

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Кузнецов В. Г., Тугай І. Ю., Нікішин Д. А.

Інститут електродинаміки Національної академії наук України

Запропоновано виконувати дослідження ферорезонансних процесів в електромережах, які використовуються для підключення відновлювальних джерел енергії, методами нелінійної динаміки на трифазній моделі.

Постановка проблеми. В наш час відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) займають все більш вагому частину встановленої потужності в енергетичних балансах країн, тому актуальною є проблема переходу від ізольованих, "острівних" ВДЕ з локальними споживачами до інтегрованих, що видають потужність в енергосистему.

Зазвичай ВДЕ безпосередньо формують змінювану в широкому діапазоні постійну напругу [1]. Для забезпечення електромагнітної сумісності ВДЕ з електричними мережами змінного струму загального призначення використовують інвертори напруги з різними схемами та принципами дії. Зрозуміло, що для роботи зі стандартним електротехнічним обладнанням доцільним є використання і стандартних номінальних напруг: 0,4 кВ для живлення окремих об'єктів та 10 кВ для під'єднання до підвищувальних підстанцій зв'язку з енергосистемою. В останньому випадку передача електричної енергії від базових інверторних комірків до підстанції, яка підключена до енергосистеми, відбувається по мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю. Як відомо з досвіду експлуатації таких мереж, переважним видом пошкодження в них є однофазні замикання на землю, що становлять 70-80% з усіх видів пошкоджень. Основною перевагою мереж з ізольованою нейтраллю вважається можливість роботи при цьому без необхідності негайного відключення пошкодженого приєднання. Виявлення аномального режиму однофазного замикання в мережах з ізольованою нейтраллю здійснюється за допомогою трансформаторів напруги (ТН) контролю ізоляції. На жаль, характерною особливістю роботи цих ТН в мережах є їх висока аварійність. Вони працюють в режимі, близькому до режиму холостого ходу і являють собою нелінійну індуктивність, підключену між фазою і землею. При різного роду перехідних процесах, а також асиметрії та несинусоїдності напруг, що характерно для інверторів, в коливних контурах, які утворені ємністю мережі і нелінійною індуктивністю ТН часом збуджуються ферорезонансні коливання. Як відомо, вони призводять до протікання надструмів в обмотці трансформатора і до її термічного руйнування. Слід відзначити, що ферорезонанс в цих мережах, хоча порівняно менш часто, може виникнути також і в силовому трансформаторі при неповнофазному режимові. Тому запобігання виникненню ферорезонансних аномальних режимів, що можуть викликати аварійні відключення ВДЕ, є актуальною теоретичною та практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ферорезонанс є складним електричним явищем, яке вини-

кає в мережі, що містить ємність і нелінійну індуктивність. Відомо, що в нелінійних колах при певних умовах можуть виникати процеси, які принципово неможливі в лінійних. Взагалі, проблемі аналізу ферорезонансу присвячена велика кількість досліджень. Для цього було запропоновано багато аналітичних, графічних, експериментальних методів. Але всі вони вимагають суттєвого спрощення задачі, тому на практиці отримати з їх допомогою цілком достовірний та однозначний результат в багатьох випадках не вдається. Значний прогрес був досягнутий останнім часом, коли для аналізу ферорезонансних схем стали використовувати методи нелінійної динаміки. Зокрема, це було зроблено для однофазних схем в мережах високої напруги з заземленою нейтраллю [2]. В той же час аналіз ферорезонансних схем в мережах з ізольованою нейтраллю вимагає використання трифазної моделі. Тому засоби попередження, які запропоновані та використовуються на практиці для таких мереж до цього часу залишаються в значному ступені емпіричними, і не можуть гарантувати режимну безпеку для довільних умов експлуатації.

Мета статті. Розглянуто використання методів нелінійної динаміки для аналізу ферорезонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, які можуть використовуватися для приєднання джерел ВДЕ до енергосистем. Характерною особливістю цих мереж, порівняно з мережами загального призначення, є порівняно невеликі їх кількість та об'єм, що дозволяє використати більш коштовні технічні засоби для попередження аномальних режимів.

Основні матеріали дослідження. Ферорезонанс в електричних мережах виникає при послідовному або паралельному з'єднанні ємності з нелінійною індуктивністю. У мережі з ізольованою нейтраллю, на відміну від мереж з ефективним заземленням нейтралі, виникає паралельне ферорезонансне коло, утворене паралельними гілками нелінійної індуктивності ТН і ємністю нульової послідовності ліній електропередачі мережі. Модель мережі 10 кВ, яка розроблена засобами пакета SimPowerSystems, наведена на рис. 1. Вона з'єднує секції шин розподільного пристрою 10кВ підвищувальної підстанції та сонячну електростанцію (коннектори 1,2,3). Три двообмоткові трансформатори ТА, ТВ і ТС моделюють групу ТН марки ЗНОЛ.06-10. Ємності кабельних ліній, враховуючи їх малу довжину, моделюються зосередженими елементами СА, СВ, СС, які підключені до відповідної системи шин. Резистор R та RN в моделі мережі призначені для перевірки можливості демпфування резонансних коливань в контурах.

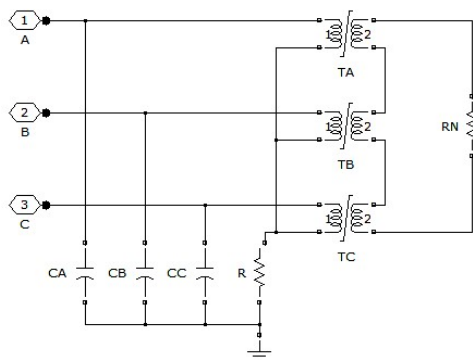


Рисунок 1 – Модель мережі 10 кВ

Як можна бачити, ємності в схемі мають лінійний характер, а індуктивність із залізними осерддями – нелінійний. Ці елементи й утворюють коливальну систему. В теорії нелінійної динаміки коливальна система, миттєвий стан якої задається двома величинами: узагальненою координатою x та її похідною, визначає нелінійний дисипативний осцилятор. Поведінка такої системи, на яку діє зовнішня періодична сила $A \cos \omega t$, може бути описана диференціальними рівняннями в загальному вигляді як [3]:

$$\frac{dx}{dt} + \gamma \frac{dx}{dt} + f(x) = A \cos \omega t,$$

де γ - параметр дисипації;

$f(x)$ - нелінійна функція.

Для ферорезонансу узагальненою координатою є поточкозчеплення, дисипація відбувається в активному опорі, а джерело електрорушійної сили характеризує вплив системи на процеси в даній електричній мережі. Тому можливі такі види ферорезонансних коливань, як нелінійного дисипативного осцилятора: ферорезонанс на основній частоті, субгармонічний ферорезонанс, квазіперіодичний ферорезонанс, хаотичний ферорезонанс [2,3]. Традиційні методи аналізу якості розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь розглядають ферорезонанс на основній частоті. Це до певної міри справедливо для електричних мереж з ефективним заземленням нейтралі, оскільки саме такий вид ферорезонансу супроводжується максимальними за значеннями перенапругами та надструмами. Але в мережах з ізольованою нейтраллю найбільшу небезпеку для ТН з точки зору термічного впливу і пошкодження несуть субгармонічні процеси, що супроводжуються появою низькочастотної складової в спектрі напруги нульової послідовності. Складова зниженої частоти, накладаючись на електрорушійну силу джерела живлення, насичує ТН, викликає протікання значних струмів в первинній обмотці і пошкодження трансформатора. Тому застосування традиційних засобів аналізу ферорезонансних процесів, що не містять розв'язків на субгармонічних частотах, в даному випадку не є коректним.

Застосування теорії біфуркації має на увазі рішення системи диференціальних рівнянь відносно керуючого параметра λ , при досягненні критичних значень якого змінюються кількість або тип рішень. При

дослідженні поведінки кола метод продовжень використовує алгоритм прогнозу та корекції: опираючись на вже досліджені розв'язки обираються та перевіряються можливі варіанти розвитку, які й утворюють дерево розв'язків. В результаті дослідження отримуємо інтервали зміни параметрів елементів схеми, в яких можливе виникнення та існування субгармонічного ферорезонансу.

Висновки. У цій статті розглянуто питання підвищення надійності роботи електричної мережі, яка з'єднує ВДЕ з енергосистемою, шляхом запобігання ферорезонансним процесам. Оскільки на особливу увагу заслуговує субгармонічний резонанс, параметри якого не можуть бути виявлені традиційними методами аналізу, запропоновано застосувати нелінійну динамічну модель та еволюційний метод. Використання результатів аналізу дозволить створити захисний пристрій з нелінійною характеристикою, що збільшить надійність придушення небезпечних ферорезонансних процесів та поліпшить режимну безпеку.

Список використаних джерел

1. Підвищення ефективності систем з відновлювальними джерелами енергії / Жуйков В. Я., Лук'яненко Л. М., Миколаєць Д. А., Осипенко К. С., Стелюк А. О., Терещенко Т. О., Ямненко Ю. С. Київ : Кафедра, 2018. 368 с.
2. Кузнецов В. Г., Тугай І. Ю., Мельничук В. А. Вплив явища гістерезису на виникнення нетрадиційних ферорезонансних процесів у електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. Вип. 40. С. 34–38.
3. Ferracci P. Ferroresonance. *Cahier technique. Schneider Electric*. Paris, 1998. No. 190. P. 1–28.

Анотація

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СЕТЯХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Кузнецов В. Г., Тугай И. Ю.,
Никишин Д. А.

Предложена нелинейная динамическая модель для исследования феррорезонансных субгармонических процессов в электросети с изолированной нейтралью служащей для присоединения возобновляемого источника энергии к системе.

Abstract

THE STUDY OF FERRORESONANCE IN THE NETWORK WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

V. Kuznetsov, I. Tuhai, D. Nikishin

The nonlinear dynamic model is proposed for studying ferroresonance subharmonic processes in electric network with an isolated neutral that serving for connecting a renewable energy source with the system.