

УДК 621.311

Ю. Л. Саєнко, д-р техн. наук, проф.;

А. С. Попов, асп.

МОДЕЛЮВАННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ПІДПРИЄМСТВ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Наведено результати досліджень явища ферорезонансу на основі комп'ютерного моделювання. Визначено межі існування ферорезонансу. Оцінено ефективність засобів боротьби з ферорезонансом.

Багаторічний досвід експлуатації мереж 6...35 кВ з ізольованою нейтраллю показує, що, найчастіше пошкоджуваним елементом мережі, є трансформатор напруги контролю ізоляції (ТНКІ) типу НТМІ, ЗНОМ, ЗНОЛ. Згідно зі статистикою аварійності трансформаторів напруги (ТН), наведеної в роботах [1—3], в Україні щороку пошкоджується 7...10 % усіх встановлених ТН. Однією з найважливіших функцій ТНКІ є контроль ізоляції мережі. Відповідно в разі пошкодження ТН втрачається контроль ізоляції і знижується рівень електробезпеки в мережі, що є недопустимим. Також пошкодження ТН призводить до зниження надійності роботи системи електропостачання. Відомі випадки, коли пошкодження ТН супроводжувалось займанням трансформатора та пожежею в розподільному пристрої. Це у свою чергу призводило до довготривалих перерв електропостачання.

Таким чином, існує *проблема* надмірної пошкоджуваності ТН, яка у свою чергу знижує надійність системи електропостачання та завдає значних матеріальних збитків.

Відомо, що найбільша аварійність ТН характерна для мереж із відносно малими струмами замикання на землю (1...10 А) [3—5]. При цьому пошкодження ТН, як правило, викликане існуванням у мережі ферорезонансних явищ. Пошкодження настає внаслідок довготривалого перебігу надструмів по обмотці високої напруги (ВН) трансформатора. У результаті настає термічне руйнування обмотки ВН трансформатора.

Важливе науково-практичне значення має визначення меж існування стійкого ферорезонансу. Сучасний розвиток обчислювальної техніки дозволяє створювати розрахункові моделі, які б дозволили врахувати всі можливі фактори та чинники, що впливають на характер перебігу ферорезонансних процесів (ФРП), оцінити ефективність засобів запобігання та придушення ферорезонансу. Тому створення адекватної математичної моделі має визначальну роль у дослідженні ФРП. Для **розв'язання цієї задачі** була створена модель мережі в пакеті MATLAB, що дозволяє досліджувати поведінку мережі за різного роду перехідних процесів.

Моделювання ФРП

Відомо, що ферорезонанс найчастіше виникає за однофазних замикань на землю (ОЗЗ) [3—5]. Тому особливу увагу слід приділити процесам під час ОЗЗ та його ліквідації. Це насамперед процеси після зникнення ОЗЗ, процеси під час замикань на землю через перекидну дугу, процеси під час вмикання холостих шин тощо. Розрахункову схему мережі наведено на рис. 1. На схемі живильний трансформатор подано активним опором R_T , індуктивністю розсіяння L_T та ЕРС E . Мережу подано фазною C_ϕ та міжфазною $C_{мф}$ ємностями, активним опором $R_{із}$, який моделює активні втрати в ізоляції мережі, активним опором $R_{д}$, який моделює опір електричної дуги. Базово було прийнято кабельну мережу 6 кВ, параметри елементів якої дорівнюють $R_T = 0,163$ мОм, $L_T = 0,86$ мГн. Співвідношення фазної та міжфазної ємностей дорівнює $C_{мф} = C_\phi/3$, коефіцієнт заспокоювання мережі прийнятий рівним 0,03

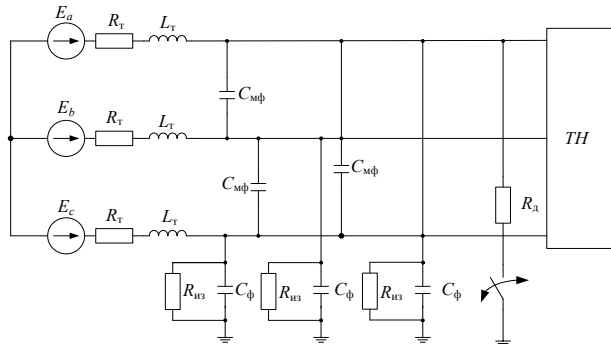


Рис. 1. Розрахункова схема мережі в режимі ОЗЗ

відповідно до [6].

Трансформатор напруги являє собою групу трьох однофазних трансформаторів, зібраних в одному баці. Розрахункову схему однофазного трансформатора, що використовується під час моделювання, показано на рис. 2. На схемі: R_1 — активний опір обмотки ВН трансформатора; R'_2 — активний опір обмотки розімкнутого трикутника, зведений до обмотки ВН; L_1 — індуктивність розсіяння обмотки ВН; L'_2 — індуктивність розсіяння обмотки розімкнутого трикутника, зведена до обмотки ВН; L_μ — нелінійна індуктивність намагнічення сталевого осердя; $R_{ст}$ — нелінійний активний опір, який моделює втрати потужності у сталі ТН.

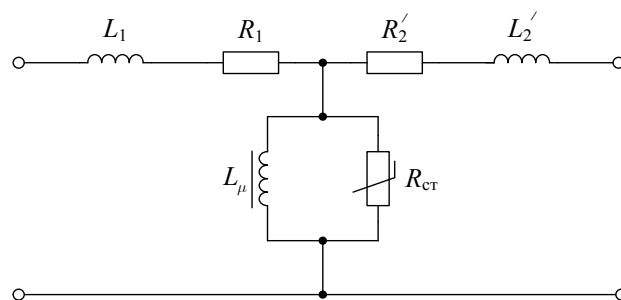


Рис. 2. Розрахункова схема однофазного ТН, яка використовується у моделюванні

Методика врахування активних втрат у осерді ТН в створеній моделі відрізняється від поширених методик [3—5, 7], в яких втрати у сталі або не моделюються, або моделюються лінійним активним опором. У роботі [8] активні втрати в осерді трансформатора моделюються нелінійним активним опором. При цьому результати моделювання є коректнішими, оскільки поведінка ТН у моделі більше наближена до процесів у реальному трансформаторі. Достовірне відтворення втрат у сталі є досить важливим у дослідженні ефективності засобів придушення ферорезонансу. Відомо, що втрати активної потужності в ферорезонансному контурі сприяють розладу ферорезонансних умов і придушенню незгасливого ферорезонансу. У деяких випадках достовірне врахування активних втрат може стати визначальним. Так, під час моделювання втрат лінійним та нелінійним опорами за однакових параметрів ємності нульової послідовності мережі ферорезонанс в одному випадку може бути згасливим, а в іншому — незгасливим. Залежність активних втрат у сталі від напруги була отримана експериментально.

Відомо, що найвизначальнішим чинником у моделюванні ФРП, який впливає на достовірність отриманих результатів, є якісне відтворення кривої намагнічення ТН [4, 9]. Використання степеневого полінома є найпростішим, проте найнеточнішим методом апроксимації вебер-амперної характеристики. Його використання може призвести до недопустимих похибок в отриманих результатах. У цій роботі використовується кусково-лінійна апроксимація. Крива намагнічення апроксимується 15 лінійними ділянками. Також у роботі враховано можливість несиметрії вебер-амперної характеристики ТН по фазах. За номінального струму намагнічення значення потокозчеплення варіювалося в діапазоні $\pm 20\%$.

На рис. 3 показано часові залежності фазних напруг, струмів у обмотці ВН трансформатора та напруги на виводах обмотки розімкнутого трикутника у разі незгасливого ферорезонансу, який виник у результаті відключення ОЗЗ ($C_\Phi = 0,6$ мкФ). Процес має чітко виражений субгармонійний характер з частотою 25 Гц. Фазні напруги в усталеному режимі ферорезонансу не перевищують лінійної. Проте, струми в обмотці ВН значно перевищують струм термічної стійкості обмотки ВН, який становить 0,25 А. Надструми виникають у результаті

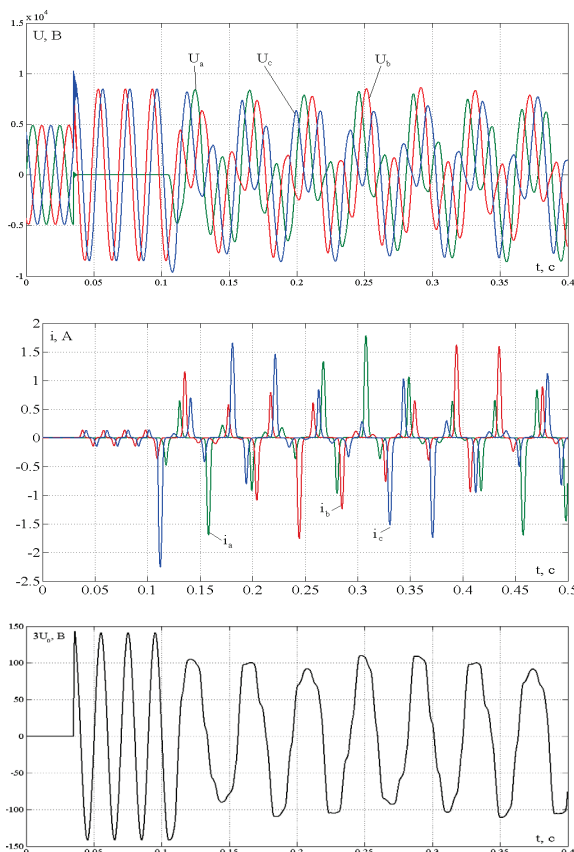


Рис. 3. Часові залежності фазних напруг, струмів у обмотці ВН трансформатора, напруги на виводах обмотки розімкнутого трикутника в умовах стійкого ферорезонансу, який виник у результаті відключення ОЗЗ. $C_\Phi = 0,6$ мкФ

проходження через ТН струму зниженої частоти. За такого режиму пошкодження ТН настане через 5...7 хвилин.

Ферорезонанс небезпечний не тільки надструмами в обмотці ВН, а й помилковими спрацьовуваннями захисту від ОЗЗ. Відомо, що ТНКІ служать для сигналізації від ОЗЗ, і виникнення в мережі замикання супроводжується появою напруги на виводах обмотки розімкнутого трикутника. У режимі ферорезонансу (див. рис. 3) напруга $3U_0$ відмінна від нуля та значно перевищує уставку спрацьовування «земляного захисту», яка найчастіше дорівнює 15 В. У цьому випадку спрацювання сигналізації буде помилковим.

Виникнення режиму ферорезонансу можливо не лише сумісно з режимом ОЗЗ. Збудження ФРП можливе також за різного роду комутацій, які призводять до появи напруги в контурі нульової послідовності. Залежно від початкових умов та співвідношення параметрів мережі ферорезонанс може бути згасливим та незгасливим. На практиці ФРП без замикань на землю досить часто виникає у разі вмикання холостих шин. Одночасно з комутацією спрацьовує сигналізація існування ОЗЗ у мережі. Подальше підключення приєднань (збільшення сумарної ємності мережі) призводить до розладу ферорезонансного контуру та зриву ферорезонансу.

Характерним для такого режиму є той факт, що струми в обмотці ВН трансформатора є безпечними. Це перш за все пов'язано з малим значенням ємності мережі. Проте поява напруги зсуву нейтралі є причиною перенапруг та помилкового спрацьовування сигналізації про ОЗЗ. Приклад ферорезонансу, який виник у результаті вмикання холостих шин ($C_\phi = 0,02$ мкФ) з одним комплектом ТН, наведено на рис. 4, на якому зображено часові залежності фазних напруг, струмів у обмотці ВН та напруги на виводах обмотки розімкнутого трикутника $3U_0$.

Числові розрахунки на створеній математичній моделі, які виконувались з урахуванням можливої несиметрії вебер-амперних характеристик ТН по фазах, можливої несиметрії фазних ємностей мережі, можливим відхиленням напруги джерела живлення, показали, що на один комплект ТН типу НТМІ діапазон ємностей, за якого незгасливий ферорезонанс є можливим, дорівнює 0,005...1,5 мкФ. За інших параметрів ємності ферорезонанс стає згасливим (згасає за 5...20 періодів) і не становить небезпеки для ТН.

Найбільш дешевим і розповсюдженим засобом придушення ферорезонансу є підключення до обмотки розімкнутого трикутника резистора номіналом 25 Ом [2—6]. Захисна дія резистора зумовлена тим, що він шунтує контур нульової послідовності малим опором та розсіює енергію вільних коливань у контурі нульової послідовності. Розрахунки показали, що на всьому діапазоні ємностей можливого незгасливого ферорезонансу, встановлення резистора сприяє придушенню стійкого ФРП. Це стосується як ферорезонансу, який виникає в разі зникнення ОЗЗ, так і ферорезонансу, який виникає під час вмикання холостих шин. На рис. 5 показано часові залежності фазних напруг ВН після встановлення резистора, які демонструють ефективність цього способу боротьби з ферорезонансом.

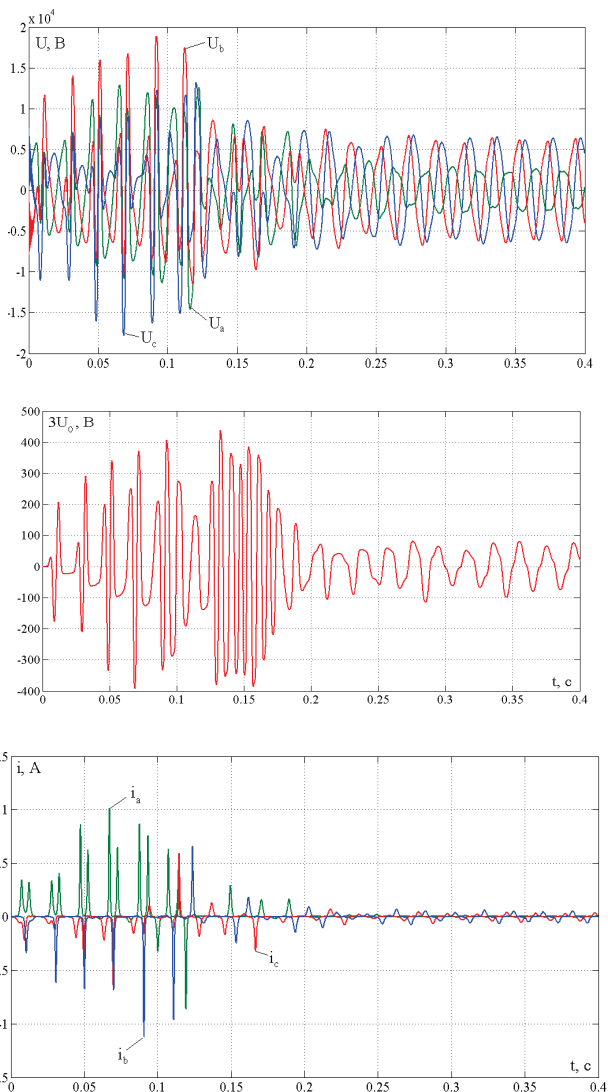


Рис. 4. Часові залежності фазних напруг, струмів у обмотці ВН трансформатора, напруги на виводах обмотки розімкнутого трикутника в умовах стійкого ферорезонансу, який виник у разі вмикання холостих шин. $C_\phi = 0,02$ мкФ

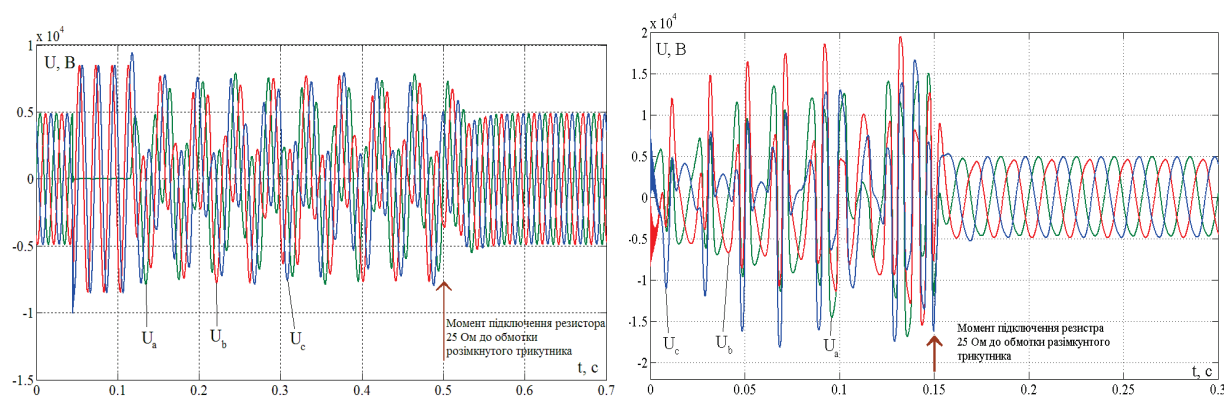


Рис. 5. Часові залежності фазних напруг у разі придушення ферорезонансу підключенням резистора 25 Ом до обмотки розімкнутого трикутника

У результаті численних розрахунків було виявлено, що на характер перебігу ФРП впливає не лише співвідношення параметрів ємності мережі та нелінійної індуктивності ТН, а й початкові умови. Цей факт слід враховувати під час визначення меж існування стійкого ферорезонансу. Так, наприклад, під час моделювання відключення стійкого металевого ОЗЗ та ємності $C_{\phi} = 0,8$ мкФ ферорезонанс був згасливим. Під час моделювання трикратного запалювання та загасання дуги (за теорією Петерсена) та подальшому відключенні замикання ферорезонанс став незгасливим. Відомо, що в разі замикань через перемижувальну дугу кратності перенапруг становлять $2,5 \dots 3 U_{\phi}$ [6]. Відповідно, процес розряду ємності нульової послідовності мережі через заземлені обмотки ВН трансформатора почне відбуватися за більшого ступеня насиченості сталевго осердя за більшої кількості вільних зарядів на ємності нульової послідовності мережі. З цього можна зробити висновок, що окрім параметрів мережі, чинниками, які визначають стійкість ферорезонансу, є початкові умови, а саме: ступінь насиченості магнітопроводу та кількість вільних зарядів на ємності нульової послідовності мережі.

Характерною рисою мереж підприємств металургійного комплексу є їх глибоке секціонування. Так, від шин ГПП можуть паралельно живитися до 4—6 РП. Такий підхід значно підвищує надійність електропостачання. Проте, у разі такої побудови системи електропостачання виникає необхідність встановлення пристроїв обліку електроенергії на всіх РП. Зазвичай, вибираючи тип ТН, не замислюючись, обирають та встановлюють на ГПП та всіх РП однакові трансформатори типів НТМІ, ЗНОЛ, ЗНОМ. Причому заземлені ТН встановлюють навіть там, де контроль ізоляції не потрібен. Це перш за все стосується шин РП споживача, де ТН необхідний лише для під'єднання пристроїв обліку електроенергії. Однак при цьому не враховуються серйозні недоліки заземлених ТН. По-перше, згідно з ДСТУ 1983-2001 на ТН заземлені трансформатори не гарантують свій клас точності у разі ОЗЗ, тобто поступаються в метрологічних характеристиках незаземленим ТН типів НОМ, НОЛ, НОС. По-друге, використання заземлених ТН призводить до появи ризику виникнення ферорезонансних явищ. Збільшення кількості ТН, що працюють паралельно, пропорційно призводить до зросту діапазону можливих ферорезонансних ємностей. Тобто, якщо на 1 комплект ТН припадає 1,5 мкФ, то на 4 комплекти — 6 мкФ, що для мережі 6 кВ еквівалентно ємнісному струму 20 А.

Висновки

1. Досліджуючи ФРП, особливу увагу слід приділити створенню адекватної математичної моделі мережі. Перш за все це стосується моделі ТН. Для отримання достовірних результатів треба досить чітко відтворювати вебер-амперну характеристику ТН. Також у розрахунках слід враховувати можливу несиметрію елементів мережі. У створеній моделі активні втрати потужності у сталі ТН моделювались нелінійним активним опором. Слід зазначити, що ці втрати впливають на перебіг ФРП, проте не є визначальними. Для отримання достовірнішої картини подій ці втрати слід моделювати нелінійним активним опором.

2. Досліджуючи ефективність засобів боротьби з ферорезонансом, з'ясувалось, що установка резистора номіналом 25 Ом в обмотку розімкнутого трикутника сприяє повному придушенню ферорезонансу на всьому діапазоні його можливого існування.

3. Слід раціонально використовувати заземлені ТН. Необхідно мати на увазі, що заземлені ТН мають гірші метрологічні показники порівняно з незаземленими та сприяють виникненню ферорезонансу. Збільшення кількості ТНКІ, що працюють паралельно, призводить до розширення зони ймовірного існування стійкого ФРП. Встановлювати заземлені ТН слід на шинах ГПП, де ведеться контроль ізоляції, а на шинах РП споживачів, де контроль ізоляції не потрібен, і ТН необхідні лише для підключення пристроїв обліку електроенергії, слід використовувати незаземлені ТН.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нагорный П. Д. Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6—35 кВ / П. Д. Нагорный, В. В. Назаров // Промышленная энергетика. — 2002. — № 3. — С. 22—23.
2. Ганус А. И. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6—35 кВ на характер повреждения трансформаторов напряжений / А. И. Ганус, Ф. П. Говоров, К. А. Старков. // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий : сб. тр. V международной научной конференции. — Мариуполь, 2005. — С. 190—194.
3. Дударев Л. Е. Оценка эффективности защиты трансформаторов напряжения от токовых перегрузок / Л. Е. Дударев, И. В. Волошек // Электрические станции. — 1986. — № 11. — С. 65—69.
4. Виштибеев А. В. Повышение надежности электрических сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ / А. В. Виштибеев, К. П. Кадомская, В. А. Хныков // Электрические станции. — 2002. — № 3. — С. 47—51.
5. Зихерман М. Х. Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6—10 кВ / М. Х. Зихерман, С. Г. Дунайцев, В. Г. Алексеев. — Электрические станции. — 1980. — № 1. — С. 56—59.
6. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. — М. : Энергия, 1971. — 152 с.
7. Дослідження ферорезонансних процесів в електромережах з заземленою нейтраллю на основі комп'ютерного моделювання / [А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, В. С. Коновалов, А. Я. Яцейко] // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія електроенергетичні та електромеханічні системи, 2009. — № 654. — С. 74—81.
8. Meng Hui YanBin Zhang ChongXin Liu. Elimination of Chaotic Ferroresonance in Power System With Nonlinear Core Loss / Meng Hui YanBin Zhang ChongXin Liu. — The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009. — P. 658—672.
9. Журахівський А. В. Вплив апроксимації вебер-амперної характеристики на результати розрахунку струму в нелінійній індуктивності / А. В. Журахівський, Р. В. Мединський, Ю. А. Кенс // Технічна електродинаміка. — 2000. — № 6 — С. 64—69.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 25.02.11
Рекомендована до друку 12.03.11

Сасенко Юрій Леонідович — професор, **Попов Артем Сергійович** — аспірант.

Кафедра електропостачання промислових підприємств, Приазовський державний технічний університет, Мариуполь