

УДК 621.311.1

АНАЛІЗ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В РОЗПОДІЛЬЧОМУ ПРИСТРОЇ ПІДСТАНЦІ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

В.Г.Кузнецов, чл.-кор. НАН України, **І.Ю.Тугай**,

Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Показано, що задачі знаходження необхідних умов виникнення ферорезонансних процесів у розподільчому пристрої підстанції високої напруги належать до класу задач нелінійної динаміки. Одержано систему рівнянь, яка дозволяє проводити дослідження ферорезонансних схем та будувати графіки в фазовому просторі й відповідні перетини Пуанкаре для нормального синусоїдального режиму та різних типів ферорезонансних процесів. Розглянуто варіації значень параметрів схеми заміщення розподільчого пристрою підстанції високої напруги в широких межах для перевірки можливості виникнення нетипових ферорезонансів. Бібл. 2.

Ключові слова: ферорезонанс, розподільчий пристрій, перенапруги, надструми.

Ферорезонанс – це складний нелінійний динамічний процес, який може виникати в будь-яких схемах електричної мережі з нелінійною індуктивністю та ємністю і викликає тривалі перенапруги та надструми, що не обмежуються традиційними засобами придушення та можуть призводити до складних системних аварій.

Методи дослідження ферорезонансних явищ розвиваються вже протягом десятиліть. Багато дослідників намагалися аналітично описати ферорезонансні процеси й погодити їх з даними, отриманими при реєстрації реальних ферорезонансних процесів у діючих електричних мережах. На жаль, виявилось, що без надмірних спрощень аналітичний опис процесів у ферорезонансних колах є нерозв’язною задачею. Ці спрощення призводять до зникнення окремих розв’язків рівнянь стану. Вперше такий висновок було обґрунтовано в [1], де автори показали, що ферорезонансне коло є нелінійною динамічною системою й опис процесів у ній вимагає застосування відповідного математичного апарату.

Як відомо, для того щоб реальну фізичну систему можна було змоделювати як динамічну систему, вона повинна бути детермінованою: знаючи стан системи в початковий момент часу, необхідно мати можливість однозначно передбачити всю її подальшу поведінку. Оскільки електромагнітні процеси в електричних колах мають властивість передбачуваності, то вони можуть бути описані як динамічні системи. Виділяють два класи динамічних систем: консервативні та дисипативні. Дисипативна система – це відкрита нелінійна система, яка є невірноваженою через розсіяння енергії, що одержується ззовні. Своєрідним стаціонарним режимом дисипативної системи є хаос – нерегулярна поведінка детермінованої системи, що описується нелінійними рівняннями руху. Мається на увазі така стаціонарність у статистичному розумінні, коли постійними є лише опосередковані за великі інтервали часу статистичні характеристики динаміки. Таким чином, існує можливість оцінити наявність необхідних умов для ферорезонансного процесу в реальній електричній мережі при будь-якому поєднанні параметрів, оскільки для цього досить вивчити аттрактори дисипативної системи.

Динамічна система має чіткий закон зміни у часі, але для того щоб отримати повну характеристику цього розвитку, необхідно виконати серію досліджень за різних початкових умов. При цьому в кожній точці площини параметрів чисельно вирішується диференціальне рівняння або ітеруються відображення, що задають динамічну систему, і проводиться аналіз характеру режиму, який виникає після завершення перехідного процесу.

Дослідження ферорезонансних процесів у діючих електричних мережах має на меті як виявлення сепаратрис басейнів аттракторів небезпечних станів з метою попередження ферорезонансних процесів, так і визначення параметрів усталеного ферорезонансного режиму з метою налаштування пристроїв для його пригнічення. Розподільчі пристрої підстанцій високої напруги є першочерговими об’єктами для досліджень можливості розвитку аварійних процесів внаслідок ферорезонансу, оскільки вони складають основу всієї електроенергетичної системи. Для ілюстрації вирішення поставленої задачі були виконані дослідження процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги з ефективним заземленням нейтралі, в якій спостерігався ферорезонанс. Відповідно до схеми заміщення розподільчого пристрою підстанції була побудована еквівалентна схема для дослідження еволюції на фазовій площині відповідного ферорезонансного кола в залежності від зміни параметра. Після необхідних обчислень та використання для апроксимації кривої намагнічування поліному 11-го степеня $i_L(\psi) = a\psi + b\psi^{11}$ [2], була отримана система рівнянь

$$d\psi / dt = \psi_1;$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \frac{G + aRC + 10bRC\psi^{10}}{C(1 + RG)}\psi_1 + \frac{a}{C(1 + RG)}\psi + \frac{b}{C(1 + RG)}\psi^{11} = E'' \cos \omega t,$$

де i_L – струм намагнічування; t – час; ψ – потокозчеплення обмотки трансформатора напруги; a , b – коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування трансформатора напруги; G – провідність, яка враховує втрати в магнітопроводі трансформатора напруги підстанції; R – втрати в обмотках, що викликані навантаженням вторинної обмотки трансформатора напруги; C – еквівалентна сумарна ємність дільників напруги вимикача C_B ,

ємностей шин і приєданого до шин обладнання C_{III} ; $E'' = \omega(1 + RG)^{-1} E'$, $E' = EC_B (C_B + C_{III})^{-1}$ – еквівалентні електрорушійні сили; ω – кругова частота системи.

Досліджувалися усталені режими, тобто режими після закінчення початкового перехідного процесу. Значення параметрів схеми заміщення розподільчого пристрою варіювалися в широких межах для перевірки можливості виникнення нетипових ферорезонансів. Було побудовано графіки в фазовому просторі та відповідні їм перетини Пуанкаре. При зміні значень параметрів у реальних межах не виникали ні квазіперіодичні, ні хаотичні режими. Для демонстрації теоретичної можливості появи хаосу за певних умов була отримана хаотична поведінка ферорезонансного кола. Слід зауважити, що такі значення параметрів на практиці не зустрічаються.

Отримані за допомогою методів нелінійної динаміки результати забезпечують перевірку необхідних умов виникнення ферорезонансу в розподільчих пристроях підстанцій високої напруги. Повністю поведінку ферорезонансного кола описує траєкторія в тривимірному фазовому просторі (напруга – потокозчеплення індуктивності – час). Однак для спрощення ідентифікації процесу доцільно використовувати дискретизацію за допомогою перерізів Пуанкаре через проміжки часу, кратні частоті зовнішньої сили. Також можна зробити висновки про відсутність псевдоперіодичного та хаотичного режимів у діючих електричних мережах. Очікувати необхідно виникнення ферорезонансних процесів або на основній, або на субгармонічних частотах, що підтверджується даними з реєстраторів аварійних процесів, які встановлено в енергосистемах.

1. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Моделювання трансформатора напруги при ферорезонансних процесах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2007. – №1. – С. 127–131.

2. Araujo A.E., Soudack A.C., Marti J.R. Ferroresonance in power systems: Chaotic behaviour // IEEE Proceedings. Generation, transmission and distribution. – 1993. – Vol. 140. – No. 3. – Pp. 237–240.

УДК 621.311.1

АНАЛИЗ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ПОДСТАНЦИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

В.Г.Кузнецов, чл.-корр. НАН України, **И.Ю.Тугай**,

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Показано, что задачи нахождения необходимых условий возникновения феррорезонансных процессов в распределительном устройстве подстанции высокого напряжения относятся к классу задач нелинейной динамики. Получена система уравнений, которая позволяет проводить исследования феррорезонансных схем и строить графики в фазовом пространстве и соответствующие сечения Пуанкаре для нормального синусоидального режима и разных типов феррорезонансных процессов. Рассмотрены вариации значений параметров схемы замещения распределительного устройства подстанции высокого напряжения в широких границах для проверки возможности возникновения нетипичных феррорезонансов. Библ. 2.

Ключевые слова: феррорезонанс, распределительное устройство, перенапряжения, сверхтоки.

ANALYSIS OF FERRORESONANCE PROCESSES IN THE HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR SUBSTATION BY USING METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS

V.G.Kuznetsov, I.Yu.Tugai,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

It is shown that the problem of finding the necessary conditions of ferroresonance processes in the high-voltage switchgear substation belongs to a class of nonlinear dynamics problems. A system of equations, which allows to study of ferroresonance schemes and to plot of the phase space and corresponding Poincare cross-section of the normal sinusoidal mode and different types of ferroresonance processes is obtained. To verify the possibility of atypical ferroresonance the equivalent circuit parameters variations of the high-voltage switchgear substation within wide limits are considered. References 2.

Key words: ferroresonance, switchgear, overvoltages, overcurrents.

1. Kuznetsov V.G., Tugai I.Yu. Modelling of the voltage transformer at ferroresonance processes // Visnyk Natsionalnogo universytetu «Lvivska politehnika». Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy. – 2007. – №1. – Pp. 127–131. (Ukr)

2. Araujo A.E., Soudack A.C., Marti J.R. Ferroresonance in power systems: Chaotic behaviour // IEEE Proceedings. Generation, transmission and distribution. – 1993. – Vol. 140. – No. 3. – Pp. 237–240.

Надійшла 23.01.2012

Received 23.01.2012