

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ КРИВИХ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ПІДКЛЮЧЕНІ РОЗІМКНУТОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

Лободзинський В.Ю., к.т.н., доцент, Галушко В.В., студентка
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. При підключенні лінії без навантаження (режим холостого ходу) до джерела, спостерігається перехідний процес, який може призвести до значних перенапруг. Велика кратність перенапруг може бути знижена шляхом аналізу кривих перехідного процесу і вибору відповідних синхронізуючих пристроїв. При цьому усталена напруга в кінці розімкнутої лінії не повинна перевищувати допустиму $U_{уст.} \approx (1,1 - 1,2)U_{ном.}$. У перехідному процесі максимальна величина перенапруги може досягати $2U_{уст.}$.

Деякі комутаційні перенапруги можливо обмежувати. Техніко-економічні обґрунтування мір захисту від аварійних перенапруг включають в себе розрахунок та аналіз комутаційних перехідних процесів для оцінки статистичного збитку, внаслідок негативного впливу цих процесів на роботу КЛ електропередачі [1-6].

Метою статті є дослідження методики чисельного розрахунку та аналітичне дослідження форми кривих перехідного процесу при підключенні розімкнутої кабельної лінії до шин електростанцій та підстанцій.

Матеріали і результати досліджень. При підключенні КЛ до шин станції або підстанції виникає перехідний процес, який можна розглядати як розімкнену лінію довжиною l , при підключенні до джерела синусоїдальної напруги з внутрішньою індуктивністю $L_{дж.}$. Максимальна напруга наводиться у кінці лінії.

Знаючи криву перехідної напруги $u(l, t)$, використовуючи операторну форму запису перехідного процесу, можемо записати:

$$u(l, p) = \frac{E(p)}{\operatorname{ch} p\tau + pT \operatorname{sh} p\tau}$$

де $T = L_{дж.}/Z_C$; $\tau = l/c = \sqrt{L'C'}l$; $Z_C = \sqrt{L'/C'}$ – хвильові опори лінії; $E(p)$ – зображення ЕРС джерела;

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi) = E_m (\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t) \stackrel{\bullet}{=} \\ \stackrel{\bullet}{=} E_m \left(\cos \varphi \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} + \sin \varphi \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right)$$

При включенні у максимум ЕРС ($\varphi = 90^\circ$)

$$u(l, t) = \frac{E_m}{p} \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{\operatorname{ch} p\tau + pT \operatorname{sh} p\tau} = \frac{E_m}{p} \frac{H(p)}{F(p)}$$

Використовуючи теорему розкладання, знаходимо оригінал:

$$u(l, t) = A_{\text{вум}} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \cos \omega_k t$$

де ω_k – кутова частота власних коливань; $A_{\text{вум}}$ – амплітуда вимушеної складової, яку визначаємо по формулі

$$A_{\text{вум}} = \frac{E_m}{\cos \omega \tau - \omega T \sin \omega \tau}$$

де A_k – амплітуда вільних складових, яку знаходимо із виразу:

$$A_k = E_m \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \frac{2}{\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau}}$$

де δ_k – коефіцієнт затухання k -ої гармоніки.

Амплітуди вільних коливань утворюють знакозмінний ряд, члени якого зменшуються зі збільшенням порядкового номеру k . При $t = 0$:

$$A_{\text{вум}} - A_1 + A_2 - A_3 + \dots = 0$$

Звідси випливає, що $A_1 > A_{\text{вум}}$, це означає, що амплітуда першої вільної складової більше амплітуди вимушеної складової, а у випадку одно частотного коливального контуру $A_1 = A_{\text{вум}}$. Максимальне значення вимушеної та перших двох вільних складових можуть співпадати, що і спостерігається в нашому випадку у момент часу $t = \pi/\omega$:

$$U_{\text{max}} \approx A_{\text{вум}} + A_1 + A_2,$$

при умові, що

$$\frac{U_{\text{max}}}{A_{\text{вум}}} \approx \frac{A_{\text{вум}} + A_1 + A_2}{A_{\text{вум}}} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{\text{вум}}} > 2$$

Характер перехідного процесу можна показати, як схему заміщення КЛ з внутрішніми параметрами з урахуванням еквівалентних перетворень послідовного з'єднання індуктивностей $L_e = L_{\text{одж}} + L'l/2$ та ємності $C_e = C'l$ можна представити простим коливальним контуром (рис. 1).

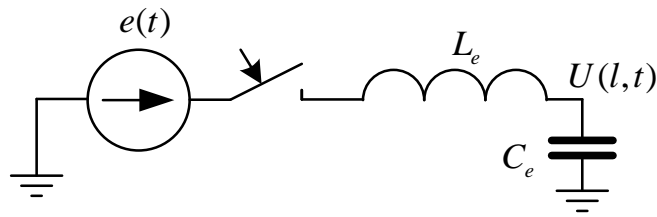


Рисунок 1 – Схема заміщення

Напряга в кінці лінії співпадає з напругою на ємності і містить складову вимушеної складової та першу вільну складову:

$$u(l,t) = u_{вим} + u_{вил} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \times \left[\sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right] \quad (1)$$

де $\varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\omega} \operatorname{tg} \varphi\right)$; ω – частота джерела; $\omega_1 = 1/\sqrt{L_e C_e}$ – частота вільних коливань; $\delta = R/2L_e$ – коефіцієнт затухання.

Із (1) випливає, що максимальна напруга у кінці лінії U_{max} визначається в основному кутом включення φ та частотою власних коливань ω_1 . Ці параметри визначають амплітуду вільних коливань

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} \quad (2)$$

Для реальних КЛ електропередачі відношення першої власної частоти до промислової більше одиниці $\omega_1/\omega > 1$.

Аналізуючи формулу (2) можемо зробити висновок, що при $\omega_1/\omega > 1$ амплітуда вільної складової має найбільше значення при кутах вмикання, близьких до 90° або 270° . Якщо ж $\omega_1/\omega < 1$, то амплітуда вільної складової буде найбільшою, коли кут вмикання φ близький до 0° або 180° , такий випадок виникає тільки в лініях надвисокої напруги, коли для збільшення пропускну здібності використовують послідовне включення ємності для компенсації індуктивного опору лінії.

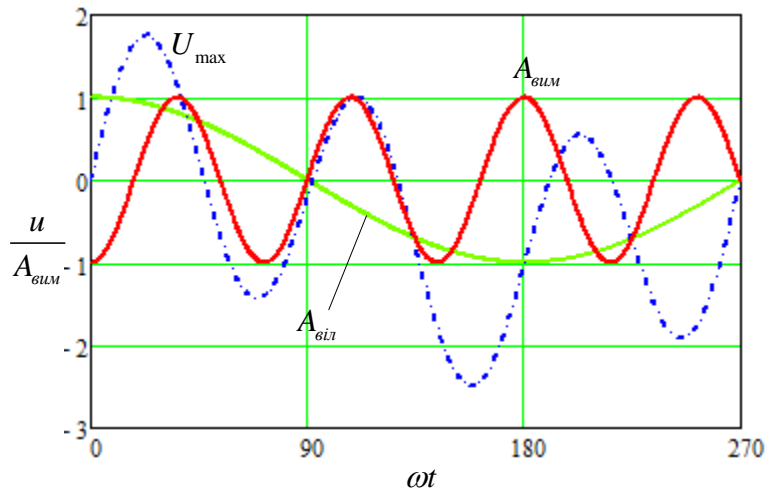


Рисунок 2 – Криві перехідного процесу при умові $\omega_1 / \omega = 5$

Розглянемо криві перехідного процесу у деяких окремих випадках. В якості прикладу проаналізуємо підключення до джерела КЛ при умові $\omega_1 / \omega = 5$ та куті вмикання $\varphi = 90^\circ$. Скориставшись формулою (1), розрахуємо амплітуду вимушеної складової $A_{вим}$ та амплітуду $A_{віль}$ вільної складової напруги (рис.2). Максимальне значення перехідного процесу досягається у перший півперіод вільних коливань. Коли напруга вимушеного режиму не встигає значно змінитися в лінії.

При умові $\omega_1 / \omega = 2$ (рис.3), найбільше значення напруги досягається на другому максимумі, бо при такому співвідношенні частот через півперіоду промислової частоти амплітуди вимушеного режиму та вільної складової додаються.

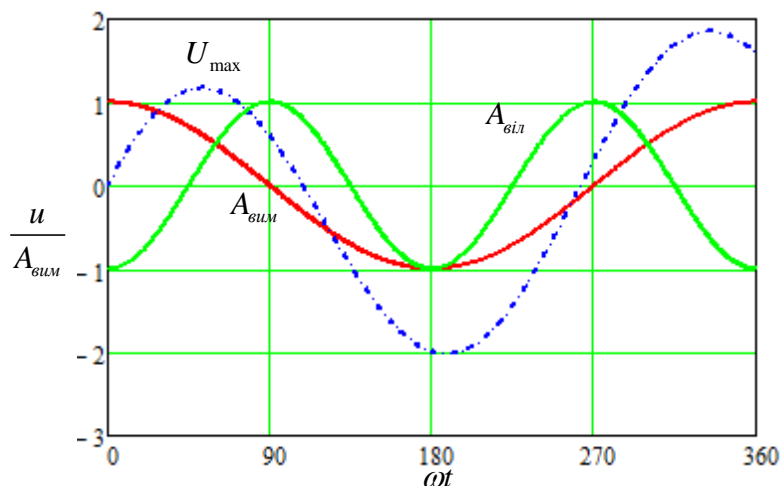


Рисунок 3 – Криві перехідного процесу при умові $\omega_1 / \omega = 2$

Висновок. У роботі проведено аналітичне дослідження комутаційних перенапруг у високовольтних КЛ електропередачі, проаналізовано форми кривих перехідного процесу. Визначено, що максимальна напруга залежить від кута початкової фази при підключенні КЛ до джерела.

Для реальних кабельних ліній електропередачі співвідношення власної частоти до промислової більше одиниці ($\omega_1 / \omega > 1$). Проведений аналіз показав, що при $\omega_1 / \omega > 1$ амплітуда вільної складової має найбільше значення при кутах включення, близьких до 90° або 270° . Якщо $\omega_1 / \omega < 1$, то амплітуда вільної складової буде найбільшою, коли кут включення φ близький до 0° або 180° .

Перелік посилань

1. Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І., Ілліна О.О.. Ідентифікація несправностей системи заземлення екранів високовольтних кабелів на основі аналізу струмів короткого замикання. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72), №2, 2022. с. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/04>.

2. Лободзинський В.Ю., Чибеліс В.І.. Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі високовольтної кабельної лінії. Енергетика: економіка, технології, екологія. №3, 2021. с. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251207>.

3. Грудська В.П., Чибеліс В.І., Лободзинський В.Ю. Дослідження автоматичного регулятора стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора. Енергетика: економіка, технології, екологія. №4, 2020. с. 84-89.

4. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 413-416. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575468.

5. Ostroverkhov N., Buryk N. Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive. IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). Kremenchuk, Ukraine, 2020. pp. 1-5. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.

6. Ostroverkhov N., Buryk N. Speed Control System of Synchronous Motor Drives with Field Weakening using the Concept of Inverse Problems of Dynamics. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine, 2020. pp. 310-314. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160008.