

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОМПЕНСОВАНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Лиховид Ю. Г.<sup>1</sup>, Тугай І. Ю.<sup>2</sup><sup>1</sup>ДП "НЕК "Укренерго",<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ)

*Розглянуто питання аналізу режимів роботи лінії електропередачі з компенсацією зарядної потужності. Виконані дослідження по знаходженню оптимального ступеня компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Розроблено математичну модель компенсованої лінії електропередачі з урахуванням впливу коронного розряду та проведено порівняння результатів моделювання з результатами випробувань в різних режимах реальної лінії. Визначена залежність рівня перенапруги від реактансу живильної мережі.*

**Постановка проблеми.** Правильна побудова, відновлення, модернізація та експлуатація ліній електропередач (ЛЕП) є важливою складовою енергетичної безпеки нашої держави. Однією з причин виходу з ладу елементів та обладнання ліній електропередач є перенапруги – аномальне підвищення напруги понад максимально допустиму величину. Для детального аналізу явища можливих перенапруг слід застосовувати моделювання режимів роботи ЛЕП. Тому розробка удосконалених моделей для аналізу режимів роботи ліній електропередачі є актуальною теоретичною та практичною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У чисельних літературних джерелах та публікаціях описано багато різноманітних методів моделювання електропередавальних ліній та режимів їхньої роботи. Проте на даний час не існує єдиного підходу, який би відповідав усім необхідним критеріям та забезпечував достовірну точність отриманих результатів.

**Мета статті.** Здійснення моделювання режимів роботи компенсованих ЛЕП для виявлення та попередження такого небажаного явища, як перенапруги.

**Основні матеріали дослідження.** Як відомо, ЛЕП надвисокої напруги – це складна інженерна споруда, конструктивні особливості якої призводять до значної генерації емісійної реактивної потужності, яку часто називають зарядною потужністю лінії. Варто зауважити, що зарядна потужність не залежить від струму навантаження, що передається по лінії.

Очевидно, що немає жодного сенсу здійснювати транспортування реактивної потужності на великій відстані магістральними мережами, оскільки такий транспорт збільшує повну потужність, яка передається по ЛЕП, а, відповідно, збільшується падіння напруги та втрати активної потужності. Це призводить до необхідності виробітку електричними станціями додаткової активної потужності, через що збільшується витрата дефіцитного палива. Це обумовлено передачею по ЛЕП реактивної потужності. Також зменшується й пропускна спроможність лінії з передачі активної потужності.

Отже, компенсація зарядної потужності – це важлива електротехнічна задача, яку слід вирішувати на усіх рівнях ієрархії електричних мереж. Очевидно, що об'єми реактивної потужності, які передаються по лінії, у великій мірі залежать від зарядної потужності цієї лінії. При відповідному підборі параметрів втрати в емісійних елементах будуть дорівнювати втратам в

індуктивних елементів. Саме у такому випадку по ЛЕП передається натуральна потужність, яка супроводжується мінімальними втратами активної потужності при нормальній робочій напрузі. Відповідно, для недопущення підвищення напруги понад допустимий діапазон, при передачі потужності відмінної від натуральної, необхідно здійснювати компенсацію зарядної потужності лінії. Лише за умови повної, стовідсоткової компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН (ступінь компенсації  $\beta = 1$ ) можна повністю виключити підвищення напруги на приймальному кінці лінії у режимі холостого ходу.

Основним способом компенсації зарядної потужності ЛЕП в Об'єднаній енергетичній системі України на поточний час є застосування шунтувальних реакторів. Їх можна підключити до шин розподільчого пристрою надвисокої напруги або безпосередньо до лінії за лінійним вимикачем. Ці реактори раніш підключали через спеціальні комутаційні апарати ВОР, а зараз через елегазові вимикачі, через вимикач або без комутаційного устаткування через роз'єднувач [5].

Для визначення потрібного ступеня компенсації зарядної потужності лінії у режимі холостого ходу можна скористатися наступною формулою

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_{\text{дон}} = \sqrt{1 - \sin^2 \lambda \sqrt{1 - \beta}} = \cos \lambda \sqrt{1 - \beta}, \quad (1)$$

де  $U_1$  та  $U_2$  – напруга на початку та кінці лінії, МВт.

З формули (1) отримаємо, що ступінь компенсації дорівнює

$$\beta = 1 - \frac{1}{\lambda^2} \left( \arccos \left( \frac{U_1}{U_2} \right)_{\text{дон}} \right)^2. \quad (2)$$

Враховуючи, що допустиме відхилення напруги для даного класу ліній складає 5% від номінальної напруги, а відповідно  $U_1/U_2 = 0,95$ , отримуємо наступну формулу визначення необхідного ступеня компенсації зарядної потужності з урахуванням допустимого перепаду напруги [3]

$$\beta = 1 - \frac{0,1}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Враховуючи отриману формулу, побудуємо графік залежності необхідного ступеня компенсації зарядної потужності лінії  $\beta$  від хвильової довжини лінії (рис.1).

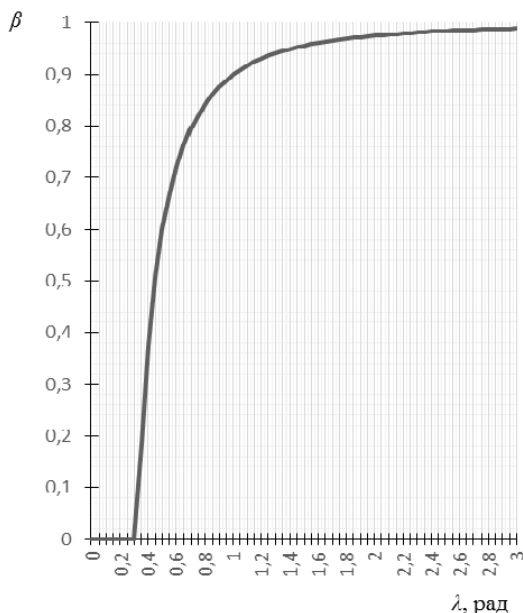


Рисунок 1 – Залежність необхідного ступеня компенсації зарядної потужності лінії  $\beta$  від хвильової довжини лінії

Саме ця залежність відповідає сучасній практиці проектування ЛЕП НВН. Як видно з (3), зі збільшенням хвильової довжини  $\lambda$  необхідна ступінь компенсації зарядної потужності лінії різко збільшується, прямуючи до  $\beta = 1$ .

Саме повну компенсацію рекомендується обирати за початок визначення кількості та пошуку оптимальних місць розташування реакторів.

Проте ЛЕП зі стовідсотковою компенсацією зарядної потужності мають цілу низку суттєвих недоліків, до яких можна зарахувати наступні [1]:

- зміна пропускнув спроможності лінії;
- пошкодження вимикачів ЛЕП аперіодичними струмами;
- резонансні перенапруги на відключеній від мережі фазі ЛЕП при неповнофазних режимах, таких як режим роботи однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ).

Таким чином виникає протиріччя раніше наведеної тези про необхідність та переваги здійснення повної компенсації зарядної потужності лінії. Адже для недопущення підвищення наруги понад допустимий діапазон, слід застосовувати повну компенсацію зарядної потужності, а для запобігання перенапругам та надструмам аномальних режимів передачі [2] не слід застосовувати жодної компенсації.

Отже, можна зробити висновки, що під час включення (синхронізації) лінії в режимі холостого ходу

необхідна повна компенсація лінії, а при зростанні передачі по ній потужності необхідно зменшувати ступінь компенсації та повністю її припинити при досягненні потужності, яка дорівнює величині натуральної.

Таким чином, вибір оптимального ступеня компенсації реактивної потужності в електричних мережах вимагає скоординованого підходу у вирішенні цієї задачі. Для цього була розроблена математична модель лінії електропередачі в середовищі MATLAB/Simulink та виконано дослідження режимів її роботи.

Як показано в [6], нехтування впливу коронного розряду при моделюванні режимів робили ЛЕП може призводити до суттєвих похибок при отриманні результатів, що знижує їх практичну цінність. Саме тому при здійсненні моделювання режимів роботи компенсованих ліній була також розроблена додаткова модель коронного розряду. Оскільки втрати на корону є функцією від наруги, яка у свою чергу доволі нерівномірно розподілена вздовж ЛЕП НВН, особливістю розробленої імітаційної моделі є не зосереджене моделювання коронного розряду, а розосереджене. Зазначений підхід був реалізований шляхом поділу лінії електропередачі на ряд ділянок з однаковими параметрами та моделюванням окремого коронного розряду на кожній з них, що суттєво підвищило точність розрахунків. Режим на кожній ділянці лінії електропередачі моделюється за допомогою окремих підмоделей однакової структури, яка відповідає "П"-подібній схемі заміщення лінії електропередачі, але вони відрізняються поточними параметрами режиму.

До переваг такої імітаційної моделі [6] можна зарахувати й значну гнучкість вибору місяця аналізу можливого короткого замикання та отримання параметрів лінії по усій її довжині.

З метою верифікації створеної моделі проведено порівняння результатів, отриманих шляхом моделювання, із результатами випробувань в різних режимах реальної лінії. Була створена модель лінії Південноукраїнська АЕС – Ісакча і досліджені її режими при поєднанні та системних випробуваннях.

Схема досліджуваної лінії зображена на рис. 2.

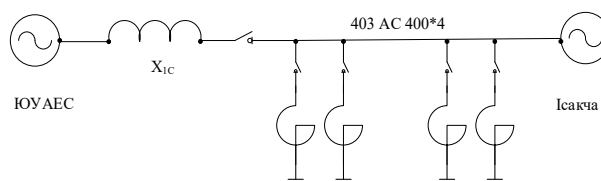


Рисунок 2 – Схематичне зображення лінії Южноукраїнська АЕС – Ісакча

Під час моделювання було проаналізовано підвищення наруги (при частоті промислового струму 50 Гц) на кінці односторонньо ввімкненої лінії з різною кількістю реакторів та в залежності від величини реактансу ( $X_{IC}$ ) живильної мережі за прямою послідовністю. Таким чином визначено необхідну кількість та схему розташування реакторів.

Графічне зображення отриманих результатів відображено на рис.3. Порівнюючи отримані результа-

ти з результатами, наведеними у пускових та системних випробуваннях ЛЕП Южноукраїнська АЕС – Ісакча, можна простежити в межах допустимої на практиці похибки їхню ідентичність. Тому можна зробити висновки про придатність запропонованої моделі для практичного використання.

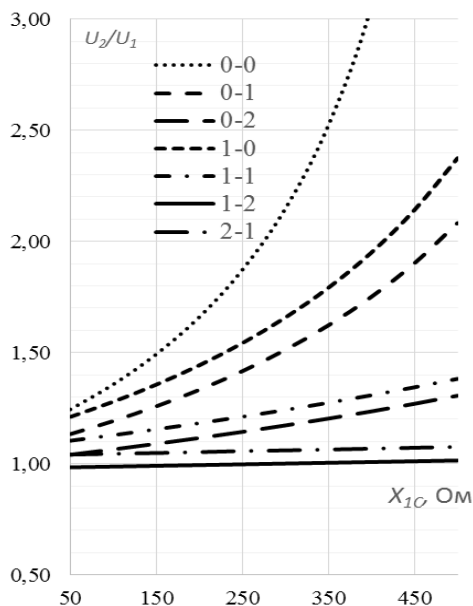


Рисунок 3 – Залежність рівня напруг на кінці односторонньо ввімкненої лінії з різною кількістю реакторів від величини реактансу ( $X_{1C}$ ) живильної мережі за прямою послідовністю

Також під час проведення досліджень було експериментально підтверджено доцільність розташування двох реакторних груп на лінії Южноукраїнська АЕС – Ісакча з боку Южноукраїнської АЕС та однієї реакторної групи з боку Ісакчи.

**Висновки.** Підтверджена важливість проведення координованих досліджень під час проектування та експлуатації ліній електропередачі для аналізу та попередження такого явища, як перенапруги. Розроблена та верифікована на практиці математична модель компенсованої лінії електропередачі. На основі розробленої моделі виконані дослідження необхідних рівнів компенсації реактивної потужності в діапазоні зміни перетоків від холостого ходу лінії до передачі натуральної потужності.

Під час проведення досліджень було визначено розташування двох реакторних груп на лінії Південноукраїнська АЕС – Ісакча з боку Південноукраїнської АЕС та однієї реакторної групи з боку підстанції Ісакча.

#### Список використаних джерел

1. Дмитриев М. В. Требования к компенсации зарядной мощности линий электропередачи 500 – 750 кВ / Дмитриев М. В. // "Энергетик". – 2014. – № 11. – С. 3-8.
2. Кузнецов В. Г. Дослідження внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах надвисокої напруги та розробка заходів по їх запобіганню й

обмеженню / В. Г. Кузнецов Ю. І. Тугай., О. Г. Шполянський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – Вип. 35. – С. 117-122.

3. Кучанський В. В. Попередження резонансних перенапруг при несиметричних режимах ліній електропередач з поперечною компенсацією / В. В. Кучанський, Ю. Г. Лиховид, В. А. Мельничук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2015. – № 164. – С. 42-43.

4. Равлик О. М. Моделювання комутаційних процесів ліній надвисокої напруги 750 кВ / Равлик О. М., Стецик В. Я. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2016. – № 840. – С. 102-107.

5. Тугай І. Ю. Вплив грозозахисних тросів на значення перенапруг у несиметричних режимах ліній електропередачі / І. Ю. Тугай, Ю. Г. Лиховид, В. А. Мельничук // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2016. – № 2 (5). – С. 6-8.

6. Тугай Ю. І. Моделювання впливу коронного розряду на перенапруги в несиметричних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги / Ю. І. Тугай, Ю. Г. Лиховид // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2016. – Вип. 45. – С. 16-20.

7. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д. Л. Файбиовича – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

#### Аннотация

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Лиховид Ю. Г., Тугай И. Ю.

*Рассмотрен вопрос анализа режимов линий электропередач при компенсации зарядной мощности. Предложена имитационная модель для расчета режимов работы компенсированных линий, в том числе с учетом влияния коронного разряда. Определена зависимость уровня перенапряжения от реактанса питающей системы.*

#### Abstract

### MODELING OF OPERATING MODES OF COMPENSATED ELECTRIC TRANSMISSION LINES

Y. Lykhovyd, I. Tugai

*The issue of analysis of the power transmission lines modes with the charging power compensation is considered. A simulation model is proposed for calculating the operating modes of compensated lines, including taking into account the influence of the corona discharge. The dependence of the overvoltage level on the reactance of the power supply system is determined.*