

2. Reliability indices applied to performance-based mechanisms in electric power distribution systems / A. M. Leite da Silva та ін. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2010. vol. 1, No. 2. pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-010-0019-4> (accessed 02.01.2025).
3. New reward and penalty scheme for electric distribution utilities employing load-based reliability indices / B. Wang та ін. IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. vol. 12, N. 15. pp. 3647–3654. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1809> (accessed 06.01.2025).
4. Ghasemi M., Dashti R. Designing a decision model to assess the reward and penalty scheme of electric distribution companies. Energy. 2018. vol. 147. pp. 329–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.021> (accessed 04.01.2025).
5. Joskow P. L. Incentive Regulation in Theory and Practice: Electricity Distribution and Transmission Networks. 2006. 63 p.
6. Stepanenko V., Zamulko A., Veremiichuk Y. Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. vol. 1254, No. 1. pp. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012043> (accessed 08.01.2025). (Ukr).

УДК 631.311

Лугін Д. М., магістрант, ORCID 0009-0009-8814-5944,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ В ДАЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 400 кВ

ANALYSIS OF COMMUTATIONAL TRANSITION MODES IN A 400 kV LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION

Анотація. В роботі представлено результати дослідження комутаційних перехідних режимів у дальній електропередачі напругою 400 кВ. Розглянуто особливості виникнення комутаційних перенапруг під час експлуатації та маніпуляцій з лініями електропередачі, включаючи постановку під напругу, оперативні перемикавання, та цикли автоматичного повторного ввімкнення. Оцінено вплив запізнення електромагнітної хвилі та можливих резонансних явищ на перенапругу в довгих лініях. Визначено заходи з обмеження перенапруги для забезпечення надійної роботи лінійної ізоляції. Бібл. 9, рис. 5., табл. 1.

Ключові слова. комутаційна перенапруга, перехідний процес, дальня електропередача, ефект Ферранті.

Abstract. The paper presents the results of a study of switching transients in a 400 kV long-distance power transmission line. The peculiarities of switching overvoltages during operation and manipulation of power lines, including energization, operational switching, and automatic reclosing cycles, are considered. The influence of electromagnetic wave delay and possible resonance phenomena on overvoltage in long-distance lines is estimated. Measures to limit the overvoltage to ensure reliable operation of line insulation are determined. Ref. 9, Fig. 5, Tabl.1.

Keywords. switching overvoltage, transient process, long-distance transmission line, Ferranti effect.

Вступ. Під час експлуатації електропередач надвисокої номінальної напруги особливої уваги потребують задачі аналізу комутаційних перехідних процесів та виникаючих при цьому перенапруг, які утворюються під час встановлення лінії електропередачі під напругу, увімкнення електропередачі в роботу, оперативних перемикань робочої схеми, здійснення циклів автоматичного повторного ввімкнення (АПВ) тощо [1–4]. При цьому слід зважати на жорстке обмеження допустимої перенапруги в електропередачах надвисокої номінальної напруги за умовами роботи лінійної ізоляції [5–7]. Проблема ускладнюється особливостями перебігу перехідних процесів в дальніх електропередачах, де відчувається запізнення електромагнітної хвилі під час її поширення вздовж лінії. Також слід зважати на можливі резонансні явища, котрі підсилюють перенапругу в лініях великої та надвеликої довжини [8].

Метою дослідження є аналіз усталених та комутаційних перехідних процесів в дальній електропередачі напругою 400 кВ та визначення заходів, направлених на обмеження перенапруги.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв’язано такі задачі:

1. Створено модель досліджуваної електропередачі в середовищі PowerFactory.
2. Проведено моделювання характерних усталених режимів досліджуваної електропередачі і проаналізовано розподіл напруги, струму та реактивної потужності вздовж лінії.
3. Проведено дослідження комутаційних та аварійних електромагнітних перехідних процесів в досліджуваній лінії електропередавання.
4. Досліджено вплив обмежувачів перенапруги на перебіг перехідних процесів та рівні перенапруги, які виникають в лінії.

Матеріал і результати досліджень. В роботі досліджено електропередачу напругою 400 кВ завдовжки 400 км, виконану в габаритах лінії 750 кВ. Електропередача складається з двох ділянок, перша ділянка довжиною 285 км, виконана пучком з п’яти проводів АС-400 на опорах ПП-750-1, друга ділянка виконана довжиною 115 км виконана пучком з чотирьох проводів АС-525 на опорах U45Р. Електропередача синхронізована з електромережею напругою 750 кВ через групу однофазних автотрансформаторів АОДЦТН-417000/750/400. Для компенсації надлишкової зарядної потужності лінії встановлено групи однофазних шунтувальних реакторів РОМБС-110000/750 та РОДЦ-110000/750 на початку та наприкінці електропередачі відповідно. Розрахункову схему електропередачі в середовищі PowerFactory наведено на рис. 1.

Виконання повітряної лінії в габаритах 750 кВ зумовило збільшення натуральної потужності та пропускної здатності електропередачі, у порівнянні з аналогічною лінією в габаритах 400 кВ, що можна побачити

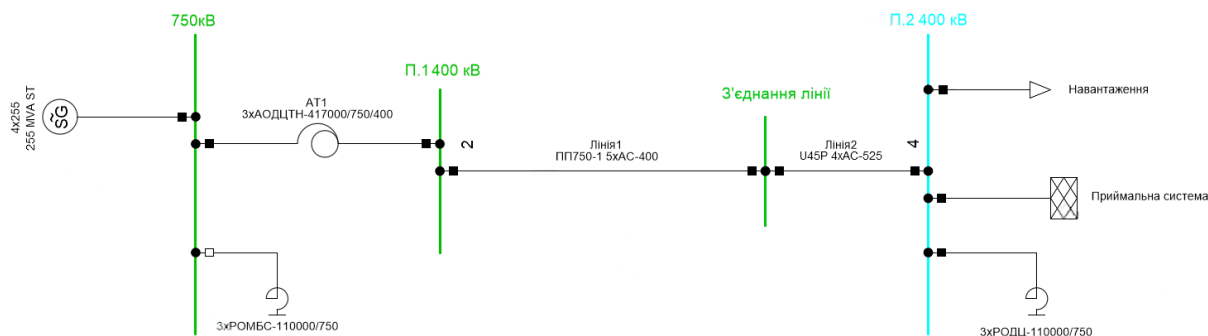


Рисунок 1. Розрахункова схема електропередачі

порівнявши параметри в табл. 1. Також збільшеною є величина зарядної потужності лінії, що впливає на режим напруги в електропередачі та баланс реактивної потужності в суміжних енергосистемах.

Таблиця 1. Електротехнічні параметри лінії в габаритах 750 кВ і 400 кВ

	1-ша Ділянка 750 кВ	2-га Ділянка 750 кВ	Ділянка 400 кВ
довжина, км	285	115	400
погонний резистанс R, Ом/км	0,01465	0,01605	0,02973
погонний реактанс X, Ом/км	0,2237	0,2348	0,3269
погонний суццептанс B, мкСм/км	5,1115	4,8420	3,6105
натуральна потужність, МВт	764,392	726,191	531,085
зарядна потужність, кВАр/км	817,84	774,72	577,68

Аналіз усталених режимів електропередачі показав, що виникнення ефекту Ферранті в лінії зумовлює збільшення напруги в проміжних точках лінії в режимі однобічного увімкнення до 10 % від номінальної напруги електропередачі, що проілюстровано на рис. 2.

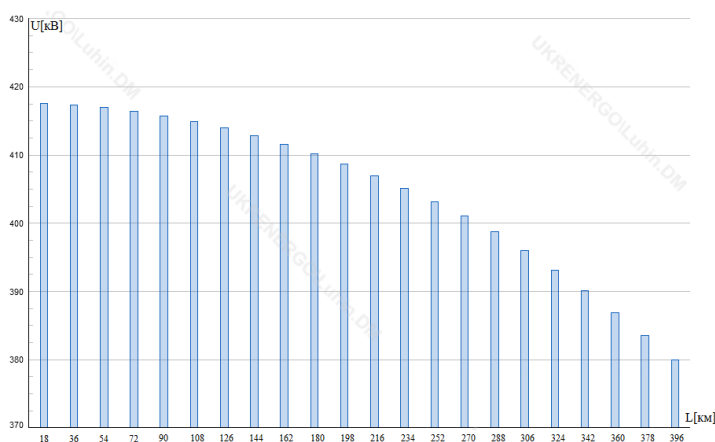
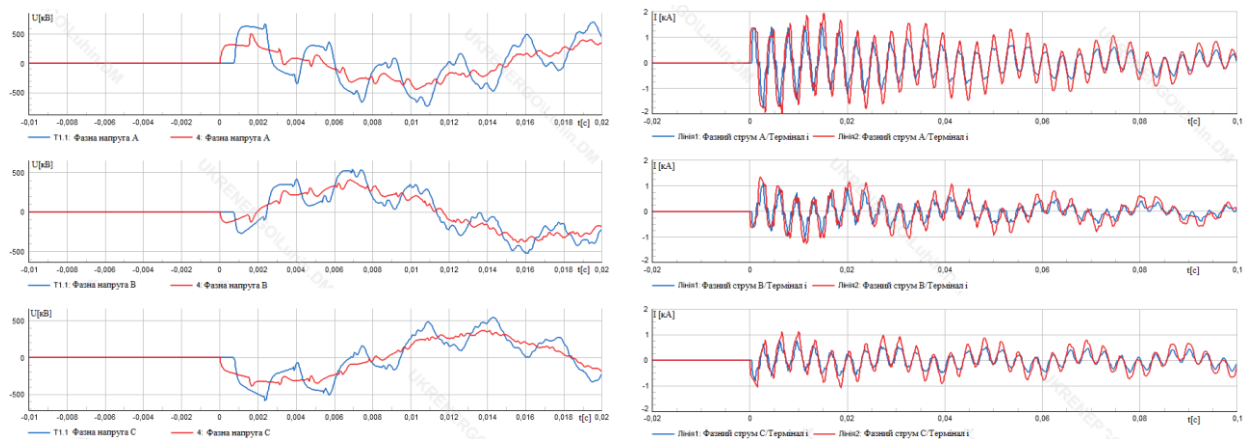


Рисунок 2. Епюра розподілу напруги вздовж лінії в режимі однобічного увімкнення

Ще одна конструктивна особливість досліджуваної лінії полягає в її поздовжній неоднорідності, пов'язаної з виконанням електропередачі такою, що складається з двох ділянок із різними характеристиками. Як наслідок, перебіг перехідних процесів в лінії супроводжується багатократним переломленням електромагнітної хвилі під час поширення вздовж лінії та віддзеркалення від кінців.

Перенапруги, спричинені внутрішніми подіями в лінії, такими як комутації, є однією з головних проблем в системах високої та надвисокої номінальної напруги з точки зору координації ізоляції. Комутаційні перемикання викликають електромагнітні перехідні процеси в електропередачі, які мають тривалість від декількох десятків до декількох тисяч мікросекунд. Вони спричиняють значні спотворення амплітуди напруги та струму, утворюючи складні форми хвиль, характерні для довгих ліній, що показано на рис. 3.



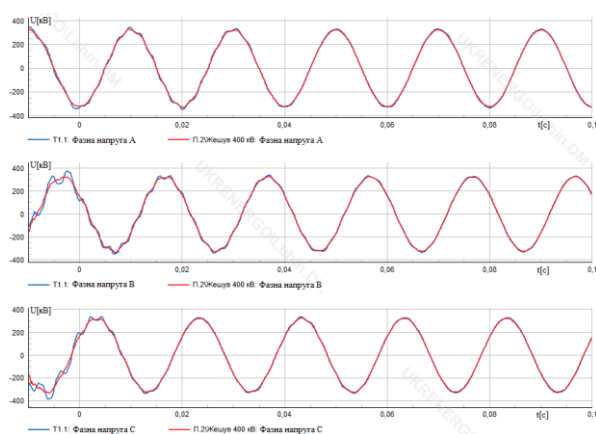
а) миттєві значення напруги

б) миттєві значення струму

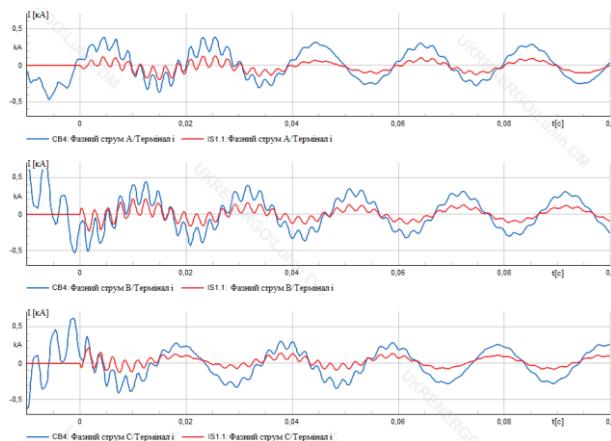
Рисунок 3. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час встановлення лінії під робочу напругу

Після комутації відкритого кінця лінії до суміжної енергосистеми спостерігається плавне затухання високочастотної складової напруги та струму з подальшим переходом до усталених коливань без спотворень, що показано на рис. 4.

Повторне включення електропередачі після однофазного короткого замкнення без використання обмежувачів перенапруги (ОПН) показало значні стрибки напруги (див. рис. 5 а) після відновлення живлення, що спричинено наявністю у непошкоджених фазах захопленого заряду, який істотно впливає на величину перехідної перенапруги під час повторного підключення [9]. Ситуація суттєво покращується, якщо використовувати обмежувачі перенапруги. Обмежувач перенапруги – це захисний пристрій, який обмежує перенапруги в електромережі для захисту обладнання шляхом розрядження або обходу імпульсного струму. Його рівень захисту може бути



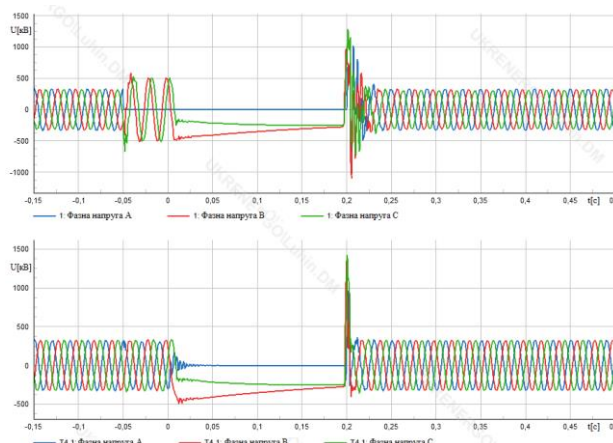
а) миттєві значення напруги



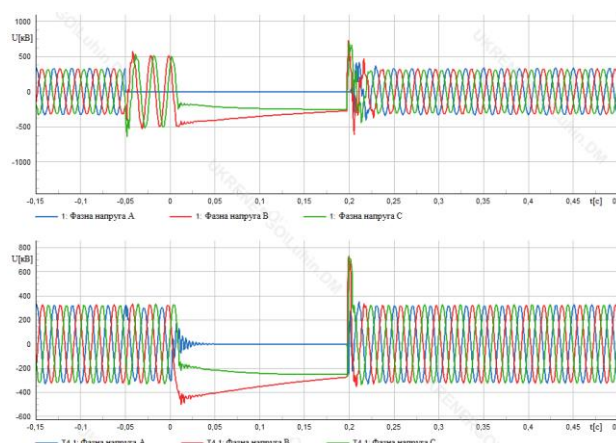
б) миттєві значення струму

Рисунок 4. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час підключення лінії без навантаження

обраний для обмеження не лише грозових перенапруг, як у випадку з типовим лінійним обмежувачем перенапруг, а також він може працювати під час комутаційних перенапруг чи тимчасових перенапруг. Під час повторного включення електропередачі після усунення КЗ з ОПН, спостерігається зменшення амплітуди напруги після повторного включення приблизно в півтора рази, що показано на рис. 5 б). Пікова напруга становить до 800 кВ миттєвого значення напруги, що є на 500 кВ меншим, у порівнянні з моделлю без обмежувачів (1300 кВ).



а) без ОПН



б) із застосуванням ОПН

Рисунок 5. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час спрацювання трифазного АПВ

Висновки. Виконання лінії напругою 400 кВ в габаритах 750 кВ зумовлює особливості її математично моделі та електротехнічних параметрів, зокрема підвищена натуральна потужність та пропускна здатність лінії. Також через цю особливість спостерігається підвищене значення сусцептансу електропередачі, який в свою чергу впливає на зарядну потужність лінії.

Аналіз усталених режимів електропередачі показав, що велика довжина лінії електропередавання зумовлює виникнення ефекту Ферранті, збільшення профілю напруги в проміжних точках лінії в режимах однобічного увімкнення, ненавантаженої лінії та навантажень, що не перевищують натуральну потужність, та характерні криві розподілу струму та реактивної потужності. Істотна зарядна потужність електропередачі розподіляється між суміжними енергосистемами і впливає на баланс реактивної потужності в них.

Комутаційні перемикання визначають протікання електромагнітних перехідних процесів, характерних для електропередачі великої довжини. Криві миттєвих значень напруги та струму визначаються накладанням падаючої та відбитої хвиль під час комутаційних перемикань. Аналіз електромагнітних перехідних процесів пов'язаних із відновленням роботи лінії після аварійних відключень показав що наявність ОПН зумовлює зниження амплітуди напруги під час комутації для деяких режимів приблизно в півтора рази.

Список використаних джерел

1. Annadi R. R., Patsa C. S. Statistical Switching Overvoltages of 1200 kV UHV AC Transmission Line. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00643-0> (дата звернення 03.03.2025).
2. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests / M. Cervantes et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. vol. 33, No. 6. pp. 2884–2893. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2834138> (дата звернення 03.03.2025).
3. Чабан А., Лисяк Г., Левонюк В. Математичне моделювання комутаційних електромагнітних процесів у довгих лініях електропередач у циклі АПВ. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2019. С. 63–73. URL: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.063> (дата звернення 03.03.2025).
4. Шполянський О. Г. Аналіз перехідних процесів при постановці ЛЕП змінного струму під напругу в об'єднаних енергосистемах. Технічна електродинаміка. 2022. № 6. С. 58–62. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.058> (дата звернення 03.03.2025).
5. Reddy S. A., Kumari M. S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. Electric Power Systems Research. 2024. vol. 236. pp. 110902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902> (дата звернення 03.03.2025).
6. Failure Risk of UHV AC Transmission Line Considering the Statistical Characteristics of Switching Overvoltage Waveshape / Y. Li et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. vol. 28, No. 3. pp. 1731–1739. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2252238> (дата звернення 03.03.2025).
7. Shim E., Zaima E. Introduction of Insulation Coordination for UHV AC Systems. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2015. vol. 10, No. 3. pp. 1293–1297. URL: <https://doi.org/10.5370/jeet.2015.10.3.1293> (дата звернення 03.03.2025).

8. Кучанський В. В. Оцінка впливу конструкції фази лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні резонансні перенапруги. Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2019. № 52. С. 22–27. URL: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.022> (дата звернення 03.03.2025).

9. Martinez J. A., Goldsworthy D., Horton R. Switching Overvoltage Measurements and Simulations–Part I: Field Test Overvoltage Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. vol. 29, No. 6. pp. 2502–2509. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2303575> (дата звернення 03.03.2025).

References

1. Annadi R. R., Patsa C. S. Statistical Switching Overvoltages of 1200 kV UHV AC Transmission Line. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00643-0> (accessed 03.03.2025).

2. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests / M. Cervantes et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. vol. 33, No. 6. pp. 2884–2893. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2834138> (accessed 03.03.2025).

3. Chaban A., Lisyak G., Levonyuk V. Mathematical modeling of switching electromagnetic processes in long power lines in the recloser cycle. Elektroenergetichni ta elektromehanichni sistemi. 2019. pp. 63–73. URL: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.063> (accessed 03.03.2025). (Ukr).

4. Shpolianskii O. G. Analysis of transient processes during energisation of the AC overhead transmission line in the hybrid power systems. Tekhnichna Elektrodynamika. 2022. No. 6. pp. 58–62. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.058> (accessed 03.03.2025) (Ukr).

5. Reddy S. A., Kumari M. S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. Electric Power Systems Research. 2024. vol. 236. P. 110902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902> (accessed 03.03.2025).

6. Failure Risk of UHV AC Transmission Line Considering the Statistical Characteristics of Switching Overvoltage Waveshape / Y. Li et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. vol. 28, No. 3. pp. 1731–1739. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2252238> (accessed 03.03.2025).

7. Shim E., Zaima E. Introduction of Insulation Coordination for UHV AC Systems. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2015. vol. 10, No. 3. P. 1293–1297. URL: <https://doi.org/10.5370/jeet.2015.10.3.1293> (accessed 03.03.2025).

8. Kuchanskyi V. V. Phase structure influence estimation of the extra high voltage line on abnormal resonance overvoltages. Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalnoi akademii nauk Ukraini. 2019. No. 52. pp. 22–27. URL: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.022> (accessed 03.03.2025). (Ukr).

9. Martinez J. A., Goldsworthy D., Horton R. Switching Overvoltage Measurements and Simulations–Part I: Field Test Overvoltage Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. vol. 29, No. 6. pp. 2502–2509. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2303575> (accessed 03.03.2025).