

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2.016.2

Лободзинський В.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Довгаль М.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мудрик В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПОШКОДЖЕННІ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

У статті описано результати моделювання перехідних процесів при однофазному і трифазному короткому замиканні на високовольтній кабельній лінії електропередачі номінальної напруги 330 кВ. Досліджено один із можливих підходів вирішення таких завдань, що ґрунтується на використанні програмного пакета Matlab/Simulink, призначеного для моделювання та чисельного розрахунку перехідних процесів у кабельних лініях електропередачі на основі побудови багатопровідної схеми заміщення.

Ключові слова: кабельна лінія, перехідні процеси, коротке замикання, моделювання, схема заміщення.

Постановка проблеми. Високовольтні кабельні лінії (далі – КЛ) електропередачі є основою енергопостачання для промислових підприємств, комунальних та побутових споживачів електроенергії, тому наукові, технічні та економічні завдання підвищення надійності їхньої роботи є науково-технічною проблемою, що вимагає ретельного дослідження та потребує здійснення оперативного моделювання різних режимів роботи з використанням сучасної обчислювальної техніки.

Протягом останніх десятиліть у силових кабелях використовується зшита поліетиленова (СПЕ) ізоляція, яка забезпечує збільшення пропускної потужності, тривалих струмів і струмів коротких замикань при тих же перерізах струмопровідних жил, а також зменшення ємнісних струмів і діелектричних втрат, порівняно з використанням паперово-масляної ізоляції [1; 2].

На практиці широко застосовують методи розрахунку перехідних процесів в КЛ електропере-

дачі, які не дозволяють із достатньою точністю отримати форми кривих струму і напруги перехідних процесів при нелінійності навантажень і складних видів пошкоджень. [3; 4; 5] Зазвичай, при розрахунках перехідних процесів ведеться якісний або кількісний аналіз параметрів процесу, зокрема діючих значень струмів і напруг, симетричних складових, гармонійного складу сигналів струму і напруги, і не розглядається картина перехідного процесу загалом. [6; 7]

Постановка завдання. Існують два основних підходи до моделювання перехідних процесів у КЛ, які базуються на схемах заміщення лінії електричним колом із зосередженими параметрами та на представленні лінії у вигляді кола з розподіленими параметрами [8].

Під час дослідження низькочастотних перехідних процесів у КЛ або у коротких лініях, аналіз перехідних процесів, як правило, виконується на основі П- або Т-подібної схеми заміщення із зосередженими параметрами [9]. Поздовжні

й поперечні параметри R , L , C схеми заміщення лінії є функціями частоти. Якщо для досліджуваного перехідного процесу можна виділити одну характерну частоту, то в розрахунках використовують значення параметрів на цій частоті. Якщо ж перехідний процес характеризується широким спектром частот, то для кожного з параметрів синтезується додаткова схема заміщення із зосередженими параметрами, що реалізує його частотну характеристику [10; 11; 12]. Для розрахунку перехідних процесів у відносно довгій лінії можливе використання розрахункового прийому поділу цієї лінії на короткі ділянки такої довжини, яка дозволяє використовувати для кожної ділянки схему заміщення із зосередженими параметрами, за цих умов уся КЛ розглядається як ланцюгова схема заміщення.

Метою статті є розроблення методики чисельного розрахунку перехідних процесів у високовольтній трифазній КЛ, яка складається з трьох однофазних кабелів 330 кВ. Визначена мета поставила завдання дослідити один із підходів вирішення таких задач, що базуються на використанні програмного пакета Matlab/Simulink, призначеного для моделювання та чисельного розрахунку перехідних процесів у кабельних лініях електропередачі. Методика включає побудову багатопровідної схеми заміщення кабельної лінії високої напруги, розрахунок її параметрів та аналіз перехідних процесів, що дозволяє вирішувати питання безпеки роботи високовольтних кабельних ліній при перенапругах, однофазних та трифазних коротких замиканнях.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розрахунку перехідного процесу необхідно скласти схему заміщення, застосовуючи метод симетричних складових часин. Цей підхід дозво-

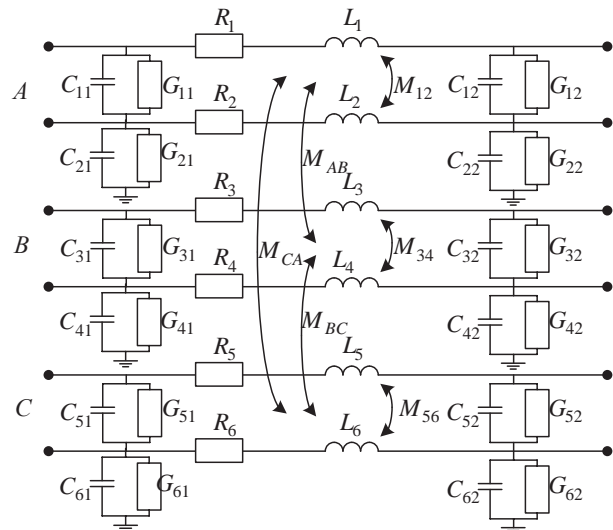


Рис. 1. Трифазна модель ділянки КЛ електропередачі у вигляді П-подібної схеми заміщення

ляє врахувати трифазну структуру, хоча й не відрізняється особливою точністю для отриманої моделі через допущення симетричності всіх елементів [13; 14], адже спрощує розрахунок параметрів схем заміщення. Слід зазначити, що отриманої точності достатньо для оцінки характеру процесів, які протікають при різних комутаціях у досліджуваному електричному колі. Однорідну ділянку кабельної лінії електропередачі замінимо П-подібною схемою заміщення, яка розглядається як трифазна модель ділянки КЛ із фіксованою довжиною. Тут враховані індуктивні та ємнісні зв'язки між сусідніми дротами і землею (рис. 1).

На рис. 1 прийняті такі позначення: $R_1..R_6$, $L_1..L_6$ – поздовжні опори та індуктивності ділянок КЛ на одиницю довжини; $C_{11}..C_{62}$, $G_{11}..G_{62}$ – поперечні опори та ємності між дротами фаз і між дротами та землею; M_{AB} , M_{AC} , M_{CA} – взаємна індуктивність

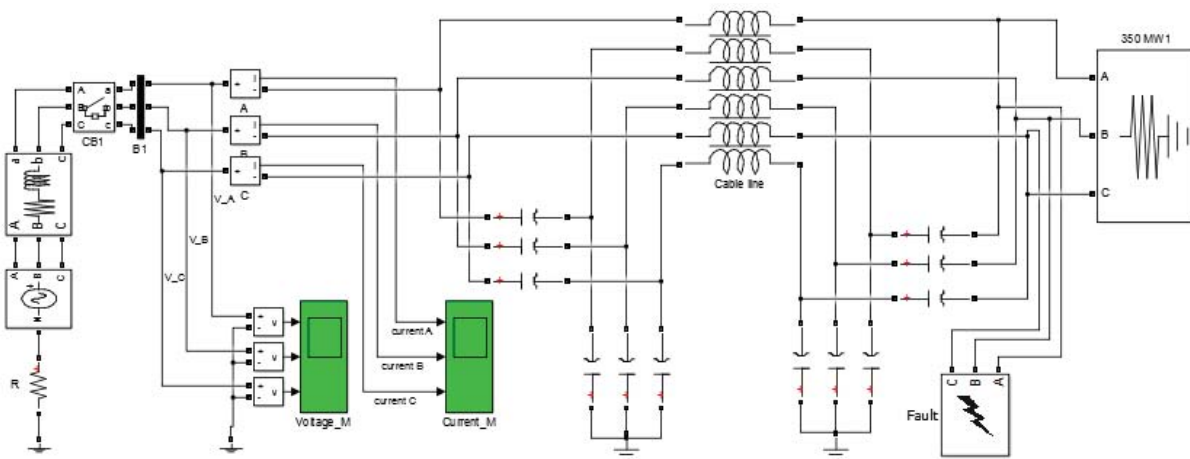


Рис. 2. Simulink-модель кабельної лінії електропередачі

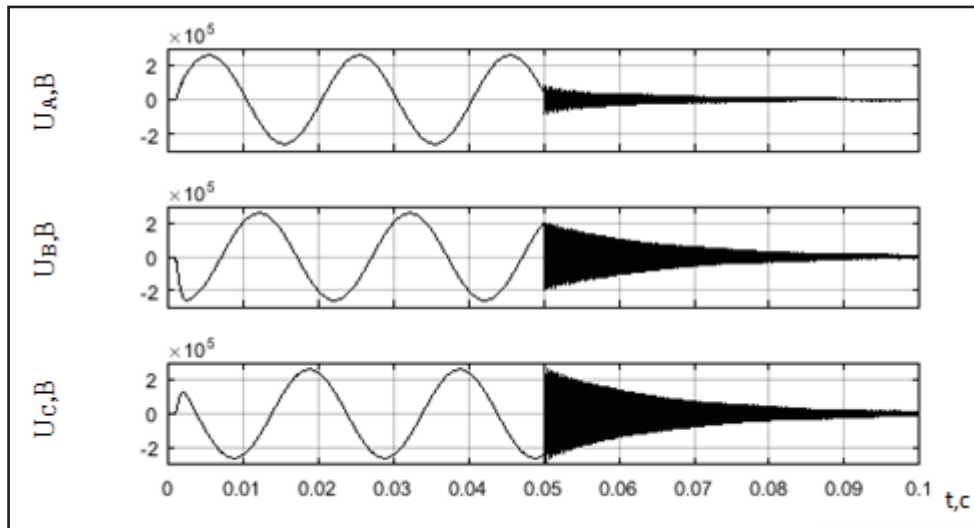


Рис. 3. Осцилограми напруг у фазах при трифазному короткому замиканні

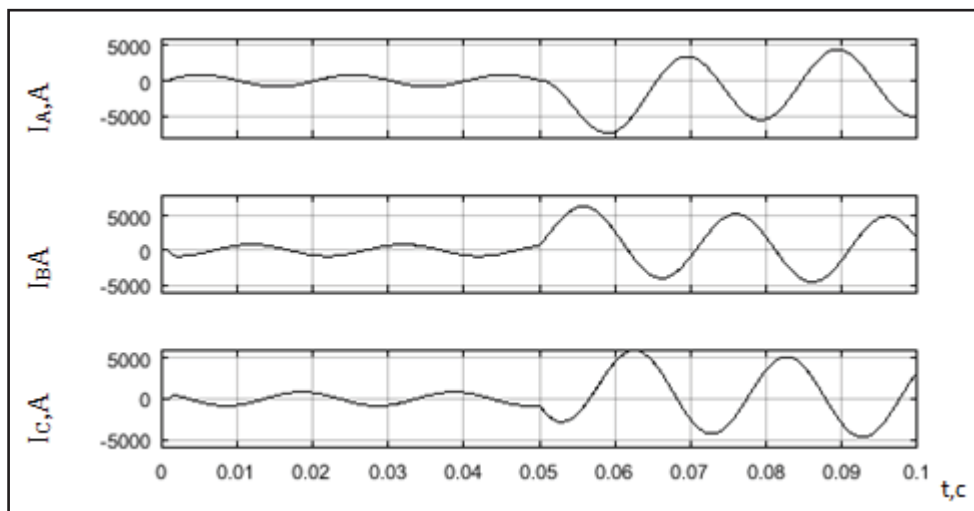


Рис. 4. Осцилограми струмів у фазах при трифазному короткому замиканні

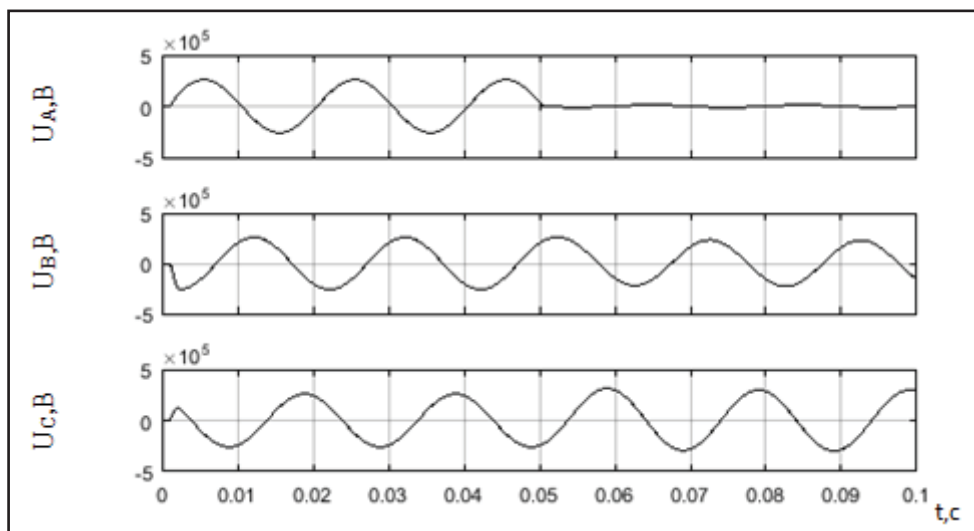


Рис. 5. Осцилограми напруг у фазах при однофазному короткому замиканні

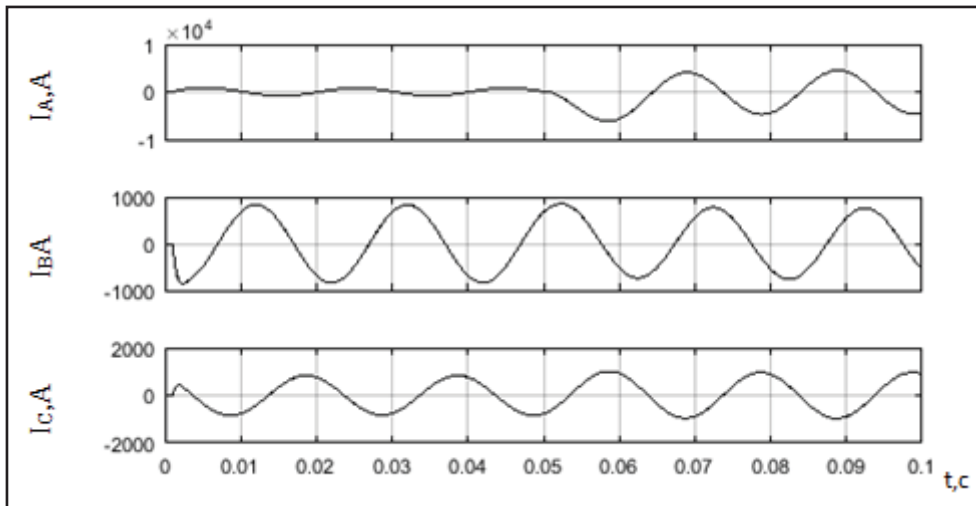


Рис. 6. Осцилограми струмів у фазах при однофазному короткому замиканні

між жилою (екраном) і сусіднім кабелем; M_{12} , M_{34} , M_{56} – взаємна індуктивність між жилою та екраном одного й того ж кабелю.

Погонні параметри кабелю (з урахуванням взаємного впливу фаз і електричних кіл один на одного та частотних залежностей цих параметрів) розраховуються з використанням відомих формул [15]. Формули достатньо складні, і без спеціальних комп'ютерних програм розрахунки значно ускладнюються.

Для більш детального аналізу перехідних процесів при однофазних і трифазних коротких замиканнях у кабельній лінії 330 кВ, авторами розроблена Simulink-модель лінії у вигляді П-подібної схеми заміщення. Модель (рис. 2) містить такі основні елементи:

- джерело трифазної напруги (опір заземлення 10 Ом) з лінійною напругою 330 кВ;
- трифазний блок, що задає еквівалентні внутрішні параметри джерела і лінії електропередачі на ділянці від джерела до КЛ;
- модель КЛ (номінальна напруга 330 кВ), яка моделюється у вигляді еквівалентного 12-ти полюсника (три жили і три екрани);
- на виході КЛ розташований блок моделювання одно- або трифазного КЗ на землю, а також блок активного трифазного навантаження, він вибирається так, щоб номінальний струм у жилах кабелів становив 800 А;
- для візуалізації струмів і напруг в основних вузлах КЛ використовуються осцилографи і трифазні вимірювальні прилади.

При моделюванні КЛ розглядалась як одноланцюгова лінія.

На осцилограмах (рис. 3, 4) показаний перехідний процес при комутації, викликаній замиканням

через 50 мс після початку моделювання. На рис. 3 бачимо, що амплітуда в момент комутації змінюється, а також виникають коливальні процеси на частоті, яка перевищує промислову.

Поява високочастотних коливань викликана наявністю в колі безлічі RLC -контурів, що виникають при послідовному з'єднанні П-схем ділянок КЛ. Коливання напруги виникають під час заряду ємностей поперечних гілок схем заміщення ділянок лінії. Амплітуда коливань струму, порівняно з напругою, майже відсутня, це зумовлено впливом індуктивностей у поздовжніх параметрах схеми заміщення. Коливання струму і напруги фази A мінімальні, порівняно з коливаннями в інших фазах, що залежить від положення вектора струму в цій фазі в момент комутації.

Осцилограми (рис. 5, 6) ілюструють результати моделювання однофазного короткого замикання фази A на землю. На рис. 6 показана звичайна картина розподілу струмів у фазах при однофазному замиканні. Струм пошкодженої фази зростає, при цьому з'являється аперіодична складова.

Висновки. У комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink розроблено програмні засоби для моделювання перехідних електромагнітних процесів у потужній електроенергетичній системі, що містить високовольтну кабельну лінію із зшитою поліетиленовою ізоляцією.

Величина напруги на вході лінії у момент трифазного КЗ має значну високочастотну складову частину і за долі секунди напруга знижується практично до нуля (рис. 3). Виникнення такої високочастотної напруги на вході лінії може призводити до прискореного старіння полімерної ізоляції кабелю (роль напівпровідних шарів у кабелі при такій високочастотній напрузі різко

знижується), а також до можливого пошкодження обладнання, розміщеного на вході кабельної лінії (реакторів, трансформаторів та ін.). Для захисту від такого виду впливу запропоновано використовувати *RC*-ланцюги, що встановлюються на вході КЛ.

Величина струму однофазного КЗ у фазі *A* досягає амплітудного значення 5 кА (рис. 6), величина напруги у цій фазі дещо знижується через падіння напруги на джерелі і лінії підведення.

Запропонована методика має такі переваги: підходить для розрахунку різних режимів роботи кабельних ліній електропередачі; дозволяє змінювати параметри і конфігурацію схеми заміщення на часовому діапазоні моделювання, що розширює спектр досліджених режимів; дозволяє розглядати не тільки процеси, які відбуваються в окремій кабельній лінії, а й оцінити її вплив на всю систему в цілому та інші електротехнічні пристрої.

Список літератури:

1. Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений. Вісник НТУ «ХПІ». 2007. № 20. С. 87–95.
2. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины: Электрические сети и системы. 2009. № 3. С. 16–21.
3. Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вишів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / За ред. Г.Г. Півняка. Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. 597 с.
4. Чабан А.В., Левонюк В.Р., Лисяк В.Г. Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередач як елемента електроенергетичної системи. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 2. С. 63-68.
5. Pivnyak G.A., Zhezhelenko I.V., Papaika Y.A. Transients in Electric Power Supply Systems. Trans Tech Publ, 2016. 392 p.
6. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання. Харків: Факт, 2005. 176 с.
7. Щедрин В.А., Ермолаев Н.М., Александрова Л.Э. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. Чебоксары: Изд. Чуваш. ун-та., 2005. 88 с.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Василец Л.Г. Компьютерное моделирование переходных процессов в высоковольтной кабельной линии с транспозицией экранов кабелей. Технічна електродинаміка. Київ, 2006. № 6. С. 3-12.
9. Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И. Электрические системы и сети. Киев: Вища шк., 1986. 585 с.
10. Marti J.R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1982. № 1. P. 147-155.
11. Olivera J.C. Paulsen R.J., Amaral M.A., et al. Electrical transmission system with variable frequency through long length cable/ Offshore Technology Conference. Houston, May, 1996.
12. Vendrusculo E.A., Pomilio J.A. Power cable parameters estimation in long distance driving of electrical machines Electrical Machines and Drivers, IEMD'99. P. 410-412.
13. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.М. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. Новосибирск, НГТУ, 2004. 368 с.
14. Valeriy Chibelis, Vadim Lobodzinskiy, Olga Illina. Research of transposition efficiency of screens of three-phase cable lines, taking into account the mutual disposition of phase: Computational problems of electrical engineering. Lviv, 2016. Vol. 6, № 2. P. 63-66.
15. Wedepohl L.M. et.al. Transient analysis of underground power-transmission system. Proc. IEE, 1973. V. 120. № 2.
16. 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), 16th International Conference on. IEEE, 2015. P. 96–98.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье описаны результаты моделирования переходных процессов при однофазном и трехфазном коротком замыкании на высоковольтной кабельной линии электропередачи номинального напряжения 330 кВ. Исследован один из возможных подходов к решению подобных задач, основанный на использовании программного пакета Matlab/Simulink, предназначенного для моделирования и численного расчета переходных процессов в кабельных линиях электропередачи на основе построения многопроводных схем замещения.

Ключевые слова: кабельная линия, переходные процессы, короткое замыкание, моделирование, схема замещения.

COMPUTER MODELING OF TRANSITION PROCESSES IN DAMAGED THE CABLE LINE OF ELECTRIC TRANSMISSION

This article describes the results of modeling the transients in a single-phase and three-phase short circuit on a high-voltage cable transmission line with a rated voltage of 330 kV. We explored one of the possible approaches to solving similar problems based on the use of the software package Matlab/Simulink, designed for modeling and numerical calculation of transients in cable power lines based on the construction of a multi-conductor substitution circuit.

Key words: cable line, transitional processes, short circuit, simulation, replacement circuit.