

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Розробка системи захисту електричних мереж при однофазному
пошкодженні дроту трифазної системи електропостачання
з боку споживача**

Виконав: студент групи ЕЕМ-20

Олександр КОГАН

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КОГАН Олександр Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка системи захисту електричних мереж при однофазному пошкодженні дроту трифазної системи електропостачання з боку споживача

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є підвищення рівня надійності, безпеки експлуатації і ефективності використання за призначенням розподільних мереж шляхом застосування автоматичного замикання пошкодженої фази
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Стан проблеми і задачі дослідження; II. Вдосконалення методу захисного шунтування однофазних пошкоджень електроустановок.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Класифікація ОЗЗ в залежності від умов виникнення і наступного існування; II. Форма струму при замиканні; III. Дослідження стійкості горіння дуги при ОЗЗ; IV. Схеми і вирази для розрахунку електричних величин в обмотках споживачів; V. Електричні величини при шунтуванні в ненавантажених лініях. -

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Загальна характеристика мережі	10.05.24
2	Види та динамічні характеристики однофазних замикань на землю	17.05.24
3	Аналіз умов стійкості дугових однофазних замикань на землю	19.05.24
4	Теоретичне обґрунтування методу захисного шунтування однофазних замикань на землю	24.05.24
5	Ефективність шунтування мережі при виникненні однофазного замикання на землю	31.05.24
6	Дослідження відновлення ізоляції	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олександр КОГАН
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Стан проблеми і задачі дослідження.....	10
1.1. Загальна характеристика розподільної мережі та її навантаження, як об'єкта дослідження.....	10
1.2. Види та динамічні характеристики однофазних замикань на землю ...	12
1.3. Аналіз умов стійкості дугових однофазних замикань на землю	16
1.4. Аналіз параметрів та електричних величин при однофазних замикань на землю в обмотках двигунів і трансформаторах	20
1.5. Метод визначення параметрів і значень величин при однофазних замиканнях на землю в розподільних мережах	26
Розділ 2. Вдосконалення методу захисного шунтування однофазних пошкоджень електроустановок.....	30
2.1. Теоретичне обґрунтування методу захисного шунтування однофазних замикань на землю електроустановок.....	30
2.2. Дослідження характеристик значень електричних величин при шунтуванні однофазних замикань на землю.....	32
2.3. Визначення значень електричних величин при шунтуванні замикань в ненавантажених лініях.....	35
2.4. Дослідження струмів при шунтуванні однофазних замикань на корпус в обмотках споживачів електроенергії	42
2.5. Ефективність шунтування розподільної мережі при виникненні однофазного замикання на землю на початку, всередині та в кінці лінії ...	47
2.6. Вплив зниження втрат напруги в лініях на захисні властивості шунтування	51

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

2.7. Дослідження відновлення ізоляції в місці виникнення однофазного замикання на землю при шунтуванні.....	55
2.8. Організаційні та технічні заходи забезпечення електробезпеки при шунтуванні.....	58

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Надійність роботи системи електропостачання багато у чому залежить від ефективності дії апаратів для захисту та припинення аварійних режимів роботи обладнання.

Енергетичні процеси у системах живлення які протікають при виникненні ушкоджень лінії електропостачання впливають на швидкість їх протікання.

Зазначені положення необхідно враховувати при розгляді перехідних процесів у сучасних системах живлення.

Електричні параметри кабельних ліній мають бути враховані при розгляді можливості функціонування системи електропостачання у аварійних режимах.

До найбільш розповсюджених проявів аварійних режимів можна віднести однофазні замикання на землю у системах електропостачання на усіх рівнях її використання.

Так більшість розглянутих аварій свідчать про важливість встановлення ефективного захисту при виникненні однофазних замикань у мережі живлення.

Номенклатура використовуваного обладнання на протязі проведення допоміжних розрахунків та визначення проявів ушкодження від режимів аварії може бути застосована не при усіх випадках розглянутих перехідних процесів.

Системи генерування електричної енергії та їх спроможність забезпечити надійним живленням споживачів багато у чому залежить від якості розрахунків подібних режимів та застосування ефективних методів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щодо їх припинення та врегулювання параметрів живлячої електроустановки мережі.

У значній мірі швидкість протікання перехідних процесів у енергосистемі буде залежати від рівню навантаження та вибору апаратів захисного відключення.

Також слід враховувати тип мережі електропостачання та її функціонування.

Звичайно кабельні лінії мережі живлення та магістральні повітряні лінії мають різну за характером типічність ушкоджень, що теж має бути враховано.

Короткі замикання на землю навіть в однофазному їх прояві супроводжуються значними значеннями струмів їх протікання що відбивається на функціонуванні обладнання а також є дуже небезпечним для людини.

Більшість методів щодо захисту від таких проявів зводяться до зниження цих струмів або зменшенню часу їх ефективної дії при виникненні аварійної ситуації.

Одним з ефективних методів що реалізує таку стратегію є метод автоматичного захисного шунтування.

При цьому однофазні замикання на землю можна розділити на окремі групи:

- з виникненням електричної дуги;
- без виникнення електричної дуги.

Висновок щодо протікання перехідних процесів при цьому роблять виходячи з форми кривої струму та гармонійного її аналізу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому слід враховувати початкові умови при здійсненні захисного шунтування.

Час перехідного процесу може складати від 3 до 30 мс, що слід враховувати при налагодженні роботи системи захисного шунтування при однофазних замиканнях на землю.

До вихідних умов слід віднести значення активних та індуктивних опорів до та після виникнення режиму короткого замикання пошкодженої ділянки мережі.

До важливих умов слід також віднести стан навколишнього середовища.

Адже це обумовлює швидкість та якість відпрацювання сигналів похибки.

Отже при врахуванні усього зазначеного можна констатувати можливість якісного підвищення рівня захисту при виникненні однофазних замикань на землю пошкодженої ділянки системи електропостачання мережі живлення.

Виходячи із загальної характеристики системи електропостачання слід виділити основні завдання врегулювання дій при виникненні подібних режимів роботи.

При цьому динаміку розвитку аварійної ситуації необхідно враховувати за формою струмів.

Аналіз струмових характеристик слід здійснювати за значеннями гармонійних складових розглянутих кривих при спрацьовуванні системи захисного шунтування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такі розрахунки мають місце бути як збоку мережі живлення у прояві значень що розглядаються з боку живлення трансформаторів, так й з боку системи навантаження.

До системи навантаження подібних систем можна віднести двигуни та інше промислове обладнання.

Отже удосконалення методів захисту із налагодженням системи автоматичного шунтування пошкоджених ділянок системи електропостачання є дуже дієвим застосуванням у системах електричного живлення споживачів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Стан проблеми і задачі дослідження

1.1. Загальна характеристика розподільної мережі та її навантаження, як об'єкта дослідження

Розглянемо види ушкоджень які виникають при експлуатації систем живлення.

Слід врахувати той факт що подібні прояви є систематизовані та підлягають реагуванню на них.

Як кабельні так і повітряні лінії можуть бути ушкоджені при експлуатації.

Тому розглянемо увесь спектр ушкоджень що має прояв у таких системах.

У системах з ізолюваною нейтраллю при підвищеній небезпеці слід враховувати також захист обслуговуючого персоналу при виникненні аварійних ситуацій.

Найбільш небезпечними при цьому є елементи повітряних ліній мереж живлення та розподілу електричної енергії.

Так замикання на ізоляторах повітряних ліній та елементів комутуючого обладнання є найбільш розповсюдженими при експлуатації електроустаткування.

Пошкодження у кабельних лініях найбільш обумовлені станом їх ізоляції, що залежить від часу та умов їх експлуатації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Коган О.В.						11	20
<i>Перевірів</i>	Сінчук І.О.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук І.О.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-20		

Представимо основні причини виникнення ушкоджень у системах електропостачання.

Таблиця 1.1 – Основні причини пошкоджуваності повітряних і кабельних ліній напругою 6—10 кВ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.2. Види та динамічні характеристики однофазних замикань на землю

Зробимо характеристику однофазним замиканням на землю при експлуатації електричного обладнання.

Рисунок 1.1 – Види та характеристики ОЗЗ в залежності від умов виникнення та наступного існування

Для розрахунків є важливим визначення форми струму при протіканні перехідних процесів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд струму бездугового металевого ОЗЗ (а)
і при замиканні через активний опір (б)

Для другої групи протікання перехідних процесів які супроводжуються виникненням електричної дуги графіки струму матимуть інший вигляд та характер протікання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

а)

б)

Рисунок 1.3 – Вигляд струму при перекидному дуговому ОЗЗ:

а) в повітрі; б) в розігрітому каналі ізоляції кабелю; в) «в нерозігрітому» каналі ізоляції кабелю

З літератури можна зазначити що форма струму при зміні опору буде мати інший вигляд[9].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.4 – Форма струму (розтягнутої) дуги ОЗЗ з введеним активним опором

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.3. Аналіз умов стійкості дугових однофазних замикань на землю

Розглянемо однофазні замикання на землю що супроводжуються виникненням електричної дуги.

Розглянемо схему ділянки мережі живлення при складанні кола протікання струму короткого замикання.

Рисунок 1.5 – Схема кола для аналізу стійкості дугових ОЗЗ

Побудуємо на основі представленої схеми математичну модель перехідних процесів.

$$p^2 + p \left(\frac{R_{\Omega}}{L} + \frac{U_{\text{д}}}{i_{\text{д}}} \frac{1}{L} \right) + \frac{1}{LC} = 0 \quad (1.1)$$

Тоді можна зазначити:

$$U_0 i_{\text{д}} + I_0 u_{\text{д}} = U_0 \theta \frac{di_{\text{д}}}{dt} - I_0 \theta \frac{du_{\text{д}}}{dt} \quad (1.2)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де I_0, U_0 — сталі значення струму і напруги на дузі;

i_d, u_d — миттєві поточні значення струму і напруги;

$\theta = Q_0/P_0$ — постійна часу дуги;

Q_0 — тепловміст в одиниці довжини дуги;

P_0 — потужність, що відводиться, від одиниці довжини дуги.

У операторній формі

$$U_0 i_d + I_0 u_d = U_0 \theta p i_d - I_0 \theta p u_d \quad (1.3)$$

Звідки

$$i_d = \frac{u_d(\theta p + 1)}{R_{ст}(\theta p - 1)} \quad (1.4)$$

де $R_{ст}$ — статичний опір дуги.

Остаточно:

$$p^3 + p^2 \left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{ц}}{L} + \frac{R_{ст}}{L} \right) + p \left(\frac{R_{ц}}{L\theta} + \frac{1}{LC} - \frac{R_{ст}}{L\theta} \right) + \frac{1}{LC\theta} = 0 \quad (1.5)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Складемо систему розрахункових рівнянь:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (1.6)$$

Або:

$$\Delta 1 = a_1 > 0; \Delta 2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$
$$\Delta 2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 \begin{vmatrix} a_2 & 0 \\ a_1 & a_2 \end{vmatrix} - a_3 \begin{vmatrix} a_0 & 0 \\ 0 & a_3 \end{vmatrix} = \Delta 2 a_3 > 0.$$

Знайдемо визначники:

$$\Delta 1 = \frac{1}{0} + \frac{R_{\Pi}}{L} + \frac{R_{CT}}{L} > 0 \quad (1.7)$$

$$\Delta 2 = \left(\frac{1}{0} + \frac{R_{\Pi}}{L} + \frac{R_{CT}}{L} \right) \left(\frac{R_{\Pi}}{L_0} + \frac{1}{LC} - \frac{R_{CT}}{L_0} \right) - \frac{1}{LC_0} > 0 \quad (1.8)$$

$$\Delta 3 = \frac{1}{LC_0} > 0 \quad (1.9)$$

Складемо рівняння у функції опорів розглянутої системи.

$$\frac{R_{\Pi}}{\theta} + 200 R_{\Pi}^2 + 6,6 * 10^7 \theta + 6,6 * 10^7 R_{CT} \theta > \frac{R_{CT}}{\theta} + \frac{R_{CT}^2}{\theta} \quad (1.10)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

У результаті отримані можливості щодо визначення характеру протікання перехідних процесів при виникненні однофазних замикань на замлю.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.4. Аналіз параметрів та електричних величин при однофазних замикань на землю в обмотках двигунів і трансформаторах

Електричні замикання на землю впливають на роботу елементів електричного обладнання як систем живлення так й систем електроспоживання.

Тому слід розглядати подібні схеми у прояві відокремлення електричних частин живлення та значень струмових навантажень споживачів.

Проведемо перетворення опорів відповідно до вище наведеного припущення.

$$Z'_n = Z_x + Z_n + \frac{Z_x Z_n}{Z_n}; \quad Z''_n = Z_x + Z_n + \frac{Z_x Z_n}{Z_n},$$
$$Z'''_n = Z_x + Z_n + \frac{Z_x Z_n}{Z_n}$$

де Z_x — опір навантаження на ділянці від місця замикання до нульової точки обмотки.

Будемо використовувати розрахункову структурну схему з позначенням обмоток споживачів.

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			20

а)

б)

в)

г)

Рисунок 1.6 – Схеми для розрахунку електричних величин при ОЗЗ в обмотках споживачів:

а – схема заміщення; б – еквівалентна схема; в – перетворена схема при металевому замиканні; г – перетворена схема при замиканні через опір дуги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Напруга спрямлення:

$$U_{de} = \frac{U\left(\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{jXc}\right) + a^2 U\left(\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{jXc}\right) + aU\left(\frac{1}{Z_H - Z_x} - \frac{1}{jXc}\right)}{\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_H + Z_H} - \frac{3}{jXc}} \quad (1.11)$$

При перетворенні:

$$\underline{U}_{de} = \frac{aU\left(\frac{1}{Z_H - Z_x} - \frac{1}{Z_H - 2Z_x}\right)}{\frac{1}{Z_H + 2Z_x} + \frac{1}{Z_H - Z_x} - \frac{3}{jXc}} \quad (1.12)$$

Тоді коефіцієнти опорів:

$$K_1 = \frac{3\alpha}{1 - \alpha + 2\alpha^2}, \quad K_1 = \frac{3}{1 + \alpha - 2\alpha^2}$$

Загальний вираз напруги:

$$\underline{U}_{de} = \frac{aU(G - jB)K_1}{K_2(G - jB) + 3jb} \quad (1.13)$$

Тоді для визначення гармонійної складової розрахунковий коефіцієнт між послідовностями:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\beta = \left(-\frac{B}{G} \right) - \arctg \frac{K_2 B - 3b}{K_2 j} \quad (1.14)$$

Для вузлу навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= \left(\frac{1}{Z_H + 2Z_x} + \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + \frac{1}{Z_H - Z_x} + \frac{1}{R_D} \right) - U_c \frac{1}{R_D} = \\ &= U \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + a^2 U \frac{1}{Z_H + 2Z_x} + aU \frac{1}{Z_H - Z_x} \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_c &= \left(\frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{-jX_c} + \frac{1}{R_D} \right) - U_c \frac{1}{R_D} = \\ &= U \frac{1}{-jX_c} + a^2 U \frac{1}{-jX_c} + aU \frac{1}{-jX_c} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Результуючий вектор напруги:

$$\underline{U}_0 = \frac{aU \mathbf{G} - jB \mathbf{K}_1}{K_2(G + 3R_D Bb) + j(3K_2 R_D Gb + 3b - K_2 B)} \quad (1.17)$$

Залишкова складова буде записана у вигляді:

$$U_{ост} = \frac{aU(3R_D Bb + G) - K_1 B + j(K_2 3R_D Gb + 3b - K_2 B + K_1 B)}{K_2(G + 3R_D Bb) + j(K_2 3R_D Gb + 3b - K_2 B)} \quad (1.18)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\text{д}}Gb - B) + K_1B}{K_2(3R_{\text{д}}Bb + G) - K_1G} - \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\text{д}}Gb - B)}{K_2(3R_{\text{д}}Gb + G)} \quad (1.19)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(-\frac{B}{G} \right) - \operatorname{arctg} \frac{K_2(3R_{\text{д}}Gb - B) + 3B}{K_2(3R_{\text{д}}Bb + G)} \quad (1.20)$$

Тоді кут зсуву:

$$\varphi = \varphi_1 - (-\beta) \quad (1.21)$$

Розглянуті залежності зручно представити у вигляді відповідних графіків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

а)

б)

Рисунок 1.7 – Векторні діаграми напруг і струму ОЗЗ в лініях (а) і в обмотках споживачів (б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

1.5. Метод визначення параметрів і значень величин при однофазних замиканнях на землю в розподільних мережах

Визначення параметрів електричних систем при виникненні однофазних замикань на землю ґрунтується на застосуванні певних методик при розрахунках.

Так значення опору при шунтуванні пошкодженої ділянки має певний вплив на значення та характер протікання перехідних процесів у контурі струму.

$$i_n = i_{n-1} e^{(-R_{II}/2L)t} ; \quad U_n = U_{n-1} e^{(-R_{II}/2L)t} \quad (1.22)$$

У цьому виразі слід враховувати кліматичні умови та стан навколишнього середовища.

$$\tilde{n}/m = -6,507 + 0,031\tilde{T} , \quad (1.23)$$

де \tilde{n}/m — середнє значення місячної кількості замикань, що самоусуваються, віднесене до підключених електроустановок;

\tilde{T} — середньомісячна температура повітря, С°.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Представлені залежності можна навести у вигляді відповідних графіків розглянутих величин.

Рисунок 1.8 – Середньодобові розподіли самоусувних ОЗЗ в мережах з напругою 6 кВ в негрозовий (1) і грозовий (2) періоди:

ω – частоти; n – число замикань; m – число підключених до мережі споживачів.

Висновки по розділу

Представимо висновки по розділу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Дослідження статистичних даних показало, що в розподільних мережах напругою 6-35 кВ переважним видом пошкодження є ОЗЗ (60-80%) від загальної кількості. В мережах з повітряними лініями частіше спостерігається обрив проводу з наступним замиканням на землю. В зв'язку з тим, що при ОЗЗ в електроустановках з ізольованою нейтраллю міжфазна напруга не змінюється існуючі Правила технічної експлуатації такі пошкодження розглядають як порушення нормального режиму роботи, а не аварію і допускають роботу електроустановки без вимикань, за виключенням електроустановок вугільних, залізородних кар'єрів, торфорозробок.

2. Обмежене за часом існування ОЗЗ сприяє виникненню аварій, що супроводжуються економічними збитками і виникненню небезпечних умов для ураження людини електричним струму, тому необхідно проводити дослідження з метою зменшення до мінімуму негативних наслідків від тривалого існування ОЗЗ.

3. Дослідження існуючих методів і засобів забезпечення безпеки експлуатації електроустановок показали суттєву перевагу методу захисного шунтування ОЗЗ, тобто метода автоматичного заземлення пошкодженої фази.

4. Виконані дослідження показали, що всі ОЗЗ можна розділити на дві групи: дугові і без дугові. Бездугове замикання має місце при виникненні надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази з землею. Вигляд кривої струму бездугового ОЗЗ залежить від опору кола замикання. При металевих ОЗЗ на основну гармоніку накладається високочастотний сигнал власної частоти контуру замикання і вищі гармоніки. Дугові замикання спостерігаються при пробоях і перекриттях фазної ізоляції. Форм кривої дуги переривна-переміжна. Гасіння дуги відбувається під час переходу через нуль власних коливань. Збудження дуги відбувається унаслідок пробую проміжку

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

під час відновлення напруги на ній до першого максимуму. При струмах 3-5 А відбувається згасання дуги. Дослідження показали, що підвищенню стійкості дуги сприяє збільшення активного опору $R_{ц}$ в колі замикання і постійна часу дуги θ . При $\theta=10^{-2}$ с горіння буде стійким при статичному опорі дуги $R_{ст} \leq 6,6$ Ом і скільки завгодно малому опору $R_{ц}$.

5. Дослідження параметрів ланцюга замикання на землю показує, що в 75% замикань $R_{ц}$ не перевищує 1 кОм. Разом з тим на виключенні значення $R_{ц}$ в межах 6-8 кОм. Тривалість існування ОЗЗ може коливатись від декількох мілісекунд до декількох годин. При тривалості 10-30 мс замикання носять характер незавершених пробоїв і самоусуваються. Дугові замикання в кабелях існують від декількох секунд до 1-2 хвилин, після чого переходять у між фазні к.з. і подвійні замикання на землю.

Вивчення впливу кліматичних умов на кількість замикань, що самоусуваються, показало, що основною впливаючою ознакою є температура повітря. Відносна вологість і швидкість вітру є спотворюючими факторами якими можна знехтувати.

Результати досліджень показали, що кількість замикань на землю і частота їх появи залежить від довжини, структури електричних мереж і кількості підключених електроприймачів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Розділ 2. Вдосконалення методу захисного шунтування однофазних пошкоджень електроустановок

2.1. Теоретичне обґрунтування методу захисного шунтування однофазних замикань на землю електроустановок

Захисне шунтування при виникненні однофазних замикань на землю є розповсюдженим та дієвим захистом працюючого обладнання та обслуговуючого персоналу.

Розглянемо електричну принципову схему ділянки мережі із застосуванням захисного шунтування при виникненні короткого замикання у її структурі.

Рисунок 2.1 – Принципова схема електричної мережі з
зашунтованим ОЗЗ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08					
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	Розділ 2			<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>		Коган О.В.						31	35	
<i>Перевірів</i>		Сінчук І.О.								
<i>Реценз.</i>										
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук І.О.								
<i>Затвердив</i>		Пересунько І.І.			КНУ ЕЕМ-20					

Ефективність шунтування у відповідності до зазначеної структури слід розраховувати відповідно до розглянутої методики автоматичного введення опору.

$$K_{\text{э,ш}} = 1 - \frac{\sum I_{\text{ш}}^{(1)}}{I^{(1)}} \quad (2.1)$$

де $I^{(1)}$ —струм через місце ОЗЗ до його шунтування.

Кількісне значення $K_{\text{э,ш}}$ знаходиться в наступних межах:

- а) при ефективному шунтуванні $K_{\text{э,ш}}=1$ або $K_{\text{э,ш}} \rightarrow 1$;
- б) при обмежено ефективному шунтуванні $0 < K_{\text{э,ш}} < 1$;
- в) при неефективному шунтуванні $K_{\text{э,ш}} < 0$.

Під швидкодією шунтування $t_{\text{ш}}$ будемо визначати час від моменту виникнення однофазного замикання до зниження напруги на пошкодженій фазі відносно землі до значення $U_{ab} = \phi_a - \phi_b$
 $\underline{U}'_{\text{зал}}$ у вразі її штучного з'єднання із землею.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Дослідження характеристик значень електричних величин при шунтуванні однофазних замикань на землю

Характеристичне рівняння контуру протікання струму короткого замикання буде визначено виходячи із співвідношення опорів у ланках представленої схеми ділянки мережі [27].

$$R_{HA} + \frac{R_{HB}R_{HC}}{R_{HB} + R_{HC}}, jX_{HA} + \frac{jX_{HB}jX_{HC}}{jX_{HB} + jX_{HC}}$$

У результаті:

$$\frac{R_B R_C}{R_B + R_C}, \frac{jX_B jX_C}{jX_B + jX_C}$$

Рисунок 2.2 – Перетворена схема електричної мережі з зашунтованим ОЗЗ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

При застосуванні методу електричного генерування врахуємо симетричність розглянутої схеми.

$$U_{ab} = \varphi_a + \varphi_b$$

$$\varphi_a = I_1(R_l + jX_l) = \frac{U_\phi(R_l + jX_l)}{(R_l + R_H) + j(X_l + X_H)} \quad (2.2)$$

$$\varphi_b = I_2 \frac{-R_{ш}jX_c}{R_{ш} - jX_c} = \frac{U_\phi}{1 - jX_c/3R_{ш}} \quad (2.2a)$$

де φ_a, φ_b — потенціали точок а и б, I_1, I_2 — контурні струми.

Тоді:

$$U_{ab} = U_\phi \left[\frac{R_l + jX_l}{(R_l + R_H) + j\omega(L_l + L_H)} - \frac{1}{1 - jX_c/3R_{ш}} \right] \quad (2.3)$$

А реактивна складова:

$$U_{ab} = U_\phi \left[\frac{R_l + j\omega L_l}{(R_l + R_H) + j\omega(L_l + L_H)} - \frac{3R_{ш}j\omega C}{3R_{ш}j\omega C + 1} \right] \quad (2.4)$$

Отже:

$$U_\phi \frac{R_l + j\omega L_l}{(R_l + R_H) + j\omega(L_l + L_H)} = U_\phi, \quad (2.5a)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$U_{\phi} \frac{3R_u j\omega C}{3R_u j\omega C + 1} = U_{зал} \quad (2.5б)$$

$$U_{ab} = \sum U_u \quad (2.5в)$$

Тоді струм з боку пошкодженої ділянки:

$$\sum I_{R_u} = I_{\phi} + I_{зал} = \frac{U_{\phi}}{z_{ex} + R_u} + \frac{U_{зал}}{z_{ex} + R_u}, \quad (2.6)$$

де

$$z_{ex} = \frac{R_u}{1 + 3j\omega CR_u} + \frac{(R_3 + j\omega L_3)(R_l + j\omega L_l)}{(R_3 + R_l) + j\omega(L_3 + L_l)}; \quad (2.7)$$

$$R_3 = 0,5R_l + 1,5R_n, L_3 = 0,5L_l + 1,5L_n, 1,5L_n,$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.3. Визначення значень електричних величин при шунтуванні замикань в ненавантажених лініях

Розрахунок електричних значень при виникненні короткого замикання слід робити на основі отриманих виразів.

$$\underline{I}^{(1)} = U_{\phi} Y_{\psi} \frac{Y_B (1-a^2) + Y_C (1-a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{\psi}}, \quad (2.8)$$

де Y_A, Y_B, Y_C , - комплексна провідність фаз мережі щодо землі;

Y - провідність в місці замикання.

Врахуємо симетричні ланки.

$$\underline{I}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{R_{\psi} - \frac{1}{3} jX_c}, \quad (2.9)$$

Тоді еквівалентні значення складатимуть:

$$\underline{I}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_{\psi} R_{\psi\psi}}{R_{\psi} + R_{\psi\psi}} - \frac{1}{3} jX_c} \quad (2.10)$$

Відповідно можна використовувати схему що містить еквівалентні значення складових.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)

б)

Рисунок 2.3 – Еквівалентні схеми трифазної мережі і векторні діаграми
напруг і струмів: а – при ОЗЗ без шунтування

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Рисунок 2.4 – Еквівалентні схеми трифазної мережі і векторні діаграми
напруг і струмів: б – при ОЗЗ при шунтуванні

Струмові складові відповідні визначеним характеристикам.

$$I_{ост}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_u R_w}{R_u + R_w} - \frac{1}{3} jX_c} \frac{R_w}{R_u + R_w}, \quad (2.11)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\underline{I}_{uu}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{R_y R_{uu}}{R_y + R_{uu}} - \frac{1}{3} jX_c} \frac{R_y}{R_y + R_{uu}}. \quad (2.12)$$

Якщо

$$\frac{R_{uu}}{R_y + R_{uu}} = K, \frac{R_y}{R_y + R_{uu}} = KR_{uu} \quad (2.13)$$

Тоді

$$\underline{I}_{ocm}^{(1)} = \frac{U_{\phi} K}{R_y - \frac{1}{3} jX_c} \quad (2.14)$$

$$\underline{I}_{uu}^{(1)} = \frac{U_{\phi} K}{R_y K - \frac{1}{3} jX_c} \quad (2.15)$$

А отже

$$\frac{I_{uu}^{(1)}}{I_{ocm}^{(1)}} = \sqrt{\frac{R_y^2 + \frac{X_c^2}{9K^2}}{R_y^2 + \frac{X_c^2}{9}}} \quad (2.16)$$

Визначимо значення напруги зсуву.

$$\underline{U}'_0 = \frac{\underline{U}_\phi}{KR_u - \frac{1}{3}jX_C} \left(-\frac{1}{3}jK_C\right) \quad (2.17)$$

Тоді можна визначити значення залишкової напруги.

$$\underline{U}'_{ост} = \frac{\underline{U}_\phi}{KR_u - \frac{1}{3}jX_C} KR_u \quad (2.18)$$

Представлену структуру слід записувати у вигляді системи електричних рівнянь.

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \arctg \frac{KR_u}{\frac{X_C}{3}}; \\ \gamma_2 &= \arctg \frac{X_C}{3} \frac{1}{KR_u}; \\ \gamma_3 &= +\frac{\pi}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Тоді можна представити модульні вектори.

$$U_\phi = \sqrt{U_0^2 + U_{ост}^2} \quad (2.20)$$

А необхідний опір системи можна визначити з врахуванням розглянутого режиму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z = -\frac{1}{3}jX_C - \frac{R_u jX_{C_u}}{R_u - jX_{C_u}} \quad (2.21)$$

Також можна розрахувати кут зсуву гармонійних складових.

$$\varphi_Z = \arctg \frac{R_u^2 \left(\frac{1}{3} X_C + X_{C_u} \right) + X_{C_u}^2 X_C}{R_u X_{C_u} \left(X_{C_u} - \frac{2}{3} X_C \right)} \quad (2.22)$$

Вирази (2.13) приймуть вигляд

$$\frac{-jX_{C_u}}{R_u - jX_{C_u}} = K; \quad \frac{R_u}{R_u - jX_{C_u}} = -KjX_{C_u} \quad (2.13a)$$

Остаточно:

$$\gamma = \arctg -\frac{R_u}{X_{C_u}}$$

А повний опір:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z = -\frac{1}{3}jX_C + \frac{R_u jX_{L_u}}{R_u + jX_{L_u}} \quad (2.21a)$$

$$\gamma_Z = \arctg \frac{R_u^2(X_{L_u} - \frac{1}{3}X_C) - X_{L_u}X_C}{R_u X_{L_u}(X_{L_u} + \frac{1}{3}X_C)} \quad (2.22a)$$

Отже баланс опорів у гілках схеми буде регулювати отримані значення складових.

$$\frac{jX_{L_u}}{R_u + jX_{L_u}} = K; \quad \frac{R_u}{R_u + jX_{L_u}} = KjX_{L_u} \quad (2.13б)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Дослідження струмів при шунтуванні однофазних замикань на корпус в обмотках споживачів електроенергії

Розглянемо схему з шунтуванням струмів короткого замикання на прикладі розподільчого пункту з живленням від трансформатора напруги лінії електропередач.

Рисунок 2.5 – Принципова схема шунтування ОЗЗ в обмотці трансформатора

Розглянемо розрахункові рівняння відповідно до схеми електропостачання.

$$X_{om} = X_I + X_{II} \quad (2.23)$$

де X_I , X_{II} — індуктивні опори розсіювання первинної і вторинної обмоток відповідно.

Тоді для струмів нульової послідовності:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_{om} = X_I + X_{\mu o}, \quad (2.24)$$

$$(2.25)$$

Для контуру ЕРС:

$$\vec{E} = \vec{E}_H + \vec{E}_K + \vec{E}_T, \quad (2.26)$$

a)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

б)

в)

Рисунок 2.6 – Схема заміщення мережі при шунтуванні ОЗЗ в обмотці споживача (трансформатора):

а, б – прямої послідовності; в – нульової послідовності

Перерахуємо опори відповідно до схеми заміщення.

$$X_{0\Sigma} = X_{0l} + X_{1m}; \quad (2.27)$$

$$R_{0\Sigma} = R_{0l} + R_{1m}. \quad (2.28)$$

Тоді результуючі опори:

$$X_{0\Sigma} = X_{0l} + X_{1m}; \quad (2.29)$$

$$R_{0\Sigma} = R_{0l} + R_{1m}, \quad (2.30)$$

$$R_{1T} = U_{к,а} U_{ном} / S_T; \quad (2.31)$$

де $U_{к,а}$ — активна складова напруги короткого замикання трансформатора;

$U_{ном}$ — номінальна напруга первинної обмотки трансформатора;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

S_T — потужність трансформатора.

Для трансформатору:

$$X_{0\Sigma} = X_{0л} + X_{1г} + X_{\mu 0}. \quad (2.32)$$

Наведемо представлені розрахунки у вигляді графіків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Рисунок 2.7 – Спад напруги в колі заземлення при шунтуванні ОЗЗ в обмотках трансформаторів: 1, 2 – потужність трансформатора 630 кВА; 3, 4 – те ж 250 кВА; 5, 6 – те ж 160 кВА; для 1, 3, 5 - $x_{\mu 0}=0,3$; 2, 4, 6 - $x_{\mu 0}=0,1$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

2.5. Ефективність шунтування розподільної мережі при виникненні однофазного замикання на землю на початку, всередині та в кінці лінії

При розриванні кола струму при однофазному короткому замиканні виникає перехідний процес що спричиняє значне зростання струму у колі контуру.

$$\underline{U}_{ed} = \frac{\frac{1}{2}jX_c U}{3Z_H - jX_c}, \quad (2.33)$$

де Z_H — опір фази навантаження.

Перетворимо фазні значення відносно землі.

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_{ed} = \frac{U(3Z_H - \frac{3}{2}jX_c)}{3Z_H - jX_c}; \quad (2.34)$$

$$\underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_{ed} = \frac{U \left[a^2 3Z_H - jX_c - \frac{1}{2}jX_c \right]}{3Z_H - jX_c} \quad (2.35)$$

$$\underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_{ed} = \frac{U \left[a^2 3Z_H - jX_c - \frac{1}{2}jX_c \right]}{3Z_H - jX_c} \quad (2.36)$$

Складемо графічне представлення відповідно до представлених вище рівнянь.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)

б)

в)

Рисунок 2.8 – Схеми заміщення для розрахунку електричних величин при замиканні обірваного проводу зі сторони споживача:

а – схема мережі; б – схема заміщення мережі при замиканні обірваного проводу на землю зі сторони споживача; в – розрахункова схема мережі.

Тоді векторна діаграма буде мати наступний вигляд.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Рисунок 2.9 – Векторна діаграма фазних напруг при заземленні обірваного проводу фази А зі сторони споживача на ділянці розгалуженої мережі

Тоді залежності до напруги живлення приймуть вигляд графіків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Рисунок 2.10 – Зміна фазних напруг при обриві проводу на різних ділянках магістралі: l – довжина ділянки; Z – опір ділянки; P – навантаження на ділянці магістралі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6. Вплив зниження втрат напруги в лініях на захисні властивості шунтування

Розглянемо прояв впливу додаткової напруги при розподілі струмів короткого замикання вздовж пошкодженої ділянки лінії електропередач.

Рисунок 2.11 – Розподіл додаткової напруги в лінії при застосуванні двостороннього шунтування місця ОЗЗ

Відповідно до схеми заміщення:

$$Z_{\text{о}} = \frac{\sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2} R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}{\sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2} + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \quad (2.37)$$

Тоді розподіл струмів:

$$I_{\text{н1}} = \frac{I_{\text{н}} R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}{\sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2} + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \quad (2.38)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$I_{H2} = \frac{I_H \sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2}}{\sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2 + R_{ш1} + R_{ш2}}} ACV \quad (2.39)$$

При перерахунку до прикладеної напруги:

$$U_{bb'} = \frac{I_H \left[R_{ш1} + R_{ш2} \quad r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi - R_{ш1} \sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2} \right]}{\sqrt{r_1 + r_2^2 + x_1 + x_2^2 + R_{ш1} + R_{ш2}}} \quad (2.40)$$

Складемо графіки розподілу додаткової напруги.

Рисунок 2.12 – Додаткова напруги в точці ОЗЗ на гранично завантаженій лінії: 1 – при наявності одного шунта з опором 0,5 Ом; 2, 3 – при двосторонньому шунтуванні з опором другого шунта відповідно 4 і 1 Ом.

Представимо схематичне рішення у вигляді структури щодо компенсації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)

б)

Рисунок 2.13 – Компенсація втрати напруги в лінії шляхом включення в точку шунтування активно-індуктивних опорів:

а – схема пристрою; б – векторна діаграма напруг.

Складемо характеристичне рівняння.

$$U_{\text{ш}} = dU_d = \frac{dU}{\frac{C_{\text{ш}}}{\omega}} \quad (2.41)$$

де U_{de} — різниця вузлових потенціалів, рівна напрузі нульової послідовності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

а)

б)

в)

Рисунок 2.14 – Зниження додаткової напруги в місці ОЗЗ з допомогою застосування шунта з ємнісною провідністю:

а – розрахункова схема; б – векторна діаграма напруг при $|\underline{U}_{C_{ш}}| < |\underline{U}_д|$; в – те ж при $|\underline{U}_{C_{ш}}| > |\underline{U}_д|$.

Тоді система рівнянь прийме вигляд:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{U}_{ост} = \underline{U}_{C_{ш}} - \underline{U}_д \text{ при } |\underline{U}_{C_{ш}}| > |\underline{U}_д| \\ \text{или} \\ \underline{U}_{ост} = \underline{U}_д - \underline{U}_{C_{ш}} \text{ при } |\underline{U}_{C_{ш}}| < |\underline{U}_д| \end{array} \right\} \quad (2.42)$$

Отже на прикладі розглянутої структури що побудована на основі отриманих виразів та характеристичних рівнянь можна бачити що компенсування ємнісної складової знижує напругу що супроводжує режим короткого замикання до значення 0,15—0,6 $U_д$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

2.7. Дослідження відновлення ізоляції в місці виникнення однофазного замикання на землю при шунтуванні

Розглянемо вплив надмірного значення струмів на цілісність ізоляції кабелів живлення.

$$\underline{I}_L = \frac{3\underline{U}_\phi}{3R_{CT} - jX_C} \quad (2.43)$$

$$\underline{I}_{д.ш}^{(1)} = \frac{3\underline{U}_\phi}{3R_{CT} - jX_C \left(\frac{R_{CT}}{R_{ш}} + 1 \right)} \quad (2.44)$$

де R_{CT} — статичний опір дуги.

Відповідно до виразів складемо схему заміщення.

Рисунок 2.15 – Схема заміщення дугового ОЗЗ, зашунтованого активним опором

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Диференційне рівняння матиме вигляд:

$$pL + \frac{1}{pC} + R_{II} + \frac{(u_d / i_d)R_{III}}{(u_d / i_d) + R_{III}} = 0 \quad (2.44)$$

Складемо його для контуру струму.

$$p^3 - p^2 \left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{III}}{R_{CT}\theta} + \frac{R_{II}}{L} + \frac{R_{III}}{L} \right) + p \left(\frac{1}{LC} - \frac{R_{II}}{L\theta} + \frac{R_{II}R_{III}}{LR_{CT}\theta} - \frac{R_{III}}{L\theta} \right) + \left(\frac{R_{III}}{CLR_{CT}\theta} - \frac{1}{CL\theta} \right) = 0 \quad (2.45)$$

Отже стійкість гасіння дуги у перехідному режимі можна виразити аналітичною залежністю.

$$\frac{1}{\theta} + \frac{R_{III}}{R_{CT}\theta} + \frac{R_{II}}{L} + \frac{R_{III}}{L} = 0 \quad (2.46)$$

$$\left(\frac{1}{\theta} + \frac{R_{III}}{R_{CT}\theta} + \frac{R_{II}}{L} + \frac{R_{III}}{L} \right) \left(\frac{1}{LC} - \frac{R_{II}}{L\theta} + \frac{R_{II}R_{III}}{LR_{CT}\theta} \right) - \left(\frac{R_{III}}{CLR_{CT}\theta} - \frac{1}{CL\theta} \right) > 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{R_{III}}{CLR_{CT}} - \frac{1}{CL\theta} > 0 \quad (2.48)$$

Тоді за умови стійкості отримаємо наступні рівняння.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \quad (\text{процес є стійким}) \\ \frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \quad (\text{процес є нестійким}) \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Тоді значення шунтового опору можна також отримати з виразу аналітичної залежності.

$$R_{ш} \leq \frac{X_c U_{кр}}{3} \sqrt[1]{\frac{\frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \quad (\text{процес є стійким})}{\frac{R_{ш}}{R_{ст}} > 1 \quad (\text{процес є нестійким})}} \quad (2.50)$$

Значення $U_{кр}$, експериментально встановлені для кабелів різної конструкції, приведені нижче.

2.8. Організаційні та технічні заходи забезпечення електробезпеки при шунтуванні

Важливою складовою функціонування електричних мереж є забезпечення заходів щодо обмеження впливу проявів режимів короткого замикання.

Відповідно до розподілу струму короткого замикання уздовж пошкодженої ділянки виконують налагодження роботи системи захисту від проявів струмів.

Рисунок 2.16 – Змодельована картин струму протікаючого через тіло людини при однофазному дотику до мережі 6 кВ, що облаштована захистом від ОЗЗ: зона 1 – перехідний режим; зона 2 – усталений струм з амплітудою $I_{ту}^1$; зона 3 – струм, обумовлений ЕРС вибігів з амплітудами $I_{тв,н}^1$ на початку і $I_{тв,к}^1$ в кінці вибігу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Тоді опір у колі короткого замикання:

$$R_q = R_h + R_0 + R_{\text{оп}} \quad (2.51)$$

де R_h — електричний опір тіла людини;

R_0 — електричний опір взуттю (одяг);

$R_{\text{оп}}$ — опір розтіканню струму з опорної поверхні ніг людини.

У математичній моделі можна використовувати функціональне значення розрахункового опору [22].

$$R_{h,\text{min}} = \frac{74}{U_h + 7} + 0,3 \quad (2.52)$$

Тоді опір розсіювання у функціональній залежності складатиме подібне рівняння [23]:

$$R_{\text{оп}} = \frac{\rho}{4\pi b} \ln \frac{4b}{l} \quad (2.53)$$

де ρ — питомий опір ґрунту;

l — довжина ступні;

b — ширина ступні;

a — відстань між внутрішніми краями паралельно розміщених ступней.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

При відключенні живлячої лінії значення струму складатиме функціональну залежність від представлених опорів.

$$i_{\phi}^1 = \frac{3e_t}{\sqrt{9R_h^2 + 1/\omega_t C_{o,l}}^2} \quad (2.54)$$

де e_t — ЕРС вибігу у момент часу t ;

ω_t — кутова частота ЕРС вибігу у момент часу t ;

$C_{o,l}$ — ємність відключеної лінії.

Тоді ЕРС контуру:

$$e_t = 0,9U_{\text{ном}} \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) \quad (2.55)$$

де τ — електромагнітна стала часу, що визначається за параметрами двигуна.

Розглянемо картину розподілу відповідно до встановленого обладнання.

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\Sigma GD^2 n^2}{365 \Sigma P_{\text{ном}}} \quad (2.56)$$

де GD^2 — момент інерції всіх агрегатів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді контур шунтування представимо у вигляді аналітичної залежності струму.

$$I_{\text{ч}}^1 = \frac{3U_{\phi}}{\sqrt{9R_{\text{ч}}^2 + X_C/K^2}} \leq I_{\text{д,т}} \quad (2.57)$$

де $R_{\text{ч}}$ — електричний опір ланцюгу при однофазному дотику людини, Ом;

$I_{\text{д,т}}$ — допустиме значення струму при часі дії t , що приймається згідно [24].

Тоді з врахуванням часу протікання перехідного процесу у представленому контурі:

$$I_{\text{д,т}} = 65/\sqrt{t}.$$

Замінивши коефіцієнт K його виразом через $R_{\text{ш}}$ и $R_{\text{ч}}=R_{\text{ц}}$, по (2.13) можна розв'язати нерівність (2.57) відносно R .

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки по розділу

Представимо висновки по розділу.

1. В разі застосуванні шунтування однофазних замикань на землю в електроустановках з ізольованою нейтраллю окрім зниження струму через місце замикання знижується і напруга пошкодженої фази відносно землі.

2. Результати аналізу закономірностей зміни електричних величин, що характеризують процес шунтування показали що можна знехтувати навантаженням ліній і врахувати тільки параметри ненавантажених ліній. В разі застосування шунтів з ємнісною, індуктивною і змішаною провідністю відбуваються кількісні і якісні зміни характеристик шунтування.

3. Результати аналізу схем заміщень мережі при виткових замиканнях в обмотках трансформатора показує на значний вплив на величину струму замикання реактивності нульової послідовності трансформаторів і схем з'єднання їх обмоток.

4. Аналіз проведених досліджень показав, що при шунтуванні ОЗЗ в обмотках споживачів падіння напруги на опорі заземлення складає 100 В і більше. Струм через місце замикання після його шунтування зростає в порівнянні із струмом до шунтування ОЗЗ, тобто шунтування є неефективним.

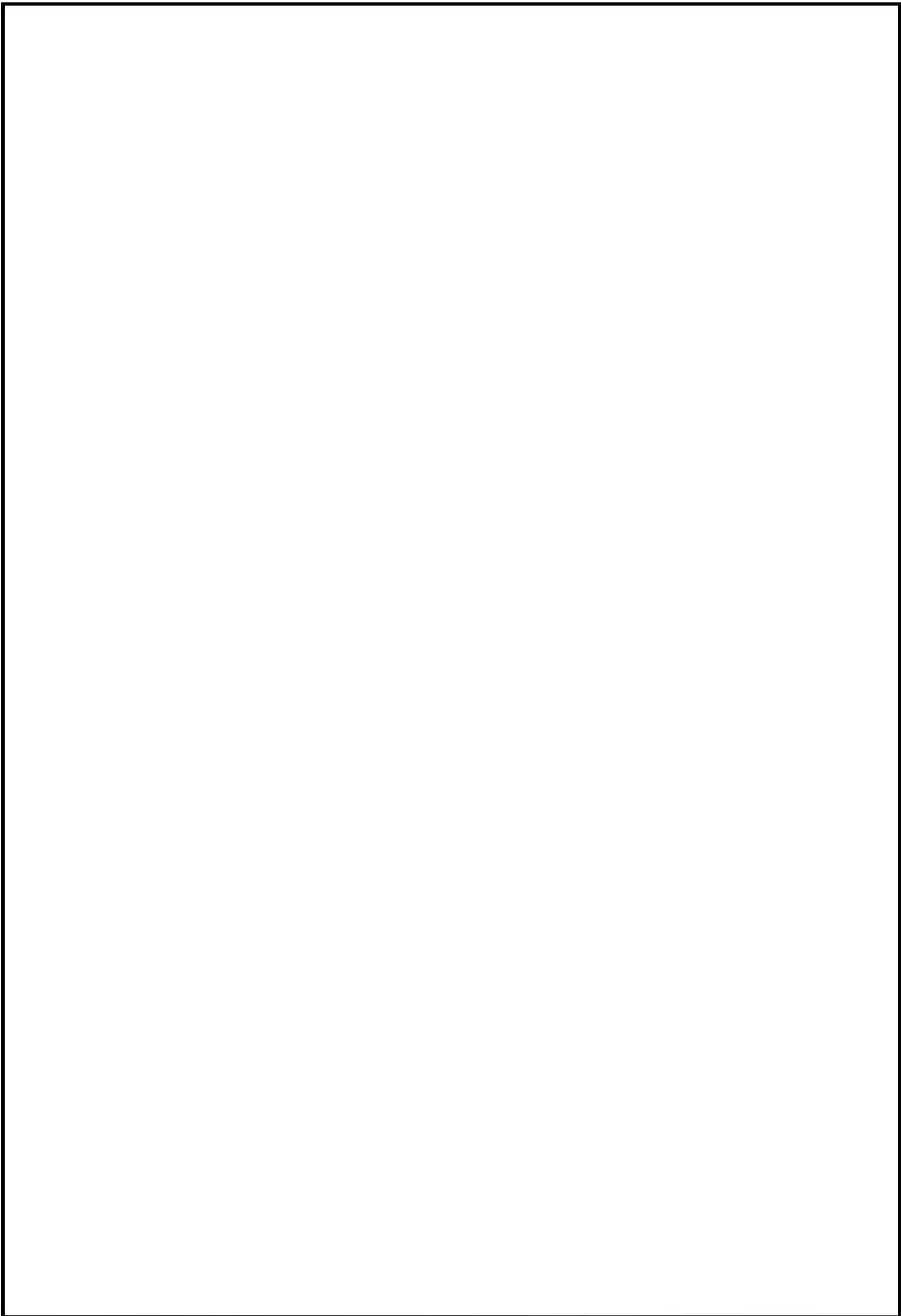
5. При знеструмленні в одній із фаз, що виникає при обриві дроту без дотику до землі виникає зміна фазної і міжфазної напруги. Такий вид пошкодження на живлячій підстанції виявити складно, проте наявність зв'язку пошкодженої фази із землею з боку споживача дозволяє однозначно виділяти пошкоджену фазу системою контролю ізоляції. Застосування активно-індуктивних і ємнісних опорів в колі шунтування дозволяє знизити

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різницю потенціалів між точкою шунтування і місцем ОЗЗ. Це досягається за допомогою формування на шунті падіння напруги , що зближує потенціал землі з потенціалом фази в місці ОЗЗ.

6.Результати моделювання показали,що в будь-який момент часу горіння дуги опір шунта буде менший ніж статичний опір дуги тому дуга стійко горіти не може. Наявність в колі замикання активного опору до певної міри сприяє стійкості горіння дуги, знижуючи тим самим роль шунта як засоба гасіння дуги. Тому другим призначенням шунта є зниження напруги, що відновлюється до значення меншого порогу запалення дуги, виключаючи її повторне запалення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-08	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		