

№ 14. ВІДДІЛ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.311.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ПО ЇХ ЗАПОБІГАННЮ Й ОБМЕЖЕННЮ

В.Г. Кузнецов, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай**, канд. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Виконано дослідження процесів в електропередачах надвисокої напруги з метою розробки та запровадження заходів по запобіганню внутрішнім перенапругам. На основі аналізу регістrogram аварійних процесів у діючих магістральних електричних мережах виявлено фактори, які впливають на значення кратності перенапруг. Виконано класифікацію внутрішніх перенапруг залежно від джерел їх виникнення та тривалості. Розроблено універсальні моделі, що дають змогу одночасно виконувати аналіз як короточасних, так і тривалих перенапруг. За допомогою цих моделей виконано аналіз внутрішніх перенапруг у лініях з номінальною напругою 750 кВ, які відходять від підстанції "Київська". Підготовлено практичні рекомендації для впровадження в діючих магістральних електричних мережах України. Бібл. 5, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова: лінії електропередачі надвисокої напруги, внутрішні перенапруги, неповнореакторні режими, обмеження перенапруг.

Магістральні лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) 330...750 кВ вирішують завдання системного характеру в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України. Вони використовуються для створення потужних міжсистемних і внутрішньосистемних зв'язків в ОЕС, передачі електроенергії від великих електростанцій, зокрема, від потужних блоків атомних електростанцій (АЕС). Крім того, розвиток ЛЕП НВН та їх ефективна експлуатація є важливою передумовою майбутньої інтеграції Об'єднаної енергосистеми України в Європейську енергосистему. Вихід з ладу чи навіть відключення ЛЕП НВН та устаткування, що забезпечує приєднання до енергосистеми, може викликати розпад ОЕС на окремі частини, в яких буде існувати дефіцит або надлишок генеруючих потужностей, і відповідно змусити відключення споживачів у дефіцитних регіонах і зупинку блоків електростанцій, перш за все АЕС, у надлишкових. Зрозуміло, що такий аномальний режим магістральної електричної мережі не може вважатись ефективним і безпечним. Отже, попередження відключення ЛЕП НВН є важливою науковою і практичною задачею як з погляду надійності електропостачання, так і з метою забезпечення задовільних показників якості й ефективності функціонування магістральної електричної мережі [3].

Як відомо, однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в магістральних електричних мережах є таке збурення, як перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги понад максимально припустиме відповідно до технічного регламенту значення [1]. Це пояснюється, зокрема, тим фактором, що загалом для елементів магістральних мереж передбачається порівняно малий резерв ізоляції через високу її ціну для даного класу напруги. При проектуванні магістральних електричних мереж, зокрема підстанцій надвисокої напруги (НВН), ізоляцію обладнання обирають за принципом нормалізації: її рівень визначають, виходячи з впливу найбільшої робочої напруги. А для короточасних перенапруг передбачають використання спеціальних заходів обмеження до рівня, при якому не буде потрібно посилення ізоляції. Цей принцип дає можливість зменшити витрати на будівництво

електроенергетичних об'єктів при збереженні достатньої надійності їх експлуатації [2]. Величини комутаційних перенапруг в електричних мережах номінальною напругою 750 кВ є визначальними під час вибору засобів обмеження короткочасних перенапруг, на відміну від мереж з меншою номінальною напругою, де вирішальну роль відіграють атмосферні перенапруги.

Метою виконання досліджень у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки НАН України були аналіз умов виникнення та протікання процесів, що спричиняють у діючих електричних мережах внутрішні перенапруги, а також розробка заходів по запобіганню або зменшенню кратності цих перенапруг до безпечних значень. Для цього було розглянуто параметри схеми і режиму магістральних електричних мереж НВН. Оскільки експериментальні дослідження внутрішніх перенапруг у мережах такого класу становлять значні труднощі, особливого значення набуває вивчення умов виникнення та процесу протікання перенапруг цього класу за допомогою методів математичного моделювання. Було виконано дослідження необхідних і достатніх умов виникнення і розвитку внутрішніх перенапруг різного виду в магістральних електричних мережах, причому розглядалися не тільки стаціонарні та квазістаціонарні режими, а й перехідні процеси, що виникають у результаті комутацій. Розроблені математичні моделі елементів магістральних електричних мереж, на відміну від традиційних, орієнтованих на дослідження режиму певного типу (перехідного або усталеного), є універсальними і найбільш адекватно відтворюють фізичні процеси в елементах електричних мереж.

Предметом раніше виконаних у відділі досліджень були в основному внутрішні тривалі перенапруги у магістральних мережах на основній частоті. Але з практики експлуатації ЛЕП НВН відомо, що в них трапляються також тривалі перенапруги на частотах, відмінних від основної. Як показав аналіз реєстрограм аварійних процесів, ці тривалі внутрішні перенапруги виникають під час резонансного режиму в електричних колах з лінійними елементами при наявності джерел спотворень. Це, перш за все, магнітний шунт трансформатора в режимі холостого ходу, який можна розглядати як джерело електрорушійної сили (ЕРС) з частотами гармонічних складових. Таким чином, нелінійні елементи безпосередньо не входять у резонансне коло, а є джерелом зовнішньої сили, яка викликає коливання. В електричних мережах усталені коливання на частотах гармонічних складових можуть спричинити перенапруги резонансного характеру, викликати перевантаження та ушкодження конденсаторів, обумовити неправильну дію пристроїв релейного захисту і порушити роботу ліній зв'язку.

Короткочасні внутрішні перенапруги виникають в електричних мережах порівняно часто у вигляді вільних коливань. Вони є результатом, по-перше, будь-якої нормальної варіації електричної або магнітної взаємодії в мережі (вимикання й включення окремих елементів, різка зміна споживання, спрацьовування розрядників і т.п.) і, по-друге, аварійних ситуацій у мережі (коротке замикання (КЗ), обрив фази, спрацьовування засобів протиаварійної автоматики і т.п.). Тривалі внутрішні перенапруги спричиняються резонансом, збудженим і підтримуваним постійно діючою зовнішньою силою; вони обумовлені властивостями мережі й можуть бути усунуті лише шляхом зміни співвідношення між параметрами мережі та її режиму. На відміну від короткочасних перенапруг, які тривають соті частки секунди, резонансні не тільки виникають непередбачено, але й можуть існувати порівняно тривалий час, поки дія захисту від підвищення напруги, регуляторів напруги або втручання персоналу не призведуть до зміни схеми й режиму.

Розроблені моделі дали змогу визначити шляхи для попередження та гасіння внутрішніх комутаційних перенапруг у діючих магістральних мережах. Перш за все це стосується програмування комутацій, для чого було розроблено алгоритм оптимального вибору варіантів за критерієм мінімальних тривалості та кратності перенапруг. Також було враховано, що приводи сучасних вимикачів дають змогу виконувати керовані комутації [5], тобто вмикати електричне коло при проходженні миттєвого значення напруги через нуль, а розмикати – при проходженні через нуль миттєвого значення струму. Такі дії мають на меті зменшити запаси обмінної енергії в елементах системи, а значить, і знизити рівень комутаційних перенапруг.

Але неодноразовість виконання комутацій, спричинена зсувом фаз напруги та струму в трифазній мережі, викликає появу короткочасного неповнофазного режиму і відповідно може викликати перенапруги вже резонансного характеру. Тому перш ніж дозволити виконання керованих комутацій, необхідно виконати моделювання процесів та їх аналіз для конкретних умов електричної мережі [4]. У відділі було розроблено методологію виконання такого аналізу.

В електричних мережах НВН шунтувальні реактори (ШР) встановлюються на лініях, виходячи з вимоги забезпечення припустимого рівня напруги на ній у мінімальному режимі. При експлуатації існує ймовірність виходу з ладу ШР у одній з фаз. На час його ремонту або заміни електрична мережа буде функціонувати в неповнореакторному режимі. У неповнореакторному режимі ступінь компенсації зарядної потужності відповідної фази буде меншим, ніж двох інших. Тому в фазі без ШР виникає небезпека появи більших за рівнем перенапруг. Крім того, постійно діюча несиметрія неповнореакторного режиму буде накладатися на короткочасну несиметрію при виконанні керованої комутації. Отже, ризики виникнення короткочасних і тривалих перенапруг зростають. Спеціальні пристрої для обмеження перенапруг типу ОПН слід розглядати перш за все як додатковий захист, оскільки він лише обмежує перенапруги, що виникли при несприятливих умовах здійснення комутації. На противагу їм використання керованої комутації може впливати на саму причину виникнення перенапруг.

Для оцінки рівнів перенапруг і дієвості застосування керованої комутації для їх зменшення було проведено дослідження на математичній моделі лінії 750 кВ, яка має такі параметри для прямої та нульової послідовностей: активний опір – 5,65 і 58,6 Ом; реактивний опір – 101,58 і 354,08 Ом; ємнісна провідність – $1389,5e-6$ і $939,03e-6$ См.

Опір ШР становить 1875 Ом, а еквівалентний опір системи та напруга джерела живлення в мінімальному режимі – 97,04 Ом і 706 кВ відповідно.

Досліджувались перехідні процеси в трьох режимах компенсації зарядної потужності лінії: підключено один ШР на початку лінії; підключено один ШР в кінці лінії; підключено обидва ШР на початку і в кінці лінії. Вплив корони і дугові процеси в комутаційних апаратах при розрахунках не враховано.

Для кожного рівня компенсації зарядної потужності в якості еталонного було прийнято повнореакторний режим з послідовністю підключення фаз С, В, А. При неповнореакторному режимі ШР було встановлено у фазах А і С. Характер зміни напруги в повнореакторному режимі при підключенні ненавантаженої лінії з ШР на її початку показано на рис. 1. У

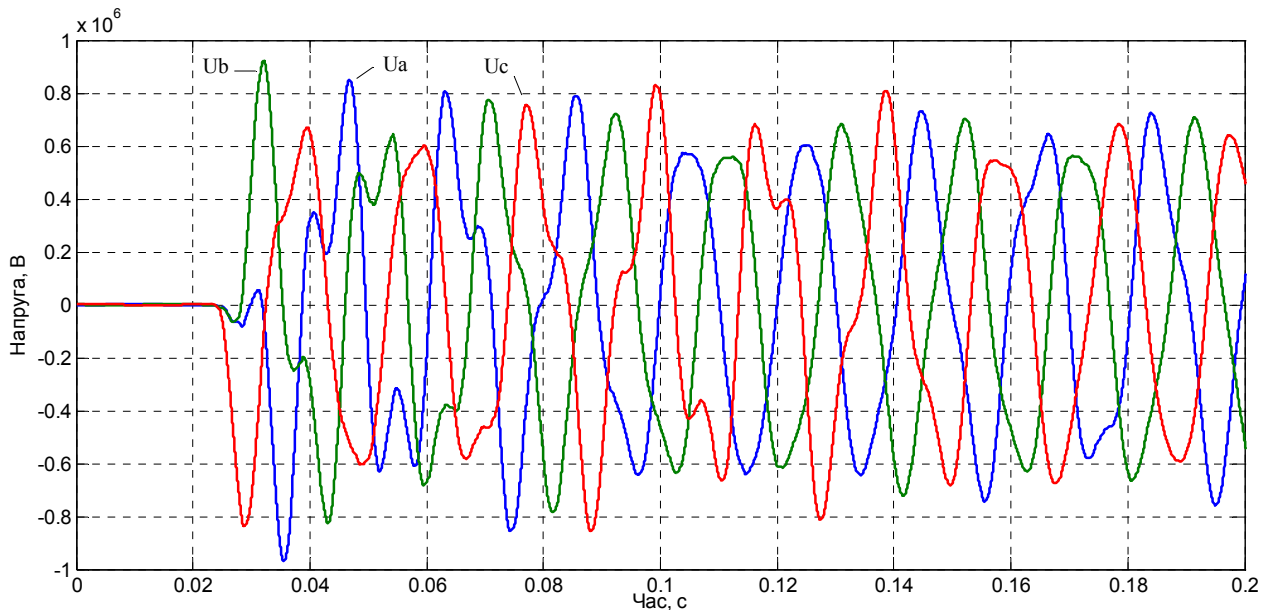


Рис. 1

цьому випадку максимальна за амплітудою напруга в кінці лінії зафіксована у фазі А – 967,5 кВ, у фазі В максимальна напруга склала 921,2 кВ, а у фазі С – 856,4 (табл. 1). У неповнореакторному режимі при тій же послідовності включення фаз максимальна напруга в фазі А зменшується на 35,3 кВ, у фазі С – на 60,9 кВ, але у фазі В вона зростає на 103,8 кВ і сягає 1025,0 кВ. Отже, можна зробити висновок, що в неповнореакторному режимі нерівномірність напруг у фазах через неоднакові умови їх підключення може суттєво збільшитися по відношенню до повнореакторного режиму.

Таблиця 1

Підстанція	Діапазон зміни миттєвих значень фазних напруг по кінцях лінії, кВ					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
Повнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-843,30	739,30	-721,80	796,80	-771,10	751,40
Кінець	-967,50	852,00	-827,50	921,20	-856,40	829,40
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-810,90	776,40	-766,00	844,70	-724,70	708,00
Кінець	-932,20	868,20	-874,20	1025,00	-795,50	780,80
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В - зростає, А, С						
Початок	-801,50	725,10	-771,10	828,70	-739,30	848,00
Кінець	-920,90	829,80	-877,70	967,60	-843,70	964,80
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В - зменшується, А, С						
Початок	-724,90	801,50	-828,90	771,40	-848,00	739,30
Кінець	-829,80	920,90	-968,10	878,30	-964,70	843,60

При зміні послідовності підключення фаз на В (напруга зростає), А, С максимальна напруга у фазах А і В зменшується до 920,9 і 967,6 кВ, а у фазі С збільшується до 964,8 кВ (рис. 2). По відношенню до еталонного режиму максимальна напруга у фазі А зменшилась на 46,9 кВ, у фазі В – зросла на 46,4 кВ, у фазі С – зросла на 108,4 кВ. Як і в попередньому випадку, максимальне зростання напруги у порівнянні з повнореакторним перевищило 100 кВ, але воно припало на фазу, де максимальне за амплітудою значення напруги було найнижчим.

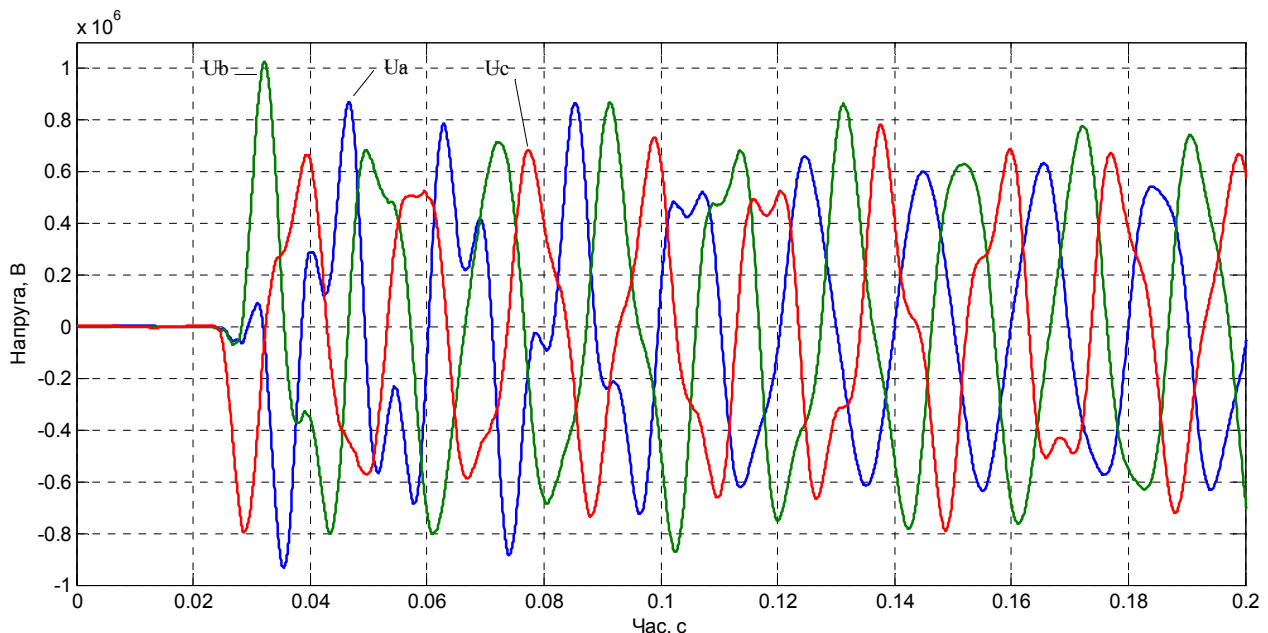


Рис. 2

Таким чином, максимальна за амплітудою напруга в кінці лінії склала 967,6 кВ, що лише на 0,1 кВ більше, ніж в еталонному режимі.

Як було зазначено, комутація кожної фази відбувається при проходженні напруги через 0. Зміна знаку градієнта напруги при підключенні фаз у тій же послідовності В (напруга зменшується), А, С призводить до зміни знаків амплітудних значень напруг на протилежні (рис. 3).

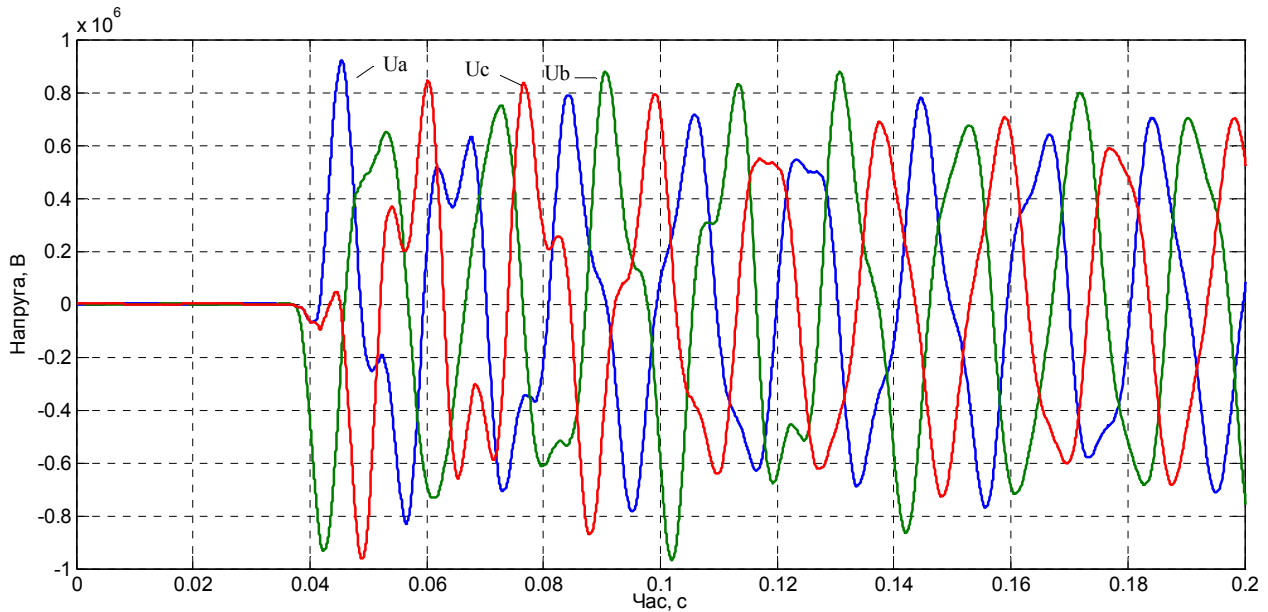


Рис. 3

Перенесення шунтувальних реакторів у кінець лінії призводить до зміни амплітудних значень напруги, а всі тенденції при зміні порядку підключення фаз залишаються такими ж (табл. 2).

Таблиця 2

Підстанція	Діапазон зміни миттєвих значень фазних напруг по кінцях лінії, кВ					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
Повнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-842,00	796,80	-704,90	796,60	-758,80	755,80
Кінець	-1011,00	939,30	-818,70	966,00	-885,40	863,50
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-846,40	814,00	-761,50	849,20	-748,40	756,10
Кінець	-1016,00	966,60	-877,20	1029,00	-884,60	861,10
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В – зростає, А, С						
Початок	-800,50	718,10	-822,20	794,50	-804,40	844,40
Кінець	-970,70	835,40	-943,20	935,50	-948,10	1012,00
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В – зменшується, А, С						
Початок	-718,20	800,50	-794,30	822,50	-844,50	804,30
Кінець	-835,60	970,60	-935,10	943,60	-1012,00	948,30

Те саме можна сказати і у випадку наявності ШР, розташованих як на початку, так і в кінці лінії (табл. 3).

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок, що керована комутація є дієвим заходом зниження рівнів комутаційних перенапруг при виконанні планових підключень ненавантажених ліній 750 кВ у неповнореакторних режимах.

У цілому при виконанні теоретичних досліджень було отримано такі результати: розроблено математичні моделі стаціонарних та перехідних процесів в електричних мережах, які на відміну від існуючих враховують частотні характеристики магістральних електричних мереж, ступінь компенсації зарядної потужності та несиметрію параметрів. Це

Таблиця 3

Підстанція	Діапазон зміни миттєвих значень фазних напруг по кінцях лінії, кВ					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
Повнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-801,60	730,70	-683,60	744,80	-707,40	730,20
Кінець	-923,90	842,70	-788,00	863,20	-795,80	812,60
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: С, В, А						
Початок	-810,90	776,40	-766,00	844,70	-724,70	708,00
Кінець	-932,20	868,20	-874,20	1025,00	-795,50	780,80
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В – зростає, А, С						
Початок	-752,40	703,50	-762,60	828,40	-733,50	809,20
Кінець	-865,70	795,70	-878,00	975,40	-835,60	923,30
Неповнореакторний режим, послідовність включення фаз: В – зменшується, А, С						
Початок	-704,00	752,10	-830,10	764,40	-809,20	733,10
Кінець	-794,40	865,00	-977,50	878,00	-922,90	835,00

дало змогу дослідити динаміку процесу розвитку перенапруг та визначити граничний час для здійснення заходів протидії;

- виявлено умови виникнення в лініях 750 кВ перенапруг на вищих гармоніках, визначено зони небезпечних значень параметрів системи для цих випадків і запропоновано організаційні заходи щодо їх попередження;
- вперше було обґрунтовано та рекомендовано для використання перехід до неповнореакторного режиму як засіб запобігання перенапругам у безструмову паузу ОАПВ на ЛЕП 750 кВ;
- досліджено процеси в електричних мережах при експлуатації сучасних елегазових вимикачів з метою обґрунтування та розробки програм безпечної керованої комутації.

Наведені результати знайшли практичне застосування в діючих електричних мережах. Так, на замовлення Національної енергетичної компанії "Укренерго" було виконано дослідження внутрішніх перенапруг різного класу на новій підстанції "Київська-750" для існуючих і проєктованих ЛЕП напругою 750 кВ. З метою забезпечення надійної роботи електрообладнання підстанції "Київська-750 кВ" та ліній 750 кВ ДП НЕК "Укренерго" були прийняті до впровадження:

оптимальний порядок підключення та відключення ненавантажених ЛЕП 750 кВ Київська – Чорнобильська АЕС, Київська – Хмельницька АЕС, Київська – Вінницька, Київська – Рівненська АЕС, Вінницька–Південноукраїнська АЕС;

порядок підключення ненавантаженого автотрансформатора на Рівненській АЕС з метою запобігання тривалим перенапругам;

перехід до неповнореакторного режиму при підключених двох групах шунтувальних реакторів на лінії 750 кВ Київська – Хмельницька АЕС, як засіб запобігання перенапругам у безструмову паузу однофазного автоматичного повторного включення.

Подальше впровадження результатів наукових досліджень на підстанціях і в електричних мережах 750 кВ дає змогу знизити рівні перенапруг та зменшити їх тривалість при виконанні комутації, а також уникнути тривалих резонансних перенапруг. Це дасть змогу підвищити надійність їх роботи і запобігти виникненню аварійних ситуацій у магістральних електричних мережах ОЕС України.

1. *Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А.* Перенапряжения в электрических системах и защита от них. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1995. – 316 с.
2. *Кадомская К. П.* Перенапряжения, возникающие при коммутациях воздушных линий. – Новосибирск: НЭТИ. – 1982. – 112 с.
3. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И.* Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж // Пр. Ін-ту електродиніміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2009. – Вип. 23. – С. 110–117.

4. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Шполянський О.Г. Використання керованої комутації для підвищення надійності роботи ЛЕП НВН // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 32. – С. 123–129.
5. *Controlled Switching, Buyerrs & Application Guide*, Edition 3.1. – ABB AB. 2010-04. – 54 с.

УДК 621.311.13

В.Г. Кузнецов, чл.-корр. НАН України, **Ю.И. Тугай**, канд. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследование внутренних перенапряжений в магистральных электрических сетях сверхвысокого напряжения и разработка мер для их предотвращения и ограничения

Выполнены исследования процессов в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения с целью разработки и внедрения мер по предотвращению внутренних перенапряжений. На основе анализа регистрограмм аварийных процессов в действующих электрических сетях выявлены факторы, влияющие на значения кратности перенапряжений. Выполнена классификация внутренних перенапряжений в зависимости от источника их возникновения и продолжительности. Разработаны универсальные модели, которые позволяют одновременно выполнять анализ как краткосрочных, так и длительных перенапряжений. С помощью этих моделей выполнен анализ внутренних перенапряжений в линиях электропередачи с номинальным напряжением 750 кВ, которые отходят от подстанции "Киевская". Подготовлены практические рекомендации для внедрения в действующих магистральных сетях Украины. Библ. 5, рис. 3, табл. 3.

Ключевые слова: линии электропередачи сверхвысокого напряжения, внутренние перенапряжения, неполно-реакторные режимы, ограничение перенапряжений.

V.G. Kuznetsov, Yu.I. Tugay, O.G. Shpolianskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Analysis of internal overvoltage in extra high voltage electrical networks and development of measures for their prevention and restriction

This paper presents an approach to the study of internal overvoltage in EHV power transmission lines in order to develop and implement measures to prevent damage important equipment and blackout. For example, if network equipment is the outage conditions, the system must be restored to normal operating conditions as fast as possible to ensure the supply security and avoid prolonged interruption of power supply. In the development of the restoration strategy a wide range of different overvoltage is needed to be studied. Field tests of various conditions by the analysis of emergency registrogramm in existing electric networks play an important role in calibrating the study models and parameters, and to verify the study results too. The extraordinary system conditions during restoration have required special electromagnetic transient analysis with different system modeling methods and system parameters. All these are very different from those studies conducted for normal operating conditions. The appropriate representations for the various components such as transformer, transmission line, circuit breaker, shunt reactor, surge arrester etc. have been selected too. The classification of internal overvoltage, depending on the source of their occurrence and duration, has been developed. The universal models that allow to perform analysis both short-term and long-term effects were derived. With all these studies, is able to establish practical and reliable system restoration plans. The open-reactor mode has been introduced for the overvoltage restriction. The analysis of internal overvoltage in power transmission lines 750 kV from substation "Kievskaya" was performed. The study results are analyzed and considered as a guide line for 750 kV operation in Ukraine. References 5, figures 3, tables 3.

Key words: EHV lines, overvoltage, open-reactor mode, power line simulation.

Надійшла 17.04.2013

Received 17.04.2013