

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КОМУТАЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА СПОСОБИ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ НАМАГНІЧУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

Досліджено перехідні процеси, що виникають при включенні ненавантаженого силового трансформатора в мережу. Проаналізовано фізичні причини виникнення струмів намагнічування, які можуть у 6-8 разів перевищувати номінальні струми, а за наявності залишкової індукції — досягати значень, порівнянних зі струмами короткого замикання. Розглянуто вплив цих струмів на електродинамічну стійкість обмоток, термічну дію та неправильну роботу релейного захисту. Запропоновано та порівняно сучасні методи м'якого включення для обмеження струмів намагнічування: синхронна комутація вимикачами, використання тиристорних ключів та попереднє намагнічування трансформатора через опір. Встановлено, що синхронна комутація є найбільш ефективним технічним рішенням для систем високої напруги.

Ключові слова:

перехідний процес, струм намагнічування, силовий трансформатор, комутація, ферорезонанс, релейний захист, синхронне включення, м'який старт.

Abstract:

The transient processes that occur when an unloaded power transformer is energized are investigated. The physical causes of inrush currents, which can exceed nominal currents by 6-8 times and, in the presence of residual induction, reach values comparable to short-circuit currents, are analyzed. The impact of these currents on the electrodynamic stability of windings, thermal effects, and improper operation of relay protection is considered. Modern soft-start methods for limiting inrush currents are proposed and compared: synchronous switching by circuit breakers, the use of thyristor keys, and pre-magnetization of the transformer through resistance. It is established that synchronous switching is the most effective technical solution for high-voltage systems.

Keywords:

transient process, inrush current, power transformer, switching, ferroresonance, relay protection, synchronous closing, soft start.

Вступ

Перехідні процеси в електроенергетичних системах виникають не лише за аварійних умов, але й при штатних комутаціях. Одним з найбільш характерних і потенційно небезпечних режимів є включення ненавантаженого силового трансформатора в мережу. Унаслідок нелінійності кривої намагнічування та явища насичення магнітопроводу виникає значний струм намагнічування. Його амплітуда залежить від моменту комутації, залишкової магнітної індукції в сердечнику та параметрів системи. На відміну від коротких замикань, які досліджувалися в попередніх роботах[5], цей процес

має інерційний характер і може тривати від кількох циклів до декількох секунд [1, 2]. Актуальність теми зумовлена широким впровадженням трансформаторів у розподільчих мережах, посиленням вимог до якості електроенергії та необхідністю уникнення помилкових відключень диференціального захисту. Метою роботи є аналіз перехідних процесів при включенні силових трансформаторів, оцінка їх впливу на елементи системи та порівняння сучасних методів обмеження струмів намагнічування.

Результати дослідження

Перехідний процес при вмиканні силового трансформатора супроводжується виникненням струмів намагнічування, величина та форма яких визначаються нелінійними властивостями магнітного кола. Процес описується диференціальним рівнянням для магнітного потоку, розв'язок якого містить примусову та вільну складові. Сумарний потік у перехідному режимі може значно перевищувати номінальне значення, особливо за наявності залишкової індукції.[2]

Встановлено, що найбільш несприятливим є момент увімкнення трансформатора при проходженні напруги через нуль ($\alpha = 0^\circ$), за якого спостерігається максимальна асиметрія магнітного потоку. У цьому випадку сумарний потік може досягати значень, близьких до $2\Phi_m + \Phi_{zal}$, що призводить до глибокого насичення осердя та різкого зростання струму намагнічування. Форма струму при цьому має імпульсний, різко несинусоїдальний характер із повільним загасанням, яке визначається сталою часу кола $\tau = L\sigma/R$.

Аналіз показав, що на величину пускового струму намагнічування суттєво впливають такі фактори: залишковий магнітний потік, кут увімкнення напруги та конструктивні особливості трансформатора. Найнебезпечніший режим реалізується у разі збігу напрямків залишкового та вільного потоків, при цьому Φ_{zal} може досягати 0,8–0,9 від номінального значення.[2] Мінімальні струми намагнічування спостерігаються при вмиканні трансформатора поблизу максимуму напруги ($\alpha \approx 90^\circ$).

Показано, що великі пускові струми намагнічування негативно впливають на роботу електроенергетичної системи, зокрема спричиняють додаткові електродинамічні навантаження на обмотки трансформатора, можуть викликати помилкову роботу диференціальних захистів через наявність парних гармонік, а також створюють умови для виникнення ферорезонансних перенапруг у мережах з ізолюваною нейтраллю.

Розглянуто основні методи обмеження струмів намагнічування. Найефективнішим є застосування синхронної (керованої) комутації вимикачів, яка забезпечує зниження пікових значень струму на 70–90%.[3] Альтернативними методами є попереднє намагнічування через обмежувальні резистори та використання тиристорних схем м'якого пуску, які, однак, потребують ускладнення схеми та додаткових витрат. Порівняльний аналіз показує, що для існуючих підстанцій оптимальним за критерієм «ефективність–вартість» є впровадження систем синхронної комутації, тоді як для нових об'єктів доцільно передбачати ці рішення на етапі проектування.

Висновки

Перехідні процеси при вмиканні силових трансформаторів, що супроводжуються виникненням значних струмів намагнічування, є штатним режимом роботи електроенергетичних систем, однак за певних умов можуть становити потенційну загрозу їх надійності.[1][4] На відміну від аварійних режимів короткого замикання, зазначені процеси мають імовірнісний характер і значною мірою залежать від початкового магнітного стану трансформатора.

Встановлено, що амплітуда та форма струму намагнічування визначаються, насамперед, величиною залишкової індукції в осерді трансформатора та моментом комутації напруги. За найбільш несприятливого поєднання цих факторів пускові струми можуть досягати значень, порівнянних зі струмами короткого замикання, що зумовлює глибоке насичення магнітного кола.

Показано, що значні струми намагнічування створюють додаткові електродинамічні навантаження на елементи трансформатора, підвищують імовірність помилкових спрацювань швидкодіючих

цифрових систем релейного захисту та можуть спричиняти виникнення ферорезонансних явищ, особливо в мережах з ізольованою нейтраллю.

Аналіз методів обмеження струмів намагнічування показав, що найбільш ефективним і технічно доцільним є застосування синхронної комутації з використанням керованих вимикачів, яка забезпечує зниження пікових значень струму до 90% без суттєвого ускладнення схеми електропостачання.[3]

Подальші дослідження доцільно спрямувати на математичне та комп'ютерне моделювання взаємодії струмів намагнічування трансформаторів групових підстанцій із системами релейного захисту мікромереж, що інтегрують відновлювані джерела енергії, з метою підвищення селективності та надійності їх роботи

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І.Несен, за ред. Г.Г. Півняка. – 5-те вид. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/15921/>
2. IEEE Std C57.142-2010. IEEE Guide for Description and Analysis of Transformer Inrush Current in Power Systems. URL (огляд та резюме): <https://standards.ieee.org/ieee/C57.142/4359/>
3. Brunke, J. H., & Fröhlich, K. J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part I & II // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – Vol. 16, No. 2. – P. 276–285.
URL (через IEEE Xplore): <https://ieeexplore.ieee.org/document/915014>
4. Тєптя В.В., Кулик В.В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах: Електронний конспект лекцій. Вінниця: ВНТУ, 2021. 183 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Teptya_2021_183.pdf
5. Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Іванков В.О. Електромагнітні перехідні процеси в системах електропостачання. Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2007. — 61 с.
URL:https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/12863/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%85_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D0%B8.pdf

Лєськов Владислав Володимирович - студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ІЕС-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vladleskov423@gmail.com

Тєптя Віра Володимирівна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Leskov Vladyslav Volodymyrovych - student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group ІES-22b, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vladleskov423@gmail.com

Teptia Vira Volodymyrivna - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com