

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

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

В роботі досліджувалася математична модель одного з елементів системи електропостачання – ліній електропередачі. Математична модель дозволяє досліджувати експлуатаційні режими електричних мереж. Математична модель лінії електропередачі відображає всі особливості фізичних процесів при сталих і перехідних режимах та забезпечує достатню точність результатів. Вид математичної моделі ліній електропередачі залежить від прийнятих спрощень, в залежності від поставленої задачі дослідження. Метою даної роботи є аналіз математичної моделі лінії електропередачі для дослідження режимів роботи системи електропостачання, з можливістю її застосування для урахування всіх конструктивних особливостей повітряних та кабельних ліній електропередачі.

Ключові слова: математична модель, система електропостачання, лінії електропередачі, сталі режими, перехідні режими, повітряні лінії електропередачі, кабельні лінії електропередачі.

Постановка проблеми.

Дослідженню режимів роботи електричних мереж присвячено значну кількість робі. Для досліджень ліній електропередачі в них наведено різноманітні математичні моделі [1, 2]. Найбільша увага в цих роботах приділяється єдиному підходу, який враховував би всі особливості фізичних процесів як сталих, так і перехідних режимів та, крім того, забезпечував достатню точність отриманих результатів.

Аналіз попередніх досліджень.

Для ліній електропередачі необхідно враховувати їх конструктивне виконання, тому їх модель є складним елементом системи електропостачання. Крім того, вони є здатними генерувати значну ємнісну потужність, яка, в свою чергу, не залежить від потужності передачі. В сталих режимах вона впливає на поточкорозподіл в мережі; в перехідних режимах визначає величину резонансної перенапруги. Прийнята математична модель ліній електропередачі ґрунтується на деяких спрощеннях, які залежать від задачі дослідження.

Формулювання мети статті.

Метою статті є дослідження універсальної математичної моделі лінії електропередачі в системі електропостачання, яку можна застосовувати для різних режимів враховуючи всі конструктивні особливості повітряних та кабельних ліній електропередачі.

Основний матеріал досліджень.

Вихідними даними математичного моделювання електроенергетичних систем (ЕЕС) є математичні моделі окремих елементів ЕЕС. Надійність і точність отриманих результатів моделювання залежить від точності цих моделей. Тип моделей залежить від початкових прийнятих спрощень, які в свою чергу визначаються складністю фізики процесів. Завдання підвищення точності моделювання аварійних процесів в ЕЕС обумовлено значним ускладненням сучасних ЕЕС та їх обладнання, швидкодіючим релейним захистом, автоматикою управління аварійними ситуаціями та впровадженням більш високошвидкісного комутаційного обладнання.

Однією з причин значної кількості серйозних аварійних ситуацій у системі є відсутність повної та надійної інформації для моделювання режимів при проектуванні та експлуатації ЕЕС. Розробка математичної моделі трифазної лінії електропередачі, що забезпечує адекватне відображення як нормальних, так й аварійних процесів, є актуальною.

Для математичного моделювання електричних ліній електропередачі (ЛЕП) застосовується система диференціальних рівнянь еквівалентної схеми заміщення. Права частина рівнянь є частинною похідною за довжиною.

$$\begin{aligned}
 (L_a - M) \frac{\partial i_a}{\partial t} + r_a i_a + (L_{aN} + 3M) \frac{\partial i_0}{\partial t} + r_{aN} 3i_{aN} &= -\frac{\partial u_a}{\partial l} \\
 C \frac{\partial u_a}{\partial t} + 3C_M \frac{\partial (u_a - u_0)}{\partial t} &= -\frac{\partial i_a}{\partial l} \\
 (L_b - M) \frac{\partial i_b}{\partial t} + r_b i_b + (L_{bN} + 3M) \frac{\partial i_0}{\partial t} + r_{bN} 3i_{bN} &= -\frac{\partial u_b}{\partial l} \\
 C \frac{\partial u_b}{\partial t} + 3C_M \frac{\partial (u_b - u_0)}{\partial t} &= -\frac{\partial i_b}{\partial l}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$(L_c - M) \frac{\partial i_c}{\partial t} + r_c i_c + (L_{cN} + 3M) \frac{\partial i_0}{\partial t} + r_{cN} 3i_{cN} = -\frac{\partial u_c}{\partial l}$$

$$C \frac{\partial u_c}{\partial t} + 3C_M \frac{\partial (u_c - u_0)}{\partial t} = -\frac{\partial i_c}{\partial l}$$

де L_i - індуктивність кола відповідної i -тої фази лінії і землі; L_{iN} - додаткова індуктивність кола відповідної фази і землі, обумовлена лише магнітним потоком землі; M - взаємна індуктивність між будь-якими двома з трьох фаз і землею; r_i - активний опір проводу відповідної i -тої фази лінії; r_{iN} - активний опір заземлення; C_i - ємність фаза-земля; C_{Mi} - міжфазна ємність; i_a, i_b, i_c - миттєві значення фазних струмів; u_a, u_b, u_c - миттєві значення фазної напруги; l_i - довжина i -ї лінії електропередачі; i_0 - миттєві значення струму нульової послідовності

$$i_0 = \frac{i_a + i_b + i_c}{3}$$

u_0 - миттєві значення напруги нульової послідовності;

$$u_0 = \frac{u_a + u_b + u_c}{3}.$$

В математичній моделі ЛЕП слід враховувати ефект коронування, що впливає на втрати потужності. Цей метод виправданий у використанні для коротких ЛЕП (повітряні до 250 км, кабельні до 50 км).

Для урахування струмів і напруг нульової послідовності можна використовувати іншу систему координат $\alpha, \beta, 0$, перевагою якої є поєднання параметрів нульової послідовності як для напруги, так і для струмів

$$\begin{aligned} L \frac{\partial i_\alpha}{\partial t} + r i_\alpha &= -\frac{\partial u_\alpha}{\partial t} \\ L \frac{\partial i_\beta}{\partial t} + r i_\beta &= -\frac{\partial u_\beta}{\partial t} \\ L_0 \frac{\partial i_0}{\partial t} + r_0 i_0 &= -\frac{\partial u_0}{\partial t} \\ C \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} &= -\frac{\partial i_\alpha}{\partial t} \\ C \frac{\partial u_\beta}{\partial t} &= -\frac{\partial i_\beta}{\partial t} \\ C_0 \frac{\partial u_0}{\partial t} &= -\frac{\partial i_0}{\partial t} \\ i_\alpha &= \frac{2}{3} i_a - \frac{1}{3} (i_b + i_c) \\ u_\alpha &= \frac{2}{3} u_a - \frac{1}{3} (u_b + u_c) \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c) \\ u_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} (u_b - u_c) \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \\ u_0 &= \frac{1}{3} (u_a + u_b + u_c) \end{aligned} \tag{2}$$

де $i_\alpha, i_\beta, i_0, u_\alpha, u_\beta, u_0$ - миттєві значення струмів і напруг в системі координат $\alpha, \beta, 0$; r, L, C - активний опір, індуктивність, ємність трифазної лінії для позитивної та негативної послідовностей; r_0, L_0, C_0 - активний опір, самоіндуктивність, ємність трифазної лінії для нульової послідовності.

Активні та реактивні параметри (рис. 1) визначаються за відомими виразами, які враховують можливі варіанти конструкції трифазних ЛЕП. Складність визначення мають параметри нульової послідовності, такі як індуктивність та ємність між лініями та землею, через тісний вплив сусідніх ЛЕП. Для ЛЕП високої та надвисокої напруги доцільно враховувати скін-ефект для нульової послідовності.

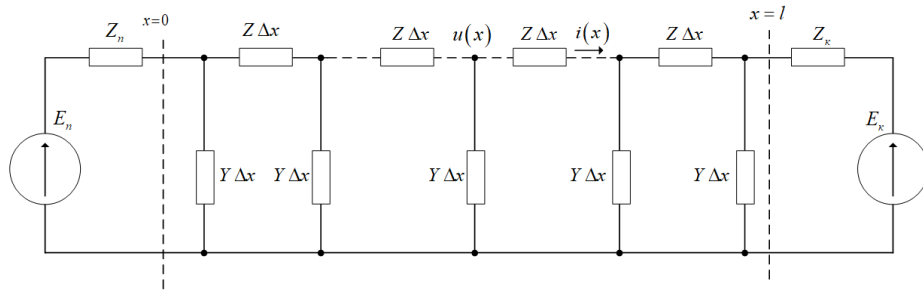


Рисунок 1 – Еквівалентна схема заміщення системи електропостачання

Активний опір землі залежить від частоти f зворотного струму:

$$r_s = f \pi^2 10^{-4} \quad (3)$$

Він практично не залежить від питомої провідності землі.

Глибина проникнення зворотного струму в землі визначається:

$$h_s = \frac{2,065}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-3}}} \quad (4)$$

Індуктивність проводу, обумовлена магнітним потоком в землі:

$$L_s = 2 \ln \left(\frac{h_s}{2h_m} \right) \cdot 10^{-4}$$

h_m -середньо геометрична висота проводів над землею.

З (3) і (4) очевидно є пряма залежність струму в землі від його частоти, яка відображається еквівалентним контуром з розподіленими чи зосередженими параметрами. Параметри цього контуру визначаються за умови:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{sk} + j\omega_k L_{sk}} = \frac{1}{r_s(\omega_k) + j\omega_k L_s(\omega_k)} \quad (5)$$

k - номер контуру, n - кількість еквівалентних контурів.

Це дозволяє враховувати скін-ефект, струми наводки, конструкцію лінії електропередачі.

Висновки.

Математична модель лінії електропередачі для дослідження режимів роботи системи електропостачання проаналізована. Вона застосовується з метою врахування конструктивних особливостей повітряних та кабельних ліній електропередачі, скін-ефект.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.

1. Нейман Л.Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: в 3т. Л.:Энергоиздат, 1981. Т.2. 415 с.
2. Kundur P. Power System Stability and Control, 3rd ed. McGraw-Hill Professional, 1994.

REFERENCES

1. Nejman L.R., Demirchyan K. S. (1981), "Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki": v3, L.: Energoizdat, T.2. 415 p.
2. Kundur P. Power System Stability and Control, 3rd ed. McGraw-Hill Professional, 1994.

Надійшла до редколегії 20.11.2020

Рецензент: Нікіфоров А.П.

G. SHEINA

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Analysis of mathematical models of transmission lines. This paper investigates a mathematical model of one elements of the power supply system - power transmission lines. The type of models depends on the initial simplifications, which in turn are determined by the complexity of the physics of processes. The task of improving the accuracy of modeling of emergency processes in the power system is due to the significant complexity of modern power systems and their equipment, high-speed relay protection, automation of emergency management and the introduction of higher-speed switching equipment. One of the reasons for a significant number of serious emergencies in the system is the lack of complete and reliable information for modeling modes in the design and operation of power systems. The development of a mathematical model of a three-phase power line, which provides adequate reflection of both normal and emergency processes, is relevant. The advanced mathematical model of power transmission lines

allows to investigate various operational modes of electric networks. The improved mathematical model of the power transmission line reflects all the features of physical processes at state modes and transient process and provides sufficient accuracy of the results. The type of mathematical model of power transmission lines depends on the accepted simplifications, depending on the task of research. The purpose of this work is to analyze the mathematical model of the power transmission line to study the modes of operation of the power supply system, with the possibility of its application to take into account all the design features of overhead and cable power lines. The mathematical model of the power line for the study of the modes of operation of the power supply system is analyzed. It is used to take into account the design features of overhead and cable power lines, skin effect.

Keywords: *mathematical model, power supply system, transmission lines, steady-state modes, transient modes, overhead transmission lines, cable transmission lines.*