

ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 6–35 кВ ВІД ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ

А.В.Журахівський, докт.техн.наук, **Ю.А.Кенс**, канд.техн.наук, **А.Я.Яцейко**, канд.техн.наук,
Р.Я.Масляк

Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, вул.С.Бандери, 12, 79013, Україна,
e-mail: masliakroman@ukr.net

В мережах з ізольованою нейтраллю, в яких працюють електромагнітні трансформатори напруги, можливе виникнення ферорезонансних процесів, що може призвести до їхнього пошкодження. На сьогодні пропонуються різні способи захисту від ферорезонансних процесів, однак у даний час одним з найефективніших є пристрій захисту від ферорезонансу (ПЗФ), розроблений на кафедрі ЕСМ НУ «Львівська політехніка». В мережах України встановлено велику кількість трансформаторів напруги і, як наслідок, майже таку ж кількість ПЗФ потрібно було б встановити для їхнього захисту. З метою зменшення необхідної кількості ПЗФ запропоновано нову багатофункціональну систему захисту трансформаторів напруги від ферорезонансних процесів на підстанціях з двома секціями шин. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: ферорезонансний процес, електромагнітний трансформатор напруги, електрична мережа, ізольована нейтраль, система захисту.

Вступ Відомо, що мережі 6–10–35 кВ в Україні та країнах СНД працюють в режимі ізольованої нейтралі, який було обрано з метою підвищення надійності електропостачання споживачів. Найбільш розповсюджений вид ушкодження ліній електропередачі – це однофазне замикання на землю, яке за режиму мережі з ізольованою нейтраллю не являється аварійним режимом і не потребує негайного його відключення та відповідного знеструмлення споживачів. Разом з тим, як зазначається у [8], за величин ємнісних струмів більших за 30 А (для $U_H=3-6$ кВ), 20 А (для $U_H=10$ кВ), 15 А (для $U_H=15-20$ кВ) та 10 А (для $U_H=35$ кВ) повинна здійснюватись компенсація ємнісних струмів за допомогою дугогасних реакторів (ДГК).

Незважаючи на ряд суттєвих переваг, мережі з ізольованою нейтраллю мають і вагомні недоліки, і серед них – можливість виникнення ферорезонансних процесів (ФРП), що призводять до пошкодження електрообладнання підстанції. Найчастіше пошкоджуються електромагнітні трансформатори напруги (ТН) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), а також можуть виходити з ладу схеми релейного захисту та автоматики.

ФРП виникає після різного роду збурень у мережі (найчастіше після обриву замикання фази на землю) в результаті утворення резонансного контуру між ємністю електромережі та нелінійною індуктивністю трансформаторів напруги. Збурення ферорезонансного процесу призводить до виникнення перенапруг та протікання надструмів у первинних обмотках ТН, що найчастіше і призводить до їхнього пошкодження. Оскільки більшість обладнання електричних мереж є старим і зношеним, то пошкодження може відбуватись і за невеликих значень перенапруг чи надструмів. Зважаючи на вищесказане, можемо зробити висновок, що проблема захисту електричних мереж від ферорезонансних процесів є актуальною та її вирішення є важливим завданням для забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Задачею досліджень є аналіз відомих заходів та засобів унеможливлення виникнення чи зриву ФРП в електромережах 6–35 кВ, а також розробка концепції побудови нової багатофункціональної системи захисту ТН від пошкоджень ферорезонансними процесами.

Аналіз існуючих способів захисту. На сьогодні існують наступні способи захисту електричних мереж від ферорезонансних процесів: 1 – переобладнання мереж з ізольованою нейтраллю в мережі з резистивно- або резонансно-заземленою нейтраллю [8, 10]; 2 – встановлення антирезонансних та нерезонуючих трансформаторів напруги; 3 – встановлення пристроїв захисту ТН. Кожний із запропонованих способів має як переваги, так і недоліки.

В Україні резистивне заземлення нейтралі не набуло великої популярності, хоча у багатьох інших країнах світу (Австралія, Канада, США, Іспанія, Португалія та ін.) мережі 6–35кВ працюють у

режимі резистивного заземлення нейтралі [7, 9, 10]. Варіанти приєднання резистора до мережі також є різні. Резистор може вмикатися в нейтраль спеціального заземлюючого трансформатора або використовується трансформатор зі з'єднанням обмоток високої напруги (ВН) в зигзаг та ін. Резистивне заземлення мережі має ряд переваг: відсутність дугових перенапруг високих кратностей та, відповідно, частих пошкоджень мережі; відсутність необхідності відключення однофазного замикання на землю (тільки для високоомного заземлення нейтралі); унеможливлення виникнення ферорезонансних процесів і пошкоджень трансформаторів напруги й ОПН; зменшення вірогідності ураження персоналу та сторонніх осіб (тварин) за однофазного замикання (тільки для низькоомного заземлення та швидкого селективного відключення пошкодження); зниження ймовірності переходу однофазного замикання в багатофазне. Але за значної кількості переваг резистивне заземлення нейтралі має й недоліки: збільшення струму в місці пошкодження, необхідність відключення однофазних замикань (для низькоомного заземлення); обмеження на розвиток мережі (для високоомного заземлення); переналаштування релейних захистів тощо [10]. Незважаючи на значні переваги резистивного заземлення нейтралі, його масове впровадження в мережах України є ускладненим, оскільки вимагає великих капіталовкладень на обладнання та модернізації релейних захистів. Разом з тим очевидно, що на сьогоднішній день аналіз режимів мереж за впровадження резистивного заземлення на деяких їхніх ділянках є актуальною задачею.

В Україні більш широкого розповсюдження набуло заземлення нейтралей мереж через дугогасний реактор (ДГР), яке має такі переваги: зниження кратності перенапруг, малий залишковий струм замикання на землю, підтримання безперебійної роботи мережі під час ОЗЗ, незначний вплив на сусідні установки, можливість самоусунення пошкодження за виконання умов гашення дуги, усунення явища субгармонічного ферорезонансу з електромагнітними трансформаторами напруги [7, 9]. Проте, використання дугогасних реакторів має й недоліки: підвищене навантаження на ізоляцію у зв'язку з підвищеною напругою здорових фаз в $\sqrt{3}$ раз, складність визначення місця замикання і відповідно складність виконання селективних захистів від ОЗЗ, складність налаштування ДГР та їхньої взаємної роботи, значні затрати на пристрої регулювання компенсації та самі заземлюючі котушки, недостатня безпека експлуатації мережі (можливість існування небезпечних напруг дотику, виникнення ОЗЗ через залізобетонні опори зі спеченим ґрунтом біля основи, можливість перекриття ізоляції комутаційних приладів під час оперативних перемикачів, обривах і падіннях проводів повітряних ліній), незадовільна селективність і стійкість до завад пристроїв релейного захисту та автоматики, їхня недостатня чутливість і швидкодія, можливість зміщення нейтралі. Встановлення ДГР також вимагає великих капіталовкладень та не може бути застосоване у всіх випадках.

Наші дослідження показали, що застосування антирезонансних трансформаторів напруги не завжди дієве і не виключає появу ферорезонансного процесу (хоча і знижує ймовірність його виникнення), оскільки зв'язок нелінійної індуктивності ТН із землею всеодно залишається і за певних параметрів мережі це призводить до виникнення ФРП [2, 3]. Повне виключення ФРП в мережі може забезпечити лише використання нерезонуючих трансформаторів напруги типу НТН, у яких одна фаза замінена на ємнісний дільник і заземлена, а дві інші не мають зв'язку з землею, і тому даний трансформатор гарантовано не створює резонансного контуру та не збудуватиме ФРП [4]. Однак заміну всіх трансформаторів в мережі на нерезонуючі також важко забезпечити, в першу чергу, через потребу в значних капіталовкладень.

На сьогоднішній день пропонується ряд заходів та засобів для уникнення чи зриву ФРП, зокрема, у нормативних документах рекомендовано під'єднання резистора номіналом 25 Ом до обмотки розімкненого трикутника ТН. Але численні дослідження та досвід експлуатації [1] доводить, що жоден із запропонованих способів не забезпечує гарантованого зриву ФРП, окрім пристрою ПЗФ [5], який за виникнення ферорезонансу під'єднує гасильний активний опір до обмотки розімкненого трикутника працюючого трансформатора напруги типу НТМИ чи ЗНОМ (які є зараз найбільш розповсюдженими) та ефективно зриває ФРП. Перевагою даного способу захисту є те, що його використання не вимагає великих капіталовкладень, монтаж і встановлення приладу є легким і не тягне за собою великої модернізації та не вимагає великих затрат часу. Недоліком використання пристроїв ПЗФ є те, що для гарантованого забезпечення зриву ферорезонансного процесу в електромережі вони повинні були б бути встановлені практично на всіх трансформаторах напруги типу НТМИ чи ЗНОМ, які працюють в електрично зв'язаній мережі [6].

Багатофункціональна система захисту. Оскільки кожен з існуючих засобів захисту від ферорезонансних процесів викликає певні труднощі в застосуванні, нами запропонована нова багатофункціональна система захисту (БСЗ) від ферорезонансних процесів, яка розроблена на основі пристрою ПЗФ та призначена для підстанцій з двома секціями шин [6].

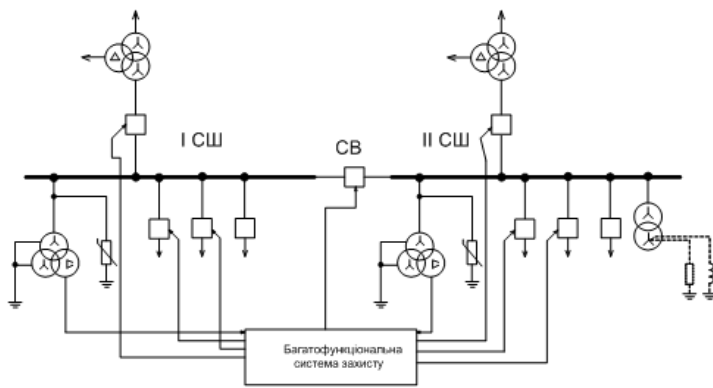


Рис. 1

та II секціях (системах) шин. Схема захисту спрацюватиме за появи на виводах обмотки розімкненого трикутника напруги $3U_0$ з частотою, відмінною від 50 Гц та амплітудою, більшою за уставку спрацювання пристрою.

Розглянемо детальніше роботу БСЗ на прикладі її структурної схеми (рис. 2). На входи 1 та 2 надходять сигнали з обмоток розімкнених трикутників трансформаторів напруг різних секцій шин. Ці напруги через понижувальні трансформатори T1 та T2 поступають на вхід операційних підсилювачів D, із виходу яких напруга, пропорційна напрузі $3U_0$, подається на один зі входів блоку мікроконтролера (БМК). Даний блок постійно сканує сигнали, які подаються на його входи і, якщо виконуються умови спрацювання (частота сигналу відрізняється від заданої уставки неспрацювання та амплітуда сигналу більша ніж задана уставкою), система починає виконувати операції для захисту від ФРП. У першу чергу формується сигнал, який подається на антипаралельно сполучені опотиристри VT1 чи VT2 (залежно від того, який зі входних сигналів спричиняє спрацювання пристрою). Виконавчий пристрій короткочасно (на заданий уставкою БСЗ час) під'єднує до обмотки розімкненого трикутника трансформатора напруги гасильний резистор (до того ТН, який бере участь у ФРП). Наші дослідження показують, що гарантований зрив ФРП можна забезпечити тільки за умови встановлення гасильних резисторів практично на всіх трансформаторах напруги електрично зв'язаної мережі. В інших випадках зрив ФРП меншою кількістю гасильних резисторів можливий, але не за всіх режимів роботи електромережі гарантований.

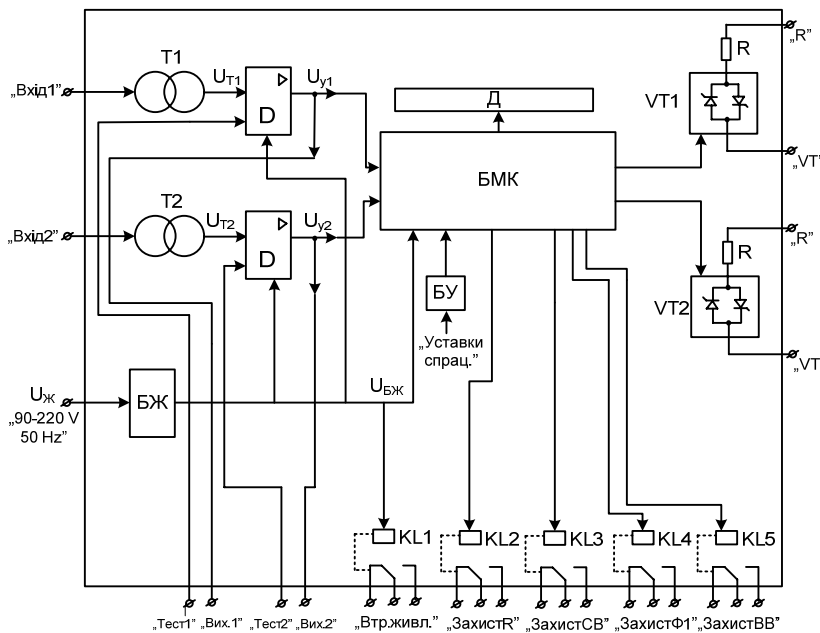


Рис. 2

трикутника ТН) та зрив ФРП. Якщо після спрацювання першої ступені захисту ферорезонанс не зрівнявся і напруга, що поступає на входи БСЗ, далі відповідає умовам спрацювання, то БМК подає сигнал на спрацювання реле KL4, яке діє на вимкнення одного з фідерів даної секції шин. Наші дослідження показали, що за вимкнення фідера з великим ємнісним струмом замикання на землю (тобто за короткочасного зменшення ємності мережі більше ніж, на 80%) наступить згасання ФРП в мережі.

На рис. 3 показано спрацювання першої ступені захисту (під'єднання гасильних резисторів до обмотки розімкненого трикутника ТН) та зрив ФРП. Якщо після спрацювання першої ступені захисту ферорезонанс не зрівнявся і напруга, що поступає на входи БСЗ, далі відповідає умовам спрацювання, то БМК подає сигнал на спрацювання реле KL4, яке діє на вимкнення одного з фідерів даної секції шин. Наші дослідження показали, що за вимкнення фідера з великим ємнісним струмом замикання на землю (тобто за короткочасного зменшення ємності мережі більше ніж, на 80%) наступить згасання ФРП в мережі.

На рис. 3 показано спрацювання першої ступені захисту (під'єднання гасильних резисторів до обмотки розімкненого трикутника ТН) та зрив ФРП.

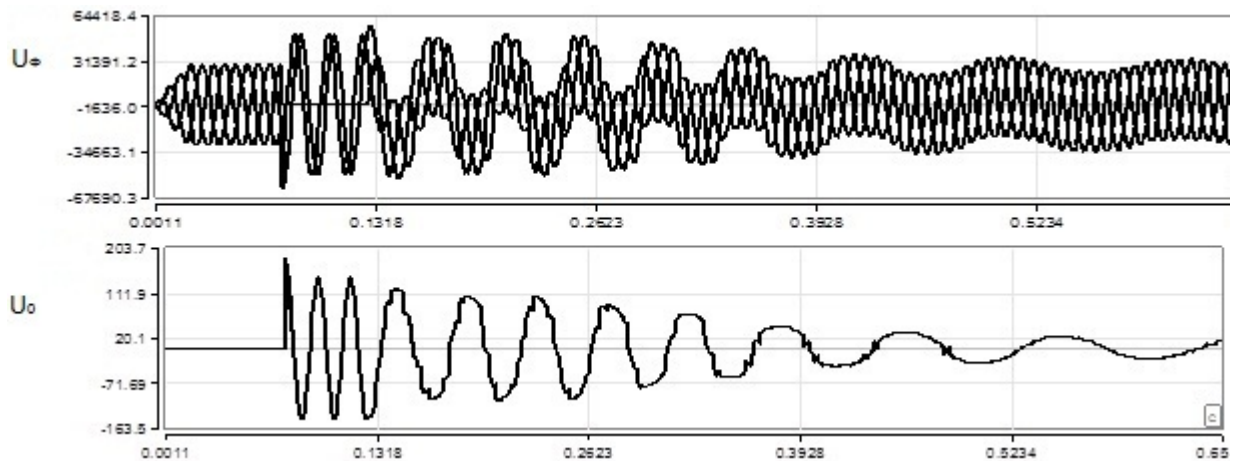


Рис. 3

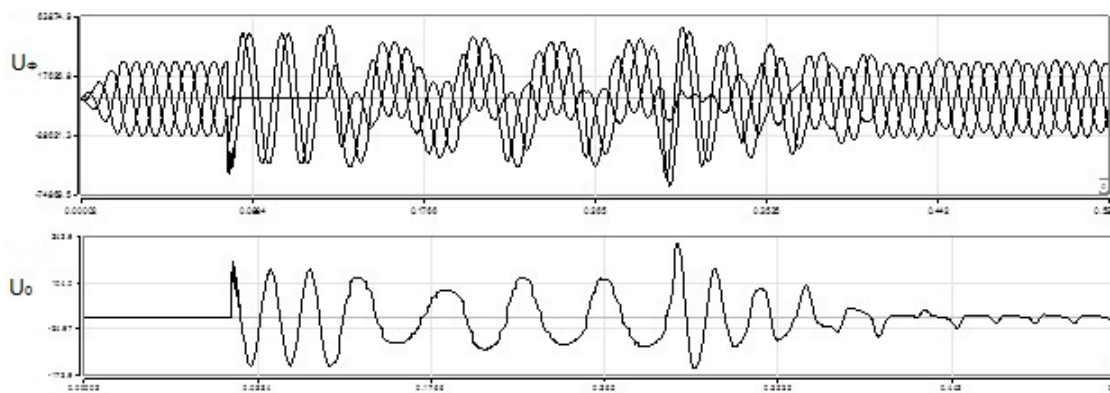
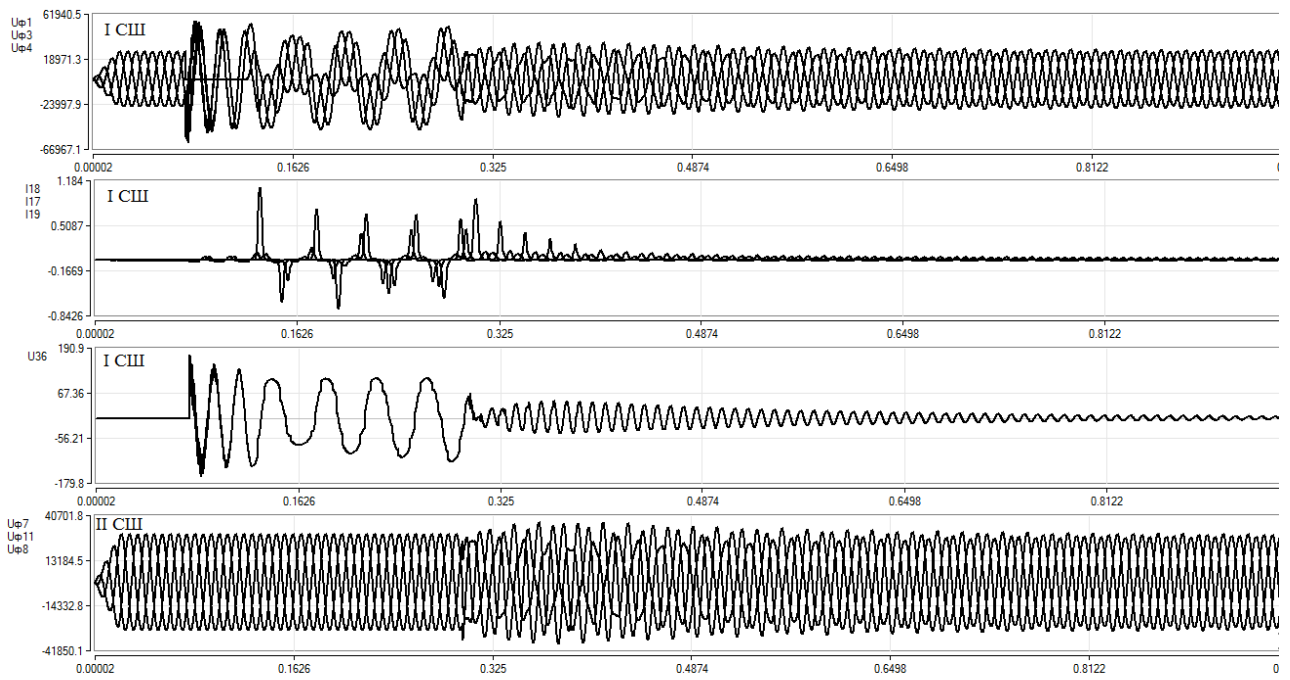


Рис. 4

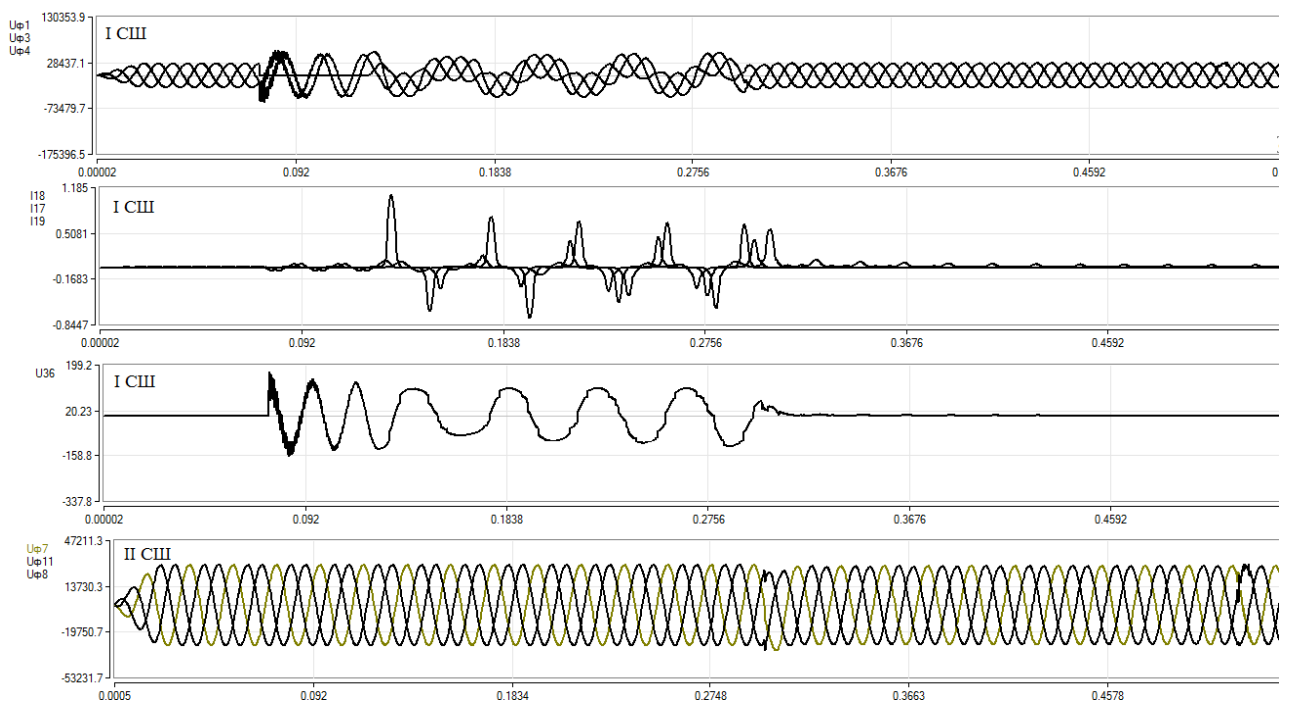
На рис. 4 показані осцилограми зриву ФРП за допомогою відключення одного з фідерів навантаження на короткий час. Разом з тим, не на всіх підстанціях дозволено відключати фідери навантаження, оскільки це може призвести до порушення технологічних процесів споживачів, тому використання даного способу захисту допустимо не на всіх підстанціях і може використовуватися лише після попереднього аналізу схеми конкретної підстанції.

Якщо і даний спосіб не дав бажаного результату або з тих чи інших причин не міг бути застосований на певній підстанції і на входи БСЗ далі подається напруга, що відповідає уставкам спрацювання системи (тобто в мережі далі існує ФРП), то БМК формує наступний сингнал на спрацювання реле КЛЗ, яке забезпечує ввімкнення чи вимкнення секційного вимикача (СВ) підстанції на заданий уставкою час.

Якщо на підстанції жодна з секцій шин не має резистивного або резонансного заземлення нейтралі, то після об'єднання (чи роз'єднання) шин ФРП згасне тільки у тому випадку, якщо після комутації СВ параметри мережі вийдуть за межі існування ФРП. Набагато ефективніший цей спосіб зриву ФРП за роботи однієї з секцій шин підстанції з резистивним або резонансним заземленням нейтралі. Як було сказано вище, виникнення паралельного ферорезонансу в мережах з даним режимом заземлення нейтралі є неможливим. Відповідно, за появи ФРП на іншій секції шин та спрацювання захисту ферорезонанс гарантовано згасне. На рис. 5 показано зрив ФРП за допомогою короткочасного об'єднання на паралельну роботу I та II СШ за різного заземлення нейтралі II СШ. З наведених осцилограм бачимо, що за наявного ДГР на II СШ після об'єднання секцій (систем) шин на паралельну роботу догасання ФРП супроводжується невеликим перехідним процесом, у той час, як у другому випадку, коли застосовується резистивне заземлення нейтралі, ФРП згасає швидко, практично без перехідного процесу, чим також підтверджується ефективність застосування резистивного заземлення нейтралі в мережах 6–35 кВ.



а) II СШ з дугогасною котушкою



б) II СШ з резистивним заземленням

Рис. 5

Якщо жодна з попередніх дій системи захисту не забезпечила згасання ФРП, то БМК формує останню запрограмовану дію та подає сигнал на спрацювання реле KL5, яке формує команду на короточасне відключення одного з вимикачів вводу (ВВ) живлення СШ.

Якщо на деякому з етапів ФРП припиняється, наступні дії не виконуються, а БСЗ повертається у початковий стан. Виконання таких варіантів зриву ФРП забезпечує ефективне його гашення та підвищує надійність роботи електромережі в цілому, зменшуючи кількість додаткового обладнання, яке потрібно встановлювати для захисту від ФРП. Кожна із запрограмованих ступеней захисту в системі може бути заблокована за потреби, оскільки на деяких підстанціях можуть застосовуватися не всі з перелічених способів зриву ФРП.

У системі захисту передбачено блок управління (БУ), за допомогою якого оператор зможе вводити зону нечутливості приладу за частотою та мінімальну уставку за амплітудою для спрацювання БСЗ та задавати часи роботи кожної зі ступеней захисту. У пристрої, що містить дисплей Д, за допомогою якого відбувається налаштування приладу, також передбачена можливість ведення журналу аварій, який можна переглядати на дисплеї. За спрацювання БСЗ передбачена сигналізація про її спрацювання за допомогою реле KL2 та сигналізація про втрату живлення (реле KL1). Для тестування системи БСЗ передбачено для кожного вхідного каналу тестові входи.

Висновки.

1. Наявність електромагнітних трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю може супроводжуватися під час різних комутацій (аварійних режимів) виникненням ФРП, що призводить, як правило, до пошкодження цих ТН.

2. Із всіх відомих на сьогодні способів і засобів захисту від ФРП дійсно ефективними є:

– зміна режиму роботи електромереж з ізольованою нейтраллю на резонансне або резистивне заземлення нейтралі, причому для збереження основних переваг ізольованої нейтралі доцільним є застосування високоомного заземлення;

– використання нерезонуючих ТН типу НТН;

– встановлення на кожний трансформатор напруги пристроїв захисту типу ПЗФ.

3. Запропонована та розроблена концепція побудови багатофункціональної системи захисту дозволяє спростити та зробити менш затратним організаційно-технічні рішення стосовно запобігання розвитку ферорезонансних процесів та ушкодження ними електрообладнання підстанцій.

4. Використання багатофункціональної системи захисту найбільш ефективно для підстанцій з двома секціями шин, одна з яких працює в режимі резонансного або резистивного заземлення нейтралі.

1. *Ганус А.И., Старков К.А.* Повреждаемость трансформаторов напряжения в обласных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению. // *Світлотехніка та електроенергетика.* – 2003. – № 1. – С. 76-81.

2. *Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Равлик О.М., Засідкович Н.Р.* Моделирование ферорезонансных процессов в сетях 35 кВ с трансформаторами напруги типу НАМИ-35 // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2000. – № 4. – С. 56-61.

3. *Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я.* Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги // *Технічна електродинаміка.* – 2010. – № 2. – С. 73-77.

4. *Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Мединський Р.В., Засідкович Н.Р.* Уведення в експлуатацію та випробування нерезонуючого трансформатора напруги 6-10 кВ // *Енергетика и электрификация.* – 2001. – № 8. – С. 17-22.

5. *Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Голяк О.Ю.* Захист трансформатора напруги від пошкоджень при ферорезонансних процесах у мережах з ізольованою нейтраллю // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» "Електромеханічні та електроенергетичні системи".* – 1997. – № 340. – С. 40-47.

6. *Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я.* Система захисту трансформаторів напруги від пошкоджень ферорезонансними процесами в електромережах з ізольованою нейтраллю // *Енергетика та електрифікація.* – 2010. – № 12. – С. 52-57.

7. *Лисицын Н.В.* К обоснованию выбора режима заземления нейтралі // *Енергетик.* – 2000. – № 1. – С. 22-25.

8. *Правила улаштування електроустановок.* – Харків: Форт. – 2011. – 708 с.

9. *Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. и др.* О необходимости изменений режимов нейтралі в сетях 3-35кВ // *Енергетика и Электрификация.* – 2001. – № 4. – С. 27-29.

10. *Титенков С.* Четыре режима заземления нейтралі в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона // *Новости Электротехники.* – 2003. – № 5. – С. 23-28.

УДК 621.314.1.027

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 КВ ОТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ

А.В.Журахивский, докт.техн.наук, **Ю.А.Кенс**, канд.техн.наук, **А.Я.Яцейко**, канд.техн.наук, **Р.Я.Масляк**
Национальный университет «Львівська політехніка»,
Львов, ул. С. Бандеры, 12, 79013, Украина,
e-mail: masliakroman@ukr.net

В сетях с изолированной нейтралью, в которых работают электромагнитные трансформаторы напряжения, возможно возникновение феррорезонансных процессов. Это может приводить к их повреждению. Сегодня предлагаются различные способы защиты от феррорезонансных процессов (УЗФ), однако в настоящее время одним из наиболее эффективным является устройство, разработанное на кафедре ЭСС НУ «Львівська політехніка». В сетях Украины установлено большое количество трансформаторов напряжения, и как следствие, примерно такое же количество УЗФ нужно установить для их защиты. С целью уменьшения их количества предложена новая многофункциональная система защиты трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов на подстанциях с двумя секциями шин. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: феррорезонансный процесс, электромагнитный трансформатор напряжения, электрическая сеть, изолированная нейтраль, система защиты.

MULTI-PROTECTION SYSTEM POWER GRIDS 6–35kV FROM FERRORESONANCE PROCESSES

A.V.Zhurahivskiy, Yu.A.Kens, A.Ya.Yatseyko, R.Ya.Maslyak
National University "Lvivska Politechnika",
Lviv, st. S.Banderu, 12, 79013, Ukraine,
e-mail: masliakroman@ukr.net

Grids with isolated neutral, in which electromagnetic voltage transformers operate, are known to undergo the ferroresonance processes. Nowadays various ways of protecting from the ferroresonance processes are proposed but one of the most effective is the ferroresonance protection device (FPD), which was created in National University "Lvivska Politechnika". A significant number of voltage transformers are installed in the electrically linked networks and, as a result, the same amount of FPD devices is necessary for its protection. The new multifunction protection system ferroresonance processes designed to allay number of protection devices and to protect voltage transformers at substations with two sections of tines. References 10, figures 5.

Keywords: ferroresonance processes, electrical voltage transformers, electrical network, insulated neutral, device protection.

1. Hanus A.I., Starkov K.A. Damaging voltage transformers in power grids regional AK "Kharkivoblenergo" and measures to reduce it // Svitlotekhnika ta Elektroenerhetyka. – 2003. – № 1. – Pp. 76-81. (Rus)
2. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu. A., Ravlyk O.M., Zasadkovych N.R. Modeling ferroresonans processes in networks 35 kV whis voltage transformer type NAMI-35 // Visnuk Vinnytskoho Politekhnichnoho Instytutu. – 2000. – № 4. – Pp. 56-61. (Ukr)
3. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu.A., Yatseiko A.Ya., Masliak R.Ya. Ferroresonance processes in electrical networks 10 kV with different voltage transformers// Tekhnichna elektrodynamika. – 2010 – № 2. – Pp. 73-77. (Ukr)
4. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu.A., Medynskiy R.V., Zasadkovych N.R. To enacting in exploitation and trying not resonance voltage transformer 6–10 kV // Enerhetyka ta Elektryfikatsiia. – 2001. – № 8. – Pp. 17-22. (Ukr)
5. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu.A., Holiak O.Yu. Protection voltage transformer from damage during ferroresonans processes in networks with isolated neutral // Visnyk Natsionalnoho Universytetu «Lvivska Politekhnika» "Elektromekhanichni ta Elektroenerhetychni systemy". – 1997. – № 340. – Pp. 40-47. (Ukr)
6. Zhurahivskiy A.V., Kens Yu. A., Yatseiko A.Ya., Masliak R.Ya. Protection system voltage transformers from damage ferroresonans processes in electric system with isolated neutral // Enerhetyka ta Elektryfikatsiia. – 2010. – № 12. – Pp. 52-57. (Ukr)
7. Lisitsyn N.V. Justification of the mode earthing // Enerhetyk. – 2000. – № 1. – Pp. 22-25. (Rus)
8. Rules for Electrical Installation. – Kharkiv: Fort, 2011. – 708 p. (Ukr)
9. Stognii B.S., Maslianik V.V., Nazarov V.V. The need for changes in the neutral networks of 3–35kV // Enerhetyka i Elektryfikatsiia. – 2001. – № 4. – Pp. 27-29. (Rus)
10. Titenkov S. 4 modes of neutral grounding in networks of 6-35 kV. Isolated neutral announce contribu law // Novosti Elektrotekhniki. – 2003. – №5. – Pp. 23-28. (Rus)

Надійшла 23.10.2012

Received 23.10.2012