

ЗАСТОСУВАННЯ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ СТРУМУ КЗ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Струмообмежувальні реактори є ефективним засобом зменшення рівня струмів короткого замикання в промислових і магістральних електричних мережах. Робота присвячена аналізу досвіду застосування реакторів для обмеження струмів КЗ, дослідженню їх впливу на перехідні процеси та механічну стійкість обладнання. Розглянуто конструктивні особливості, критерії вибору параметрів і типові схеми підключення реакторів у мережах середньої та високої напруги.

Ключові слова: струмообмежувальний реактор, струм короткого замикання, пускові струми, обмеження струму КЗ, високовольтне обладнання.

Abstract

Current-limiting reactors are an effective means of reducing the level of short-circuit currents in industrial and main electrical networks. The work is devoted to the analysis of the experience of using reactors to limit short-circuit currents, the study of their impact on transient processes and mechanical stability of equipment. The design features, criteria for selecting parameters and typical connection schemes of reactors in medium and high voltage networks are considered.

Keywords: current-limiting reactor, short-circuit current, starting currents, short-circuit current limitation, high-voltage equipment.

Вступ

Зростання потужності енергосистем і підключення нових джерел генерації призводить до неухильного збільшення рівнів струмів короткого замикання [1, 2]. Перевищення номінальних параметрів комутаційної апаратури створює загрозу пошкодження обладнання підстанцій і порушення стабільності електропостачання [1]. Заміна всього комплексу вимикачів, роз'єднувачів і трансформаторів на обладнання з вищими характеристиками короткозамкнутої стійкості є економічно недоцільною і технічно складною [2]. Альтернативним рішенням стає застосування струмообмежувальних реакторів, які дозволяють знизити амплітуди струмів КЗ до допустимих значень без радикальної реконструкції мережі.

Метою роботи є аналіз досвіду використання реакторів в промислових і магістральних електромережах, визначення критеріїв їх вибору та оцінка впливу на перехідні процеси. Завданнями дослідження є: систематизація конструктивних рішень і типових схем підключення реакторів; визначення методики розрахунку електромагнітних і теплових параметрів; аналіз впливу повторних пускових струмів на механічну міцність обладнання; оцінка впливу реакторів на перехідну відновлювальну напругу вимикачів [1, 2].

Результати дослідження

Повітряні реактори без феромагнітного осердя забезпечують лінійну вольт-амперну характеристику незалежно від величини струму, що принципово відрізняє їх від реакторів з осердям, які схильні до насичення при перевантаженнях. Конструктивно такі апарати виконуються у вигляді циліндричних котушок, намотаних на немагнітний каркас із кераміки, скловолокна або бетону. Екранування немагнітним матеріалом, зазвичай алюмінієм або міддю, запобігає проникненню розсіяного магнітного поля до металевих конструкцій і знижує вплив зовнішніх полів на індуктивність котушки [1].

Механічні навантаження на обмотки реактора визначаються квадратом амплітуди струму. Стандартна методика розрахунку механічної стійкості передбачає, що максимальний асиметричний пік струму КЗ становить 2,55 разів діюче значення симетричного струму КЗ [1]. Діюче значення струму короткого замикання на навантажувальній стороні реактора розраховується за формулою 1:

$$I_{SC} = \frac{U_S}{\sqrt{3} \cdot (X_R + X_S)} \quad (1)$$

де U_S – лінійна напруга системи, X_R – реактивний опір реактора, X_S – еквівалентний реактивний опір системи. Реактивний опір реактора визначається співвідношенням:

$$X_R = U_S^2 \left(\frac{1}{S_{SCL}} - \frac{1}{S_{SCS}} \right) \quad (2)$$

де S_{SCS} і S_{SCL} – потужності короткого замикання з боку джерела і навантаження відповідно.

Термічна стійкість реактора визначається тривалістю протікання струму КЗ, яка залежить від налаштувань релейного захисту та часу спрацювання вимикачів. Стандартні значення тривалості термічного струму становлять 1, 2 або 3 секунди. За відсутності конкретних вказівок застосовується тривалість 3 секунди [1].

Бразильський досвід застосування реакторів у мережах 345 кВ і 550 кВ демонструє високу ефективність обмеження струмів КЗ. На підстанції компанії Eletronorte у складі ГЕС Тукуруї встановлено трифазний комплект реакторів з реактивним опором 20 Ом на фазу для зниження струму з 55 кА до 36 кА [2]. Це дозволило уникнути заміни 40 комутаційних апаратів, вартість яких у десятки разів перевищувала вартість реакторів. Аналогічне рішення реалізовано компанією Furnas на підстанції 345 кВ, де встановлення двох комплектів секційних реакторів з реактивним опором 15 Ом дозволило знизити струм КЗ з 54 кА до 45 кА і уникнути заміни 37 вимикачів [2].

Вибір місця встановлення реактора суттєво впливає на техніко-економічні показники системи [1, 2]. Встановлення реактора в секційному вимикачі забезпечує обмеження струмів КЗ на обох секціях шин і зменшує сумарний струм від внутрішніх генераторів. Послідовне з'єднання реакторів з вхідними фідерами дозволяє індивідуально обмежувати внески в струм КЗ від кожного джерела живлення, але супроводжується додатковими втратами потужності та ускладненням регулювання напруги [1, 2]. Підключення реакторів до вихідних фідерів забезпечує найкращий захист окремих споживачів, але створює проблеми при пуску потужних двигунів через значні падіння напруги [1].

Промислові мережі з потужними асинхронними двигунами і синхронними генераторами характеризуються частими пусковими струмами, амплітуда яких може досягати 5-10 номінальних значень [1]. Хоча ці струми нижчі за розрахунковий пік струму КЗ, їх повторюваність призводить до механічної втоми конструкції реактора [1]. Дослідження аварії на промисловій підстанції 6 кВ показало, що реактор, який за 15 років експлуатації піддавався приблизно 120 пускам двигунів на рік і 5-8 коротким замиканням на рік, був пошкоджений при струмі 48,14 кА, що становить лише 92,6% від номінального пікового струму 52 кА [1]. Моделювання в Matlab/Simulink виявило, що найбільш критичною є конфігурація мережі з паралельною роботою двох синхронних генераторів по 25 МВт і зовнішньої системи 110/6 кВ, коли струм через реактор досягає максимальних значень. Для реакторів, розташованих у ланцюгах з частими комутаціями, стандарт IEEE C57.16 рекомендує враховувати кількість очікуваних перехідних струмів на рік і застосовувати вагові коефіцієнти при розрахунку механічної міцності [1].

Важливим аспектом застосування реакторів є їх вплив на перехідну відновлювальну напругу (ПВН) вимикачів. Реактор як зосереджена індуктивність створює додатковий коливальний контур з хвильовим опором у кілька тисяч Ом, що різко збільшує швидкість наростання ПВН. Для мітигації цього ефекту паралельно реактору встановлюється конденсатор, який формує низькочастотну складову ПВН [2]. Місткість підбирається так, щоб частота власних коливань контуру реактор-конденсатор знижувалася до безпечних значень:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_R \left(C_R + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right)}} \quad (3)$$

де L_R – індуктивність реактора, C_R – ємність конденсатора на реакторі, C_1 – ємності системи. Для деяких типів вимикачів може знадобитися також встановлення конденсаторів від кожної сторони реактора на землю для запобігання явищу зриву струму, яке призводить до небезпечних перенапруг.

Оптимізація параметрів реактора включає балансування між індуктивністю, струмонесучою здатністю, вартістю провідникових матеріалів і габаритами установки. Чисельні методи розрахунку електромагнітних і теплових полів дозволяють підвищити ефективність використання міді або алюмінію обмоток. Трифазні реактори виконуються у вигляді котушок, розташованих коаксіально одна над одною або паралельно в одній площині [1]. Коаксіальна конструкція компактніша, але вимагає реверсування напрямку намотки центральної котушки для зменшення електродинамічних

зусиль при трифазному КЗ [1]. Паралельне розташування забезпечує кращі умови охолодження, але потребує більшої площі та додаткових проміжних опор.

Висновки

Застосування струмообмежувальних реакторів є ефективним економічним рішенням для контролю рівня струмів короткого замикання в електромережах середньої і високої напруги [1,2]. Бразильська практика підтверджує, що вартість реакторів становить лише частку від витрат на заміну комутаційного обладнання на апарати з вищими характеристиками стійкості [2]. Вибір параметрів і місця встановлення реактора повинен ґрунтуватися на комплексному аналізі можливих конфігурацій мережі, режимів роботи обладнання та очікуваної кількості перехідних струмів. Для промислових мереж з частими пусками двигунів і генераторів необхідно враховувати вплив повторних пускових струмів на механічну міцність реактора, застосовуючи методику з ваговими коефіцієнтами. Обов'язковою умовою надійної роботи є перевірка вимикачів на відповідність підвищеним вимогам до перехідної відновлювальної напруги та встановлення компенсуючих конденсаторів при необхідності [1,2].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Amon J. F., Fernandez P. C., Rose E. H., D'Ajuz A., Castanheira A. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. CIGRÉ Technical Colloquium, Vienna, 2011. URL: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Fernandez/publication/237515148_Brazilian_Successful_Experience_in_the_Usage_of_Current_Limiting_Reactors_for_Short-Circuit_Limitation/links/0c9605318c0456d9e9000000/Brazilian-Successful-Experience-in-the-Usage-of-Current-Limiting-Reactors-for-Short-Circuit-Limitation.pdf?origin=scientificContributions
2. Varetsky Y., Gajdzica M. Study of Short Circuit and Inrush Current Impact on the Current-Limiting Reactor Operation in an Industrial Grid. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, p. 811. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/811>

Томчук Максим Віталійович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 1ЕС-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maks.tomchuk.20051@gmail.com

Науковий керівник: **Тептя Віра Володимирівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Tomchuk Maksym Vitaliyovych – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 1ES-226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maks.tomchuk.20051@gmail.com

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