

АНАЛІЗ ЗАГРОЗИ РОЗВИТКУ ФЕРОРЕЗОНАНСІВ У ДІЮЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Тугай І. Ю.

Інститут електродинаміки Національної академії наук України

Запропоновано методика, яка дозволяє оцінити ймовірність виникнення ферорезонансу та виявити області небезпечних параметрів в електричних мережах за допомогою комп'ютерного моделювання.

Постановка проблеми. В електричних мережах існує значна кількість нелінійних індуктивностей (у вигляді силових трансформаторів, електромагнітних трансформаторів напруги та ін.), а також ємностей (наприклад, кабелів, ємнісних дільників напруги у вимикачах, ємнісних трансформаторів напруги та ін.), тобто є численні передумови для виникнення ферорезонансу. Цей процес є причиною системних аварій як в Україні, так і за кордоном, отже при проектуванні або модернізації електричних мереж особливу увагу необхідно звертати на можливість виникнення та розвитку ферорезонансних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження ферорезонансу в електричних мережах можуть бути виконані за допомогою аналітичних, графічних, чисельних методів, експериментально, а також з використанням комп'ютерного моделювання. Електричні мережі високої напруги працюють з ефективним заземленням нейтралі та мають однофазні трансформатори напруги, тому для аналізу ферорезонансних явищ найчастіше використовують однолінійну схему заміщення, яку приводять до класичної ферорезонансної схеми заміщення [1]. Зазвичай, аналітичні методи не дозволяють точно апроксимувати в області перегину криву намагнічування сучасних трансформаторів, що може привести до невірних результатів. Графічні методи мають перевагу в наочності, однак спираються на значні обмеження та в більшості випадків дозволяють досліджувати ферорезонансні процеси тільки на основній частоті [2]. При застосуванні чисельних методів аналізу ферорезонансних явищ на частотах, відмінних від основної, може з'явитися значна похибка у порівнянні з результатами натурних експериментів. Експериментальні дослідження ферорезонансу в діючих електричних мережах мають обмежене застосування на практиці, оскільки існує значний рівень небезпеки розвитку системних аварій. Також при проведенні експерименту важко врахувати всі можливі відхилення параметрів ферорезонансної схеми. Комп'ютерне моделювання найчастіше виконується за допомогою програмного забезпечення ЕМТР [3], однак ферорезонансний перехідний процес є тривалим процесом, тому аналіз може привести до накопичення значної похибки. Слід зазначити, що при таких дослідженнях проводиться простий перебір варіантів, що не гарантує знаходження всіх потенційно небезпечних ферорезонансних режимів.

Мета статті. Пропонується методика аналізу запобігання розвитку ферорезонансних явищ в електричних мережах високої напруги з використанням електронно-обчислювальної машини.

Основні матеріали дослідження. Ферорезонанс – це нелінійний динамічний процес, а ферорезонансне коло є нелінійною динамічною системою. Динамічна система має чіткий закон зміни в часі, отже постає необхідність у виконанні серії досліджень при різних початкових умовах, вирішенні диференціального рівняння для кожної точки площини параметрів, що задає динамічну систему та проведенні аналізу характеру режиму. Ферорезонансна схема може бути описана диференціальною системою рівнянь [4]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \psi_1; \\ \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{G + aRC + 10bRC\psi^{10}}{C(1 + RG)}\psi_1 + \frac{a}{C(1 + RG)}\psi + \\ &+ \frac{b}{C(1 + RG)}\psi^{11} = E^n \cos \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

де $i_L(\psi) = a\psi + b\psi^{11}$ – струм намагнічування; ψ – потокозчеплення обмотки трансформатора напруги; a , b – коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування трансформатора напруги (крива намагнічування була апроксимована поліномом одинадцятого ступеня); t – час; 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 приєднаного до шин обладнання C_{III} ; $E^n = \frac{\omega}{1 + RG} E'$, $E' = E \frac{C_B}{C_B + C_{III}}$ – еквівалентні електрорушійні сили; ω – кругова частота системи.

Згідно (1) наявність необхідних умов виникнення ферорезонансних процесів визначається наступними параметрами елементів ферорезонансної схеми: ємністю шин та дільників напруги вимикачів, активними опорами та навантаженням трансформаторів напруги.

Вирішення рівняння (1) для кожної точки площини параметрів, що задає динамічну систему, а також проведенні аналізу характеру режиму дозволяє виконувати спеціалізований пакет програм WINPP, який призначений для вирішення задач динамічних систем. Він знаходиться у вільному користуванні, має графічний інтерфейс і дає можливість моделювати динамічні системи та досліджувати біфуркації динамічних систем. Для моделювання створюється файл з входніми даними за допомогою будь-якого текстового

редактора. З цього файлу WINPP одержує інформацію про рівняння, параметри, змінні, граничні умови та функції, які будуть використовуватися при моделюванні. Також є можливість визначити параметри графіків. Необхідно звернути увагу, що всі WINPP файли повинні мати розширення ".ode". Файли повинні включати в собі рівняння у форматі WINPP та параметри. При завданні параметрів у текстовому файлі необхідно переконатися, що їм присвоєні значення, які потім при розрахунку можна змінювати. Взагалі, у процесі розрахунку параметри моделювання можуть бути змінені вже не текстовим файлом, а за допомогою графічного інтерфейсу, окрім назв параметрів та розмірності системи. Також за допомогою графічного інтерфейсу обираються методи розв'язання рівнянь. Основними вихідними даними моделювання WINPP є графік залежності кожного параметра від часу.

Для аналізу ферорезонансних процесів в електричних мережах за допомогою комп'ютерної програми WINPP спочатку знаходиться точка, яка відповідає усталеному режиму. Слід зазначити, що задаються не тільки диференційні рівняння, але і початкові умови. Їм необхідно приділяти особливу увагу, оскільки ферорезонансі кола, як нелінійні динамічні системи, надзвичайно чутливі до найменших відхилень в початкових умовах. Потім за обраним параметром ферорезонансного кола будується діаграма біфуркацій. При побудові діаграм біфуркацій WINPP дає можливість відстежувати спеціальні точки біфуркацій, тобто точки, де відбуваються біфуркації. Ці особливі точки надають інформацію про систему, у нашому випадку вони вказують на характер процесу. Окрім цього, вони дозволяють визначити тип ферорезонансу, тобто ферорезонанс на основній частоті, субгармонійний або квазіперіодичний ферорезонанс. В результаті можна розрахувати області небезпечних параметрів, де існує ймовірність виникнення та розвитку ферорезонансних явищ в електричних мережах.

За допомогою програмного пакету WINPP вищезазначені області були розраховані для ферорезонансів на основній і субгармонійній частотах та увійшли до складу методичних вказівок "Виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги з заземленою нейтраллю та запобігання їм" [5], які затверджені Міністерством енергетики та вугільної промисловості України. Области можна використовувати як при експлуатації магістральних електричних мереж електроенергетичної системи України, так і при проектуванні.

Висновки. Ферорезонанс належить до нелінійних динамічних процесів, а його аналіз відноситься до класу задач нелінійної динаміки, тому доцільно застосовувати відповідні методи. Використання спеціалізованого пакету програм WINPP дозволяє перейти від прямого перебору можливих станів ферорезонансного кола та тисячі розрахунків до направленого перебору варіантів і знаходження точок біфуркацій, в яких відбувається якісна зміна поведінки кола. WINPP дає можливість визначити області небезпечних значень параметрів, при яких існує можливість появи та розвитку ферорезонансу в електричних мережах високої напруги і які є частиною нормативного документа

Міненерговугілля України по попередженню ферорезонансних процесів.

Список використаних джерел

1. Wisniewski J. Search for network parameters preventing ferroresonance occurrence / J. Wisniewski, E. Anderson, J. Karolak // Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU): Proceedings of 9th International Conference. – Barcelona, Spain, October, 2007. – P. 253–257.
2. Soudack A. C. Ferroresonance in power systems: Fundamental solutions / A. C. Soudack, J. R. Marti // Generation, transmission and distribution: IEEE Proceedings. – July, 1991. – Vol. 138, no. 4. – P. 321–329.
3. Escudero M. V. Characterization of ferroresonant mode in HV substation with CB grading capacitors / M. V. Escudero, I. Dudurych, M. A. Redfern // Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST). – Montreal, Canada, June 19–23, 2005. – P. 1506–1513.
4. Кузнецов В. Г. Аналіз ферорезонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки / В. Г. Кузнецов, І. Ю. Тугай // Технічна електродинаміка. Ч. 3, Київ: ІЕД НАН України, 2012. – С. 33–34 (Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність).
5. Виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги та запобігання їм: Методичні вказівки / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, А. К. Шидловський, А. М. Гашімов, Є. В. Дмитрієв – К.: ДП НЕК Укренерго, 2008. – 52 с.

Анотація

АНАЛИЗ УГРОЗЫ РАЗВИТИЯ ФЕРОРЕЗОНАНСА В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тугай И. Ю.

Предложена методика, которая позволяет оценить вероятность возникновения феррорезонанса и рассчитать области опасных параметров в электрических сетях при помощи компьютерного моделирования.

Abstract

ANALYSIS OF THE FERRORESONANCE THREAT IN HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH THE HELP OF COMPUTER SIMULATION

I. Tugai

The technique is offered, allowing to estimate the probability of ferroresonance occurrence and to determine the dangerous parameters domains in electrical networks using computer simulation.