

УДК 621.311:004

В.М. Авраменко, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Електроенергетична система як об'єкт нелінійної електроенергетики

Дана характеристика електроенергетичної системи як істотно нелінійної динамічної системи. Виконано порівняння аналітичних і чисельних методів аналізу стійкості нелінійних систем. Розрахунками за тестовою схемою, в основі якої переріз Захід-Вінниця ОЕС України, показано, що для перевірки її стійкості «в малому» може бути недостатньо аналізу лінеаризованої моделі ЕЕС. У ремонтних режимах ОЕС України можуть виникати ситуації, коли дія АРЗ генераторів призводить до тривалих коливань параметрів режиму і небезпеки порушення стійкості ОЕС. Ефективне чисельне розв'язання задачі стійкості ЕЕС у програмному комплексі Інституту електродинаміки НАН України АВР-74, чисельно-аналітичні алгоритми якого враховують особливості ЕЕС як нелінійної системи, дає змогу аналізувати не тільки динамічну, але і статичну стійкість ЕЕС шляхом розрахунку перехідного процесу при малому скінченному збуренні. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: електроенергетична система, нелінійна система, аналітичний метод, чисельний метод, статична стійкість, скінченне збурення.

V.M. Avramenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Power system as the object of nonlinear electricity

Electric power system is a highly nonlinear dynamic system. Comparison of analytical and numerical methods of stability analysis of nonlinear systems is full execution. By calculations on the test scheme for the cross section of the West-Vinnitsa IPS of Ukraine, it is shown that to check its stability "in the small" may not be sufficient analysis of the linearized model of power system. As a small disturbance, it was decided to cut 5% of the load of the powerful substation of the Kiev energy center. The automatic regulator of excitation of a strong action which actually is installed at the station was taken into account for the generator of the block number 2 of Khmelnytsky NPP. The load was taken into account by the static characteristics of voltage and frequency. For repair conditions of IPS of Ukraine, there may be situations when the effects of automatic regulation of excitement of generators leads to oscillation mode parameters and risk of violation of stability of the ECO. Efficient numerical solution of the problem of sustainability of EES in the program of the Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine ATS-74, numerical-analytical algorithms which take into account the features of the EPS as nonlinear systems, allows to analyze not only the dynamic stability, but static stability of the EPS by computing the transient process at small finite perturbation. Referenses 6, figures 6.

Key words: power system, nonlinear system, analytical method, numerical method, static stability, the ultimate indignation.

Надійшла 30.06.2017

Received 30.06.2017

УДК 621.315.2.016.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМ КРИВИХ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ КОМУТАЦІЯХ**В.Ю. Лобозинський**

Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна

e-mail: vadim_lv@bigmir.net

Проведено теоретичне дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях у високовольтній кабельній лінії. Теоретичне дослідження дало змогу виявити основні закономірності перенапруг при характерних комутаціях. Проведено аналіз складових перехідного процесу, який дає можливість аналізувати форму кривої перехідного процесу для визначення тривалості, амплітуди та вільних складових комутаційних перенапруг, які впливають на ізоляцію високовольтної кабельної лінії. Визначено, що максимальна напруга залежить від кута вмикання та частоти власних коливань, які визначають амплітуду **Ключові слова:** перехідні процеси, перенапруга, комутація, амплітуда.

Вступ. Підвищення робочої напруги та збільшення довжини кабельних ліній (КЛ) електропередачі збільшує актуальність обмеження в них комутаційних процесів та перенап-

руг. При таких дослідженнях виникає необхідність уточнення умов для здійснення таких обмежень. Уточнення розрахунків перенапруг потребує обов'язкового та ретельного обліку основних природних факторів, таких як частотні залежності втрат у провідних середовищах КЛ. Все це визначає необхідність удосконалювати математичні моделі та алгоритм розрахунку перехідних процесів і використання для їх реалізації обчислювальної техніки.

Кабельні лінії високої та надвисокої напруг мають коливальний характер, оскільки містять зосереджені та розподілені індуктивності та ємності. В нормальних режимах передачі потужності ці коливальні властивості не проявляються. Однією з причин виникнення коливань електричної та магнітної енергії є планові та аварійні комутації. Кожна комутація викликає перехідний процес, який може супроводжуватися перенапругами та деградацією ізоляції кабелів.

Деякі комутаційні перенапруги можливо обмежувати. Техніко-економічні обґрунтування заходів захисту від аварійних перенапруг включають у себе розрахунок та аналіз комутаційних перехідних процесів для оцінки статистичного збитку внаслідок негативного впливу цих процесів на роботу КЛ електропередачі [1-3, 6].

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

Матеріали та 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 $u(l, t)$ та 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; $e = E_m \sin(\omega t + \varphi) = E_m (\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t) \stackrel{\bullet}{=} E_m \left(\cos \varphi \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} + \sin \varphi \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right)$.

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:

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

де ω_k – кутова частота власних коливань; $A_{\text{вим}}$ – амплітуда вимушеної складової, яку визначаємо за формулою

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

де A_k – амплітуда вільних складових, яку знаходимо з 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 -ї гармоніки.

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

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

Звідси випливає, що $A_1 > A_{\text{вим}}$, це означає, що амплітуда першої вільної складової більша за амплітуду вимушеної складової, а у випадку одночастотного коливального контура $A_1 = A_{\text{вим}}$.

На рис. 1 показано криву напруги у кінці лінії та її складові ($L_{\text{дж}}/Z_C = 0,3$): 1 – вимушена складова; 2 – перша гармоніка; 3 – друга гармоніка.

Максимальне значення вимушеної та перших двох вільних складових можуть співпадати, що і спостерігається в нашому випадку на момент часу $t = \pi/\omega$:

$U_{\text{max}} \approx A_{\text{вим}} + A_1 + A_2$, за умови, що

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

Характер перехідного процесу можна показати як Т-подібну схему заміщення КЛ з внутрішніми параметрами індуктивних $L'l$ та ємнісних $C'l$ елементів на одиницю довжини лінії l , яка під'єднана до джерела синусоїдальної напруги з внутрішньою індуктивністю $L_{\text{дж}}$ (рис. 2).

Схему заміщення (рис. 2) з урахуванням еквівалентних перетворень послідовного з'єднання індуктивностей $L_e = L_{\text{дж}} + L'l/2$ та ємності $C_e = C'l$ можна представити простим коливальним контуром (рис. 3).

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

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

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

Із формули (1) випливає, що максимальна напруга у кінці лінії U_{max} визначається в основному кутом вмикання 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 оди-

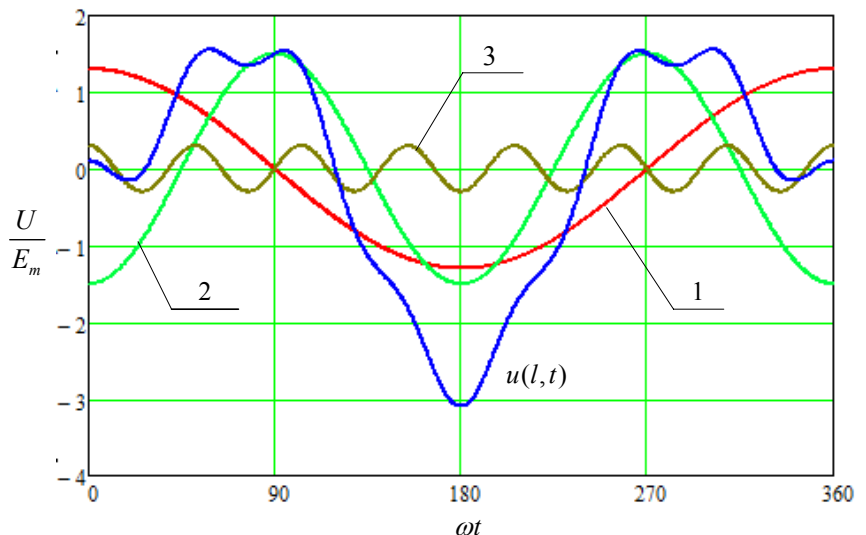


Рис. 1

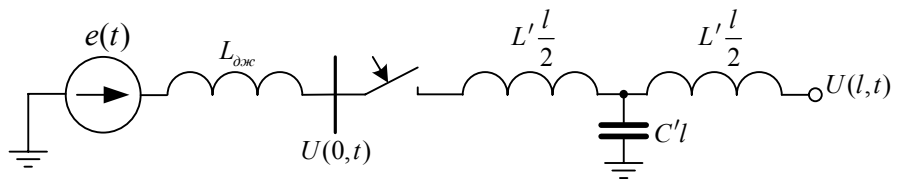


Рис. 2

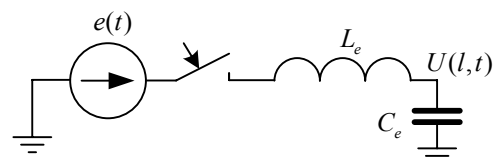


Рис. 3

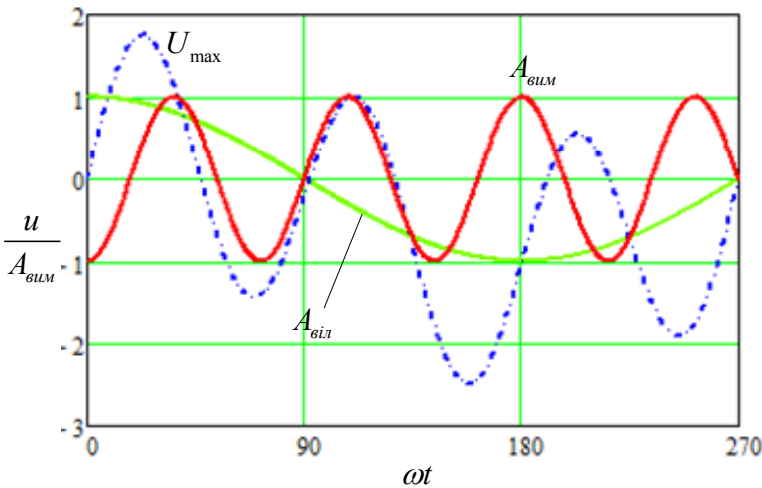


Рис. 4

ниці $\omega_1 / \omega > 1$ [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° [5, 7]. 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 пропускної спроможності використовують послідовне вмикання ємності для компенсації індуктивного опору лінії.

Розглянемо криві перехідного процесу в деяких окремих випадках. Для прикладу проаналізуємо підімкнення 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. 4). Максимальне значення перехідного процесу досягається за перший півперіод вільних коливань, коли напруга вимушеного режиму не встигає значно змінитися в лінії.

За умови $\omega_1 / \omega = 2$ (рис. 5) найбільше значення напруги досягається на другому максимумі, бо при такому співвідношенні частот через півперіоду промислової частоти амплітуди вимушеного режиму та вільної складової додаються.

У дуже рідкісних випадках можливе виконання умови резонансу на промисловій частоті за умови $\omega_1 = \omega$. При цьому напруга у коливальному контурі буде визначатися виразом

$$u(l, t) = E_m \frac{\omega L_e}{R} (1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega t + \varphi). \tag{3}$$

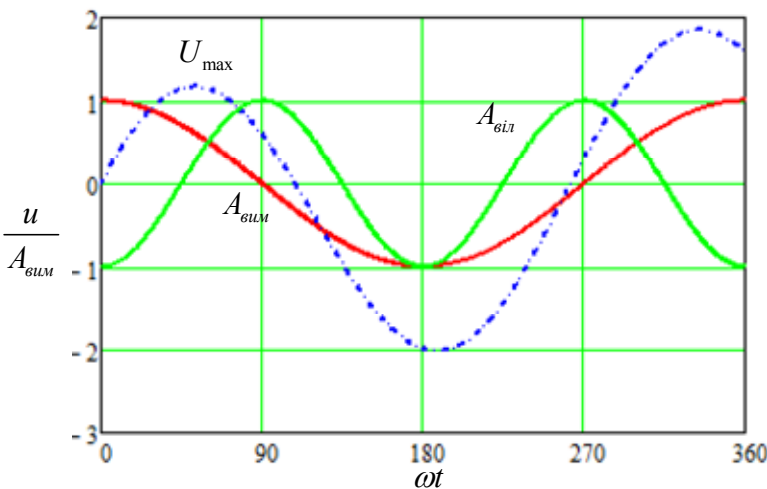


Рис. 5

З формули (3) можна зробити висновок, що напруга поступово збільшується та досягає максимального значення у межах вимушеного режиму, яке складає $E_m \frac{\omega L_e}{R} = (10 \dots 20) E_m$. Це в декілька разів перевищує ЕРС джерела, що визначається високою добротністю контура реальної лінії.

Розглянуті особливості перехідного процесу у простому коливальному контурі зберігаються і для лінії, в якій існує нескінченне число гармонік вільної складової.

При $e(t) = A_{вим} \sin(\omega t + \varphi)$ напруга в кінці лінії

$$u(l, t) = A_{вим} \sin(\omega t + \varphi) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k),$$

де $\varphi_k = \arctg \left[\frac{\omega_k}{\omega} \operatorname{tg} \varphi \right]$; δ_k – коефіцієнт згасання.

Визначення коефіцієнта згасання δ_k є непростим завданням. За даними вимірювання на діючих високовольтних КЛ середнє значення δ_k може буде оцінено 30 с^{-1} (або $0,1 \text{ рад}^{-1}$), що відповідає зменшенню амплітуди вільних коливань за період T промислової частоти на 45 % [4].

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 ввімкнення, близьких до 90° або 270° . Якщо $\omega_1 / \omega < 1$, то амплітуда вільної складової буде найбільшою, коли кут ввімкнення φ близький до 0° або 180° .

1. Базуткин В.В., Домховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высокого напряжения: изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
3. Золотарев В.М., Обозный А.Л. Перспективы развития силовых кабелей в электроэнергетике Украины // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 9. – С. 33–36.
4. Золотарев В.В., Чонов Е.Ю. и др. Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожарной безопасности. – Харьков: Майдан, 2013. – 49 с.
5. Лободзинский В.Ю., Чибелис В.И., Щерба А.А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при коммутациях кабельной линии электропередачи в сверхвысоковольтных трехфазных электрических сетях // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч.1. – С. 155–158.
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Василюк Л.Г. Компьютерное моделирование переходных процессов в высоковольтной кабельной линии с транспозицией экранов кабелей // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 3–13.
7. Lobodzinskiy V., Maślak 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 // IEEE, 2015. – С. 96–98.

УДК 621.315.2.016.2

В.Ю. Лободзинский

Национальный технический университет Украины «КПИ им. И. Сикорского»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Исследование формы кривых переходного процесса при коммутациях

Проведены теоретическое исследование и анализ перенапряжений переходного процесса при коммутациях в высоковольтной кабельной линии. Теоретическое исследование позволило определить основные закономерности перенапряжений при характерных коммутациях. Проведен анализ составляющих переходного процесса, который позволяет анализировать форму кривой переходного процесса для определения длительности, амплитуды и свободных составляющих коммутационных перенапряжений, которые влияют на изоляцию высоковольтной кабельной линии. Определено, что максимальное напряжение зависит от угла включения и частоты собственных колебаний, которые определяют амплитуду свободной составляющей. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: переходные процессы, перенапряжения, коммутация, амплитуда.

V.Yu. Lobodzinskiy

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

Research of the form of curves of transition process for commutations

It was conducted theoretical research and analysis of overvoltages transient phenomenon in switching transients of high-voltage cable line. Theoretical research has revealed the basic laws of overvoltages at the typical switching. The analysis of transient process components allows to analyze the shape of the transient-response curve for determination of duration, the amplitude of the forced and free components of switching overvoltages, which have effects on insulation of high-voltage cable line. It was defined that the maximum voltage is mainly determined by the switching angle and self-resonant frequency which determine the amplitude of the transient (free) component. References 7, figures 5.

Key words: transient phenomenon, overvoltage, switching, range.

Надійшла 29.06.2017

Received 29.06.2017