

УДК 621.311

Ю. І. Тугай, д. т. н., с. н. с.; О. Б. Бесараб

МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ

Розроблено математичну модель електромагнітного трансформатора напруги. Явище гістерезису відтворено на моделі Джилса-Атертона, у якій враховано вплив швидкості перемагнічування на величину коерцитивної сили.

Ключові слова: ферорезонанс, основна крива намагнічування, гістерезис, модель Джилса-Атертона.

Вступ

Труднощі проведення натурального вивчення ферорезонансних процесів (ФРП) та пов'язана із цим небезпека пошкодження обладнання підстанції сприяли становленню математичного моделювання як основного засобу вивчення ФРП. Найскладнішою частиною математичної моделі для дослідження ФРП є модель нелінійного електромагнітного трансформатора напруги (ТН). Проблемі дослідження ФРП присвячено велику кількість робіт як вітчизняних, так і закордонних авторів, однак є підстави вважати, що проблему ще остаточно не розв'язано. Зазвичай автори під час формування математичної моделі електромагнітного ТН здійснюють значні спрощення: магнітну систему враховують лише за основною кривою намагнічування, не враховують каскадність, використовують кусочно-лінійну апроксимацію тощо [1, 2]. Враховуючи велику чутливість характеру розвитку ферорезонансного процесу до початкових умов та точності опису параметрів елементів схеми заміщення, будь-які спрощення розрахункової схеми призводять до значних похибок під час моделювання.

Метою цієї роботи є розробка математичної моделі електромагнітного трансформатора напруги для дослідження ферорезонансних процесів у розподільчих пристроях з урахуванням явища гістерезису та каскадності.

Схема заміщення електромагнітного трансформатора напруги

Електромагнітні трансформатори типу НКФ, які використовують у розподільчих пристроях (РП) підстанцій електричних мереж напругою 110 – 500 кВ, мають каскадне виконання. Кожен каскад представляє собою окремий трансформатор із нерозгалуженим магнітопроводом (рис. 1), тому магнітний потік через усі котушки одного каскаду можна вважати однаковим.

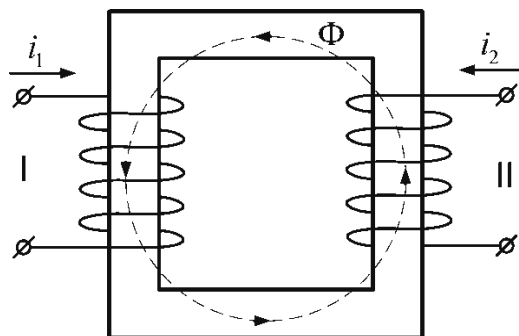


Рис. 1. Магнітна система каскаду ТН

Електрична схема заміщення каскаду ТН представлена на рис. 2. Активні опори та

індуктивності розсіювань представлені елементами R_1, R_2, L_1, L_2 . n_1, n_2 – кількості витків відповідно первинної та вторинної обмоток.

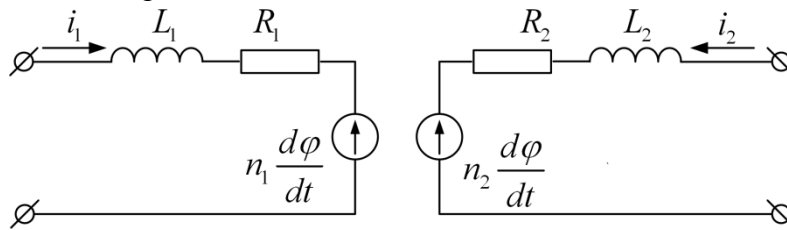


Рис. 2. Електрична схема заміщення каскаду трансформатора

Напруженість магнітного поля, зумовлену струмами в обмотках трансформатора, визначають за співвідношенням:

$$H = \frac{i_1 n_1 + i_2 n_2}{l_{cp}}, \quad (1)$$

де l_{cp} – середня довжина магнітної силової лінії.

Магнітний потік можна розраховувати за формулою:

$$\varphi = B(H) \cdot S, \quad (2)$$

де S – переріз магнітопроводу ТН.

Функції апроксимації кривих намагнічування

Для моделювання нелінійних індуктивних елементів найчастіше застосовують основну криву намагнічування, що представляє собою геометричне місце вершин гістерезисних циклів, отриманих під час циклічного перемагнічування осердя. Вона може бути представлена у вигляді залежностей потокозчеплення від струму намагнічування обмотки $\Psi = f(i)$ або магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$. Також можна використовувати обернені функціональні залежності. У роботі [3] наведено низку варіантів апроксимації кривих намагнічування. Розглянемо їх детальніше.

Кусочно-лінійна апроксимація передбачає заміну реальної кривої ламаною з кількома точками злому. Кількість лінійних ділянок залежить від необхідної точності відображення кривої намагнічування та діапазону її зміни. Основною перевагою використання кусочно-лінійної апроксимації є можливість переходу до розв'язку лінійної задачі. А основним недоліком цього наближення є стрибкоподібна зміна похідної під час переходу від однієї ділянки до іншої, що може призвести до неприпустимих похибок під час використання числових методів, тому під час дослідження ферорезонансних схем використання цієї функції апроксимації є обмеженим.

Логарифмічна та експоненціальна апроксимації обмежені задачами розрахунку магнітних кіл із постійними полями, тому під час дослідження ферорезонансних схем використання цих функцій апроксимації є нераціональним. Гіперболічна апроксимація основної кривої намагнічування має наближення до реальної кривої лише в областях сильних полів, тому під час дослідження ферорезонансних схем використання цієї апроксимації взагалі є неприпустимим.

Загалом широке застосування мають степеневі функції, оскільки вони дозволяють виконувати розрахунки магнітних кіл зі змінними магнітними полями. Точність апроксимації реальної кривої степеневим поліномом пропорційна кількості членів полінома. Однак збільшення кількості членів поліному призводить до ускладнення визначення коефіцієнтів полінома.

Функції гіперболічних синуса і тангенса під час розкладання в ряд перетворюються у

степеневі поліноми. Апроксимації гіперболічними синусом і тангенсом близькі до апроксимації степеневим поліномом і в багатьох випадках мають достатню збіжність із даними натурних експериментів.

Метод сплайнів є доволі ефективним за умови пред'явлення жорстких вимог до точності апроксимації кривої намагнічування. За рахунок застосування різних апроксимувальних функцій на окремих ділянках кривої намагнічування досягають неперервності не тільки самої сплайн-функції, але і її похідної. Обмеженням використання методу сплайнів є громіздкість розрахунків.

Високої точності апроксимації кривої намагнічування вдається досягнути використанням раціональних функцій. Однак для визначення коефіцієнтів апроксимації необхідно використовувати велику кількість експериментальних точок $(2n+1)$, що не завжди можливо через обмеженість вихідних даних.

Широкого розповсюдження набуло застосування функцій з арктангенсами під час апроксимації кривих намагнічування нелінійних індуктивних елементів, оскільки як сама функція, так і її похідна обчислюються порівняно просто за достатньої відповідності оригіналу, тому для подальших досліджень у якості моделі була застосована арктангенсна функція апроксимації з трьома коефіцієнтами та лінійним членом [2]:

$$B = \alpha \cdot \operatorname{arctg}(\beta H) + \gamma H, \quad (3)$$

де α , β , γ – коефіцієнти апроксимації.

Моделювання магнітного гістерезису

Під час моделювання ферорезонансних процесів за основною кривою намагнічування явище гістерезису зазвичай пропонують враховувати введенням до розрахункової моделі активної поперечної провідності. Однак таке врахування явища гістерезису накладає певні неточності, що в поєднанні із чутливістю ферорезонансних процесів може призвести до хибних результатів моделювання, тому під час моделювання ферорезонансних процесів слід використовувати моделі гістерезису. У більшості комп'ютерних стимуляторів явище гістерезису описують за моделями Дж. Чана [4] та Джилса-Атертона [5]. Модель Дж. Чана є простішою, однак вона не дозволяє достатньо точно відтворити основну криву намагнічування, що є дуже важливим під час моделювання ферорезонансних процесів. Основою моделі Джилса-Атертона є безгістерезисна крива, яка представляє собою залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. Модель Джилса-Атертона дозволяє максимально точно відобразити основну криву намагнічування, тому під час моделювання ферорезонансних процесів доцільно використовувати саме її.

Зв'язок між магнітною індукцією, напруженістю магнітного поля та намагніченістю описують співвідношенням:

$$B = \mu_0(M + H). \quad (4)$$

Виразивши із цієї рівності намагніченість і підставивши магнітну індукцію із (3), отримаємо залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля:

$$M_{an}(H) = \frac{1}{\mu_0} B_{an}(H) - H = \frac{\alpha}{\mu_0} \cdot \operatorname{arctg}(\beta H) + H \left(\frac{\gamma}{\mu_0} - 1 \right). \quad (5)$$

Похідна безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля має доволі простий математичний запис:

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{1}{\mu_0} \left(\gamma + \frac{\alpha \cdot \beta}{1 + (\beta \cdot H)^2} \right) - 1. \quad (6)$$

Опис гістерезисних процесів у феромагнетику ґрунтується на теорії руху доменних стінок
Наукові праці ВНТУ, 2014, № 4

у змінному магнітному полі. Ефект відставання внутрішнього поля під час перемагнічування подібний до ефекту сухого тертя між доменними стінками. Реальні процеси перемагнічування феромагнітних матеріалів супроводжуються пружним вигином доменних границь, тому гістерезисна модель має враховувати ефект в'язкого тертя, що досягається врахуванням добавки пропорційної до похідної безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. У результаті отримуємо рівняння:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{K} \cdot \delta + \frac{C}{1+C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH}, \quad (7)$$

де K – величина коерцитивної сили петлі гістерезису; δ – коефіцієнт, що враховує напрям перемагнічування.

Однією із основних характерних рис ферорезонансних процесів є значне спотворення форми кривих струму та напруги, тобто виникнення вищих гармонійних складників. Іншою особливістю ферорезонансних схем є можливість виникнення усталених коливань на частотах, відмінних від частоти мережі, насамперед на третій субгармоніці.

Модель Джилса-Атертона за змінних значень швидкості намагнічування, що має місце під час ферорезонансу, має розбіжності з експериментальними результатами. Основним параметром, що характеризує динамічні властивості (насамперед, втрати) феромагнітних матеріалів є залежність коерцитивної сили від швидкості перемагнічування. У роботі [6] автори пропонують апроксимувати згадану залежність лінійною функцією виду:

$$H_C = H_{C0} + K_{hef} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|, \quad (8)$$

де H_{C0} , K_{hef} – коефіцієнти лінійної регресії.

Підставивши значення розрахованої за (8) коерцитивної сили у рівняння (7), отримаємо повне рівняння перемагнічування феромагнітного осердя ТН:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{H_{C0} + K_{hef} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|} \cdot \delta + \frac{C}{1+C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH}. \quad (9)$$

Отримані рівняння (2), (3) та (7) представляють собою кінцеву модель для опису магнітної системи кожного окремого каскаду електромагнітного трансформатора напруги. Розроблена модель була реалізована в середовищі Matlab. Отримана для одного каскаду НКФ-330 гістерезисна крива представлена на рис. 3.

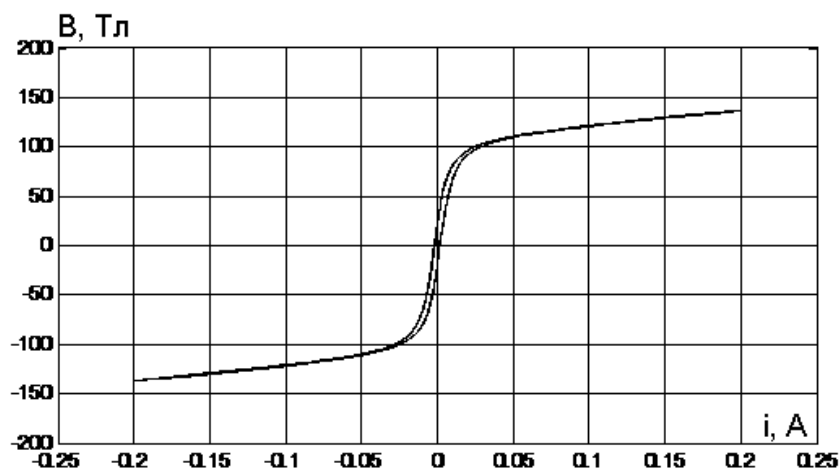


Рис. 3. Крива гістерезису одного каскаду НКФ-330

показали, що врахування явища гістерезису має значний вплив, насамперед, на границі областей існування ферорезонансних процесів, а також на виникнення та перебіг ферорезонансних процесів на субгармоніках.

Висновки

Розроблено модель трансформатора напруги, яка враховує каскадність і явище гістерезису. Ураховано вплив швидкості перемагнічування осердя трансформатора на величину втрат активної енергії, що вкрай важливо, оскільки ферорезонансні процеси супроводжуються значним спотворенням форми кривої струму та можуть виникати на частотах, відмінних від основної.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stosur M. ATP/EMTP Study of Ferroresonance Involving HV Inductive VT and Circuit Breaker Capacitance / M. Stosur, W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk // Power Quality and Utilization, Journal. – 2008. – Vol. XIV, No. 2. – P. 49 – 53.
2. Бесараб О. Б. Моделювання ферорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом / О. Б. Бесараб, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 30. – С. 87 – 90.
3. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью / Бессонов Л. А. – М. : Госэнергоиздат, 1946. – 171 с.
4. Chan J. H. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation / J. H. Chan, A. Vladimirescu, X. C. Gao, P. Liebmann, J. Valainis // IEEE transactions on computer-aided design. – 1991. – Vol. 10, № 4. – P. 476 – 482.
5. Jiles D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – P. 48 – 60.
6. Амелин С. А. Модификация модели Джилса-Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков / С. А. Амелин, А. А. Новиков, К. Н. Строев, Н. Н. Строев // Электричество. – 1995. – № 11. – С. 60 – 63.

Тугай Юрій Іванович – доктор технічних наук, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання.

Інститут електродинаміки НАН України.

Бесараб Олександр Борисович – асистент кафедри електричних мереж та систем.
Національний технічний університет України «КПІ».