якого підприємства причини виникнення провалів напруги можна розділити на зовнішні та внутрішні. Визначення належності провалу напруги до будь-якої групи має істотне значення під час оцінювання відповідальності за виникнення збитків від порушення технологічного циклу. Невизначеність розташування джерела провалу напруги викликає правові суперечки між споживачами електричної енергії та її постачальниками.

Одними з небагатьох вітчизняних вчених, які намагалися вирішити це питання, хто винуватець в появі провалу напруги — споживач електричної енергії чи постачальник, є О. Г. Гриб та Г. А. Сендерович [1]. Вони запропонували метод автоматичного визначення положення джерела провалу напруги відносно межі балансової належності. У своїх роботах вони застосували аналіз

симетричних складових та кутових характеристик напруги для визначення напрямку пошкодження. Проте їх метод виявився чутливим до параметрів внутрішніх мереж споживача, особливо за великої неоднорідності елементів системи та змінних навантажень, що знижує точність діагностики.

У світовій практиці відомі й інші підходи. У роботах J. Chen та R. Iravani [2] запропоновано застосування векторного аналізу миттєвих напруг у dq-просторі для виявлення характеру аварії. Метод дозволяв визначити напрям пошкодження, проте вимагав високої точності синхронізації вимірювальних пристроїв.

М. Н. J. Bollen у своїх дослідженнях [3], [4] розглядав класифікацію типів провалів напруги [5] та особливості їх поширення в мережі, наголошуючи, що місце реєстрації не завжди збігається з місцем виникнення провалу.

У працях [6], [7] пропонується використання вейвлет-аналізу або нейронних мереж для розпізнавання шаблонів провалів, але ці методи здебільшого ефективні для класифікації типу порушення, а не для визначення його джерела.

Таким чином, більшість наявних підходів мають суттєві обмеження: чутливість до параметрів мережі, залежність від потужності джерела живлення, труднощі з точним визначенням фази події.

З огляду на вищезазначене, виникає потреба у створенні надійного інструменту, який дозволить би визначати напрямок пошкодження в електричній мережі відносно межі балансової належності з урахуванням реальних режимів роботи, параметрів мережі та типу провалу напруги.

Метою дослідження є розробка способу визначення розташування джерела провалу напруги в трифазній мережі, який базується на аналізі повного опору зворотної послідовності, що дає змогу визначати напрямок пошкодження незалежно від потужності джерела живлення, опору місця пошкодження та кутових характеристик.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання:

- проаналізовано обмеження традиційних напрямних елементів, зокрема залежність від струму та напруги зворотної послідовності;
- введено поняття повного опору зворотної послідовності як нового критерію напрямку пошкодження;
- виконано моделювання провалу напруги типу В для перевірки дієвості методу.

Результати досліджень

Розглянемо аналітичні міркування, що лежать в основі запропонованого методу визначення напрямку пошкодження. Ключовим елементом є перехід від традиційного моменту до повного опору зворотної послідовності, який, на відміну від моменту, не залежить безпосередньо від амплітуд струму та напруги, а лише від їхнього співвідношення та фази.

Для ілюстрації ефективності підходу розглянемо випадок короткого замикання фази А на землю (тип провалу В).

У цій роботі проведено імітацію провалу напруги типу В як базовий приклад для перевірки дієвості методу. Водночас результати можуть бути чутливими до параметрів мережі (тип лінії, довжина, навантаження), тому в майбутніх дослідженнях планується порівняльне моделювання в умовах кабельних і повітряних ліній.

Для визначення 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 площини, то вектор фазного струму лінії буде розташовуватися в IV квадранті (для конкретного типу лінії 110 кВ кут складе $\varphi = 70^\circ$). У разі розташування точки короткого замикання у споживача, якщо допустити, що характер мережі практично той самий, струм буде мати протилежний напрямок. При цьому кут зміниться на 180° ($\varphi = 70^\circ + 180^\circ$).

Автори в [1] підсумували: коротке замикання розташоване з боку лінії, якщо $\cos\varphi > 0$ ($|\varphi| < \pi/2$); коротке замикання розташоване з боку підприємства, якщо $\cos\varphi < 0$ ($|\varphi| < \pi/2$).

Зауважуючи, що кутові характеристики під час коротких замикань у внутрішній мережі підприємства можуть істотно відрізнятися від кутових характеристик під час коротких замикань у зовнішніх мережах через неоднорідність мереж різних ступенів номінальних напруг, це може вплинути на кутові характеристики і призвести до суттєвих похибок.

В зв'язку з цим, у цій роботі напрямок пошкодження визначається розробленим напрямним елементом повного опору зворотної послідовності напруги.

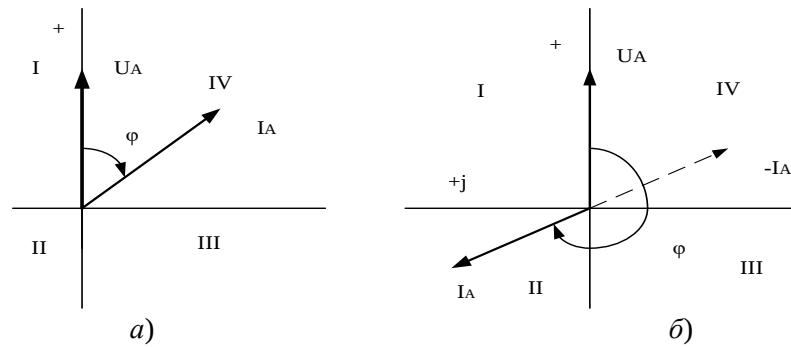


Рис. 1. Визначення місця КЗ: а — з боку лінії; б — з боку споживача [1]

Розглянемо приклад однофазного короткого замикання, характерного для мереж низької напруги (0,4 кВ), який за класифікацією ІЕС 61000-4-30 відповідає провалу напруги типу В [5]. Основні характеристики змодельованої системи в полярних координатах:

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

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

Визначимо пряму та зворотну послідовності напруг.

Пряма послідовність

$$\begin{aligned} U_{div} &= 1/3 \left(176 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ \right) = \\ &= 1/3 \left(176 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ \right) = 205 \angle 0^\circ \text{ В.} \end{aligned} \quad (2)$$

Зворотна послідовність

$$\begin{aligned} U_{rev} &= 1/3 \left(176 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ \right) = \\ &= 1/3 \left(176 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle 240^\circ \right) = 15 \angle 180^\circ \text{ В.} \end{aligned} \quad (3)$$

Висновок. У разі короткого замикання фази А на землю (тип провалу напруги В) пряма послідовність напруги зменшується до $205 \angle 0^\circ$, а зворотна послідовність напруги становить $15 \angle 180^\circ$, тобто відстає на 180° від прямої послідовності.

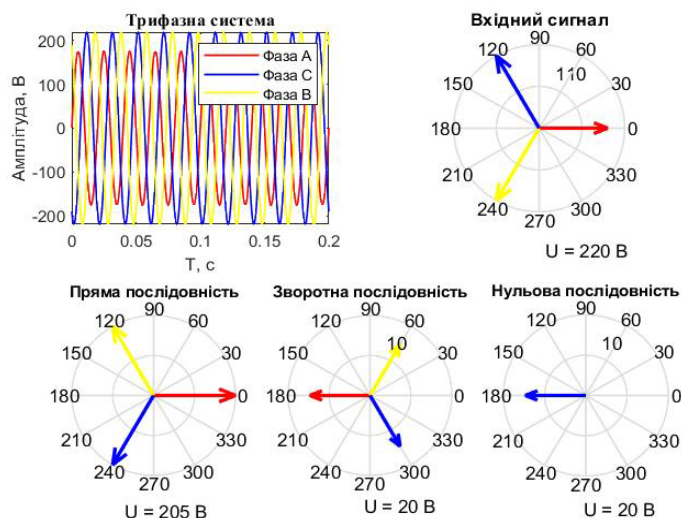


Рис. 2. Трифазна напруга (провал типу В), пряма, зворотна та нульова послідовності

На рис. 2 показано трифазну незбалансовану напругу електричної мережі, пряму, зворотну та нульову послідовності [8].

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 більшості випадків лише у разі аварійних режимів, то 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 такі формули [9], [10]:

$$U_{div} = 1/3(U_A + aU_B + a^2U_C); \quad (4)$$

$$U_{rev} = 1/3(U_A + a^2U_B + aU_C); \quad (5)$$

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

Множення вектора на « a » обертає цей вектор на 120° проти годинникової стрілки. Якщо оператор « a » в квадраті, він стає $1 \angle 240^\circ$, що відповідає обертанню вектора на 240° проти годинникової стрілки.

Для визначення напрямку пошкодження використовується так званий напрямний елемент зворотної послідовності — тобто елемент, який аналізує напругу U_{zv} послідовності на лінії електропередачі та струм зворотної послідовності, що протікає через цю лінію. Далі ці значення порівнюються за їхніми відносними фазовими кутами.

Умови визначення пошкодження при цьому такі. Пошкодження в прямому напрямку фіксується тільки тоді, коли струм зворотної послідовності випереджає напругу зворотної послідовності на 180° мінус характеристичний кут лінії [11]

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

де T_{32Q} — крутний момент напрямного елемента зворотної послідовності, MTA — характеристичний кут лінії електропередачі.

Якщо T_{32Q} — додатне, це означає, що пошкодження знаходиться в прямому напрямку.

Вважаємо, що струм фази А буде відставати від напруги фази А на MTA . При цьому припустимо спрощення, що $MTA = 90^\circ$. 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.

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

Дані: $I_a = 12 \angle 90^\circ$ А, $I_b = 0^\circ$ А, $I_c = 0^\circ$ А.

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

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 напрямного елемента зворотної послідовності.

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

Обчислимо крутний момент за формулою

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

З (8) випливає, що крутний момент додатний — пошкодження в прямому напрямку.

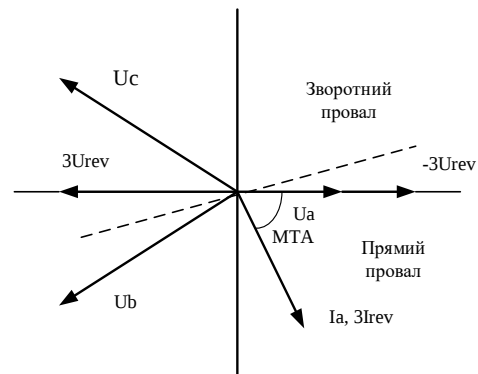


Рис. 3. Характеристики традиційного напрямного елемента зворотної послідовності [12]

Примітка. Розрахунок для зворотного замикання аналогічний прямому замиканню. Усі параметри мережі залишаються незмінними, окрім струму фази А, який буде зміщений на 180° відносно попереднього випадку. Це призведе до від'ємного моменту, що означатиме зворотний напрямок пошкодження.

Дослідження показали, що застосування традиційного напрямного елемента зворотної послідовності має такі обмеження [12], [13]:

- напруга зворотної послідовності U_{3B} — обернено пропорційна потужності джерела живлення;
- чим потужніше джерело (менший повний опір), тим менше U_{3B} ;
- опір у місці пошкодження знижує рівень струму зворотної послідовності;
- значення традиційного напрямного моменту зворотної послідовності безпосередньо залежить від рівня струму та напруги зворотної послідовності, що обмежує можливості виявити напрям пошкодження.

Для подолання цих обмежень розроблено новий напрямний елемент зворотної послідовності — напрямний елемент повного опору зворотної послідовності Z_{3B} . Визначається напрямок пошкодження за іншою методикою — замість використання добутку U_{3B} та I_{3B} , аналізуються їхні співвідношення. Ці співвідношення дають значення повного опору зворотної послідовності, який використовується для визначення напрямку пошкодження [14]

$$Z_{2(rev)} = \frac{U_{rev}}{I_{rev}} \quad \text{або} \quad Z_{2(rev)} = \frac{3U_{rev}}{3I_{rev}}. \quad (9)$$

При цьому варто зазначити, що у разі пошкодження U_{3B} завжди негативне. В нашому прикладі

$$U_{3B} = 15 \angle 180^\circ, \text{ або } -15^\circ \text{ В.}$$

Зауважимо, що у разі пошкодження в прямому напрямку I_{3B} відстає від напруги на характеристичний кут лінії МТА і вважається додатним. Наприклад, у разі прямого замикання $I_{3B} = 3 \angle -90^\circ \text{ А}$.

У разі пошкодження у зворотному напрямку струм зворотної послідовності I_{3B} зміщується на 180° відносно випадку прямого замикання і вважається від'ємним. Тобто, за зворотного замикання $I_{3B} = 3 \angle 90^\circ \text{ А}$, оскільки U_{3B} завжди має негативне значення, а I_{3B} — позитивне у разі прямого замикання, та негативне при зворотному замиканні.

У разі прямого пошкодження значення $Z_{2(rev)}$ завжди негативне

$$Z_{2(rev)} = \frac{\text{негативне значення}}{\text{додатне значення}} = \text{негативне значення.}$$

У разі зворотного пошкодження значення $Z_{2(3\phi)}$ завжди позитивне

$$Z_2 = Z_{3B} = \frac{\text{негативне значення}}{\text{негативне значення}} = \text{позитивне значення.}$$

Розрахуємо повний опір зворотної послідовності в нашому прикладі.

Прямий напрямок

$$Z_2 = Z_{3B} = \frac{U_{3B}}{I_{3B}} = \frac{15 \angle 180^\circ}{3 \angle -90^\circ} = 5 \angle 270^\circ, \text{ Ом} \quad Z_2 = -5 \text{ Ом.} \quad (10)$$

Зворотний напрямок

$$Z_2 = Z_{3B} = \frac{U_{3B}}{I_{3B}} = \frac{15 \angle 180^\circ}{3 \angle 90^\circ} = 5 \angle 90^\circ, \text{ Ом} \quad Z_2 = +5 \text{ Ом.} \quad (11)$$

Оскільки цей метод базується на відношенні напруги до струму, він дозволяє виявляти пошкодження навіть за дуже низького значення U_{3B} . Якщо значення U_{3B} дуже мале, то повний опір Z_{3B} наближається до нуля, що свідчить про пошкодження у прямому напрямку.

Висновки

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

Впровадження запропонованого способу визначення джерела спотворення дозволить підвищити надійність функціонування систем розподілу та електроспоживання за рахунок своєчасного виявлення пошкодження в електричній мережі та його усунення.

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

Подальші дослідження передбачають розширення моделювання з урахуванням різних типів коротких замикань (однофазних, двофазних, трифазних) у мережах з кабельними та повітряними лініями. Це дозволить точніше оцінити ефективність запропонованого способу визначення напрямку пошкодження у різних конфігураціях електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова, і 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>.
- [2] Д. Чен, і Р. Іравані, «Аналіз визначення джерела провалу напруги на основі синхронізованого вимірювання фазових», *Транзакції IEEE з постачання електроенергії*, т. 21, № 1, с. 233-240, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852356>.
- [3] М. Боллен, *Розуміння проблем якості електроенергії: провали напруги та перерви*. Нью-Йорк: IEEE Press, 2000, 543 с. ISBN: 978-0780347131.
- [4] М. Боллен, і П. Рібейро, «Визначення походження провалів напруги та короткочасних перерв», *Матеріали Зимової конференції IEEE з електроенергетики*, 2001, т. 2, с. 1123-1128. <https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917233>.
- [5] IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, International Electrotechnical Commission, 2015, 140 p.
- [6] “Modified methods for voltage sag source detection using transient characteristics,” *Electric Power Systems Research*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107087>.
- [7] “Detection and classification of voltage sags in real-time for power quality monitoring,” *Measurement*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108046>.
- [8] Вейзага М., Делфа Ц., Діалло Д., Берсу С., і Бертін Л. «Методика ідентифікації джерел провалів напруги на основі симетричних складових та динамічного вирівнювання часових рядів», *IET Генерація, передача та розподіл*, 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12765>.
- [9] Bill Fleming, “Negative-Sequence Impedance Directional Element,” *10th Annual ProTest User Group Meeting Pasadena*, California February 24–26, 1998. <https://selinc.com/api/download/2475?id=2475>.
- [10] Y. Yalman, та ін. «Реалізація алгоритму визначення відносного розташування провалу напруги та типу несправності з використанням даних реального часу», *Mathematics*, т. 10, № 19, 2022. <https://doi.org/10.3390/math10193537>.
- [11] Karl Zimmerman, David Costello, “Fundamentals and Improvement for Directional Relays,” *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2010. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2010.5469483>.
- [12] Ryan McDaniel and Michael Thompson, “Impedance-Based Directional Elements – Why Have a Threshold Setting?” *75th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia May 4–6, 2022*, pp. 1-18. <https://selinc.com/api/download/135483/>.
- [13] Joe Mooney, P. E. Jackie Peer, *Application Guidelines for Ground Fault Protection*. [Electronic resource]. Available: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6065_ApplicationGuidelines_Web.pdf.
- [14] Karl Zimmerman, and Joe Mooney, “Comparing Ground Directional Element Performance Using Field Data,” *20th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 19-21, 1993.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.04.2025

Волошко Анатолій Васильович — д-р техн. наук, професор кафедри електропостачання, e-mail: avolosko820@gmail.com ;

Козловський Євген Валерійович — аспірант кафедри електропостачання, e-mail: eugene.kozlovskiy@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

A. V. Voloshko¹
Ye. V. Kozlovskiy¹

Method of Determination of Voltage Dip Source Location in Relation to the Border of Balance Responsibility

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The uncertainty of voltage dips source location on the border of balance responsibility complicates the timely response of maintenance personnel to faults in the electrical network and also leads to frequent legal disputes between electricity consumers and suppliers. The determination of the fault direction—towards the consumer or the electricity supplier—is carried out by analyzing the negative-sequence voltage on the power line and the negative-sequence current flowing through that line, followed by comparing their relative phase angles. It is important to note that the angular characteristics of voltage dips within an internal network (e.g., within a facility) may significantly differ from those in external networks due to the heterogeneity of networks with different nominal voltage levels. This can affect the angular characteristics and lead to substantial errors. Research also shows that determining torque for the conventional negative-sequence directional element has several limitations: the negative-sequence voltage is inversely proportional to the source power; the fault impedance reduces the level of the negative-sequence current; and the values of the traditional directional torque directly depend on the magnitude of the negative-sequence voltage and current, which limits the ability to accurately determine the fault direction. This work presents the method for identifying the location of a voltage dip relative to the boundary of balance responsibility in a three-phase electrical network by developing a directional element based on the total negative-sequence impedance. In this approach, the total negative-sequence impedance is always negative for forward faults and always positive for reverse faults. The effectiveness of this method for fault direction detection was verified through simulation of a type B voltage dip. The results of the simulation demonstrated acceptable accuracy.

Keywords: symmetrical voltage components, polar coordinates, types of voltage dips, total negative-sequence impedance.

Voloshko Anatolii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Supply, e-mail: avolosko820@gmail.com ;

Kozlovskiy Yevgen V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Supply, e-mail: eugene.kozlovskiy@gmail.com