Г. О. ШЕІНА (канд. техн. наук)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
ganna.sheina@donntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В роботі розглянуті процеси, які виникають в лініях електропередачі і силових трансформаторах при атмосферних і комутаційних перенапругах. Атмосферні перенапруги розділяють на два типи: прямі, які виникають внаслідок прямого удару блискавки; та індукційні – виникають при будь-яких комутаціях. Прямі перенапруги досягають значень достатніх для перекриття ізоляції будь-якого класу напруги. Захист ліній електропередачі від них – підвіска заземлених грозозахисних тросів, захист обладнання підстанцій – встановлення блискавковідводів. Є важливим дослідження хвильових процесів в лініях електропередачі, що виникають при комутаціях, які виникають при включенні на напругу джерела живлення, при відключенні від джерела живлення, при виникненні коротких замикань, при ураженні ліній електропередачі блискавкою. Крім того є важливим дослідження хвильових процеси в силових трансформаторах, вплив імпульсної корони, вплив перенапруги на обмотки трансформатора.

Ключові слова: лінія електропередачі, трансформатори, атмосферні і комутаційні перенапруги, ізоляція, захист, грозозахисні троси, блискавковідводи, включення, комутація, короткі замикання, хвильові процеси.

Постановка проблеми.

Процеси, які протікають в електричних мережах, характеризуються значною швидкістю протікання процесів, та значною величиною струмів та напруг при аварійних процесах. Розглянуті процеси, які виникають в лініях електропередачі і силових трансформаторах при атмосферних і комутаційних перенапругах [1]. Атмосферні перенапруги розділяють на два типи: прямі, які виникають внаслідок прямого удару блискавки; та індукційні – виникають при будь-яких комутаціях.

Прямі перенапруги досягають значень достатніх для перекриття ізоляції будь-якого класу напруги. Захист ліній електропередачі від них – підвіска заземлених грозозахисних тросів, захист обладнання підстанцій – встановлення блискавковідводів. Значна увага приділена дослідженню хвильових процесів в лініях електропередачі, що виникають при комутаціях, які виникають при включенні на напругу джерела живлення, при відключенні від джерела живлення, при виникненні коротких замикань, при ураженні ліній електропередачі блискавкою. Крім того, дослідженню хвильових процесів в силових трансформаторах, вплив імпульсної корони, вплив перенапруги на обмотки трансформатора. Важливим є розгляд перенапруги в автотрансформаторах і трансформаторах підстанцій, розгляд системних рішень щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги. Це дозволяє отримати теоретичні знання і практичні навички захисту обладнання електричних мереж від перенапруги. В умовах нашої реальності, коли електричні мережі є зношеними, а ізоляція обладнання є старою і фізично не може витримати можливі перенапруги, тема роботи є актуальною.

Аналіз попередніх досліджень.

Хвильові процеси в ЛЕП виникають при будь-яких комутаціях [2-3]:

- включення на напругу джерела живлення (ДЖ);
- відключення від ДЖ;
- виникнення коротких замикань (КЗ);
- ураження ЛЕП ударом блискавки.

Електромагнітне збурення від точки виникнення поширюється в обох напрямках і супроводжується втратами енергії на нагрів й на іонізацію повітря навколо проводу. Диференційні рівняння при нехтуванні цими втратами приймають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

де L_0 , C_0 - погонні параметри ЛЕП на одиницю довжини, відповідно (індуктивний опір та ємнісна провідність).

Рішенням цих рівнянь є хвильові функції напруги та струму:

$$\left. \begin{aligned} u &= u^+ + u^- = \underbrace{F^+(x-v \cdot t)}_{\text{пряма хвиля}} + \underbrace{F^-(x+v \cdot t)}_{\text{зворотня хвиля}} \\ i &= i^+ - i^- = \underbrace{\frac{1}{z} F^+(x-v \cdot t)}_{\text{пряма хвиля}} - \underbrace{\frac{1}{z} F^-(x+v \cdot t)}_{\text{зворотня хвиля}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Хвильовий опір ЛЕП, якщо не враховувати втрати потужності, визначається наступним чином:

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (3)$$

Швидкість розповсюдження хвилі, як відомо, є залежною від наступних параметрів

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} \quad (4)$$

З урахуванням того, що швидкість світла складає $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек} = 300 \text{ м/мксек}$ якщо враховувати конструкцію ліній електропередачі, то

$$\left. \begin{aligned} \text{повітряні ЛЕП } \varepsilon' = \mu' = 1 & \implies v = c \\ \text{кабельні ЛЕП } \varepsilon' \approx 4, \mu' = 1 & \implies v = \frac{c}{2} \end{aligned} \right\}$$

Формулювання мети статті.

Метою даної роботи є розгляд перенапруги в обладнанні підстанцій, розгляд системних рішень щодо захисту обладнання підстанцій від перенапруги.

Основний матеріал досліджень.

Параметри хвиль є функціями просторових координат $x-v \cdot t$ і $x+v \cdot t$ в заданий момент часу t . Ці ж хвилі є функціями часу.

Якщо t – час початку процесу в точці $x=0$, а v – швидкість хвилі, то час, що визначається від моменту приходу початку хвилі у точку x

$$t' = t - \frac{x}{v}$$

Таким чином, пряма й обернена хвиля, складають:

$$\left. \begin{aligned} F^+(t') &= F^+\left(t - \frac{x}{v}\right) \\ F^-(t') &= F^-\left(t - \left(-\frac{x}{v}\right)\right) = F^-\left(t + \frac{x}{v}\right) \end{aligned} \right\}$$

З рівняння (2) робиться висновок, що для прямих та зворотних хвиль є справедливі твердження:

$$i^+ = \frac{u^+}{z}$$

$$i^- = \frac{u^-}{z}$$

Хвильовий опір залежить від конструкції ЛЕП:

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 60 \ln \left(\frac{2h}{r_{np}} \right) = 138 \lg \left(\frac{2h}{r_{np}} \right)$$

де h – середня висота проводу над землею, r_{np} – радіус проводу.

На практиці для різних конструкцій ЛЕП

$$\left. \begin{aligned} \text{повітряні ЛЕП} & \implies z = \begin{cases} 350 - 400 \text{ Ом з розщепленням} \\ 450 - 550 \text{ Ом без розщеплення} \end{cases} \\ \text{кабельні ЛЕП} & \implies z = 5 - 20 \text{ Ом} \end{aligned} \right\}$$

Висновок: за умови однакової напруги мережі хвиля напруги буде більше в кабельній ЛЕП, ніж у повітряній, через різницю хвильового опору.

З рівнянь (3) і (4) отримуються індуктивність та ємність ЛЕП:

$$\left. \begin{aligned} L &= L_0 \cdot l = \frac{z}{v} \cdot l \\ C &= C_0 \cdot l = \frac{1}{z \cdot v} \cdot l \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Далі у роботі використовуються наступні позначення: A – вузлова точка; z_n – комплексне навантаження, яке складається з r, L, C ; u^+, u^-, u – напруга падаючої, відбитої, заломленої хвиль відповідно; i^+, i^-, i – струми падаючої, відбитої, заломленої хвиль відповідно.

З рівняння (2) маю систему рівнянь, яка використовується для визначення параметрів заломленої хвилі

$$\left. \begin{aligned} u &= u^+ + u^- \\ i \cdot z &= u^+ - u^- \end{aligned} \right\}$$

Таким чином

$$u + i \cdot z = 2 \cdot u^+ \quad (6)$$

Згідно рис. 1, а u, i – напруга на навантаженні, струм в навантаженні. Рис. 1, б є розрахунковою схемою заміщення – схемою Петерсона.

Отже алгоритм розрахунків має наступні етапи:

По-перше, визначаються параметри навантаження z_n і системи електропередачі z , шляхом заміни кола зі розподіленими параметрами колом зі зосередженими параметрами.

Наступним етапом задається напруга джерела живлення $u_0 = 2 \cdot u^+$.

За виразом (6) визначаються напруга і струм заломленої хвилі, а напруга заломленої хвилі далі використовується для визначення напруги відбитої хвилі:

$$u^- = u - u^+$$

Рисунок 1 – Для параметрів заломленої хвилі

Для зручності розрахунків використовують метод операторних перетворень.

На його основі комплексний опір навантаження z_n представляється операторним опором $z_n(p)$, який включає операторні опори $r, pL, \frac{1}{pC}$.

Таким чином, зв'язок між падаючою u^+ , заломленою u і відбитою u^- хвилями визначається через коефіцієнт заломлення α і коефіцієнт відбиття β відповідно:

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_n}{z + z_n} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{z_n - z}{z_n + z}$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

З рівняння (7)

$$\alpha - \beta = \frac{2 \cdot z_n}{z + z_n} - \frac{z_n - z}{z_n + z} = 1$$

В залежності від виду навантаження можливі різні значення коефіцієнта заломлення α і коефіцієнта відбиття β :

якщо $z_n(p) = r$, то α, β – дійсні числа;

якщо $z_n(p) = \infty$, режим холостого ходу (ХХ), то

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_n}{z + z_n} = \frac{2 \cdot \infty}{z + \infty} = \frac{2 \cdot \frac{\infty}{\infty}}{\frac{z}{\infty} + \frac{\infty}{\infty}} = \frac{2 \cdot 1}{0 + 1} = 2$$

$$\beta = \frac{z_n - z}{z_n + z} = \frac{\infty - z}{\infty + z} = \frac{\frac{\infty}{\infty} - \frac{z}{\infty}}{\frac{\infty}{\infty} + \frac{z}{\infty}} = \frac{1 - 0}{1 + 0} = 1$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ = 2 \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ = 1 \cdot u^+ \end{aligned} \right\}$$

якщо $z_n(p) = 0$, режим короткого замикання (КЗ), то

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_n}{z + z_n} = \frac{2 \cdot 0}{z + 0} = 0$$

$$\beta = \frac{z_n - z}{z_n + z} = \frac{0 - z}{0 + z} = -1$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ = 0 \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ = -1 \cdot u^+ \end{aligned} \right\}$$

Висновки:

- режим ХХ – струм навантаження буде спадати до нуля, а напруга на навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде зберігати знак.

- режим КЗ – напруга навантаження буде спадати до нуля, а струм на навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде змінювати знак.

Таким чином, коли обладнання підстанції тримається під охоронною напругою в режимі близькому до ХХ, то ми маємо велику вірогідність виникнення пошкодження обладнання під час атмосферної перенапруги.

Для можливості аналізу процесів, які виникають при русі хвиль, використовують три типи хвиль:

- хвилі прямокутної форми $u_0(t) = U_0$ тривалістю t_{xe} (рис. 2, а);
- хвилі косокутної форми $u_0(t) = \alpha \cdot t$ тривалістю фронту t_{fp} (рис. 2, б);
- хвилі аперіодичної $u_0(t) = u_0 \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ або експоненціальної $u_0(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha t}$ форм (рис. 2, в).

Рисунок 2 – Приклад хвиль

Якщо прийняти, що до електричної схеми прикладена хвиля одиничної величини (падаюча хвиля) $u^+ = u_0 = 1$, то заломлена хвиля (струму чи напруги) може представлятися перехідною функцією $u(t) = h(t)$ і за допомогою інтеграла Дюамеля знаходиться невідоме значення заломленої напруги $u(t)$ при будь-якій формі прикладеної напруги $u_0(t)$.

При більш детальному аналізі процесів були зроблені наступні висновки:

1) за умови однакової напруги мережі хвиля напруги буде більше в кабельній ЛЕП, ніж у повітряній, через різницю хвильового опору.

2) в режимі ХХ струм навантаження буде спадати до нуля, а напруга на навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде зберігати знак. В режимі КЗ – напруга навантаження буде спадати до нуля, а струм на

навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде змінювати знак. Таким чином, при знаходженні обладнання підстанції під охоронною напругою в режимі близькому до XX, є вірогідність виникнення пошкодження обладнання під час атмосферних перенапруг.

3) Для підстанцій, які отримують живлення повітряними ЛЕП, доцільним є використання ємності для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі, а для підстанцій, які отримують живлення кабельними ЛЕП, доцільним є використання індуктивності для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі.

4) Індуктивність та ємність можуть здійснити істотний вплив на амплітуду хвилі напруги за умови, що $t_{\text{хв}} \ll T$.

5) Ємність виконує захисні функції в усіх напрямках, як заломленої, так і відбитої хвилі, а індуктивність лише згладжує заломлену хвилю.

Отримані співвідношення можна використовувати для дослідження перенапруги у вузлах підключення вузлових підстанцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. 2017. 617 с.
2. Temporary overvoltage suppression in half-wavelength transmission lines during asymmetric faults / F. P. Albuquerquea, R. F. Pereiraa, E. C. Costaa, L. H. Libonib. // Electric Power Systems Research. – Volume 178, 2020.
3. Overvoltage protection for high voltage power transformers. / D. T. Mendes de Souza¹, Br. Valverde, J. A. Pomilio // Eletrôn. Potên., Fortaleza. – Volume 25, №. 1, pp. 125-134, 2020.

REFERENCES

1. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. 2017. 617 p/
2. Temporary overvoltage suppression in half-wavelength transmission lines during asymmetric faults / F. P. Albuquerquea, R. F. Pereiraa, E. C. Costaa, L. H. Libonib. // Electric Power Systems Research. – Volume 178, 2020.
3. Overvoltage protection for high voltage power transformers. / D. T. Mendes de Souza¹, Br. Valverde, J. A. Pomilio // Eletrôn. Potên., Fortaleza. – Volume 25, №. 1, pp. 125-134, 2020.

Надійшла до редколегії 19.04.2021

Рецензент: д.т.н. Нікіфоров А. П.

G. SHEINA

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Investigation of overvoltage in electrical networks. The paper considers the processes that occur in power lines and power transformers at atmospheric and switching overvoltages. Atmospheric overvoltages are divided into two types: direct, which occur due to a direct lightning strike; and induction - occur at any switching. Direct overvoltages reach values sufficient to cover the insulation of any voltage class. Protection of power transmission lines from them - suspension of grounded lightning protection cables, protection of substation equipment - installation of lightning rods. It is important to study the wave processes in power lines that occur when switching, which occurs when the power supply is turned on, when disconnected from the power supply, in the event of short circuits, when power lines are struck by lightning. In addition, it is important to study the wave processes in power transformers, the effect of the pulse corona, the effect of overvoltage on the transformer windings. In a more detailed analysis of the processes, the following conclusions were made: 1) under the condition of the same mains voltage, the voltage wave will be higher in the cable transmission line than in the air, due to the difference in impedance. 2) in the XX mode, the load current will drop to zero, and the load voltage will double. The voltage of the reflected wave will keep the sign. In short-circuit mode, the load voltage will drop to zero and the load current will double. The voltage of the reflected wave will change the sign. Thus, when the substation equipment is under a voltage close to XX, there is a probability of equipment damage during atmospheric overvoltages. 3) For substations that are powered by overhead power lines, it is advisable to use a tank to smooth the slope of the refracted wave, and for substations that are powered by cable transmission lines, it is advisable to use inductance to smooth the slope of the refracted wave. 4) Inductance and capacitance can have a significant effect on the amplitude of the voltage wave, provided that. 5) Capacitance performs protective functions in all directions, both refracted and reflected wave, and inductance only smooths the refracted wave. The obtained relations can be used to study the overvoltage in the connection nodes of node substations.

Key words: *power line, transformers, atmospheric and switching overvoltages, isolation, protection, lightning protection cables, lightning conductors, switching on, switching, short circuits, wave processes.*