

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Коржовський Ілля Романович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування принципу виконання адаптивного струмового захисту від
замикань на землю в кабельних мережах 6-10 кВ
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Коржовський І. Р.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Голубенко Анна Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

ст. викладач кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Консультат

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Коржовський І.Р. Обґрунтування принципу виконання адаптивного струмового захисту від замикань на землю в кабельних мережах 6-10 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

У роботі розглянуті питання пов'язанні з обґрунтуванням принципу виконання адаптивного струмового захисту від замикань на землю в кабельних мережах 6-10 кВ.

Ключові слова: короткі замикання, струмовий захист, кабельна мережа, споживачі електроенергії.

ABSTRACT

Korzhovskyi I.R. Justification of the principle of implementation of adaptive current protection against earth faults in 6-10 kV cable networks. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2023.

The issues discussed in the paper are related to the justification of the principle of adaptive current protection against ground faults in 6-10 kV cable networks.

Keywords: short circuits, current protection, cable network, electricity consumers.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6–10 КВ	6
1.1 Загальні відомості про однофазні замикання на землю	6
1.2 Аналіз схеми трифазної мережі в режимі однофазного замикання на землю	8
1.3 Аналіз процесів при однофазному замиканні на землю	11
1.3.1. Напруга та струми нульової послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю в режимі замикання на землю.	11
1.3.2. Струми та напруга нульової послідовності в перехідних режимах замикання на землю	16
Висновки по розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ У ЗАХИСТАХ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 6-10 кВ	21
2.1 Методика дослідження та оцінки інформаційних параметрів електричних величин перехідного процесу під час ОЗЗ	22
2.2 Аналітичне визначення значень інформаційних параметрів електричних величин перехідного процесу при ОЗЗ у мережах напругою 6-10 кВ.	23
2.3 Визначення амплітуди перехідних струмів під час ОЗЗ.	26
Висновки по розділу 2	28
РОЗДІЛ 3 СПОСІБ ВИКОНАННЯ АДАПТИВНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 6–10 кВ З ІЗОЛОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ	30
3.1 Спосіб дії традиційного адаптивного струмового захисту нульової послідовності.	31
3.2 Спосіб дії адаптивної СЗНП, що базується на використанні складових основної частоти 50 Гц.	34
3.3 Структурно-функціональна схема та принцип дії адаптивної СЗНП на основі складових робочої частоти 50 Гц.	36
Висновки по розділу 3	39
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

ВСТУП

Науково-технічний прогрес посилив вимоги до надійності та безперебійності електропостачання підприємств, установ, житлових масивів, всіх видів транспорту, пошти та телеграфу, будівництва та інших об'єктів, а також різних систем управління та контролю.

Але з різних причин лінії електропередач виходять з ладу, що веде до великих економічних втрат через неполадки на лінії, не якісну електроенергію та відключення лінії на ремонт. Складовою частиною обслуговування ліній електропередач є їх технічна діагностика, однією з функцій якої є виявлення та локація несправності.

Найбільш частим видом ушкоджень у мережах 6-10 кВ є однофазні замикання на землю (ОЗЗ), які закінчуються пробоем ізоляції в її ослаблених місцях.

Пошук місця однофазного замикання на землю в таких умовах затягується на кілька днів тому, що пов'язаний з трудомісткими роботами з визначення місця пошкодження. Протягом усього цього часу лінія постійно, або періодично працює в режимі однофазного замикання на землю, що може виявитися необхідним для діагностики лінії. Такий режим роботи призводить до підвищеної аварійності, переходу однофазного замикання на землю міжфазні або багатомісні замикання на землю. Особливо страждають при цьому двигуни, фазна ізоляція яких розрахована на менші перенапруження, ніж у інших елементів мережі.

Більшість електричної енергії розподіляється споживачам через мережі середньої напруги 6-10 кВ, протяжність яких в Україні становить близько 1 млн км. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) в мережах 6–10 кВ, що працюють із ізольованою нейтраллю, резонансним заземленням нейтралі через дугогасний реактор (ДГР) або з високоомним заземленням нейтралі через резистор, є найбільш ймовірним видом ушкоджень (70–90 пошкоджень) і часто є причиною небезпечних короточасних порушень електропостачання (КНЕ) або аварій, що супроводжуються значними економічними збитками.

Тому надійність електропостачання споживачів значною мірою залежить від технічної досконалості (селективності та стійкості функціонування) пристроїв захисту від ОЗЗ та визначає **актуальність теми** кваліфікаційної роботи.

Відповідно до вище сказаного **метою кваліфікаційної роботи** являється визначення основних методів та принципів виконання адаптивних струмових захистів при ОЗЗ.

Об'єктом дослідження в даній роботі є однофазні короткі замикання на землю в високовольтних кабельних мережах система електропостачання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Коржовський І. Р. АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮОУ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 6-10 кВ .

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна. С. 69-71

Гончаренко Ю.П., Коржовський І. Р. АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮОУ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 6-10 кВ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна. С. 69-71

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6–10 КВ

1.1 Загальні відомості про однофазні замикання на землю

З відомих даних досвіду експлуатації відомо, що від 75 до 90% всіх проблем з електропостачанням споживачів посідає електричні мережі 6–10кВ, причому головною причиною пошкодження електрообладнання є однофазні замикання на землю, які супроводжуються значними економічними збитками.

Однофазних замикань на землю (ОЗЗ) діляться на дві основні групи: стійкі та нестійкі. Стійкі однофазні замикання на землю характеризуються наявністю в струмах і напругах, тільки вимушених складових. промислової частоти та вищих гармонік. Вони виникають за наявності надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази із землею.

Основним видом однофазних замикань на землю є нестійкі дугові замикання, що характеризуються переривчастою формою струму. У цьому струмі переважають вільні складові перехідного процесу, амплітуди якого досягають в залежності від відстані від шин підстанції до точки однофазного замикання на землю, сумарного ємнісного струму мережі I_{Σ} , параметрів електромережі, напруги на пошкодженій фазі в момент пошкодження та пробою ізоляції та ін.

Нестійкі однофазні замикання на землю поділяються на два основні види:

- одноразові пробої ізоляції, які самоусуваються.
- дугові переривчасті замикання, в яких послідовність самоусуванних пробоїв ізоляції неперіодична.

Якщо запалення дуги повторюються через невеликі проміжки часу (менше ніж 0,1 с), ОЗЗ відбувається з додатковим зміщенням нейтралі мережі та накопиченням зарядів на фазах лінії [1]. Їх називають дуговими переміжними замикання на землю. При дугових однофазних замикань, що перемежуються на землю в електричних мережах із ізольованою нейтраллю, мінімальні

безструмові паузи між повторними пробоями ізоляції найчастіше не перевищують 40-50 мс. Іноді згасання та запалення дуги можуть повторюватися кожен період чи напівперіод. Горіння дуги між безструмовими паузами зазвичай триває трохи більше 20 – 40 мс.

З погляду захисту можливі пошкодження при однофазних замиканнях на землю можна розділити на кілька основних категорій:

- бездугові, "металеві" однофазні замикання на землю;
- обриви повітряних ліній без тривалого однофазного замикання на землю;
- дугові однофазні замикання на землю;
- однофазних замикань на землю через великі перехідні опори;
- короткочасні пробої.

Короткочасні нестійкі пробої ізоляції, тривалість яких становить від 1 до 10 мс, між значними по тривалості безструмовими паузами (від 1 до 17 хвилин) є причиною більшості «стійких» однофазних замикань на землю. Стійке однофазне замикання на землю виникає через час від 1 хвилини до 10 діб і як правило більше після першого короткочасного пробою. При появі надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази із землею (наприклад, із заземленим корпусом електроустановки) виникає бездугове однофазне замикання на землю. Струми та напруги нульової послідовності можна вважати синусоїдальними та максимальними за величиною. Найпростіший режим функціонування з погляду захисту – це бездугове однофазне замикання на землю.

Контакт землі і фази через неметалеві предмети (наприклад, при падінні проводу на сухий ґрунт, через дерев'яні частини конструкції і т.д.) може призвести до однофазного замикання на землю з дуже великим перехідним опором. Перехідний опір, при падінні проводу повітряної лінії 10 кВ на пісок, змінюється приблизно від 7 до 5 кОм протягом декількох секунд. У Польщі величина опору дорівнює 13,5 кОм, а в Канаді - 7,5 кОм. Великі перехідні опори можуть значно ускладнити вимоги до захисту повітряних ліній від

однофазних замикань на землю, так як зростання переходного опору призводить до зменшення і напруги U_0 , і струму нульової послідовності I_0 .

При пробоях та перекриттях фазної ізоляції виникає дугове замикання. Під час замикання у дузі з'являється «переривчаста» форма кривої струму. Таку дугу називають переміжною. При однофазному замиканні на землю струм в реле захисту може перериватися на деякий час і містити велику кількість високочастотних складових. Іноді в струмі та напрузі нульової послідовності можуть виникати субгармонічні складові. Можливе переривання дуги на значний час, що перевищує кілька періодів промислової частоти.

Час горіння дуги і протяжність безструмових пауз можуть змінюватись при різних значеннях струму однофазного замикання на землю та фазах розвитку процесу.[2]

1.2 Аналіз схеми трифазної мережі в режимі однофазного замикання на землю

На рисунку 1.1 наведено еквівалентну схему заміщення трифазної електричної мережі при однофазному замиканні на землю. У нейтраль мережі з фазною напругою $E_k(t)$, $k=1,2,3$, введені регульована котушка індуктивності $L(t)$, яка має активний опір $R(t)$ або резистор $R_3(t)$. Розглянемо цю схему у випадку компенсованої нейтралі.

Розподілені фазні ємності $C_k(t)$, $k=1,2,3$ та активні провідності $g_k(t)$, $k=1,2,3$, ізоляції замінюються зосередженими елементами. Нелінійний опір однофазного замикання, що характеризується Вольтовою дугою, введеною між фазою 3 і землею:

$$I_0(t)=f[U_3(t)], \quad (1.1)$$

де $I_0(t)$ і $U_3(t)$ - струм і напруга місця пошкодження мережі.

ЕРС джерел $E_k(t)$, $k=1,2,3$, розподіляються між паралельно з'єднаними $C_k(t)$ і $g_k(t)$, $k=1,2,3$ і послідовно з'єднаними $L(t)$ і $R(t)$ компенсуючого реактора або $R_3(t)$ так, що напруга $U_k(t)$ між k -тою фазою і землею є результат порівняння напруги $E_k(t)$ і напруги $e(t)$ на реакторі або резисторі:

$$U_k(t) = E_k(t) - e(t) \quad (1.2)$$

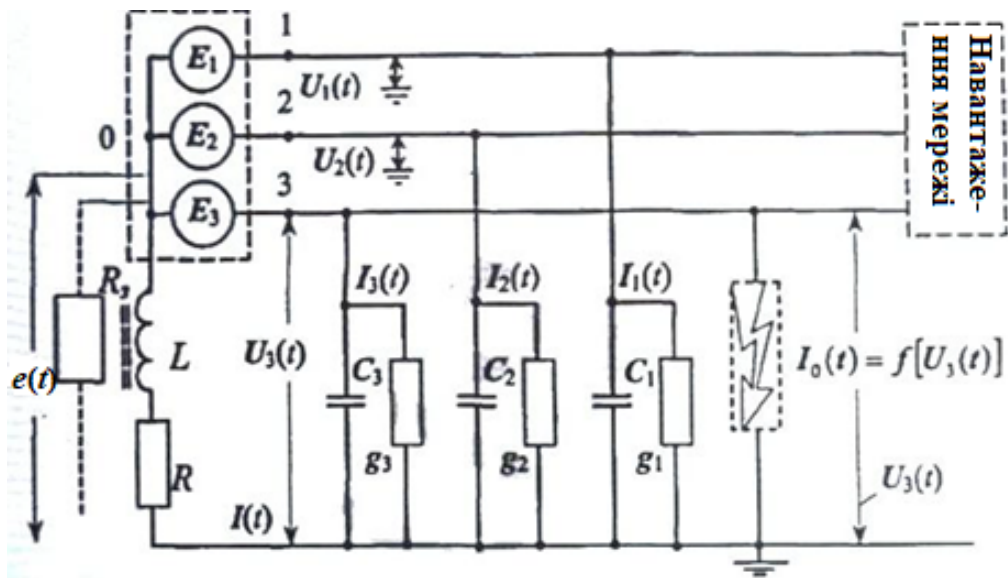


Рисунок 1.1 - Спрощена схема заміщення трифазної електричної мережі з зосередженими параметрами

Одержана напруга $U_k(t)$, $k=1,2,3$, створює струми $I_{ck}(t)$ и $I_{gk}(t)$ в відповідності з фізичними законами:

$$I_{ck}(t) = D [C_k(t) U_k(t)], I_{gk}(t) = g_k(t) U_k(t), k = 1,2,3. \quad (1.3)$$

Згідно зі схемою на рисунку 1.1 струм $I_k(t)$ k -тої фази мережі на землю буде рівним:

$$I_k(t) = I_{ck}(t) + I_{gk}(t), k = 1,2,3. \quad (1.4)$$

У місці однофазного замикання на землю розвивається струм $I_0(t)=f[U_3(t)]$. Сума всіх струмів, тобто $I(t)=I_0(t)+I_1(t)+I_2(t)+I_3(t)$, протікає, взагалі кажучи, через нелінійну індуктивність $L(t)=L[I(t)]$ та активний опір $R(t)$ реактора, що є причиною утворення напруги:

$$U_L(t)=D[L(I(t))I(t)], \quad (1.5)$$

на нелінійній індуктивності $L(t)$ та напруги:

$$U_R(t)=R(t)I(t), \quad (1.6)$$

на опір $R(t)$. Результиуюча напруга $e(t)$ реактора буде дорівнювати:

$$e(t) = U_L(t) + U_R(t). \quad (1.7)$$

З поняттям витоку, як правило, пов'язують процес стікання на землю зарядів із струмопровідних елементів мережі, викликаний або ушкодженням ізоляції, або випадковим дотиком обслуговуючого персоналу. Сильноточні витоки називаються замикання. У зв'язку з цим витоком як правило в низьковольтних мережах до 1140 В, замикання - у високовольтних мережах 6-10 кВ.

Слід розрізняти три режими трифазної електричної мережі. Назвемо їх режимами А, В, і С.

Режим А - це режим роботи мережі, коли в ній відсутні будь-які ушкодження та небезпечні ситуації.

Режим В - це режим однофазного глухого замикання на землю або режим однофазного витоку, коли між фазою мережі і землею з'являється зосереджене пошкодження у вигляді деякого активного опору $R_0 = 1/g_0$.

Режим С - це такий режим однофазного замикання на землю, при якому утворюються дугові або іскрові процеси в місці пошкодження ізоляції, що описуються гістерезисною нелінійністю типу Вольтової дуги. За аналогією можна ввести режими Д і Т, як режими відповідно двофазних або трифазних замикань мережі, при яких пошкоджені ділянки слід негайно відключити, переводячи мережу в режим А.

З погляду захисної мінімізації струмів режими В і С є основними робочими режимами, режим А; підготовчим до режимів, С або режимом їх очікування. Режими ж Д і Т - це режими небезпечної ситуації, що вимагають швидкодіючого захисного відключення всієї мережі або пошкоджених приєднань.

1.3 Аналіз процесів при однофазному замиканні на землю

При однофазному замиканні на землю в електричних мережах 6-10 кВ необхідно проводити аналіз перехідних процесів і оцінку їх параметрів при вирішенні наступних завдань:

- 1) дослідження перенапруг, що супроводжуються дуговими переривчастими однофазними замиканнями на землю в повітряних лініях 6-10 кВ, у перехідних режимах;
- 2) оцінка значення струму при дугових переривчастих однофазних замиканнях на землю в місці пошкодження лінії;
- 3) дослідження впливу на стійкість роботи захисту від даного виду ушкоджень перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю;
- 4) оцінка співвідношень і параметрів перехідних напруг і струмів, що використовуються для захисту від однофазних замикань на землю, що реагують на перехідний процес.

1.3.1. Напруга та струми нульової послідовності в мережі з ізолюваною нейтраллю в режимі замикання на землю.

Захисту від однофазних замикань на землю реагують на струми та напругу нульової послідовності. Розумність використання складових нульової послідовності для роботи захисту від однофазних замикань на землю обумовлюється тим, що в симетричній системі вони відсутні в робочих режимах і при коротких міжфазних замиканнях і з'являються тільки при замиканнях фаз на землю. Такі захисту забезпечують значне підвищення їхньої чутливості.[3]

На рисунку 1.2 представлена трифазна мережа змінного струму при нормальній роботі за фазами, якою протікають струми, викликані ємностями фаз на землю C_{0A}, C_{0B}, C_{0C} і струми навантаження. Струми, викликані активними провідностями фаз мережі на землю G_{0A}, G_{0B}, G_{0C} , в мережі з ізолюваною нейтраллю 2-6 % не перевищують ємнісних струмів і при аналізі режимів, що встановилися, ними можна знехтувати без однофазних замикань

на землю і з однофазними замиканнями на землю. Активні провідності та ємності між фазами лінії на значення параметрів нульової послідовності, що встановилися, не впливають і в схемі на рисунку 1.2 не враховані.

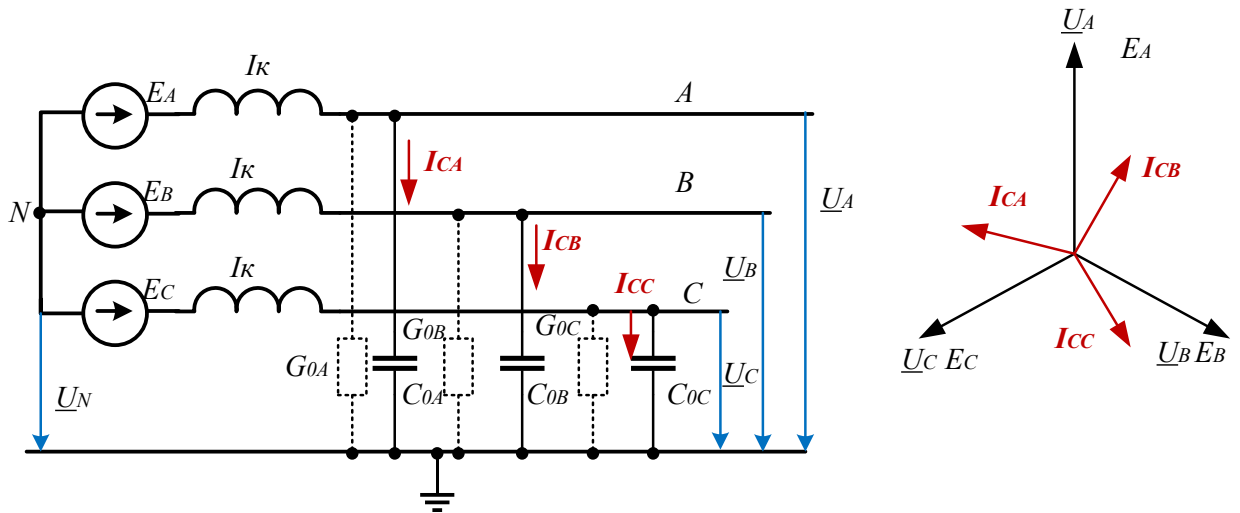


Рисунок 1.2 – Векторні діаграми ємнісних струмів та напруг у нормальному режимі мережі із ізольованою нейтраллю

На схемі електричної мережі з ізольованою нейтраллю відображені процеси при внутрішньому, зображеному на рисунку 1.3, і зовнішньому, зображений на рисунку 1.4, замиканні на землю: лінія, що захищається, показана підсумовуючим трансформатором ТА і захистом Р на початку лінії. Всі інші елементи мережі, підключені до шин, замінюються іншою лінією.

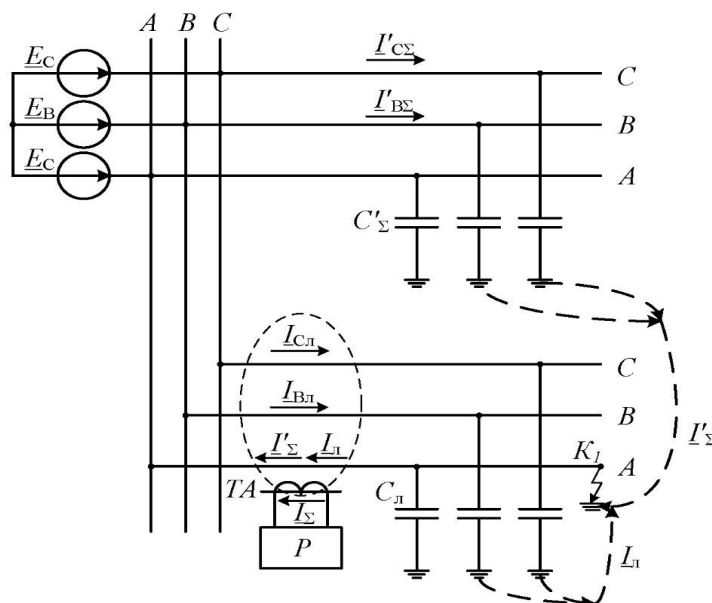


Рисунок 1.3 – Схема електричної мережі із ізолюваною нейтраллю при внутрішньому замиканні на землю

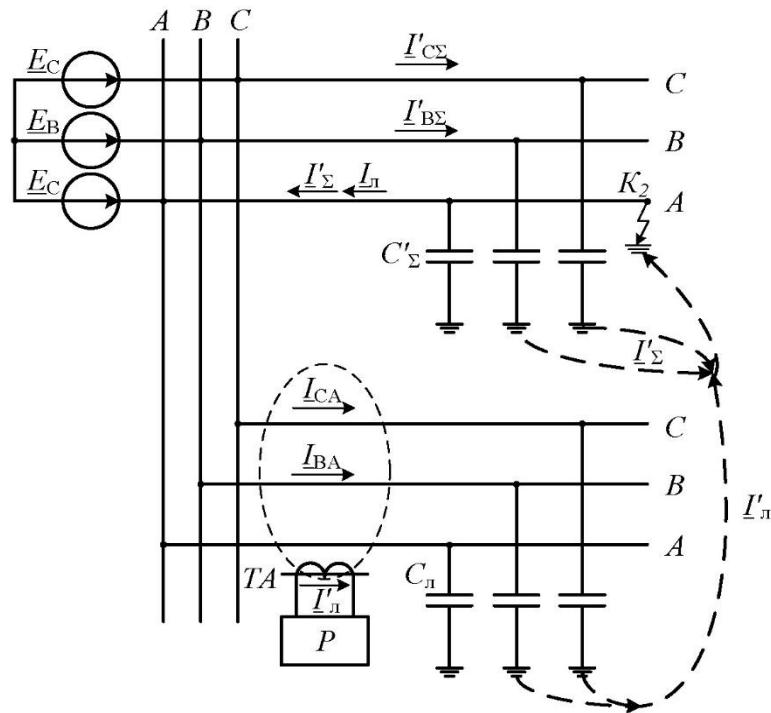


Рисунок 1.4 – Схема електричної мережі із ізолюваною нейтраллю при зовнішньому замиканні на землю

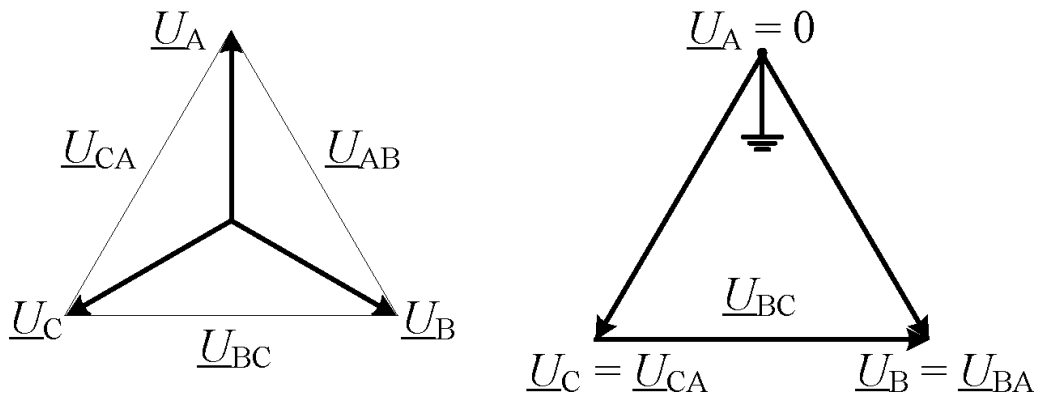


Рисунок 1.5 – Напруги мережі із ізолюваною нейтраллю: а - нормальний режим, б - замикання на землю фази А

При замиканні фази А на землю на лінії, що захищається, зображеної на рисунку 1.5 (а), потенціал фази А і лінії, що захищається, і всіх електрично пов'язаних з нею елементів стає дорівнює нулю, а потенціал неушкоджених фаз В і С, зображених малюнку 1.5 (б), збільшуються до лінійного напруги.

Кожна з фаз має певну ємність щодо землі і (C_L - ємність лінії, що захищається, C'_Σ - еквівалентна ємність інших елементів).

З урахуванням цього потенціал фаз В і С щодо землі відповідно дорівнює:

$$U_B = E_B - E_A = a^2 E_A - E_A; U_C = E_C - E_A = a E_A - E_A.$$

Ємнісні струми $I'_{B\Sigma}$ та $I'_{C\Sigma}$ від еквівалентних зовнішніх елементів дорівнюють:

$$I'_{B\Sigma} = j\omega \cdot C'_\Sigma \cdot (a^2 - 1) \cdot E_A; I'_{C\Sigma} = j\omega \cdot C'_\Sigma \cdot (a - 1) \cdot E_A.$$

де $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, рад/с; f - промислова частота, Гц.

Результуючий ємнісний струм $I'_\Sigma = I'_{C\Sigma} + I'_{B\Sigma}$ підтікає до т. K_1 на лінії, що захищається.

Струм, який витікає з точки K_1 і протікає через лінію, що захищається, має протилежну струму I'_Σ полярність (напрямок від лінії до шин на рисунку 1.3):

$$3I_0 = -I'_\Sigma = -(I'_{B\Sigma} + I'_{C\Sigma}) = 3j\omega \cdot C'_\Sigma \cdot E_A.$$

Ємнісні струми $I_{Вл}$ і $I_{Сл}$, що підтікають від фаз пошкодженої лінії до місця замикання K_1 відповідно дорівнюють:

$$I_{Вл} = j\omega_0 \cdot C_L \cdot (a^2 - 1) \cdot E_A; I_{Сл} = j\omega \cdot C_L \cdot (a - 1) \cdot E_A,$$

а сумарний ємнісний струм лінії $I'_L = I_{Вл} + I_{Сл}$ по знаку протилежний струму I_L , що протікає до шин по ушкодженій фазі А. З урахуванням цього, у підсумовуючому трансформаторі ТА ємнісні струми пошкодженої лінії взаємно компенсуються, так як $I_{Сл} + I_{Вл} + I_L = 0$.

Тому, при однофазних замиканнях на землю на лінії, що захищається сумуючий трансформатор струму ТА вимірює суму ємнісних струмів, які створюються всіма зовнішніми по відношенню до лінії, що захищається елементами енергосистеми.

При замиканні на землю в т. K_2 на будь-якому елементі енергосистеми поза розташуванням лінії, що розглядається на рисунку 1.4, через трансформатор

ТА протікають тільки ємнісні струми непошкоджених фаз лінії. Потрійний струм нульової послідовності, що вимірюється захистом, дорівнює

$$3I_0 = I_{Вл} + I_{Сл} = -(I'_{В\Sigma} + I'_{С\Sigma}) = -3j\omega \cdot C_{л} \cdot E_A.$$

Отже, селективний захист від замикань на землю виконується з контролем струмів нульової послідовності, а струм спрацьовування вибирається відбудовою від зовнішніх замикань від власних струмів ємнісних лінії за виразом (1.11). Відбудова проводиться при дугових замиканнях, що перемежуються, з урахуванням можливих кидків ємнісного струму.[4] Також відбудова проводиться з урахуванням небалансу по струму $3I_0$, обумовленого не ідеальністю характеристик амагнічування трансформатора струму нульової послідовності. Селективність захисту визначається різницею ємнісних струмів при зовнішніх та внутрішніх замиканнях на землю. Вона забезпечується лише за умови, що ємність лінії, що захищається значно менше еквівалентної сумарної ємності зовнішніх елементів.

Принцип дії селективного струмового захисту нульової послідовності заснований на відстежуванні значень струму $3I_0$ в приєднанні, що захищається, з заданою постійною величиною струму спрацьовування захисту при внутрішніх і зовнішніх однофазні замиканнях на землю, його також називають принципом «абсолютного виміру» струму $3I_0$. Цей принцип можна використовувати для виконання селективного захисту від однофазного замикання на землю, якщо $(I_{C\Sigma} - I_{C1}) > I_{C1}$.

Для мереж із досить великою кількістю приєднань виконується співвідношення $I_{C\Sigma} > I_{C1}$. Для таких мереж ток $3I_0$ у пошкодженому приєднанні завжди більше, ніж у будь-якому з неушкоджених.

При даних умовно позитивних напрямках струмів нульової послідовності в лініях струм $3I_0$ у пошкодженому приєднанні відстає, а в неушкодженому приєднанні випереджає напругу $3U_0$ на кут $\pi/2$.

Вимірюючи струм фази $3I_0$ по відношенню до напруги $3U_0$ можна визначити приєднання з однофазним замиканням на землю. Даний метод

абсолютного виміру визначення пошкодженого приєднання використовується у спрямованому токовому захисті від однофазних замикань на землю. Повна потужність нульової послідовності, яка передається при однофазному замиканні на землю лініями, фактично дорівнює реактивної складової потужності. Якщо врахувати мале значення активної складової струмів $3I_0$, то спрямований захист розумно виконувати нульової послідовності, яка реагує на повну потужність.

У пошкодженому і неушкодженому приєднання фази струмів $3I_0$ завжди протилежні. Пошкоджене приєднання можна визначити, порівнюючи між собою фази струмів $3I_0$ у всіх приєднаннях об'єкта, що захищається. Цей спосіб використовується в централізованому струмовому спрямованому захисті відносного виміру.

Загальна неселективна сигналізація однофазних замикань на землю по напрузі $3U_0$, струмовий захист нульової послідовності абсолютного виміру і струмовий спрямований захист, який реагує на напрямок потужності нульової послідовності в лінії, що захищається при однофазних замиканнях на землю, отримали практичне застосування в електричних мережах.

1.3.2. Струми та напруга нульової послідовності в перехідних режимах замикання на землю

Схема заміщення розрахунку перехідних процесів при однофазному замиканні на грішну землю.

Перехідний процес при однофазному замиканні на землю ділиться на дві стадії, пов'язані з розрядом ємностей пошкодженої фази на землю, які супроводжуються перезарядом міжфазних ємностей, і зарядом ємностей ушкоджених фаз. При однофазному замиканні на землю в реальних електричних мережах та на фізичних моделях, які враховують розподілений характер параметрів ліній, у розрядних та зарядних складових струму та напруги перехідного процесу при однофазному замиканні на землю переважає по одній частотній складовій, що визначає їх форму та амплітуду. Частота та

амплітуда зазначених частотних складових визначається перехідним опором R_{Π} у місці пошкодження та параметрами пошкодженої лінії на ділянці від шин до точки однофазного замикання на землю, сумарними міжфазними ємностями непошкодженої частини мережі та сумарною ємністю фаз мережі на землю. У зв'язку з цим складний перехідний хвильовий процес при однофазному замиканні на землю в електричних мережах 6–10 кВ можна наближено розглядати як перехідний процес у схемі із зосередженими параметрами, виняток становлять однофазні замикання на землю на шинах або у безпосередній близькості від шин, коли необхідно враховувати явно виражений хвильовий характер розрядних складових.

Захист від однофазних замикань на землю заснований на використанні перехідних процесів. Для їх виконання в основному використовуються початкові фазні співвідношення перехідного струму та напруги нульової послідовності. Втрати в контурі нульової послідовності при відповідному виборі вхідних інформаційних величин не впливає на фазні співвідношення перехідного струму та напруги нульової послідовності.

Частота розрядної складової $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$ залежно від типу ліній електричної мережі (повітряні або кабельні), їх довжин та віддаленості точки однофазного замикання на землю від шин об'єкта, що захищається, зазвичай становить від декількох до сотень кілогерц. Розрядні складові згасають протягом кількох сотень мікросекунд. Частота зарядної $f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi}$ складової залежить в основному від сумарного ємнісного струму мережі I_{Σ} та індуктивності джерела живлення $L_{ж}$ і лежить зазвичай у межах від кількох сотень герц до кількох кілогерц. Зарядна складова згасає протягом 3-5 мс.

Змішування нейтралі $u_N(0) \neq 0$ у момент виникнення пробую ізоляції може призвести до порушень початкових фазних співвідношень між перехідною напругою u_0 і перехідними струмами i_0 у приєднаннях об'єкта, що захищається.

У зв'язку з цим використання початкових фазних співвідношень між u_0 і i_0 в деяких умовах можуть призводити до зайвих спрацьовувань спрямованих імпульсних захистів від однофазних замикань на землю.

1.3.3. Вплив активних втрат у контурі нульової послідовності на перехідний процес при однофазному замиканні на землю

При замиканнях через великий перехідний опір необхідно враховувати вплив втрат у контурі нульової послідовності на співвідношення електричних величин перехідного процесу або значній відстані від шин джерела живлення до місця однофазного замикання землі. При збільшенні втрат в контурі нульової послідовності u_0 і i_0 , розрядні складові u_{0p} і i_{0p} , до того ж сумарні вільні складові $u_{0p} + u_{0z}$ і $i_{0p} + i_{0z}$ зберігають початкові співвідношення знаків такими ж, як і в втрат, а початковий знак зарядної складової струму i_{0z} може змінюватися на протилежний за незмінності початкового знака складової напруги u_{0z} . Збільшення втрат в ланцюзі струму однофазного замикання на землю не спотворює початкові фазні співвідношення між похідною du_0/dt і струмом i_0 але може істотно змінити співвідношення амплітуд розрядних і зарядних складових напруги і струму.

При збільшенні втрат відношення амплітуд складових напруги U_{0mp}/U_{0mz} зростає, а відношення амплітуд складових струмів I_{0mp}/I_{0mz} зменшується, але залишається істотно більше 1. Розрядна складова визначає амплітуду та початковий знак перехідного струму i_0 у разі малих втрат у контурі нульової послідовності, також при однофазному замиканні на землю через великий перехідний опір. Зарядні складові напруги u_{0z} і струму i_{0z} можуть зберігати коливальний характер навіть при значеннях R_{Π} , рівних десяткам Ом, проте амплітуда їх у напрузі u_0 і струмі i_0 зі зростанням опору R_{Π} різко зменшується. Частота зарядних коливань у цих умовах зростає і прагне до межі $\omega_{3max} = 1/\sqrt{L_2 \cdot C_2}$. Ця межа визначає частоту власних коливань мережі у режимі без однофазного замикання на землю. При відповідних параметрах частота розрядних коливань ω_p може бути навіть меншою, ніж частота зарядних

коливань ω_3 , отже частотний поділ зазначених складових струму та напруги перехідного процесу зазвичай неможливий.

Найпростішим способом забезпечення не спрацьовувань захисту від однофазних замикань на землю, які реагують на перехідні струми та напругу нульової послідовності, вважається застосування спеціального пускового органу по напрузі $3U_0$.

Вибір робочого спектру частот для пристроїв захищених від однофазних замикань на землю, заснованих на використанні перехідних процесів. Частоти струмів перехідного процесу при однофазному замиканні на землю можуть лежати в межах від десятків герц до сотень кілогерц. Високу стійкість функціонування пристроїв захисту від однофазних замикань на землю, які засновані на використанні електричних величин перехідного процесу в такому широкому діапазоні частот, дуже важко забезпечити, отже, доводиться обмежувати "верхню" межу робочого спектра частот. У цьому спектрі необхідно забезпечувати стійкість функціонування захисту від однофазних замикань на землю, які використовують для дії перехідний процес при внутрішніх пошкодженнях. Ця межа визначається, аналізуючи розподіл енергії між гармонійними складовими в "поточному спектрі" перехідною струму $i_0(t)$.

У "поточному спектрі" розподіл енергії неперіодичного коливання знаходиться рівністю Парсеваля:

$$E = \frac{1}{\pi} \int_0^t |S(\omega)|^2 dt, \quad (1.12)$$

де E - енергія коливання (при навантаженні в 1 Ом); $S(\omega)$ – спектр коливання $S(t)$.

Розглядаючи розподіл $|S(\omega)| = S(\omega)$ струму в інтервалі часу, зазвичай не перевищує кількох десятків мікросекунд, спостереження перехідного процесу вимірювальними органами захисту від однофазних замикань на землю, можна визначити смугу частот, в якій зосереджена основна частина енергії вхідного

сигналу. Аналіз, виконаний за рівняннями перехідного процесу для мережі з ізольованою нейтраллю при параметрах електричної мережі, що варіюються, і умов виникнення пробую ізоляції ($I_{c\Sigma} = 1/100\text{А}$, $\varphi = 0/90^\circ$, віддаленість точки однофазного замикання на землю від шин $l_3 = 0,1/10$ км, $R_{\Pi} = 0/100$ Ом та ін.), показав, що 80 – 90 % енергії вхідного сигналу $i_0(t)$ зосереджено смузі частот до 2 – 3 кГц. У зв'язку з цим при виконанні пристроїв захисту від однофазних замикань на землю, заснованих на використанні перехідного процесу, "верхня" робоча частота вимірювальних органів зазвичай обмежена значенням 2 - 3 кГц.

Висновки по першому розділу

Аналіз схеми мережі з однофазним замиканням на землю показав, що при замиканні однієї з фаз на землю напруга на двох інших підвищуються до міжфазних, тобто у $\sqrt{3}$ рази, а перехідний процес при однофазному замиканні на землю визначається параметрами:

U_B, U_C – потенціали шин фаз В та С;

$I'_{B\Sigma}, I'_{C\Sigma}$ – ємнісні струми від зовнішніх еквівалентних елементів;

I'_{Bl}, I'_{Cl} – ємнісні струми від фаз пошкодженої лінії;

I_l – ємнісний струм лінії, що захищається;

I'_Σ – результуючий ємнісний струм;

C_l – ємність лінії, що захищається;

C'_Σ – еквівалентна ємність інших елементів.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ У ЗАХИСТАХ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 6-10 кВ

У мережах, що розглядаються, як захист від ОЗЗ, що діє на сигнал або відключення, застосовуються два основних типи пристроїв, відповідно заснованих:

- на контролі значень і співвідношень різних складових встановленого струму і напруги нульової послідовності (промислої частоти, вищих гармонік, «накладених» струмів – штучно створюваних при ОЗЗ складових непромислової частоти);
- контролі значень і співвідношень електричних величин перехідного процесу, що виникає в момент пробною (першого і наступних) ізоляції фази мережі на землю.

Для пристроїв захисту першого типу струми і напруги електромагнітного перехідного процесу при ОЗЗ є перешкодами, що спотворюють значення та співвідношення контрольованих величин встановленого режиму ОЗЗ і надають значне вплив на динамічну стійкість їх функціонування. Для пристроїв другої групи електричні величини перехідного процесу є інформаційними сигналами.

До основних параметрів електричних величин перехідного процесу при ОЗЗ у мережах 6–10 кВ, що впливає на функціонування пристроїв захисту обох зазначених груп, відносяться:

- значення струмів та напруг перехідного процесу (амплітуди і інтегральні значення) і їх співвідношення;
- частотні характеристики перехідних струмів і напруг (спектр частот, амплітудно- частотні характеристики, енергетичні характеристики);
- фазові співвідношення електричних величин перехідних процесів.

Основними факторами, що впливають на значення та частоти перехідних струмів при ОЗЗ, являються: сумарний ємнісний струм мережі I_{CS} ,

індуктивність джерела живлення L_i , віддаленість l_3 місця ОЗЗ від шин джерела живлення, режим заземлення нейтралі мережі [5, 6].

Дослідження та оцінка параметрів електричних величин перехідного процесу при ОЗЗ в електричних мережах середньої напруги представляють важливе завдання, вирішення якого необхідно для підвищення технічного досконалості захистів від даного виду пошкоджень, насамперед стійкості функціонування при найбільш небезпечних дугових переривчастих (перемежуються) замикання на землю.

2.1 Методика дослідження та оцінки інформаційних параметрів електричних величин перехідного процесу під час ОЗЗ

Для визначення значень та оцінки діапазонів можливої зміни інформаційних параметрів електричних величин перехідного процесу при ОЗЗ і дослідження впливу на них зазначених вище факторів можуть бути використані:

- аналітичне рішення для рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ;
- математичне моделювання перехідних процесів при ОЗЗ на ЕОМ.

Імітаційне моделювання на ЕОМ являється найбільш потужним засобом кількісного аналізу перехідних процесів при ОЗЗ. Однак велике число факторів, що впливають на форму і значення перехідних струмів, і широкий діапазон зміни багатьох з них приводять до того, що з застосуванням методу імітаційного моделювання можливо проаналізувати лише обмежену частину з практично нескінченного числа розрахункових варіантів, відповідних конкретним поєднанням факторів що впливають. Ефективність імітаційного моделювання на ЕОМ можна суттєво підвищити, якщо з багатьох впливових факторів і їх поєднань попередньо наближеними аналітичними методами виділити основні та визначити потрібний діапазон їх зміни. Тому найкращим способом дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ у мережах 6–10 кВ представляється поєднання аналітичних методів вирішення розглянутої задачі на основі спрощеної моделі електричної мережі середньої

напруги та методу імітаційного моделювання на ЕОМ, який забезпечує можливості ускладнення та підвищення точності моделі.

2.2 Аналітичне визначення значень інформаційних параметрів електричних величин перехідного процесу при ОЗЗ у мережах напругою 6-10 кВ.

Практично всі відомі способи виконання та виготовлення пристроїв захисту від ОЗЗ засновані на використанні струму i_0 та напруги u_0 нульової послідовності. Аналітичні рішення для струму i_0 та напруги нульової послідовності при ОЗЗ можна отримати тільки для спрощеної моделі (схеми заміщення) електричної мережі. У той же час модель мережі повинна враховувати всі основні фактори, що впливають на форму і амплітуду вільних складових i_0 і u_0 . У [5, 6] показано, що цій вимозі в достатній мірі задовольняє схема заміщення електричної мережі середньої напруги, що враховує наявність в електричних величинах перехідного процесу при ОЗЗ двох основних частотних складових – розрядної (пов'язаної з розрядом ємностей пошкодженої фази) та зарядної (пов'язаної з підзарядом ємностей непошкоджених фаз) (рис. 2.1).

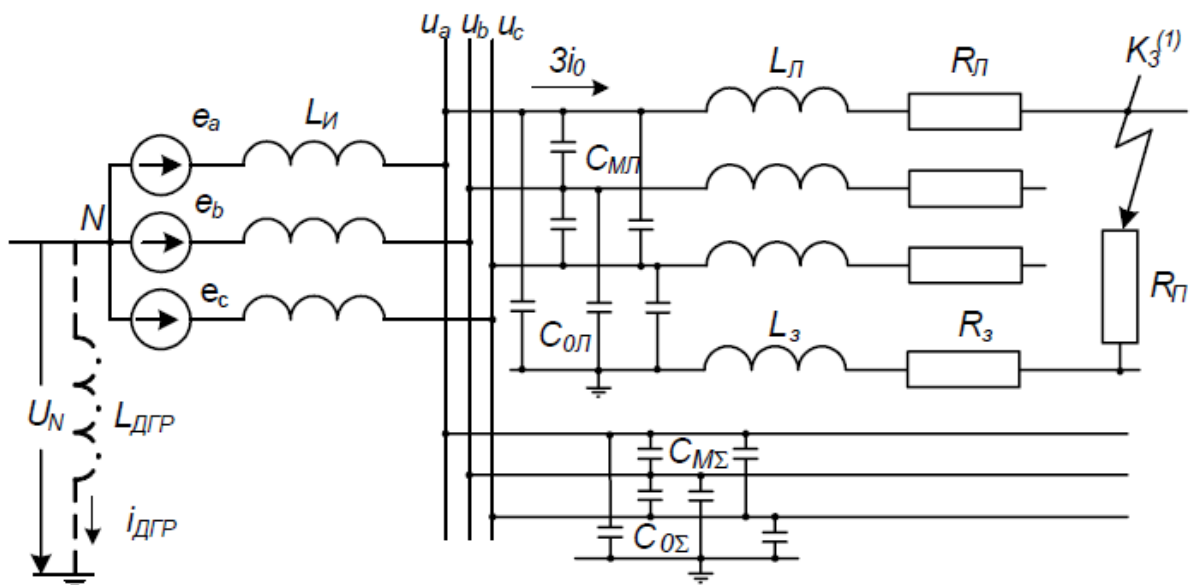


Рисунок 2.1 - Двочастотна схема заміщення радіальної мережі 6–10 кВ для аналізу перехідних процесів під час ОЗЗ

Для схеми заміщення мережі (рис. 2.1), що працює із ізольованою нейтраллю, для напруги нульової послідовності $u_0(t)$ можна отримати наступні рівняння [5, 6]:

$$u_0(t) = u_{np} + u_p + u_3 \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \sin(\omega_p t + \varphi_p) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_p t \right] - U_m a_2 e^{-\delta_3 t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_3 t \right]; \quad (2.1)$$

$$U_{mp} = U_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p}; \quad (2.2)$$

$$U_{m3} = U_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3}; \quad (2.3)$$

де u_{np} – вимушена складова перехідної напруги $u_0(t)$; u_p - розрядна складова напруги $u_0(t)$; u_3 - зарядна складова напруги $u_0(t)$; U_m - амплітуда складової напруги промислової частоти на пошкодженій фазі; $u_N(0)$ – напруга усунення нейтралі мережі в момент пробною ізоляції; ω_p – частота розрядних коливань; ω_3 – частота зарядних коливань; δ_p - постійна згасання розрядних коливань; δ_3 - постійна згасання зарядних коливань;

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}; \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\omega_3 \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_3 \sin \varphi};$$

$$a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

Частоти ω_p , ω_3 та постійні згасання δ_p , δ_3 розрядних та зарядних коливань визначаються з наступних рівнянь [1, 2]:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (2.4)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (2.5)$$

$$\delta_p = \alpha \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (2.6)$$

$$\delta_3 = \alpha \frac{\omega_3^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_3^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}, \quad (2.7)$$

де

$$\alpha_1 = R_1/L_1; \quad \omega_1^2 = 1/L_1 C_1; \quad \omega_2^2 = 1/L_2 C_2; \quad k_c = 1 + C_1/C_2; \quad L_1 = 3L_n + L_3; \quad C_1 = C_{0\Sigma} + C_{0n}; \\ R_1 = 3R_n + R_3 + 3R_n; \quad L_2 = 2L_i; \quad C_2 = 0,5[C_{0\Sigma} + C_{0n} + 3(C_{m\Sigma} + C_{ml})].$$

Перехідний струм ОЗЗ у місці ушкодження для мережі з ізольованою нейтраллю пропорційний похідній напруги $u_0(t)$:

$$3i_0 = -3C_1 du_0/dt = i_{np} + i_p + i_3 = 3C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_3 t + \theta_3); \quad (2.8)$$

$$I_{mp} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_p a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p^2 + \delta_p^2}; \quad (2.9)$$

$$I_{m3} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_3 a_2 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3^2 + \delta_3^2}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } \theta_{p,3} = \varphi_{p,3} + \arctg \frac{\delta_{p,3}}{\omega_{p,3}}.$$

У компенсованих мережах ДГР через свою силу інерційності практично не впливає на амплітуду і частоту розрядної і зарядної складових перехідного струму, тому параметри вільних складових струму і напруги наближено можуть бути визначені по (1)-(10).

При дугових уривчастих ОЗЗ пробій ізоляції при повторних пробоях виникає при більших, ніж амплітуда U_m , значеннях напруги, що призводить до пропорційного збільшення амплітуд розрядної та зарядної складових. Знаючи граничні значення напруги на ушкодженій фазі при повторних пробоях

ізоляції (наприклад, [7]), за виразами (2.8)–(2.10) можна визначити складові перехідного струму і при переривчастих дугових ОЗЗ.

2.3 Визначення амплітуди перехідних струмів під час ОЗЗ.

Амплітуди розрядної та зарядної складових перехідного струму нульової послідовності визначалися за рівняннями (2.9) (2.10). На рис. 2.2 наведені отримані за вказаними рівняннями струми перехідного процесу при ОЗЗ та його складові.

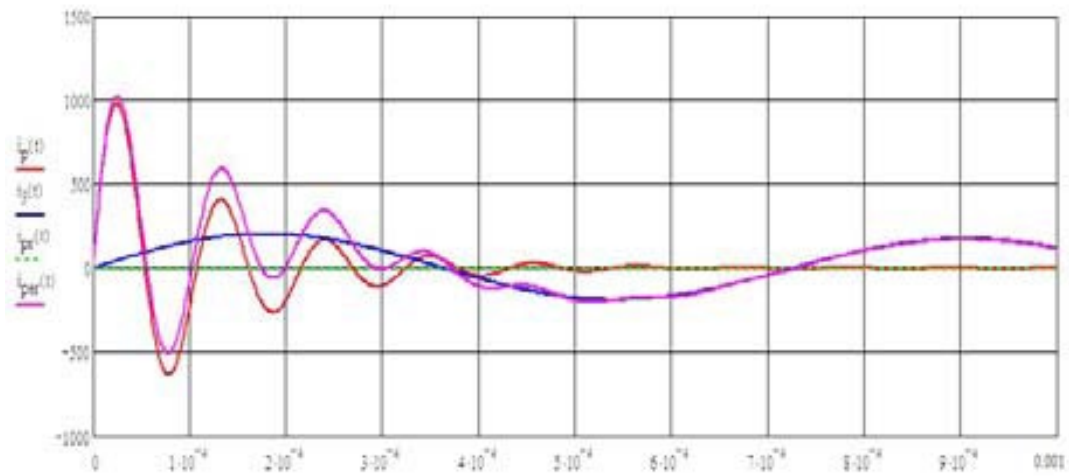


Рисунок - 2.2. Струми перехідного процесу при ОЗЗ у мережі 6 кВ з $I_{C\Sigma} = 30$ А при віддаленості місця ОЗЗ від шин $l_3 = 1$ км $\varphi = 900$: $i_p(t)$ - розрядна складова; $i_z(t)$ – зарядна складова; $i_{пр}(t)$ – вимушена складова; $i(t)$ – повний струм перехідного процесу

Аналіз отриманих струмів та складових (рис. 2.2) показує, що при малих втратах в контурі нульової послідовності мережі 6–10 кВ, коли розрядна складова перехідного струму $i_p(t)$ при ОЗЗ зберігає коливальний характер, $I_{mp} \gg I_{mz}$ та амплітуда повного перехідного струму I_m визначається в основному значенням I_{mp} і може бути визначено як значення струму $3i_0$ при $t = t_m \approx 1/4f_p$ за виразом (2.8).

Найбільш істотний вплив на амплітуду I_{mz} зарядної складової струму перехідного процесу має величина сумарного ємнісного струму мережі $I_{C\Sigma}$ та індуктивності джерела живлення Li (визначеної за значенням струму

трифазного КЗ на шинах), на амплітуду розрядної складової I_{mp} – величина $I_{c\Sigma}$ та індуктивність пошкодженої лінії від шин до місця пробою, тобто. віддаленість l_3 точки ОЗЗ від шин (рис. 2.3, 2.4).

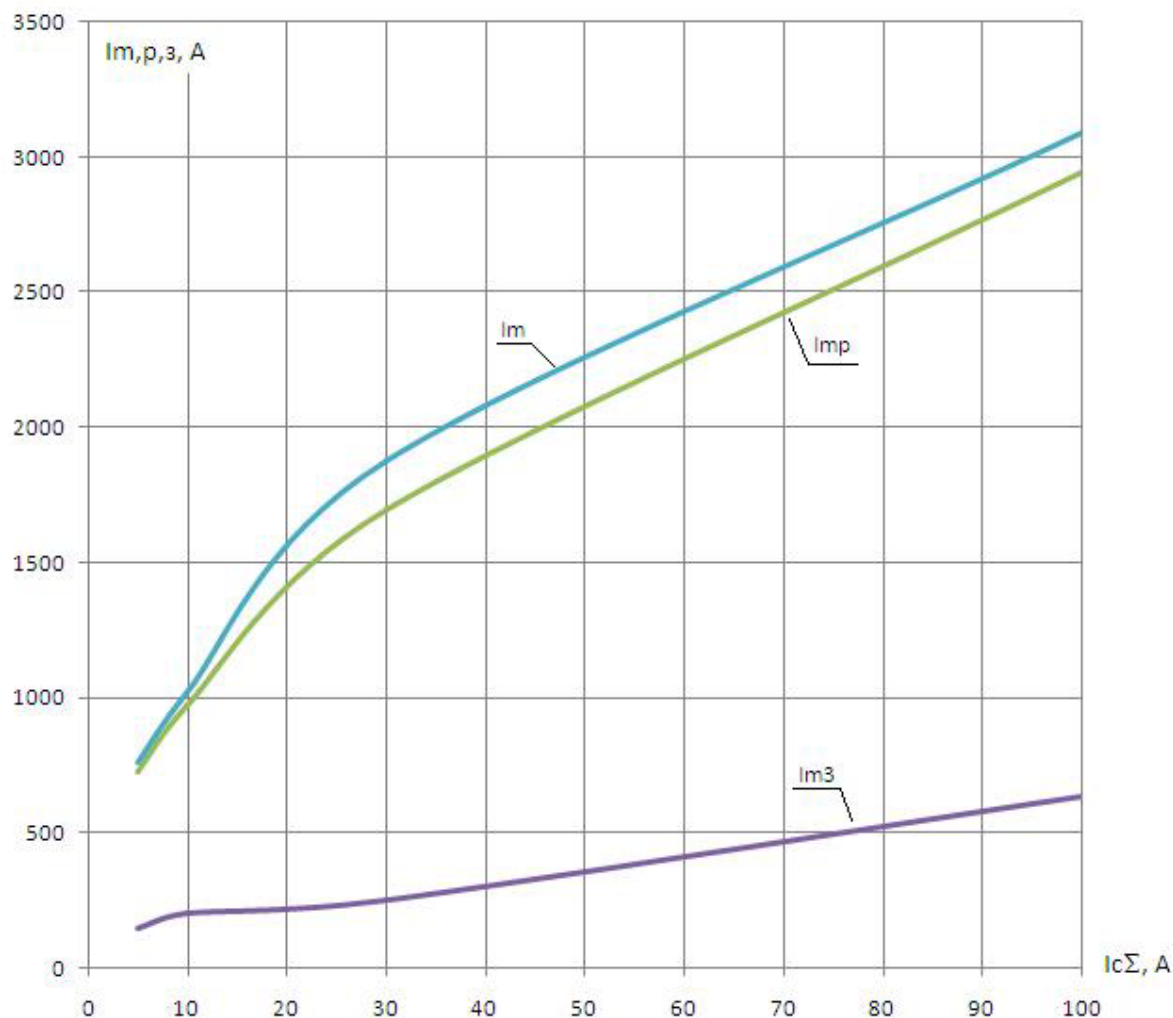


Рисунок 2.3 - Залежності амплітуд зарядної та розрядної складових та амплітуди повного струму від сумарного ємнісного струму $I_{c\Sigma}$ кабельної мережі напругою 6 кВ при $l_3 = 1$ км і $\varphi = 90^\circ$: I_{mp} - амплітуда розрядної складової перехідного струму; I_{m3} - амплітуда зарядної складової перехідного струму; I_m – амплітуда повного струму перехідного процесу

Розрахунки показали, що при зміні сумарного ємнісного струму мережі $I_{c\Sigma}$ від 5 до 100 А, струму трифазного КЗ на шинах джерела живлення від 5 до 20 кА і віддаленості місця ОЗЗ від шин від 0,1 до 10 км амплітуда розрядного струму I_{mp} і повного струму перехідного процесу I_m може змінюватися в межах від сотень ампер до 3 кА, амплітуда зарядного струму $I_{m3} \sim$ до 1 кА.

Результати, отримані аналітичним шляхом за рівняннями (2.1)–(2.10), були перевірені моделюванням на ЕОМ з урахуванням розподіленого характеру параметрів пошкодженої лінії для ідентичних розрахункових умов (параметри мережі та пошкодженої лінії): розбіжність результатів аналітичного розрахунку та моделювання на ЕОМ не перевищило ~5%.

Аналіз отриманих залежностей (рис.2. 4) показав, що при великих віддаленості l_3 місця ОЗЗ від шин амплітуди розрядної та зарядної складових перехідного струму стають сумірними.

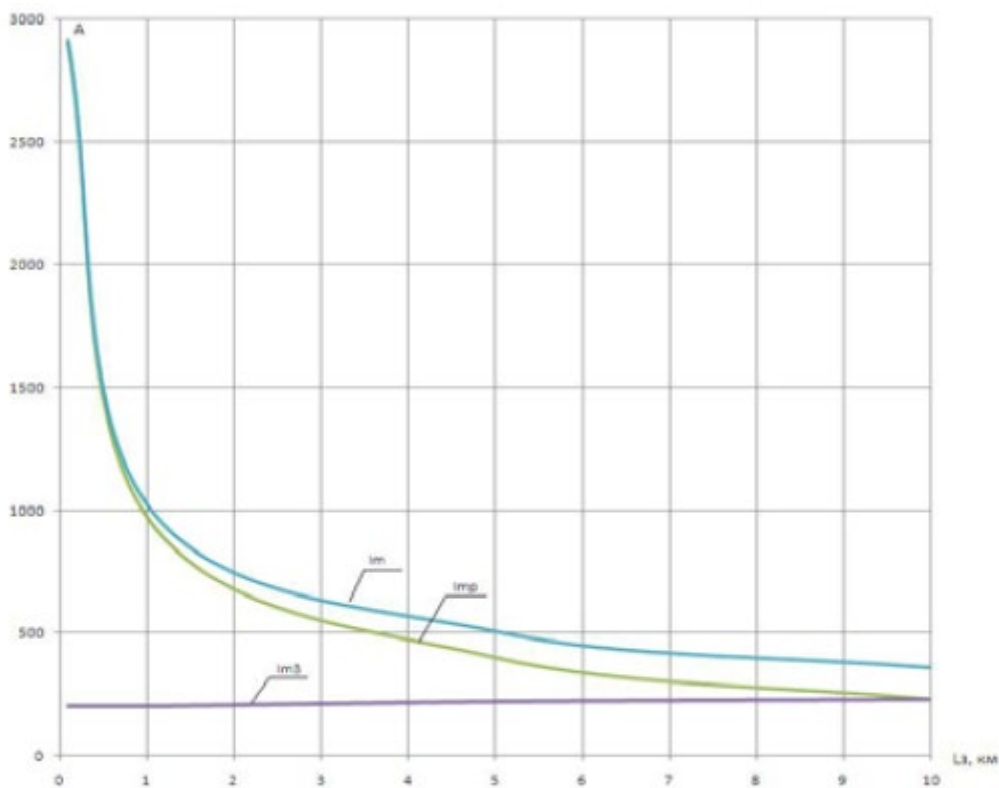


Рисунок 2.4 - Залежності амплітуд зарядної, розрядної складових та амплітуди повного струму від відстані l_3 до місця ушкодження в кабельній мережі 6 кВ при $I_{C\Sigma} = 30$ А та $\varphi = 90^0$: $I_{mп}$, $I_{mз}$, I_m - те, що і на рис. 2.3

Висновки по другому розділу

На функціонування різних виконань захисту від ОЗЗ електричних мереж середньої напруги 6–10 кВ істотно впливають значення струмів та напруг

електромагнітних перехідних процесів (амплітуди та інтегральні значення) та їх співвідношення, частотні характеристики перехідних струмів та напруг (спектр частот, амплітудно-частотні характеристики, енергетичні характеристики) та фазові співвідношення електричних величин перехідного процесу.

РОЗДІЛ 3

СПОСІБ ВИКОНАННЯ АДАПТИВНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 6–10 кВ З ІЗОЛОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Для захисту від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) – основного виду пошкоджень у розподільчих кабельних мережах середньої напруги 6–10 кВ – найбільш широке застосування отримали струмові захисту нульової послідовності (СЗНП) [7-9]. Відомо, що у початковій стадії пошкодження ізоляції в кабельних мережах із ізольованою нейтраллю більшість ОЗЗ має дуговий перемежований характер [11–13]. Відбудова від впливу перехідних процесів при дугових ОЗЗ струму спрацьовування призводить до зниження чутливості СЗНП при внутрішніх ОЗЗ і значне обмеження області її можливого застосування. Тому застосування традиційних виконань СЗНП обмежується приєднаннями, у яких власний ємнісний струм $I_{C_{\text{влас}}}$ не перевищує 15-20% від величини сумарного ємнісного струму мережі $I_{C_{\Sigma}}$ [8,9]. Частка приєднань з $I_{C_{\text{влас}}} > (0,15-0,2)I_{C_{\Sigma}}$ на центрах живлення (ЦЖ) кабельних мереж із ізольованою нейтраллю може становити до ~25–30 % і більше [9]. Недоліком СЗНП є також не завжди достатня чутливість при внутрішніх стійких ОЗЗ (СОЗЗ) через перехідний опір [10].

На приєднаннях, що мають $I_C \text{ собс} > 0,2I_{C_{\Sigma}}$, повинні застосовуватися струмові спрямовані захисту нульової послідовності (ССЗНП), умови селективності яких при зовнішніх та чутливості при внутрішніх ОЗЗ, на відміну від СЗНП, не обмежені відносними значеннями власного ємнісного струму $I_{C_{\text{влас}}}$ приєднання, що захищається. Однак зазначені переваги ССЗНП забезпечуються переважно при СОЗЗ. За даними експлуатації деякі виконання ССЗНП поводяться незадовільно при дугових ОЗЗ через можливі перехідні режими порушень фазних співвідношень між напругою $U_0(t)$ та струмом $I_0(t)$ нульової послідовності [8, 10]. Недоліком спрямованих захистів від ОЗЗ є також відмови їх функціонування через можливі в реальних умовах

експлуатації помилок у полярності підключення вторинних ланцюгів кабельних трансформаторів струму нульової послідовності.

Тому вдосконалення ненаправлених струмових захистів від ОЗЗ є актуальним завданням насамперед для ЦЖ кабельних мереж середньої напруги. Однією з перспективних напрямів розв'язання завдання є застосування адаптивних струмових захистів від ОЗЗ.

Методи дослідження. При аналізі особливостей функціонування традиційних та розроблених адаптивних струмових захистів з урахуванням складності перехідних процесів при дугових замиканнях на землю в кабельних мережах середньої напруги в роботі застосовувалося імітаційне моделювання в системі Matlab з пакетами розширення SimPowerSystem і Simulink. Дослідження алгоритмів функціонування адаптивних струмових захистів від ОЗЗ проводились на імітаційних моделях кабельних мереж 6–10 кВ, які враховують основні особливості конфігурації та розподілений характер параметрів кабельних ліній.

3.1 Спосіб дії традиційного адаптивного струмового захисту нульової послідовності.

Відомі пропозиції щодо принципів виконання адаптивних СЗНП, наприклад [14, 15], для мереж 6–10 кВ призначені в першу чергу для підвищення чутливості при внутрішніх СОЗЗ через перехідний опір. Адаптивні властивості таких захистів забезпечуються автоматичною зміною уставки струму спрацьовування залежно від поточного значення коефіцієнта повноти замикання на землю:

$$I_{0\text{ с.з}}(t) = K_{\text{від}} b_0(t) I_{C\text{ влас}} , \quad (3.1)$$

де $K_{\text{від}}$ - коефіцієнт відбудови, що враховує похибки функціонування захисту; $I_{C\text{ влас}}$ - власний ємнісний струм приєднання, що захищається; $b_0(t)$ – поточне значення коефіцієнта повноти ОЗЗ, що визначається відношенням поточного значення напруги нульової послідовності $U_0(t)$ до номінальної

фазної напруги мережі $U_{\phi \text{ ном}}$ або до поточного значення фазної напруги $U_{\phi}(t)$ [14, 15]:

$$b_0(t) = U_0(t) / U_{\phi \text{ ном}}, \quad (3.2)$$

або

$$b_0(t) = U_0(t)/U_{\phi}(t). \quad (3.3)$$

Варіант структурно-функціональної схеми традиційної адаптивної СЗНП, в якому $b_0(t)$ визначається (3.2), представлений на рис. 3.1.

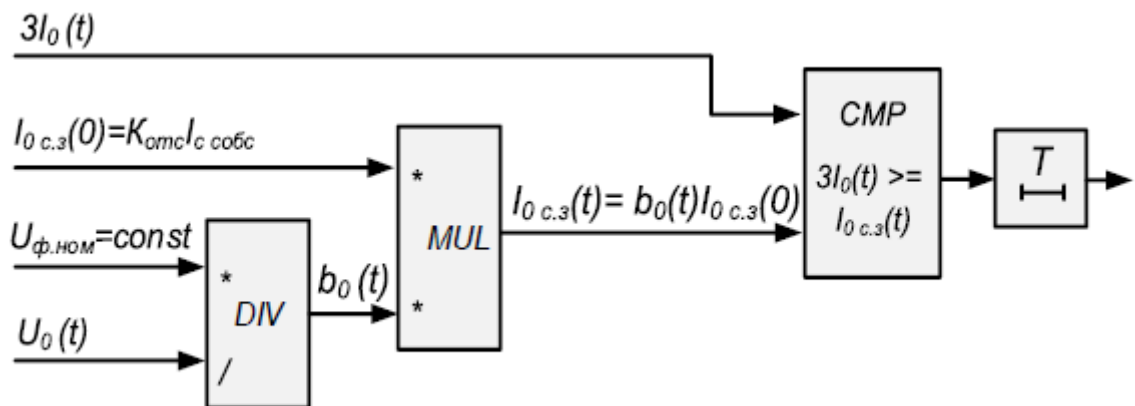


Рисунок 3.1- Схема традиційної адаптивної СЗНП: *DIV* – блок розподілу, на виході якого формується поточне значення коефіцієнта повноти замикання; *MUL* – блок множення, виході якого формується поточне значення уставки $I_{0 \text{ с.з}}(t)$; *CMP* – схема порівняння поточного значення впливає величини $I_0(t)$ зі уставкою; $U_{\phi.ном}$ - номінальна фазна напруга мережі; *T* – тимчасова затримка на спрацювання.

Початкове значення уставки спрацьовування струму $I_{0 \text{ с.з}}(0)$ визначається за виразом (3.1) при $b_0(t) = 1$, тобто. вибирається з умови відбудови від зовнішніх ЗОЗЗ без урахування впливу перехідних процесів за дугових замикань.

Як правило, значення струму $3I_0$ при дугових переміжних ОЗЗ (ДПОЗЗ) змінюється значно більшою мірою, ніж значення напруги $3U_0$, тобто. коефіцієнт повноти замикання, що визначається за (3.2) або (3.3), для стадій ЗОЗЗ та ДПОЗЗ має різні значення. Тому при зовнішніх дугових ОЗЗ

розглянутий спосіб регулювання уставки адаптивної СЗНП по струму спрацьовування (3.1) у загальному випадку не дозволяє забезпечити динамічну стійкість її функціонування.

На рис. 3.2 як приклад наведені отримані на імітаційній моделі кабельної мережі 6 кВ з $I_{\Sigma} = 5$ А осцилограми, що ілюструють зміну середньоквадратичного значення струму $3I_{0\text{неп}}(t)$ у неушкодженому приєднанні з власним ємнісним струмом $I_{\text{Свлас}} = 0,2 b_0(t)$ та поточної адаптивної уставки СЗНП $I_{0\text{с.з}}(t)$ при складному дуговому ОЗЗ, що переходить у металеве стійке замикання, а потім в СЗЗ через великий перехідний опір.

Аналіз осцилограм (рис. 3.2) показує, що запропоновані в [14, 15] способи виконання адаптивної СЗНП забезпечують необхідне співвідношення між величиною, що впливає, і уставкою ($I_{0\text{уст}}(t) > 3I_{0\text{неп}}(t)$) тільки на стадії СОЗЗ.

Для забезпечення стійких неспрацювань захисту на дуговій стадії ОЗЗ початкову уставку по струму спрацьовування $I_{0\text{с.з}}(0)$ адаптивної СЗНП на основі способів, що розглядаються, необхідно збільшити, вибираючи її за виразом

$$I_{0\text{с.з}}(0) \geq K_{\text{від}} K_{\text{пер}} I_{\text{Свлас}}, \quad (3.4)$$

де $K_{\text{пер}} > 1$ - коефіцієнт, що враховує збільшення струму в перехідних режимах при дугових ОЗЗ.

Необхідна забезпечення стійких неспрацювань адаптивного струмового захисту на стадії ДПОЗЗ ступінь збільшення уставки $I_{0\text{с.з}}(0)$, тобто. значення коефіцієнта $K_{\text{пер}}$ може досягати 4–5.

З урахуванням (3.4) умова застосування адаптивної СЗНП на аналізованому принципі при стійких ОЗЗ матиме такий самий вид, як і для звичайної СЗНП [9]:

$$I_{\text{Свлас}}^* = I_{\text{Свлас}} / I_{\text{с}} \square \leq 1 / (1 + K_{\text{від}} K_{\text{пер}} K_{\text{ч.мін}}), \quad (3.5)$$

де $K_{\text{ч.мін}}$ – мінімально допустиме значення коефіцієнта чутливості для струмових захистів від ОЗЗ.

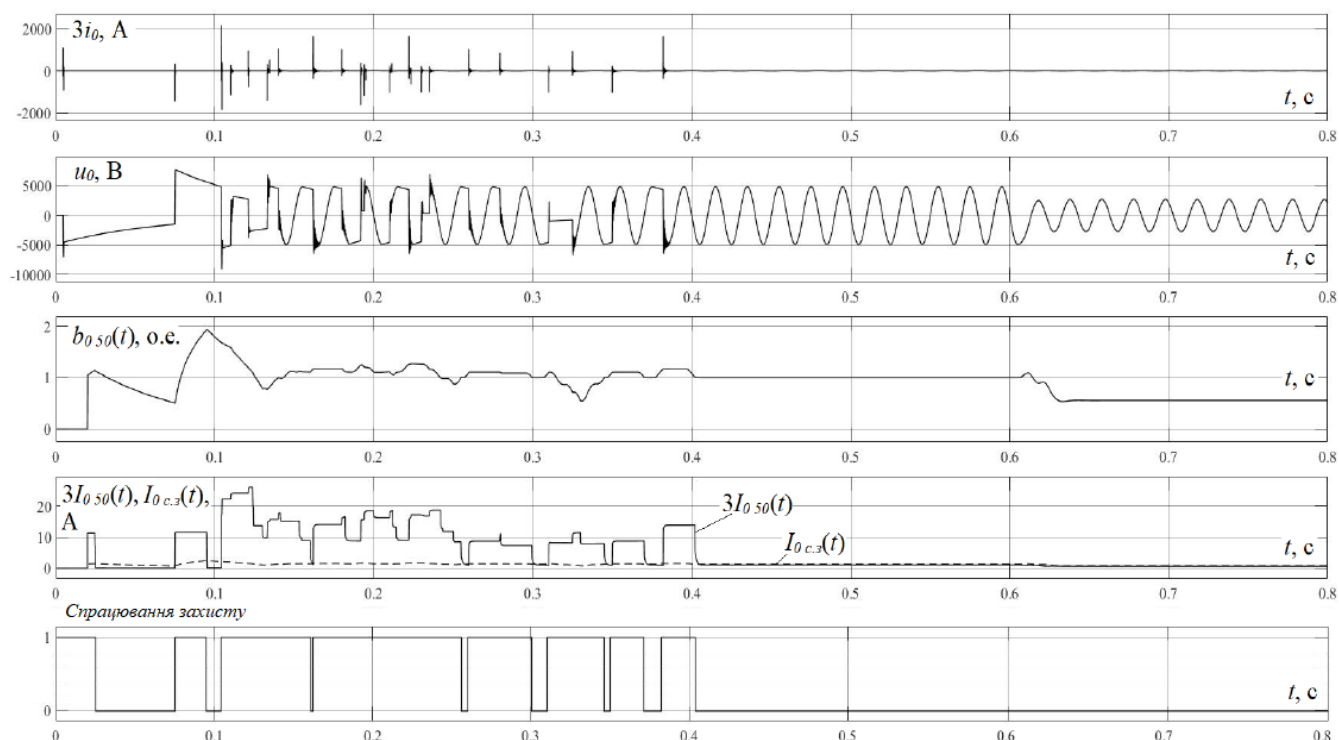


Рисунок 3.2 - Розрахункові осцилограми, що ілюструють особливості функціонування традиційної адаптивної СЗНП при зовнішньому дуговому ОЗЗ, що переходить у стійке замикання (металевий, а потім через великий перехідний опір), в мережі 6 кВ з $I_{C\Sigma} = 5$ А на приєднанні з власним ємнісним струмом $I_{C \text{ влас}} = 0,2I_{C\Sigma}$

Згідно (3.5), необхідність збільшення уставки $I_{0.c.з}(0)$ у $K_{\text{пер}}$ вкотре значно обмежує область можливого застосування адаптивного струмового захисту на основі аналізованих способів у кабельних мережах 6-10 кВ, що працюють із ізольованою нейтраллю. Зазначимо також, що розглянуті вище способи виконання адаптивної СЗНП [14, 15] не отримали практичного застосування в кабельних мережах 6–10 кВ.

3.2 Спосіб дії адаптивної СЗНП, що базується на використанні складових основної частоти 50 Гц.

В [9] показано, що в кабельній мережі 6–10 кВ з ізольованою нейтраллю для миттєвих значень складових основної частоти 50 Гц струму нульової

послідовності $3i_{0\ 50}(t)$ у місці ОЗЗ та нульової напруги послідовності $u_{0\ 50}(t)$ на шинах джерела живлення виконується співвідношення

$$3i_{0\ 50}(t) \approx 3C_{0\Sigma}\omega u_{0\ 50}(t),$$

де $3C_{0\Sigma}$ – сумарна ємність фази мережі на грішну землю; ω – кутова частота мережі.

Відповідно до (3.6), у будь-яких режимах ОЗЗ поточне середньоквадратичне значення складової робочої частоти струму нульової послідовності в місці замикання пов'язано з поточним середньоквадратичним значенням складової робочої частоти напруги нульової послідовності співвідношенням

$$3I_{0\ 50}(t) \approx 3C_{0\Sigma}\omega U_{0\ 50}(t) . \quad (3.7)$$

З урахуванням (3.7) для середньоквадратичних значень складової робочої частоти 50 Гц струмів нульової послідовності неушкоджені $3i_{0\text{неп}}(t)$ і пошкоджені $3i_{0\text{пов}}(t)$ приєднаннях, що використовуються в цифрових струмових захистах як впливає величини, отримаємо:

$$3I_{0\ \text{неп}}(t) \approx 3C_{0\ \text{влас}}\omega U_{0\ 50}(t) ; \quad (3.8)$$

$$3I_{0\ \text{пов}}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0\ \text{влас}})\omega U_{0\ 50}(t) . \quad (3.9)$$

Поточне значення коефіцієнта повноти замикання на землю для складової робочої частоти нульової напруги послідовності можна визначити так:

$$b_{0\ 50}(t) = U_{0\ 50}(t) / U_{\text{ф.ном}} . \quad (3.10)$$

З урахуванням (3.10) із (3.8) і (3.9) одержимо:

$$3I_{0\ \text{неп}}(t) \approx 3C_{0\ \text{влас}}\omega b_{0\ 50}(t)U_{\text{ф.ном}} = b_{0\ 50}(t) \cdot I_{C\ \text{влас}} ; \quad (3.11)$$

$$3I_{0\ \text{пов}}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0\ \text{влас}})\omega b_{0\ 50}(t) \cdot U_{\text{ф.ном}} = b_{0\ 50}(t) \cdot (I_{C\Sigma} - I_{C\ \text{влас}}) . \quad (3.12)$$

На основі співвідношень (3.11) і (3.12) може бути отриманий максимальний струмовий захист від ОЗЗ для некомпенсованих кабельних

мереж 6-10 кВ, що забезпечує адаптивність до впливу як перехідного опору у місці ушкодження, а й перехідних струмів при дугових замиканнях на землю.

Поточне значення уставки струму спрацьовування запропонованої адаптивної СЗНП для забезпечення неспрацювань при зовнішніх стійких та дугових ОЗЗ має формуватися відповідно до виразу

$$I_{0\text{с.з}}(t) \geq K_{\text{отс}} b_{050}(t) I_{\text{свлас}}. \quad (3.13)$$

Так як запропонований захист забезпечує адаптивність до впливу перехідних процесів при дугових ОЗЗ, умова її застосування визначається виразом (3.5) при $K_{\text{пер}} = 1$. При значеннях коефіцієнтів $K_{\text{отс}} = 1,5$, $K_{\text{ч.мін}} = 1,25$ (для захисту від ОЗЗ з дією на сигнал), $K_{\text{пер}} = 1$ з (3.5) отримуємо, що адаптивна СЗНП може застосовуватися на приєднання з відносним значенням власного ємнісного струму $I_{\text{свлас}} \leq 0,35$. За даними [11], умовою $I_{\text{свлас}^*} \leq 0,35$ на ЦЖ кабельних мереж 6-10 кВ задовольняє більше 90 % усіх приєднань, на розподільних підстанціях та трансформаторних пунктах кабельних мереж 6–10 кВ систем промислового електропостачання – 100% приєднань.

3.3 Структурно-функціональна схема та принцип дії адаптивної СЗНП на основі складових робочої частоти 50 Гц.

На рис. 3.3 представлена структурно-функціональна схема адаптивної струмового захисту, заснованого на використанні складових, що становлять робочої частоти 50 Гц.

На рис. 3.4 наведені отримані на імітаційній моделі кабельної мережі 6 кВ з $I_{\text{СΣ}} = 5$ А, що працює із ізольованою нейтраллю, осцилограми, що ілюструють зміну середньоквадратичного значення струму $3I_{0\text{неп}}$ неушкодженому приєднанні з власним ємнісним струмом $I_{\text{свлас}} = 0,2I_{\text{СΣ}}$, величини коефіцієнта повноти замикання за складовою робочої частоти напруги нульової послідовності $b_{050}(t)$ та поточної уставки адаптивної СЗНП $I_{0\text{с.з}}(t)$ при складному дуговому ОЗЗ, що переходить у металеве стійке замикання, а потім в СОЗЗ через великий перехідний опір.

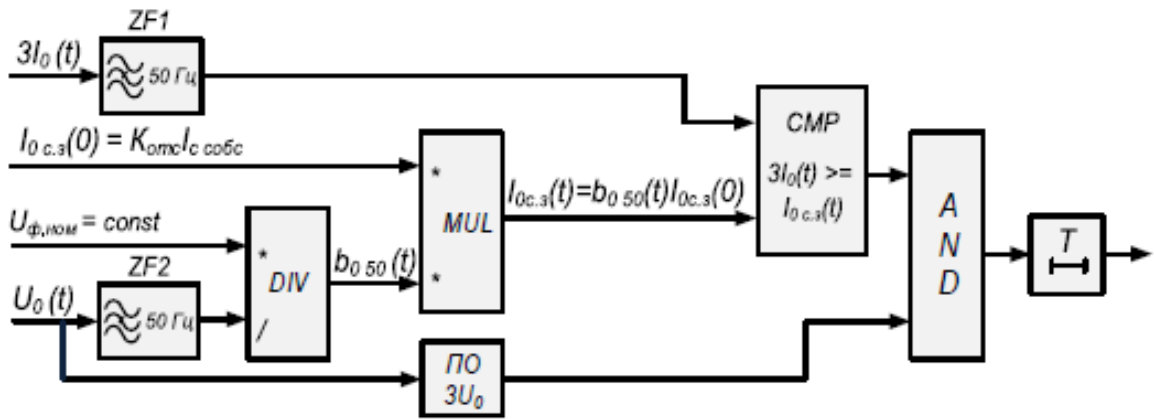


Рисунок 3.3 - Схема адаптивного струмового захисту, заснованого на використанні складових робочої частоти 50 Гц: *DIV*, *MUL*, *CMP*, *T* – те саме, що й на рис. 3.2; *ZF1*, *ZF2* – фільтри, що виділяють із вхідних величин $3i_0$ та u_0 складову робочої частоти 50 Гц; $3U_0$ – пусковий орган з напруги нульової послідовності, призначений для відбудови пристрою захисту від перехідних процесів, пов'язаних з комутаційними перемиканнями в мережі, що захищається; *AND* – логічний елемент «І» для дозволу дії захисту лише при спрацьовуванні $3U_0$.

Аналіз осцилограм, наведених на рис. 3.4, 3.5, показує, що за будь-якої зміни впливу величини (середньоквадратичного значення складової робочої частоти струму $3I_{0\ 50}$), обумовлених як впливом перехідного опору при СОЗЗ, і впливом перехідних струмів при замиканнях через переміжну дугу, автоматично забезпечується як необхідний рівень відбудови захисту від зовнішніх ОЗЗ ($I_{0\ c.з}(t)/3I_{0\ 50}(t) \geq K_{отс}$ – рис. 3.4, криві 3, 4), так і необхідний рівень чутливості при внутрішніх ОЗЗ ($3I_{0\ 50}(t)/I_{0\ c.з}(t) \geq K_{ч.мін}$ – рис. 3.5, криві 3, 4).

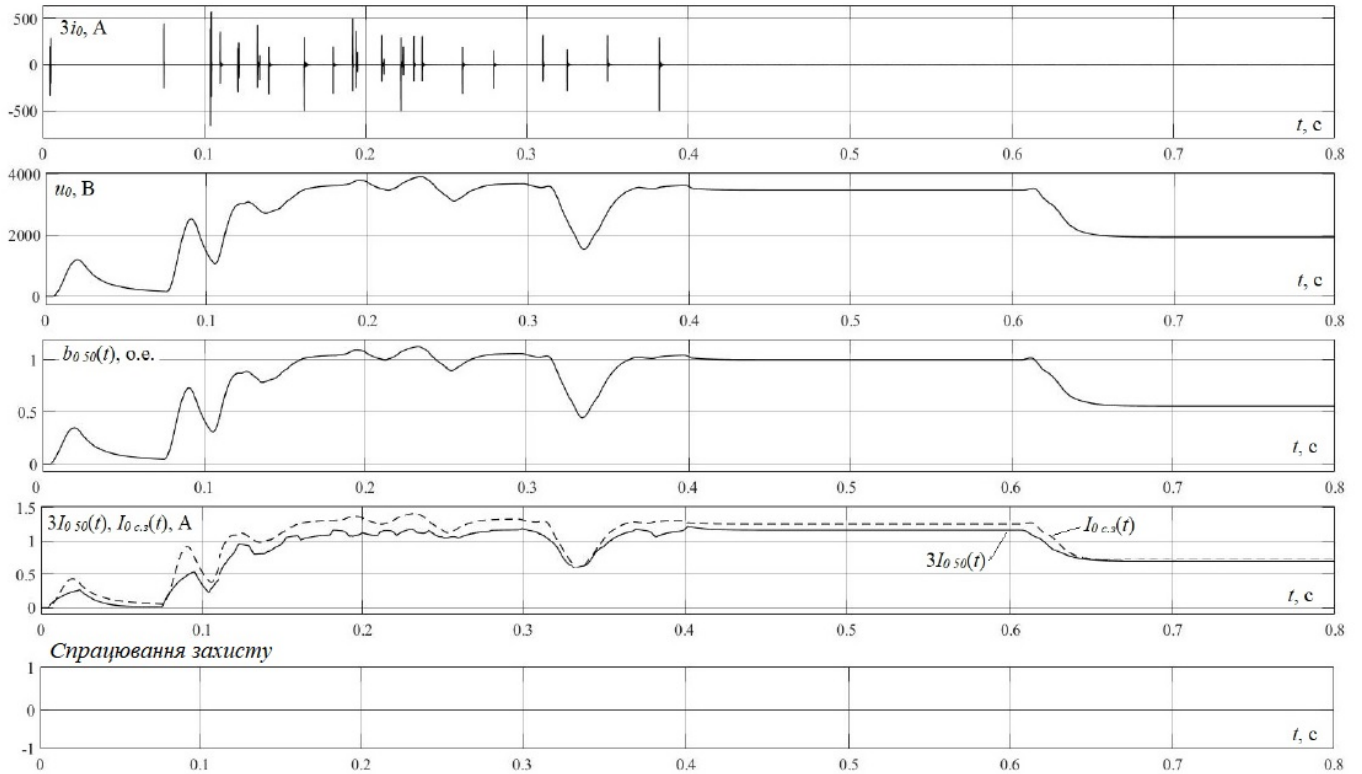


Рисунок 3.4 - Розрахункові осцилограми, що ілюструють функціонування розробленої адаптивної СЗНП при зовнішньому складному дуговому ОЗЗ, що переходить у стійке замикання (металевий, а потім через великий перехідний опір), в мережі 6 кВ з $I_{C\Sigma} = 5$ А на приєднанні з власним ємнісним струмом $I_{Cвлас} = 0,2I_{C\Sigma}$

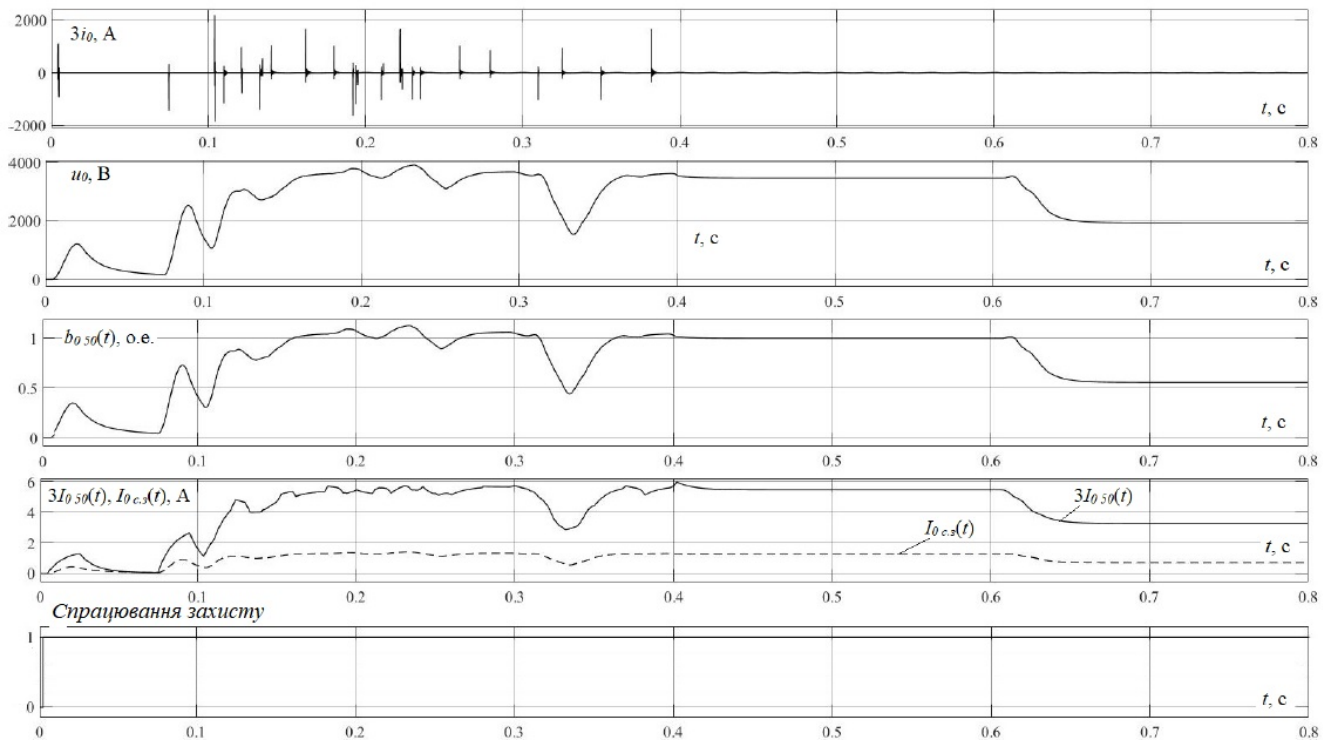


Рисунок 3.5 - Розрахункові осцилограми, що ілюструють функціонування розробленої адаптивної СЗНП при внутрішньому складному дуговому ОЗЗ, що переходить у стійке замикання (металеве, а потім через великий перехідний опір), у мережі 6 кВ з $I_{C\Sigma} = 5$ А на приєднанні з власним ємнісним струмом $I_{C_{влас}} = 0,2I_{C\Sigma}$.

Висновки по третьому розділу

Відомі способи виконання адаптивного струмового захисту від ОЗЗ, засновані на використанні повного струму та напруги нульової послідовності, не дозволяють забезпечити високу стійкість функціонування в кабельних мережах із ізольованою нейтраллю при замиканнях через дугу, що перемежується.

ВИСНОВКИ

На основі рішення рівнянь перехідного процесу при ОЗЗ для спрощеної двочастотної схеми заміщення мережі 6–10 кВ отримано аналітичні вирази для розрахунку середньоквадратичного значення перехідного струму при одноразовому пробію ізоляції та при дугових уривчастих ОЗЗ за теоріями Петерсена та Петерса та Сліпяна.

Розрахунки за отриманими аналітичними виразами, перевірені моделюванням на ЕОМ, показали, що навіть при одноразовому пробію ізоляції в мережах 6–10 кВ середньоквадратичне (ефективне) і середньовипрямлене значення контрольованого захистом струму може збільшуватися в 5–10 разів у порівнянні з режимом замикання, що зумовився суттєвим впливом перехідних процесів на стійкість функціонування СЗНП та інших захистів від ОЗЗ.

При дугових переміжних ОЗЗ середньоквадратичне (ефективне) і середньовипрямлене значення контрольованого захистом струму може збільшуватися в 10-15 разів порівняно з режимом замикання, що призводить до необхідності значного закруглення більшості виконань СЗНП, обмеження їх чутливості і області можливого застосування.

Запропонований спосіб виконання адаптивного струмового захисту від ОЗЗ на основі складових робочої частоти 50 Гц струму та напруги нульової послідовності дозволяє не тільки збільшити чутливість до замикань через великий перехідний опір, а й забезпечити високу динамічну стійкість функціонування при зовнішніх і внутрішніх дугових замиканнях, що перемежуються.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Батулько, Д. В. Визначення пошкодженої повітряної лінії з однофазним замиканням на землю в мережі з ізольованою нейтраллю: дис... канд техн наук / Д. В. Батулько – Київ 2007 – 165 с.
2. Замикання на землю в лініях електропередачі 6-35 кВ Особливості виникнення та прилади захисту - <https://refdb.ru/look/1650603-pall.html>
3. Шуїн, В.А. Бібліотечка електроніка – додаток до журналу «Електронік»: Захисту від замикань на землю в електричних мережах 6-10 кВ / В.А. Шуїн, А.В. Гусенків. - М: НТФ «Енергопрес». «Енергетик».2006. - 103 с.
4. Режими роботи нейтралі електроустановок напругою 0,4-750 кВ: навчально-методичний посібник / укл. Л.Є. Паперний, М.В. Алейнікова. За загальною редакцією Л.Є. Паперного. - Мінськ БНТУ. 2016. - 150 с.
5. Шуїн В.А. Початкові фазові співвідношення електричних величин перехідного процесу при замиканнях на грішну землю в кабельних мережах 6–10 кВ // Електрика. - 1991. - № 10. - С. 58-61.
6. Шуїн В.А. Теорія та практична реалізація захист від однофазних замикань на землю, заснованих на використанні перехідних процесів, в електричних мережах 3–35 кВ: дис. ... д-ра техн. наук. - М.: ВНДІЕ, 1994.
7. Лихачов Ф.А. Замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю та з компенсацією ємнісних струмів. - М.: Енергія, 1971.
8. Федосєєв А.М. релейний захист електричних систем. - М.: Енергія, 1976. - 560 с.
9. Андрєєв В.А. Релейний захист та автоматика систем електропостачання. - М.: Вищ. шк., 2006. - 639 с.
10. Шабад М.А. Розрахунки релейного захисту та автоматики розподільчих мереж. - СПб.: ПЕШК, 2003. - 350 с.
11. Лихачов Ф.А. Замикання на землю в мережах із ізольованою нейтраллю та з компенсацією ємнісних струмів. - М.: Енергія, 1971. - 152 с.
12. Дударєв Л.Є., Запорожченко С.І., Лук'янцев Н.М. Дугові замикання на землю в кабельних мереж // Електричні станції. - 1971. - № 8. - С. 64-66.

13. Захист мереж 6–35 кВ від перенапруг / Ф.Х. Халілов, Г.А. Євдокунін, В.С. Поляків та ін; за ред. Ф.Х. Халілова, Г.А. Євдокуніна, А.І. Таджибаєва. - СПб.: Вища школа, 2002. - 272 с.

14. Захист мереж 6–35 кВ від перенапруг / Ф.Х. Халілов, Г.А. Євдокунін, В.С. Поляків та ін; за ред. Ф.Х. Халілова, Г.А. Євдокуніна, А.І. Таджибаєва. - СПб.: Вища школа, 2002. - 272 с.

15. Оцінка чутливості струмових захистів від замикань на землю у кабельних мережах 6–10 кВ / М.С. Аль-Хоміді, О.А. Добрягіна, Є.С. Шагуріна та ін // Вісник ІДЕУ. - 2016. - Вип. 3. - С. 50-55.