

УДК 621.316.11

В. І. Романовський, канд. техн. наук; С. М. Лебедка**АНАЛІЗ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6 КВ ДЛЯ ВИБОРУ
ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ**

Розглянуто розподільні мережі 6—35 кВ. Проаналізовано причини виникнення перенапруг та їх вплив на надійність експлуатації мережі. Запропоновано оптимізувати режим заземлення нейтралі мережі, вибираючи спосіб заземлення нейтралі та параметри заземлювальних пристроїв.

Вступ

Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) в мережах 6—35 кВ становлять не менше 70 % загального числа ушкоджень [1] і супроводжуються виникненням кидків ємнісних струмів і перенапруг. Ступінь прояву цих ефектів залежить від ряду факторів — режиму нейтралі, довжини й завантаження мережі, початкових умов комутації, віддаленості місць замикань від джерела живлення тощо. Основний фактор, що визначає небезпеку виникнення й розвитку однофазних замикань у даних мережах, — спосіб заземлення нейтралі. Тому вибір способу заземлення нейтралі в розподільчих мережах є актуальним.

Матеріали і результати досліджень

В Україні розподільні мережі 6—35 кВ працюють або з ізолюваною нейтраллю, або з компенсацією ємнісного струму замикання на землю. З літератури відомо, що у разі ОЗЗ в розподільній мережі виникають специфічні перенапруги [2]. Виникнення перенапруг під час ОЗЗ відбувається за рахунок зсуву напруги нейтралі U_n , що приводить до зростання напруги на неушкоджених фазах до лінійної. За рахунок коливного характеру перехідного процесу максимальне значення перенапруги після першого пробією ізоляції ушкодженої фази досягає 2,4—2,5 фазної напруги U_ϕ . Якщо подальші пробією ізоляції відбуваються за ненульового значення напруги нейтралі, то виникає зростання напруги на нейтралі, в результаті чого максимальні значення напруги на неушкоджених фазах досягають 3,2—3,5 U_ϕ . Такі високі значення перенапруг є недопустимими для кабельних мереж, і тому в розподільній мережі потрібно використовувати спеціальні режими заземлення нейтралі для компенсації виникаючих струмів та перенапруг.

Зараз у вітчизняній [3] і закордонній [4, 5] літературі обговорюються такі можливі режими нейтралі: ізолювана, компенсована (заземлена через дугогасильний реактор (ДГР)), включення резистора в нейтраль. Розроблено різні способи заземлення нейтралі, які використовуються на практиці. Але, незважаючи на це, за останні десять років середній питомий показник пошкоджуваності електроустаткування мереж з електричних причин зріс приблизно на порядок і за даними досвіду експлуатації, з урахуванням пробитого під час випробувань, становить більше 100 ушкоджень на кожні 100 км мережі в рік [6].

Аналізуючи відомі підходи до заземлення нейтралі в розподільних мережах 6—35 кВ з метою підвищення експлуатаційної надійності мереж, можна зробити висновок про те, що жоден з існуючих методів заземлення нейтралі не виключає виникнення перенапруг в мережах у разі виникнення ОЗЗ.

Задача досліджень

Підвищення експлуатаційної надійності розподільчих мереж 6—35 кВ неможливе без вибору того способу заземлення нейтралі, який найбільше відповідає всім параметрам мережі. Тому для визначення режиму заземлення нейтралі важливо застосувати комплексний, системний підхід до вирішення проблеми компенсації струмів короткого замикання й обмеження перенапруг за ОЗЗ. Визначаючи режим заземлення нейтралі в розподільній мережі, потрібно врахувати такі параметри режиму мережі як: довжина мережі, опір нульової

послідовності, місце виникнення ОЗЗ тощо. Потрібно дослідити вплив цих параметрів на струми ОЗЗ та перенапруги, що виникають у мережі. Розв'язання цієї задачі неможливо без побудови математичної моделі розподільної мережі, розробки методу дослідження цієї моделі, аналізу отриманих результатів моделювання.

Таким чином, пропонується вибрати оптимальний варіант заземлення нейтралі в розподільній мережі методами математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу

Під час виникнення ОЗЗ в мережі з ізольованою нейтраллю (переважно в кабельних лініях) виникають внутрішні перенапруги, які супроводжуються нестійким (переміжним) горінням дуги в місці однофазного замикання на землю. Також в мережах з дугогасними реакторами можуть виникати резонансні перенапруги, викликані послідовним резонансом у контурі, що складається з його індуктивності та ємності мережі на землю. У переважній більшості випадків (до 90 % загальної кількості порушень нормальної роботи мережі) ушкодження починається із пробією ізоляції на землю, а потім більше половини з них (до 70 %) розвиваються у міжфазні короткі замикання або багатомісні пробію ізоляції з груповим виходом з ладу елементів електрообладнання.

Перенапруга залежить від опору нульової послідовності, струмів замикання на землю, напруги зсуву нейтралі, які переважно визначаються режимом заземлення нейтралі. Відомо декілька методів заземлення нейтралі, найпоширенішим в Україні є заземлення за допомогою ДГР. Для компенсації струмів однофазного замикання в мережі на шини підстанції підключається додатковий трансформатор ДГР зі схемою з'єднання обмоток Y/Δ , нейтраль якого може бути ізольована, заземлена через резистор (активний опір) або реактор (реактивний опір). Якщо ДГР налаштоване точно, то заземлення нейтралі за допомогою ДГР компенсує ємнісні струми в місці замкнення, а після погасання дуги відбувається коливне відновлення напруги на пошкодженій фазі та одночасне зменшення напруги на нейтралі. За рахунок зниженої, у перший момент після погасання дуги, напруги на аварійній фазі вірогідність повторного пробію зменшується. Якщо відбувається повторний пробій, то він відбувається за напруги, яка менша $2,5U_{\phi}$.

Якщо ДГР налаштовано до рівня компенсації ($k = 0,95 \dots 1,15$), то дугові перенапруги мають невелике значення, яке близьке до перенапруги під час однократного запалення дуги. Налаштування ДГР виконується переключенням відпайок нерегульованих ДГР або використанням реакторів з автоналаштуванням. Якщо ДГР налаштований неточно або небаланс в мережі виникає вже після ОЗЗ, то виникає небезпека виникнення великої кратності перенапруг під час ОЗЗ. Навіть якщо використовується ДГР з автоналаштуванням, цей режим неможливо виключити, оскільки під час виникнення ОЗЗ автоматика в усіх видах реакторів блокується. В такому режимі коливний процес відновлення напруги має вигляд биття, тому за повторного пробію можуть виникнути перенапруги до $(3 \dots 4)U_{\phi}$. Для зменшення перенапруг паралельно ДГР включають активні опори, які сприяють швидшому зниженню вільних коливань, гашенню биття та зниженню напруги на пошкодженій фазі. Таке рішення використовують практично всі організації, що експлуатують. Розміщення ДГР та резисторів в мережі та визначення їх опорів є оптимізаційною задачею, котра може бути розв'язана математичним моделюванням перехідних процесів, що виникають в мережі під час ОЗЗ.

Для оцінки ступеня впливу всіх відомих факторів на перенапруги в мережі була складена математична модель, яка враховує параметри мережі та режим заземлення нейтралі. Модель створена на основі рівнянь у фазних координатах, що записуються на підставі законів Кірхгофа для кожної із трьох фаз і розв'язуються одночасно для всіх фаз. Їх безсумнівною перевагою є те, що ці рівняння містять параметри елементів мережі (активні опори, власні й взаємні індуктивності та ємності) і параметри її режиму (струми, напруги, потужності фаз), які відповідають реальним фізичним параметрам електричних систем.

На відміну від методу симетричних складових, всі несиметричні аварійні ушкодження в електричній мережі можуть бути досить просто відображені під час формування рівнянь за законами Кірхгофа з урахуванням відповідних комутацій у вузлах і вітках трифазної мережі. Крім того, наявність декількох несиметрій не приводить до яких-небудь ускладнень алгорит-

мів формування й розв'язання рівнянь мережі порівняно з випадком однократної несиметрії.

В якості моделей елементів розподільної мережі (повітряні та кабельні лінії, силові трансформатори, джерела та споживачі електричної енергії, засоби обмеження перенапруг) використовуються трифазні багатополіусники.

Модель системи в цілому отримується об'єднанням моделей елементів. Загальна математична модель мережі побудована на основі вузлового методу, а моделювання перехідних процесів в мережі зводиться до багаторазової процедури знаходження її квазістатичних станів для кожного інтервалу часу, в котрих виконується алгебраїзація інерційних компонентних співвідношень. Склавши рівняння балансу струмів для всіх незалежних трифазних вузлів мережі, отримують у результаті систему рівнянь, розв'язання якої дозволяє за параметрами режиму схеми на попередніх кроках чисельного інтегрування визначити параметри режиму на черговому інтервалі часу.

З використанням математичної моделі розподільної мережі розглянуто чотири схеми кабельних мереж напругою 6 кВ сумарною довжиною кабельних ліній, відповідно, близько 20, 40, 60 та 80 км, що охоплює широкий діапазон довжин існуючих розподільних мереж.

Для кожної зі схем були виконані розрахунки режимів під час ОЗЗ. Для чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь, що описує перехідні процеси в мережі, були прийняті такі значення: крок інтегрування $h = (0,05-0,1)$ мс, опір в місці замикання $R = 0,1$ Ом.

Аналіз перенапруг, які виникають в мережі, свідчить про те, що вони досягають недопустимих значень, тому для підвищення експлуатаційної надійності мережі повинні бути скомпенсовані вибором режиму заземлення нейтралі.

Для вибору оптимального варіанту заземлення нейтралі було проведено дослідження способів та параметрів заземлення нейтралі, що впливають на перенапруги в мережі. У розрахунках варіювалися: режим нейтралі (ізолювана, заземлена), спосіб заземлення (через реактор, через резистор), величини опорів реактора й резистора (від 0 до 1000 Ом). Досліджувався вплив цих факторів на опори нульової послідовності, струми замикання на землю, напругу зсуву нейтралі.

Значення опорів реактора або резистора в нейтралі змінювалися від нуля до нескінченності, чим охоплюється весь можливий діапазон способів заземлення нейтралі — глухозаземлена (для $Z_n = 0$), компенсована (при $I_n = 0$), з резистивним заземленням (для $R_n = 100-600$ Ом), ізолювана (для $Z_n = \infty$). Зі збільшенням опорів в нейтралі струми ОЗЗ за модулем знижувались від сотень ампер до одиниць і десятків ампер, за фазою змінювалися з відставального до випереджувального, напруга нейтралі збільшувалася до фазної.

Таким чином, був проаналізований вплив режиму заземлення нейтралі на струми короткого замикання та перенапруги в розподільній мережі. За результатами досліджень встановлені такі залежності струмів ОЗЗ та перенапруг від параметрів мережі:

— перенапруги в мережі під час виникнення ОЗЗ при варіаціях ступеня віддаленості місця замикання, початкових моментів комутацій, загальної довжини кабельних ліній досягають значення біля 9 кВ, що складає $2,5 U_{\phi}$. Ступінь віддаленості, початкові фази комутації, довжина мережі на ці значення впливають незначно; індуктивний та активний опори заземлення впливають на перенапруги суттєво;

— струми ОЗЗ в усталених режимах залежать від довжини мережі та досягають значень: для некомпенсованої мережі довжиною 21,5 км — 15 А; 41,6 км — 45 А; 62,5 км — 72 А; 85,3 км — 96 А;

— довжина мережі та початкова фаза замикання на землю суттєво впливають на значення початкових імпульсів струму в момент замкнення: залежно від фази напруги в момент виникнення ОЗЗ початкові імпульси струму змінюються від 200 А до 1100 А.

Тому за вимогами до надійності і з урахуванням результатів виконаного дослідження мережі можна розділити на три групи за способами заземлення нейтралі:

1. Мережі з ДГР і мережі з комбінованим (ДГР і високоомний резистор) заземленням нейтралі.
2. Електричні мережі з ізолюваною нейтраллю (або нейтраллю з високоомним резистором).
3. Електричні мережі з низькоомним резистором в нейтралі.

Завдання вибору способу заземлення нейтралі при цьому вирішується в два етапи. На першому етапі виконується вибір одного з трьох варіантів, виходячи з вимог до надійності

електропостачання. На другому етапі ухвалені рішення уточнюються на основі техніко-економічних розрахунків: знаходяться значення ємнісних струмів, формулюються вимоги до системи регулювання ДГР, вирішуються питання необхідності застосування резисторів, визначення їх параметрів тощо.

Проведені дослідження показали, що для компенсації перенапруг потрібно дуже точно налаштувати ДГР, тому що малим змінам струму відповідає значний діапазон зміни опору нейтралі. В існуючих ДГР, налаштування яких відбувається за допомогою відпайок, що перемикаються заздалегідь або автоматично — можливості точно змінювати опір нейтралі немає. ДГР з підмагнічуванням не може бути рекомендоване, оскільки існуючі системи автоматичного управління блокуються в момент ОЗЗ, що призводить у разі небалансу до виникнення неприпустимих перенапруг в мережі. Тому можна рекомендувати лише застосування плунжерних ДГР з паралельним включенням резистору. Застосування цього методу заземлення нейтралі дозволяє зменшити значення перенапруг до безпечного для ізоляції значення у $(2,2...2,4)U_{\phi}$, отримати надійне гасіння дуги, перевести коливний перехідний процес у аперіодичний, зменшити швидкість відновлення напруги на uszkodженій фазі.

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити висновки, які можуть бути використані під час вибору оптимального способу заземлення нейтралі в розподільній мережі 6–35 кВ.

1. Для компенсації (зменшення) величини струму однофазного замикання на землю потрібно регулювати як індуктивний, так і активний опір в нейтралі спеціального трансформатора. Значення перехідних струмів зменшуються з сотень ампер у схемах з ізольованою нейтраллю до нормованих значень у схемах з компенсованою нейтраллю.

2. Напруга зсуву нейтралі залежить практично тільки від модуля повного опору Z_n нейтралі, сумарна довжина мережі на нього впливає незначним чином. Для зменшення перенапруг значення повного опору має бути від 30 до 200 Ом.

3. Із заземленням нейтралі через реактор струм ОЗЗ залежить від опору нейтралі таким чином, що малим змінам струму відповідає значний діапазон зміни опору нейтралі. Це суттєво знижує ефективність дискретно регульованих ДГР, які застосовують зараз. Тому для компенсації ємнісних струмів ОЗЗ необхідно використовувати плавно регульовані ДГР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Половой И. Ф. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения / И. Ф. Половой, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 152 с.
2. Качесов В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Электрические станции. — 2002. — № 8. — С. 38—45.
3. Анализ эффективности существующих режимов нейтрали сетей 6–35 кВ в энергетике / Б. С. Стогний, В. В. Масляник, В. В. Назаров [та ін.] // Технічна електродинаміка. — 2002. — № 3. — С. 37—41.
4. Целебровский Ю. В. Области применения различных систем заземления нейтрали / Ю. В. Целебровский // Новости ЭлектроТехники. — 2004. — № 5(29).
5. Мусиенко А. Г. Пути повышения надежности работы городских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ / А. Г. Мусиенко, В. Ф. Сивокобыленко, М. П. Дергилев // Электрические сети и системы. — 2003. — № 3. — С. 18—26.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 1.07.11

Рекомендована до друку 30.08.11

Романовський Володимир Ігорович — доцент, **Лебедка Сергій Миколайович** — асистент.

Кафедра електроенергетики, Сумський державний університет, Суми