

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ЛИХОВИД ЮРІЙ ГРИГОРОВИЧ



УДК 621.311.1

**ПЕРЕНАПРУГИ В НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ МАГІСТРАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі оптимізації систем електропостачання в Інституті електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий керівник - доктор технічних наук, с.н.с.
Тугай Юрій Іванович,
Інститут електродинаміки НАН України,
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет
МОН України,
завідувач кафедри електричних станцій та систем;

- кандидат технічних наук, доцент
Гай Олександр Валентинович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України МОН України,
доцент кафедри електропостачання
ім. проф. В.М. Синькова.

Захист дисертації відбудеться «7» квітня 2021 р. о 11:00, годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, м. Київ-57, просп. Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий « 4 » березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Бібік

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. При вирішенні задач проектування й експлуатації електричних мереж за базовий приймають нормальний усталений режим, при якому техніко-економічні показники роботи мереж є оптимальними з погляду надійності, якості та ефективності електропостачання. Але електрична мережа є динамічною системою, яка змінюється як у часі (зміна схеми і навантажень), так і в просторі (поява нових елементів у процесі розвитку або реконструкції). У результаті перманентних змін поточний усталений режим, який існує в мережі, завжди буде відрізнятися від оптимального. Тому попередньо прийняті рішення повинні піддаватись постійній корекції для збереження бажаних значень критеріїв оптимальності.

Магістральні лінії електропередавання надвисокої номінальної напруги 330-750 кВ (ЛЕП НВН) є основними системоутворюючими лініями в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України і забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій (АЕС), а також необхідний їй обмін між окремими енергосистемами. Поза тим розвиток та ефективна експлуатація магістральних ЛЕП НВН є основною технічною передумовою забезпечення інтеграції ОЕС України в Європейську енергосистему. Зрозуміло, що вихід з ладу ЛЕП НВН або обладнання, що забезпечує їхнє приєднання, є важкою системною аварією в ОЕС. Вона може викликати розпад системи на окремі частини з дефіцитом та надлишком генеруючих потужностей і відповідно вимагати відключення споживачів у дефіцитних регіонах та зупинки блоків електростанцій у надлишкових. Такий аномальний режим магістральної електричної мережі (МЕМ) буде далеким від оптимального і матиме значні відхилення показників якості та ефективності, тому попередження виходу з ладу ЛЕП НВН є важливою науковою та практичною задачею не тільки з точки зору забезпечення безперебійності електропостачання.

Одним з критичних режимних параметрів роботи МЕМ, який може спричинити вихід з ладу ЛЕП НВН та іншого обладнання, є перенапруги, тобто підвищення робочої напруги понад максимальне значення, яке передбачено технічним регламентом. Аварії в електричних мережах внаслідок перенапруг характеризуються пошкодженням дорогого устаткування, позбавленням електропостачання значних територій, великими витратами часу та засобів на ліквідацію наслідків.

Тому аналіз причин виникнення перенапруг та попередження виходу їх значень за зони режимної безпеки МЕМ є важливою науковою та практичною задачею. Вирішенню зазначеного питання присвячено наукові праці багатьох відомих учених: Г.Н. Александрова, В.О. Бжезицького, Ю.М. Веприка, А.М. Гашимова, Ч.М. Джуварли, Є.В. Дмитрієва, К.П. Кадомської, В.Г. Кузнецова, О.М. Равлика, М.С. Сегеди, В.С. Собчука, С.Ю. Шевченка, S. Atmuri, N. Knudsen, M. Hashmi, P. Ferracci та ін.

У той же час зміна структури та параметрів МЕМ, технічне переоснащення і модернізація їх устаткування разом зі зростанням вимог до надійності електропостачання, обумовлює актуальність сучасних досліджень режимних перенапруг. Зокрема, це стосується подальшого розвитку методів комп'ютерного моделювання, оскільки можливості проведення безпосередніх експериментів на магістральних ЛЕП НВН у діючих мережах обмежені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. У роботі викладено результати наукових досліджень, що проводились у відділі оптимізації систем

електропостачання Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Це дослідження, котрі здійснювались при виконанні наступних планових науково-дослідних робіт, у яких здобувач брав участь: «Розробка методів і моделей аналізу резонансних процесів та мінімізації втрат електроенергії в несиметричних режимах роботи електричних мереж» («Безпека-3») №: П-24-14, 2014-2018 рр. Державний реєстраційний номер роботи 0114U001465. Виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАНУ від 15.10.2013 р., № 14; «Підвищення надійності виконання комутацій в компенсованих магістральних лініях електропередачі надвисокої напруги» № П-17-16, 2016-2018 рр. комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом («Об'єднання-3»)). Державний реєстраційний номер роботи 0116U006587. Виконується за постановами Президії НАН України від 30.12.2015 № 311, 20.01.2016 № 12 та розпорядженнями Президії НАН України від 25.03.2016 № 180, від 02.02.2017 № 99, від 01.02.2018 № 69.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення математичних моделей для аналізу режимних перенапруг у магістральних електричних мережах при наявності несиметрії параметрів та розроблення заходів для попередження їх появи та розвитку понад критичні значення.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз зон існування достатніх та необхідних для виникнення перенапруг значень параметрів режимів МЕМ;
- створити нові та вдосконалити існуючі моделі для дослідження процесів перенапруг в несиметричних режимах роботи МЕМ;
- розробити та науково обґрунтувати заходи запобігання виникненню перенапруг на ЛЕП НВН.

Об'єктом дослідження є режими в магістральних електричних мережах, в яких виникають перенапруги.

Предметом дослідження є перенапруги у несиметричних режимах роботи магістральних електричних мереж.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у роботі завдань базується на законах електротехніки, теорії лінійних та нелінійних кіл, методах математичного моделювання. При виведенні рівнянь нормального та аномального режимів застосовувались класичні методи аналізу багатофазних електричних кіл. Верифікація результатів, які були отримані за допомогою математичних моделей, виконана за даними пускових та налагоджуваних випробувань ЛЕП НВН в ОЕС України.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено математичну модель лінії електропередачі надвисокої напруги, що, на відміну від традиційної, враховує явище розподіленого коронного розряду в лініях електропередавання надвисокої напруги, та вплив геометрії грозозахисних тросів на електромагнітне поле, що дозволило отримати уточнені значення параметру перенапруг у нормальних та несиметричних режимах і обрати адекватні засоби корекції.

2. Уперше науково обґрунтовано використання чотирипроменевої реакторної схеми для компенсації зарядної потужності як в несиметричних, так і в нормальних режимах електропередачі надвисокої напруги, що дозволяє підвищити

надійність роботи особливостей основного обладнання магістральних електричних мереж та протиаварійної автоматики.

3. Отримала подальший розвиток теорія моделювання роботи магістральних електричних мереж в напрямку використання несиметричних режимів при їх експлуатації, що дозволило розробити нові заходи щодо попередження резонансних перенапруг шляхом використання неповних груп шунтувальних реакторів під час ліквідації аварії засобами автоматичного повторного включення.

4. Удосконалено математичні моделі у частині врахування особливостей режимів роботи комутаційного обладнання для дослідження комутацій елегазових лінійних вимикачів у лініях електропередавання надвисокої напруги, що дозволило більш точно виконати аналіз електромагнітних процесів при переведенні лінії з неповнофазного режиму роботи у повнофазний (та навпаки).

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні методичних рекомендацій керування лінійними вимикачами при переведенні ЛЕП НВН з повнофазного режиму роботи у неповнофазний та навпаки, які на практиці дозволяють нівелювати наслідки неповної компенсації фази лінії шунтувальними реакторами (ШР) та знизити рівні перенапруг цієї фази.

Практичне використання отриманих результатів полягає у заземленні грозозахисних тросів (ГЗТ) в нових та реконструйованих ЛЕП НВН, що дало можливість знизити рівень технічних вимог до спеціальних апаратних захисних засобів.

Вказані результати роботи у вигляді методичних матеріалів впроваджені в проєктній організації ТОВ «ЕНКОР ПЛЮС» (м. Березань) та рекомендовані для використання в НЕК «Укренерго» (м. Київ) під час експлуатації магістральних електричних мереж надвисокої напруги.

Особистий внесок здобувача. Наукові та практичні результати, які висвітлено в дисертації, одержано здобувачем особисто. В основних наукових працях, що були опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: [1] – дослідження та аналіз діапазонів кутів комутації, при яких виникають небезпечні перенапруги; [2] – проведення обробки отриманих залежностей резонансних довжин ліній від рівня їх компенсації; [3] – створення моделей для дослідження несиметричних режимів роботи МЕМ та спосіб вирішення проблеми перенапруг на підстанціях з неповною реакторною групою шляхом використання ШР інших підстанцій; [4] – моделювання режимів роботи компенсованих ЛЕП для дослідження внутрішніх перенапруг; [6] – розроблення математичної моделі дослідження впливу коронного розряду на перенапруги у несиметричних режимах роботи ліній електропередачі надвисокої напруги; [7] – дослідження фактору впливу коронного розряду на рівень перенапруг у лініях електропередачі надвисокої напруги.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 12-13 листопада 2015р.); Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій» (Рівне, 2-4 березня 2018р.); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми

енергоресурсозбереження в енергетичних системах» (Кременчук, 15-17 травня 2018р.); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної електротехніки - 2018» (Київ, 4-8 червня 2018р.); International Ukraine-Poland Seminar «Power quality in distribution networks with distributed generation» (Kyiv, July 4-5, 2019); I International Scientific and Practical Conference «Priority directions of science and technology development», (Kyiv, September 27-29, 2020),

Публікації. За результатами досліджень, було опубліковано 12 наукових праць (з них 2 – самостійно): з яких 7 – у наукових фахових виданнях України (з них 1 категорії А і 1 категорії Б), 1 стаття у періодичному науковому виданні Польщі, 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 143 сторінках друкованого тексту, складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 126 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 12 таблицями та 25 рисунками. Список використаних джерел містить 142 найменування, з них 130 кирилицею та 12 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, викладено її наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості про публікації, апробацію та впровадження основних результатів досліджень.

У першому розділі розглянуті значення та перспективи розвитку МЕМ в електроенергетиці. Надано огляд нормальних та аномальних режимів роботи ліній електропередавання надвисоких напруг, зокрема, проаналізовано характерні особливості несиметричних режимів магістральних електричних мереж. У результаті порівняльного аналізу результатів попередніх досліджень, які викладені в наукових літературних джерелах, відзначено, що однією з основних причин виходу з ладу елементів та обладнання в МЕМ є перенапруги – аномальне підвищення напруги понад гранично допустиме значення. Внутрішні перенапруги виникають при несприятливому збігові значень параметрів елементів МЕМ та її поточного режиму, а зовнішні – під дією атмосферних явищ. У роботі головна увага приділена саме внутрішнім перенапругам, хоча розглянуті й деякі питання грозозахисту.

Магістральні лінії мають велику довжину, а тому і значення напруги в різних їх точках відрізняється, що вимагає відповідного вибору місця для контролю перенапруг. Як відомо з теорії режимів електричних мереж, при передачі електричної потужності, значення якої відрізняється від натуральної, можна спостерігати різні варіанти розподілу значень напруги вздовж ліній НВН. У випадку фіксації напруги на початку лінії матимемо розподіл напруги, зображений на рис. 1 а). З графічного зображення видно, що коли по лінії передається активна потужність зі значенням меншим від натурального, то значення зарядних потужностей будуть перевищувати значення індуктивних втрат потужності. Це призводитиме до підвищення рівня напруги на кінці лінії. Якщо по лінії передається активна потужність зі значенням понад натуральну, то значення індуктивних втрат потужності перевищуватимуть значення зарядних потужностей, і напруга вздовж лінії буде знижуватись. У випадку фіксації напруги на початку та на

кінці лінії отримаємо відповідний розподіл значень напруги вздовж лінії (рис. 1б). У цьому випадку найбільші відхилення по напрузі відбуваються у середині лінії.

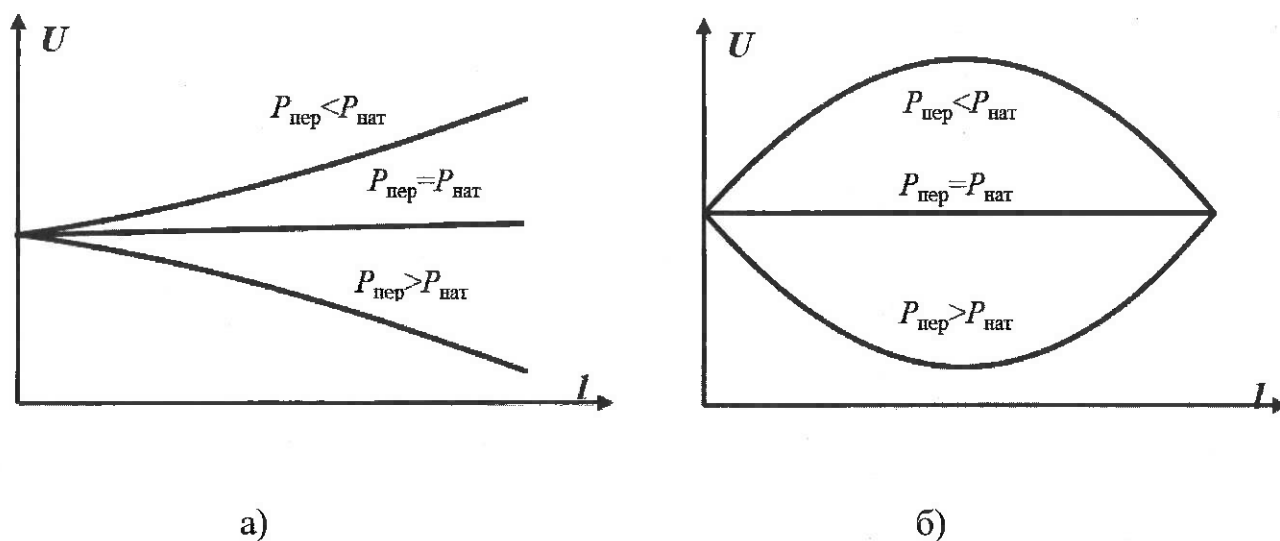


Рис. 1. Розподіл напруги вздовж ЛЕП НВН при: а) фіксації напруги на початку лінії; б) фіксації напруги на початку та кінці лінії

Проведено огляд методів дослідження параметру перенапруг ЛЕП НВН, які спираються на засади математичного моделювання. Визначено недоліки та погрішності існуючих моделей та окреслено напрямки їх вдосконалення, серед яких необхідність врахування фізичних процесів при розподіленому коронному розряді вздовж лінії та впливу на електромагнітне поле лінії елементів і геометрії грозозахисних тросів.

У другому розділі виконано аналіз характерних особливостей впливу технічних засобів компенсації зарядної потужності ліній електропередавання надвисокої напруги, які використовуються в діючих МЕМ, на виникнення перенапруг в несиметричних режимах.

Найбільш розповсюдженим засобом компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН є ШР. Типові схеми підключення групи ШР показані на рис. 2. Практичне застосування тієї чи іншої схеми підключення ШР до ЛЕП НВН обґрунтовується результатами техніко-економічного порівняння.

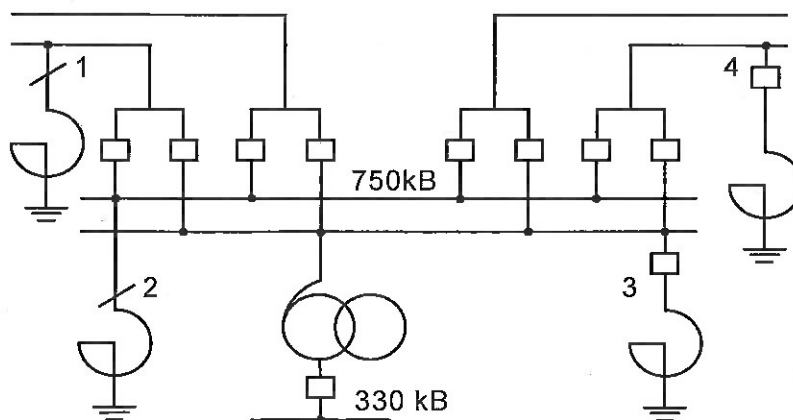


Рис. 2. Варіанти підключення шунтувальних реакторів

Для визначення потрібного ступеню компенсації зарядної потужності лінії β у режимі холостого ходу в залежності від хвильової довжини лінії λ використаємо наступні відомі рівняння

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

де U_1 та U_2 – напруга на початку та кінці лінії.

З виразу (1) отримуємо

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

Враховуючи, що допустиме відхилення напруги для даного класу ліній складає 5% від номінальної напруги, а також висновки з робіт Александра Г.Н., був використаний наступний вираз для визначення необхідного ступеня компенсації зарядної потужності з урахуванням допустимого перепаду напруги

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

Застосовуючи вираз (3), побудуємо графік залежності необхідного ступеня компенсації зарядної потужності лінії β від хвильової довжини лінії (рис. 3).

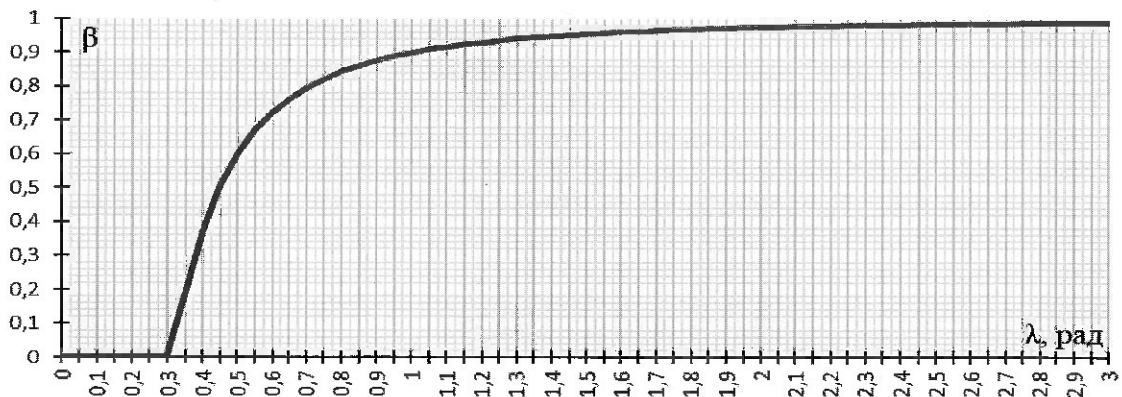


Рис. 3. Залежність ступеню компенсації зарядної потужності від хвильової довжини лінії

Як можна побачити з отриманої залежності, зі збільшенням хвильової довжини λ необхідна ступінь компенсації зарядної потужності лінії різко збільшується, прямуючи до $\beta=1$.

Традиційно в базових математичних моделях при дослідженні перенапруг у магістральних електричних мережах для спрощення розв'язку диференціальних рівнянь при комп'ютерній реалізації зазвичай не враховують вплив розподіленого коронного розряду та

спотворення елементами грозозахисту електромагнітного поля ЛЕП НВН. Але виконаний порівняльний аналіз показав, що таке спрощення моделей призводить до суттєвих відхилень результатів моделювання від фактичних, які були отримані при натурних експериментах під час пускових випробувань ЛЕП НВН. Для врахування коронного розряду була запропонована та розроблена модель (рис. 4), що дозволяє врахувати розподіленість параметрів вздовж ліній електропередачі з врахуванням коронного розряду.

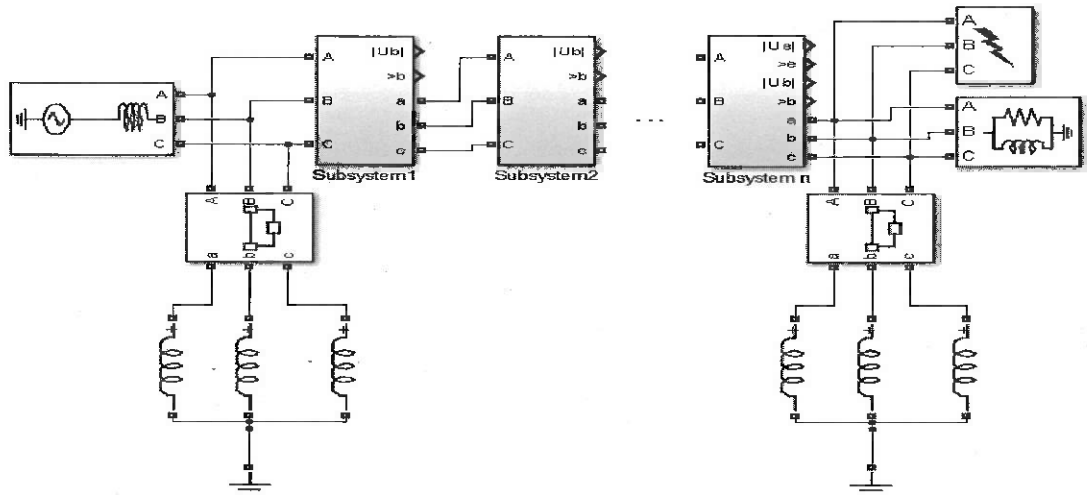


Рис. 4. Реалізація узагальненої моделі ЛЕП НВН в середовищі Matlab Simulink

Особливістю розробленої моделі є врахування нерівномірної розподіленості коронного розряду. Зазначений підхід був реалізований шляхом поділу лінії електропередавання на окремі ділянки з однаковими параметрами та рівняннями, що зв'язують ці параметри. Такий підхід дозволяє врахувати вплив зміни метеорологічних умов вздовж траси. На рис. 5 наведена реалізація моделі ділянки лінії електропередавання з урахуванням впливу коронного розряду.

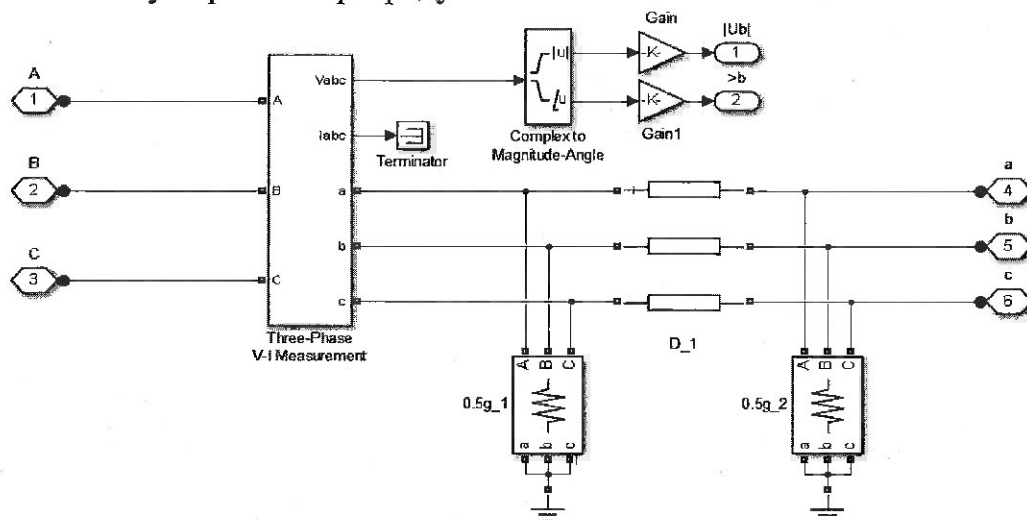


Рис. 5. Реалізація моделі впливу коронного розряду в середовищі Matlab Simulink

Була проведена верифікація використання розробленої моделі з результатами пускових випробувань реальної лінії НВН 750 кВ Південноукраїнська АЕС – Ісакча.

Усереднена похибка результатів, отриманих за допомогою моделювання, склала 1,3% у порівнянні з результатами пускових випробувань.

Також на удосконаленій моделі ЛЕП НВН були проаналізовані варіанти несиметричних режимів роботи ліній електропередавання надвисокої напруги з двома групами шунтувальних реакторів. У несиметричному режимі лінії електропередавання розглядався випадок відключення групи ШР на одному з кінців. За результатами проведеної серії моделювань було запропоновано для зниження рівня перенапруг вмикати однойменну фазу відключеної групи ШР по відношенню до відключеної фази лінії.

Було удосконалено метод Кнудсена щодо забезпечення умов згасання дуги підживлення короткого замикання (КЗ) та зниження значень резонансних перенапруг протягом циклу спрацювання однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ). У роботі запропоновано схему постійного підключення компенсаційного реактора (рис. 6), при якій струм I_0 в симетричному режимі, що проходить через нього, наближений до нуля, і тому він не впливає на роботу ШР та ЛЕП НВН в цілому.

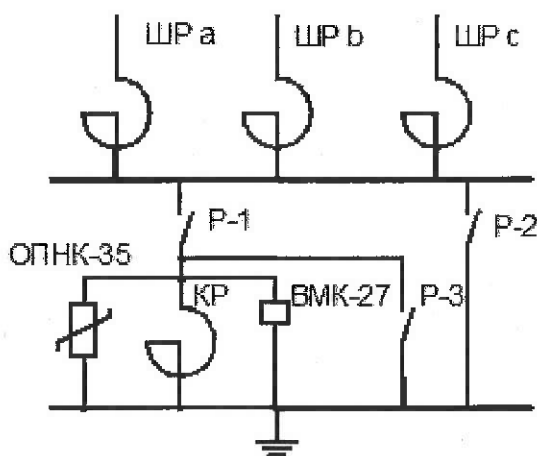


Рис. 6. Схема підключення компенсаційного реактора

Досліджені несиметричні режими ЛЕП НВН з постійно включеним компенсаційним реактором (КР). За результатами моделювання цих режимів, зроблено висновок, що під час них коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності напруги не перевищує гранично допустимого значення.

Таким чином теоретично була обґрунтована можливість застосування при експлуатації ЛЕП НВН постійно включеного компенсаційного реактора. Використання удосконаленої чотирипроменевої схеми дозволяє підвищити надійність роботи МЕМ за рахунок відсутності в порівнянні з традиційною схемою спеціальної автоматики керування введенням в роботу КР, яка може дати збій та призвести до порушення алгоритму роботи ОАПВ.

Слід зазначити, що постійне підключення компенсаційного реактору має супутній ефект - зменшуються сумарні втрати енергії. Відповідно до розрахунків за період експлуатації протягом одного року такої схеми економія енергії призвела б до заощадження грошових коштів на суму понад 440 тисяч гривень на рік на восьми реакторних групах, які оснащені постійно діючими компенсаційними реакторами.

У третьому розділі виконано теоретичний аналіз доцільності використання неповнофазних режимів роботи ліній електропередавання надвисокої напруги на

практиці. Були розглянуті можливі неповнофазні режими роботи внаслідок аварійного короткочасного вимкнення однієї або декількох фаз лінії при КЗ; під час планових (позапланових) ремонтних роботах на окремих фазах лінії; під час плавки ожеледі.

Як відомо, використання тривалих неповнофазних режимів роботи електропередавання в діючих електричних мережах дозволяє істотно підвищити надійність електропостачання споживачів, оскільки навіть унаслідок аварійних або планових вимкнень однієї або двох фаз лінії споживач буде отримувати електроенергію, хоча і в обмеженому обсязі. Але виникнення у системі струмів і напруг зворотної та нульової послідовностей при несиметричних режимах роботи призводить до додаткових втрат потужності в поздовжніх та поперечних елементах схеми електропередавання і погіршення техніко-економічних показників режиму роботи лінії.

Значення падінь напруги на невідключених фазах можна отримати за відомими формулами (4) та (5)

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= (R_0 + j\omega L)\ell I_1 + j\omega M_{12}\ell I_2 + j\omega M_{1зем}\ell I_{зем} = \\ &= \left(R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{H_{зем}}{D} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{DH_{зем}}}{r_e} \right) \ell I_1, \end{aligned} \quad (4)$$

де $H_{зем}$ – глибина повернення сумарного струму, м; μ_0 – магнітна стала, що дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; r_e – еквівалентний радіус розщепленої фази; M_{12} – взаємна індукція двох працюючих фаз; $M_{1зем}$ – взаємна індукція між працюючою фазою та еквівалентного зворотного проводу у землі; D – відстань між непошкодженими фазами.

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= (R_0 + j\omega L)\ell I_2 + j\omega M_{12}\ell I_1 + j\omega M_{1зем}\ell I_{зем} = \\ &= \left(R_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{H_{зем}}{D} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{DH_{зем}}}{r_e} \right) \ell I_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Для визначення рівнів напруг на фазах ЛЕП НВН проведено моделювання неповнофазних режимів роботи. Здійснено порівняння параметрів повнофазного (вихідного) режиму з параметрами неповнофазного (двофазного) режиму при відключенні фази В. Шляхом дослідження перехідних процесів для різного часу спрацювання комутаційного обладнання визначено оптимальні за рівнем перенапруг моменти виконання комутацій.

Найбільші за амплітудою значення напруги спостерігаються на відключеній фазі та, значною мірою, залежать від часу відключення фази. Узагальнені графіки залежностей підвищення напруги на фазі, що відключається, від часу спрацювання вимикачів, наведено на рис. 7.

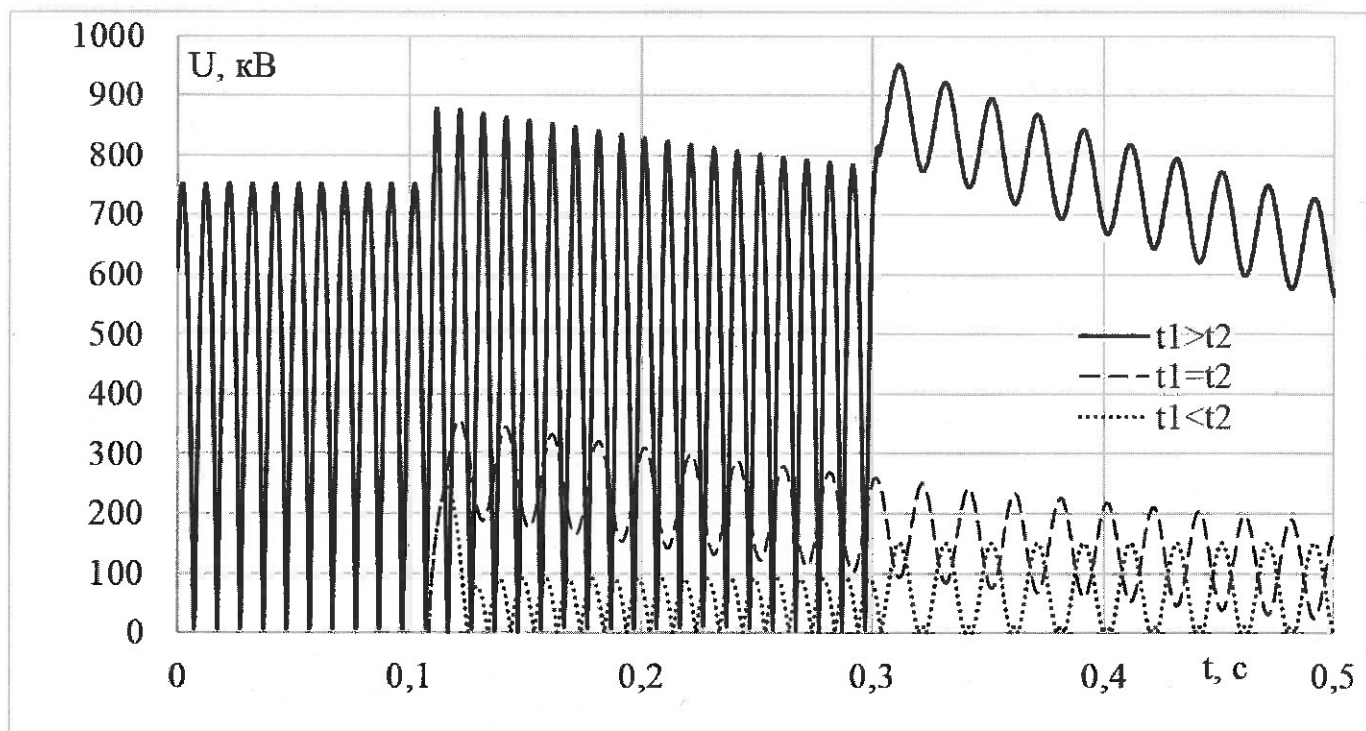


Рис. 7. Залежності напруги на фазі від часу спрацювання вимикачів

Встановлено, що значення напруги на фазах, які лишаються у роботі, може знаходитися у допустимих межах. Перенапруги на фазі, що відключається, мають місце виключно у випадку, коли фаза відключається спочатку з боку споживача, а потім з боку живлення. У результаті проведених досліджень та серії моделювань режимів був підтверджений висновок, що повернення у повнофазний режим необхідно здійснювати шляхом одночасного ввімкнення фази з обох боків або здійснювати ввімкнення фази з боку навантаження, а потім з протилежного кінця.

Таким чином була визначена послідовність роботи лінійних вимикачів для зменшення рівнів комутаційних перенапруг, що було підтверджено при моделюванні режимів роботи ЛЕП НВН у неповнофазних режимах. Виконання запропонованої послідовності спрацювання вимикачів запобігає неприпустимому зростанню напруги на фазах, що відключаються/включаються. Також було експериментально підтверджено, що на фазах, які лишаються в роботі при неповнофазному режимі МЕМ, напруга змінюється в основному у межах допустимих відхилень для даного класу напруг.

У четвертому розділі визначено вплив конструктивних особливостей будови та експлуатації ЛЕП НВН на можливість виникнення перенапруг. Зараз в ОЕС України всі лінії електропередавання надвисокої напруги 750 кВ експлуатуються з ізолюваними ГЗТ, але існує можливість переведення їх на заземлений режим роботи. Режим роботи ГЗТ впливає на значення параметрів ЛЕП і призводить до зміни налаштувань ОАПВ та можливих значень внутрішніх перенапруг. Показано, що ізолювані троси практично не впливають на кратність перенапруг, тому при дослідженні на увагу заслуговують варіанти, коли ГЗТ відсутні або заземлені.

Погонний активний опір нульової послідовності проводів, без впливу грозозахисного троса, можна визначити за такою формулою

$$r_{0(0)} = \frac{r_0}{n} + 0,15, \quad (6)$$

де $r_{0(0)}$ - питомий опір струму нульової послідовності, Ом/км; r_0 - питомий опір проводу одного ланцюга лінії, Ом/км; n - кількість паралельних ланцюгів ліній. Збільшення погонного активного опору відносно параметрів прямої послідовності в середньому на 0,15 Ом/км відбувається внаслідок того, що у контур нульової послідовності входить земля.

Як відомо погонний індуктивний опір лінії нульової послідовності, без впливу грозозахисних тросів, визначається за емпіричною формулою

$$x_{0(0)} = 0,435 \lg \frac{D_3}{R_{ce}}, \quad (7)$$

де $R_{ce} = \sqrt[3]{r_e D_{cep}^2}$ - середньгеометричний радіус фази; D_3 - еквівалентна глибина зворотного струму, що визначається за формулою Карсона. Для оцінювальних розрахунків зазвичай приймають $D_3 = 1000$ м.

У випадку, коли ГЗТ використовуються у якості високочастотних каналів зв'язку, його виконують суцільним, тому необхідно враховувати вплив ГЗТ на поздовжні параметри схеми заміщення лінії нульової послідовності. У такому випадку повний погонний опір нульової послідовності можна визначити як

$$z_{0(0)} = z_{л(0)} + \frac{z_{м(0)}}{z_{т(0)}}, \quad (8)$$

де $z_{л(0)}$ - погонний опір нульової послідовності лінії без урахування контуру трос-земля; $z_{т(0)}$ - погонний опір нульової послідовності системи тросів; $z_{м(0)}$ - опір нульової послідовності взаємодукції між проводом і тросом.

Опір нульової послідовності системи тросів визначається як

$$z_{т(0)} = \frac{r_t}{n_t} + 0,15 + jx_{т(0)}, \quad (9)$$

де r_t - активний опір троса; n_t - кількість тросів; $x_{т(0)}$ - індуктивний опір нульової послідовності системи тросів

$$x_{т(0)} = 0,435 \lg \frac{D_3}{\sqrt{r_{т.е} D_t}}, \quad (10)$$

де $r_{т.е}$ - еквівалентний радіус троса; D_t - відстань між тросами.

Опір нульової послідовності взаємодукції між проводом і тросом визначають за наступною формулою

$$x_{m(0)} = 0,435 \lg \frac{D_3}{D_{п.т}}, \quad (11)$$

де $D_{п.т}$ - середньгеометрична відстань між проводами і тросом.

Ємнісна провідність нульової послідовності визначається за наступною емпіричною формулою

$$b_{0(0)} = \zeta \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2h_{сер}}{r_e \left(\frac{D'_{сер}}{D_{сер}} \right)^2}}, \quad (12)$$

де ζ - коефіцієнт, що враховує вплив тросів на величину ємнісної провідності нульової послідовності лінії та для надвисокої напруги приймається 1,1; $h_{сер}$ - середня висота підвісу проводу над землею; $D'_{сер}$ - середньгеометрична відстань між фазними проводами і їхніми дзеркальними відображеннями.

У результаті проведених досліджень було підтверджено зниження рівня максимальних перенапруг на непошкоджених фазах (рис. 8). Доведено необхідність врахування різних режимів роботи ГЗТ на перенапруги у ЛЕП НВН. Встановлено, що зниження рівня напруги під впливом заземлення ГЗТ складає від 6 до 12% номінальної напруги, тому рекомендовано заземлювати грозозахисні троси як дієвий засіб обмеження рівня перенапруг.

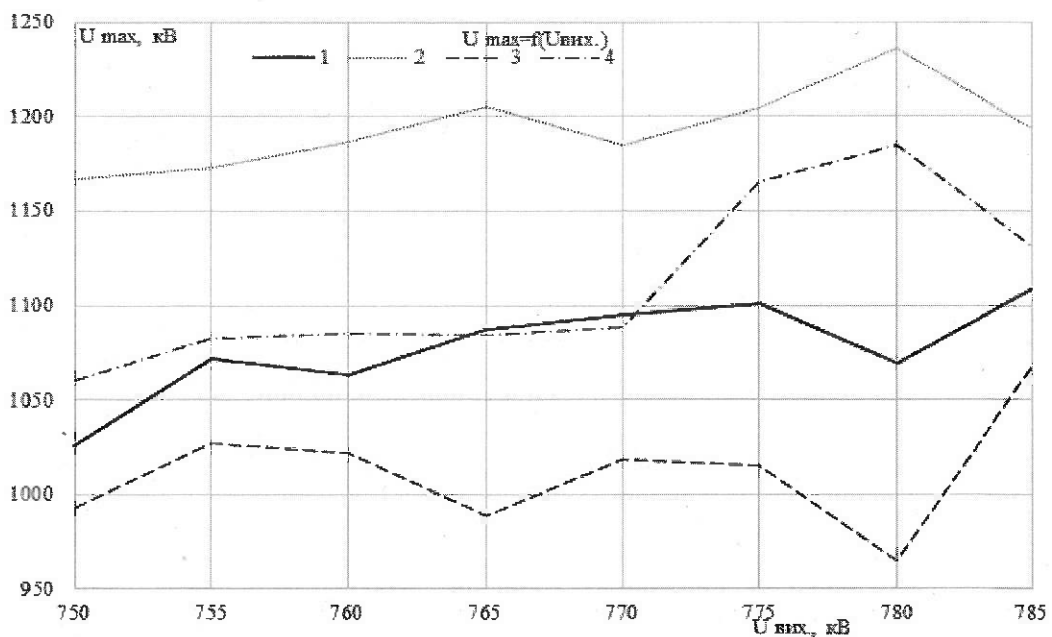


Рис. 8. Залежність рівнів напруги на фазах А та С при несиметричному режимі з урахуванням (лінії 1 та 3 відповідно) та без урахування ГЗТ (лінії 2 та 4 відповідно)

Ступінь компенсації ШР, який обирається за умовами перенапруг нормального режиму, зазвичай близький до 100%, що відповідає умовам резонансу в неповнофазному режимі. Для запобігання пошкодженню обладнання необхідно не допустити резонансного підвищення напруги шляхом розладнання резонансного контуру, що утворився. Ясно, що досягти цього можна зміною параметрів зосередженої індуктивності, що входить у контур, а не розосередженої ємності. Моделювання та аналіз режимів показали, що використання керованого шунтувального реактора (КШР) завдяки плавній зміні індуктивності, дозволяє: під час паузи ОАПВ забезпечити зниження струму підживлення дуги у 1,5 рази і зменшити час безструмової паузи; у режимі включення лінії обмежити комутаційні перенапруги; під час різкого зниження навантаження КШР успішно знижує рівень перенапруг та запобігає можливості аварійного відключення лінії.

Для того, щоб проілюструвати висновок про доцільність використання КШР в МЕМ, у тому числі й з метою попередження резонансних перенапруг у несиметричних режимах, у роботі розглянуто приклад встановлення реактора з проектними показниками: КШР-150000/750, робочий діапазон зміни індуктивного опору 0÷2000 Ом.

З аналізу перехідного процесу резонансного контуру отримаємо вираз напруги між точками на відключеній фазі під час здійснення циклу ОАПВ.

$$U_B(t) = U_B \sin(\omega t + \Psi_{U_B}) + U_B^{Bin}(t) \quad (13)$$

де U_B , Ψ_{U_B} амплітуда та фаза стаціонарного значення напруги в точці КЗ; $U_B^{Bin}(t)$ – вільна складова напруги, ω – кутова швидкість.

У свою чергу вільна складова напруги визначається з рівняння

$$U_B^{Bin}(t) = L \frac{\partial i}{\partial t} + R_\Sigma i + \frac{1}{2C_M + C_3} \int_0^t i dt \quad (14)$$

З рівняння (14) отримаємо

$$U_B^{Bin}(t) = U_B \left(\sin \Psi_{U_B} \frac{\omega}{\beta} \sin \beta t - \cos \Psi_{U_B} \cos \beta t \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (15)$$

де β – власна частота коливань, що визначається за виразом

$$\beta = (L_{КШР} (L_{КШР} + 3L_{ККР}) / (L_{КШР} + 2L_{ККР}) \cdot (2C_M + C_3) \cdot l)^{-0.5}, 1/c$$

де l – довжина лінії. T – постійна часу затухання коливань

$$T = (L_{КШР} + 3L_{ККР}) / R_\Sigma, c.$$

Підставляючи (15) у (13), отримаємо

$$U_B(t) = U_B \left[\sin(\omega t + \Psi_{U_B}) + \left(\sin \Psi_{U_B} \frac{\omega}{\beta} \sin \beta t - \cos \Psi_{U_B} \cos \beta t \right) e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (16)$$

На основі виразу (16) було виконано аналіз ефективності використання КШР для ЛЕП НВН з метою запобігання резонансних перенапруг у несиметричних режимах. При відсутності можливості зміни індуктивності ШР спостерігався розвиток резонансного процесу зі значними перенапругами (рис.9) більше, ніж 1000 кВ.

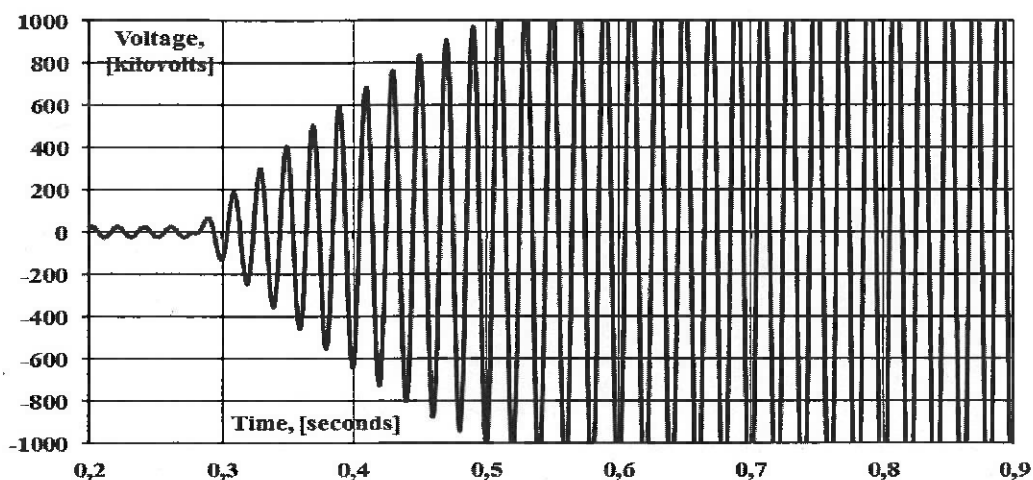


Рис. 9. Резонансні перенапруги на відключеній фазі у безструмову паузу ОАПВ

Відстроювання від умов резонансу досягається за допомогою плавного налаштування індуктивності $L_{кшр}$ (рис.10).

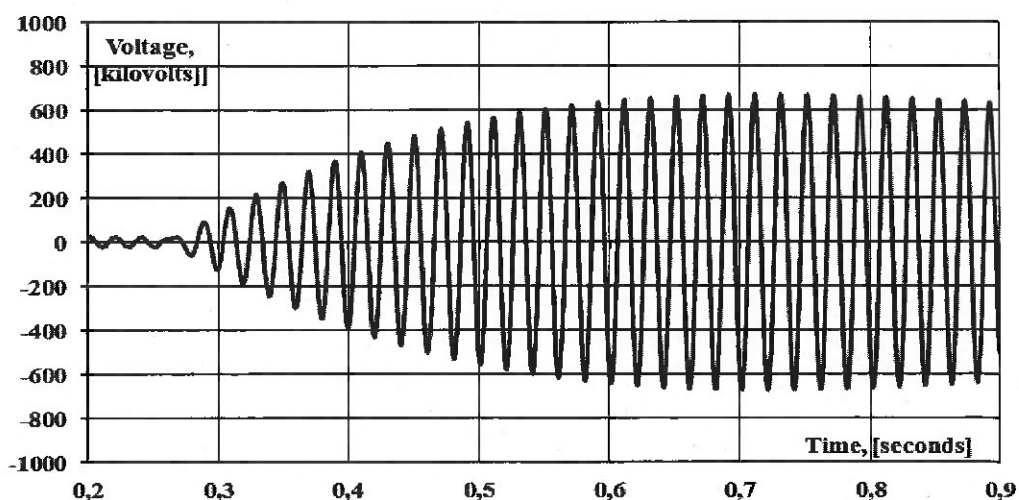


Рис. 10. Резонансні перенапруги при використанні змінної індуктивності

Таким чином використання КШР дозволяє знизити значення перенапруг до безпечного рівня.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання щодо вдосконалення математичних моделей для дослідження і аналізу перенапруг у магістральних електричних мережах, що дозволило науково обґрунтувати заходи для попередження виникнення перенапруг при несиметричних режимах роботи ліній електропередавання надвисокої напруги.

Основні наукові та практичні результати роботи.

1. Удосконалено математичну модель магістральної електричної мережі, яка, на відміну від традиційної, враховує вплив коронного розряду та грозозахисних тросів на рівень перенапруг при несиметричному режимі роботи лінії. Адекватність запропонованої моделі підтверджена шляхом порівняння результатів, що були отримані за допомогою моделювання та з натурних експериментів. Похибка результатів моделювання становила 1,3%.

2. За допомогою математичного моделювання проведено аналіз роботи неповнореакторних груп шунтувальних реакторів та визначено вплив їх режимів на ліній електропередавання надвисокої напруги. Уперше обґрунтовано використання програмованих комутацій шунтувальних реакторів, при яких частково нівелюються негативні наслідки неповної компенсації фази лінії (що вимушено працює без шунтувальних реакторів) та знижуються рівні несиметрії і перенапруг.

3. Уперше за результатами математичного моделювання обґрунтовано та рекомендовано заземлювати грозозахисні троси як дієвий допоміжний захід обмеження кратностей перенапруг на ЛЕП НВН. Зниження рівня напруги при заземленні грозозахисних тросів склало від 6 до 12% номінальної напруги.

4. Запропоновано постійно використовувати компенсаційний реактор при роботі повнореакторної групи шунтувальних реакторів у симетричних та несиметричних режимах ЛЕП НВН. У порівнянні з загальноприйнятою схемою підвищується надійність роботи МЕМ за рахунок відсутності потреби у використанні складних пристроїв для оперативного введення в роботу компенсаційного реактора. Також зменшується потреба у додатковому коштовному комутаційному устаткуванні.

5. Розроблена схема підключення у порівнянні з загальноприйнятою також дає супутній економічний ефект за рахунок покращення параметрів нормального усталеного режиму. Так, моделювання режимів у діючій електричній мережі показало, що сумарні втрати у реакторній групі зменшуються на 6,183 кВт·год у порівнянні з застосуванням трипроменевої реакторної схеми, що усереднено за рік складає 325225,8 кВт·год

6. На основі проведених досліджень визначено, що для уникнення пошкодження компенсаційних та шунтувальних реакторів внаслідок виникнення перенапруг на обладнанні в аномальних режимах, необхідно використовувати компенсаційний реактор та нейтральні виводи ШР на номінальну напругу 110 кВ при їх використанні у ЛЕП НВН з номінальною напругою 750 кВ.

7. Уперше розроблено рекомендації для виконання безпечної комутації лінійних вимикачів при переведенні лінії з неповнофазного режиму роботи у повнофазний (та навпаки) з метою недопущення появи комутаційних перенапруг. Для таких режимів

шляхом математичного моделювання підтверджено, що відхилення напруги на робочих фазах ЛЕП НВН ОЕС України знаходиться у допустимих межах.

8. Отримані результати роботи були впроваджені у вигляді методичних матеріалів для дослідження перехідних процесів при комутаціях компенсованих ліній електропередачі надвисокої напруги, а також рекомендацій по реалізації заходів з підвищення надійності комутацій в НЕК «Укренерго» (м. Київ) та ТОВ «ЕНКОР ПЛЮС» (м. Березань) з метою використання під час експлуатації та проектування ЛЕП НВН.

9. Подальше використання результатів роботи пропонується у проєктних та експлуатаційних організаціях, що займаються МЕМ для попередження розвитку аварійних процесів внаслідок появи аномальних перенапруг.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. №2. С. 69 – 73.
2. Тугай Ю.І., Лиховид Ю.Г. Моделювання впливу коронного розряду на перенапруги в несиметричних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. №45. С. 16 – 20.
3. Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Попередження резонансних перенапруг при несиметричних режимах ліній електропередач з поперечною компенсацією. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. №164. С. 42 – 43.
4. Лиховид Ю.Г., Тугай І.Ю. Моделювання режимів роботи компенсованих ліній електропередач. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. №1 (6). С. 10 – 12.
5. Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А., Тугай І.Ю. Використання неповнореакторних режимів ліній електропередач. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. №186. С. 12 – 13.
6. Тугай І.Ю., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Вплив грозозахисних тросів на значення перенапруг у несиметричних режимах ліній електропередачі. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2016. №2 (5). С. 6 – 8.
7. Лиховид Ю. Моделювання усталеного двофазного режиму роботи ліній електропередач надвисокої напруги. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2018. Vol. 7(35). P. 34 – 39.
8. Лиховид Ю. Пристрій для компенсації лінії електропередачі. пат. 128357 Україна. № u 2018 04269; заявл. 18.04.2018; опубл. 10.09.2018, Бюл. № 17.
9. Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Дослідження гармонійних перенапруг в лінії електропередачі надвисокої напруги за допомогою штучної нейронної мережі: *матеріали міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних*

технологій», Рівне, 2-4 березня 2018 р. Рівне: Рівненський державний гуманітарний університет, 2018. С. 201 – 203.

10. Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Вплив компенсаційного реактора на режими роботи магістральної електричної мережі: *матеріали XVIII міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми енергозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика»*, Кременчук, 15-17 травня 2018 р. Кременчук: Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, 2018. С. 141 – 143.

11. Кучанський В.В., Мельничук В.А., Лиховид Ю.Г. Використання керованих шунтувальних реакторів для попередження перенапруг в несиметричних режимах електричних мереж: *матеріали міжн. наук. конф. «Power quality in distribution networks with distributed generation»*, Kyiv, July 4-5, 2019. Lodz: Lodz University of Technology, 2019. Pp. 165 – 169.

12. Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А., Тугай І.Ю. Особливості виконання комутацій вимикачами SF6 в електричних мережах надвисокої напруги: *матеріали міжн. наук. конф. «Priority directions of science and technology development»*, Kyiv, September 27-29, 2020. Kyiv, 2020. Pp. 228 – 234.

АНОТАЦІЇ

Лиховид Ю.Г. Перенапруги в несиметричних режимах магістральних електричних мереж. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукового завдання щодо вдосконалення методів, математичних моделей для аналізу режимних перенапруг у магістральних електричних мережах при наявності несиметрії параметрів та розроблення наукових підходів до заходів для попередження їх появи та розвитку понад критичні значення

В роботі розглянуто та класифіковано види перенапруг при несиметричному режимі роботи магістральних електричних мереж, проведено аналіз зон існування достатніх та необхідних для виникнення перенапруг значень параметрів режимів, розроблено та науково обґрунтовано заходи запобігання виникненню перенапруг.

У дисертаційній роботі розроблено математичну модель ліній електропередавання з урахуванням впливу коронного розряду. Це у значній мірі дозволило підвищити точність отримуваних результатів. Здійснено верифікацію отриманої моделі шляхом порівняння отриманих результатів моделювання з пусковими та системними випробуваннями реальної лінії надвисокої напруги.

У дисертаційній роботі розглянуто проблему виникнення перенапруг на лініях з неповною реакторною групою та вперше запропоновано розв'язання її шляхом використання шунтувальних реакторів інших підстанцій. Також запропоновано використання компенсаційного реактора не лише під час безструмової паузи однофазного автоматичного повторного ввімкнення, а й в нормальному режимові. За допомогою проведеного моделювання було доведено безпечність постійного

знаходження під напругою компенсаційного реактора, а також розраховано додатковий економічний ефект у вигляді зниження втрат енергії реакторної групи на 6,183 кВт·год у порівнянні з застосуванням класичної схеми.

Шляхом моделювання несиметричних режимів доведено дієвість та надійність використання неповнофазних режимів роботи повітряних ліній надвисокої напруги. Розроблена безпечна послідовність роботи вимикачів для уникнення перенапруг при здійсненні комутацій при неповнофазних режимах роботи.

Розглянуто та досліджено вплив режиму роботи грозозахисних тросів на рівень внутрішніх перенапруг в повітряних ліній надвисокої напруги.

Ключові слова: перенапруга, несиметричний режим, коронний розряд, лінії надвисокої напруги, грозозахисний трос, шунтувальний реактор, компенсаційний реактор.

ANNOTATION

Lykhovyd Y. Overvoltages in asymmetric modes of main electrical networks. – The Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Candidate of technical sciences in the specialty 05.14.02 – electrical power plants, networks and systems. – The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of improving methods, mathematical models, development of scientific approaches and measures for prevention and elimination of the consequences of the occurrence of the phenomenon of overvoltages in main electrical networks.

The types of overvoltages under the asymmetrical operation of main electrical networks are considered and classified.

In the dissertation the simulation model of transmission lines is developed taking into account the influence of corona discharge. This greatly improved the accuracy of the results. Verification of the obtained model was performed by comparing the obtained simulation results with the start and system tests of the real ultra-high voltage line.

The problem of occurrence of overvoltage phenomena on lines with incomplete reactor group is considered and for the first time it was solved by using shunt reactors of other substations.

In dissertation work the use of compensating reactor is proposed not only during uninterrupted pausing of single-phase automatic re-activation, but constantly at work of a full-reactor group of shunt reactors. With the help of the simulation, the safety of the constant finding of the compensating reactor under voltage was proved, and the received economic effect was calculated.

The efficiency and reliability of the use of incomplete phase modes of lines has been experimentally proved. The sequence of operation of switches for the avoidance of overvoltages during switching operations under incomplete operating modes is developed.

The influence of the lightning protection overhead ground wire on the level of overvoltages arising is investigated.

Keywords: over-voltage, asymmetric mode, crown, ultra-high voltage line, overhead ground wire, shunt reactor, compensating reactor.