

АНОРМАЛЬНІ ПЕРЕНАПРУГИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ДЖЕРЕЛАМИ СПОТВОРЕНЬ

Дослідження умов виникнення, характеру розвитку та можливих наслідків аномальних режимів електричних мереж з екстремальними значеннями параметрів режимів, такими як перенапруги та надструми, традиційно виконують за допомогою математичних моделей з лінійними і симетричними елементами. Це пояснюється великим досвідом розробки та використання моделей даного класу на практиці, оскільки основою прийняття рішень під час проектування та експлуатації мереж є результати моделювання перш за все нормальних режимів. Більш детальний аналіз показує, що наявність у сучасних електромережах джерел спотворень, головним чином несиметрії та несинусоїдності, суттєво впливає на поточні значення параметрів режиму, в т. ч. й на ймовірність переходу цих значень через граничні межі.

Вступ

Тенденції розвитку сучасних магістральних електричних мереж вказують на зростання ролі ліній електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) (рис. 1) як системоутворюючих та міжсистемних. Слід відзначити, що саме дослідження перенапруг для даного класу ліній повинні виконуватись особливо ретельно, зокрема з урахуванням впливу джерел спотворень. Це пояснюється практичною відсутністю експлуатаційного запасу ізоляції, розрахованого на екстремальні значення параметрів, оскільки такий запас для надвисоких напруг має високу вартість. Таким чином, аналіз можливості виникнення перенапруг в ЛЕП НВН повинен виконуватись не лише для нормальних, але й для аномальних (несиметричних та несинусоїдних) режимів. Як показує досвід, такий аналіз може бути здійснений за допомогою: експериментів на діючому обладнанні; використання аналітичних методів; математичного та імітаційного моделювання на електронно-обчислювальних машинах. Через високий рівень небезпеки неочікуваного переходу стану мережі з аномального в аварійний режим експериментальні дослідження мають обмежене застосування, і тому для дослідження аномальних перенапруг зазвичай використовують аналітичні методи.

Магістральні лінії електропередачі напругою 330–750 кВ є основними системоутворюючими лініями в Об'єднаній енергосистемі України (рис. 2) та забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій, а також необхідний обмін між окремими енергосистемами. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація – важлива передумова інтеграції Об'єднаної енергосистеми України в європейську енергосистему в майбутньому [7–10]. Саме тому пошкодження таких ліній чи обладнання, що забезпечує їх приєднання до енергосистеми, є важкою системою аварією: вона може викликати розпад об'єднаної системи на окремі частини, в яких буде існувати дефіцит чи надлишок генеруючих потужностей, і, відповідно, спричинити відключення споживачів в дефіцитних регіонах та зупинки блоків електростанцій в надлишкових регіонах. Звісно, такий аномальний режим магістральної електричної мережі буде суттєво відрізнятися від оптимального [1–3]. Отже, попередження виходу з ладу ЛЕП НВН – важлива наукова та практична задача з точки зору надійності електропостачання і забезпечення задовільних показників якості та ефективності функціонування магістральних електричних мережах.



Владислав Кучанський
канд. техн. наук,
стар. наук. співроб.
Інституту електродинаміки
НАН України,
м. Київ

Класифікація перенапруг у магістральних електричних мережах

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в магістральній електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище максимально допустимого значення, відповідно до технічного регламенту [1–5]. Це пояснюється тим, що передбачено порівняно малий резерв ізоляції для складових елементів магістральних електричних мереж через високу вартість для даного класу напруги.



Рис. 1. Лінії електропередачі надвисокої напруги

Тривалі внутрішні перенапруги виникають через резонанс, внаслідок збігові значень параметрів елементів кола [7]. Цей вид перенапруг, зумовлений властивостями мережі, може бути усунений шляхом зміни співвідношення між параметрами мережі та її режиму [2]. На відміну від комутаційних перенапруг, які тривають соті доли секунди, резонансні не тільки виникають непередбачено, а й можуть існувати досить тривалий час, доки дія захисту від підвищення напруги, регуляторів напруги чи втручання персоналу не виконають зміни схеми або режиму. Резонансні перенапруги не беруться до уваги при виборі ізоляції чи параметрів нелінійних обмежувачів, оскільки ці захисні заходи розраховуються для обмеження комутаційних перенапруг, а не для гасіння тривалого процесу. Тому вірогідність виникнення та розвитку системних аварій при резонансних перенапругах досить значна. З цієї причини робота присвячена дослідженню саме тривалих аномальних перенапруг [3].

До аномальних перенапруг в магістральних електричних мережах можна віднести перенапруги на основній гармоніці під час неповнофазних режимів повітряних ліній та шунтувальних реакторів і перенапруги при автоматичному самозбудженні вищих гармонічних складових [2]. Але слід зауважити, що в реальних умовах діючих енергосистем той чи той вид аномальних перенапруг може взагалі не існувати або амплітуди цих перенапруг настільки малі, що їх дослідження не становлять практичного інтересу.

Живання терміну аномальних перенапруг не випадкове [7], тому що при опрацюванні літературних джерел [5] та результатів експериментів зроблено висновок, що цей вид перенапруг принципово відрізняється від тради-

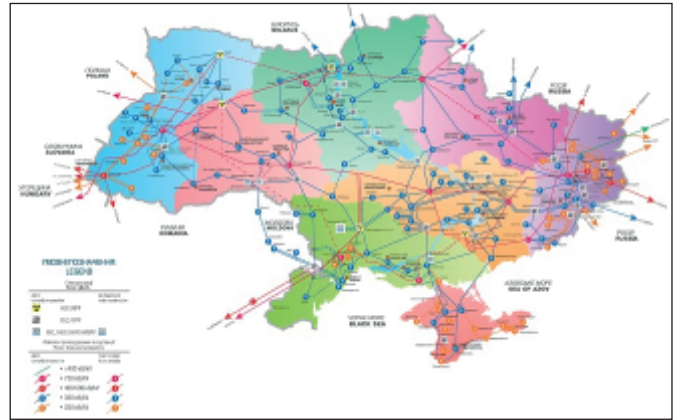


Рис. 2. Карта Об'єднаної енергосистеми України

ційних. Відмінність та особливі характеристики перенапруг полягають у тому, що вони спричинені аномальним режимом, зумовленим перш за все дією джерела спотворень [7–9, 11]. На рис. 3 наведено поділ цього виду внутрішніх перенапруг на дві головні категорії, в залежності від резонансу на певній частоті: 1) на основній гармоніці та 2) вищих гармонічних складових. Такий поділ продиктований тим, що досліджувалися режими магістральних електричних мереж, спричинені комутацією ненавантажених силових автотрансформаторів в режимі насичення та режими мереж, в яких джерело спотворення не містить нелінійних елементів. Тобто можна зробити ще один поділ за лінійністю джерел спотворення – нелінійне чи лінійне – і резонансу, в якому колі він відбувається – лінійному чи нелінійному.

У роботі розглядаються 2 типи аномальних перенапруг відповідно до класифікації, наведеної на рис. 3.

Перший тип аномальних перенапруг викликається джерелом вищих гармонічних складових. Найбільш типовий випадок для магістральних електричних мереж – підключення ЛЕП НВН на ненавантаженої групи автотрансформаторів. Підвищення напруги відбувається на вищих гармонічних складових: перенапруги на частотах парної кратності виникають в лінійному колі, до якого приєднано джерело спотворення (магнітний шунт автотрансформатора, що працює в ненавантаженому режимі.)

Другий тип аномальних перенапруг виникає в несиметричному режимі. Характерна ситуація – відключення фази ЛЕП НВН з можливим відключенням також однієї з груп шунтувальних реакторів. Можливе виникнення перенапруг при комбінації несиметричного та несинусоїдного режимів. До такого типу віднесено включення ЛЕП НВН на неповну групу автотрансформатора.

Тривалі аномальні перенапруги є одними з найбільш складних для аналізу видів внутрішніх перенапруг [5]. Проблема дослідження зумовлена тим, що в магістральній електричній мережі існує багато елементів, процеси в яких адекватно та точно змодельовати складно. До таких елементів зокрема належать індуктивності зі стальними осерддями та дроти ЛЕП НВН з коронним розрядом, а також повторна дуга змінного струму під час однофазного автоматичного повторного включення, оскільки ці процеси мають нелінійний характер [4]. Тобто вольт-амперні елементи описуються нелінійними рівняннями. Саме через наявність таких елементів неможливо отримати точні результати про існування перенапруг в тому чи тому режимі.



Рис. 3. Класифікація аномальних перенапруг ЛЕП

Аномальні перенапруги при наявності несинусоїдних спотворень

Як відомо, несинусоїдність напруги та струмів спричиняє старіння ізоляції електричних машин, трансформаторів та кабелів через нагрівання, а також через виникнення та протікання в ізоляції іонізаційних процесів, особливо при високих частотах змінного електричного поля. Для електричних машин, трансформаторів та кабелів найбільш суттєвим є термічне старіння ізоляції, а вплив вищих гармонічних складових, спричинений суттєвими спотвореннями форми кривих напруги та струму при збудженні автотрансформатора на іонізаційні процеси в ізоляції, посилює ефект старіння. Таким чином, аномальні перенапруги, що виникають через насичення магнітного шунта автотрансформатора, мають подвійну негативну дію на ізоляцію обладнання на відміну, наприклад, від аномальних перенапруг в несиметричних режимах.

Аномальність несинусоїдних режимів характеризується появою вищих гармонік струму і напруги [4, 11]. Спотворення форми кривої напруги і струмів у даному випадку обумовлені нелінійністю шунтів намагнічування. За останні роки при дослідженнях режимів електричних мереж велику увагу стали приділяти коливанням у колах зі сталлю. Приводом для цього стала поява на ЛЕП НВН складних явищ, таких, як резонанси на частотах, що відрізняються від основної [2].

Резонансні явища в ланцюгах зі сталлю об'єднані під загальною назвою "ферорезонансні процеси" і відомі майже сто років. Але тільки з розвитком сучасної теорії нелінійних коливань із застосуванням новітніх методів, що реалізуються на сучасних електронно-обчислювальних машинах, ці явища отримали достатньо повне теоретичне обґрунтування. Теорія нелінійних коливань розкрила ряд особливостей, які принципово відрізняють нелінійні коливальні системи від лінійних. Такими особливостями є стрибкоподібна зміна характеру коливань при зміні параметрів системи (тригерний ефект), поява коливань та резонанс на частотах, відмінних від частоти електропостачання, кола – субгармонічні, ультрагар-

монічні та дробні резонанси [3]. Серед методів досліджень найбільшого розповсюдження отримали модернізовані методи малого параметру, комплексних амплітуд, методи аналізу теорії стійкості періодичних коливань та інші класичні методи аналізу. А для того, щоб детально дослідити автопараметричну поведінку елементів нелінійного кола, необхідно застосовувати теорію нелінійної динаміки та детермінованого хаосу. В цілому ці дослідження складають окрему проблему сучасної електротехніки. Тут розглядаються резонансні явища в лінійному електричному колі, і нелінійна індуктивність є тільки джерелом спотворень, а не складовою частиною кола.

У даній роботі найбільшої уваги приділено виникненню перенапруг на парних гармонічних складових, що спричинені включенням ненавантажених автотрансформаторів як у повнофазному, так і неповнофазному режимах роботи (рис. 4).

У літературних джерелах [2] причини появи перенапруг розглянуто або коротко і плутано, або наведено інженерні методи розрахунку областей самозбудження гармонік парної кратності, з яких фізика процесу виникнення перенапруг незрозуміла. Це означає, що механізм і фізична природа явища аномальних перенапруг не описані ясно і детально, тому що відсутня інформація про повний розвиток процесу від початку і до кінця, а джерелом парних гармонік вважають тільки зміну індуктивності шунта намагнічування автотрансформатора. Взагалі наявність значної кількості суперечливої інформації не дає можливості детально проаналізувати явища, які відбуваються при включенні малонавантаженого або ненавантаженого автотрансформатора.

Як уже вимічалось вище, для вирішення задачі гармонічних перенапруг необхідно перш за все адекватно відтворювати нелінійний характер шунта намагнічування. На практиці це зробити складно, тому при вирішенні цієї задачі потрібно йти на певні компроміси. Реалізувати точний метод проблематично не тільки через великі розрахункові труднощі. Точність вихідних даних та їх повнота є не менш важливою проблемою, оскільки очевидно, що точність аналізу не може перевищувати точність вихідних

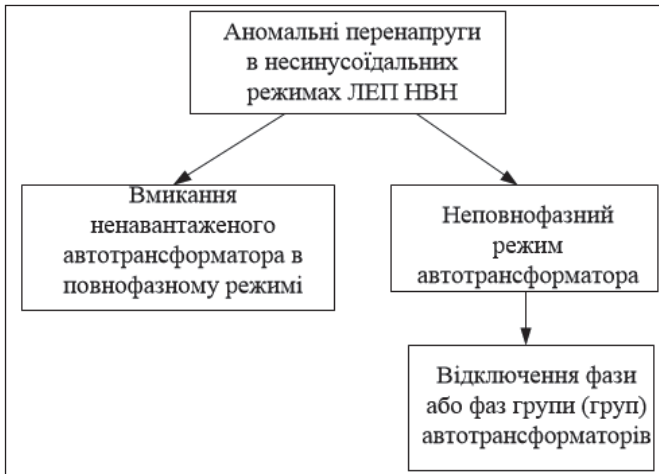


Рис. 4. Перенапруги на парних гармонічних складових

даних. Крім цього, для дослідження необхідно мати дані від виробника автотрансформаторів про криву намагнічення.

Фізична природа виникнення парних гармоніки на ЛЕП НВН з приєднаним автотрансформатором пояснюється періодичною зміною індуктивності магнітного шунта при протіканні через нього змінного струму. Ця індуктивність змінюється з подвійною частотою по відношенню до прикладеної напруги. За умови, що власна частота еквівалентної схеми дорівнює 100 Гц, можливе існування перенапруг на другій гармоніці. Для цього необхідно, щоб вхідний опір мав ємнісний характер і приблизно дорівнював середньому значенню індуктивного опору магнітного шунта автотрансформатора на цій частоті.

Максимальне значення перенапруг залежить від багатьох параметрів, найважливішими з яких є: робоча напруга ЛЕП НВН; довжина ЛЕП; кількість груп шунтувальних реакторів і ступінь компенсації зарядної потужності; відношення реактивного опору прямої і нульової послідовності лінії; величина передвключених активних опорів у вимикачеві і тривалість їх підключення; розкид у моментах включення окремих полюсів вимикача.

Слід відзначити, що хоча випадки виникнення даного типу перенапруг зафіксовані досить давно, але і до теперішнього часу процес їх виникнення та розвитку досліджено недостатньо. Залишалася нез'ясованою навіть причина їх появи. Одні автори вважають, що джерелом спотворень є постійна складова потокозчеплення автотрансформатора, інші – як причину визначали зміну параметрів шунта намагнічування [6].

В основному гармонічні перенапруги (див. рис. 5) виникають впродовж перших етапів відновлення електропостачання, коли вся система слабо демпфована. При включенні автотрансформаторів, що працюють у режимі холостого ходу, відбувається насичення магнітопроводу. Це в свою чергу спричиняє кидки струмів намагнічування з істотним вмістом гармонік, в тому числі другої гармонічної складової. Таким чином, джерело струму, що генерує гармонічні складові, виявляється підключеним до ЛЕП НВН. Як правило, значення гармонічних перенапруг мають велику кратність і є тривалими, тому можуть привести в дію засоби релейного захисту або спричинити пошкодження ізоляції устаткування.

Коли відбувається початкове збудження автотрансформатора, його магнітне осердя приходить в стан наси-

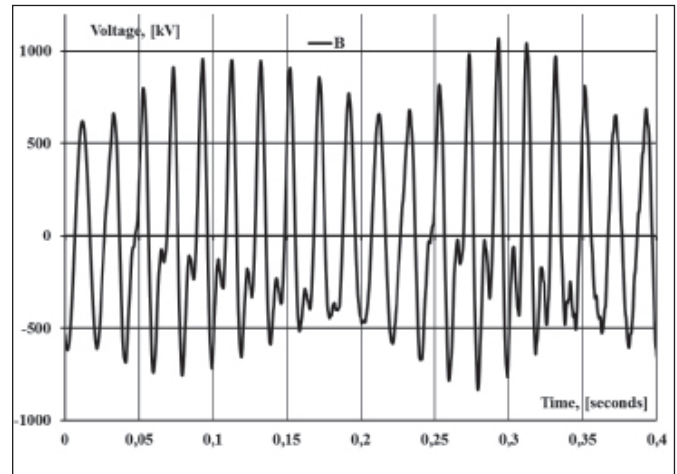


Рис. 5. Гармонічні перенапруги

чення, при якому генеруються струми намагнічування, що викликають підвищення напруги гармонічних складових. Для дослідження можливості виникнення аномальних перенапруг доцільним є використання математичного моделювання [3]. Хоча відомі також роботи по визначенню характеристик перенапруг аналітичними методами розрахунку електричних кіл [7]. Але дослідження, виконані за допомогою згаданого інструментарію, не враховують кореляцію між факторами, що впливають на характеристики перенапруг. Крім того, використання тільки імітаційного моделювання не дає можливості повною мірою відтворити ймовірнісну природу перенапруг через відсутність розробки відповідних процедур в математичному забезпеченні. У роботі для розв'язку вказаних проблем з метою дослідження аномальних перенапруг запропоновано використовувати штучну нейронну мережу і програмні комплекси (ПК), створення яких є необхідним для підготовки функціонування штучної нейронної мережі. Саме таке поєднання сучасних засобів аналізу дало можливість забезпечити отримання результатів досліджень з необхідною на практиці точністю для електричних мереж НВН сучасного рівня складності.

Аномальні перенапруги при наявності несиметричних спотворень

Найбільш детально розглянуто крайній випадок аномального несиметричного режиму – робота обладнання електропередачі з неповною кількістю фаз. Неповнофазні режими можуть виникати стихійно як аварійні режими або плануватися спеціально як захід, що підвищує надійність роботи електричної системи (рис. 6). До останньої категорії належать, наприклад, неповнофазні режими, що виникають при застосуванні на лініях пофазного ремонту, а також при відключенні однієї або двох фаз лінії з метою звільнення від ожеледі.

Актуальність використання тривалих неповнофазних режимів можна пояснити низкою причин. *По-перше*, на сьогодні в Україні спостерігається швидкий ріст споживання електроенергії з одночасним відставанням будівництва нових ЛЕП НВН; *по-друге*, існування диспропорції в розподілі генеруючих потужностей на території країни, внаслідок чого передаються значні потужності на великі відстані; *по-третє*, з'явилася велика кількість порівняно



Рис. 6. Неповнофазні режими, які можуть виникати стихійно як аварійні режими або плануватися спеціально як захід, що підвищує надійність роботи електричної системи

малопотужних споживачів, що отримують електричну енергію по одноланцюгових ЛЕП НВН довжиною в сотні кілометрів. Слід відзначити, що при великій довжині лінії вірогідність як планових, так і раптових відключень збільшується [10].

Саме по собі відімкнення фаз або фази груп шунтувальних реакторів в нормальному режимі роботи не призведе до аномального підвищення напруги [5]. Останні виникають, як показано в роботі, при відключенні фази групи шунтувальних реакторів, що створює умови їх резонансного підвищення на основній частоті (рис. 7).

Слід відзначити можливість появи під час неповнофазних режимів перенапруг, пов'язаних насправді не з наявністю несиметрії, а з несинусоїдними спотвореннями в ЛЕП НВН, які були розглянуті в попередньому розділі. Так, включення ненавантаженого автотрансформатора при певній довжині лінії призводить до появи аномальних перенапруг на парних гармоніках [4]. При неповнофазному вмиканні автотрансформатора відбуваються ті ж самі процеси, що й при повнофазному, але тільки на тих фазах, що вмикаються. Специфіка полягає в тому, що вмикання лінії відбувається не на три фази групи однофазних автотрансформаторів, а на дві. Такий режим у мережі надвисокої напруги є допустимим з точки зору несиметрії, бо значення струму по зворотній та нульовій послідовностях не перевищують гранично допустимих значень. Це обумовлено тим, що на кінцевій підстанції працюють дві або навіть три групи однофазних автотрансформаторів, тому відключення однієї фази не призводить до суттєвого погіршення режиму.

При застосуванні однофазного автоматичного повторного включення відключення фази ЛЕП призводить до виникнення перехідного процесу, після затухання якого напруга на цій фазі встановлюється на рівні, що визначається ступенем компенсації розподілених ємностей повітряної лінії групою шунтувальних реакторів [2]. Цей рівень може перевищувати гранично допустиме значення робочої

напруги. Як показали осцилограми реальних процесів в діючих мережах, часто перехідний процес зміни напруги на фазі після її відключення має вид биттів з заповненням синусоїдою промислової частоти [8–10]. Величини вимушеної напруги залежать від параметрів конкретної ЛЕП (довжини та конструкції фази лінії, потужності системи постачання, наявності, кількості та розташування груп шунтувальних реакторів). Здійснення однофазного автоматичного повторного включення може супроводжуватись аномальними перенапругами. Даний вид перенапруги виникає через виникнення резонансних ланцюгів з розподіленими ємностями лінії та індуктивностями груп шунтувальних реакторів. Тобто при реальних довжинах повітряної лінії резонансні властивості лінії з реакторами проявляються не в нормальному симетричному режимі роботи, а в несиметричному режимі.

Отже, найбільш сприятливі умови для виникнення резонансних перенапруг спостерігаються при комутаціях повітряної лінії з приєднаними ШР (роз'ємами), якщо ступінь компенсації ємності лінії близька до одиниці, але й кількість груп шунтувальних реакторів на ЛЕП НВН підбирають саме на рівень компенсації, близький до одиниці. Якщо ж при налаштуванні релейного захисту на повітряних лініях з установленими шунтувальними реакторами не враховувати неповнофазні режими, то вони можуть призвести до серйозного пошкодження обладнання, або, в кращому випадку, до повного відключення лінії.

Для дослідження перенапруг при однофазному автоматичному повторному включенні використовувались аналітичні методи, що дають лише кількісну характеристику процесів та достатні умови. Визначено багато факторів та параметрів, що впливають на існування та кратність перенапруг, наприклад, повздовжня несиметрія лінії [11]. Але, незважаючи навіть на розробку моделі транспонованої повітряної лінії, вплив повздовжньої несиметрії у вигляді пофазної відмінності параметрів та конструктивних особливостей повітряної лінії детально не був досліджений.

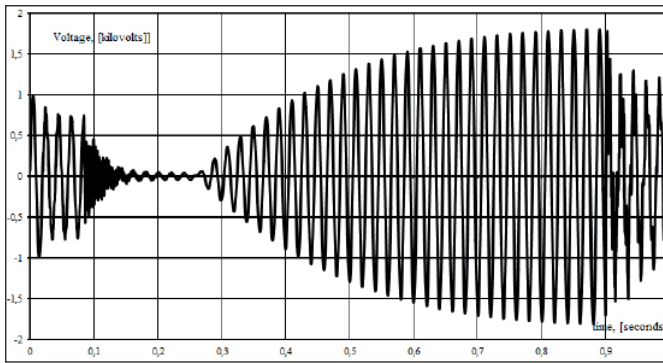


Рис. 7. Аномальне підвищення напруги, яке виникає при відключенні фази групи шунтувальних реакторів, що створює умови їх резонансного підвищення на основній частоті

У магістральних електричних мережах потік відмов практично повністю визначається аваріями на повітряній лінії. При цьому, як уже зазначалося, у лініях напругою 750 кВ переважна частина відключень викликається однофазними короткими замиканнями. З точки зору спотворюючих впливів на сусідні системи істотне значення мають заходи ліквідації коротких замикань на лінії. Виникаючі на лінії нестійкі однофазні короткі замикання супроводжуються мінімальними збуреннями на сусідні системи, якщо вони ліквідуються в циклі однофазного автоматичного повторного включення [5]. У цьому випадку пошкоджену фазу лінії відключають з двох сторін вимикачами, а потім, через певний час так звану «безструмову паузу» автоматично включають повторно. За час безструмової паузи відкрита дуга змінного струму в місці перекриття повинна згаснути, а саме місце перекриття має бути деіонізоване, в результаті чого майже повністю відновить свою електричну міцність. При експлуатації ліній

НВН до 60 – 70 % однофазні короткі замикання мають нестійкий характер, тобто можуть бути усунені в циклі короткочасної безструмової паузи з подальшим відновленням нормальної схеми.

Висновки

Аномальні перенапруги характерні для режиму, в якому суттєву роль відіграють відхилення схеми та параметрів елементів від фазної симетрії. Як приклад такого спотворення розглянуто неповнофазний режим роботи лінії електропередачі НВН, що спричиняє появу резонансних кіл з розподіленими ємностями лінії та індуктивностями шунтувальних реакторів. Постановка задачі відрізняється від традиційної проектної, коли критерієм вибору індуктивностей шунтувальних реакторів слугують перенапруги нормального режиму [3], але, хоча причини виникнення перенапруг в неповнофазних режимах цілком визначені, їх поява і значення залежать від багатьох факторів та чинників аномального режиму. Тому при проектуванні та експлуатації ЛЕП НВН необхідна ретельна перевірка можливості існування необхідних та достатніх умов аномальних перенапруг в реальних електричних мережах. Аномальні перенапруги в електропередачах НВН виникають внаслідок протікання багатьох взаємопов'язаних між собою процесів, які залежать від значень великої кількості параметрів. Саме це зумовлює постійну необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів дослідження аномальних перенапруг.

У статті розглянуто можливості розвитку перенапруг в аномальних режимах із джерелами, що характеризуються спотвореннями: несиметричними, несинусоїдними та комбінованими. Така класифікація перенапруг не випадкова, бо джерело їх виникнення та характеристики спотворення визначають аномальний режим. ■

Література

1. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
2. Дмоховская Л.Ф. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах. М.: Энергия, 1972. 288 с.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанський В.В., Шполянський О.Г. Дослідження резонансних перенапруг на ультра гармоніках парної кратності на ЛЕП 750 кВ. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. № 29. С. 15–22.
4. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г. Исследование возможности возникновения перенапряжений в ЛЭП 750 кВ на 2-ом гармонике. *Problemy Elektroenergetyki: VI Miedzynarodowe Seminarium Polsko– Ukrainskie*, Lodz, 16-17 сентября, 2010 г., С. 51–58.
5. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанский В.В. Использование искусственной нейронной сети для анализа резонансных перенапряжений. *Problemy Elektroenergetyki: VI Miedzynarodowe Seminarium Polsko– Ukrainskie*, Lodz, 16-17 сентября 2010 г., С. 81–88.
6. Kriesel David. Brief Introduction to Neural Networks. Berlin, 2010. P. 286.
7. Kuchansky V. The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes. *IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2017, April, P. 394–399.
8. Sadeghkhan I., Ketabi A., Feuillet R. New approach to harmonic overvoltages reduction during transformer energization via controlled switching. *Proceedings of in Proc. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, Brazil, 2009. P.1589–1595.
9. Sadeghkhan I., Mortazavian A., Moallem M. Mitigation of capacitor banks switching overvoltages using radial basis function technique. *Advances in Electrical Engineering Systems* 13. Vol. 1, No. 1, March 2012. P. 8–13.
10. Sadeghkhan I., Ketabi A., Feuillet R. Estimation of Temporary Overvoltages during Power System Restoration using Artificial Neural Network. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, Oct. 2002. P.1121–1127.
11. Tugay Y. The resonance overvoltages in EHV network. *Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Poland, Lodz, September 15–17, 2009. P. 14–18.