

УДК 621.315.2.016.2

ЛОБОДЗИНСЬКИЙ В.Ю.

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

АНАЛІЗ ПЕРЕНАПРУГ ТА СТРУМІВ ОДНОРІДНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ

Мета. Аналіз впливу перенапруг при несиметричних коротких замиканнях в однорідних довгих лініях.

Методика. В основу роботи покладені чисельні методи розрахунку розподілу напруг та струмів по лінії при коротких замиканнях.

Результати. Розроблена чисельна методика дозволяє розраховувати та аналізувати підвищення напруги при несиметричних коротких замиканнях для рішення питань безпеки експлуатації елементів електропередачі.

Наукова новизна. Визначено відношення модулів струму несиметричного короткого замикання до модуля струму трифазного короткого замикання та модулів напруги на непошкоджених фазах до модуля напруги в точці короткого замикання в попередньому (усталеному) режимі від різних вхідних опорів прямої та нульової послідовності.

Практична значимість. Розроблена методика чисельного розрахунку розподілу напруги та струму по лінії при короткому замиканні та виведені розрахункові вирази для аналізу та способу обмеження перенапруг та струмів при несиметричних коротких замиканнях.

Ключові слова: напруга, струм, однорідна довга лінія, короткі замикання, перенапруга.

Вступ. Квазістаціонарні перенапруги в електропередачах високого класу напруг можуть виникати як в режимах примикання високовольтних ліній к системам, так і в режимах їх живлення з однієї сторони, наприклад при синхронізації системи, до якої підключена лінія або в стаціонарних режимах, які відповідають плановому чи аварійному відключенню лінії. Основні співвідношення, які визначають стаціонарний режим роботи довгої однопровідної лінії електропередач, можуть бути отримані на основі рівнянь однорідної ділянки [1]. Ці співвідношення будуть справедливими і при розгляданні процесів в будь-якому модальному каналі трифазної лінії електропередачі. При нехтуванні активними опорами рівняння лінії можна записати у наступному вигляді:

$$\dot{U}_n = \dot{U}_k \cos \lambda + j \dot{Z}_g \dot{I}_k \sin \lambda; \dot{I}_n = \dot{I}_k \cos \lambda + j \frac{\dot{U}_k}{\dot{Z}_g} \sin \lambda$$

де \dot{U}_n , \dot{U}_k , \dot{I}_n , \dot{I}_k – комплекси напруг та струмів на початку і в кінці лінії;

\dot{Z}_g – хвильовий опір;

λ – хвильова довжина лінії;

L , C погонні індуктивності та ємності лінії.

Аналіз несиметричних режимів однорідних довгих ліній може бути проведений в різних системах координат. Дослідження несиметричних режимів базується на вирішенні рівнянь лінії та крайових умов, які описують вид несиметрії в тій чи іншій точці, записаних відносно фазних величин струмів та напруг. При цьому, раціональність цього підходу залежить від типу задачі, що вирішується [2]. Крайові умови у несиметричному режимі, найпростіше записувати у фазних координатах [3, 4].

Тому, при відносно простих випадках несиметрії найбільш прості випадки рішення задачі може бути отримані при записі рівнянь елементів лінії та крайових умов в незалежних режимних координатах. При складних видах несиметрії найбільш простий шлях рішення полягає у безпосередньому використанні фазних координат. Останній шлях дозволяє також записувати рішення при різних видах несиметрії та в значній мірі формалізувати рішення, які особливо істотно застосовуються при використанні обчислювальної техніки [5].

Постановка завдання. В статті розглядається аналіз впливу перенапруг при несиметричних коротких замиканнях (КЗ) в однорідних довгих лінях для оцінки небезпеки виникаючих перенапруг для ізоляції елементів електропередачі, а також розробка методики чисельного розрахунку розподілу напруги та струму по лінії при КЗ та доведення розрахункових виразів до виду, за допомогою яких можливе ефективне програмування з використанням сучасної комп'ютерної техніки.

Результати дослідження. Рівняння електропередачі, яка представлена на рис.1, можуть бути отримані шляхом компонування розрахункових рівнянь елементів лінії у фазних координатах [6]. При прийнятих на рис. 1 позначеннях маємо систему

$$\begin{cases} \dot{E}_n = \dot{U}_n + jX_n \dot{I}_{n-} \\ \dot{I}_{n-} = -\dot{I}_{n+} - jB_{pn} \dot{U}_n \\ \dot{U}_n = A_x \dot{U}_x + jB_x \dot{I}_{x-} \\ \dot{I}_{n+} = -A_x \dot{I}_{x-} - jC_x \dot{U}_x \end{cases}$$

де струми з індексами «-» та «+» позначають відповідні величини струмів зліва та справа від будь-якого поперечного відгалуження;

A_x, B_x, C_x – постійну ділянки лінії від її початку до точки з напругою \dot{U}_x ;

$B_{pn} = 1 / X_p$ – провідність реактора.

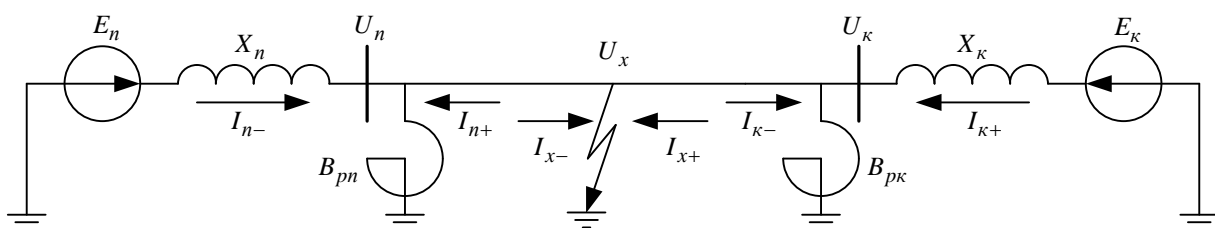


Рис. 1. Розрахункова схема електропередачі при несиметричному КЗ

Якщо права частина електропередачі, відносно точки x, має той же вигляд, що і рис. 1 для її лівої частини, то схема заміщення всієї електропередачі при несиметричному КЗ в точці x буде мати вигляд, приведений на рис. 2, де \dot{U}_x – напруга в точці лінії зі сторони приймача при повному розриві лінії в цій точці

$$\dot{E}_{ek} = \left[(1 + X_k B_{pk}) A_{l-x} - X_x C_{l-x} \right]^{-1} \dot{E}_k,$$

а Z_{x-k} вхідний опір правої частини схеми відносно точки x

$$Z_{x-k} = j \left[(1 + X_k B_{pk}) A_{l-x} - X_x C_{l-x} \right]^{-1} \left[(1 + X_k B_{pk}) B_{l-x} - X_k A_{l-x} \right]$$

де $A_{l-x}, B_{l-x}, C_{l-x}$ – постійні правої частини лінії відносно точки КЗ.

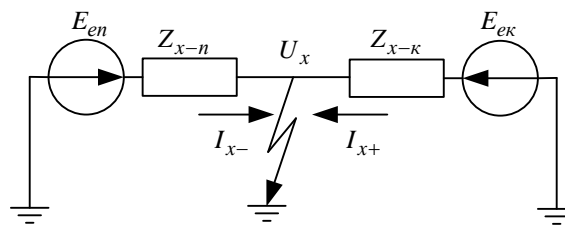


Рис. 2. Схема заміщення при несиметричному КЗ

Для визначення струму КЗ $\dot{I}_x = \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x+}$ та напруг на непошкоджених фазах скористаємось рівняннями

$$\dot{E}_{ен} = \dot{U}_x + Z_{x-n} \dot{I}_{x-}; \quad \dot{E}_{ек} = \dot{U}_x + Z_{x-k} \dot{I}_{x+} \quad (1)$$

Розподіл напруги по лінії при КЗ у деякій точці x знайдемо наступним чином. Напряга у точці u лінії, розташована зліва або справа від точки КЗ, і визначається відповідним рівнянням

$$\dot{U}_y = A_{xy} \dot{U}_x + jB_{xy} \dot{I}_{x-}, \quad \dot{U}_y = A_{xy} \dot{U}_x + jB_{xy} \dot{I}_{x+} \quad (2)$$

де A_{xy} , B_{xy} – постійні ділянки лінії між точкою КЗ та точкою лінії у якій визначається напруга.

В останні вирази підставимо значення струмів \dot{I}_{x-} та \dot{I}_{x+} , отримаємо:

значення напруги для лівої ділянки відносно точки КЗ

$$\dot{U}_y = (A_{xy} + jB_{xy} Z_{x-n}^{-1}) \dot{U}_x + jB_{xy} Z_{x-n}^{-1} \dot{E}_{ен} \quad (3)$$

значення напруги для правої ділянки відносно точки КЗ

$$\dot{U}_y = (A_{xy} + jB_{xy} Z_{x-k}^{-1}) \dot{U}_x + jB_{xy} Z_{x-k}^{-1} \dot{E}_{ек} \quad (4)$$

У виразах (3) та (4) напруга \dot{U}_x

$$\dot{U}_x = (YK_u + K_i Y_x)^{-1} K_i Y_x \dot{U}_x^n \quad (5)$$

де Y – діагональна матриця одиничних активних провідностей;

$Y_x = Z_{x-n}^{-1} + Z_{x-k}^{-1}$ – матриця провідностей всієї електропередачі відносно точки КЗ;

K_u , K_i – матриці комутацій по напрузі та струму;

\dot{U}_x^n – напруга попереднього (усталеного) режиму до КЗ, яку знаходимо, підставляючи крайові умови $\dot{I}_{x-} = -\dot{I}_{x+}$ ($\dot{I}_x = 0$) у рівняння (2)

$$\dot{U}_x^n = Y_x^{-1} (Z_{x-n}^{-1} \dot{E}_{ен} + Z_{x-k}^{-1} \dot{E}_{ек})$$

Струм КЗ, знайдемо шляхом виразу з (1) струмів

$$\dot{I}_{x-} = Z_{x-n}^{-1} (\dot{E}_{ен} - \dot{U}_x); \quad \dot{I}_{x+} = Z_{x-k}^{-1} (\dot{E}_{ек} - \dot{U}_x)$$

отже

$$\dot{I}_x = \dot{I}_{x-} + \dot{I}_{x+} = [1 - Y_x (YK_u + K_i Y_x)^{-1} K_i] Y_x \dot{U}_x^n \quad (6)$$

Розглянемо випадки однофазного, двофазного на землю та між фазами (без землі) короткого замикання, розрахункові формули (5) та (6) будуть видозмінюватись в залежності від граничних умов та виду матриць комутацій K_u , K_i для різних видів КЗ.

При однофазному короткому замиканні (фаза a):

$$\dot{I}_{a,x} = \frac{3\dot{U}_{a,x}^n}{2Z_x + Z_{0x}}, \dot{I}_{b,x} = \dot{I}_{c,x} = 0$$

$$\dot{U}_{a,x} = 0, \dot{U}_{b,c,x} = -\left(\frac{3}{2} \frac{Z_{0x}}{2Z_x + Z_{0x}} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \dot{U}_{a,x}^n$$

де Z_x та Z_{0x} – вхідні опори прямої та нульової послідовності електропередачі відносно точки КЗ.

При $\text{Re}Z_x = \text{Re}Z_{0x} = 0$ модулі напруг на пошкоджених фазах у точці КЗ рівні

$$U_{b,x} = U_{c,x} = \frac{\sqrt{3(m^2 + m + 1)}}{2 + m} U_{a,x}^n$$

а співвідношення струму однофазного КЗ до струму трифазного КЗ в тій же точці x рівне

$$\frac{I_{a,x}^{(1)}}{I_{a,x}^{(3)}} = \frac{3}{2 + k}$$

де $k = \frac{Z_{0x}}{Z_x}$.

При двофазному короткому замиканні на землю (фаз b та c):

$$\dot{I}_{a,x} = 0, \dot{I}_{b,c,x} = -\left(\frac{3}{2} \frac{1}{2Z_{0x} + Z_x} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2Z_x}\right) \dot{U}_{a,x}^n$$

$$\dot{U}_{a,x} = \frac{3Z_{0x}}{2Z_{0x} + Z_x} \dot{U}_{a,x}^n, \dot{U}_{b,x} = \dot{U}_{c,x} = 0$$

При $\text{Re}Z_x = \text{Re}Z_{0x} = 0$ співвідношення модулів струмів двофазного КЗ на землю та трифазного КЗ рівне

$$\frac{I_{b,x}^{(2)}}{I_{b,x}^{(3)}} = \frac{I_{c,x}^{(2)}}{I_{c,x}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3(m^2 + m + 1)}}{2m + 1}$$

а модуль напруги на непошкодженій фазі в точці КЗ буде

$$U_{a,x} = \frac{3m}{2m + 1} U_{a,x}^n$$

Двофазне коротке замикання без землі (між фазами b та c):

$$\dot{I}_{a,x} = 0, \dot{I}_{b,x} = -\dot{I}_{c,x} = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\dot{U}_{a,x}^n}{Z_x}$$

$$\dot{U}_{a,x} = \dot{U}_{a,x}^n, \dot{U}_{b,x} = \dot{U}_{c,x} = -\frac{1}{2} \dot{U}_{a,x}^n$$

На рис. 3 показані залежності від параметру k співвідношення модулів струму несиметричного короткого замикання до модуля струму трифазного короткого замикання, а також співвідношення відповідних модулів напруг на непошкоджених фазах в точці КЗ до модуля напруги в тій же точці у попередньому режимі до КЗ.

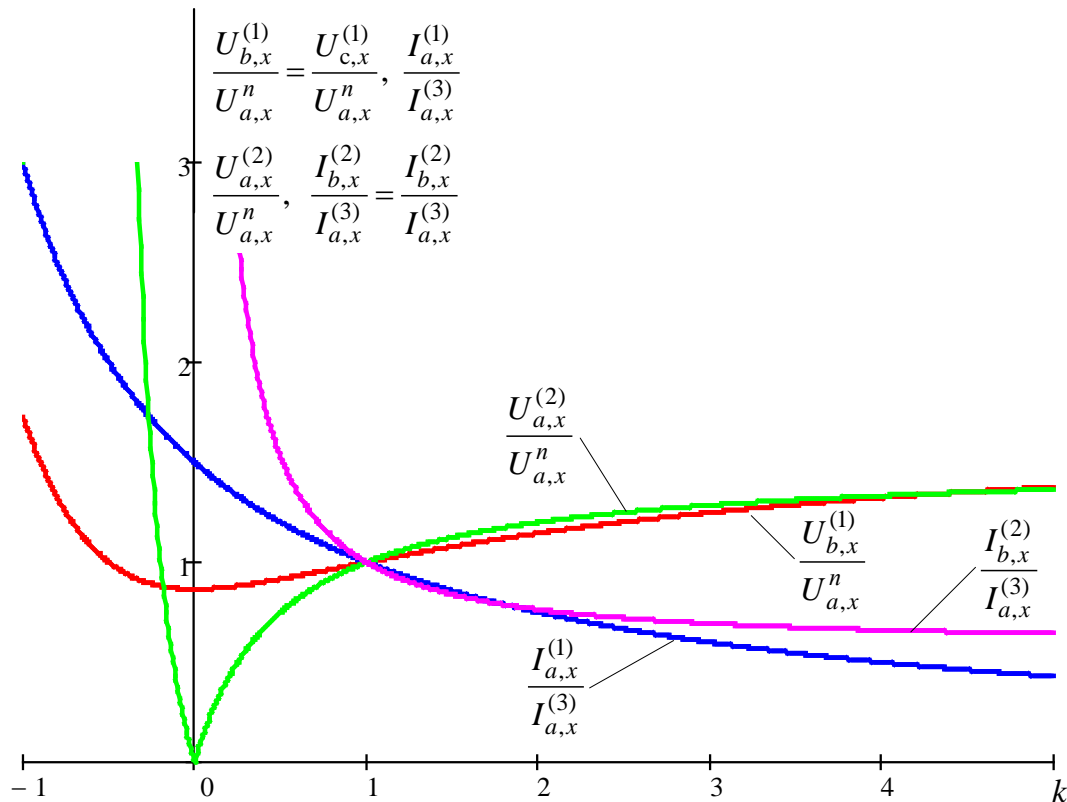


Рис 3. Залежності відношень модулів струмів та напруг

Із рис. 3 видно, що найбільшу небезпеку при виникненні перенапруги при несиметричних КЗ являють собою випадки, коли вхідні опори електропередачі прямої та нульової послідовності відносно точки КЗ мають протилежні знаки. Останнє, має місце при короткому замиканні в кінці, хвильова довжина нульової послідовності якої істотно перевищує хвильову довжину прямої послідовності, в результаті чого вхідний опір нульової послідовності відносно точки КЗ може мати ємнісний характер, тоді як вхідний опір прямої послідовності індуктивний характер. Умови, близькі до резонансних, можуть виникати при живленні від систем малої потужності.

Висновок. Чисельна методика дозволяє розраховувати та аналізувати підвищення напруги при несиметричних коротких замиканнях, які можуть представляти небезпеку для обладнання підстанцій при тривалій дії такого режиму. Очевидно, що підвищення напруг при таких режимах повинні враховуватися при врахуванні квазістаціонарних складових перехідних процесів, які супроводжуються комутаціями, пов'язаних з виникненням та ліквідацією коротких замикань на лініях електропередачі.

Використання розробленої методики дозволяє аналізувати різні режими роботи ліній та оцінювати необхідні параметри засобів захисту в аварійних режимах.

Список використаної літератури

1. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. / Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. – СПб.: Питер, 2003. – Т.3 – 377 с.
2. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники: изд. 2-е, доп. / Левинштейн М.Л. – Л.: Энергия, 1972. – 360 с.

3. Безносова О.И. Обобщенный подход к моделированию электрических цепей с разнородными элементами / О.И. Безносова, Э.П. Семагина // Наукові праці ДонНТУ. – 2010. – №11(164). – С. 147-153.
4. Semagina E.P. Nransmission line analysis via Taylor series / E.P. Semagina, O.I. Beznosova // International journal of Circuit Theory and Application. – 1992. – 20. – pp 371-386.
5. Костенко М.В. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжений / Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.
6. Lobodzinskiy V. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks / V. Lobodzinskiy, L. Maslak // Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015 16th International Conference on. – IEEE, 2015. – pp. 96-98.

References

1. Demyrchian K.S. Teoreticheskiye osnovi elektrotekhniki: v 3-kh t. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering] / Demyrchian K.S., Neiman L.R., Korovkyn N.V., Chechurny V.L. – SPb: Piter, 2003. Т.3 – 377 s.
2. Levinshteyn M.L. Operatsyonnoe yschyslenye v zadachakh elektrotekhniki: yzd. 2-e, dop [Operational calculus in electrical engineering problems] / Levinshteyn M.L. – L.: Energiya, 1972. – 360 s.
3. Beznosova O.Y. Obobshchenniy podkhod k modelyrovaniyu elektrycheskykh tsepei s raznorodnymi elementami [A generalized approach to modeling electrical circuits with different elements] / O.Y. Beznosova, E.P. Semahyna // Naukovi pratsi DonNTU. – 2010. – №11(164). – s. 147-153.
4. Kostenko M.V. Perenapryazheniya i zaschita ot nih v vozdushnyih i kabelnyih elektroperedachah vyisokogo napryazheniya [Overvoltage and protection against them in the overhead power line and cable transmission of high voltage] / Kostenko M.V., Kadomskaya K.P., Levinshteyn M.L., Efremov I.A. – L.: Nauka, 1988. – 302 s.
5. Lobodzinskiy V., Maslak L. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks // Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015 16th International Conference on. – IEEE, 2015. – s. 96-98.

АНАЛИЗ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ОДНОРОДНОЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПРИ НЕСИМЕТРИЧЕСКИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ ЛОБОДЗИНСКИЙ В.Ю.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени
Игоря Сикорского»*

Цель. Анализ влияния перенапряжений при несимметрических коротких замыканиях в однородных длинных линиях.

Методика. В основе работы используются численные методы расчета распределения напряжений и токов по линии при коротких замыканиях.

Результаты. Разработанная численная методика позволяет рассчитывать и анализировать повышение напряжения при несимметричных коротких замыканиях для решения вопросов безопасности эксплуатации элементов электропередачи.

Научная новизна. Определено отношение модулей токов несимметричных коротких замыканий к модулю тока трехфазного короткого замыкания и модулей напряжения на неповрежденных фазах к модулю напряжения в точке короткого замыкания в предшествующем режиме от разных входных сопротивлений прямой и нулевой последовательности.

Практическая значимость. Разработана методика численного расчета распределения напряжения и тока по линии при коротком замыкании та выведены расчетные выражения для анализа и способа ограничения перенапряжений и токов при несимметричных коротких замыканиях.

Ключевые слова: напряжение, ток, однородная длинная линия, короткие замыкания, перенапряжения.

ANALYSIS OF OVERLOADS AND CURRENTS OF A HOMOGENEOUS LONG LINE IN NONSYMMETRIC SHORT CIRCUITS

LOBODZINSKIY V.U.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute"

Purpose. The analysis of overvoltage impact on homogeneous long lines during asymmetric short-circuit.

Methodology. The research is based on numerical calculation methods of voltage and current distribution on the lines during short-circuit.

Findings. Developed numerical method allows to calculate and analyze the voltage increasing during asymmetric short-circuits for security solutions of power transmission elements exploitation.

Originality. The relations between current modulus of asymmetric short-circuit and current modulus of three-phase short-circuit and between voltage modulus of undamaged phases and voltage modulus in a point of short-circuit in steady regime from different input resistances of direct- and zero-sequence were found.

Practical value. Numerical calculation method of voltage and current distribution on line during short-circuit were developed. Also calculated formulas were derived for analysis and limitation of overvoltage and current during asymmetric short-circuit.

Keywords: voltage, current, uniform transmission lines, short circuit, overvoltage .