

УДК 621.311

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОРОННОГО РОЗРЯДУ НА ПЕРЕНАПРУГИ В НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Ю.І. Тугай, докт. техн. наук, Ю.Г. Лиховид, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: tugay@ied.org.ua

Мета цього дослідження – вивчення впливу коронного розряду на рівень можливих перенапруг у лініях електропередачі надвисокої напруги. Для виконання аналізу була розроблена імітаційна модель, яка відтворює залежність кратності перенапруг від демпфівального впливу корони. Запропонована модель дає змогу ефективно обчислювати розподілені параметри схеми заміщення вздовж ліній електропередачі у режимах, що досліджуються. Визначено залежність можливого рівня перенапруг від робочої напруги лінії. Зроблено висновки щодо можливості практичного використання коронного розряду для зниження рівня перенапруг.

Бібл. 7, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: перенапруги, несиметричний режим роботи, корона, лінії надвисокої напруги.

Як відомо, під час проектування ліній електропередачі (ЛЕП) вибір перерізу проводів здійснюють на підставі ряду техніко-економічних розрахунків альтернативних варіантів спорудження. При цьому обов'язковим обмежуючим фактором у лініях високої та надвисокої напруг є мінімально допустимий еквівалентний переріз фазних проводів за умовами виникнення коронування з урахуванням неоднорідності електричного поля на їх поверхні. При досягненні граничних значень мінімально допустимого перерізу виконують розщеплення фази на декілька проводів у ЛЕП надвисокої напруги (НВН). Тим самим збільшуються еквівалентні радіус і площа перерізу провідників фази, компенсується неоднорідність поля і відповідно зменшується коронний розряд, наслідками якого є низка таких небажаних явищ, як втрати електричної енергії, акустичні шуми, порушення сталої і надійної роботи високочастотного зв'язку [4, 7]. Але крім перерахованих негативних наслідків коронний розряд є причиною й позитивного ефекту зниження перенапруг у нормальних та аномальних режимах ЛЕП НВН. Відомі такі результати експериментальних досліджень, що виконувались у середині минулого сторіччя з метою вивчення коронного розряду, як можливого технічного засобу для обмеження перенапруг [2, 3].

Також слід відзначити, що корона впливає і на значення параметрів еквівалентної схеми заміщення ЛЕП, що у свою чергу слід враховувати, наприклад, під час вибору уставок засобів автоматичного протиаварійного захисту. Взагалі планові та оперативні розрахунки режимів ліній електропередачі, виконані без врахування коронного розряду, мають суттєві похибки, що знижує практичну цінність їх результатів. У той же час наявні методи врахування ефекту корони досить неточні й мало пристосовані для використання в задачах оцінки обмеження внутрішніх перенапруг. Складність врахування ефекту впливу коронного розряду на режими ліній НВН полягає у тому, що якісні та кількісні характеристики відповідного фізичного процесу залежать від величини та форми кривої напруги на проводах лінії, які у свою чергу визначаються зміненими під дією корони параметрами ліній. Врахування взаємного зв'язку між параметрами режиму і параметрами ліній, обумовленого коронним розрядом, під час розрахунків за відомими методиками є досить наближеним через значні труднощі [3, 6].

Метою цієї роботи було моделювання коронного розряду ЛЕП НВН для підвищення точності результатів аналізу аномальних режимів. Була запропонована та розроблена нова імітаційна модель, що дає змогу визначити в планових та оперативних режимах уточнені розподілені параметри вздовж ліній електропередачі з врахуванням впливу коронного розряду.

Традиційно значення початкової напруги корони визначають за градієнтом потенціалу

електричного поля на поверхні електродів з малими радіусами кривизни. Але на практиці на виникнення коронного розряду впливають й інші чинники. До найбільш важливих відносяться геометрія розташування проводів та стан їх поверхні (наявність механічних пошкоджень та забруднень). Ці чинники викликають появу великої кількості джерел активації розряду на поверхні проводу. Відповідні локальні розряди малої потужності називаються «місцевою короною». Для неї характерний розряд при напрузі на лінії, меншій за напругу корони ($U < U_k$). У випадку тривалого підвищення напруги чи атмосферних опадів відбувається подальша іонізація повітря навколо проводів, що у свою чергу призводить у певний момент часу до збільшення струму коронного розряду. Виникає так звана «загальна корона», вона розповсюджується на поверхні усього проводу. При ній можна спостерігати фіолетово-блакитне «підсвічування» проводів, озоновий запах та шуми (потріскування). На лініях електропередачі, особливо високовольтних, коронний розряд іонізує навколишнє повітря та у вигляді чохла симетрично охоплює провід, збільшуючи його електродинамічну ємність. У цілому процес корони на проводі складається з безперервного процесу розвитку та затухання стримерів, що розповсюджуються вздовж проводів, тросів та опор і випромінюються в оточуюче середовище. Взагалі за сталої напруги характер корони на проводах буде стаціонарним. Під час несприятливих погодних умов початкова напруга корони знижується, і загальна корона виникає на всіх лініях електропередачі практично незалежно від діаметра проводів та їх коефіцієнтів гладкості. Як було зазначено вище, коронний розряд викликає суттєві втрати енергії, значення яких залежить від кількості об'ємного заряду та його інтенсивності. Усі ці фактори необхідно враховувати під час вибору оптимальної конструкції ЛЕП НВН.

Великий вплив на розвиток корони мають погодні умови. Зокрема, існує залежність річних втрат енергії на корону від метеорологічних умов уздовж траси лінії, що визначають початкову напругу корони. Найменші втрати відбуваються за гарної сухої погоди, а найбільші – при паморозі. Не останнє значення має й температура поверхні проводів: навіть при незначному перегріванні поверхні провідника відносно температури оточуючого середовища зменшуються втрати енергії. Для визначення впливу цих умов на значення втрат активної потужності на корону зазвичай використовують таку класифікацію погодних умов:

1. Сприятлива погода без опадів;
2. Сухий сніг – сніжна крупа, сніжні зерна, крижані голки, заметілі, заметілі з випаданням снігу;
3. Дощ і мокрий сніг;
4. Паморозь, змерзла ожеледь, сніг і мокрий замерзлий сніг.

В електроенергетиці для вирішення інженерних задач, пов'язаних з економічністю роботи ЛЕП НВН, рекомендовано використовувати метод оцінювання втрат активної потужності на корону, відповідно до якого для районів України враховуються усереднені значення тривалості різних груп погодних умов (таблиця) [4].

У таблиці параметр T_p означає тривалість певної групи погоди за рік, а $p(A)$ – імовірність появи цієї групи погоди.

Питомі середньорічні втрати активної потужності на корону для трифазної лінії визначаються шляхом підсумовування втрат за фазами для кожної групи погодних умов [4]:

$$\Delta P_{0k} = nr_0^2 (\psi_{с.п.} \sum_{k=1}^3 \Theta_{г.п.к} + \psi_{с.с.} \sum_{k=1}^3 \Theta_{с.с.к} + \psi_{д.} \sum_{k=1}^3 \Theta_{д.к} + \psi_{пам.} \sum_{k=1}^3 \Theta_{пам.к}), \quad (1)$$

де $\Theta_{г.п.к}$, $\Theta_{с.с.к}$, $\Theta_{д.к}$, $\Theta_{пам.к}$ – узагальнені втрати потужності на корону для сприятливої погоди, сухого снігу, дощу і паморозі для k -ї фази лінії; $\psi_{с.п.}$, $\psi_{с.с.}$, $\psi_{д.}$, $\psi_{пам.}$ – імовірність відповідних груп погоди.

Саме розгляд негативного фактора зростання втрат активної енергії переважав до цього часу при аналізі ефекту коронного розряду. Проте, як зазначалось вище, існують й позитивні ефекти цього явища: збільшується

Група погоди	T_p , год	$p(A)$
Сприятлива погода	7235	0,8259
Сухий сніг	800	0,0913
Дощ	500	0,0571
Паморозь та ожеледь	225	0,0257

коефіцієнт зв'язку між паралельними проводами, що зумовлює деформацію та гасіння імпульсних хвиль, які поширюються вздовж лінії, та обмежується значення внутрішніх перенапруг до менших кратностей відносно до робочої напруги. Під час виконання такої роботи ефект впливу коронування ЛЕП НВН на рівень перенапруг, що виникає при несиметричному режимі, досліджувався з врахуванням досвіду попередніх досліджень. Моделювання схеми та дослідження режиму роботи здійснювалось за допомогою середовища MATLAB/Simulink. Схема імітаційної моделі зображена на рис. 1.

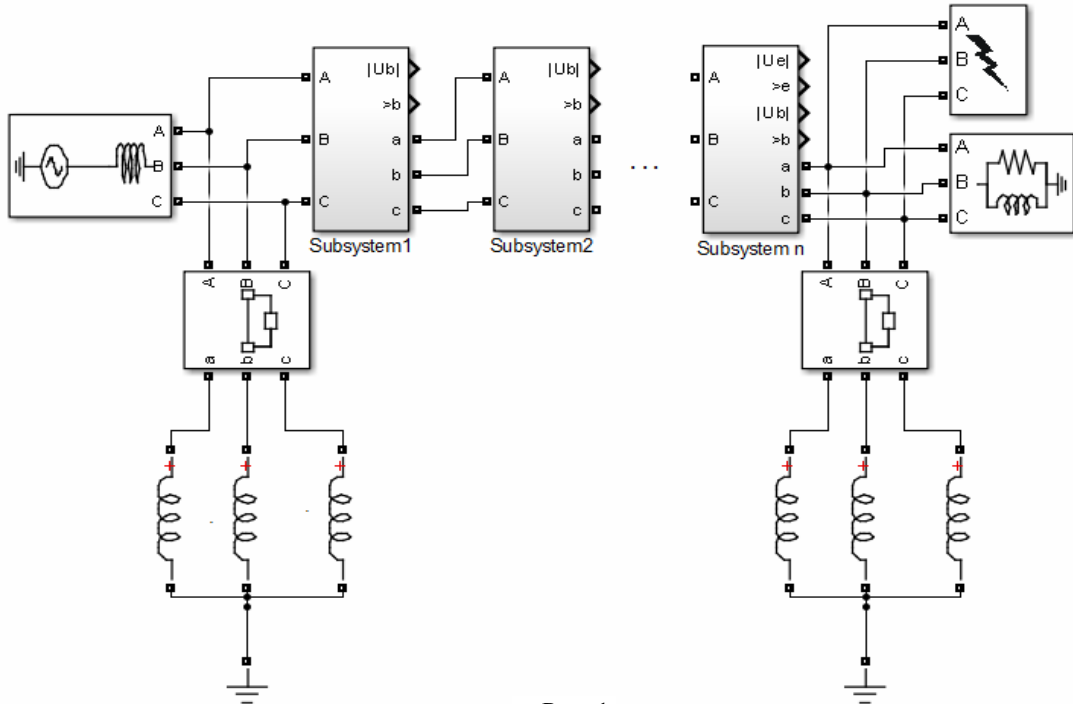


Рис. 1

Враховуючи, що початкова напруга корони складає 1,1...1,3 напруги ЛЕП НВН, підключення моделі корони здійснювалось відповідним ключем лише при досягненні необхідних величин напруги.

Оскільки втрати на корону є функцією від напруги, особливістю розробленої імітаційної моделі є врахування розосередженого коронного розряду, а не за допомогою загальноприйнятих зосереджених елементів схеми заміщення ЛЕП. Зазначений підхід був реалізований шляхом поділу лінії електропередачі на n ділянок з фактично різними параметрами та моделюванням окремого коронного розряду на кожній з них. Це суттєво підвищує достовірність результатів.

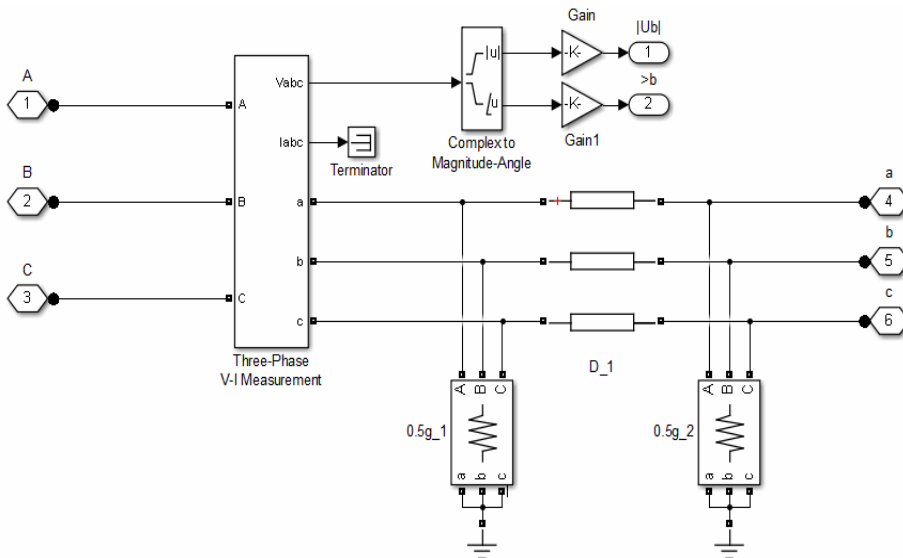


Рис. 2

Усередині кожної ділянки, зображеної на рис. 1, окремими підсистемами моделюється ділянка лінії з урахуванням коронного розряду залежно від напруги на кожній з них. Коронний розряд враховується у «П»-подібній схемі заміщення лінії електропередачі, що зображена на рис. 2.

Було проведено моделювання на прикладі ЛЕП НВН 750 кВ РАЕС-Київська, результати яко-

го наведені на рис. 3. Враховуючи, що фази цієї ЛЕП виконані у варіанті 5*АС400/51, та використовуючи узагальнені характеристики втрат на корону для різних груп погоди, отримуємо $\Delta P_{0k} = 12,896$ кВт/км. До переваг розробленої імітаційної моделі можна зарахувати також значну гнучкість вибору місця аналізу короткого замикання (КЗ) та отримання параметрів лінії по усій її довжині.

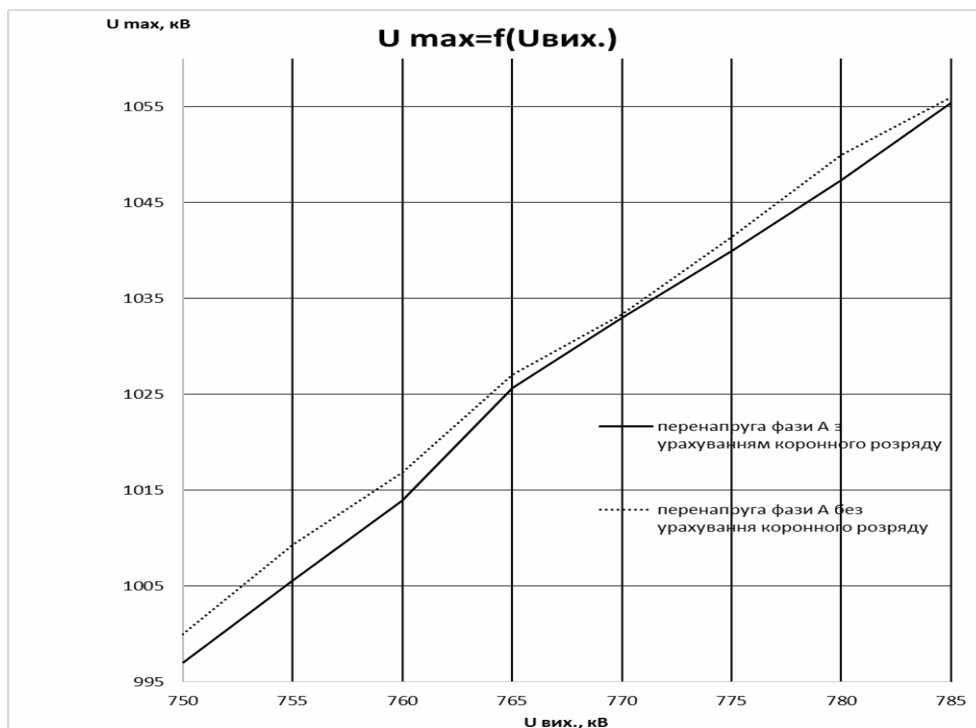


Рис. 3

Висновки.

Створена «гнучка» імітаційна модель дає змогу оперативно уточнювати поточні параметри ліній електропередачі надвисокої напруги у симетричних та несиметричних режимах роботи з урахуванням впливу коронного розряду.

Результати моделювання показують, що впливу виключно коронного розряду для обмеження перенапруг, які виникають у несиметричних режимах, до прийнятних рівнів недостатньо. Проте у поєднанні з іншими чинниками, наприклад, як режим роботи грозозахисних тросів, на практиці можна очікувати на суттєве зниження рівня перенапруг, що дасть можливість знизити вимоги до інженерно-технічних засобів, які застосовуються для обмеження перенапруг на ЛЕП НВН.

1. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбиовича – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
2. Дмоховская Л.Ф. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
3. Сегада М.С., Губіліт І.В., Дудурич О.Б. Вплив корони на перенапруги в ЛЕП 750 кВ // Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2007. – С. 147–151.
4. Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л. Электричні мережі та системи. – К: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.
5. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г. Дослідження внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах надвисокої напруги та розробка заходів по їх запобіганню й обмеженню // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 35. – С. 117–122.
6. Федченко І.К., Кондра Б.Н. Коэффициенты связи линий электропередачи при импульсной короне. – К.: Техніка, 1968. – 120 с.
7. Черненко П.А. Оперативное определение потерь активной мощности (нагрузочных и на корону) в высоковольтных линиях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – № 2 (11). – С. 31–33.

УДК 621.311

Ю.І. Тугай, докт. техн. наук, **Ю.Г. Лиховид**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Моделирование влияния коронного разряда на перенапряжения в несимметричных режимах линий электропередач сверхвысокого напряжения

Цель этого исследования – изучение факторов, которые влияют на уровень перенапряжений в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН), а именно влияние коронного разряда. Специально для проведения необходимых опытов была разработана цепочная имитационная модель в среде MATLAB/Simulink, которая позволила учитывать влияние коронного разряда на кратность перенапряжения. Коронный разряд на

ЛЭП СВН смоделирован дополнительной нагрузкой, величина которой была определена при помощи среднегодовых потерь мощности на корону. Учитывая тот факт, что начальное напряжение короны составляет 1,1...1,3 номинального напряжения линии, модель коронного разряда подключается соответствующим ключом по достижению необходимого уровня напряжения. Так как потери на корону являются функцией от напряжения, которое распределено неравномерно вдоль ЛЭП СВН, особенностью разработанной имитационной модели является не сосредоточенный учет коронного разряда, а рассредоточенный. Такой подход позволил существенно повысить точность моделирования и был реализован путем разделения линии электропередачи на n участков с одинаковыми параметрами и имитацией отдельного коронного разряда на каждом из них. В результате исследований определена зависимость уровня перенапряжения от начального напряжения. Сделаны выводы по поводу теории использования коронного разряда для снижения уровня перенапряжений. Библиограф. 7, рис. 3, таблица.

Ключевые слова: перенапряжения, несимметричный режим работы, корона, линии сверхвысокого напряжения.

Yu.I. Tugai, Yu.G. Lykhovyd

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Modeling the influence of corona discharge on the surge in single-ended modes of extra-high voltage transmission lines

The aim of the research was to study the factors that influence the level of re-voltage power lines in the ultra-high voltage (EHV transmission lines), namely the effect of corona discharge. Especially for the necessary experiments was designed chained simulation model in MATLAB / Simulink environment, which has allowed to take into account the effect of corona discharge on the multiplicity of overvoltage. Corona discharge on power lines EHV modeled additional load, the value of which was determined by the average annual loss of power to the crown. Given the fact that the initial tension of 1.1-1.3 crown nominal line voltage, corona model connects the corresponding key to achieve the desired voltage level. Since the corona losses are a function of the voltage, which is evenly distributed along the transmission line IOS feature developed simulation model is not focused accounting corona and dispersed. This approach will significantly improve simulation accuracy, has been implemented by dividing the transmission line into n sections with the same parameters, and simulated a single corona discharge on each of them. As a result of research the dependence of the overvoltage level of the initial voltage. The conclusions about the theory of using a corona discharge to reduce the surge level. References 7, figures 3, table.

Key words: over-voltage, single-ended mode, crown, EHV line.

Надійшла 10.10.2016

Received 10.10.2016

УДК 621.316

**АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ МЕРЕЖА-ТРК
У РЕЖИМІ ПЛАВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.
ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ МОСТОВОГО ТРК НА ЙОГО
ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СУМІСНІСТЬ З МЕРЕЖЕЮ**

О.І. Чиженко, докт. техн. наук, **І.В. Трач**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: trachi@ied.org.ua

Отримано аналітичні співвідношення у замкнутому вигляді стосовно електромагнітних процесів у моделі системи мережа – керований мостовий тиристорний компенсатор реактивної потужності, які відображають залежність напруг і струмів на його елементах, а також його вихідних енергетичних інтегральних показників від основних параметрів, у тому числі від величини індуктивності дроселя у колі випрямленого струму тиристорного моста. Ці співвідношення можуть бути застосовані для оптимізації режимів та параметрів мостового тиристорного компенсатора з метою забезпечення його електромагнітної сумісності з мережею, у якій він здійснює корекцію $\cos\varphi$. Бібліограф. 5, рис. 4.

Ключові слова: модель системи, мережа, ТРК, реактивна потужність, якість струму.

Важливою проблемою у вітчизняних електроенергетичних системах і мережах є покращення якості електроенергії, що передається промисловим споживачам, зокрема, забезпе-