

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

**Дослідження перехідних процесів при керованому включенні
енергетичних об'єктів**
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ЗЕБ-24 мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Лариса СЛОНЬОВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Ларисі СЛОНЬОВІЙ

1. Тема «Дослідження перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3665 від «06 » 10 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 20 25 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: характеристики та параметри високовольтних комутаційних апаратів; рівні напруги в мережі; параметри та типи силових трансформаторів та конденсаторних батарей; рівні струмів коротких замикань

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1.ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ РОЗДІЛ. 2.ТЕХНОЛОГІЇ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ. 3.ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КЕРОВАНІЙ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ. ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ. СПИСОК ПОСИЛАНЬ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 06 » 10 2025 р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Лариса СЛОНЬОВА

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	07.10.25 – 10.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	11.10.25 – 18.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	19.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації доповіді	27.11.25 – 10.12.25	

Студентка

(підпис)

Лариса СЛОНЬОВА

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Дослідження перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів» магістранткою Ларисою

СЛОНЬОВОЮ

Магістерська робота виконана на 69 сторінок, містить - таблиць, 35 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 20.

Трансформація енергетичного сектору України — інтеграція до європейських енергосистем, реалізація «зеленого курсу», розвиток відновлюваної генерації та децентралізованих ресурсів — створюють нові технічні виклики: збільшення частки генерації із нелінійною поведінкою, необхідність швидких включень та відключень, широке застосування електроніки та перетворювачів, нестандартні режими провідності.

У таких умовах перехідні процеси при керованому включенні можуть призводити до значної перенапруги, коливань струмів, реактивних чи гармонічних навантажень, порушення стійкості, що підвищує потребу в глибинному дослідженні їх параметрів, методики моделювання, заходів пом'якшення та управління.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – розробити системний науково-методичний підхід до аналізу, моделюванню та оцінки перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів в енергетичній системі України з урахуванням сучасних викликів з подальшим обґрунтуванням рекомендацій щодо керування такими процесами.

Ключові слова: перехідний процес, кероване включення, силовий трансформатор, конденсаторна батарея, високовольтний вимикач, стійкість системи

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Study of transient processes during controlled switching on of energy facilities" by master's student Larisa SLONIOVA

The master's work is executed on 69 pages, contains - tables, 35 drawings, which characterize the results of research, used literary sources 20.

The transformation of Ukraine's energy sector — integration into European energy systems, implementation of the "green course", development of renewable generation and decentralized resources — creates new technical challenges: an increase in the share of generation with nonlinear behavior, the need for fast switching on and off, widespread use of electronics and converters, non-standard conduction modes.

Under such conditions, transients during controlled switching can lead to significant overvoltage, current fluctuations, reactive or harmonic loads, and stability disturbances, which increases the need for in-depth study of their parameters, modeling techniques, mitigation measures, and control.

The purpose of the master's qualification work is to develop a systematic scientific and methodological approach to the analysis, modeling and assessment of transient processes during the controlled inclusion of energy facilities in the energy system of Ukraine, taking into account modern challenges with further substantiation of recommendations for the management of such processes.

Keywords: transient process, controlled switching, power transformer, capacitor bank, high-voltage switch, system stability

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

- 1.1. Поняття та задачі керованої комутації
- 1.2. Процеси при включенні елемента мережі та вибір оптимальної фази включення
- 1.3. Фактори, що впливають на точність комутації
- 1.4. Інформаційні потоки у пристроях керованої комутації

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

- 2.1. Особливості керованої комутації при нормальних та аварійних режимах в електричних мережах середньої напруги
- 2.2. Дослідження перехідних процесів при керованій комутації електричної мережі
- 2.3. Керована комутація та моніторинг вимикачів для електроенергетики

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КЕРОВАНІЙ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

- 3.1. Дослідження ПП при керованому включенні силового трансформатору
- 3.2. Перехідні процеси при керованому включенні конденсаторної батареї

3.3. Перехідний процес при керуванні комутації вакуумним
вимикачем силового трансформатора

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ЕЕ - електрична енергія

АВР - автоматичне введення резерву

АПВ - автоматичне повторне включення

КЗ - коротке замикання

ЗДР - звичайне диференційне рівняння

ПП - перехідний процес

КСН - кидки струму намагнічування

ВСТУП

Актуальність.

Сучасний стан енергетичної системи України створює надзвичайно складний і динамічний фон, в якому дослідження перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів набуває виняткового значення. Внаслідок широкомасштабної війни, численних атак на енергетичну інфраструктуру та руйнування ключових генеруючих і мережевих об'єктів, система передачі і розподілу електроенергії перебуває у зоні підвищеного ризику втрати стійкості, виникнення аварійних режимів та необхідності швидкого відновлення. У таких умовах кероване включення енергетичних об'єктів (блоків генерації, підстанцій, ліній передачі, відновлюваних джерел тощо) має вирішальне значення для забезпечення надійного відновлення, гнучкої реакції на збурення і нижчої вразливості системи.

Водночас трансформація енергетичного сектору України — інтеграція до європейських енергосистем, реалізація «зеленого курсу», розвиток відновлюваної генерації та децентралізованих ресурсів — створюють нові технічні виклики: збільшення частки генерації із нелінійною поведінкою, необхідність швидких включень та відключень, широке застосування електроніки та перетворювачів, нестандартні режими провідності. У таких умовах перехідні процеси при керованому включенні можуть призводити до значної перенапруги, коливань струмів, реактивних чи гармонічних навантажень, порушення стійкості, що підвищує потребу в глибинному дослідженні їх параметрів, методики моделювання, заходів пом'якшення та управління.

Крім того, модернізація енергетичної системи України супроводжується переглядом нормативної бази, імплементацією європейських стандартів, оновленням кодексів системи передачі та розподілу, що вимагає чіткого урахування трансієнтних режимів, керованих включень та відновлення після аварій. Термін «трансієнтний режим» (transient regime, або transient process) означає перехідний режим роботи електричної системи чи її елемента, тобто

такий стан, коли параметри системи — напруга, струм, частота, потужність, потік енергії тощо — змінюються у часі не стаціонарно, поки система переходить від одного усталеного режиму до іншого.

Наприклад, у проєкті змін до Кодексу системи передачі передбачено регламентацію включень/відключень, роботи систем автоматичного відновлення частоти, узгоджених перетоків потужності. У цьому контексті наукове розуміння перехідних процесів є ключовим для забезпечення сумісності технічних рішень з нормативними вимогами та реальними експлуатаційними викликами.

Отже, дослідження перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів відповідає трьом взаємопов'язаним умовам:

по-перше, воно направлене на підвищення надійності, стабільності та відновлюваності енергосистеми України в умовах екстремальних навантажень і руйнувань;

по-друге, воно враховує нормативно-технічні зміни та завдання інтеграції до європейських енергомереж;

по-третє, воно враховує швидке зростання складності компонентів енергосистеми — великої кількості керованих енергетичних об'єктів (генерація, ВДЕ, мережеві пристрої) — і, відповідно, підвищену важливість грамотного моделювання та управління перехідними процесами для уникнення кризових сценаріїв.

Враховуючи це, можна стверджувати, що тема дослідження є сучасною, критичною для національної енергетичної безпеки та розвитку, має практичну значущість для експлуатаційних операторів, для розвитку нормативної бази, а також наукову перспективу з точки зору моделювання, управління та оптимізації режимів включення. У такому світлі мета дослідження набуває як прикладного, так і теоретичного значення.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи: розробити системний науково-методичний підхід до аналізу, моделювання та оцінки перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів в енергетичній

системі України з урахуванням сучасних викликів з подальшим обґрунтуванням рекомендацій щодо керування такими процесами.

Об'єкт дослідження: процес функціонування електроенергетичної системи України в умовах керованого включення енергетичних об'єктів та виникнення перехідних (трансієнтних) режимів.

Предмет дослідження: перехідні процеси, що відбуваються в елементах енергосистеми під час керованого включення, а також методи їх аналізу, моделювання й оптимізації для забезпечення надійної, стабільної та безпечної роботи системи.

Задачі дослідження:

- ✓ Провести аналітичний огляд літературних джерел, нормативних документів і сучасних технічних рішень, що стосуються процесів керованого включення енергетичних об'єктів та особливостей їх протікання в умовах сучасної енергосистеми України.

- ✓ Визначити фізичну природу, основні параметри та типові характеристики перехідних (трансієнтних) процесів, які виникають при комутації трансформаторів, конденсаторних батарей та вимикачів.

- ✓ Проаналізувати вплив режимів включення, стану мережі та типу комутаційної апаратури на амплітуду, тривалість і форму перехідних процесів.

- ✓ Розробити узагальнені рекомендації щодо підвищення надійності, безпеки та ефективності включення енергетичних об'єктів із урахуванням сучасних умов експлуатації та розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

- ✓ Сформулювати практичні висновки для впровадження результатів дослідження в діяльність операторів системи передачі та розподілу, а також для оновлення нормативних вимог щодо керованих комутацій.

Теоретичне значення роботи полягає у поглибленні наукових уявлень про закономірності виникнення та протікання перехідних процесів при керованому включенні енергетичних об'єктів. Отримані результати розширюють теоретичну базу аналізу нестационарних електромагнітних явищ, уточнюють умови їх виникнення та затухання, а також сприяють

удосконаленню методів оцінки надійності й електромагнітної сумісності елементів енергосистеми при комутаційних переходах.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при розробленні заходів для зниження негативних наслідків перехідних процесів, удосконаленні схем і режимів керованого включення енергетичних об'єктів, а також у підвищенні надійності, безпеки та стійкості роботи електроенергетичних систем України.

Методи дослідження: аналіз літератури та інформаційних джерел; а також методи, що ґрунтуються на використанні аналітичних та розрахункових методів електротехніки, теорії електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів, елементів теорії перехідних режимів, а також методів порівняльного аналізу, узагальнення експлуатаційних даних та нормативно-технічних матеріалів.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1. Поняття та задачі керованої комутації

Увімкнення та вимкнення силового обладнання — таких як батареї конденсаторів, вимикачі чи силові трансформатори — супроводжується виникненням перехідних процесів у електричній мережі, що можуть негативно впливати на її нормальне функціонування або спричиняти пошкодження окремих елементів [1, 2]. Характер впливу комутації на роботу мережі залежить від типу електротехнічного обладнання та його режимних особливостей.

У разі увімкнення батареї конденсаторів у невдалий момент часу можуть виникати значні імпульси струму та перенапруги. Надмірні пускові струми спричиняють прискорений знос і ерозію контактів вимикача, тоді як перенапруги можуть пошкоджувати ізоляцію елементів електричної мережі. Крім того, під час некерованого вимкнення на конденсаторних батареях залишається залишковий електричний заряд, який призводить до швидкого підвищення напруги на контактах вимикача понад номінальні значення, що, у свою чергу, може викликати повторні пробої контактної проміжки.

У результаті повторного займання дуги у вимикачі відбувається інтенсивне зношування його контактів і виникають перенапруги в мережі. Під час увімкнення шунтуючих реакторів може з'являтися значна аперіодична складова струму, що спричиняє ударні струми з потужним електродинамічним впливом на елементи електрообладнання. Наявність аперіодичної складової також викликає насичення магнітопроводів силових і вимірювальних трансформаторів, що призводить до погіршення якості електроенергії та підвищує ризик помилкових спрацювань релейного захисту.

Повторні займання дуги у вимикачі спричиняють інтенсивне руйнування контактів і появу перенапруги у мережі. Увімкнення шунтуючих реакторів часто супроводжується виникненням значної аперіодичної

складової струму, що викликає ударні струми та створює значні електродинамічні навантаження на обладнання мережі. Наявність цієї складової також призводить до насичення магнітопроводів силових і вимірювальних трансформаторів, що негативно впливає на якість електроенергії та збільшує ймовірність помилкового спрацювання релейного захисту.

Під час увімкнення силового трансформатора, особливо в режимі холостого ходу, існує висока ймовірність появи значних кидків струму намагнічування. Такі струми створюють небажані динамічні навантаження на обмотки трансформатора, що призводить до скорочення терміну його експлуатації та зниження загальної надійності роботи обладнання.

Щоб уникнути шкідливого впливу перехідних процесів на електрообладнання, під час його комутації слід застосовувати спеціальні технічні заходи. Одним із сучасних та ефективних методів зменшення інтенсивності перехідних процесів є вибір оптимального моменту фази комутації. Такий підхід отримав назву керованої комутації [4].

У цьому розділі подано основні принципи керованої комутації, розглянуто методи визначення оптимального моменту ввімкнення та вимкнення вимикача, а також проаналізовано чинники, які впливають на точність реалізації комутації.

До основних принципів керованої комутації можна віднести:

1. Вибір оптимального моменту комутації — здійснення вмикання або вимикання вимикача у визначену фазу синусоїдальної напруги або струму, коли електромагнітні напруження в колі мінімальні.

2. Забезпечення мінімальних комутаційної перенапруги і струмових кидків — зменшення амплітуди перехідних процесів під час увімкнення конденсаторних батарей, реакторів, трансформаторів та інших елементів.

3. Синхронізація моменту комутації з напругою мережі — точне узгодження моменту замикання або розмикання контактів вимикача з нульовими або мінімальними значеннями відповідної електричної величини.

4.Попереднє прогнозування моменту комутації — використання електронних систем керування для аналізу фази напруги і струму та визначення оптимального моменту спрацювання.

5.Компенсація впливу часових затримок — врахування інерційних властивостей виконавчих механізмів вимикача та похибок у схемах керування для підвищення точності комутації.

6.Адаптивність до режиму мережі — корекція алгоритму керування залежно від поточного стану напруги, частоти або параметрів навантаження.

Основні задачі керованої комутації:

- Зменшення амплітуди комутаційної перенапруги і струмів під час вмикання або вимикання елементів енергосистеми.
- Підвищення довговічності комутаційних апаратів, зокрема зниження ерозії контактів вимикачів і зменшення кількості повторних пробоїв.
- Забезпечення електромагнітної сумісності між елементами мережі та чутливим електронним обладнанням.
- Зниження ймовірності спрацювання захистів від хибних сигналів, що виникають через коливання напруги й струму у перехідних процесах.
- Підвищення якості електроенергії шляхом мінімізації коливань, аперіодичних складових та гармонічних спотворень.
- Покращення загальної стійкості та надійності роботи енергосистеми за рахунок оптимізації моментів комутацій у режимах навантаження, резервування та відновлення.

1.2. Процеси при включенні елемента мережі та вибір оптимальної фази включення

Окрему увагу приділено структурі пристрою керованої комутації та наведенню прикладу її застосування під час ввімкнення, на прикладі шунтувального реактора.

Розглянемо процес включення реактора (рис.1.1) до мережі синусоїдальної напруги, приймаючи в момент включення $t = 0$.

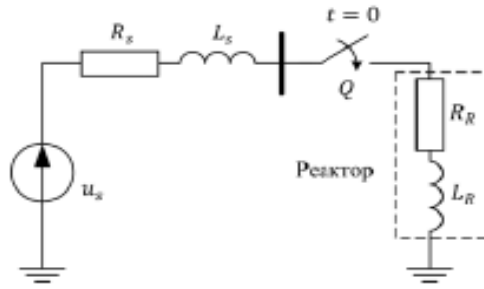


Рисунок 1.1 - Еквівалентна схема мережі при включенні реактора

Струм у реакторі після комутації містить вимушену:

$$i_{st}(t) = \frac{U}{Z_{\Sigma}} \sin(\omega t + \psi - \phi)$$

та аперіодичну (вільну) складову:

$$i_{fr}(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

$$\underline{Z}_{\Sigma} = (R_s + R_R) + j\omega(L_s + L_R) = Z_{\Sigma} e^{j\phi}$$

де: Z_{Σ} - сумарний опір всього ланцюга включення реактора.

Опір реактора набагато більше опору системи, тому струм визначається, переважно, опором реактора. Існуючі реактори мають невисокий рівень активних втрат (за даними [4]), тому можна вважати, що модуль сумарного опору та куту:

$$Z_{\Sigma} \approx X_R = \omega L_R$$

$$\phi = \arg\{\underline{Z}_{\Sigma}\} \approx \pi / 2.$$

До включення реактора струм у ньому дорівнював нулю, тому в початковий момент замикання електричного ланцюга виконується рівність:

$$i(0) = i_{fr}(0) + i_{st}(0) = 0.$$

$$i_{fr}(0) = -i_{st}(0).$$

Початкове значення вільної складової струму реактора:

$$I_0 = -\frac{U}{X_R} \cos \psi$$

Оптимальним буде включення вимикача у моменти, що відповідають фазам: $\Psi = \pi/2$ або $\Psi = 3\pi/2$ напруги. У цьому випадку створюються умови, що запобігають виникненню аперіодичної складової у струмі реактора (рис. 1.2). Зазвичай у якості уставки приймається кут:

$$\psi_{set} = \pi / 2.$$

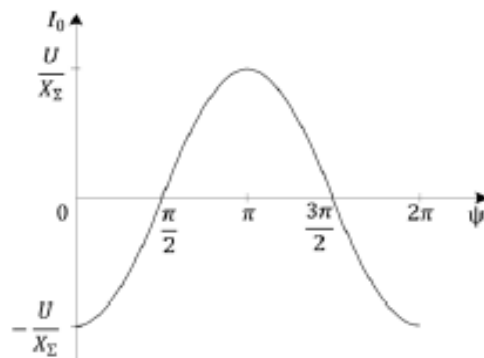


Рисунок 1.2 - Залежність початкового значення вільної складової струму реактора від фази живильної напруги в момент включення

Принцип дії пристрою керованої комутації.

Момент надходження команди на ввімкнення реактора є випадковим і приймається пристроєм керованої комутації як початок відліку часу, тобто ($t = 0$). У цей момент здійснюється вимірювання фази опорного сигналу напруги мережі (рис.1.3), що дозволяє оцінити поточний електричний стан кола. З урахуванням власного часу спрацьовування вимикача та затримок виконавчих механізмів пристрій прогнозує оптимальний момент замикання контактів, коли напруга на них наближається до нуля або до мінімального значення.

Для визначення цього моменту використовується спеціальний алгоритм, який базується на структурному аналізі сигналів напруги та струму. Алгоритм враховує як електричні параметри кола, так і механічні характеристики вимикача, формуючи команду на його спрацювання з урахуванням необхідного випередження. Завдяки такому підходу комутація виконується у

фазі, що мінімізує перехідні процеси — зменшує амплітуду пускових струмів, перенапруги і коливань.

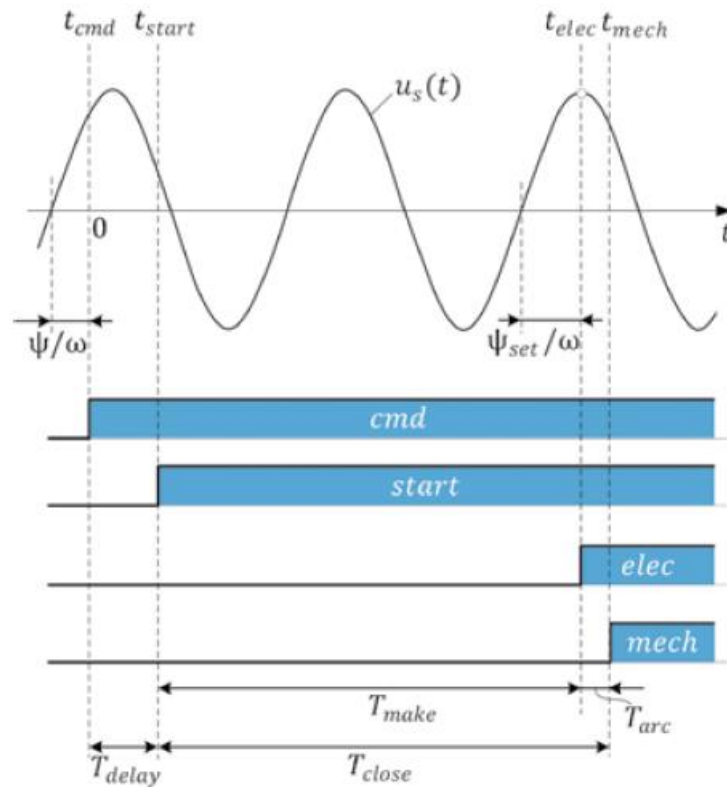


Рисунок 1.3 - Ілюстрація принципу керованого включення

де: t_{cmd} - момент отримання команди на включення; t_{start} – момент видачі команди увімкнення вимикача пристроєм керованої комутації; t_{elec} – момент замикання електричного кола; t_{mech} – момент механічного торкання контактів вимикача; T_{close} - власний час включення вимикача; T_{delay} - затримка команди включення; T_{arc} – час горіння дуги; cmd – зовнішня команда включення реактора; $start$ – команда включення, що формується пристроєм керованої комутації; $elec$ – замикання електричного кола; $mech$ - замикання контактів вимикача.

Відлік часу T_{make} замикання повинен завершитися на максимумі напруги U_m з метою виконання умови у момент електричного замикання ланцюга (у момент ; t_{elec}). Для цього пристрій визначає розрахунковий час T_{delay} затримки видачі команди на електромагніт увімкнення вимикача t_{start} з таким розрахунком, щоб:

$$\underline{t_{start}} + T_{make} = t_{elec}.$$

Інтервал часу T_{make} включає кілька періодів опорного сигналу, тобто:

$$\psi + \omega T_{make} = \pi m + \Delta\psi,$$

$$\Delta\psi = \psi + \omega T_{make} - \pi \left\lfloor \frac{\psi + \omega T_{make}}{\pi} \right\rfloor.$$

Водночас справедлива наступна рівність:

$$\psi + \omega (T_{make} + T_{delay}) = \psi_{set} + \pi n.$$

Таким чином, час затримки T_{delay} обчислюється як:

$$T_{delay} = \frac{\psi_{set} - \Delta\psi}{\omega} + \zeta \frac{T}{2},$$

де ψ_{set} - уставка (фаза включення), в даному випадку.

$$\zeta = \begin{cases} 1, & \Delta\psi > \psi_{set}, \\ 0, & \Delta\psi \leq \psi_{set}. \end{cases}$$

Пристрій діє на електромагніт вимикача в момент часу t_{start} , що віддаляється від моменту приходу команди t_{cmd} на час T_{delay} . Увімкнення реактора відбудеться в момент t_{elec} , коли напруга на реакторі досягне максимуму.

Таким чином, пристрій керованої комутації забезпечує узгоджене та точне вмикання електричних апаратів, підвищуючи надійність і безпеку роботи енергетичного обладнання, знижуючи електродинамічні навантаження й подовжуючи термін служби комутаційних елементів.

1.3. Фактори, що впливають на точність комутації

Час спрацьовування вимикача визначається низкою факторів [6], серед яких:

1. Температура навколишнього середовища;
2. Тиск робочої рідини або газу у приводі;

3. Напруга живлення електромагнітних ланцюгів керування;
4. Тривалість безопераційного простою вимикача;
5. Ступінь зношення його контактної системи в процесі експлуатації.

Для досягнення необхідної точності комутації необхідно враховувати вплив кожного з перелічених чинників. Тому при оцінюванні часу дії вимикача слід вносити відповідні коригувальні поправки, що забезпечують узгодженість розрахункового та фактичного часу спрацьовування.

$$\hat{T}_{oper} = T_{nom} + \Delta T_{cond} + \Delta T_{prev} + \Delta T_{idle},$$

де T_{nom} – номінальний час роботи вимикача; ΔT_{cond} - поправка, що враховує вплив умов роботи вимикача; ΔT_{prev} - поправка, що коригує час дії вимикача з урахуванням роботи у циклі попередньої комутації; ΔT_{idle} - поправка, що враховує вплив часу простою вимикача.

Розглянемо особливості обліку впливу факторів на точність керованої комутації.

До умов експлуатації вимикача належать температура навколишнього середовища, тиск робочої рідини або газу, а також напруга живлення електромагнітів увімкнення та відключення. Вплив цих параметрів враховується шляхом використання сигналів від відповідних датчиків температури та тиску, які можуть надходити в аналоговій формі (у вигляді струму в діапазоні 4–20 мА) або в цифровому форматі. Контроль напруги живлення ланцюгів електромагнітів здійснюється за допомогою аналогових входів пристрою вимірювання.

Для вимикачів, конструкція яких не передбачає обігрів приводу, здійснюється вимірювання температури навколишнього повітря. У випадку вимикачів, оснащених системою обігріву, контроль проводиться за температурою усередині корпусу приводу, що забезпечує точніше відображення реальних умов його роботи.

Зазвичай коригування за температурою навколишнього середовища, тиском у приводі (р) та напругою оперативного живлення (U_{DC}) визначаються

окремо, без урахування взаємного впливу цих параметрів. Значення таких поправок подаються у вигляді таблиць або задаються за допомогою коефіцієнтів апроксимуючого полінома [6,7]. Відтак загальна поправка, що враховує вплив умов навколишнього середовища, визначається як сумарна функція індивідуальних складових:

$$\Delta T_{cond} = f(t_{amb}) + f(p) + f(U_{DC}).$$

Автономний облік умов роботи вимикача забезпечує достатню точність лише в обмеженому діапазоні зміни впливових факторів. Якщо ж температура, тиск або напруга змінюються у широких межах, для підвищення точності визначення коригувальних значень доцільно застосовувати багатфакторні функції, які враховують взаємозалежність кількох параметрів одночасно.

Під час тривалого безопераційного простою вимикача, зокрема з гідравлічним приводом, у робочій рідині можуть утворюватися повітряні бульбашки. Це призводить до підвищення її стисливості та виникнення додаткової затримки у спрацюванні приводу. Подібна затримка стає відчутною вже після кількох годин простою вимикача без виконання комутаційних операцій.

Для врахування впливу тривалості простою, пристрій здійснює відлік часу від моменту виконання останньої комутаційної операції та, відповідно до заданої характеристики конкретного виду комутаційного електрообладнання, автоматично обчислює необхідну коригувальну поправку.

Таким чином, визначені фактори, що впливають на точність керованої комутації.

1.4. Інформаційні потоки у пристроях керованої комутації

Сучасні пристрої керованої комутації є універсальними для всіх типів комутаційного електрообладнання. Вони можуть застосовуватися як для ввімкнення чи вимкнення конденсаторних батарей, так і для шунтувальних реакторів, трансформаторів або ліній електропередачі. Налаштування

пристрою під конкретний об'єкт здійснюється шляхом вибору відповідного алгоритму роботи та встановлення необхідних уставок.

Момент комутації синхронізується із фазою опорного сигналу. Під час операції включення зазвичай використовують як опорний сигнал напругу з боку джерела живлення. При виконанні відключення фаза комутації визначається за формою струму. Однак як опорний сигнал у цьому випадку також може бути використано напругу (рис.1.4).

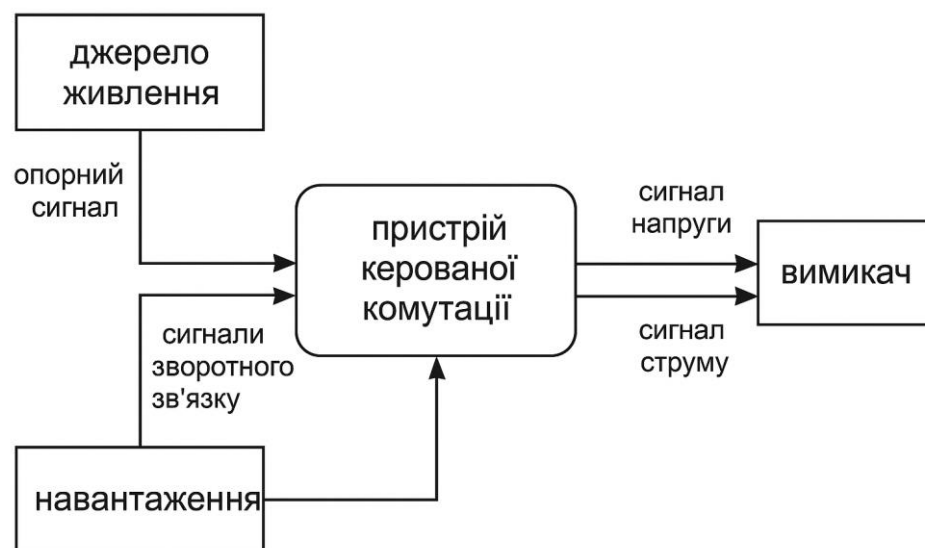


Рисунок 1.4 - Інформаційні потоки в пристроях керованої комутації

Окрім опорного сигналу, до пристрою також подаються сигнали зворотного зв'язку, серед яких — сигнали струму, напруги з боку комутуваного електричного об'єкта, а також дискретні сигнали від блок-контактів кожної фази вимикача. Отримані через канали зворотного зв'язку дані використовуються пристроєм керованої комутації для уточнення розрахункового часу спрацювання вимикача та оцінювання результативності виконаної комутації.

Вимірювані значення струму та напруги з боку навантаження застосовуються для контролю моменту комутації, фіксації можливих повторних пробоїв контактного проміжку та визначення тривалості горіння дуги. Під час комутації силових трансформаторів у режимі холостого ходу

доцільно використовувати як сигнал зворотного зв'язку напругу, оскільки струм холостого ходу має малу величину й не забезпечує достатньої інформативності.

Принципи керованої комутації ґрунтуються на універсальній концепції вибору оптимальної фази комутаційного процесу, що забезпечує мінімізацію перехідних процесів та електромагнітної перенапруги. Завдяки цьому підхід до реалізації керованої комутації має спільну інформаційну та функціональну основу незалежно від типу комутуваного електричного об'єкта.

Таким чином, як для трансформаторів, так і для ліній електропередачі, конденсаторних батарей чи шунтувальних реакторів, використовується єдина структура пристрою керованої комутації, яка включає модулі вимірювання, аналізу фазових параметрів, прогнозування моменту комутації та формування сигналів керування до вимикача.

В алгоритмах керованої комутації необхідно враховувати не лише власний час спрацювання вимикача (включення чи відключення), але й динамічні властивості електричної міцності його контактної проміжки під час комутаційного процесу. До таких характеристик належать показники RDDS (швидкість відновлення діелектричної міцності при включенні) та RRDS (швидкість відновлення діелектричної міцності при відключенні), які визначають точність прогнозування оптимального моменту комутації та забезпечують надійність роботи вимикача.

Для досягнення високої точності та стабільності функціонування пристроїв керованої комутації їхні алгоритми мають здійснювати прогнозування часу спрацювання вимикача з урахуванням комплексу впливових факторів. До таких факторів належать температура навколишнього середовища, тиск робочої рідини або газу в приводі, рівень напруги живлення електромагнітів керування, тривалість безопераційного простою вимикача, а також часові параметри його роботи під час попередньої комутації. Урахування цих параметрів дає змогу підвищити точність визначення

моменту комутації та забезпечити стабільність дії пристрою в різних експлуатаційних умовах.

Ефективність виконаної комутації в пристроях контролюється шляхом аналізу сигналів струму та напруги, що знімаються з боку коматованих електричних об'єктів. Такий підхід дозволяє оцінити правильність моменту спрацювання вимикача та підтвердити успішність проведеної комутації.

ВИСНОВКИ РОЗДІЛУ 1:

У даному розділі визначені основні принципи та задачі керованої комутації енергетичних елементів.

Пристрій керованої комутації забезпечує узгоджене та точне вмикання електричних апаратів, підвищуючи надійність і безпеку роботи енергетичного обладнання, знижуючи електродинамічні навантаження й подовжуючи термін служби комутаційних елементів.

Визначені фактори, що впливають на точність керованої комутації на прикладі вимикача, а саме: автономний облік умов роботи вимикача забезпечує достатню точність лише в обмеженому діапазоні зміни впливових факторів. Якщо ж температура, тиск або напруга змінюються у широких межах, для підвищення точності визначення коригувальних значень доцільно застосовувати багатофакторні функції, які враховують взаємозалежність кількох параметрів одночасно.

Принципи керованої комутації ґрунтуються на універсальній концепції вибору оптимальної фази комутаційного процесу, що забезпечує мінімізацію перехідних процесів та електромагнітної перенапруги. Завдяки цьому підхід до реалізації керованої комутації має спільну інформаційну та функціональну основу незалежно від типу комутуваного електричного об'єкта.

Для досягнення високої точності та стабільності функціонування пристроїв керованої комутації їхні алгоритми мають здійснювати прогнозування часу спрацювання вимикача з урахуванням комплексу впливових факторів.

До таких факторів належать температура навколишнього середовища, тиск робочої рідини або газу в приводі, рівень напруги живлення електромагнітів керування, тривалість безопераційного простою вимикача, а також часові параметри його роботи під час попередньої комутації.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Особливості керованої комутації при нормальних та аварійних режимах в електричних мережах середньої напруги

Зміна нормального режиму роботи електричної мережі внаслідок комутаційних операцій вимикачами або виникнення аварійних ситуацій, зокрема коротких замикань, супроводжується складними перехідними процесами. В їх основі лежить перерозподіл накопиченої енергії між індуктивними та ємнісними складовими елементів мережі.

У таких умовах під час відключення можуть виникати високочастотні перенапруги, при включенні — значні кидки струму, а в аварійному режимі — струми великої амплітуди. Такі явища негативно впливають на електричні параметри мережі, знижують надійність її роботи та сприяють прискореному старінню й зносу електрообладнання.

Нині в електричних мережах середніх класів напруги як основне захисно-комутаційне обладнання переважно застосовуються вакуумні вимикачі. Як в Україні, так і у світі простежується стійка тенденція до зростання їхнього використання [8]. Зокрема, у країнах Європи та США частка вакуумних вимикачів серед усього випуску комутаційної апаратури перевищує 70 %, а в Японії вона досягає 100 %. В Україні за останні роки цей показник також неухильно зростає і вже перевищує 50 % [9]. Популярність таких вимикачів зумовлена їх високою надійністю, простою конструкцією, тривалим ресурсом роботи та низькими експлуатаційними витратами.

Разом із численними перевагами в експлуатації, вакуумні вимикачі мають і певні недоліки. Зокрема, під час комутаційних операцій у них можуть виникати небезпечні перенапруги та імпульсні кидки струму. За результатами досліджень [10], масове впровадження вакуумних вимикачів у мережах напругою 6–10 кВ на промислових підприємствах спричинило зростання

кількості однофазних замикань на землю, викликаних саме комутаційною перенапругою.

У процесі роботи таких вимикачів можуть спостерігатися небажані фізичні явища — пробої під час включення, зріз струму до природного переходу через нуль, а також повторні пробої при відключенні. Вони виникають унаслідок недостатнього відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку після гасіння дуги. Сукупна дія цих факторів призводить до збільшення амплітуди перенапруги і підвищення ймовірності їх виникнення в електричній мережі.

Перспективним напрямом, який дозволяє повною мірою реалізувати переваги вакуумних вимикачів і водночас мінімізувати їхні недоліки, пов'язані з появою перенапруги та струмових кидків під час комутацій у нормальних режимах роботи, є впровадження керованої (синхронної) комутації. Такий підхід також забезпечує зниження електродинамічного впливу струмів аварійних режимів на сам вимикач, підвищуючи його надійність, довговічність і безпечність роботи в енергосистемі.

Концепція керованої (синхронної) комутації передбачає пофазне виконання комутаційних операцій за заздалегідь визначеним алгоритмом у моменти, коли синусоїда струму або напруги проходить через нуль. Такий принцип забезпечує усунення небезпечних струмових кидків і перенапруги, що виникають під час комутації, а також сприяє підвищенню комутаційного ресурсу та загальної довговічності електрообладнання.

Застосування керованої комутації у нормальних режимах роботи є ефективним як при включенні, так і при відключенні електричного кола. Зокрема, кероване включення вимикача на реактивне навантаження дозволяє суттєво зменшити кидки струму, тоді як кероване відключення знижує ймовірність повторних пробоев у вакуумному проміжку та, відповідно, ймовірність виникнення комутаційної перенапруги.

Кероване відключення струмів короткого замикання дозволяє мінімізувати тривалість горіння дуги, що суттєво знижує електричну ерозію

елементів дугогасного пристрою та збільшує експлуатаційний ресурс вимикача.

Основною метою керованої комутації під час нормальних робочих режимів є зменшення амплітуди перехідних струмів та кратності комутаційної перенапруги. Це досягається шляхом точного визначення моментів включення та відключення вимикача відповідно до фазових параметрів напруги й струму у колі.

Кероване вимкнення.

Кероване відключення реалізується шляхом розмикання контактів вимикача у певний момент часу — безпосередньо перед переходом струму через нуль. Такий підхід дозволяє істотно скоротити час горіння дуги, адже кількість енергії, що виділяється в дуговому проміжку, значно менша. Завдяки цьому знижується термічне та електричне навантаження на контакти, зменшується ймовірність відмов у роботі вимикача та підвищується його загальна надійність.

У синхронних комутаційних апаратах необхідно з високою точністю подавати сигнал на розмикання контактів безпосередньо перед моментом переходу струму через нуль. При цьому важливо забезпечити достатню швидкість руху контактів, щоб до моменту згасання дуги відстань між ними була такою, що гарантує необхідну електричну міцність проміжку та виключає можливість повторного пробоя.

Точність подачі комутаційного імпульсу визначається роботою синхронізуючого пристрою, тоді як швидке розведення контактів забезпечується спеціальним приводом, здатним створити необхідну кінематичну характеристику руху (рис.2.1).

Особливості комутації в нормальних режимах.

Найбільші значення комутаційної перенапруги і кидків струму спостерігаються під час перемикання реактивних елементів електричної мережі. Найхарактернішими прикладами ситуацій, коли виникають значні кидки струму, є вмикання конденсаторних батарей або трансформаторів, що

працюють у режимі холостого ходу. Високі рівні перенапруги, своєю чергою, можуть виникати при комутації ненавантажених ліній електропередачі, електродвигунів, трансформаторів чи конденсаторних установок.



Рисунок 2.1 — Принцип керованої комутації

Наприклад, під час вмикання конденсаторних батарей амплітуда кидків струму може у багато разів перевищувати номінальне значення робочого струму [10]. При відключенні таких батарей нерідко виникають перенапруги з кратністю до $5U_{\phi}$, особливо у випадках повторних пробоїв контактної проміжки. Такі явища не лише погіршують електромагнітну обстановку в мережі, а й прискорюють старіння ізоляції та знижують надійність роботи електрообладнання.

Комутація ненавантажених ліній електропередачі може супроводжуватися виникненням перенапруги як під час їх увімкнення, так і при відключенні. Амплітуда такої перенапруги може досягати $4,5U_{\phi}$. Використання керованої комутації є особливо доцільним у режимах автоматичного повторного вмикання (АПВ), коли на лінії зберігається залишковий заряд, що здатен спричинити ще вищі рівні перенапруги [11].

При комутації електродвигунів також можливе виникнення значної перенапруги — до $3,5U_{\phi}$ під час вмикання. Якщо ж увімкнення здійснюється в процесі автоматичного введення резерву (АВР) або АПВ за наявності

несинхронної залишкової напруги на затискачах двигуна, перенапруга може зрости до $4,5U_{\phi}$. Відключення електродвигунів супроводжується додатковими небезпечними явищами, такими як зріз струму до переходу через нуль і повторні пробої у дугогасних камерах. Найбільш критичним є відключення нерухомого двигуна, коли фіксуються перенапруги до $6U_{\phi}$.

Комутація навантажень, що мають значну реактивну складову, призводить до істотного збільшення перехідних напруги і струмів у колах, що негативно впливає на стан усіх елементів електричної мережі. Такі процеси спричиняють додаткові електродинамічні та термічні навантаження на обладнання, прискорюють старіння ізоляції та знижують загальну надійність системи електропостачання.

Застосування принципів керованої комутації дозволяє суттєво зменшити або повністю усунути ці небажані наслідки. Завдяки точному визначенню моментів включення та відключення вдається ліквідувати комутаційні перенапруги, подовжити строк служби трансформаторів, знизити електродинамічні навантаження на їхні обмотки та забезпечити роботу без кидків струму намагнічування. Це також дозволяє використовувати простіші й більш чутливі схеми релейного захисту.

У випадку електродвигунів керована комутація сприяє зменшенню рівня перенапруги подовженню ресурсу їх роботи та усуненню потреби в додатковому захисті від перенапруги. Для кабельних ліній, особливо виконаних зі зшитого поліетилену, вона забезпечує стабільність електричних параметрів і запобігає виникненню небезпечних комутаційних процесів. Крім того, такий підхід обмежує кидки струму та повторні запалення при комутації конденсаторних батарей, що позитивно впливає на довговічність і безпечність роботи всієї енергосистеми.

Загальні принципи керованої комутації в аварійних режимах (рис.2.2).

На відміну від комутації струмів у нормальних режимах, у разі аварійних ситуацій вимикач повинен діяти максимально швидко, оскільки тривале протікання струму короткого замикання може призвести до серйозних

пошкоджень електрообладнання. У таких умовах відсутня можливість чекати оптимального моменту комутації з точки зору мінімізації перенапруги, адже головним завданням є якомога швидше усунення аварійного струму. Водночас навіть у цих умовах можна зменшити негативний вплив надструмів на вимикач шляхом скорочення часу горіння дуги у дугогасній камері.

Під час відключення КЗ мінімальний час горіння дуги визначається як найменший проміжок, необхідний для того, щоб контакти вимикача розійшлися на відстань, достатню для надійного гасіння дуги при першому переході струму через нуль. Якщо ж вимикач не встигає виконати роз'єднання до цього моменту, процес відключення може не відбутися успішно з першої спроби. У такому разі час горіння дуги зростає, оскільки повторне гасіння відбувається лише при наступному переході струму через нуль. Це подовження дугового процесу супроводжується додатковими тепловими й електродинамічними навантаженнями на контакти вимикача, що може зменшити його ресурс і надійність роботи.

Без сумніву, під час некерованого відключення аварійного струму тривалість горіння дуги зазвичай перевищує мінімально допустиме значення і в окремих випадках може досягати свого максимуму. Надмірна тривалість дугового процесу спричиняє інтенсивну електричну ерозію елементів дугогасного пристрою, що призводить до зменшення ресурсу та надійності вимикача. Тому головною метою застосування керованої комутації в аварійних режимах є мінімізація часу горіння дуги за рахунок точного узгодження моменту розмикання контактів із фазою струму, що забезпечує ефективніше гасіння дуги та зменшення пошкоджень комутаційних вузлів.

Застосування принципів керованої комутації під час відключення аварійних струмів є значно складнішим завданням, ніж у випадку комутації струмів нормального режиму. Основна складність полягає в точному прогнозуванні моменту переходу струму через нуль, що ускладнюється наявністю аперіодичної складової у перехідному процесі. Проте ця проблема може бути розв'язана за допомогою різних підходів — як класичних

математичних методів, наприклад методу найменших квадратів, так і сучасних методів штучного інтелекту, здатних адаптивно аналізувати форму струму в реальному часі.

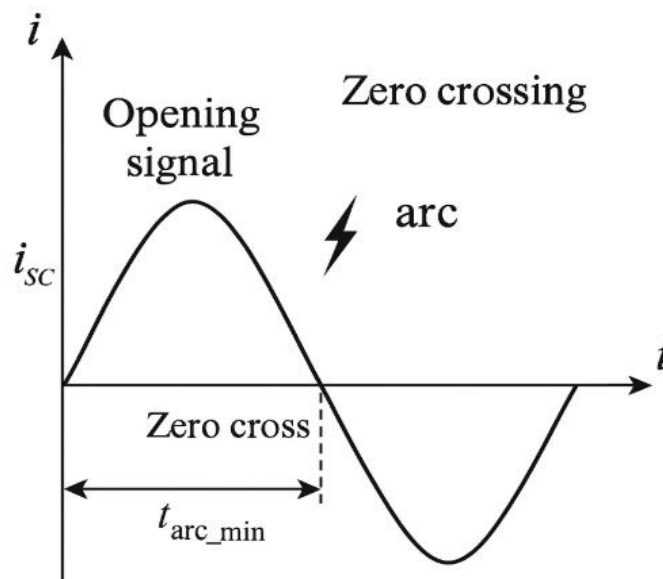


Рисунок 2.2 - Принцип керованого вимкнення в аварійному режимі

У випадках, коли визначити момент переходу через нуль неможливо або прогноз має надто велику похибку, відключення аварійного струму виконується за традиційним алгоритмом, без застосування керованої комутації.

Таким чином, застосування принципів керованої комутації в аварійному режимі забезпечує низку суттєвих переваг, безпосередньо пов'язаних із роботою самого захисно-комутаційного апарата. Завдяки точному вибору моменту розмикання контактів вдається зменшити тривалість горіння дуги, що істотно скорочує ерозійне зношування елементів дугогасного пристрою та продовжує ресурс вимикача. Крім того, оптимізоване керування процесом комутації покращує його електричні характеристики, підвищує надійність і розширює здатність на відключення вимикача під час дії струмів короткого замикання.

2.2. Дослідження перехідних процесів при керованій комутації електричної мережі

Зазвичай процес комутації супроводжується виникненням тимчасової або постійної нестационарності в електричному колі. Це проявляється у зміні таких параметрів, як струм і напруга в різних його ділянках. Подібні зміни можуть відбуватися за певними закономірностями, зокрема:

- аперіодичні процеси — характеризуються плавною зміною параметрів без коливань, як, наприклад, поступове зменшення напруги, показане на рис. 2.3;

- загасаючі періодичні коливання — характеризуються поступовим зменшенням амплітуди з часом до встановлення сталого режиму;

- незатухаючі періодичні коливання — відзначаються стабільною або навіть зростаючою амплітудою в часі, що може свідчити про наявність умов для самозбудження коливального процесу.

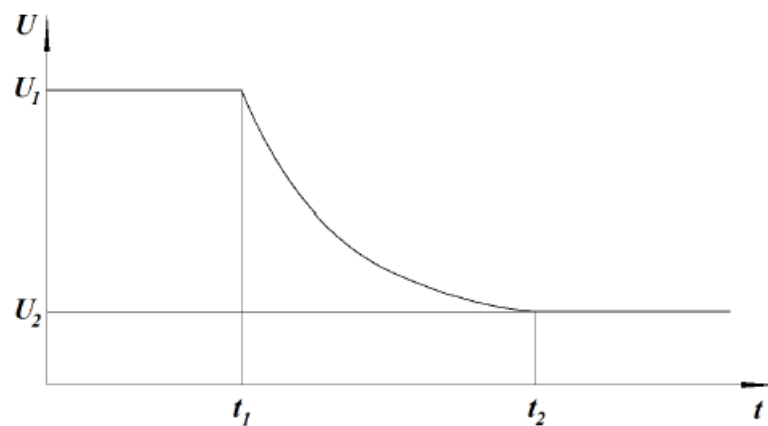


Рисунок 2.3 - Аперіодична зміна напруги в перехідному процесі

З точки зору стійкості параметрів системи, найсприятливішим є перебіг аперіодичного перехідного процесу під час комутації електричного кола. У цьому випадку бажано також забезпечити мінімальну тривалість перехідного процесу, що дозволяє швидше досягти сталого режиму. На рис. 2.3 тривалість перехідного процесу позначено як $\Delta t = t_2 - t_1$, що відповідає зміні напруги від початкового значення U_1 до кінцевого U_2 .

Розрахунок перехідних процесів, що виникають під час комутації електричних кіл, може виконуватися за допомогою спеціалізованих програмних засобів, таких як Micro-Cap, DesignLAB, ORCAD, PCAD, NI Multisim, Symica, AutoCAD Electrical [12] та інших.

Проте використання цих програм має низку обмежень. Основними серед них є недостатня наочність фізичної сутності процесів, оскільки користувач не завжди може безпосередньо простежити закономірності, що впливають із рівнянь, які розв'язуються програмою, а також висока вартість більшості комерційних продуктів, що обмежує їх широке застосування в освітній та дослідницькій практиці.

Для розроблення алгоритмів визначення параметрів електричного кола під час його розмикання чи замикання доцільно застосовувати методику, що ґрунтується на складанні та розв'язанні звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) [14]. Такий підхід дозволяє з достатньою точністю описати динаміку зміни струмів і напруги у перехідних режимах.

Як найбільш показовий і водночас відносно простий приклад для застосування даної методики розглянемо послідовне з'єднання опору (резистора R), індуктивності (котушки L) та ємності (конденсатора C), підключене до джерела постійної напруги V та кероване ключем, який забезпечує можливість замикання або розмикання кола (рис.2.4). Подібну систему прийнято називати RLC-контуром.

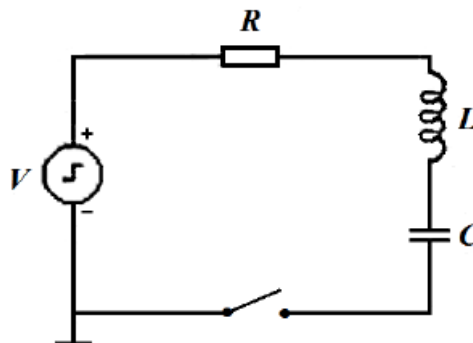


Рисунок 2.4 - Досліджуваний RLC-контур

Зміна сили струму або напруги на елементах RLC-контурі під час проходження перехідних процесів (ПП) описується звичайним диференціальним рівнянням другого порядку. Саме тому така електрична схема класифікується як ланцюг другого порядку.

Наприклад, у момент замикання ключа напругу на клеммах конденсатора можна визначити із розв'язку відповідного лінійного неоднорідного диференціального рівняння, складеного на основі другого закону Кірхгофа.

$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = U,$$

де U – напруга джерела струму V , що має нульовий опір.

Знаючи зміну напруги, за законом Ома можна знайти зміну сили струму:

$$I = U \cdot R.$$

Початкові умови для вирішення ЗДР задаються до замикання ланцюга (коли він розімкнутий):

$$U_c(0) = 0;$$
$$\frac{dU_c(0)}{dt} = 0.$$

На основі наведених залежностей було розроблено алгоритм та програмний код мовою Python, який дає змогу розв'язувати це звичайне диференціальне рівняння з урахуванням початкових умов.

Програма також забезпечує графічне відображення отриманих результатів, структура якої включає такі основні елементи:

1. *Імпорт потрібних бібліотек.* Для роботи програми використовуються такі модулі: NumPy — для створення та заповнення масивів даних, а також виконання необхідних математичних операцій; Matplotlib.Pyplot — для побудови та відображення графіків отриманих результатів на екрані або збереження їх у файл; Odeint з модуля — для чисельного розв'язання звичайних диференціальних рівнянь.

2. *Задання початкових параметрів.* На цьому етапі задаються числові значення основних змінних: опір резистора, R (Ом); індуктивність котушки, L (Гн); ємність конденсатора, C (Ф); напруга джерела, U (В); максимальний час спостереження перехідного процесу, $t_{\max}$ (с).

3. *Створення функції користувача,* що описує наведене вище ЗДР 2-го порядку.

4. *Створення часової сітки.* Для побудови графіка часу формується послідовність чисел від 0 до $t_{\max}$ з рівномірним кроком за допомогою функції `NumPy.linspace`. Кількість інтервалів визначає точність обчислення: чим їх більше, тим точніший результат. У даному прикладі використано 1000 інтервалів, що, як показали пробні розрахунки, забезпечує більш ніж достатню точність для відображення процесу.

5. *Задання початкових умов.* До початку перехідного процесу приймаються нульові значення шуканої функції та її похідної, тобто в початковий момент часу струм і зміна напруги дорівнюють нулю.

6. *Розв'язання рівняння.* За допомогою функції `Odeint` виконується чисельне розв'язання звичайного диференціального рівняння, сформульованого у пункті 3 алгоритму. При цьому враховуються заданий у пункті 4 часовий крок та початкові умови, наведені у пункті 5.

7. Знайдені значення функції $U_c(t)$ заносяться до масиву.

8. *Побудова графіка.* Використовуючи значення часу t (масив із пункту 4) та відповідні значення $U_s(t)$, створюється графік за допомогою команд модуля `Matplotlib.Pyplot`. На графіку задаються назви осей, додається легенда та координатна сітка. Після цього графік виводиться на екран і зберігається у файл.

Приклад розрахунку

Для демонстрації роботи створеного програмного коду виконаємо розрахунок перехідного процесу в електричному колі, зображеному на рис. 2.4. Розглянемо випадок замикання попередньо розімкнутого кола з такими

початковими параметрами: $R = 200 \text{ Ом}$, $L = 0.05 \text{ Гн}$, $C = 0.0001 \text{ Ф}$, $U = 100 \text{ В}$,
 $t_{\max} = 0.1 \text{ с}$.

Отримані результати розрахунку подано на рис. 2.5.

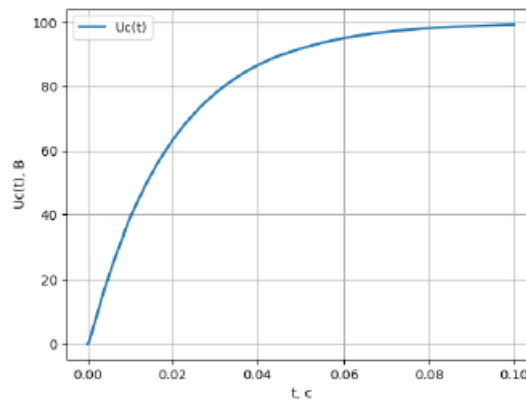


Рисунок 2.5 - Результат розрахунку перехідного процесу при замиканні електричного кола

З графіка видно, що для заданих параметрів елементів RLC-контурі перехідний процес має аперіодичний характер, а час його встановлення (досягнення напруги $U = 100 \text{ В}$) становить приблизно 0,1 с.

Для порівняння було проведено розрахунок цього ж контуру при зменшенні ємності конденсатора у 10 разів. У цьому випадку перехідний процес також залишився аперіодичним, проте його тривалість скоротилася приблизно у 10 разів. Це пояснюється тим, що конденсатор із меншою ємністю заряджається швидше, оскільки для накопичення меншої кількості енергії електричного поля потрібно менше часу.

Розглянемо вплив збільшення індуктивності L до 5 Гн на перебіг перехідного процесу для електричного кола, наведеного у першому прикладі (рис.2.6).

У цьому випадку спостерігається, що перехідний процес відбувається за періодичним коливальним законом.

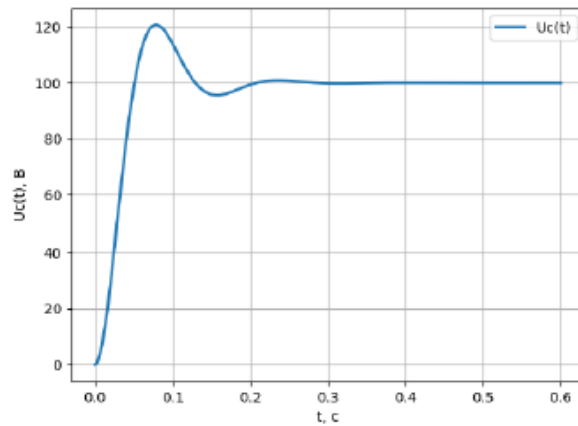


Рисунок 2.6 - Результат розрахунку перехідного процесу при замиканні електричного кола зі збільшеним до 5 Гн значенням індуктивності

У цьому випадку максимальний кидок напруги становить близько 120 В, що є небажаним явищем, оскільки може призвести до пошкодження елементів електричного кола, розрахованих, наприклад, на номінальну напругу 100 В.

При подальшому збільшенні індуктивності L до 50 Гн характер коливань змінюється — вони набувають вигляду, показаного на рис. 2.7.

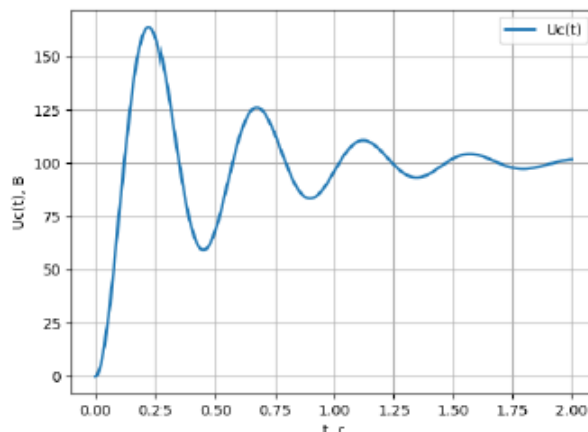


Рисунок 2.7 - Результат розрахунку перехідного процесу при замиканні електричного кола зі збільшеним до 50 Гн значенням індуктивності

Візуалізація коливального процесу, що виникає під час комутації при збільшенні індуктивності в RLC-контурі, дає змогу зробити такі висновки:

- стійкість системи зменшується, і спостерігається перехід від аперіодичного до загасаючого періодичного процесу;
- зі зростанням індуктивності тривалість коливального процесу збільшується, що пояснюється довшим часом накопичення та віддачі енергії магнітного поля;
- із графіків коливань (рис. 2.6 і 2.7) видно, що період коливань зростає зі збільшенням індуктивності;
- підвищення значення L також призводить до зростання амплітуди перенапруги у колі.

Наприклад, як показано на рис.2.7, у контурі спостерігаються коливання з періодом $T = 0,45$ с, що відповідає частоті $f = 1/T = 2,23$ Гц.

Для перевірки правильності результатів програмний код було доповнено формулою для обчислення частоти власних загасаючих коливань у герцах [14]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}.$$

Розрахунок показав, що отримане значення частоти повністю збігається з результатом, визначеним за графіком.

При цьому максимальне перенапруга становить близько 165 В, тобто у 1,65 рази перевищує номінальне значення. Такий рівень перенапруги є, як правило, неприпустимим з точки зору надійності роботи електричного ланцюга.

Отже, розроблено методику розрахунку перехідного процесу під час комутації електричного кола, детально розглянуто її алгоритм і програмну реалізацію.

Створений код наочно демонструє послідовність розв'язання задачі та відображає динаміку зміни параметрів у процесі переходу.

Практичні приклади підтверджують ефективність застосування розробленої методики для розрахунку RLC-контур.

Аналіз отриманих графіків дає змогу зробити наведені вище висновки щодо характеру перебігу перехідного процесу та чітко відобразити фізичну сутність явищ, що при цьому відбуваються.

Під час розрахунку електричного кола іншої конфігурації в програмному коді достатньо змінити функцію користування, яка описує диференціальне рівняння системи. Це рівняння визначається на основі другого закону Кірхгофа та закону Ома для конкретної схеми.

З огляду на наведені переваги, рекомендується використовувати розроблену методику для дослідження перехідних процесів в електричних колах у сучасному середовищі програмування Python.

Завдяки своїй наочності та зручності реалізації, вона сприяє кращому розумінню впливу різних факторів на перебіг перехідних процесів під час комутації.

2.3. Технологія керованої комутації та моніторингу вимикачів для електроенергетики

Сучасна технологія керованої комутації (Controlled Switching, CS) забезпечує оптимальний момент включення або відключення високовольтних вимикачів шляхом точного визначення фази напруги або струму. Це дозволяє мінімізувати комутаційні перенапруги, струмові удари та динамічні навантаження на ізоляцію і механічні елементи апарата.

Реалізація принципів CS є особливо важливою при комутації ємнісних і індуктивних навантажень (ліній електропередачі, трансформаторів, реакторів), де неконтрольоване замикання може спричинити пошкодження ізоляції або втрату стійкості системи.

Паралельно з керованою комутацією розвиваються системи моніторингу стану вимикачів, що базуються на аналізі механічних, електричних та часових характеристик роботи апарата. Використання вбудованих сенсорів, реєстраторів подій, мікропроцесорних блоків та алгоритмів машинного

навчання дозволяє прогнозувати технічний стан вимикача, виявляти тенденції деградації контактів, приводу чи ізоляції ще до виникнення відмови (рис.2.8).

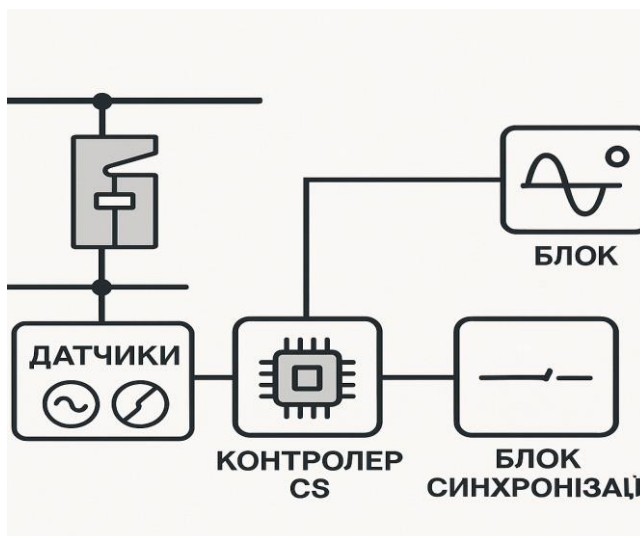


Рисунок 2.8 - Типова структура системи керуваної комутації

Перспективи розвитку технології CS та моніторингу полягають у переході до інтелектуальних комутаційних модулів, інтегрованих у систему цифрової підстанції (Digital Substation) та SCADA-платформи. Такі модулі зможуть у реальному часі узгоджувати комутаційні дії з режимом мережі, використовувати прогнозні алгоритми для вибору оптимального моменту комутації та забезпечувати автоматичне ведення історії станів вимикачів. Це сприятиме підвищенню надійності, ресурсу та безпеки експлуатації електрообладнання в умовах переходу до інтелектуальних електроенергетичних систем.

У світовій практиці технології [15] керуваної комутації та моніторингу вимикачів активно розвиваються в рамках концепції Smart Grid і цифрових підстанцій IEC 61850. Провідні виробники (ABB, Siemens, Hitachi Energy, Schneider Electric) впроваджують інтелектуальні контролери CS із високою точністю синхронізації ($< 0,5$ мс) та інтегрованими алгоритмами самоаналізу.

Завдяки розвитку інтернету речей (IoT) і цифрових двійників, моніторинг вимикачів переходить від періодичного до безперервного режиму, що дає змогу формувати прогнозні моделі старіння обладнання. У передових

системах застосовуються технології машинного навчання для автоматичної оцінки стану ізоляції, контактів і приводів, а також хмарні платформи моніторингу, які забезпечують централізоване управління великою кількістю вимикачів у реальному часі.

У найближчій перспективі очікується поєднання керованої комутації з автоматизованими системами керування режимами енергомережі, що дозволить досягти само налаштування комутаційних алгоритмів і ще більшої надійності електропостачання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У розділі розглянуті особливості керованої комутації при нормальних та аварійних режимах в електричних мережах.

Можна сказати, що застосування принципів керованої комутації в аварійному режимі забезпечує низку суттєвих переваг, безпосередньо пов'язаних із роботою самого захисно-комутаційного апарата. Завдяки точному вибору моменту розмикання контактів вдається зменшити тривалість горіння дуги, що істотно скорочує ерозійне зношування елементів дугогасного пристрою та подовжує ресурс вимикача. Крім того, оптимізоване керування процесом комутації покращує його електричні характеристики, підвищує надійність і розширює здатність на відключення вимикача під час дії струмів короткого замикання.

Розроблено методику розрахунку перехідного процесу під час комутації електричного кола, детально розглянуто її алгоритм і програмну реалізацію.

Створений код наочно демонструє послідовність розв'язання задачі та відображає динаміку зміни параметрів у процесі переходу.

Практичні приклади підтверджують ефективність застосування розробленої методики для розрахунку RLC-контур.

Аналіз отриманих графіків дає змогу зробити наведені вище висновки щодо характеру перебігу перехідного процесу та чітко відобразити фізичну сутність явищ, що при цьому відбуваються.

Оцінена перспектива застосування керованої комутації. Завдяки розвитку інтернету речей і цифрових двійників, моніторинг вимикачів переходить від періодичного до безперервного режиму, що дає змогу формувати прогнозні моделі старіння обладнання. У передових системах застосовуються технології машинного навчання для автоматичної оцінки стану ізоляції, контактів і приводів, а також хмарні платформи моніторингу, які забезпечують централізоване управління великою кількістю вимикачів у реальному часі.

РОЗДІЛ 3. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КЕРОВАНІЙ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Дослідження ІІ при керованому включенні силового трансформатора

Подача напруги на силовий трансформатор супроводжується виникненням характерного перехідного процесу, під час якого спостерігаються значні кидки струму намагнічування (КСН). Їх амплітуда може у кілька разів перевищувати номінальний струм трансформатора і у сотні разів — струм холостого ходу.

Такі імпульсні перевантаження створюють підвищені електродинамічні зусилля в струмопровідних частинах та обмотках, що сприяє прискореному зношенню ізоляції й загальному скороченню ресурсу силового трансформатора. Окрім цього, КСН здатні викликати короточасні перенапруги, які прискорюють старіння ізоляційних матеріалів, а також можуть призводити до помилкових спрацювань релейного захисту [11]. На рис.3.1 наведено типову тимчасову залежність струму намагнічування.

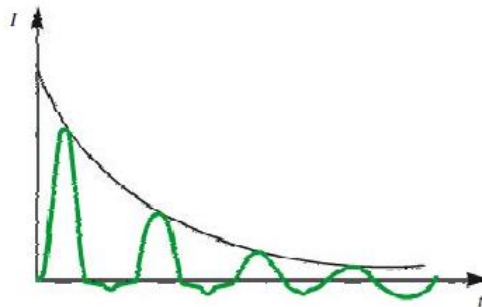


Рисунок 3.1 - Струм намагнічування трансформатора при включенні

Основною причиною появи кидків струмів намагнічування є невідповідність між залишковим магнітним потоком у магнітопроводі трансформатора та тим магнітним потоком, який формується після подачі напруги в момент увімкнення. Якщо між цими потоками існує різниця, то на вимушений синусоїдальний магнітний потік накладається значна аперіодична складова. У результаті сумарний магнітний потік може перевищувати номінальний приблизно вдвічі. Надмірне збільшення потоку спричиняє

насичення магнітопроводу, різке зменшення індуктивного опору трансформатора та, як наслідок, інтенсивне зростання струму первинної обмотки — так званий кидок струму намагнічування.

Аналіз перехідних процесів під час увімкнення трансформаторів у мережах 6–10 кВ залишається актуальним завданням, що зумовлено широким поширенням таких трансформаторів та високою значущістю відповідних навантажень. Підвищені кидки струму намагнічування створюють небажані механічні й електричні впливи, тому в практиці експлуатації застосовують низку методів, спрямованих на їх зменшення. Серед них можна відзначити такі підходи:

- застосування постійно під'єднаних резисторів або реакторів;
- використання резисторів чи реакторів, що вводяться в роботу лише на момент увімкнення;
- зниження робочої магнітної індукції трансформатора;
- використання спеціалізованих пристроїв та алгоритмів керованого ввімкнення.

Однак наведені методи у ряді випадків виявляються малоефективними або економічно недоцільними. Найбільш результативним підходом до мінімізації кидків струму намагнічування є застосування сучасних комутаційних пристроїв та алгоритмів керованого включення трансформаторів.

Концепція керованої комутації ґрунтується на послідовному змиканні полюсів вимикача відповідно до спеціально визначеного алгоритму. Такий підхід забезпечує мінімізацію небезпечних кидків струму, зменшує рівень високочастотної перенапруги та сприяє збільшенню комутаційного ресурсу обладнання.

Для ємнісного навантаження кероване вмикання передбачає замикання контактів вимикача у строго визначений момент — з випередженням відносно переходу напруги джерела через нуль. Це дозволяє забезпечити оптимальні умови комутації та знизити амплітуду перехідних процесів.

$$T_{\text{cont}} = T_{\text{zero}} - T_m - (T_{\text{closing}} - T_{\text{prestriking}}) = T_{\text{zero}} - T_m - T_{\text{making}}.$$

Концепція керованої комутації передбачає пофазне змикання або розмикання полюсів вимикача за заздалегідь визначеним алгоритмом у моменти переходу синусоїдальної напруги чи струму через нуль. Завдяки такому підходу вдається запобігати виникненню небезпечних кидків струму та перенапруги, а також істотно підвищувати комутаційний ресурс електричного обладнання.

Створена імітаційна модель призначена для відтворення процесу увімкнення силового трансформатора і забезпечує можливість реєстрації осцилограм струмів та напруги у мережі й навантаженні.

Моделювання виконувалося з використанням таких вихідних параметрів: номінальна напруга мережі становила 6 кВ, потужність силового трансформатора — 1000 кВА. Кабельна лінія, що з'єднувала вимикач із навантаженням, мала довжину 200 м та переріз жил 95 мм².

На основі розробленої імітаційної моделі було проведено серію експериментів з визначення оптимального алгоритму керованої комутації силового трансформатора. Додатково виконано аналіз перехідних процесів під час некерованої комутації, результати якого наведені на рис.3.2.

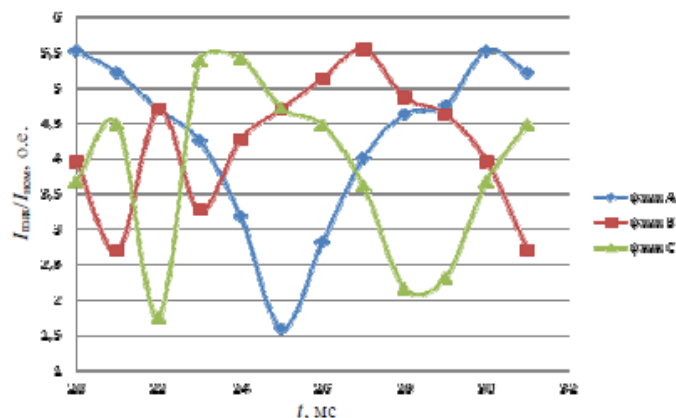


Рисунок 3.2 - Зміна величини струму при некерованій комутації

Показано максимальний рівень кидків струму під час увімкнення силового трансформатора без залишкового магнітного потоку, залежно від вибраного моменту комутації. Отримані результати підтверджують

ефективність застосування керованої комутації, оскільки максимальний струм сягає $5,54 \cdot I_{ном}$.

Подальший етап полягав у визначенні оптимального алгоритму керованої комутації. На початку, за допомогою редактора параметрів вимикача, задавали час увімкнення окремої фази. З урахуванням того, що система є трифазною з ізольованою нейтраллю, увімкнення лише однієї фази не створює замкнутого контуру для протікання струму. Це дозволило зробити висновок, що для коректної комутації необхідно одночасно вмикати щонайменше дві фази.

Подальшим варіюванням моментів увімкнення фаз СВ у діапазоні від 20 до 31 мс було отримано залежності, наведені на рис.3.3.

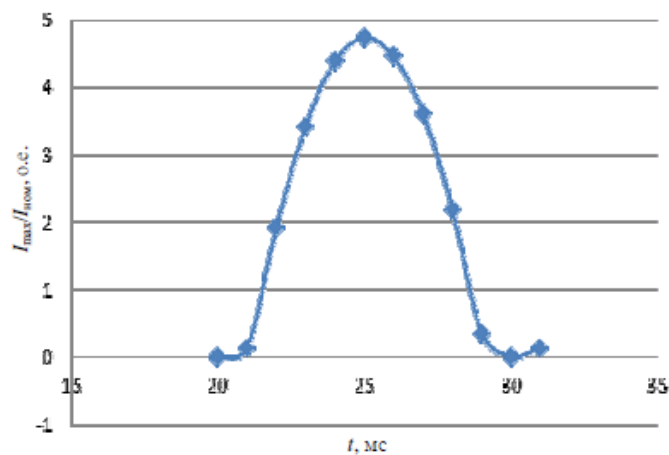


Рисунок 3.3 - Зміна величини струму від часу комутації для фази

Графік зміни наведено для фази В, оскільки характер процесу для фази С є аналогічним. На основі отриманих даних встановлено, що оптимальний момент увімкнення фаз С і В становить 20 мс, адже саме при цьому значенні спостерігається мінімальний струм: $I_{max} / I_{ном} = 0,012$.

Після фіксації часу увімкнення фаз С та В на рівні 20 мс було виконано підбір оптимального моменту увімкнення фази А. Результати цього етапу подано на рис.3.4.

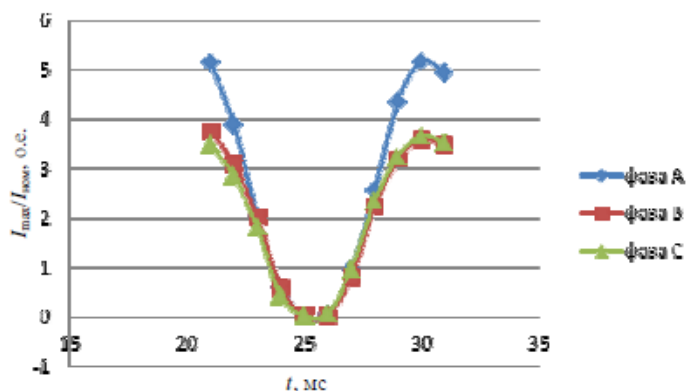


Рисунок 3.4 - Зміна величини струму від часу комутації СВ-А

Дослідження процесу увімкнення трансформатора з первинною обмоткою, з'єднаною за схемою «трикутник», підтвердило ефективність використання алгоритму комутації С–В–А як методу значного зниження кидків струму намагнічування. Експериментальні результати показали, що оптимальні моменти включення становлять: $T_B = T_C = 20$ мс та $T_A = 25$ мс, при цьому максимальний струм дорівнює $0,039 \cdot I_{ном}$.

Осцилограми увімкнення трансформатора за обраним оптимальним алгоритмом керованої комутації наведено на рис.3.5.

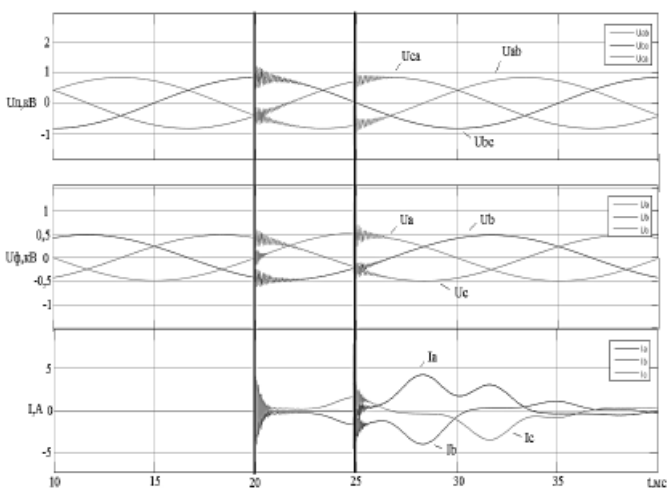


Рисунок 3.5 - Кероване включення трансформатора 1000 кВА; $U_{л}$, $U_{ф}$ – лінійна та фазна напруга в електричній мережі до вимикача; I – струм трансформатора

З осцилограм видно, що увімкнення фаз С та В здійснюється в момент досягнення максимальної лінійної напруги між ними ($T_C = T_B = 20$ мс). У свою чергу, увімкнення фази А припадає на момент максимального значення її фазної напруги ($T_A = 25$ мс).

Чинники, що впливають на величину кидка струму.

Розглянемо вплив основних параметрів на величину кидка струму намагнічування.

Напруга мережі. Оскільки номінальна напруга становить 6 кВ, у ході дослідження її значення змінювали в діапазоні від 5 до 7 кВ. Після реєстрації кидків струму для кожного варіанта напруги отримані результати були подані у вигляді графічної залежності (рис.3.6).

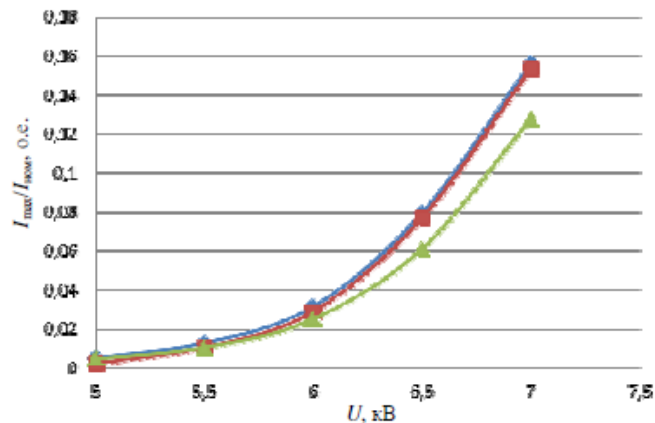


Рисунок 3.6 - Кидок струму при зміні напруги

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що зі зростанням напруги мережі пропорційно збільшується й величина кидка струму. Це явище пояснюється підвищенням магнітного потоку в осерді трансформатора, який прямо залежить від прикладеної напруги, а отже, спричиняє зростання струму намагнічування.

Довжина лінії. Довжину кабельної лінії змінювали в межах від 200 до 3000 м. Отримані залежності наведено на рис.3.7.

З графіка видно, що при значному збільшенні довжини лінії: до 3000 м — величина кидка струму намагнічування поступово зменшується. Це

зумовлено зростанням активного та реактивного опору лінії, який обмежує амплітуду пускових струмів.

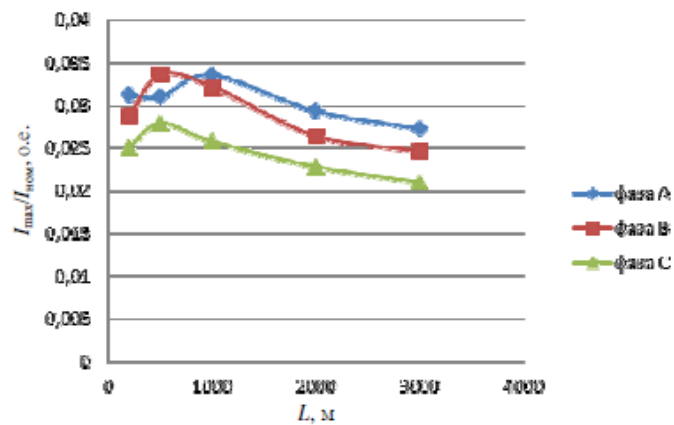


Рисунок 3.7 - Кидок струму при зміні довжини лінії

Перетин лінії. Параметри перерізу лінії міняємо при значеннях – від 25 до 240 мм². Отримані результати подано на рис.3.8.

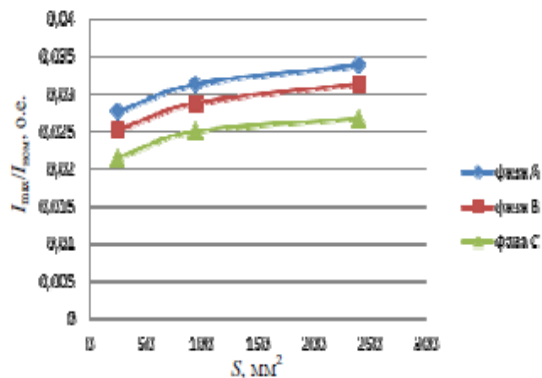


Рисунок 3.8 - Кидок струму при зміні перерізу

Можна дійти висновку, що зі збільшенням перерізу кабельної лінії величина струму кидка зростає. Це пояснюється тим, що більший переріз відповідає меншому опору провідника, а отже, зменшує обмежувальний вплив лінії та сприяє підвищенню амплітуди КСН.

Електрична міцність. Результати впливу швидкості зниження електричної міцності на величину кидка струму наведено на рис.3.9.

Зі збільшенням кількості передпробів величина кидка струму поступово зменшується. Це пов'язано з тим, що кожен передпробій частково

розсіює накопичену енергію та сприяє передаванню її назад у мережу, що фактично приводить до часткового розмагнічування магнітопроводу трансформатора.

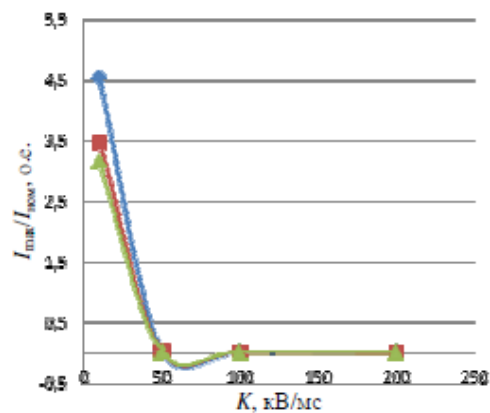


Рисунок 3.9 - Кидок струму при зміні швидкості
зниження електричної міцності

Зміна потужності трансформатора. Отримані результати подано на рис. 3.10.

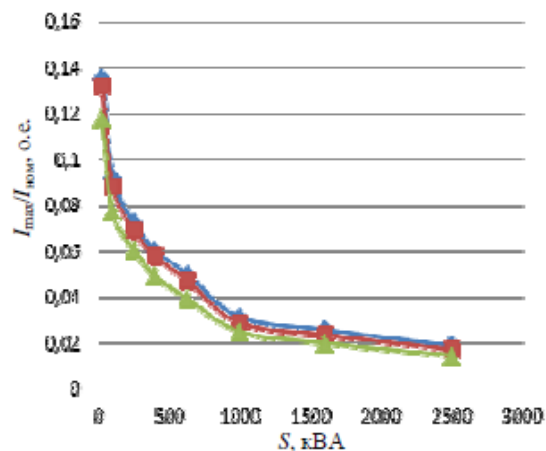


Рисунок 3.10 - Кидок струму при зміні потужності трансформатора

При збільшенні потужності трансформатора величина кидка струму намагнічування зменшується.

Разом із тим розглянуті фактори забезпечують відносно незначне зниження амплітуди кидків струму і не завжди можуть бути реалізовані з огляду на економічні обмеження. Найвагомішим параметром, що визначає

рівень кидка струму під час увімкнення силового трансформатора, залишається величина залишкового магнітного потоку в його осерді [15].

Це явище пояснюється невідповідністю між миттєвим значенням встановленого магнітного потоку в момент комутації та залишковим потоком у трансформаторі. За максимальної різниці між цими потоками результуючий магнітний потік може перевищувати номінальне значення у два і більше разів. У таких умовах відбувається насичення магнітопроводу, різке зниження його індуктивного опору та, відповідно, поява максимальних кидків струму намагнічування.

Ураховуючи значний вплив цього фактору, було проведено окремі дослідження режимів увімкнення трансформатора за наявності залишкового потоку, який задавався в редакторі параметрів моделі. Отримані результати наведені на рис.3.11.

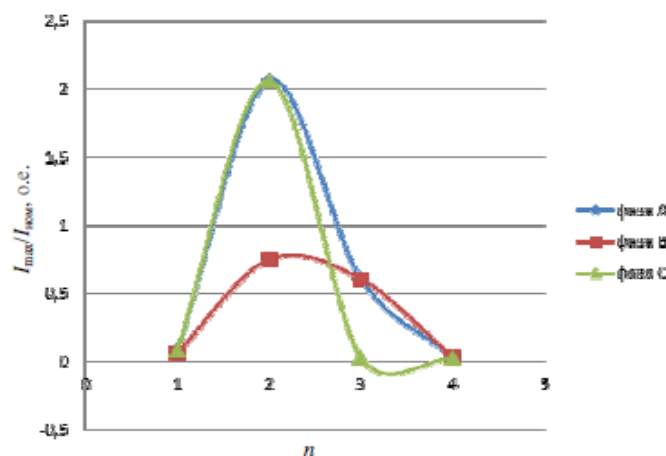


Рисунок 3.11 - Величина кидка струмів при зміні залишкового магнітного потоку у фазі А

Позначення 1–4 на графіку відповідають таким значенням заданого залишкового потоку: 1 – (–0,5; 0,5; 0), 2 – (0,5; 0,5; 0), 3 – (0; 0,5; 0), 4 – оптимальний варіант керованої комутації за відсутності залишкового потоку.

Аналіз зміни залишкового потоку лише у фазі А свідчить про те, що зі зростанням залишкового магнітного потоку трансформатора рівень кидків струму істотно підвищується.

Наявність залишкової намагніченості трансформатора, якщо її величина відома, висуває підвищені вимоги до точності роботи полюсів вимикача. У таких умовах комутація повинна здійснюватися у визначеній послідовності: першою вмикається та обмотка, для якої модуль залишкового потокозчеплення є найменшим. Це реалізується шляхом одночасного замикання двох полюсів вимикача в момент, коли залишкове потокозчеплення та встановлене потокозчеплення першої обмотки збігаються.

Далі третій полюс вимикача замикається в момент, коли різниця між потокозчепленнями решти обмоток трансформатора є мінімальною. Під час дослідження режимів із залишковою намагніченістю, аналіз осцилограм магнітних потоків дозволив також визначити відповідний алгоритм керованої комутації.

Застосування традиційних методів зменшення кидків струму у більшості випадків є малоефективним або економічно недоцільним. У розділі роботи представлено принцип керованого увімкнення та проаналізовано основні переваги й особливості технології керованої комутації.

Розроблено й детально описано процедуру визначення оптимального алгоритму увімкнення силового трансформатора. На основі отриманих залежностей можна зробити висновок про високу результативність використання керованої комутації.

Проаналізовано вплив різних чинників на амплітуду кидків струму. Найсуттєвішим із них є залишковий магнітний потік у сердечнику трансформатора, який зумовлює необхідність коригування алгоритму керованої комутації.

3.2. Перехідні процеси при керованому включенні конденсаторної батареї

Для зменшення амплітуди перехідних процесів під час комутації застосовують низку традиційних технічних заходів. До них належать: увімкнення додаткових резисторів, використання демпфувальних реакторів

або резисторів, а також введення паузи перед повторним включенням конденсатора з метою зниження залишкового заряду. Додатково може бути підсилена ізоляція системи та обладнання, щоб забезпечити їхню стійкість до підвищених електричних навантажень [16].

Попередньо ввімкнений резистор — це пристрій, призначений для придушення аперіодичної складової струму в лінійних вимикачах.

Попередньо ввімкнений резистор інтегрують у конструкцію високовольтного вимикача. Він підключається послідовно через допоміжні контакти та вводиться в роботу на момент комутації — зазвичай на тривалість одного напівперіоду промислової частоти. Під час включення повітряної лінії електропередачі, оснащеної шунтуючим реактором, у реакторі та в лінійному вимикачі виникає аперіодична складова струму, проте її амплітуда є відносно малою, а затухання — швидким, що забезпечує більш плавний характер перехідного процесу.

Водночас цей технічний засіб має суттєвий недолік: при включенні лінії, на кінці якої має місце коротке замикання, у попередньо ввімкненому резисторі виділяється значна енергія. Резистор повинен поглинути її без пошкодження до моменту, коли головні контакти вимикача повністю шунтують його. Саме вимога до високої енергоємності та термічної стійкості обмежує застосування таких резисторів у реальних комутаційних режимах.

Струми перехідних процесів, що виникають під час комутації, а також пускові струми, спричинені несправностями шунтуючих конденсаторних установок, можуть бути ефективно обмежені за допомогою демпфувального реактора, увімкненого послідовно з конденсаторною батареєю.

За своїми властивостями такі реактори подібні до послідовних реакторів із малим реактивним опором, проте до них висуваються підвищені вимоги щодо рівня ізоляції та допустимої напруги. Крім того, демпфувальні реактори дозволяють контролювати резонансну частоту системи, що змінюється внаслідок підключення конденсаторної батареї.

Після вимкнення конденсаторної батареї, згідно з вимогами ПУЕ, перед її повторним увімкненням необхідно витримати паузу, необхідну для повного розрядження. Проте в ситуаціях, коли потрібне оперативне відновлення компенсації реактивної потужності, така затримка може бути неприйнятною та обмежувати гнучкість роботи електроустановки.

Традиційні технічні заходи, що застосовуються для зменшення струмових кидків, нерідко виявляються недостатньо ефективними, ненадійними або економічно невиправданими. Ба більше, вони не забезпечують принципового вирішення проблеми перехідних процесів і лише частково знижують їхню амплітуду.

У світовій практиці активно ведуться дослідження та створюються спеціалізовані пристрої керованої комутації, здатні істотно обмежувати кидки струму та мінімізувати динамічні електромагнітні навантаження на обладнання. Проте переважна більшість таких розробок орієнтована на високовольні класи — від 110 кВ і вище [16].

Це зумовлює нагальну потребу у проведенні цілеспрямованих досліджень і впровадженні технологій керованої комутації в мережах середньої напруги 6–10 кВ, де проблема перехідних процесів також є актуальною, але поки що недостатньо дослідженою та технічно не забезпеченою.

Нижче наведено осцилограми струмів для випадків керованого та некерованого вмикання конденсаторної батареї (рис.3.12, 3.13). У процесі моделювання було визначено, що найефективнішою є послідовність увімкнення фаз СВ–А. Для мережі з ізольованою нейтраллю такий алгоритм передбачає замикання перших двох фаз у моменти переходу лінійної напруги через нуль, а третьої фази — у момент, коли фазна напруга досягає мінімального значення.

Під час керованого включення кратність кидків струмів зменшилось у 9,8 разів.

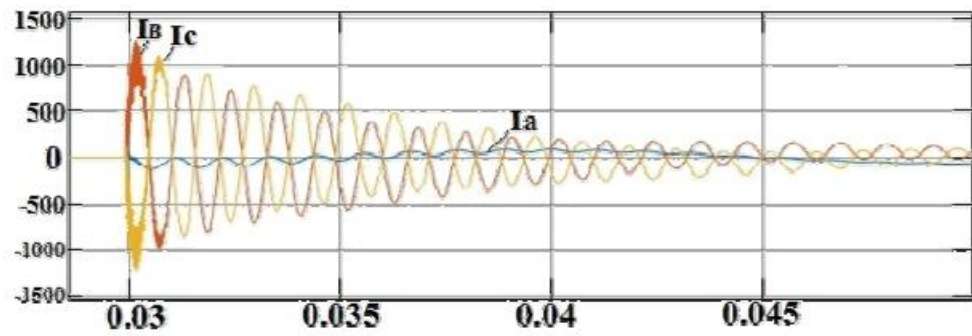


Рисунок 3.12 – Некероване включення конденсаторної батареї

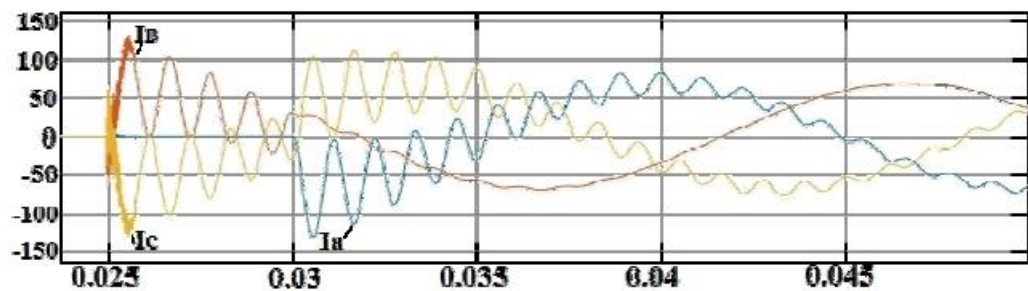


Рисунок 3.13 – Кероване включення конденсаторної батареї

Чинники, що визначають величину кидків струму.

Основним параметром, який впливає на амплітуду струмових кидків під час комутації, є залишковий заряд, що зберігається на виводах вимикача [15]. На рис.3.14 показано зміну амплітуди кидків струму при вмиканні, залежно від величини цього заряду. У деяких випадках пікове значення може досягати $20 \cdot I_{ном}$.

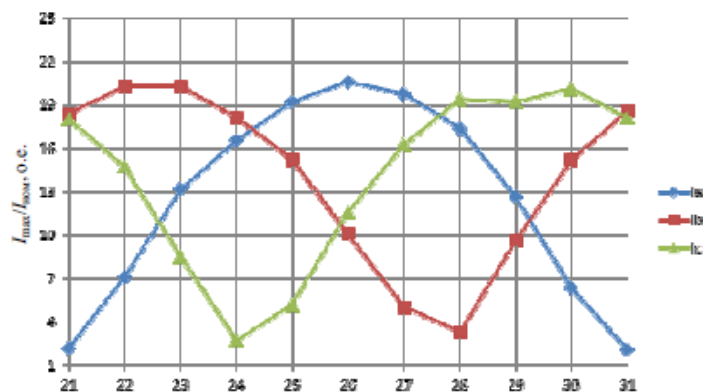


Рисунок 3.14 - Максимальні рівні кидків струму під час увімкнення конденсаторної батареї 500 квар без обліку залишкового заряду

На рис.3.15 наведено максимальні величини струмових кидків під час увімкнення конденсаторної батареї з урахуванням залишкового заряду. Пікові значення можуть досягати $47 \cdot I_{ном}$, що свідчить: наявність залишкового заряду підвищує амплітуду кидків струму приблизно у 2,35 рази.

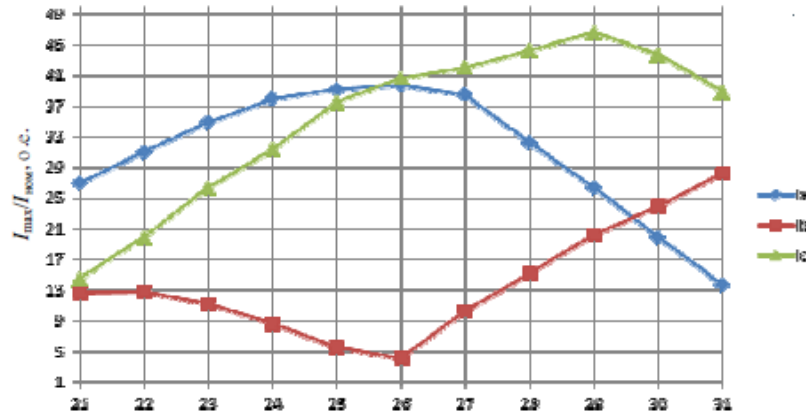


Рисунок 3.15 - Максимальні рівні кидків струму під час увімкнення конденсаторної батареї 500 квар з урахуванням залишкового заряду

Розглянемо додаткові чинники, що впливають на амплітуду струмових кидків.

Рівень напруги мережі. Із підвищенням напруги мережі зростає й величина кидків струму під час увімкнення конденсаторної батареї. Вища напруга приводить до збільшення залишкового заряду на конденсаторі, що відповідно підсилює початковий струмовий імпульс [16]. На рис.3.16 подано залежність кратності струму від рівня напруги.

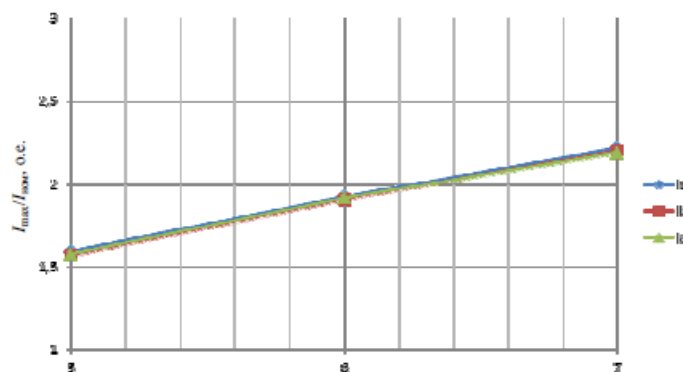


Рисунок 3.16 - Вплив величини напруги мережі на кидки струму

Потужність навантаження. Зі збільшенням номінальної потужності конденсаторної батареї спостерігається тенденція до зростання струмових кидків. Чим більша встановлена потужність, тим вищою є енергія, що накопичується в конденсаторі, а відповідно — і амплітуда кидка під час комутації. Вплив потужності навантаження на величину струмового імпульсу наведено на рис.3.17.

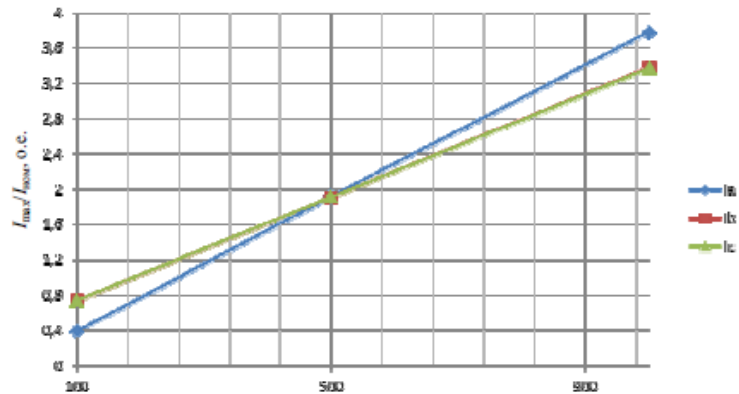


Рисунок 3.17 - Вплив потужності навантаження на кидки струму

Параметри кабельних ліній. Зміна довжини кабельної ділянки також позначається на величині кидків струму. Чим більшою є відстань між вимикачем і конденсаторною батареєю, тим меншим стає значення кидків. Це пояснюється збільшенням активного та індуктивного опору кабельної лінії, які лімітують перехідний процес і зменшують пікові струми. Відповідна залежність показана на рис.3.18.

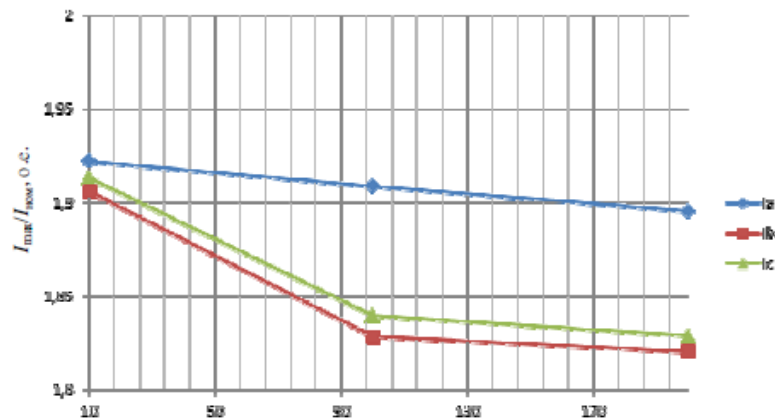


Рисунок 3.18 - Вплив довжини кабельної лінії електропередачі між вимикачем та навантаженням на кидки струму

Розглянуті фактори істотно впливають на амплітуду струмових кидків. Керуючи рівнем напруги мережі, вибором потужності конденсаторної батареї та параметрами кабельної лінії, можна цілеспрямовано змінювати величину перехідних струмів. У поєднанні з правильно обраним алгоритмом керованого вмикання конденсаторної батареї це дає змогу додатково зменшити пікові значення кидків і підвищити стабільність роботи системи.

У даному пункті розроблений алгоритм керованого увімкнення конденсаторної батареї. На основі отриманих залежностей підтверджено високу ефективність застосування технології керованої комутації. Аналіз показує, що впровадження цього методу дає можливість використовувати існуючі на енергетичних об'єктах комутаційні пристрої без необхідності встановлення додаткового спеціалізованого обладнання, що сприяє зменшенню капітальних витрат.

У роботі також проаналізовано вплив різних чинників на амплітуду струмових кидків. Встановлено, що визначальним фактором, який формує пікове значення струму під час увімкнення конденсаторної батареї, є залишковий заряд на її виводах. Саме його наявність потребує коригування алгоритму керованого вмикання для забезпечення мінімізації перехідних процесів.

3.3. Перехідний процес при керованій комутації вакуумним вимикачем силового трансформатора

Модель електричної мережі 6(10) кВ, подана на рис.3.19, дає змогу виконувати дослідження комутаційних процесів під час роботи вакуумних вимикачів на силових трансформаторах.

У моделі реалізовано незалежне управління моментів увімкнення та відключення полюсів вакуумного вимикача. Модель розроблена з використанням стандартних блоків MatLab/Simulink.

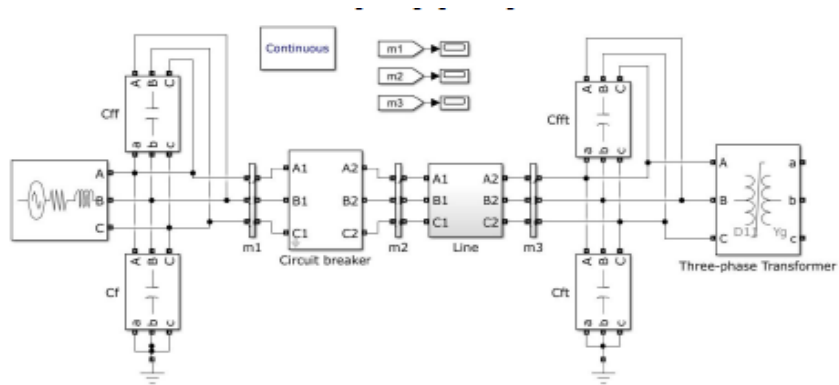


Рисунок 3.19 - Модель комутації синхронним вакуумним вимикачем силового трансформатора

Джерело живлення у моделі реалізовано за допомогою блока Three-Phase Source. Воно відтворює роботу енергосистеми з заданими характеристиками, зокрема з урахуванням внутрішнього опору, та функціонує в режимі мережі з ізолюваною нейтраллю [17].

У моделі синхронного вимикача передбачена можливість налаштування параметрів, що визначають характер і тривалість перехідних процесів (рис. 3.20). До таких параметрів належать: пороговий струм вимкнення, швидкість наростання електричної міцності під час увімкнення й відключення, темп зміни високочастотної складової струму, а також точні моменти замикання та розмикання полюсів вимикача.

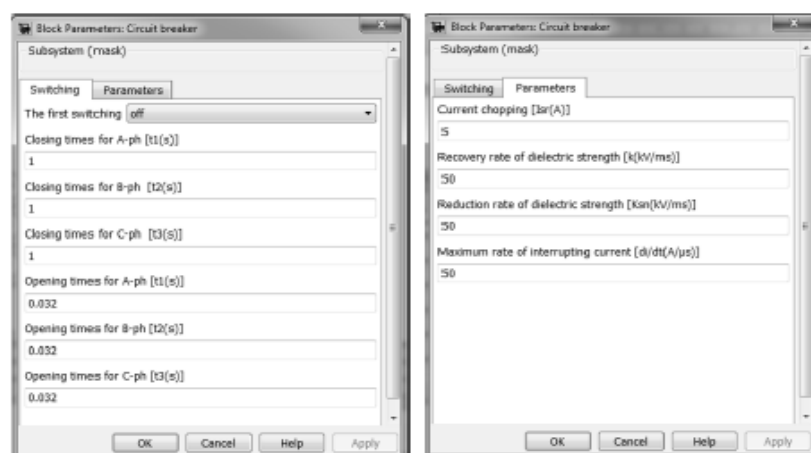


Рисунок 3.20 - Вікно встановлення параметрів синхронного вакуумного вимикача

Модель кабельної лінії реалізовано за допомогою блока Distributed Parameters Line, який описує лінію з розподіленими параметрами. У цьому блоці можна задавати активні, індуктивні та ємнісні величини як для прямої, так і для нульової послідовностей. Стандартна модель автоматично враховує скін-ефект — збільшення активного опору зі зростанням частоти струму. Тому для адекватного відтворення перехідних процесів до моделі додатково вводиться активний опір на відповідній частоті:

$$R(\omega) = R \cdot \sqrt{\frac{\omega}{100\pi}},$$

де: R – активний опір лінії електропередачі; ω – кутова частота.

Для коректного відтворення струму холостого ходу силового трансформатора в моделі необхідно врахувати нелінійну характеристику його магнітного кола. Спираючись на підходи, наведені в роботах [18,19], криву намагнічування можна визначити за такими виразами:

$$i = B \cdot \psi^{11}, \quad B = \frac{I_{0\phi} \cdot 1,6}{\psi_{ном}^{11}}, \quad \psi_{ном} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{1\phi}}{\omega},$$

де: i – струм намагнічування; ψ – потокозчеплення; $I_{0\phi}$ – фазний струм холостого ходу трансформатора, $\psi_{ном}$ – номінальне потокозчеплення, $U_{1\phi}$ – фазна напруга первинної обмотки при з'єднанні за схемою трикутник, ω – кутова частота.

На рис.3.21 показано найбільш сприятливий сценарій керованого вимкнення трансформатора без навантаження, коли комутація здійснюється в моменти переходу фазних струмів через нуль. У реальних умовах робота вимикачів супроводжується часовими похибками під час замикання та розмикання контактів. Тому одним із ключових практичних завдань є визначення допустимих значень часових відхилень спрацювання полюсів вимикача, які забезпечують коректну реалізацію технології керованої комутації.

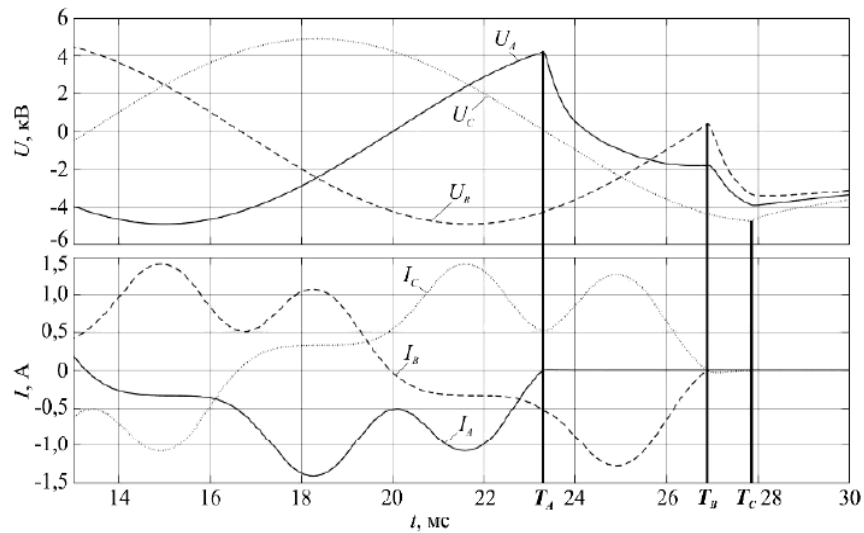


Рисунок 3.21 - Кероване відключення ненавантаженого трансформатора

Під час оптимізації режиму керованого вмикання трансформатора основною метою є зниження амплітуди кидка струму намагнічування. На величину цього кидка істотно впливають два параметри: залишковий магнітний потік у сердечнику трансформатора ($\Phi_{ост}$) та момент замикання полюсів вимикача. На рис.3.22 продемонстровано, як збільшення залишкового потоку призводить до зростання пускового струму намагнічування, а також показано залежність амплітуди цього струму від вибору моменту увімкнення.

Якщо залишковий магнітний потік $\Phi_{ост}$ не збігається з вимушеним потоком $\Phi_{уст}$ у момент увімкнення, осердя трансформатора входить у режим насичення. Це спричиняє різке зменшення його індуктивного опору та, відповідно, появу максимальних кидків струму [20].

Виконані дослідження процесу керованого вмикання силового трансформатора з з'єднанням у трикутник первинної обмотки підтвердили доцільність використання принципів керованої комутації для ефективного обмеження кидків струму намагнічування (рис.3.23).

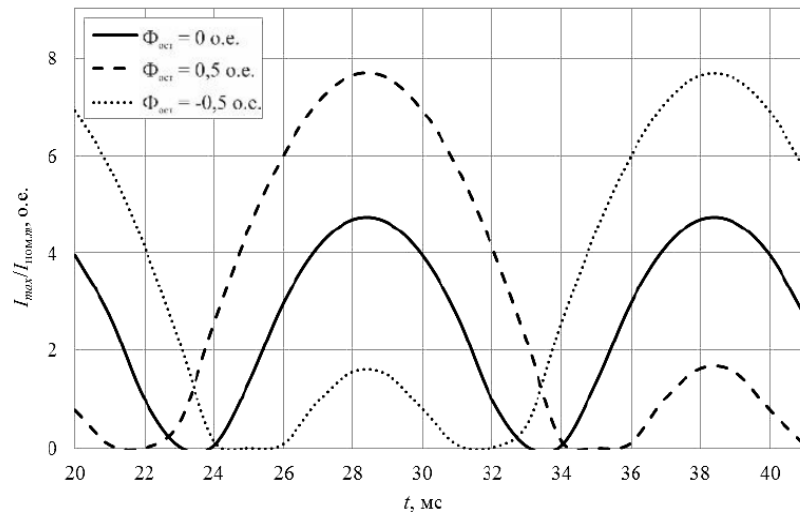


Рисунок 3.22 - Кидки струму намагнічування при варіюванні моменту комутації та наявності залишкового магнітного потоку

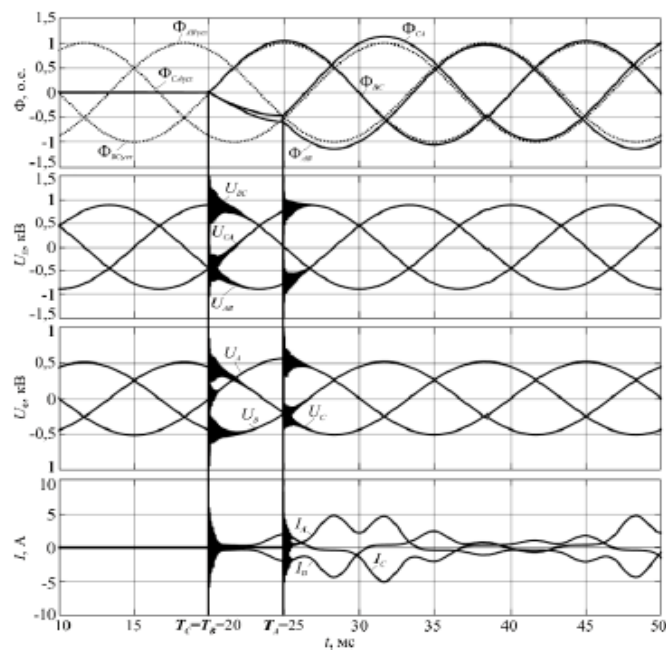


Рисунок 3.23 - Кероване включення силового трансформатора

За відсутності інформації про величину залишкового потоку Фост кероване вмикання трансформатора дає змогу знизити амплітуду пускових струмів до рівня, що не перевищує приблизно трикратного значення номінального струму трансформатора, за умови, що часовий розкид замикання полюсів вимикача не перевищує 0,5 мс.

Створено модель електричної мережі 6(10) кВ системи електропостачання, яка забезпечує можливість дослідження перехідних процесів під час керованої комутації вакуумними вимикачами трансформаторів без навантаження.

У роботі проаналізовано вплив моментів замикання та розмикання полюсів вимикача на величину перенапруги і амплітуду струмових кидків.

Сформульовано вимоги до синхронних вакуумних вимикачів щодо забезпечення стабільності часу спрацювання полюсів під час комутації трансформаторів без навантаження. Допустимий розкид моментів розмикання полюсів не повинен перевищувати 0,8 мс. На необхідну точність комутації впливають такі фактори, як потужність трансформатора, довжина живильної лінії та швидкість відновлення електричної міцності вимикача.

На вимоги до стабільності моменту замикання контактів вимикача суттєво впливає наявність залишкового магнітного потоку в трансформаторі. Якщо залишковий потік відсутній, допустимий часовий розкид замикання полюсів може становити до 1,2 мс. У разі наявності залишкового потоку цей показник має бути значно жорсткішим — не більше 0,5 мс.

Отримані результати свідчать, що застосування методів керованої комутації у вакуумних вимикачах напругою 6(10) кВ забезпечує можливість вмикати та вимикати силові трансформатори в оптимальних режимах, зводячи перехідні струми й перенапруги до мінімально можливого рівня.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Розроблено й детально описано процедуру визначення оптимального алгоритму увімкнення силового трансформатора. На основі отриманих кривих можна зробити висновок про високу результативність використання керованої комутації.

Проаналізовано вплив різних чинників на амплітуду кидків струму. Найсуттєвішим із них є залишковий магнітний потік у сердечнику трансформатора, який зумовлює необхідність коригування алгоритму керованої комутації.

У даному пункті розділу розроблений алгоритм керованого увімкнення конденсаторної батареї. Підтверджено високу ефективність застосування технології керованої комутації. Аналіз показує, що впровадження цього методу дає можливість використовувати існуючі на енергетичних об'єктах комутаційні пристрої без необхідності встановлення додаткового спеціалізованого обладнання, що сприяє зменшенню капітальних витрат.

У роботі також проаналізовано вплив різних чинників на амплітуду струмових кидків при увімкненні даного елементу системи. Встановлено, що визначальним фактором, який формує пікове значення струму під час увімкнення конденсаторної батареї, є залишковий заряд на її виводах. Саме його наявність потребує коригування алгоритму керованого вмикання для забезпечення мінімізації перехідних процесів.

У розділі також проаналізовано вплив моментів замикання та розмикання полюсів вимикача на величину перенапруги і амплітуду струмових кидків.

Сформульовано вимоги до синхронних вакуумних вимикачів щодо забезпечення стабільності часу спрацювання полюсів під час комутації трансформаторів без навантаження. Допустимий розкид моментів розмикання полюсів не повинен перевищувати 0,8 мс. На необхідну точність комутації впливають такі фактори, як потужність трансформатора, довжина живильної лінії та швидкість відновлення електричної міцності вимикача.

На вимоги до стабільності моменту замикання контактів вимикача суттєво впливає наявність залишкового магнітного потоку в трансформаторі. Якщо залишковий потік відсутній, допустимий часовий розкид замикання полюсів може становити до 1,2 мс. У разі наявності залишкового потоку цей показник має бути значно жорсткішим — не більше 0,5 мс.

Отримані результати свідчать, що застосування методів керованої комутації у вакуумних вимикачах напругою 6(10) кВ забезпечує можливість вмикати та вимикати силові трансформатори в оптимальних режимах, зводячи перехідні струми й перенапруги до мінімально можливого рівня.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській кваліфікаційній роботі визначені основні принципи та задачі керованої комутації енергетичних елементів.

Пристрій керованої комутації забезпечує узгоджене та точне вмикання електричних апаратів, підвищуючи надійність і безпеку роботи енергетичного обладнання, знижуючи електродинамічні навантаження й подовжуючи термін служби комутаційних елементів.

Визначені фактори, що впливають на точність керованої комутації на прикладі вимикача, а саме: автономний облік умов роботи вимикача забезпечує достатню точність лише в обмеженому діапазоні зміни впливових факторів. Якщо ж температура, тиск або напруга змінюються у широких межах, для підвищення точності визначення коригувальних значень доцільно застосовувати багатофакторні функції, які враховують взаємозалежність кількох параметрів одночасно.

Принципи керованої комутації ґрунтуються на універсальній концепції вибору оптимальної фази комутаційного процесу, що забезпечує мінімізацію перехідних процесів та електромагнітної перенапруги. Завдяки цьому підхід до реалізації керованої комутації має спільну інформаційну та функціональну основу незалежно від типу комутуваного електричного об'єкта.

Розглянуті особливості керованої комутації при нормальних та аварійних режимах в електричних мережах.

Можна сказати, що застосування принципів керованої комутації в аварійному режимі забезпечує низку суттєвих переваг, безпосередньо пов'язаних із роботою самого захисно-комутаційного апарата. Завдяки точному вибору моменту розмикання контактів вдається зменшити тривалість горіння дуги, що істотно скорочує ерозійне зношування елементів дугогасного пристрою та подовжує ресурс вимикача. Крім того, оптимізоване керування процесом комутації покращує його електричні характеристики, підвищує надійність і розширює здатність на відключення вимикача під час дії струмів короткого замикання.

Розроблено методику розрахунку перехідного процесу під час комутації електричного кола, детально розглянуто її алгоритм і програмну реалізацію.

Практичні приклади підтверджують ефективність застосування розробленої методики для розрахунку RLC-контуру.

Аналіз отриманих графіків дає змогу зробити наведені вище висновки щодо характеру перебігу перехідного процесу та чітко відобразити фізичну сутність явищ, що при цьому відбуваються.

Оцінена перспектива застосування керованої комутації. Завдяки розвитку інтернету речей і цифрових двійників, моніторинг вимикачів переходить від періодичного до безперервного режиму, що дає змогу формувати прогностичні моделі старіння обладнання. У передових системах застосовуються технології машинного навчання для автоматичної оцінки стану ізоляції, контактів і приводів, а також хмарні платформи моніторингу, які забезпечують централізоване управління великою кількістю вимикачів у реальному часі.

Розроблено й детально описано процедуру визначення оптимального алгоритму увімкнення силового трансформатора. На основі отриманих кривих можна зробити висновок про високу результативність використання керованої комутації.

Розроблений алгоритм керованого увімкнення конденсаторної батареї. Підтверджено високу ефективність застосування технології керованої комутації. Аналіз показує, що впровадження цього методу дає можливість використовувати існуючі на енергетичних об'єктах комутаційні пристрої без необхідності встановлення додаткового спеціалізованого обладнання, що сприяє зменшенню капітальних витрат.

Також проаналізовано вплив моментів замикання та розмикання полюсів вимикача на величину перенапруги і амплітуду струмових кидків.

Сформульовано вимоги до синхронних вакуумних вимикачів щодо забезпечення стабільності часу спрацювання полюсів під час комутації трансформаторів без навантаження. Допустимий розкид моментів розмикання

полюсів не повинен перевищувати 0,8 мс. На необхідну точність комутації впливають такі фактори, як потужність трансформатора, довжина живильної лінії та швидкість відновлення електричної міцності вимикача.

Найдоцільнішими *напрямами* подальших досліджень і практичного застосування технології керованої комутації є вдосконалення алгоритмів синхронного включення з урахуванням залишкового магнітного потоку, інерційності приводу вимикача та реального стану мережі.

Важливим є розроблення точних моделей перехідних процесів, що включають магнітні властивості трансформатора, динаміку роботи приводу та високочастотні складові перенапруги. Доцільно розширювати експериментальні дослідження на лабораторних стендах і реальних підстанціях, що дозволить перевірити коректність моделей і підвищити точність комутаційних алгоритмів.

Перспективним є впровадження цифрових пристроїв керованої комутації у складі систем Smart Grid та цифрових підстанцій, що забезпечить адаптивне керування комутаціями залежно від режимів мережі та параметрів обладнання.

Окремо слід досліджувати вплив керованої комутації на ресурс вимикачів, зниження кидків струму та перенапруги, а також оцінювати економічний ефект її застосування у мережах 6–110 кВ. Це створить підґрунтя для широкого практичного впровадження технології та підвищення надійності роботи енергетичних об'єктів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. CIGRE WG 13.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers». 1st Part, «ELECTRA», No. 183, April 2019, pp. 65–96.
2. CIGRE Study Committee A3: High Voltage Equipment. Switching Equipment. CIGRE Green Books, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, 584 p.
3. Gabriel Benmouyal, Normann Fischer, Douglas Taylor, Mark Talbott-Williams, Ritwik Chowdhury. A unified approach to controlled switching of power equipment // 44th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017
4. Switchsync PWC600. Technical manual [Электронный ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://search-ext.abb.com/library>
5. Dan Goldsworthy, Tom Roseburg, Demetrios Tziouvaras, Jeff Pope. Controlled switching of HVAC circuit breakers: application examples and benefits // 34th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017.
6. H. Tsutada, T.Hirai, H.Kohyama, H. Ito and K. Sasaki. Development of Synchronous Switching Controller for Gas Circuit Breakers. // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Vol. 2, pp. 807-812, 2017.
7. Sadayuki Kinoshita, Hiroki Ito. Factory and Field Tests of Controlled Switching in Accordance with IEC62271-302 Standard. Mitsubishi Electric Advance, Vol. 117, March, 2017.
8. Horiszny J. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2022. – Vol. 39. – № 1–4. – P. 1013–1019.
9. Horiszny J. Implementation of power transformer controlled switching algorithm // International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2016. – Vol. 35. – Iss. 4. –P. 1418–1427.
10. Smith L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications

to calculating, limiting and reducing the effects of transient current // IEEE Transactions on industry applications. – 2017. – Vol. 31, iss. 4.– P. 721–724.

11. Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuitbreakers – benefits and economic aspects // CIGRE Technical Brochure. –2014. – № 262. – 34 p. 12.

12. Zhang C., Quan F. Analysis of cable sheath overvoltage due to main transformer no-load closing // High voltage apparatus. – 2019. –Vol. 55, № 2. – P. 164–170.

13. Cho C.H., Lee J.B., Min B.W. Application of controlled switching device for high voltage circuit breaker in KEPCO real power system // 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China. – 2017. – P. 492–495. DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188892

14. Андрійчук В.А., Костик Л.М., Філюк Я.О. Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами. №2 (2024), с. 68-72.

15. Попов М.А., Пінаєв Б.О. Моделювання перехідних процесів у системах електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. ВНТУ, 2025.

16. Кубрик Б.І. Аналіз перехідних процесів в лінійних електричних колах. Навчальний посібник. НТУ «ХПІ», 2023. 276 с.

17. Левонюк В. Аналіз перехідних процесів у лінії електропередачі з грозозахисними тросами під час керованої комутації. 2024: DOI: 10.31734/agroengineering2023.27.051.

18. Horsszny J. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core. International journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. Vol.39 Nos 1-4, 2022, pp. 1013-1019.

19. Півняк Г.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання. Підручник для ВНЗ. Дніпро, НГУ. 2021. 600 С.

20. Тептя В.В., Кулик В.В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах. Конспект лекцій. ВНТУ, Вінниця. 2021. 184 с.