

Ю. Л. Саєнко¹
А. С. Попов¹

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЗАХИСТІВ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ У МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ ЗА УМОВИ ІСНУВАННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ

¹Приазовський державний технічний університет

Розглянуто питання розподілу струмів нульової послідовності і режимів роботи захистів від однофазних замикань на землю під час ферорезонансних процесів. Показано, що в режимі ферорезонансу можливе помилкове спрацювання як електромеханічних, так і цифрових пристроїв релейного захисту. Розглянуто типові алгоритми функціонування захистів від однофазних замикань на землю, що використовуються цифровими терміналами релейного захисту, а також особливості їх налаштування при організації захисту від однофазних замикань на землю і блокування при ферорезонансі.

Ключові слова: ферорезонанс, однофазне замикання на землю, струм і напруга нульової послідовності, субгармонічний процес, кореляційна функція, спектральний аналіз.

Постановка проблеми

На сьогодні згідно з правилами улаштування електроустановок електричні мережі напругою 6—35 кВ повинні працювати з ізольованою, резонансною або резистивною нейтраллю. Режим роботи нейтралі визначається значенням струму однофазного замикання на землю (ОЗЗ), вимогами до релейного захисту від ОЗЗ, рівнем обмеження дугових перенапруг. У вітчизняних електричних мережах найбільшого поширення набула ізольована нейтраль.

Відомим недоліком цих мереж є можливість існування ферорезонансних процесів (ФРП), що розвиваються між ємністю нульової послідовності мережі та нелінійною індуктивністю трансформаторів напруги контролю ізоляції (ТНКІ). Перебіг ферорезонансу супроводжується тривалими перенапругами і може призводити до пошкодження обладнання. Особливо схильні до пошкодження під час ФРП трансформатори напруги контролю ізоляції [1]. Досвід експлуатації показав, що в режимі ферорезонансу можлива неселективна робота захистів від ОЗЗ, що особливо критично для мереж, в яких захист від ОЗЗ працює на відключення.

У вітчизняних електричних мережах експлуатуються як електромеханічні, так і мікропроцесорні захисти від ОЗЗ. Перші основані на використанні реле типів РТ-40, РТЗ-50, РТЗ-51, ЗЗП, УСЗ і можуть бути як направлені, так і ненаправлені. Серед мікропроцесорних терміналів існує низка пристроїв, наприклад, REJ 517, СІРІУС-ОЗЗ, Бреслер-0107.081, ЗЗП-6-35-І та ін., логіка роботи яких подібна електромеханічним пристроям релейного захисту. Досвід експлуатації показує, що незалежно від елементної бази пристроїв релейного захисту для них існує можливість помилкової роботи в режимах ФРП. Це зумовлено існуванням напруги і струмів нульової послідовності в режимі ферорезонансу, що в залежності від співвідношення між цими параметрами режиму роботи мережі та алгоритму роботи захистів від ОЗЗ може приводити до спрацювання захисту.

З урахуванням обмеженої можливості проведення натуральних експериментів в діючих мережах на перший план під час дослідження перехідних процесів виходить математичне моделювання. Цей підхід дозволяє врахувати все різноманіття і взаємозв'язок факторів, що впливають на характер перебігу перехідних процесів і режими роботи захистів від ОЗЗ під час розвитку ферорезонансних коливань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] розглядається експлуатація кар'єрної мережі, в якій середньомісячне число неселективних відключень захисту від ОЗЗ через існування ферорезонансних явищ становило

15 відкл./міс. У цій мережі використаний направлений захист від ОЗЗ сімейства ЗЗП. Такий тип захистів містить в струмовому каналі нульової послідовності LC фільтр, налаштований на частоту 50 Гц і має високу добротність. Після зникнення ОЗЗ LC фільтр продовжує виробляти гармонічні коливання з частотою 50 Гц. У разі появи ФРП після відключення ОЗЗ на вхід реле ЗЗП подається напруга $3U_0$ і загасальні гармонічні коливання струму з частотою 50 Гц, що за певних співвідношень між цими двома сигналами може привести до помилкового спрацювання захисту. Як показав досвід експлуатації такої мережі, навіть загасальний ФРП тривалістю 1—3 періоду може призвести до помилкового відключення фідерів. В якості технічного рішення в роботі [2] запропоновано відмовитися від захисту ЗЗП і використовувати реле типу РТЗ, а також додатково підмагнічувати трансформатори струму нульової (ТСНП) послідовності. Для цього на кожен ТСНП намотується додаткова обмотка, яка підключається через ємність до обмотки розімкнутого трикутника ТНКІ. Умова вибору ємності і кількості витків визначається з умови забезпечення рівності ампер-витків від додаткової обмотки і від ємнісного струму цього приєднання. У підсумку при ОЗЗ в мережі результуючий потік ТСНП непошкоджених приєднань наближається до нуля, в той час як в пошкодженому приєднанні він збільшується вдвічі, що підвищує чутливість і селективність захисту. Принципова схема такого рішення наведена на рис. 1 [2].

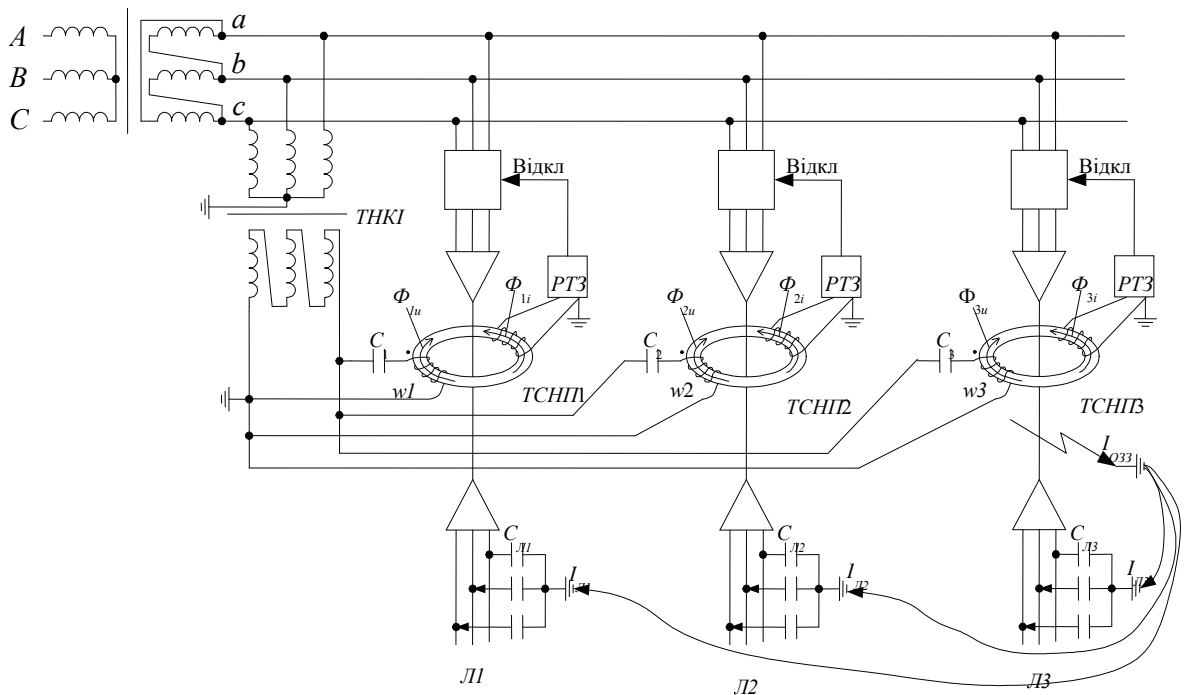


Рис. 1. Принципова схема захисту від ОЗЗ з підмагнічуванням ТСНП за даними [2]

Такий підхід є досить ефективним у випадку синусоїдальних струмів і напруг та ідеальних трансформаторів струму і напруги. Під час перекидних замикань на землю частоти коливань можуть досягати 1...3 кГц і вище. На таких частотах можуть проявлятися резонансні явища в ТНКІ і ТСНП. В результаті нелінійності і відмінності між собою частотних характеристик цих трансформаторів можлива некоректна робота захисту, оскільки МРС, утворена ємнісним струмом лінії, і МРС додаткової обмотки підмагнічування будуть не рівні між собою.

В роботі [3] запропоноване блокування спрацювання направлених захистів від ОЗЗ під час ферорезонансних процесів. Структурна схема блокування зображена на рис. 2. Є два входні канали: один складається з випрямляча 1 і підсилювача-обмежувача напруги нульової послідовності 2,

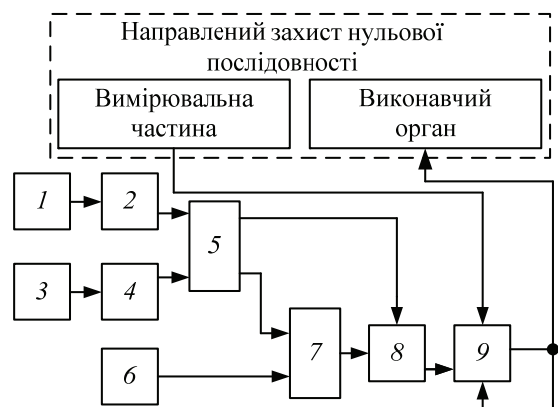


Рис. 2. Блок-схема блокування направленої захисту від ОЗЗ під час ФРП

інший — з випрямляча 3 і підсилювача-обмежувача лінійної напруги 4.

Підсилювачі-обмежувачі слугують для перетворення вхідних сигналів в прямокутні імпульси однієї полярності, тривалість яких дорівнює тривалості відповідних напівхвиль вхідних напруг. З виходів блоків 2 і 4 прямокутні імпульси надходять на вхід блока перемикачів режимів підрахунку 5. З надходженням першого позитивного фронту прямокутних імпульсів по каналу напруги нульової послідовності блок 5 запускає підрахунок імпульсів від високочастотного генератора 6 реверсивним лічильником 7. При проходженні негативного фронту цього ж прямокутного імпульсу робота лічильника зупиняється, і отримана сума зберігається до приходу на другий вхід блоку 5 найближчого позитивного фронту прямокутних імпульсів по каналу лінійної напруги. З цього моменту починається підрахунок імпульсів на віднімання показників лічильника до приходу негативного фронту імпульсу. Потім показники лічильника фіксуються і подаються на вхід формування сигналу дозволу 8, а блок 5 встановлюється в режим очікування наступного найближчого позитивного фронту імпульсу по каналу напруги нульової послідовності, обнуливши показники лічильника.

Якщо зафіксований показник лічильника малий, це означає, що частоти напруги нульової послідовності і лінійної напруги практично рівні. В іншому випадку частоти не рівні, і направлений захист від ОЗЗ блокується. Варто зазначити, що при нестійких процесах ОЗЗ частота напруги $3U_0$ не є фіксованою, в результаті чого захист від ОЗЗ блокуватиметься помилково.

На сьогоднішній день проводяться дослідження в області ідентифікації режиму ферорезонансу на тлі інших перехідних процесів. В роботі [4] запропоновано метод ідентифікації режиму ферорезонансу і режиму ОЗЗ, оснований на кореляційному аналізі параметрів перехідного процесу. Для цього були розраховані коефіцієнти взаємної кореляції між фазною напругою кожної з фаз в режимі ферорезонансу і стандартною синусоїдальною функцією. Потім розраховано коефіцієнти взаємної кореляції між фазною напругою кожної з фаз в режимі ОЗЗ і стандартною синусоїдальною функцією. На основі порівняння коефіцієнтів взаємної кореляції авторами [4] знайдено відмінну між даними режимами. Режиму ферорезонансу відповідає коефіцієнт взаємної кореляції менше 0,9, режиму ОЗЗ — 0,9 і вище. Розрахунок виконується в режимі реального часу за період промислової частоти.

В роботі [5] запропоновано розпізнавати режим ферорезонансу і ОЗЗ на основі визначення диференціальної індуктивності ТНКИ. Метод базується на тому, що при ФРП має місце суттєве насичення ТНКИ, тому значення диференціальної індуктивності в цьому режимі досить мале. У режимі ОЗЗ істотного насичення ТНКИ не виникає, що дозволяє використовувати ступінь насичення ТН як критерій появи ферорезонансу.

Автори [6, 7] розглядають особливості застосування спектрального підходу при ідентифікації режиму ферорезонансу. Відомо, що при ФРП спотворюється форма кривої напруги нульової послідовності і фазних напруг. Тому результати спектрального аналізу можуть бути використані в якості критерію існування режиму ферорезонансу. Крім класичного прямокутного Фур'є-аналізу для ідентифікації режиму ферорезонансу також застосовують вейвлет-аналіз [8], в основі якого також покладено виявлення спотворення форми кривої фазних напруг.

До нових методів ідентифікації режиму ферорезонансу відносять алгоритм негативного відбору (negative selection algorithm) [9], застосування фрактальної теорії [10], генетичні алгоритми [11], використання перетворення Гільберта–Хуанга [12] і комбінації цих методів.

Незважаючи на досить велику кількість публікацій у цій галузі повністю не розкритим є питання функціонування захистів від ОЗЗ в режимі ферорезонансу, розподілу струмів нульової послідовності, а також рекомендацій по відбудові пристроїв релейного захисту від помилкових спрацьовувань при ФРП.

Метою статті є математичне моделювання ферорезонансних процесів в мережах з ізолюваною нейтраллю і подальший аналіз режимів роботи захистів від ОЗЗ під час ферорезонансу, а також розроблення рекомендацій щодо запобігання помилкового спрацьовування захистів від ОЗЗ під час ферорезонансних процесів.

Виклад основного матеріалу

Як відомо, ФРП розвиваються в мережах з відносно малими струмами замикання на землю (близько 1...5 А). Результати математичного моделювання в статті наведені для мережі 6 кВ з

ізолюваною нейтраллю і ТНКІ типу НТМІ-6, вебер-амперна характеристика якого визначена експериментально.

На рис. 3 показані дослідні осцилограми напруги $3U_0$ в режимі ОЗЗ, відключення якого викликало загасальний ферорезонанс. Цей випадок виник в мережі власних потреб електростанції, яка працює з ізолюваною нейтраллю і струмом ОЗЗ близько 7 А. Для захисту фідерів використані термінали REF 615 і REM 615 фірми АВВ. Різний час загасання ферорезонансу зумовлено різною ємністю мережі в кожному з випадків.

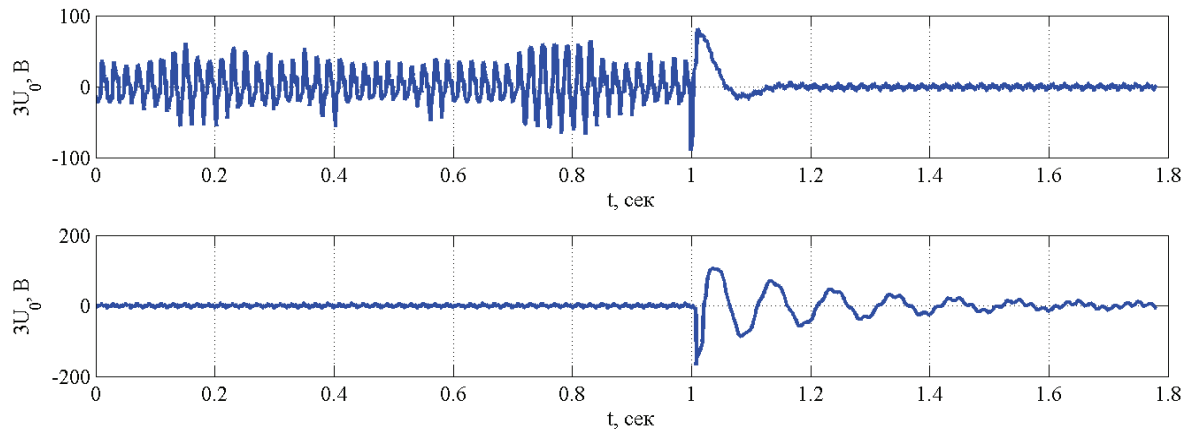


Рис. 3. Дослідні осцилограми відключення ОЗЗ і появи затухаючого ферорезонансу

Найбільш поширений субгармонічний ферорезонанс на частоті 25 Гц, який виникає після відключення ОЗЗ. Розглянемо мережу з ізолюваною нейтраллю і трьома фідерами, що відходять від неї, ємнісний струм кожного з яких відповідно дорівнює 0,5 А, 0,3 А і 0,1 А (див. рис. 2а). У мережі встановлений один ТНКІ типу НТМІ-6. На першому приєднанні ($I_C = 0,5$ А) короткочасно виникає ОЗЗ з подальшим самоусуненням. Векторна діаграма струмів і напруги нульової послідовності для випадку ОЗЗ зображена на рис. 4б.

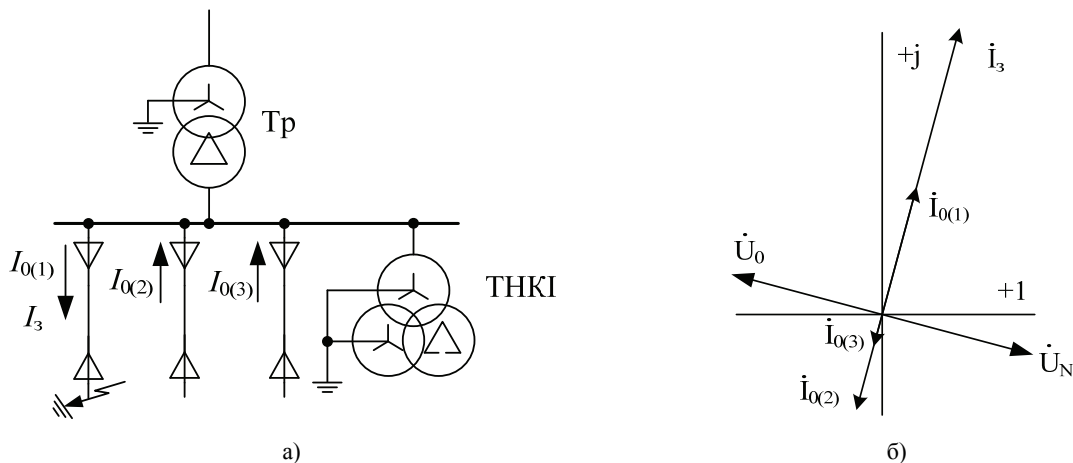


Рис. 4. Спрощена однолінійна схема мережі з ізолюваною нейтраллю (а) і векторна діаграма струмів і напруги нульової послідовності при ОЗЗ (б)

З векторної діаграми випливає, що струми нульової послідовності непошкоджених приєднань спрямовані від кабелю до шин, в той час як струми нульової послідовності пошкодженого фідера спрямовані від шин до кабелю.

На рис. 5 наведені розрахункові криві струмів і напруги нульової послідовності для схеми, показаної на рис. 4а і випадку виникнення та самоусунення ОЗЗ з подальшим збудженням ФРП.

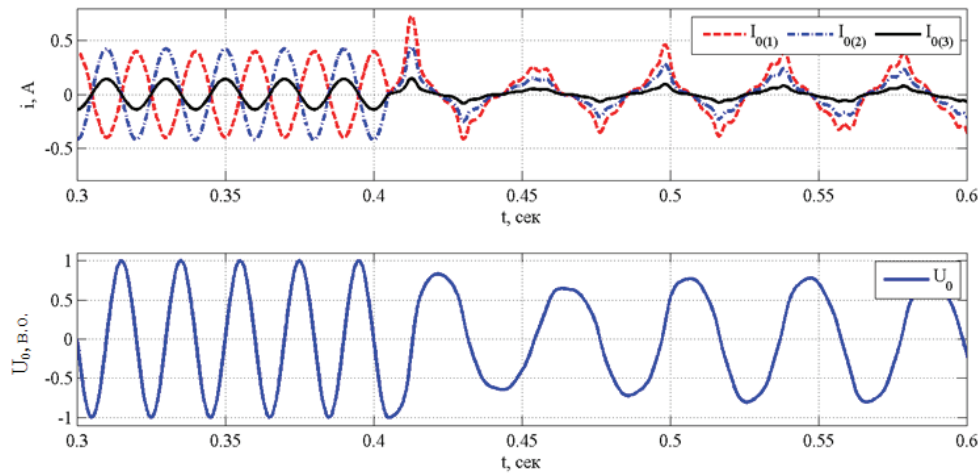


Рис. 5. Розрахункові криві струмів і напруги нульової послідовності під час ферорезонансу, що виник в результаті самоусунення ОЗЗ

В результаті появи ФРП по всіх приєднаннях протікають струми нульової послідовності, частота яких визначається частотою ФРП. Для субгармонічних ФРП напруга нульової послідовності найчастіше нижча, ніж при металевому ОЗЗ. Тому з урахуванням ємнісної природи струму ОЗЗ при субгармонічних ферорезонансах струми нульової послідовності фідерів менші, ніж при металевому ОЗЗ.

Розглянемо дію захистів від ОЗЗ у разі виникнення субгармонічних ФРП. Як відомо, уставка ненаправленого захисту від ОЗЗ відлаштовується від власного ємнісного струму лінії, що захищається, з урахуванням коефіцієнта надійності та коефіцієнта кидка ємнісного струму. Тому якщо правильно обрані уставки, то поява ферорезонансу не повинна приводити до помилкового спрацьовування ненаправлених струмових захистів як електромеханічної, так і мікропроцесорної елементної бази. Однак це далеко не завжди так, що зумовлено неточністю розрахунку уставок і суттєвими похибками ТСНП.

Небезпека помилкової землі, насамперед, полягає в тому, що оперативний персонал повинен вжити заходів щодо пошуку пошкодженого фідера шляхом їх почергового відключення до моменту зникнення ОЗЗ. На цьому об'єкті (мережа власних потреб ТЕС) неодноразово були відмічені випадки появи ферорезонансу. В результаті почергових відключень фідерів виникало порушення ферорезонансних умов, і помилкова земля зникала. Подальше вимірювання опору ізоляції свідчило про цілісність ізоляції (кабелі з ПВХ ізоляцією), тому дані випадки були віднесені до ферорезонансу. Неселективні відключення при пошуку ОЗЗ можуть призводити до зниження продуктивності всього технологічного процесу (відключення димососів, живильних насосів, млинів тощо), недоотримання прибутку та штрафних санкцій. Також слід враховувати той факт, що існування напруги нульової послідовності під час ферорезонансу є джерелом перенапруг, що негативно впливає на режим роботи електричної мережі.

Особливо схильні до неселективної роботи під час ферорезонансу захисти від ОЗЗ, що засновані на відносному вимірюванні струму нульової послідовності. В алгоритмі такого виду захистів пошкодженим приєднанням вважається те, струм нульової послідовності якого максимальний. Під час ферорезонансу струм нульової послідовності фідера визначається ємністю приєднання, частотою ФРП і напругою нульової послідовності. Тому захист спочатку помилково спрацює на приєднанні з найбільшою ємністю і так далі до порушення резонансних умов і загасання ФРП.

На відміну від електромеханічних, для мікропроцесорних пристроїв релейного захисту важливий режим вимірювання струму нульової послідовності. Для більшості пристроїв доступні такі режими вимірювання діючого значення струму нульової послідовності: вимірювання істинного діючого значення (True RMS), вимірювання складової промислової частоти на основі дискретного перетворення Фур'є (DFT), амплітудний режим, в якому вимірювана величина розраховується як середнє між позитивними і негативними амплітудними значеннями. Тут важливо зазначити, що у різних розробників використані свої індивідуальні підходи під час цифрової обробки сигналів, причому ця інформація виходить за рамки технічної документації. Найважливішими параметрами тут є ширина вікна при Фур'є-аналізі та визначенні діючого значення, а також фіксованість часто-

ти дискретизації. З математичної точки зору аналізувати субгармонічний сигнал частотою 25 Гц за період промислової частоти 20 мсек некоректно. Тому розробники використовують два типових підходи в такій ситуації — оцифрування і фільтрація з фіксованою частотою дискретизації з подальшим застосуванням коригувальних коефіцієнтів і додаткових фільтрів, або виявлення справжнього періоду функції і корекція частоти модуляції в режимі реального часу. Так, наприклад, відомий міжнародний стандарт IEC 61850 передбачає використання фіксованої частоти дискретизації. Загалом саме алгоритм цифрової обробки, закладений розробниками, визначає точність і коректність роботи захистів від ОЗЗ.

Важливість коректного вибору режиму вимірювання струму нульової послідовності пояснимо на такому прикладі. Під час перекидних ОЗЗ в режимі вимірювання DFT частка складової промислової частоти в струмі нульової послідовності мізерно мала (близько 5—10 %), тому захист може не відчувати це пошкодження. Відповідна дослідна осцилограма лінійних струмів і струму нульової послідовності двигуна показана на рис. 6. Значення складової промислової частоти в цьому випадку не перевищує 0,6 А при уставці спрацьовування захисту 3 А. Захист в такому випадку не спрацював, а однофазне замикання перейшло в двофазне коротке замикання з подальшим пошкодженням двигуна 6 кВ. Варто зазначити, що при використанні режиму вимірювання True RMS величина струму нульової послідовності досягає 4,7 А, проте, з урахуванням наявності в струмі ОЗЗ нульових пауз і ширини вікна 20 мсек цього виявляється недостатньо для спрацьовування захисту. Для захисту від перекидних ОЗЗ слід використовувати захист типу INTRPTEF1 (шифр за стандартом IEC 61850).

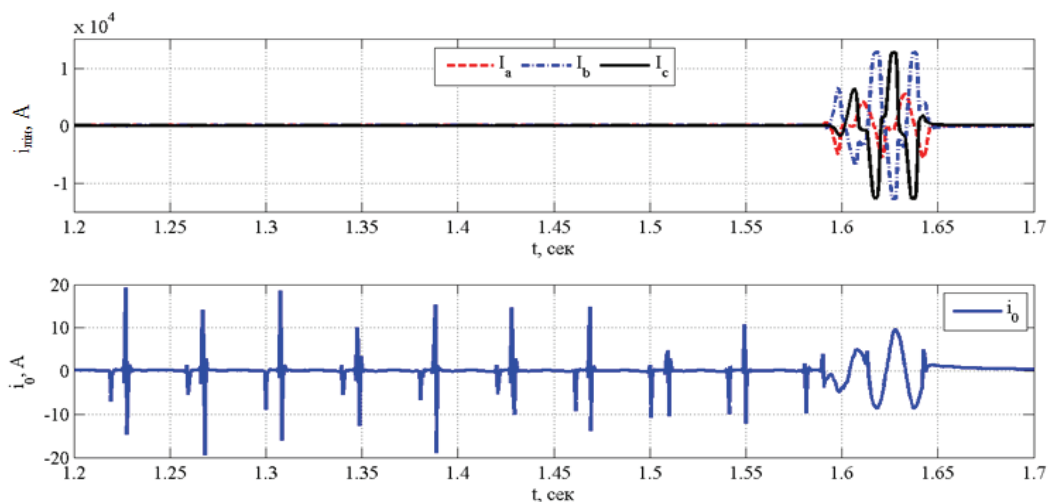


Рис. 6. Дослідні осцилограми лінійних струмів і струму нульової послідовності при перекидному ОЗЗ, який перейшов у міжфазне коротке замикання

Математичний апарат цифрової обробки сигналів також важливий для організації спрямованого захисту від ОЗЗ. За умови коректної математичної обробки сигналів струму і напруги нульової послідовності для випадку ФРП, зображеного на рис. 5, всі струми випереджають напругу нульової послідовності, тобто течуть від шин до ліній, тому захист не повинен спрацювати на жодному з приєднань. Однак, за деякого налаштування захисту він може розцінити таку ситуацію як ОЗЗ на шинах, оскільки всі струми течуть від шин до ліній. До помилкового спрацьовування особливо схильні електромеханічні направленні захисти, що зумовлені аналоговою фільтрацією струму нульової послідовності.

Розподіл струмів нульової послідовності під час ФРП може істотно змінитися за наявності декількох ТНКІ. На рис. 7 показана схема двоступеневої системи електропостачання, в якій на вводі підстанції і шинах РП встановлені ТНКІ. Ємнісний струм кожного з фідерів відповідно дорівнює 0,5 А, 0,3 А і 0,1 А, сумарний ємнісний струм кабелів РП дорівнює 0,2 А.

Застосування ТН з заземленою обмоткою високої напруги створює передумови для розвитку ФРП, тому слід раціонально вибирати кількість заземлених ТН. Найчастіше на шинах РП достатнє лише вимірювання напруги без контролю ізоляції, тому застосування ТНКІ не обов'язково, а іноді і нераціонально. Збільшення паралельно працюючих ТНКІ розширює область існування ферорезонансу і ускладнює його гасіння.

На рис. 8 наведені розрахункові криві струмів і напруги нульової послідовності під час короткочасної появи та самоусунення ОЗЗ на першому фідері. Як випливає з результатів розрахунку, струм нульової послідовності фідера, що живить РП, після зникнення ОЗЗ і збудження ФРП змінив свій напрямок, і став направлений зустрічно струмів нульової послідовності фідерів 1 і 2. Отже, залежно від способу цифрової обробки сигналів мікропроцесорним терміналом релейного захисту таке приєднання може бути розпізнано як пошкоджене. Величина струму нульової послідовності фідера РП може зрости в ще більше у випадку, якщо кабельні РП, що відходять, відключені. У цьому випадку струм $I_{0(3)}$ буде дорівнювати струму намагнічування другого ТНКІ.

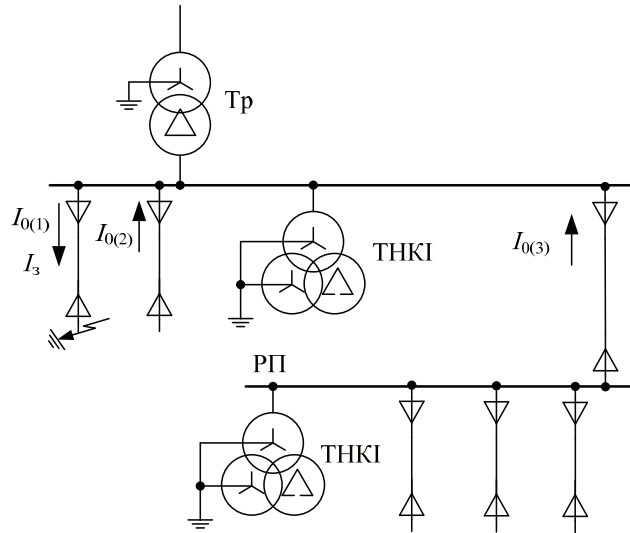


Рис. 7. Схема двоступеневої системи електропостачання із застосуванням двох ТНКІ

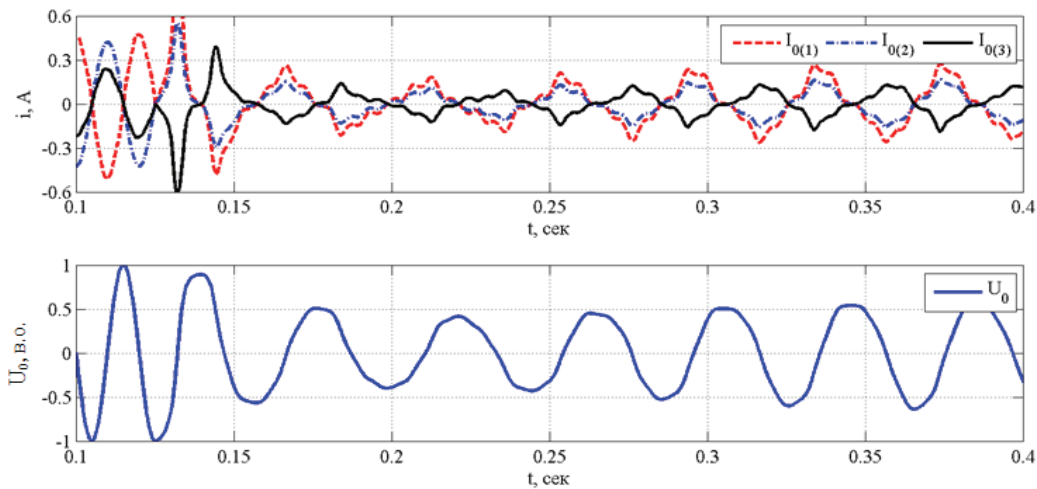


Рис. 8. Розрахункові криві струмів і напруги нульової послідовності під час ферорезонансу, що виник в результаті самоусунення ОЗЗ, для схеми з двома ТНКІ

Як відомо, крім субгармонічних ФРП можливий розвиток ферорезонансних коливань на частотах вище промислової. Подібні випадки характерні для мережі з сумарним ємнісним струмом близько $0,03...0,1$ А, що відповідає ємності ненавантажених шин або непротяжних повітряних мереж. Збудження такого роду коливань виникає в результаті комутацій в мережі, наприклад, при включенні або відключенні ліній. У такому випадку під час ФРП струм нульової послідовності лінії виявляється більшим, ніж власний ємнісний струм в режимі ОЗЗ, що може призвести до помилкового спрацьовування захисту. Однак на практиці такі випадки зустрічаються значно рідше, ніж субгармонічні коливання.

Насамкінець слід зазначити, що багато виробників цифрових пристроїв релейного захисту декларують у своєму складі блокування захисту від ОЗЗ за наявності ферорезонансу. У документації математичний алгоритм цього блокування детально не розглядається, хоча саме на цей момент

слід звертати увагу замовнику. До найпоширеніших відноситься блокування під час появи в спектрі напруги нульової послідовності складової 25 Гц і блокування під час появи непромислових частот з амплітудою, вище заданої.

Висновки

1. Виникнення і перебіг ФРП може призводити до помилкових спрацьовувань як направлених, так і ненаправлених захистів від ОЗЗ. Особливо схильні до помилкового спрацьовування захисти, що засновані на відносному вимірюванні струму та електромеханічні направлені захисти. Тому слід обмежити їх застосування в мережах, в яких можливий розвиток ферорезонансних процесів.

2. Під час організації захисту від ОЗЗ слід передбачити блокування від спрацювання при існуванні ферорезонансних явищ. З урахуванням того, що субгармонічний ФРП найпоширеніший, досить ефективним є блокування захистів від ОЗЗ, що спрацьовує за появи в спектрі напруги нульової послідовності частоти 25 Гц. При цьому ширина вікна під час цифрової обробки сигналів повинна бути не менше 40 мсек. Якщо умови експлуатації мережі дозволяють, то необхідно ввести на захист від ОЗЗ невелику затримку часу, погодивши її з динамічними характеристиками фільтра пристрою релейного захисту, що дозволить підвищити ефективність фільтрації сигналів під час перехідних процесів.

3. Для цифрових пристроїв релейного захисту слід брати до уваги алгоритм розрахунку діючих значень і початкових фаз при перехідних процесах в контурі нульової послідовності мережі. Для ненаправлених захистів від ОЗЗ рекомендується вибирати режим вимірювання DFT, що дозволить налаштувати від помилкових спрацьовувань за наявності спотворень в спектрі струмів нульової послідовності, а також від імпульсів струму, що виникають у разі нестійких ОЗЗ. Для перекидних ОЗЗ рекомендується використовувати окремий захист типу INTRPTEF1 в комплексі з захистом від стійких ОЗЗ. Амплітудний режим вимірювання струму нульової послідовності під час організації захисту від ОЗЗ рекомендуємо не використовувати, оскільки в такому випадку можливі помилкові спрацьовування у разі нестійких замикань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Захист електричних мереж 6–35 кВ від ферорезонансних процесів / [А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк] // *Технічна електродинаміка*. — 2013. — № 5. — С. 70—76.
2. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю / [В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, А. В. Ковязин и др.] // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»* — Донецьк, 2009. — Вип. № 9 (158). — С. 211—220.
3. Сафарбаков А. А. Блокировка срабатываний направленных защит от замыканий на землю при феррорезонансных процессах / А. А. Сафарбаков, С. И. Олейник // *Энергетик*. — 2001. — № 8. — С. 20—21.
4. Kong H. A Novel Ferroresonance and Single-phase Earth Fault Recognition Method Based on Correlation Analysis / H. Kong, B. Zhang // 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (E3E), Krakow, Poland. — 2014. — Pp. 426—430.
5. Kong H. A Novel Ferroresonance Recognition Method Based on the Excitation Characteristic of Potential Transformer / H. Kong, B. Zhang, Z. Bo // *International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014)*, Chengdu, China. — 2014. — Pp. 121—126.
6. Zhicheng Zh. Discussion on the detecting method of TV harmonic ferroresonance / Zh. Zhicheng, Junjia He, Junwu Ch // *High Voltage Engineering*. — 2009. — Vol. 35 (2). — Pp. 266—271.
7. Саенко Ю. Л. Устройство защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью / Ю. Л. Саенко, В. В. Нестерович, А. С. Попов // *Науковий вісник НГУ — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет*, 2014. — № 5. — С. 69 — 75.
8. Mokryani G. Identification of ferroresonance based on wavelet transform and artificial neural networks / G. Mokryani, M.-R. Haghifam, J. Esmailpoor // *Power Engineering Conference, (AUPEC 2007)*, Perth, Western Australia. — 2007. — Pp. 1—6.
9. Fan L. Fault detection approach of overvoltage in neutral grounded system based on negative-selection algorithm / L. Fan, Hong Z., An X. // *Power System Protection and Control*. — 2009. — Vol. 37 (15). — Pp. 23—41.
10. Xiaohui Y. Application of fractal theory in the fault classification for distribution system / Y. Xiaohui, Xu C. // *Automation of Electric Power Systems*. — 2006. — Vol. 30 (4). — Pp. 59—64.
11. Lin D. Hierarchical fuzzy-clustering classification of overvoltage's in power systems based on the genetic algorithm / D. Lin, Liang-feng G., Wen-xia S., Ming-ying Ch., Li-jin Zh. // *Proceedings of the Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. — 2010. — Vol. 30 (10). — Pp. 119—124.
12. Jiaan X. Application of NHT to ferroresonance over-voltage recognition / X. Jiaan, L. Tianyun, H. Jianwei // *Electric Power Automation Equipment*. — 2009. — Vol. 29 (1). — Pp. 75—78.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.04.2015 р.

Сасенко Юрій Леонідович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електрифікації промислових підприємств, e-mail: yls@mail.ru;

Попов Артем Сергійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електрифікації промислових підприємств, e-mail: artempopov9@gmail.com.

Приазовський державний технічний університет, Маріуполь

Yu. L. Saienko¹

A. S. Popov¹

Investigation of the operation modes of protection against single-phase earth fault in the network with isolated neutral point in presence of ferroresonance processes

¹Prirazovskyi State Technical University, Mariupol

The problem of distribution of zero-sequence currents and modes of protection against single-phase earth fault with the existence of ferroresonance processes are considered in the article. It's shown that in the ferroresonance mode the false tripping of both electromechanical and digital relaying is possible. There have been considered the typical algorithms of protection against single-phase earth fault that are used by digital terminals of relay protection, and also special feature of their setting and blocking at the ferroresonance mode.

Keywords: ferroresonance, single-phase ground fault, current and voltage of zero-sequence, subharmonic process, correlation function, spectral analysis.

Saienko Yuri L. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrification of Industrial Enterprises, e-mail: yls@mail.ru;

Popov Artem S — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electrification of Industrial Enterprises, e-mail: artempopov9@gmail.com

Ю. Л. Саенко¹

А. С. Попов¹

Исследование режимов работы защит от однофазных замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью при существовании феррорезонансных процессов

¹Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

Рассмотрен вопрос распределения токов нулевой последовательности и режимов работы защит от однофазных замыканий на землю при феррорезонансных процессах. Показано, что в режиме феррорезонанса возможно ложное срабатывание как электромеханических, так и цифровых устройств релейной защиты. Рассмотрены типовые алгоритмы функционирования защит от однофазных замыканий на землю, используемые цифровыми терминалами релейной защиты, а также особенности их настройки при организации защиты от однофазных замыканий на землю и блокировки при феррорезонансе.

Ключевые слова: феррорезонанс, однофазное замыкание на землю, ток и напряжение нулевой последовательности, субгармонический процесс, корреляционная функция, спектральный анализ.

Саенко Юрий Леонидович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электрификации промышленных предприятий, e-mail: yls@mail.ru;

Попов Артем Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электрификации промышленных предприятий, e-mail: artempopov9@gmail.com