

Р.О. БУЙНИЙ, канд. техн. наук, доц., ЧДТУ, Чернігів
В.В. ЗОРИН, д-р техн. наук, проф., НТУУ "КПІ", Київ
А.О. КВИЦИНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТЦ електроенергетики НЕК "Укренерго", Чернігів

**ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ДОВЖИНИ
КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ.
КОМЕНТАРІ ТА ЗАУВАЖЕННЯ ДО ГЛАВИ 2.3 ПУЕ**

Проаналізовано вплив ємності високовольтних ЛЕП на режим напруги. Отримано аналітичну залежність, що дозволяє розраховувати критичну довжину КЛ, за якої, при відключенні навантаження, напруга в кінці лінії не буде перевищувати допустиму напругу для ізоляції кабелю. Це дозволило обґрунтувати доцільність зміни у розділі 2.3 ПУЕ формули для визначення критичної довжини КЛ.

Проведен анализ влияния емкости высоковольтных ЛЭП на режим напряжения. Получено аналитическое выражение, которое позволяет рассчитывать критическую длину КЛ, при которой, напряжение в конце линии не будет превышать допустимого значения для изоляции кабеля в режиме холостого хода. Обоснована целесообразность замены в разделе 2.3 ПУЭ формулы по определению критической длины КЛ.

Вступ. У повітряних лініях (ПЛ) електропередавання напругою 110-750 кВ та у кабельних лініях (КЛ) напругою 35-330 кВ на режим напруги суттєво впливає ємність фаз по відношенню до землі.

Ємність фази, а також активний опір і індуктивність проводів розподілені уздовж лінії рівномірно. Схема заміщення ЛЕП з параметрами при роботі під навантаженням на рис. 1.

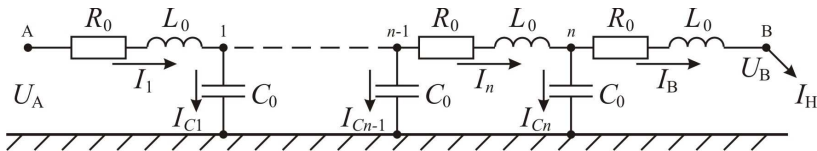


Рис. 1.

У нормальному режимі роботи струм навантаження в кінці лінії дорівнює I_n , а напруга – U_B . На елементарній ділянці лінії електропе-

редавання $n-B$ буде протікати струм $I_B = I_H$. Напряга на початку ділянки $n-B$ (у вузлі n) U_n буде більшою за напрягу U_B на величину падіння напряги в активному R_0 та індуктивному $\omega \cdot L_0$ опорах ділянки. Причому падіння напряги в активному опорі буде співпадати по фазі зі струмом I_B , а в індуктивному – випереджувати його на 90° (чверть періоду) (рис. 2).

Струм, що протікає по другій ділянці $(n-1)-n$, складається із струму I_B і струму, що відгалужується в перший конденсатор I_{Cn} , який випереджує напрягу U_n на 90° (чверть періоду). Протікання цього струму також викликає падіння напряги в активному R_0 та індуктивному $X_0 = \omega \cdot L_0$ опорах цієї ділянки і т.д. Векторна діаграма струмів та напруг у ЛЕП при роботі під навантаженням наведена на рис. 2.

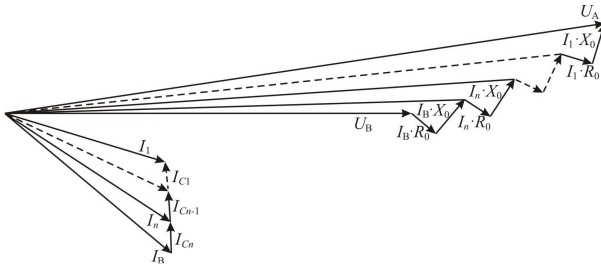


Рис. 2.

Як видно з векторної діаграми в нормальному режимі роботи напряга в на початку лінії буде більшою за напрягу в кінці лінії на величину падіння напряги в її активному та індуктивному опорах, а струм на початку лінії буде меншим за стум в кінці лінії. Це обумовлено компенсацією індуктивної складової струму навантаження ємнісним струмом, який генерує лінія.

Для високовольтних ліній електропередавання (ЛЕП) ємність лінії є джерелом реактивної потужності, що розвантажує її в нормальному режимі роботи, зменшуючи при цьому втрати напруги, втрати потужності та електричної енергії.

Розглянемо випадок, коли струм навантаження в кінці лінії $I_B = I_H = 0$, що характерно для режиму мінімальних навантажень, та аварійного відключення навантажень системою автоматикою. Схема заміщення ЛЕП з параметрами у режимі холостого ходу показана на рис. 3.

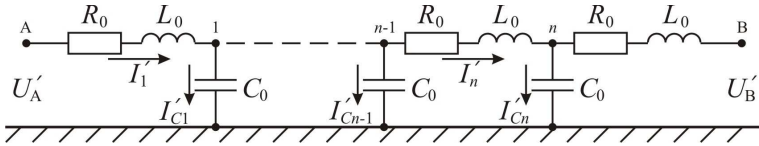


Рис. 3.

У зв'язку з тим, що струм по ділянці $n - B$ протікати не буде, то напруга $U'_B = U'_n$. В наслідок цього у вузлі n буде протікати ємнісний струм I'_{Cn} , обумовлений напругою U'_n , який буде її випереджувати на кут 90° (чверть періоду).

На ділянці $(n-1) - n$ буде протікати ємнісний струм $I'_n = I'_{Cn}$, який буде створювати падіння напруги в активному R_0 та індуктивному $X_0 = \omega \cdot L_0$ опорах ділянки. Причому падіння напруги в активному опорі буде співпадати по фазі зі струмом I'_n , а в індуктивному – випереджувати його на 90° (чверть періоду). Векторна діаграма струмів та напруг у ЛЕП у режимі холостого ходу наведено на рис. 4. Як видно на векторній діаграмі, напруга у вузлі $n-1$ буде меншою за напругу у вузлі n на величину падіння напруги, яке обумовлене ємнісним струмом і т.д.

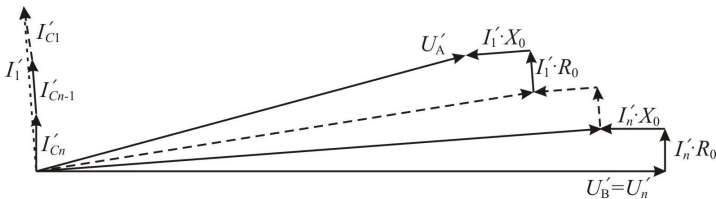


Рис. 4.

Тобто у разі відключення навантаження (режим холостого ходу лінії) напруга на початку лінії буде меншою за напругу в кінці лінії на величину падіння напруги в її активному та індуктивному опорах від протікання ємнісного струму лінії. А струм на початку лінії буде більшим за струм в кінці лінії.

Ємність ЛЕП визначає величину ємнісного струму. Для ПЛ вона розраховується за формулою [1]:

$$C_0 = \frac{2,41 \cdot 10^{-2}}{\lg(2 \cdot D_{\text{сер}}/d)}, \text{ мкФ/км}, \quad (1)$$

де $D_{\text{сер}}$ – середньогометрична відстань між проводами фаз, мм; d – діаметр проводу, мм, а для КЛ [2]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \cdot \ln(D/d)}, \text{ мкФ/км}, \quad (2)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу ізоляції; D – зовнішній діаметр основної ізоляції, мм; d – внутрішній діаметр основної ізоляції (діаметр жили), мм.

У табл. 1 і 2 наведені орієнтовні значення фазних ємностей ПЛ і КЛ електропередавання.

Таблиця 1 – Орієнтовні значення фазних ємностей та ємнісних струмів ПЛ різних класів напруг.

Параметр	Значення параметру за номінальної напруги U_H , кВ				
	35	110	330	500	750
Питома ємність фази, мкФ/км	0,0093	0,0089	0,0119	0,0121	0,0142
Питомий ємнісний струм, А/км	0,06	0,18	0,72	1,1	1,93
Зарядна потужність, квар/км	3,6	33,8	408,8	955	2503

Таблиця 2 – Орієнтовні значення фазних ємностей та ємнісних струмів КЛ різних класів напруг, виконаних одножилним кабелем з ізоляцією із зшитого поліетилену (для перерізу жили 800 мм²).

Параметр	Значення параметру за номінальної напруги U_H , кВ		
	35	110	330
Питома ємність фази, мкФ/км	0,324	0,233	0,18
Питома ємнісний струм, А/км	2,06	4,6	10,7
Зарядна потужність, квар/км	124,6	855,3	6155

Для КЛ ємність набагато більша ніж для ПЛ за рахунок меншої ві-

дстані між фазами КЛ. Протікання ємнісного струму в режимі холостого ходу (відключення навантаження) призводить до недопустимого перевищення напруги в кінці лінії і пробою ізоляції. Для його компенсації на ПЛ використовуються шунтуючі реактори, які включаються між фазою ЛЕП і землею спеціальними реакторними "вимикачами-вимикачами" при збільшенні напруги в лінії понад допустиме значення.

Мета статті. У зв'язку з значно більшою погонною ємністю КЛ, застосування шунтуючих реакторів є не ефективним (КЛ коротка, а реакторів треба багато). Тому постає проблема у визначенні допустимої (критичної) довжини КЛ, за якої при відключенні навантаження напруга в кінці лінії не буде перевищувати допустиму для ізоляції.

Основні матеріали дослідження. Для цього скористаємося теорією лінійних електричних кіл з розподіленими параметрами [3]. Напруга і струм у будь-якій точці лінії буде визначатися через комплекси напруги \dot{U}_2 та струму \dot{I}_2 в кінці лінії:

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot y) + \dot{I}_2 \cdot Z_c \cdot \text{sh}(\gamma \cdot y); \\ \dot{I} = \dot{I}_2 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot y) + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot y), \end{cases} \quad (3)$$

де γ – постійна розповсюдження; Z_c – хвильовий опір; y – відстань від кінця лінії до точки, в якій визначається напруга \dot{U} та струм \dot{I} ;

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)}; \\ Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}, \end{cases}$$

де R_0 , L_0 – поздовжній активний опір та індуктивність 1 км лінії; G_0 , C_0 – поперечна провідність та ємність 1 км лінії, Ом/км; ω – кутова частота $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Гц.

У зв'язку з тим, що кабельні лінії на напругу 110 і 330 кВ виконуються кабелем великого перерізу, то для них характерно $R_0 \approx 0$, а втрати на корону практично відсутні – $G_0 \approx 0$. Це дозволяє суттєво спростити розрахунки, прийнявши, що лінія не має активних втрат ($R_0 = G_0 = 0$) і

$$\begin{cases} \gamma = j\omega \sqrt{L_0 \cdot C_0}; \\ Z_c = \sqrt{L_0 / C_0}. \end{cases}$$

Для визначення напруги та струму на початку лінії у формулу (3) замість відстані y необхідно підставити довжину лінії l .

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot l) + \dot{I}_2 \cdot Z_c \cdot \text{sh}(\gamma \cdot l); \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot l) + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot l). \end{cases} \quad (4)$$

Користуючись формулами (4) можна визначити, чому буде дорівнювати напруга в кінці лінії, якщо відключиться навантаження, тобто $\dot{I}_2 = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot l); \\ \dot{U}_2 &= \frac{\dot{U}_1}{\text{ch}(\gamma \cdot l)} = \frac{\dot{U}_1}{\text{ch}(j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l)} = \frac{\dot{U}_1}{\cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l)}. \end{aligned}$$

Напругу \dot{U}_2 можна представити у вигляді: $\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \Delta\dot{U}$, де $\Delta\dot{U}$ – допустиме перевищення напруги для кабелю в нормальному режимі роботи. Тоді:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \Delta\dot{U} &= \frac{\dot{U}_1}{\cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l)}; & \cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l) &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 + \Delta\dot{U}}; \\ \cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l) &= \frac{1}{1 + \Delta\dot{U}/\dot{U}_1}. \end{aligned}$$

Представивши значення $\frac{\Delta\dot{U}}{\dot{U}_1}$ у відсотках, можна записати:

$$\cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l) = \frac{100}{100 + \Delta U \%}. \quad (5)$$

З формули (5) можна визначити, при якій довжині кабельної лінії l напруга на її кінці буде перевищувати напругу \dot{U}_1 на $\Delta U \%$ відсотків:

$$l = \frac{\arccos\left(\frac{100}{100 + \Delta U \%}\right)}{\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0}}.$$

У зв'язку з тим, що $\omega = 314$, а у довіднику для кабелів параметри L_0 і C_0 зазвичай приводяться у мГн/км і мкФ/км, то можна визначити таку довжину кабельної лінії, при якій напруга на її кінці в режимі холостого ходу не буде перевищувати допустимого значення:

$$l_{\text{доп}} = \frac{\arccos\left(\frac{100}{100 + \Delta U\%}\right)}{314 \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0 \cdot 10^{-9}}} \approx \frac{100 \cdot \arccos\left(\frac{100}{100 + \Delta U\%}\right)}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}, \quad (6)$$

де $\Delta U\%$ – допустиме перевищення напруги для кабелю в нормальному режимі роботи, %; L_0 – погонна індуктивність кабелю, мГн/км; C_0 – погонна ємність кабелю, мкФ/км.

Перевірку виконують за максимально допустимою довжиною лінії:

$$l \leq l_{\text{доп}}.$$

Для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену допустиме перевищення напруги в нормальному режимі складає 20% [4], тому:

$$l_{\text{доп}} = \frac{58,6}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}. \quad (7)$$

В новій редакції глави 2.3 ПУЕ для визначення критичної довжини приводиться формула [5]:

$$l_{\text{доп}} = \frac{14}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}, \quad (8)$$

яка в 4,2 рази зменшує допустиму довжину кабельної лінії електропередавання. Тому автори пропонують ввести у розділ 2.3 ПУЕ формулу (6), яка дає значення критичної довжини КЛ в залежності від допустимого перевищення напруги для кабелю в нормальному режимі роботи.

Висновки.

1. При проектуванні кабельних ЛЕП обов'язково необхідно враховувати максимально можливу довжину лінії, за якої, при відключенні навантаження, напруга в кінці лінії не буде перевищувати допустиму напругу для ізоляції кабелю.

2. В главу 2.3 ПУЕ необхідно включити формулу (6), яка дозволяє визначити критичну довжину КЛ в залежності від допустимого перевищення напруги для кабелю в нормальному режимі роботи.

Список літератури: 1. Блок В.М. Электрические сети и системы: Учебное пособие для электротехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 430 с. 2. Electric cables handbook/VICC Cables; edited by G.F. Moore. – 3rd ed. – 1997. 3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 368 с. 4. Силовые кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. – Харьков: ЗАО "Южкabelь", 2007. – 56 с. 5. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. Передавання електроенергії. Глава 2.3. Кабельні лінії напру-

гою до 330 кВ – К.: "КВЦ", 2009. – 80 с.



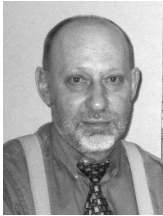
Буйний Роман Олександрович – заступник завідувача кафедри електричних систем і мереж Чернігівського державного технологічного університету, к.т.н.

Напрямок наукової діяльності: підвищення надійності розподільних електричних мереж, діагностика та проектування електричних мереж.



Зорін Владлен Володимирович – професор кафедри електропостачання інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ "КПІ", д.т.н., професор.

Напрямок наукової діяльності: підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж.



Квицинський Анатолій Олександрович – директор науково-технічного центру електроенергетики НЕК "Укренерго", к.т.н., доцент.

Напрямок наукової діяльності: підвищення ефективності роботи розподільних електричних мереж.

Надійшла до редколегії 28.09.2010