

ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

*Коли діти будуть дивитись на великих вчених так само,
як вони дивляться на відомих акторів та музикантів,
людство здійснить великий прорив.*
Брайан Рендолф Грін

Недостатня вивченість ферорезонансних процесів як нелінійного явища в теорії електричних ланцюгів, а також потреба у створенні ефективних засобів захисту електротехнічного обладнання від ферорезонансних перенапруг визначають актуальність роботи. Пошук місць можливої локалізації ферорезонансних процесів в електричних мережах є актуальною теоретичною задачею. Ця задача неоднозначна і на точність її розв'язання значною мірою впливають як адекватність моделі, так і похибки під час вимірювання. Ферорезонансні процеси виникають непередбачено і можуть існувати порівняно тривалий час. Тому імовірність виникнення системних аварій, навіть за невеликих ферорезонансних перенапруг, значна. Також необхідно звернути увагу на той факт, що перенапруги цього типу часто супроводжуються надструмами, які обмежуються порівняно незначним активним опором. Тому обладнання руйнується не тільки через пробій ізоляції, а й через термічне uszkodження.

ВСТУП



**Владислав
Кучанський**
канд. техн. наук,
стар. наук. співроб.
Інституту
електродинаміки
НАН України,
м. Київ

Ферорезонанс в електричних системах – це складні нелінійні коливання, які можуть виникати в будь-яких схемах електричної мережі з нелінійною індуктивністю (силові трансформатори, електромагнітні трансформатори напруги (ТН), реактори) та ємністю (кабелі, ємнісні дільники напруги у вимикачах та ін.) [5, 7]. Як відомо, ферорезонансні процеси викликають тривалі перенапруги та надструми [1–8], які не обмежуються традиційними засобами подавлення та можуть призводити до складних системних аварій.

У 1907 році французький інженер **Джозеф Бетено** опублікував статтю «Про резонансні процеси в трансформаторах», де він уперше звернув увагу на таке явище як ферорезонанс. Безпосередньо ж термін «ферорезонанс» в 1920 році ввів **Пауль Бушері** – теж француз, інженер і викладач електротехніки – в статті, яка називалася «Існування двох режимів ферорезонансу». Бушер проаналізував явище ферорезонансу і показав, що існує дві стабільні резонансні частоти в ланцюзі, котрий складається з конденсатора, резистора і нелінійної індуктивності.

Таким чином, явище ферорезонансу пов'язано з нелінійністю індуктивного елемента в ланцюзі контуру (рис.1). Нелінійний резонанс, який може виникнути в електричному ланцюзі, називається «ферорезонанс», і для його виникнення необхідно, щоб контур обов'язково містив нелінійну індуктивність і звичайну ємність. Очевидно, в ланцюгах з лінійною індуктивністю ферорезонанс абсолютно не властивий. У разі, якщо індуктивність у контурі лінійна, а ємність нелінійна, можливе явище, аналогічне ферорезонансу [6, 8]. Основною особливістю ферорезонансу є те, що для одного ланцюга характерні різні режими цього нелінійного резонансу в залежності від виду збурення.

Головні відмінності ферорезонансного кола від лінійних: можливість виникнення резонансних коливань у широкому діапазоні зміни ємності; частота коливань

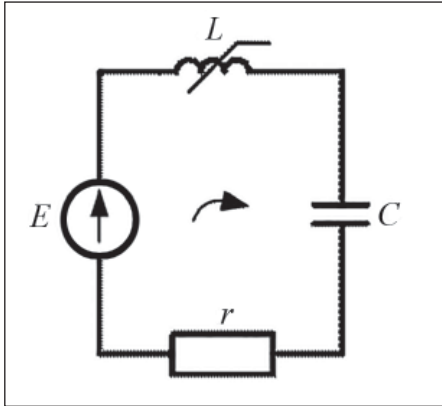


Рис. 1. Коливальне коло резонансу з нелінійною індуктивністю

напруги та струму, яка може відрізнятись від частоти синусоїдального джерела електрорушійної сили; існування декількох стабільних усталених режимів для даної схеми та значень параметрів (один з цих режимів є очікуваним «нормальним» з лінійними характеристиками, в той час як інші – аномальними, параметри яких часто становлять небезпеку для обладнання) [1–5,10–11]. Але й актуальність створення адекватних методів досліджень таких складних процесів зростає, оскільки ймовірність виникнення ферорезонансу в електричних мережах останнім часом безупинно збільшується.

Чому індуктивність може бути нелінійна? Головним чином тому, що магнітопровід цього елемента виготовлений з матеріалу, який нелінійно реагує на магнітне поле [8]. Цей принцип використовуються в усіх електричних машинах. Зазвичай осердя виготовляють з феромагнетиків, і коли термін «*ферорезонанс*» був введений Паулем Бушері, теорія феромагнетизму ще не була сформована до кінця, а всі матеріали такого роду називали *феромагнетиками*, ось і виник термін «*ферорезонанс*» для позначення явища резонансу в ланцюзі з нелінійною індуктивністю. Процес намагнічування феромагнетика, поміщеного в котушку зі струмом, зображено кривою намагнічування $B = f(H)$ на рис.2 .

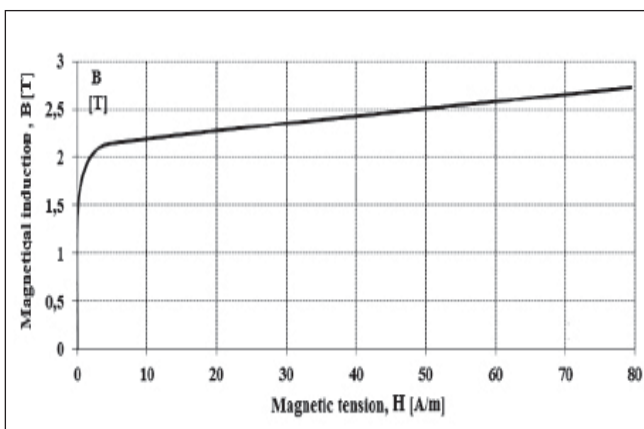


Рис. 2. Крива намагнічування трансформатора напруги

Трансформатор напруги (рис.3) типу НКФ (трансформатори напруги однофазні, маслонаповнені, каскадні, що призначені для живлення електричних вимірювальних приладів, ланцюгів захисту та сигналізації) складається з двох обмоток і осердя.



Рис. 3. Каскадний трансформатор напруги 330 кВ

Обмотки також підрозділяються на первинну і вторинну. Первинна обмотка трансформатора напруги містить значно більше витків, ніж вторинна, та підключається до магістрально електричної мережі 330–750 кВ. На первинну обмотку подається напруга, яку необхідно виміряти, а до вторинної обмотки приєднується вольтметр.

ФЕРОРЕЗОНАСНІ ПРОЦЕСИ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЯХ ПІДСТАНЦІЙ 330–750 кВ

Магістральні електричні мережі зв'язують окремі регіони, країни і їх найбільші джерела і центри споживання електричної енергії. Для таких мереж характерні надвисокі і високі рівні напруги і великі потоки потужності по лініях 330–750 кВ.

У мережах з глухозаземленою нейтраллю (330–750 кВ) можна виділити дві основні причини виникнення ферорезонансу: 1) відключення холостих ошинок багаторозривними вимикачами, що оснащені ємнісними дільниками напруги, і 2) неповнофазні режими, які не супроводжуються короткими замиканнями, наприклад обрив шлейфу на опорі повітряної лінії електропередач або на підстанції, відмова полюса вимикача при комутації. Пошкодження трансформатора напруги при неповнофазних режимах характерні насамперед для мереж 330–750 кВ і пов'язані з розземленою нейтраллю силових трансформаторів. У свою чергу розподільчий пристрій

(РП) призначений для прийому і розподілу електричної енергії одного класу напруги. Розподільний пристрій містить набір комутаційних апаратів, збірні і з'єднувальні шини, допоміжні пристрої релейного захисту і автоматики та вимикачі.

Серед факторів, що обумовлюють небажаний розвиток подій, можна назвати: появу та розповсюдження кабельних мереж високої напруги; впровадження сучасних силових трансформаторів з малими втратами (що одночасно збільшує загрозу появи нетрадиційних ферорезонансів); зростання питомої ваги в РП підстанцій сучасної компактної комутуючої апаратури на елегазі. Тому як при проектуванні нових електричних мереж, так і при модернізації існуючих необхідно звертати особливу увагу на можливість появи ферорезонансу.

Повітряні і зрідка кабельні магістральні мережі працюють з ефективно заземленою нейтраллю, проте у значної частини силових трансформаторів вона розземлена для зменшення струмів короткого замикання і спрощення релейного захисту. У цих мережах були помічені три види стійких ферорезонансних явищ:

- гармонійний (50 Гц) ферорезонанс між нелінійною індуктивністю ТН і ємностями конденсаторів, які шунтують розриви високовольтних вимикачів (рис. 4 а);
- субгармонійний ферорезонанс при неповнофазних режимах ліній електропередачі, коли напруга з'являється на вимкнутій фазі (разом з встановленим ТН) через міжфазні ємності лінії (рис. 4 б);
- гармонійний ферорезонанс при неповнофазних режимах ліній електропередачі, коли ємність відключеної фази резонує з нелінійною індуктивністю цих відгалужень силового трансформатора з розземленою нейтраллю.

Субгармонійний ферорезонанс на частотах 16,66 Гц на відключеній фазі лінії є рідкісним та цікавим електротехнічним явищем. Раніше таке явище спостерігалось кілька разів на десятиріччя від 1960–1980 рр. і, як правило, відбувалося на дуже довгих магістральних лініях без проміжного відбору потужності на силові трансформатори. З тих пір конфігурація мережі 330–750 кВ змінилася; і такі ферорезонансні явища більше не спостерігалися. Але останнім часом [1, 7, 9] ферорезонанс на субгармонійній частоті відбувається все частіше, через те що сучасні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії підключаються до розподільчих пристроїв магістральної електричної мережі кабельними лініями, що мають великі ємності. При такому підключенні виникають більші області існування з ферорезонансними процесами на частоті 16,66 Гц.

Неповнофазні режими в ЛЕП 330–750 кВ трапляються або через відмову вимикачів чи роз'єднувачів, або через обриви проводів. Відключена від джерела фаза лінії не може розглядатися як елемент мережі

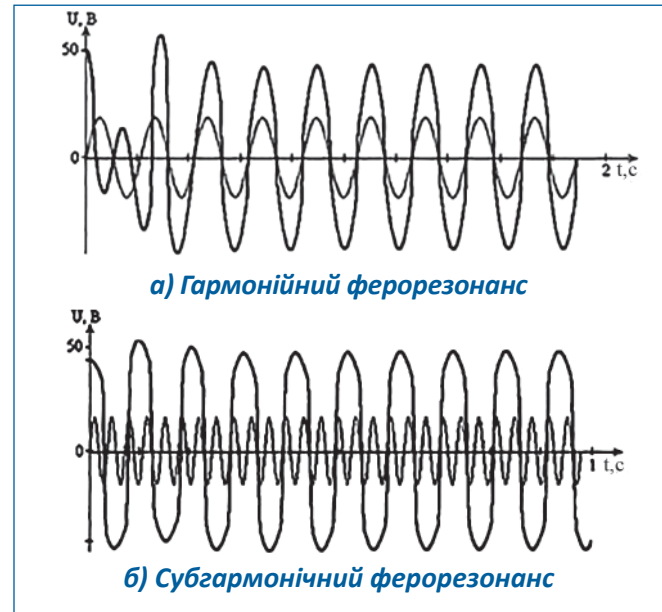


Рис. 4. Найрозповсюджені види ферорезонансних процесів

з заземленою нейтраллю. На цій фазі можливі тривалі ферорезонансні явища, що супроводжуються, як показує досвід, 2,5-кратними підвищеннями напруги основної частоти. Останні можуть виникнути, якщо приєднані до лінії силові трансформатори не навантажені і мають розземлену нейтраль. Трансформатор напруги 330–750 кВ пошкоджується при цьому за кілька хвилин. Таких випадків у мережах України відбувається по 10–15 випадків щорічно.

ПІДХОДИ АНАЛІЗУ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ НАЙБІЛЬШ РОЗПОВСЮДЖЕНИХ ТИПІВ

Аналіз ферорезонансних схем виконується на основі моделі перехідних й усталених процесів мережі, структура якої визначається системою нелінійних диференціальних рівнянь стану електричних і магнітних кіл. Основною проблемою при складанні рівнянь елементів розрахункової схеми заміщення є математичне представлення нелінійних елементів (наприклад, із застосуванням аналітичної апроксимації їх характеристик). До таких елементів у даному випадку відносяться нелінійні індуктивності магнітопроводів трансформаторів зі сталі [1–8]. У загальному вигляді аналіз ферорезонансних схем складається з таких етапів:

- за допомогою розрахункової схеми заміщення записується вихідна система нелінійних диференціальних рівнянь стану за першим і другим законами Кірхгофа для електричного і магнітного кіл;
- на наступному етапі здійснюється вибір змінних стану та перетворення вихідної системи рівнянь у нормальну форму Коші. Вибір змінних стану

виконується за умовою відповідності його правилам комутації й одержання найбільш простого математичного запису для рівнянь стану; виконується рішення рівнянь стану методами чисельного інтегрування [12].

Розрахунок перехідного процесу передбачає визначення початкових умов для змінних стану. Ферорезонансні схеми виникають при різних комутаціях. У найпростішому випадку, коли досліджуване коло було відключене від мережі, початкові умови будуть нульовими. У інших випадках (наприклад для ферорезонансних схем розподільчих пристроїв (РП) 330–750 кВ із вимикачами, на яких встановлені ємнісні дільники, та електромагнітними трансформаторами напруги) перед комутацією до шин підстанції прикладена робоча напруга. Тоді, використовуючи модель трансформатора як нелінійного елемента, можна визначити струм через обмотку вищої напруги (ВН) до комутації. Система диференціальних рівнянь стану у формі Коші і рівняння для струмів та напруг в обмотці ВН ТН будуть кінцевою формою математичної моделі ферорезонансної схеми в даному випадку. Пошук окремих розв'язків, що відповідають стабільним усталеним режимам, можна виконати за допомогою покрокового руху в просторі часу, починаючи з довільної точки.

Тобто задачу аналізу режиму в ферорезонансному колі доцільно розглядати як двоточкову крайову задачу для моделювання як перехідного процесу, так і усталеного стану. Відомо, що диференціальне рівняння такого типу не може бути виражене через елементарні функції. Тому попередніми дослідниками було запропоновано ряд графічних та спрощених аналітичних методів аналізу ферорезонансу, які в кращому випадку дають опис якісної сторони процесу. Не змінили радикально ситуацію й поява та швидкий розвиток обчислювальної техніки, хоча практика застосування методів чисельного аналізу диференціальних рівнянь й давала надію на отримання результатів, що достовірно відтворюють кількісну сторону явища в умовах конкретної електричної мережі [12].

Такий підхід не є цілком коректним, оскільки досліджуваний процес належить до класу параметричних резонансів, коли один з параметрів поступово налагоджується під зовнішню силу, а тому перехідний процес може тривати сотні періодів, і не простою задачею є навіть визначення моменту його закінчення. Як наслідок, програми можуть бути використані тільки у випадках жорсткого ферорезонансу з малим перехідним періодом, а також для верифікації окремих результатів, отриманих іншими методами. Навіть подальше підвищення швидкодії обчислювальних машин з відповідним зростанням періоду часу, на якому можна виконати моделювання перехідного процесу в реальній мережі з заданою точністю, не зможе дати гарантованих відповідей при аналізі ферорезонансів, оскільки головна при-

чина невизначеності результатів у іншому – у наявності нелінійних осциляторів.

Вимикачі 500–750 кВ є багато розривними, з кількістю розривів зазвичай двох, причому як у повітряних, так і у елегазових. Для рівномірного розподілу напруги по розривах паралельно їм включаються спеціальні конденсатори (подільники напруги). Після відключення вимикача відключений об'єкт (система шин) залишається пов'язаним з джерелом напруги через еквівалентну ємність подільників на розривах.

Необхідною умовою задовільної роботи вимикачів з багаторазовим розривом є рівномірний розподіл відновлюваної напруги між розривами. Для забезпечення рівномірного розподілу напруги між розривами при будь-якій частоті відновлюваної напруги застосовують ємнісні дільники напруги.

Для повного відключення приєднання потрібна комутація роз'єднувача. Ємність конденсаторів, які шунтують розриви вимикачів, спільно з ємністю ошиновки і підключеного до неї обладнання на землю утворюють ферорезонансний контур. На рис. 5 наведена еквівалентна схема розподільчого пристрою з ТН [4,7,8], на якій зображено джерело електрорушійної сили (ЕРС) E , вимикач з ємністю дільників напруги C_B , ємність шин та приєднаного до шин обладнання $C_{Ш}$, провідність, що враховує втрати в магнітопроводі ТН G .

Електромагнітні процеси в електричних мережах мають властивість передбачуваності, тобто характеризуються як динамічні системи: існує однозначний перехід від реального процесу до його математичної моделі. Динамічна система, миттєвий стан якої задається двома величинами, узагальненою координатою x та її похідною, визначає нелінійний дисипативний осцилятор. Поведінка ферорезонансного кола повністю відповідає даному класу осциляторів (узагальненою координатою є потокозчеплення, дисипація відбувається в активній провідності, а джерело ЕРС характеризує вплив системи на процеси в даній електричній мережі). Але саме зовнішня сила перетворює нелінійний осцилятор у неавтономну систему, яка може демонструвати складну динаміку й перехід до хаосу.

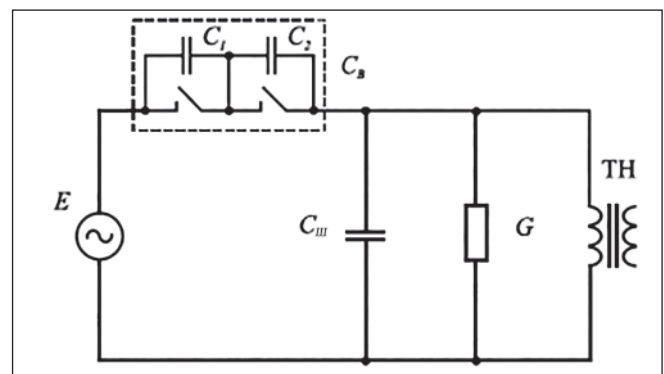


Рис. 5. Ферорезонансний контур розподільчого пристрою

У математиці хаос [10–11] визначають як крайню непередбачуваність постійного нелінійного й нерегулярного складного руху, що виникає в динамічній системі. Слід зазначити, що цей хаос, незважаючи на властивість непередбачуваності, характеризує не випадкові процеси. Більше того, він динамічно детермінований, оскільки підкоряється своїм законам іррегулярності. По суті, якщо розв'язок рівняння обмежений, але не є стабільним або періодичним, його класифікують як хаотичний.

На практиці при виявленні небезпеки виникнення ферорезонансного процесу в електричній мережі повинні бути впроваджені заходи щодо його попередження. Зокрема, були запропоновані, досліджені та рекомендовані для використання на практиці такі засоби: виключення можливості утворення ферорезонансного контура (рис. 6); розладнання ферорезонансного контура, що утворюється джерелом живлення, ємностями та індуктивностями; зниження добротності ферорезонансного контура включенням у нього резистора; ведення в ферорезонансний контур стороннього джерела електричної енергії для виведення феромагнітного осердя з стану насичення; використання захисного відключення. Три останніх заходи зумовили розробку спеціальних захисних пристроїв, які мають датчики початку ферорезонансу, логічні схеми та системи керування комутаційними апаратами або елементами корекції, що підключаються до існуючих елементів мережі. Зважаючи на принципову неможливість точного прогнозування розвитку ферорезонансного процесу, вживання захисних пристроїв визнано найбільш універсальним і ефективним заходом [12].

Непередбачуваність хаосу пояснюється в основному саме істотною залежністю від початкових умов. Один з головних висновків теорії хаосу полягає ось у чому: майбутнє пророчити неможливо, тому що завжди будуть помилки вимірювання, породжені в тому числі незнанням усіх факторів і умов, а малі зміни або помилки можуть породжувати великі наслідки. Характерною властивістю хаотичної поведінки є експонентне нагромадження помилок. Відповідно до квантової механіки початкові умови завжди невизначені, а відповідно до теорії хаосу [11] ці невизначеності будуть швидко наростати й перевищать припустимі межі передбачуваності. Тому другий висновок теорії хаосу: *вірогідність результатів залежно від часу швидко зменшується*.

Відомо, що в нелінійних дисипативних динамічних системах, які знаходяться під дією періодичної сили, можливі три типи реакції: *періодична*, *квазіперіодична* та *хаотична*. Таким чином, в електричному ферорезонансному колі можна очікувати на появу таких коливань: періодичних – як на основній частоті, так і на частотах вищих та нижчих гармонійних складових (рис. 6); коливань з нестабільним періодом; повністю хаотичних коливань. Причому в

двох останніх випадках у спектрі коливань присутні гармонійні складові, які не є кратними основній частоті, і саме тому за критерієм початку ферорезонансу доцільно вибрати ступінь загального спотворення синусоїди основної частоти, а не перевищення вмісту якоїсь певної гармонійної складової.

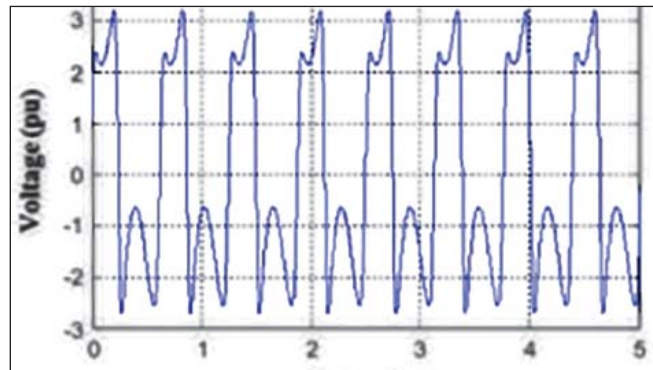


Рис. 6. Ферорезонансні перенапруги

Найбільш небезпечним для обладнання електричних мереж є періодичний ферорезонанс на основній частоті, оскільки при цьому коливанням максимально передається енергія джерела. Це підтверджується й досвідом експлуатації. Інші типи коливань також можуть стати причиною ушкодження, але частіше за все спричиняють відмови засобів релейного захисту та автоматики. Тому загроза їх появи також повинна бути виявлена й попереджена. З цією метою пропонується використовувати метод продовжень, що дозволяє визначити, як впливає зміна одного з параметрів режиму чи схеми на можливість існування усталеного ферорезонансу.

Вивчення особливості поведінки окремих розв'язків при зміні параметрів системи базується на принципах теорії якісного дослідження диференціальних рівнянь. Одним із основних питань цієї теорії є питання про стійкість рішення або руху системи, якщо рівняння трактувати як модель фізичної системи. Метод продовжень передбачає аналіз стійкості окремого розв'язку рівняння при відхиленнях досліджуваного параметра (без необхідності виконання обчислень у часовому просторі). У результаті отримуємо інтервали зміни параметра, в яких можливе виникнення та існування ферорезонансного процесу певного типу. Границі інтервалів є точками біфуркацій. Взагалі теорія біфуркації довела свою ефективність при вивченні нелінійних динамічних систем як адекватний математичний інструмент. Поведіння таких систем описується діаграмами біфуркацій, які в міру зростання керуючого параметра дають послідовність розгалужень. У таких точках відбувається зміна типу ферорезонансу [12].

Виявити точки біфуркації можна за критеріями стійкості згідно з Ляпуновим, що передбачає дослідження про те, як змінюється частинний розв'язок нелінійного рівняння при малих відхиленнях параметру, вплив якого вивчається. Ознакою стійкості

частинного розв'язку є те, що всі множники Флоке будуть за модулем менші одиниці, тобто перехідні процеси на всіх осях будуть згасаючі. Якщо ж при дослідженні множник Флоке вийде за межі $+1$, то в цій точці ферорезонансний процес змінює свій характер в результаті тангенціальної біфуркації. Також про наявність біфуркації свідчить поява множника Флоке, який вийде за межі -1 , але це буде біфуркація іншого типу – подвоєння періоду. І, нарешті, коли з'являється пара спряжених комплексних множників, модулі яких перевищують одиницю, то це відповідає біфуркації Хопфа (ферорезонанс з періодичного стає квазіперіодичним).

Перевірка необхідних умов існування ферорезонансних процесів при експлуатаційній постановці задачі передбачає дослідження методом продовжень залежності режимів від ємності дільників, ємності шин, втрат в активній провідності. Початкові умови (початковий заряд конденсатора, залишковий потік в осерді трансформатора, момент комутації) визначають, яким в результаті буде усталений режим. Аналіз повинен бути виконаний для всіх можливих конфігурацій електричної мережі з урахуванням не тільки нормальних, але й аварійних, післяаварійних і ремонтних схем. При цьому слід враховувати роботу засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики. Виконання цього етапу забезпечує перевірку необхідних умов для розвитку ферорезонансного процесу. Перевірка достатніх умов передбачає аналіз можливості виникнення в мережі подій, що можуть ініціювати ферорезонанс: підключення трансформатора, відключення лінії електропередачі

(у тому числі неповнофазні), падіння навантаження, атмосферні і комутаційні перенапруги та інші відхилення від нормального режиму.

Для захисту обладнання від пошкоджень, пов'язаних з ферорезонансом, можна рекомендувати такі заходи:

1. Ретельний контроль за симетрією параметрів навантаження і самої мережі; застосування вимикачів з трифазним приводом, що забезпечують малу ймовірність неповнофазних включень і відключень.

2. Ввід у схему додаткових елементів, які забезпечують достатнє збільшення активних втрат. Наприклад, для зниження ферорезонансних перенапруг на вимірювальних трансформаторах напруги рекомендується одну з його вторинних обмоток замкнути на активний опір величиною кілька десятків Ом.

При подальших теоретичних дослідженнях аномальних режимів у магістральних мережах особливо увагу буде приділено нетиповим резонансним процесам, які хоча безпосередньо й не викликають ушкодження основного обладнання, оскільки напруги та струми не досягають критичних значень, але зумовлюють неправильну дію засобів релейного захисту і протиаварійної автоматики, а також систем автоматизованої діагностики та керування режимами, що впроваджуються в сучасних мережах. Це стосується перш за все лінійних резонансів на частотах субгармонійних та ультрагармонійних складових, а також квазіперіодичних та хаотичних ферорезонансів. ■

Література

1. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Математическое моделирование ферорезонанса на субгармонической частоте. К.: ІЕД НАНУ, 2007. №1(16). С. 147–149.
2. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Моделювання трансформатора напруги при ферорезонансних процесах. *Вісн. Нац. ун-ту «Львівська Політехніка»*. Львів: НУ «Львівська Політехніка». 2007. № 596. С. 127–131.
3. Тугай Ю.І. Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах. *Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. Львів: НУ «Львівська Політехніка». 2007. Вип. 596. С. 132–136.
4. Амелин С.А., Новиков А.А., Строев К.Н., Строев Н.Н. Модификация модели Джилса-Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков. *Электричество*. 1995. №11. С. 60–63.
5. Кадомская К.П., Лаптев О.И. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения. *Новости электротехники*. 2006. Вып. 6(42). С. 2–5.
6. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. *Наука и технологии*. М., 2000. 224 с.
7. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование ферорезонансных процессов с учетом варьирования вебер-амперной характеристики трансформаторов напряжения. *Електроенергетичні та електромеханічні системи* (зб. наукових праць). 2012. № 736. С. 123–132.
8. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 1986. Vol. 61. Pp. 48–60.
9. Бартошевич Н.П. Определения начальных условий для ускорения расчета установившегося режима в ферорезонансных цепях. *Изв вузов. Энергетика*. 1977. No 5. С 128–132.
10. Ott E. Chaos in Dynamical Systems. *Cambridge University Press*. 1993. 385 p.
11. Doedel E.J., Keller H.B., Kemevez J.P. Numerical Analysis and Control of Bifurcation Problems (II): Bifurcations in Infinite Dimensions. *Int. J. of Bifurcation and Chaos*. 1996. Vol. 1, No. 4. P. 745–772.
12. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2009. №23. С. 110–118.