

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, -
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ”

_____ 2021 р

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Модернізація засобів релейного захисту силових трансформаторів

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛКп-18

(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

та електромеханіка»

Клименко Марина Олександрівна

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник ст. викл. каф. Нємцев Е. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент к. т. н, зав. каф. ЕМ Калиниченко В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль:

Любименко О. М.

(підпис)

02.06.2021

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

02.06.2021

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Клименко Марина Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація засобів релейного захисту
силових трансформаторів

керівник роботи ст. викл. каф. Нємцев Е. М.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи червні року.

3. Вихідні дані до роботи: _____

оперативна схема ділянки мережі

дані ліній електропередачі

дані силових трансформаторів

дані споживачів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз видів ушкоджень в електричних мережах

2. Ділянка мережі 110 кВ між Слов'янська ТЕС і ПС Соль-110

3. Розрахунок релейного захисту трансформатора ПС Соль-110

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання Прийняв
Розділи 1 – 3	Нємцев Е. М.		
Розділ 4	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	03.05.21 – 12.05.21	
2.	Розділ 2	13.05.21 – 23.05.21	
3.	Розділ 3	24.05.21 – 27.05.21	
4.	Розділ 4	28.05.21 – 31.05.21	
5.			
6.			

Студент _____ Клименко М. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Нємцев Е. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Клименко Марина Олександрівна. Модернізація засобів релейного захисту силових трансформаторів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі приведені основи теорії електричних мереж, які дозволяють розраховувати, аналізувати та оцінювати несиметричні короткі замикання.

У другому розділі показані всі етапи створення математичної моделі електричної мережі напругою 110 кВ.

У третьому розділі виконаний розрахунок захистів силових триобмоткових трансформаторів.

Четвертий розділ присвячений розділу охорони праці.

Ключові слова: електричні мережі, коротке замикання, математична модель, напруга, захист, трансформатори, охорона праці.

ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1. Аналіз видів ушкоджень в електричних мережах	7
Розділ 2. Ділянка мережі 110 кВ між Слов'янська ТЕС і ПС Соль-110	28
Розділ 3. Розрахунок релейного захисту трансформатора ПС Соль-110	39
Розділ 4. Охорона праці	51
Висновки	55
Список використаної літератури	56

ВСТУП

В роботі розглянуті основи теорії релейного захисту енергосистеми, її функції, та вимоги до релейного захисту.

Основним завданням релейного захисту [1-10] є виявлення несправності та швидке її усунення, а також забезпечення того, щоб неушкоджена частина ЕЕС могла продовжувати працювати в звичайному режимі.

Релейний захист, якщо його параметри обрані вірно повинен відповідати вимогам надійності, вибіркової, швидкості та чутливості. Для того, щоб відповідати вимогам складної мережі необхідно застосовувати складні види захистів, а також підвищити їх вибірковість та надійність, що корисно для інтелектуального прийняття рішень щодо захисту.

Мережеві розподільні системи призначені для забезпечення надлишкових потужностей для споживачів. Втрата хоч одного приєднання може призвести до аварійної ситуації.

Метою даної роботи є розробка релейного захисту для силового трифазного трансформатора.

У першому розділі приведені основи теорії електричних мереж, які дозволяють розраховувати, аналізувати та оцінювати несиметричні короткі замикання. У другому розділі показані всі етапи створення математичної моделі електричної мережі напругою 110 кВ. У третьому розділі виконаний розрахунок захистів силових триобмоткових трансформаторів. Четвертий розділ присвячений розділу охорони праці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИДІВ УШКОДЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Розроблена теорія базується на базових твердженнях, що

$$\underline{V} = V_d + jV_q$$

$$\underline{V} = |\underline{V}| \cdot e^{j \arctg\left(\frac{V_q}{V_d}\right)}$$

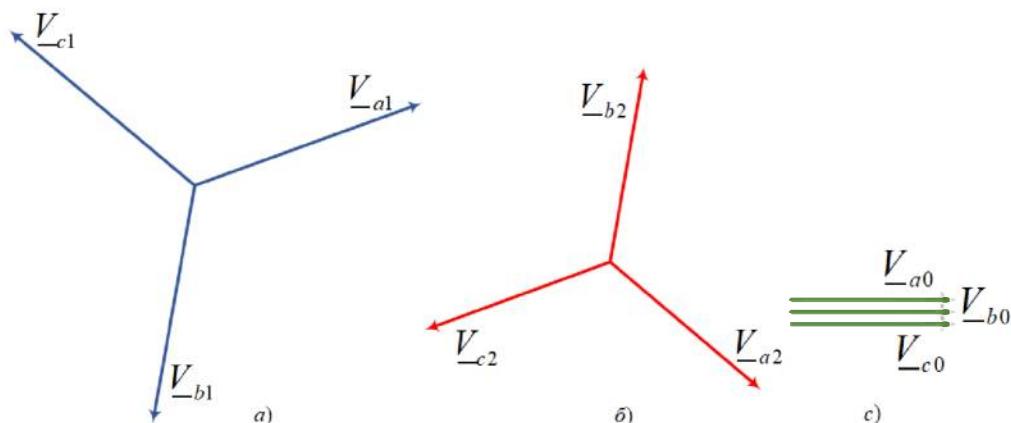
Кути між векторами визначаються за допомогою одиничного вектору

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ} \end{aligned} \right\}$$

Таким чином можна легко дістати рівняння

$$\left. \begin{aligned} a^2 + a &= -1 \\ a^2 - a &= -j\sqrt{3} \end{aligned} \right\}$$

Основна ідея полягає у тому, що одиничний вектор зв'язує фазну систему координат



$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= a \cdot \underline{V}_b = a^2 \cdot \underline{V}_c \\ \underline{V}_b &= a \cdot \underline{V}_c = a^2 \cdot \underline{V}_a \\ \underline{V}_c &= a \cdot \underline{V}_a = a^2 \cdot \underline{V}_b \end{aligned} \right\}$$

Для довільної зрівноваженої системи є визначеним

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{c1} &= \underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^2 + a) = 0 \\ \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{c2} &= \underline{V}_{a2} \cdot (1 + a + a^2) = 0 \end{aligned} \right\}$$

а в протилежному випадку

$$\underline{V}_{a0} + \underline{V}_{b0} + \underline{V}_{c0} = 3 \cdot \underline{V}_{a0} = 0$$

Якщо розглянути випадок несиметричних ушкоджень в електричних системах, то

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b &= \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{b0} \\ \underline{V}_c &= \underline{V}_{c1} + \underline{V}_{c2} + \underline{V}_{c0} \end{aligned} \right\}$$

Спільний їх розв'язок визначає нову систему

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b &= a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_c &= a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

Класичне підсумовування цих рівнянь

$$\sum \left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ a \cdot \underline{V}_b = a \cdot (a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \\ a^2 \cdot \underline{V}_c = a^2 \cdot (a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \end{array} \right\}$$

$$\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^3 + a^3) + \underline{V}_{a2} \cdot (1 + a^2 + a^4) + \underline{V}_{a0} \cdot (1 + a + a^2)$$

Якщо показати, що

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1$$

$$a^4 = a^3 \cdot a^1 = 1 \cdot a = e^{j120^\circ}$$

і

$$\underline{V}_{a0} \cdot (1 + a + a^2) = 0$$

$$\underline{V}_{a2} \cdot (1 + a^2 + a) = 0$$

То справді, отримуємо

$$\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot 3$$

$$\underline{V}_{a1} = \frac{\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c}{3}$$

Нове підсумовування рівнянь, але з різним кутом повороту

$$\sum \left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ a^2 \cdot \underline{V}_b = a^2 \cdot (a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \\ a \cdot \underline{V}_c = a \cdot (a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \end{array} \right\}$$

$$\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c = \underbrace{\underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^4 + a^2)}_0 + \underbrace{\underline{V}_{a2} \cdot (1 + a^3 + a^3)}_3 + \underbrace{\underline{V}_{a0} \cdot (1 + a^2 + a)}_0$$

Це означає, що

$$\underline{V}_{a2} = \frac{\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c}{3}$$

І наступне підсумовування тих самих рівнянь

$$\sum \left(\begin{array}{l} \underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b = a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_c = a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \end{array} \right)$$

$$\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c = \underbrace{\underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^2 + a)}_0 + \underbrace{\underline{V}_{a2} \cdot (1 + a + a^2)}_0 + \underbrace{\underline{V}_{a0} \cdot (1 + 1 + 1)}_3$$

І це означає, що

$$\underline{V}_{a0} = \frac{\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c}{3}$$

З отриманих розв'язків формується нова система

$$\left. \begin{array}{l} \underline{V}_{a1} = (\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c) / 3 \\ \underline{V}_{a2} = (\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c) / 3 \\ \underline{V}_{a0} = (\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c) / 3 \end{array} \right\}$$

Для цієї системи є справедливої наступна ВД

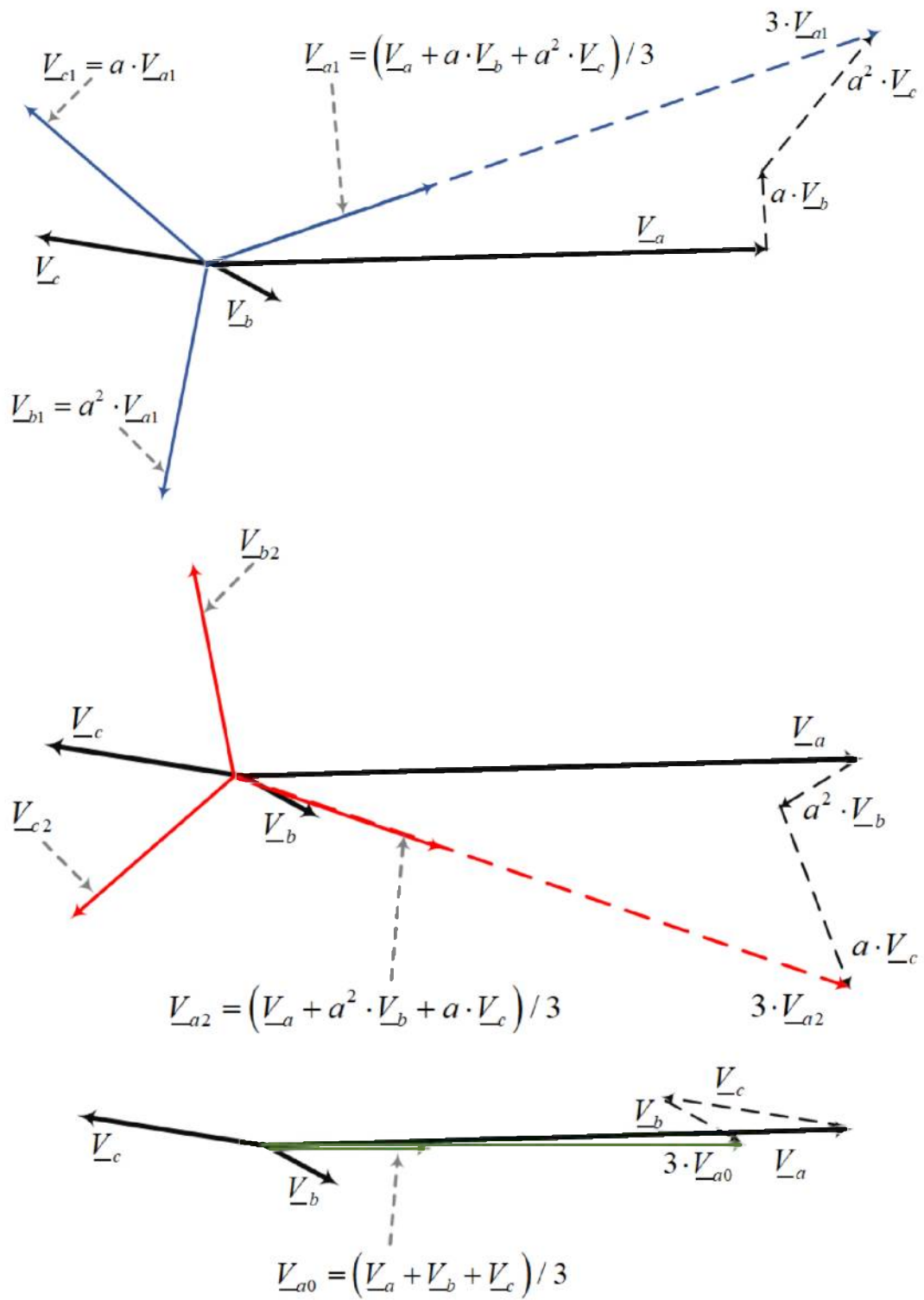


Рисунок 1.1 – ВД напруги

Існує й обернений перехід, який так само можна визначити графічно.

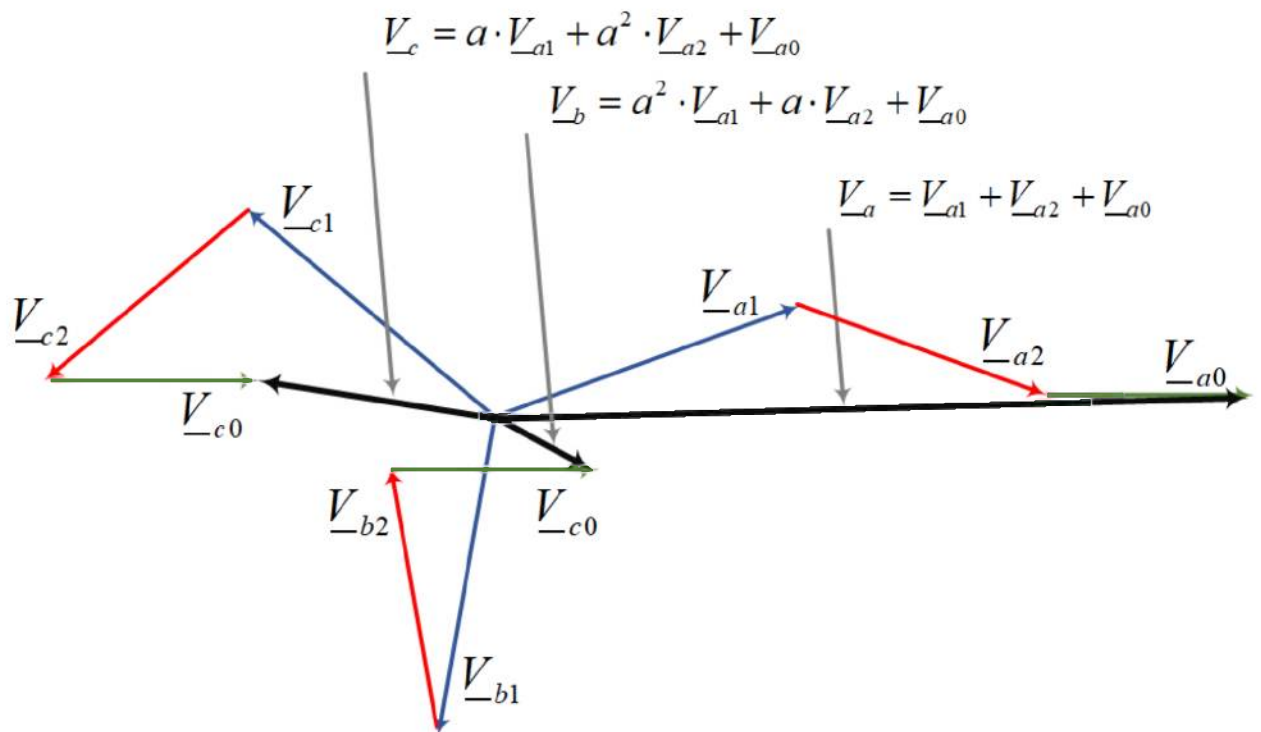
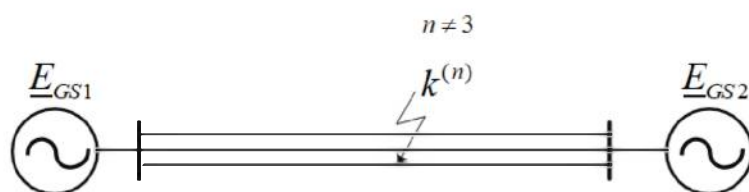


Рисунок 1.2 – ВД напруги

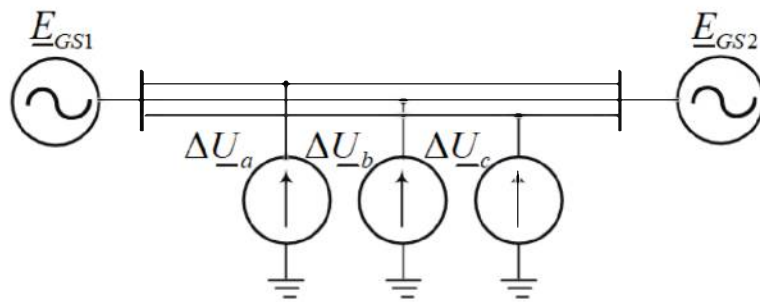
З наведених фактів робимо висновок, що між різними послідовностями в опорах чи напругах взаємний вплив можна не враховувати

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}_1 &= \underline{z}_1 \cdot \underline{I}_1 \\ \Delta \underline{U}_2 &= \underline{z}_2 \cdot \underline{I}_2 \\ \Delta \underline{U}_0 &= \underline{z}_0 \cdot \underline{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

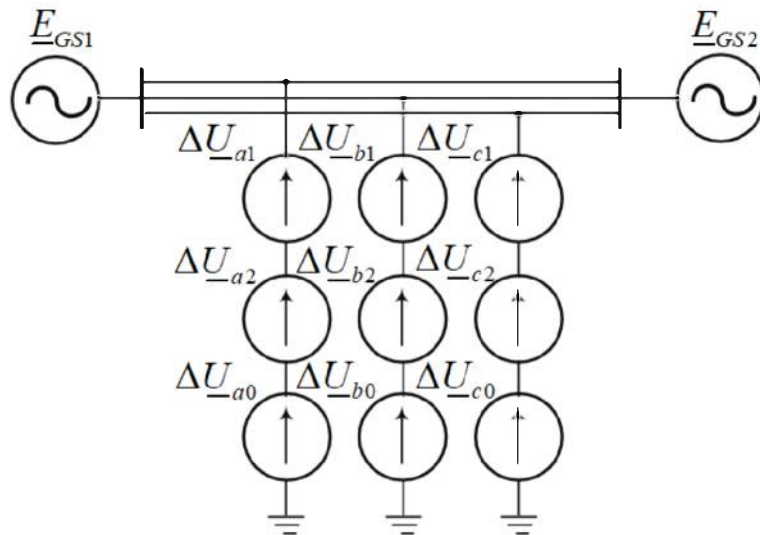
Наприклад, якщо задана система



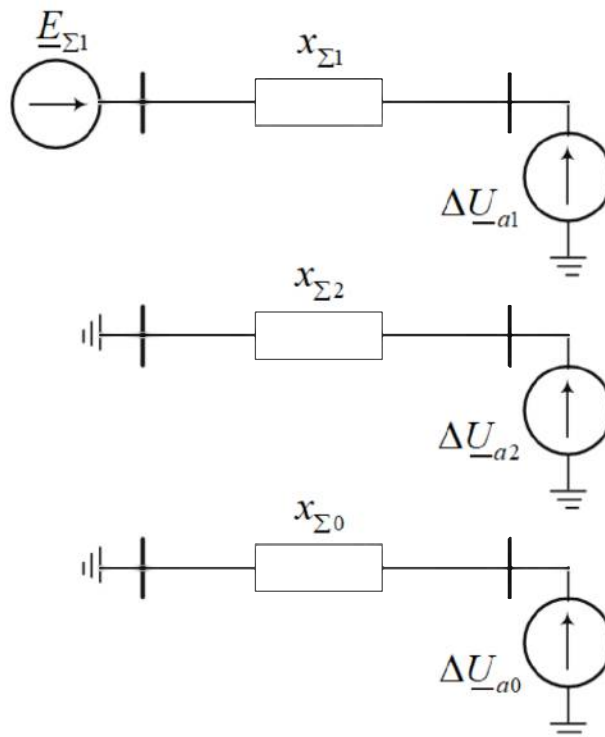
в якій виникло несиметричне ушкодження



то це означає, що його можна умовно еквівалентувати



В цьому випадку розглядається лише одна фаза, через яку визначають характер процесів в двох інших фазах.



Цей розрахунок виконується в наступному напрямку

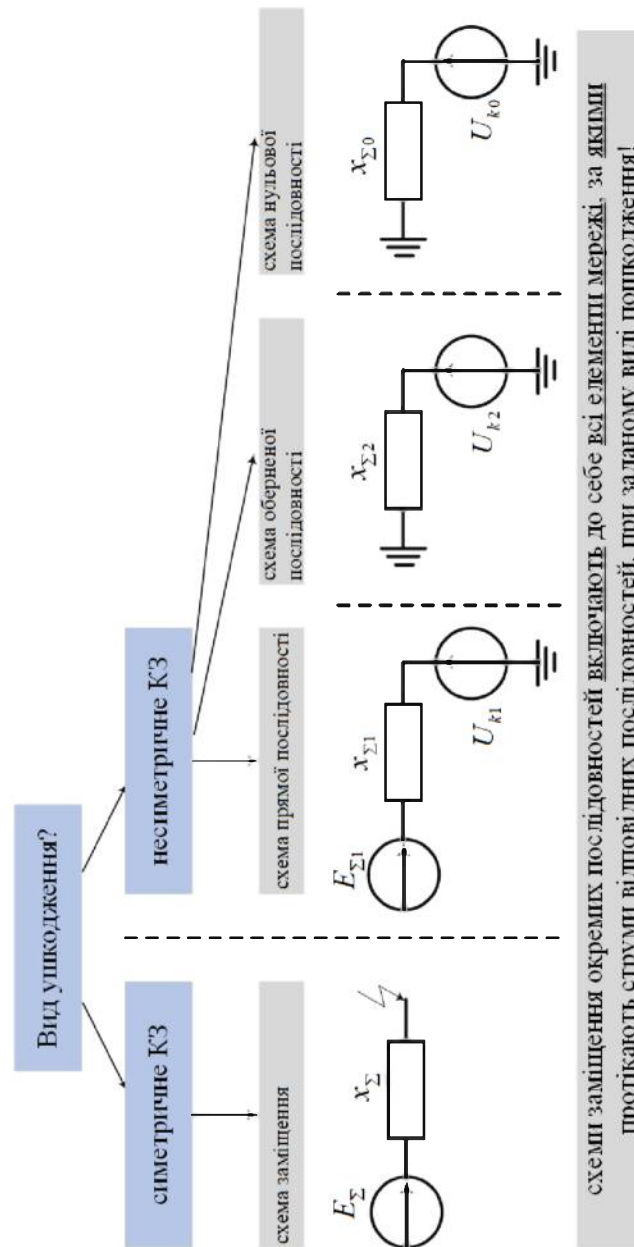


Рисунок 1.3 – Хід розрахунків

Справді, якщо згадати вище приведені викладки, то для однієї фази буде справедливим твердження

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ka1} &= \underline{E}_{\Sigma 1} - j \underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} \\ \underline{U}_{ka2} &= 0 - j \underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2} \\ \underline{U}_{ka0} &= 0 - j \underline{I}_{ka0} \cdot x_{\Sigma 0} \end{aligned} \right\}$$

З цього факту впливають значення фазних напруги та струмів

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{ka1} + \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \\ \underline{I}_b &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \\ \underline{I}_c &= a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{ka1} + \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \\ \underline{U}_b &= a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \\ \underline{U}_c &= a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \end{aligned} \right\}$$

Розв'яжемо ці рівняння для $k^{(3)}$, коли

$$\underline{U}_{ka}^{(3)} = 0, \quad \underline{U}_{kb}^{(3)} = 0, \quad \underline{U}_{kc}^{(3)} = 0$$

Таким чином на основі попередніх викладок отримуємо

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{ka1}^{(3)} &= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{jx_{\Sigma 1}} \\ \underline{I}_{ka2}^{(3)} &= 0 \\ \underline{I}_{ka0}^{(3)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \underline{I}_{ka}^{(3)} &= \underline{I}_{ka1}^{(3)} \\ \underline{I}_{kb}^{(3)} &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(3)} \\ \underline{I}_{kc}^{(3)} &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(3)} \end{aligned} \right\}$$

При цьому:

$$m^{(3)} = \frac{\underline{I}_{ka}^{(3)}}{\underline{I}_{k1}^{(3)}} = 1$$

Розв'яжемо ці ж самі рівняння для $k^{(1)}$, коли

$$\underline{U}_{ka}^{(1)} = 0, \quad \underline{I}_{kb}^{(1)} = 0, \quad \underline{I}_{kc}^{(1)} = 0$$

Основне спрощення буде полягати у тому, що

$$\begin{aligned} \underline{I}_b - \underline{I}_c &= (a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0}) - (a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0}) \\ 0 &= a \cdot (\underline{I}_{ka2} - \underline{I}_{ka1}) + a^2 \cdot (\underline{I}_{ka1} - \underline{I}_{ka2}) \\ (\underline{I}_{ka1} - \underline{I}_{ka2}) \cdot \underbrace{(a^2 - a)}_{-j\sqrt{3}} &= 0 \\ \underline{I}_{ka1} &= \underline{I}_{ka2} \end{aligned}$$

і наступні твердження

$$\begin{aligned} \underline{I}_b + \underline{I}_c &= (a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0}) + (a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0}) \\ 0 &= 2 \cdot \underbrace{(a^2 + a)}_{-1} \cdot \underline{I}_{ka1} + 2 \cdot \underline{I}_{ka0} \\ \underline{I}_{ka1} &= \underline{I}_{ka0} \end{aligned}$$

Так само з попередніх викладок

$$\begin{aligned} \underbrace{\underline{U}_{ka1} + \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}}_{\underline{U}_{ka}^{(1)}=0} &= \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2} - j\underline{I}_{ka0} \cdot x_{\Sigma 0} \\ 0 &= \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 2} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 0} \\ 0 &= \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) \\ \underline{I}_{ka1}^{(1)} &= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})} \end{aligned}$$

Запишемо повний струм для $k^{(1)}$

$$\underline{I}_{ka}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)} + \underline{I}_{ka2}^{(1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1)} = 3 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{3 \cdot \underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}$$

При цьому

$$m^{(1)} = \frac{\underline{I}_{ka}^{(1)}}{\underline{I}_{ka1}^{(1)}} = 3$$

Легко бачити, що для напруги так само

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ka2}^{(1)} &= -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} \\ \underline{U}_{ka0}^{(1)} &= -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} \\ \underline{U}_{ka1}^{(1)} &= -\underline{U}_{ka0}^{(1)} - \underline{U}_{ka2}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})\end{aligned}$$

З властивостей фазних напруг отримуємо

$$\begin{aligned}\underline{U}_{kb}^{(1)} &= a^2 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1)} + a \cdot \underline{U}_{ka2}^{(1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1)} = \\ &= a^2 \cdot j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a \cdot j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} - j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} \\ \underline{U}_{kc}^{(1)} &= a \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1)} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2}^{(1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1)} = \\ &= a \cdot j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a^2 \cdot j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} - j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0}\end{aligned}$$

Отримані співвідношення, зокрема, можна представити й у вигляді векторних діаграм

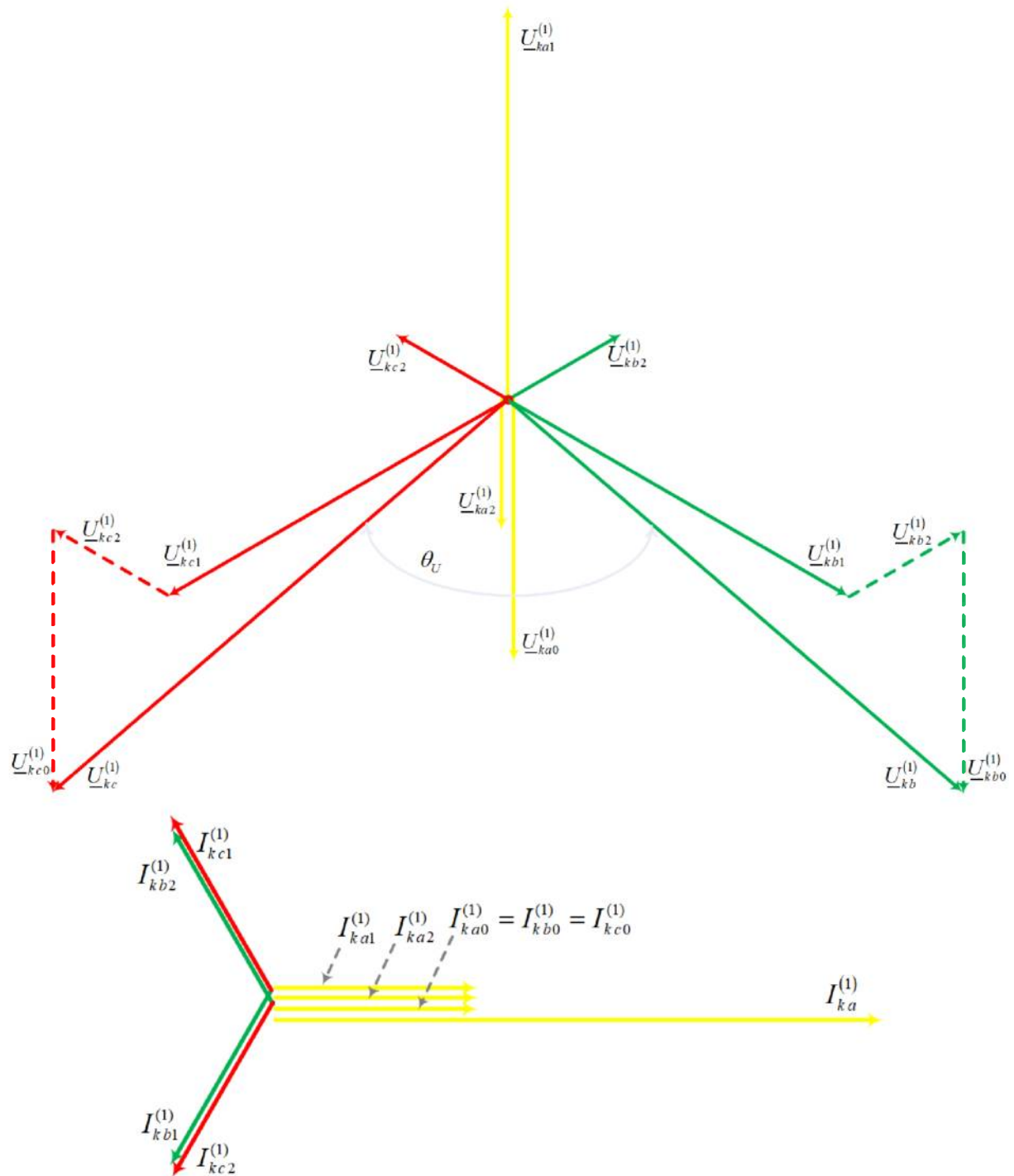


Рисунок 1.4 – ВД для $k^{(1)}$

Розв'яжемо ці рівняння для $k^{(2)}$, коли

$$\underline{U}_{kb}^{(2)} = \underline{U}_{kc}^{(2)}, \quad \underline{I}_{kb}^{(2)} = -\underline{I}_{kc}^{(2)}, \quad \underline{I}_{ka}^{(2)} = 0$$

Справді, якщо

$$\underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)} = & \left(\underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka1} \right) + \\ & + \left(\underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka1} \right) + \left(\underline{I}_{ka0} + \underline{I}_{ka0} + \underline{I}_{ka0} \right) \end{aligned}$$

$$\underbrace{\underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)}}_0 = \underbrace{\left(1 + a + a^2 \right)}_0 \cdot \underline{I}_{ka1} + \underbrace{\left(1 + a + a^2 \right)}_0 \cdot \underline{I}_{ka2} + 3 \cdot \underline{I}_{ka0}$$

то дістанемо наступний результат

$$\underline{I}_{ka0}^{(2)} = 0$$

$$\underline{I}_{ka}^{(2)} = \underline{I}_{ka1}^{(2)} + \underline{I}_{ka2}^{(2)} = 0$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(2)} = -\underline{I}_{ka2}^{(2)}$$

Спільний розв'язок для напруг:

$$\underline{U}_{kb}^{(2)} = \underline{U}_{kc}^{(2)}$$

$$a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} = a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}$$

$$a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} - a \cdot \underline{U}_{ka1} = a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} - a \cdot \underline{U}_{ka2}$$

$$(a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} = (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka2}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(2)} = \underline{U}_{ka2}^{(2)}$$

Отже виявляється, що

$$\underline{E}_{\Sigma 1} - j \underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} = -j \underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2}$$

Цей факт доводить наступне

$$\underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} = j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 2}$$

$$\underline{E}_{\Sigma 1} = j\underline{I}_{ka1} \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}$$

Аналогічно доводимо для інших фаз:

$$\underline{I}_{kb}^{(2)} = a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underbrace{\underline{I}_{ka2}}_{-\underline{I}_{ka1}} + \underbrace{\underline{I}_{ka0}}_0 =$$

$$= (a^2 - a) \cdot \underline{I}_{ka1} = -j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}$$

$$\underline{I}_{kc}^{(2)} = a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underbrace{\underline{I}_{ka2}}_{-\underline{I}_{ka1}} + \underbrace{\underline{I}_{ka0}}_0 =$$

$$= (a - a^2) \cdot \underline{I}_{ka1} = j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}$$

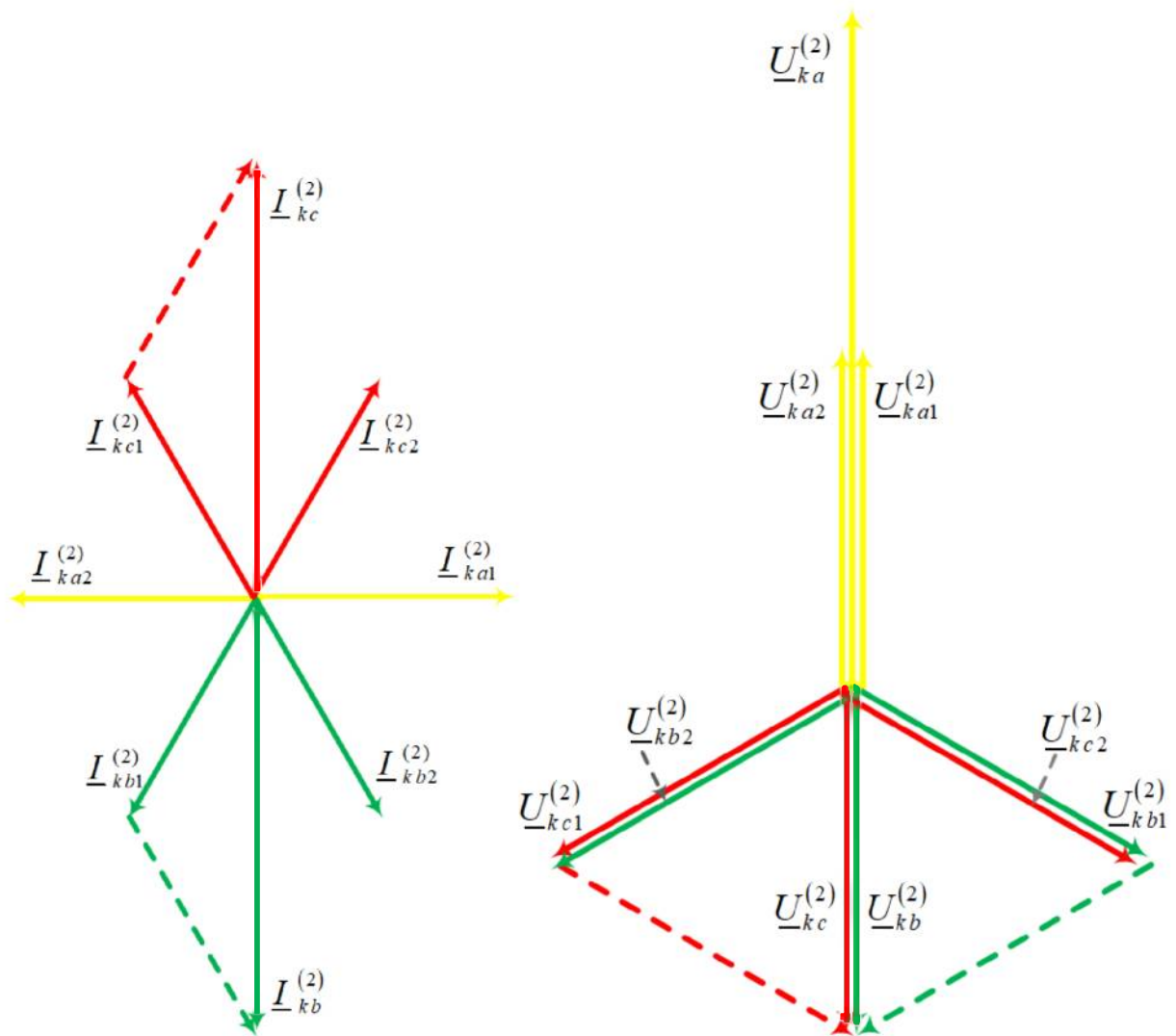
При цьому:

$$m^{(2)} = \frac{\underline{I}_{kb}^{(2)}}{\underline{I}_{ka1}^{(2)}} = \frac{\underline{I}_{kc}^{(2)}}{\underline{I}_{ka1}^{(2)}} = \sqrt{3}$$

Запишемо повний струм для $k^{(2)}$

$$\underline{I}_k^{(2)} = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}$$

Отримані співвідношення, так само, можна представити й у вигляді векторних діаграм

Рисунок 1.5 – ВД для $k^{(2)}$

Розв'яжемо ці рівняння для $k^{(1,1)}$, коли

$$\underline{I}_{ka}^{(1,1)} = 0, \quad \underline{U}_{kb}^{(1,1)} = 0, \quad \underline{U}_{kc}^{(1,1)} = 0$$

Справді, якщо

$$\underline{I}_{ka}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = 0$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} = -\left(\underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)}\right)$$

то дістанемо наступний результат

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{kb}^{(1,1)} - \underline{U}_{kc}^{(1,1)} &= (a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}) - (a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}) \\
0 &= (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} + (a - a^2) \cdot \underline{U}_{ka2} \\
(a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} &= (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka2} \\
\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} &= \underline{U}_{ka2}^{(1,1)}
\end{aligned}$$

Звідси, враховуючи

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{kb}^{(1,1)} + \underline{U}_{kc}^{(1,1)} &= (a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}) + (a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}) \\
\underline{U}_{kb}^{(1,1)} + \underline{U}_{kc}^{(1,1)} &= \left(\underbrace{a^2 + a}_{-1} \right) \cdot \underline{U}_{ka1} + \left(\underbrace{a^2 + a}_{-1} \right) \cdot \underline{U}_{ka2} + 2 \cdot \underline{U}_{ka0} \\
0 &= -\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} - \underline{U}_{ka2}^{(1,1)} + 2 \cdot \underline{U}_{ka0}^{(1,1)} \\
\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} &= \underline{U}_{ka2}^{(1,1)} = \underline{U}_{ka0}^{(1,1)}
\end{aligned}$$

Мають місце наступні твердження

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{ka0}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 0}} \\
\underline{I}_{ka2}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 2}}
\end{aligned}$$

У той же час

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} &= -\left(\underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} \right) = -\left(-\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 2}} - \frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 0}} \right) = \\
&= \underline{U}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(\frac{1}{jx_{\Sigma 2}} + \frac{1}{jx_{\Sigma 0}} \right)
\end{aligned}$$

Визначимо залежність напруги

$$\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$$

Враховуємо, що

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{j x_{\Sigma 0}} = -\frac{1}{j x_{\Sigma 0}} j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \\ \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{j x_{\Sigma 2}} = -\frac{1}{j x_{\Sigma 2}} j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \end{aligned}$$

Тепер є змога визначити фазні струми

$$\begin{aligned} \underline{I}_{kb}^{(1,1)} &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a \cdot \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = \\ &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a \cdot \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) + \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) = \\ &= \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a^2 - a \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{kc}^{(1,1)} &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = \\ &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a^2 \cdot \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) + \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) = \\ &= \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a - a^2 \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} - \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right) \end{aligned}$$

Взагалі, при подальших спрощеннях

$$\underline{I}_b^{(1,1)} = \underline{I}_c^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\sqrt{x_{\Sigma 2}^2 + x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 0}^2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$$

При цьому для $k^{(1,1)}$

$$m^{(1,1)} = \frac{I_{kb}^{(1,1)}}{I_{ka1}^{(1,1)}} = \frac{I_{kc}^{(1,1)}}{I_{ka1}^{(1,1)}} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{x_{\Sigma 2}^2 + x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 0}^2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$$

Очевидно, що

$$\begin{cases} x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 0} & \rightarrow m^{(1,1)} = 1,5 \\ \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}} = 0 \text{ або } \infty & \rightarrow m^{(1,1)} = \sqrt{3} \end{cases}$$

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}$$

Отримані співвідношення, так само, можна представити й у вигляді векторних діаграм

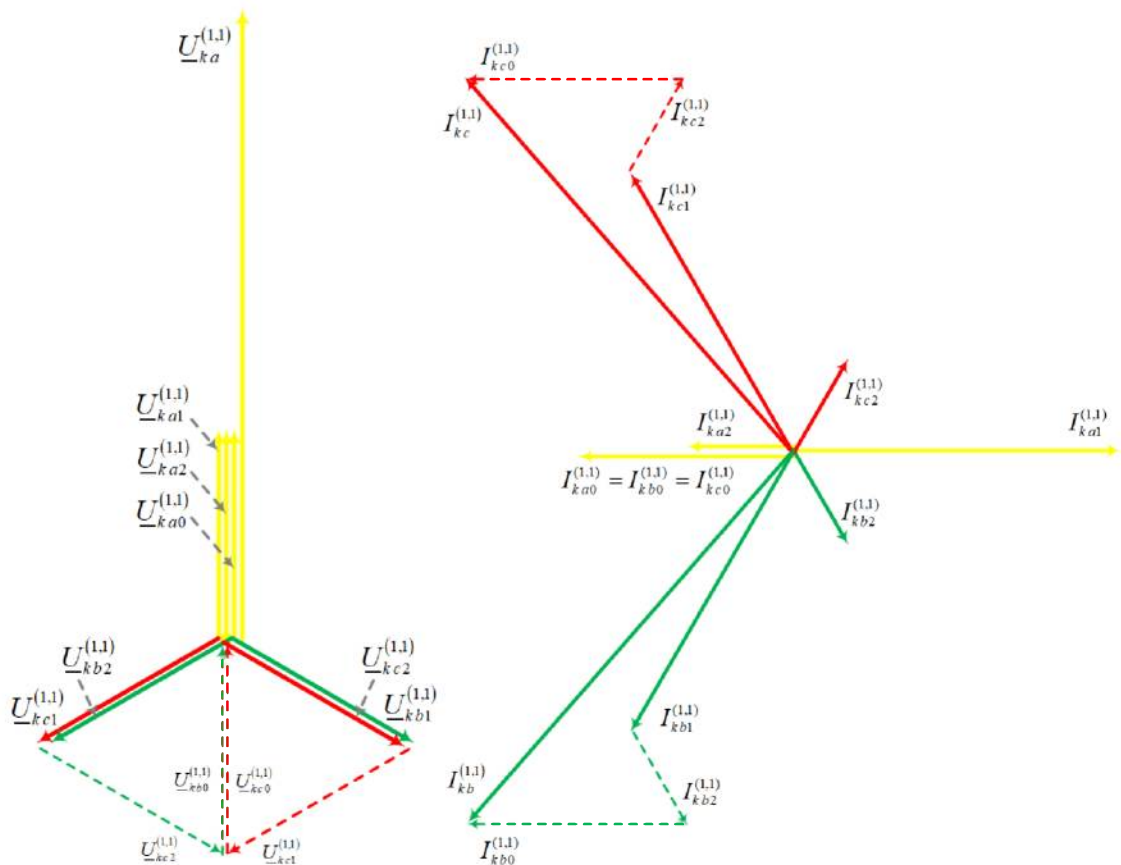


Рисунок 1.6 – ВД для $k^{(1,1)}$

Виконуючи ті ж самі дії для напруги

$$\underline{U}_{ka}^{(1,1)} = \underline{U}_{ka1}^{(1,1)} + \underline{U}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1,1)} = 3 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1,1)}$$

$$\underline{U}_{kb}^{(1,1)} = \underline{U}_{kc}^{(1,1)} = 0$$

Покажемо, як враховується активний опір у місці ушкодження, який характеризує процеси в електричній дузі.

$$\underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{\left[r_{\partial} + j x_{\Sigma 1} \right] + \left[r_{\partial} + j x_{\Sigma 2} \right] + \left[r_{\partial} + j x_{\Sigma 0} \right]}$$

$$= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{3r_{\partial} + j \left[x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0} \right]}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot \left(3r_{\partial} + j \left[x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0} \right] \right)$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{\left[\frac{r_{\partial}}{2} + j x_{\Sigma 1} \right] + \left[\frac{r_{\partial}}{2} + j x_{\Sigma 2} \right]} =$$

$$= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{r_{\partial} + j \left(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} \right)}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(2)} = \underline{U}_{ka2}^{(2)} = \underline{I}_{ka2}^{(2)} \cdot \left[r_{\partial} + j x_{\Sigma 2} \right]$$

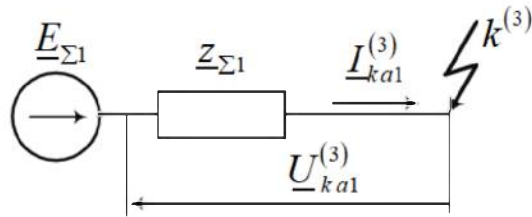
$$\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j x_{\Sigma 1} + \frac{j x_{\Sigma 2} \cdot (r_{\partial} + j x_{\Sigma 0})}{j x_{\Sigma 2} + (r_{\partial} + j x_{\Sigma 0})}}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{j x_{\Sigma 2} \cdot (r_{\partial} + j x_{\Sigma 0})}{j x_{\Sigma 2} + (r_{\partial} + j x_{\Sigma 0})}$$

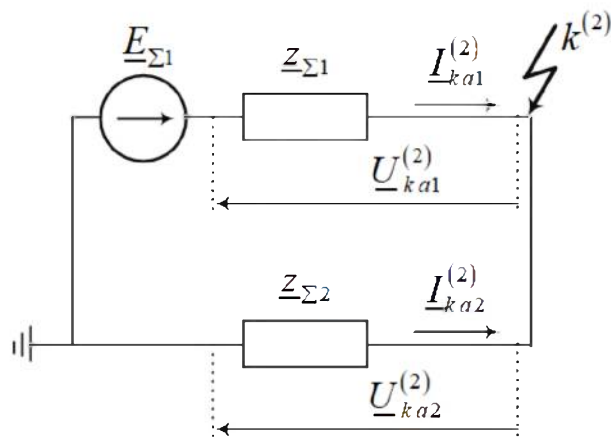
Всі отримані математичні співвідношення можна представити графічною інтерпретацією.

Має наступні схеми:

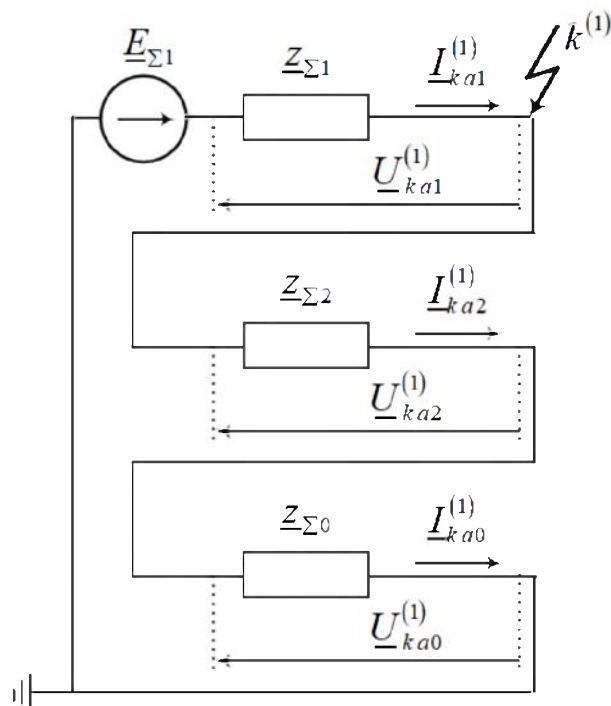
- для $k^{(3)}$



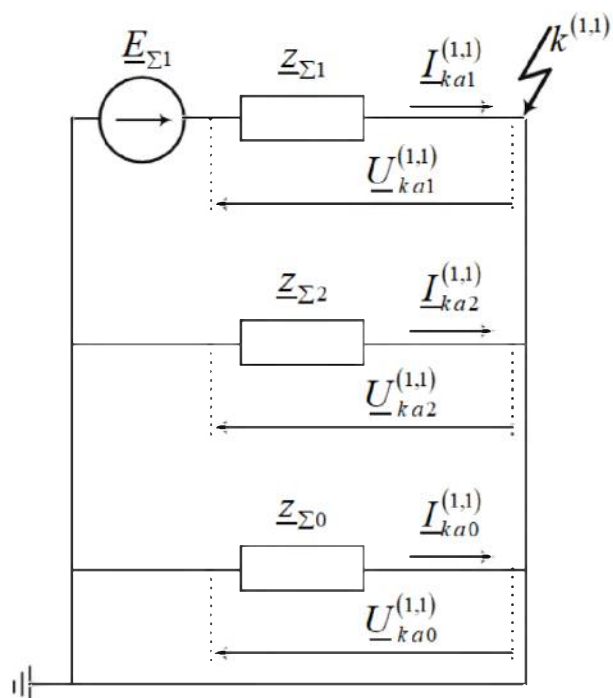
- для $k^{(2)}$



- для $k^{(1)}$



- для $k^{(1,1)}$



Сформулюємо підсумковий результат

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1)} < \underline{I}_{ka1}^{(2)} < \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} < \underline{I}_{ka1}^{(3)}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1)} > \underline{U}_{ka1}^{(2)} > \underline{U}_{ka1}^{(1,1)} > \underline{U}_{ka1}^{(3)} = 0$$

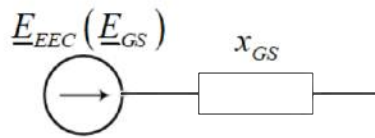
В результаті ми маємо алгоритм за яким можемо розрахувати несиметричні КЗ.

РОЗДІЛ 2. ДІЛЯНКА МЕРЕЖІ 110 КВ МІЖ СЛОВ'ЯНСЬКА ТЕС І ПС СОЛЬ-110

Схема Слов'янської ТЕС:

Уставка: локально		Макс. значения	
Рабочая точка		Мощность КЗ Sk макс.	3100. MVA
Угол	0. deg	Ток КЗ Ik макс.	16.27078 kA
Уставка напряжения	1.032 p.u.	Козф. R/X (макс.)	0.1
Опорная шина	▼ ➡ ...	Козф. импеданса	
		Z2/Z1 макс.	1.
		X0/X1 макс.	1.
		R0/X0 макс.	0.1

Зауважимо, що для енергосистеми



$$x_{*GS} = \frac{I_{\delta}}{I_{\text{відк.ном}}}, \quad x_{*GS} = \frac{S_{\delta}}{S_{\text{кз}}}, \quad E_{GS} = 1,05$$

Для ПС Ямполь-110 (ТДТН-15000/110/35)

Имя: ТДТН-15000/110			
Ном. мощность		Ном. напряжение	
Сторона ВН	15. MVA	Сторона ВН	115. kV
Сторона СН	15. MVA	Сторона СН	38.5 kV
Сторона НН	15. MVA	Сторона НН	6.6 kV
Векторная группа			
Сторона ВН	YN	Фаз. сдвиг	0. *30deg
Сторона СН	YN	Фаз. сдвиг	0. *30deg
Сторона НН	D	Фаз. сдвиг	11. *30deg
Обозначение YNd11			
Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям. Например, Ik(BH-CH) относится к мин. Sr(BH) и Sr(CH)			
Полное сопротивление прямой последовательности			
Напряжение КЗ Ik		Потери в меди	
ВН-СН	10.5 %	ВН-СН	85. kW
СН-НН	6.5 %	СН-НН	85. kW
НН-ВН	17.5 %	НН-ВН	85. kW
Ответ. стороны ВН		Полн. сопр. намагничивания	
Добав. напр. на отв.	1.78 %	Положение	Нейтраль
Фазовый сдвиг напр.	0. deg	Ток ХХ	0.8 %
Нейтр. полож.	0	Потери холостого	19. kW
Мин. положение	-9	Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Макс. положение	9	Положение	Нейтраль
Ток ХХ		Действ. R/X	
0. %		0.	
Макс. положение		2	

Для ПС Северськ-110 (ТДТН-20000/110/35)

Имя: ТДТН-20000/110	
Ном. мощность	
Сторона ВН: 20. MVA	Сторона ВН: 115. kV
Сторона СН: 20. MVA	Сторона СН: 38.5 kV
Сторона НН: 20. MVA	Сторона НН: 6.6 kV
Векторная группа	
Сторона ВН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона СН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона НН: D	Фаз. сдвиг: 11. *30deg
Обозначение: YNDyn0d11	
Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям Например, uk(ВН-СН) относится к мин. Sr(ВН) и Sr(СН)	
Полное сопротивление прямой последовательности	
Напряжение КЗ uk	Потери в меди
ВН-СН: 10.5 %	ВН-СН: 153. kW
СН-НН: 6.5 %	СН-НН: 153. kW
НН-ВН: 17.5 %	НН-ВН: 153. kW
Отв. стороны ВН	
Добав. напр. на отв.:	1.78 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-9
Макс. положение:	9
Полн. сопр. намагничивания	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0.8 %
Потери холостого:	62. kW
Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0. %
Действ. R/X:	0.
Отв. стороны СН	
Добав. напр. на отв.:	2.5 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-2
Макс. положение:	2

Для ПС Бахмутська-110 (ТДТН-10000/110/35)

Имя: ТДТН-10000/110	
Ном. мощность	
Сторона ВН: 10. MVA	Сторона ВН: 115. kV
Сторона СН: 10. MVA	Сторона СН: 38.5 kV
Сторона НН: 10. MVA	Сторона НН: 6.6 kV
Векторная группа	
Сторона ВН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона СН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона НН: D	Фаз. сдвиг: 11. *30deg
Обозначение: YNDyn0d11	
Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям (например, uk(ВН-СН) относится к мин. Sr(ВН) и Sr(СН))	
Полное сопротивление прямой последовательности	
Напряжение КЗ uk	Потери в меди
ВН-СН: 10.5 %	ВН-СН: 76. kW
СН-НН: 6.5 %	СН-НН: 76. kW
НН-ВН: 17.5 %	НН-ВН: 76. kW
Отв. стороны ВН	
Добав. напр. на отв.:	1.78 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-9
Макс. положение:	9
Полн. сопр. намагничивания	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0.8 %
Потери холостого:	11.5 kW
Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0. %
Действ. R/X:	0.
Отв. стороны СН	
Добав. напр. на отв.:	2.5 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-2
Макс. положение:	2

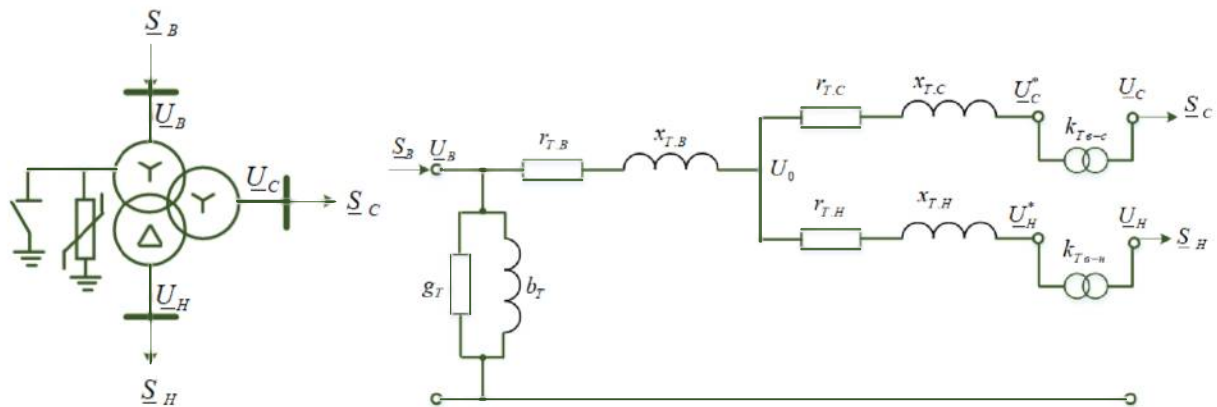
Для ПС Соль-110 (ТДТН-31500/110/35)

Имя: ТДТН-31500/110	
Ном. мощность	
Сторона ВН: 31.5 MVA	Сторона ВН: 115. kV
Сторона СН: 31.5 MVA	Сторона СН: 38.5 kV
Сторона НН: 31.5 MVA	Сторона НН: 6.6 kV
Векторная группа	
Сторона ВН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона СН: YN	Фаз. сдвиг: 0. *30deg
Сторона НН: D	Фаз. сдвиг: 11. *30deg
Обозначение: YNDyn0d11	
Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям Например, uk(ВН-СН) относится к мин. Sr(ВН) и Sr(СН)	
Полное сопротивление прямой последовательности	
Напряжение КЗ uk	Потери в меди
ВН-СН: 10.5 %	ВН-СН: 260. kW
СН-НН: 6.5 %	СН-НН: 260. kW
НН-ВН: 17.5 %	НН-ВН: 260. kW
Отв. стороны ВН	
Добав. напр. на отв.:	1.78 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-9
Макс. положение:	9
Полн. сопр. намагничивания	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0.6 %
Потери холостого:	125. kW
Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Положение:	Нейтраль
Ток XX:	0. %
Действ. R/X:	0.
Отв. стороны СН	
Добав. напр. на отв.:	2.5 %
Фазовый сдвиг напр.:	0. deg
Нейтр. полож.:	0
Мин. положение:	-2
Макс. положение:	2

Для ПС Соль-110 (ТДТН-40000/110/35)

Имя: ТДТН-40000/110			
Ном. мощность			
Сторона ВН	40, MVA		
Сторона СН	40, MVA		
Сторона НН	40, MVA		
Ном. напряжения			
Сторона ВН	115, kV		
Сторона СН	38,5 kV		
Сторона НН	6,6 kV		
Векторная группа			
Сторона ВН	YN	Фаз. сдвиг	0, *30deg
Сторона СН	YN	Фаз. сдвиг	0, *30deg
Сторона НН	D	Фаз. сдвиг	11, *30deg
Обозначение YN0yn0d11			
Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям Например, uk (ВН-СН) относится к мин. S _N (ВН) и S _N (СН)			
Полное сопротивление прямой последовательности			
Напряжения КЗ uk		Потери в меди	
ВН-СН	10,5 %	ВН-СН	200, kW
СН-НН	6,5 %	СН-НН	200, kW
НН-ВН	17,5 %	НН-ВН	200, kW
Ответы стороны ВН		Полн. сопр. намагничивания	
Добав. напр. на отв.	1,78 %	Положение	Нейтраль
Фазовый сдвиг напр.	0, deg	Ток ХХ	0,6 %
Нейтр. полож.	0	Потери холостого	39, kW
Мин. положение	-9	Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Макс. положение	9	Положение	Нейтраль
Ответы стороны СН		Ток ХХ	0, %
Добав. напр. на отв.	2,5 %	Действ. R/X	0,
Фазовый сдвиг напр.	0, deg		
Нейтр. полож.	0		
Мин. положение	2		
Макс. положение	2		

Цим трансформаторам відповідає схема заміщення



Врахуємо, що опори будуть визначатися наступним чином:

$$x_{*T\theta} = \frac{0,5 \cdot (u_{\kappa\theta-\text{C}\%} + u_{\kappa\theta-\text{H}\%} - u_{\kappa\text{C}-\text{H}\%})}{100} \cdot \frac{S_{\theta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_{*T\text{C}} = \frac{0,5 \cdot (u_{\kappa\theta-\text{C}\%} - u_{\kappa\theta-\text{H}\%} + u_{\kappa\text{C}-\text{H}\%})}{100} \cdot \frac{S_{\theta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

$$x_{*T\text{H}} = \frac{0,5 \cdot (-u_{\kappa\theta-\text{C}\%} + u_{\kappa\theta-\text{H}\%} + u_{\kappa\text{C}-\text{H}\%})}{100} \cdot \frac{S_{\theta}}{S_{\text{НОМ}}}$$

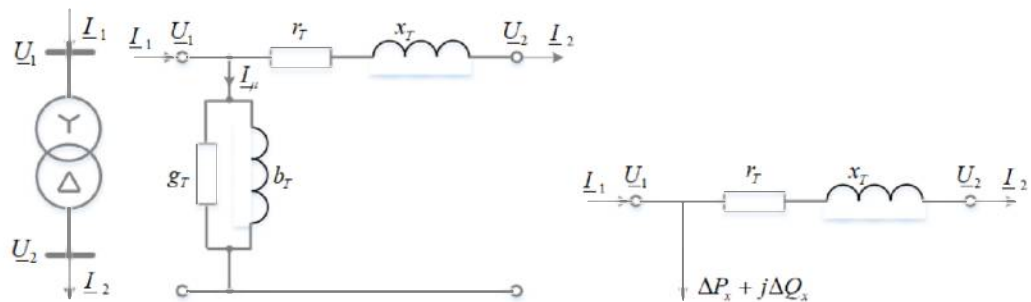
Для ПС Зовна-110 (ТДН-15000/110)

Имя	ТДН-15000/110/9	
Схема соедин.	3-фазный трансформатор	
Номинал. Мощность	15.	MVA
Номинал. частота	50.	Hz
Номинал. напр.		
Сторона ВН	115.	kV
Сторона НН	6.3	kV
Сопротивление прямой посл.		
Напряжение КЗ ук	10.5	%
Потери в меди	130.	kW
Векторная группа		
Сторона ВН	YN	
Сторона НН	D	
Фазовый сдвиг	11.	*30deg
Обозначение	YNd11	

Для ПС Свердлова-110 (ТДН-16000/110)

Имя	ТДН-16000/110/9	
Схема соедин.	3-фазный трансформатор	
Номинал. Мощность	16.	MVA
Номинал. частота	50.	Hz
Номинал. напр.		
Сторона ВН	115.	kV
Сторона НН	6.3	kV
Сопротивление прямой посл.		
Напряжение КЗ ук	10.5	%
Потери в меди	85.	kW
Векторная группа		
Сторона ВН	YN	
Сторона НН	D	
Фазовый сдвиг	11.	*30deg
Обозначение	YNd11	

Цим трансформаторам відповідає схема заміщення



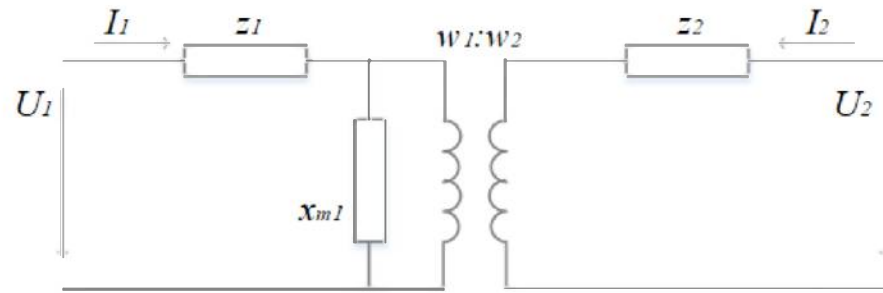
Врахуємо, схема визначається наступним чином:

А	позначення автотрансформатора
	трансформатор не позначається
Т	кількість фаз: трифазний
О	однофазний
Р	наявність розщеплення обмотки
С	вид системи охолодження: природне повітряне, відкрите виконання
М	
Д	
Ц	
ДЦ	
Т	кількість обмоток: триобмотковий
	двообмотковий не позначається
Н	вид перемикавня відгалужень: наявність РПН
Г	особливість виконання: грозоупорне
З	
У	
Ж	для електрофікації залізниць
С	для власних потреб електричних станцій
$S_{ном}$	номінальна потужність трансформатора, кВА
$U_{нов}$	клас напруги обмотки ВН, кВ, і СН для триобмоткових трансформаторів

Як доведено, для двообмоткового трансформатора справедливі твердження

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{U}_{BH} &= \underline{z}_{BH} \cdot \underline{I}_{BH} + \frac{w_{BH}}{w_{HH}} \cdot \underline{U}_{HH} - \frac{w_{BH}}{w_{HH}} \cdot \underline{z}_{HH} \cdot \underline{I}_{HH} \\
 \underline{U}_{HH} &= \frac{w_{HH}}{w_{BH}} \cdot \underline{U}_{BH} - \frac{w_{HH}}{w_{BH}} \cdot \underline{z}_{BH} \cdot \underline{I}_{BH} + \underline{z}_{HH} \cdot \underline{I}_{HH} \\
 \underline{z}_{BH} &= r_{BH} + j x_{BH} \\
 \underline{z}_{HH} &= r_{HH} + j x_{HH}
 \end{aligned} \right\}$$

яким відповідає схема заміщення



Варто підкреслити, що у відносних одиницях ця система використовується найчастіше:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{\text{вн}} &= \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \\ \underline{z}_{\text{вн}} &= \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \\ \underline{z}_{\text{вн}} &= \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \cdot I_{\text{вн}} + \frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{вн}}} \cdot U_{\text{вн}} - \frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{вн}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \cdot I_{\text{вн}} \\ \underline{z}_{\text{вн}} &= \frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{вн}}} \cdot U_{\text{вн}} - \frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{вн}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \cdot I_{\text{вн}} + \left(\frac{n_{\text{вн}}}{n_{\text{внНОМ}}} \right)^2 \cdot \underline{z}_{\text{внНОМ}} \cdot I_{\text{вн}} \end{aligned}$$

Згадаємо, класичні базисні умови:

$$\begin{aligned} \frac{n_{\text{внНОМ}}}{n_{\text{внНОМ}}} &= \frac{U_{\text{внб}}}{U_{\text{внб}}} \\ U_{\text{внб}} &= \underline{z}_{\text{внб}} \cdot I_{\text{внб}} \\ U_{\text{внб}} &= \underline{z}_{\text{внб}} \cdot I_{\text{внб}} \end{aligned}$$

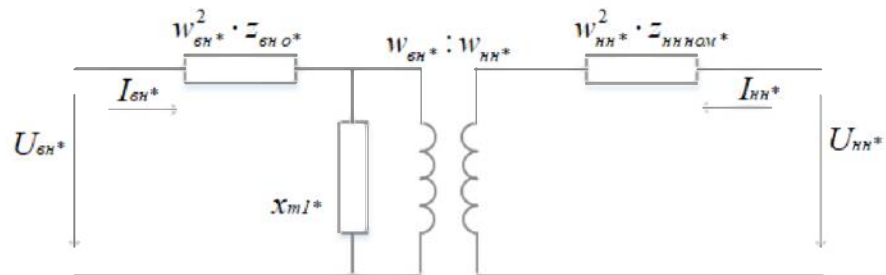
З їх допомогою маємо нову систему

$$n_{\delta H}^* = \frac{n_{\delta H}}{n_{\delta H \text{ НОЛ}}}$$

$$n_{HH}^* = \frac{n_{HH}}{n_{HH \text{ НОЛ}}}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{\delta H}^* &= n_{\delta H}^{*2} \cdot \underline{z}_{\delta H \text{ НОЛ}}^* \cdot \underline{I}_{\delta H}^* + \frac{n_{\delta H}^*}{n_{HH}^*} \cdot \underline{U}_{HH}^* - \frac{n_{\delta H}^*}{n_{HH}^*} \cdot n_{HH}^{*2} \cdot \underline{z}_{HH \text{ НОЛ}}^* \cdot \underline{I}_{HH}^* \\ \underline{U}_{HH}^* &= \frac{n_{HH}^*}{n_{\delta H}^*} \cdot \underline{U}_{\delta H}^* - \frac{n_{HH}^*}{n_{\delta H}^*} \cdot n_{\delta H}^{*2} \cdot \underline{z}_{\delta H \text{ НОЛ}}^* \cdot \underline{I}_{\delta H}^* + n_{HH}^{*2} \cdot \underline{z}_{HH \text{ НОЛ}}^* \cdot \underline{I}_{HH}^* \end{aligned} \right\}$$

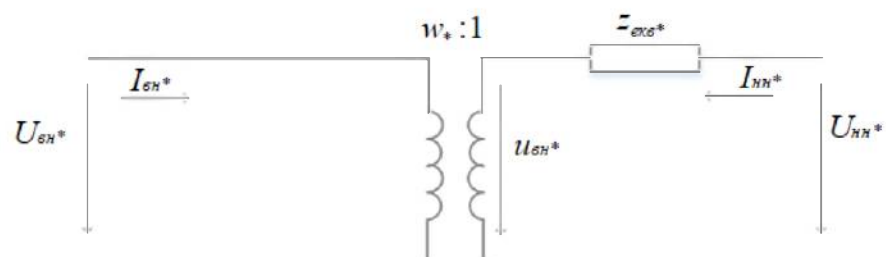
Вона відповідає новій схемі



Далі переходимо до розгляду еквівалентного опору

$$\underline{z}_{\text{екв}}^* = w_2^{*2} \cdot (\underline{z}_{\delta H \text{ НОЛ}}^* + \underline{z}_{HH \text{ НОЛ}}^*) = \left(\frac{w_{HH}}{w_{HH \text{ НОЛ}}} \right)^2 \cdot (\underline{z}_{\delta H \text{ НОЛ}}^* + \underline{z}_{HH \text{ НОЛ}}^*)$$

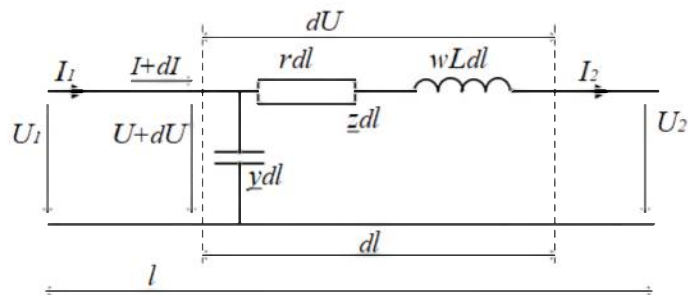
якому відповідає так само нова схема



Зазначимо, що для ЛЕП використовують наступну систему

$$\left. \begin{aligned} d\underline{U} &= \underline{I} \cdot \underline{z} dl \\ d\underline{I} &= \underline{U} \cdot \underline{y} dl \end{aligned} \right\}$$

Їй відповідає схема



З цього випливає рішення

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \frac{\underline{U}_2 + \underline{z}_c \cdot \underline{I}_2}{2} e^{\gamma l} + \frac{\underline{U}_2 - \underline{z}_c \cdot \underline{I}_2}{2} e^{-\gamma l} \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2 / \underline{z}_c + \underline{I}_2}{2} e^{\gamma l} - \frac{\underline{U}_2 / \underline{z}_c - \underline{I}_2}{2} e^{-\gamma l} \end{aligned} \right\}$$

Враховуючи, що

$$\left. \begin{aligned} e^{\gamma l} &= e^{(\alpha + j\beta)l} = e^{\alpha l} \cdot (\cos \beta l + j \cdot \sin \beta l) \\ e^{-\gamma l} &= e^{-(\alpha + j\beta)l} = e^{-\alpha l} \cdot (\cos \beta l - j \cdot \sin \beta l) \end{aligned} \right\}$$

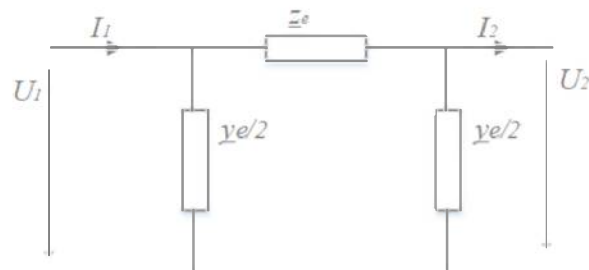
рішення розділяється

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} + \underline{z}_c \cdot \underline{I}_2 \cdot \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_c} \cdot \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} + \underline{I}_2 \cdot \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \end{aligned} \right\}$$

а потім й спрощується

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cosh(\gamma l) + \underline{z}_c \cdot \underline{I}_2 \cdot \sinh(\gamma l) \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_c} \cdot \sinh(\gamma l) + \underline{I}_2 \cdot \cosh(\gamma l) \end{aligned} \right\}$$

Зазначимо, що цьому рішенню відповідає схема



Для АС-240/32

Имя		АС-240/32			
Ном. напряжение	110.	kV			
Ном. ток	0.61	kA			
Ном. частота	50.	Hz			
Кабель / ЛЭП	ЛЭП				
Тип системы	перем. ток	Фазы	3		
		Кол-во Нейтр.	0		
Удельные параметры прямой и обратной посл.		Удельные параметры нулевой посл.			
АС-Акт. сопр. R'(20°C)	0.12	Ohm/km	АС-Акт. сопр. R0'	0.12	Ohm/km
Реакт. сопр. X'	0.405	Ohm/km	Реакт. сопр. X0'	1.2	Ohm/km

Мною буде досліджуватися наступна схема

$$\underline{S}_T' = \underline{S}_{HAB} + \Delta \underline{S}_{M\partial\Sigma}$$

$$\underline{S}_{np} = \underline{S}_T' + \Delta \underline{S}_{cm} = \underline{S}_{HAB} + \Delta \underline{S}_{M\partial\Sigma} + \Delta \underline{S}_{cm}$$

$$\underline{S}_p = \sum \underline{S}_{np} - j \sum \frac{Q_{c.тен}}{2}$$

$$\underline{S}_{n-m}^{//} = \underline{S}_{pm}$$

$$\Delta \underline{S}_{n-m} = \frac{\left(P_{n-m}^{//}\right)^2 + \left(Q_{n-m}^{//}\right)^2}{\left(U_m^{\langle 0 \rangle}\right)^2} \cdot \left(r_{n-m} + j x_{n-m}\right)$$

$$\underline{S}_{n-m}' = \underline{S}_{n-m}^{//} + \Delta \underline{S}_{n-m}$$

і відповідних їм втрат напруги в мережі

$$\Delta U_{1-i} = \frac{P_{1-i}' \cdot r_{1-i} + Q_{1-i}' \cdot x_{1-i}}{U_1}$$

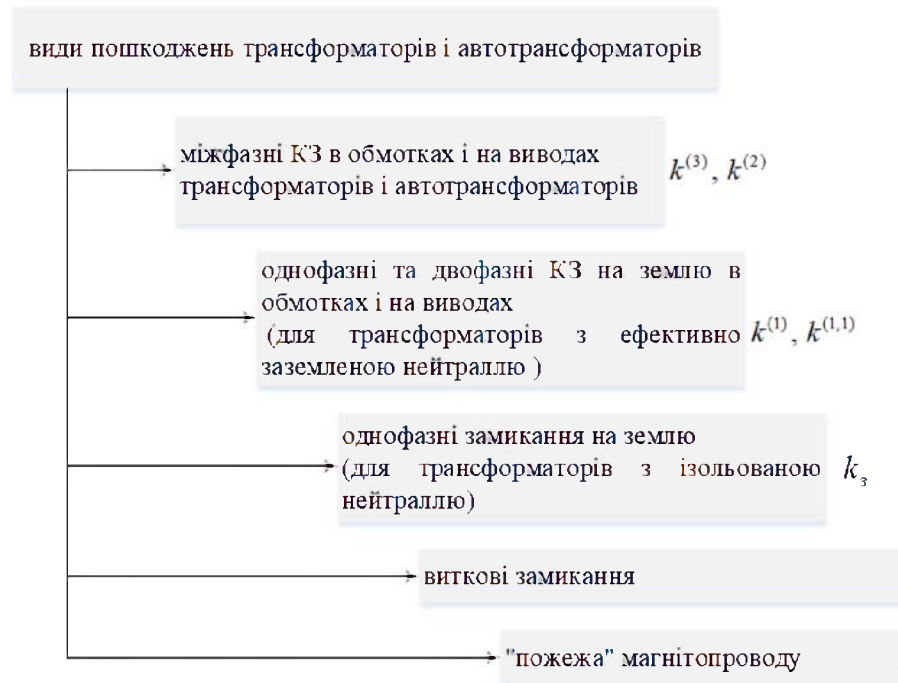
$$\delta U_{1-i} = \frac{P_{1-i}' \cdot x_{1-i} - Q_{1-i}' \cdot r_{1-i}}{U_1}$$

$$U_i = \sqrt{\left(U_1 - \Delta U_{1-i}\right)^2 + \left(\delta U_{1-i}\right)^2}$$

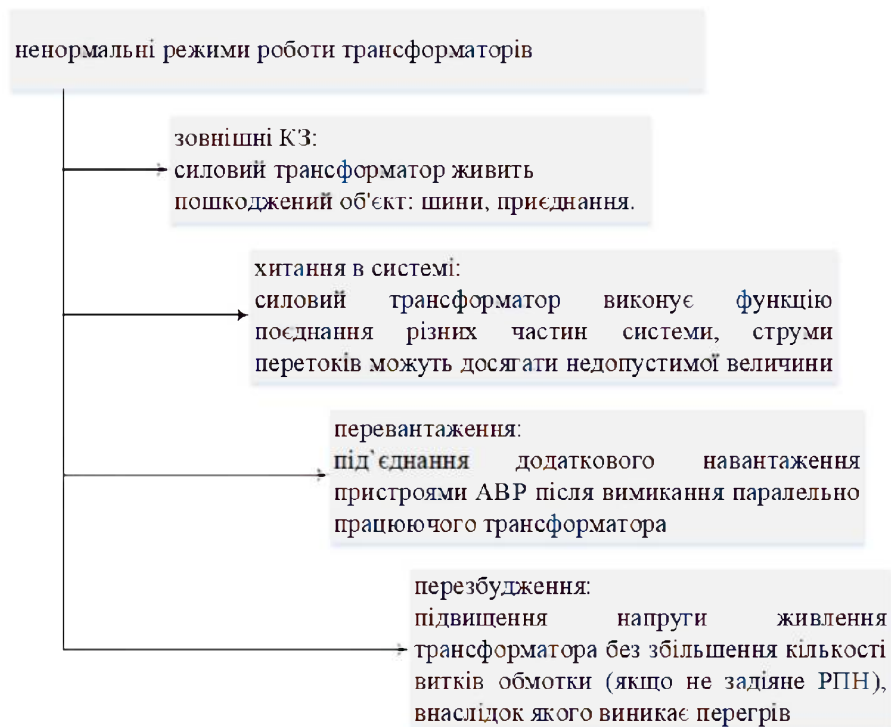
$$\frac{U_i^{\langle k \rangle} - U_i^{\langle k-1 \rangle}}{U_i^{\langle k-1 \rangle}} \cdot 100 \leq \varepsilon \%$$

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРА ПС СОЛЬ-110

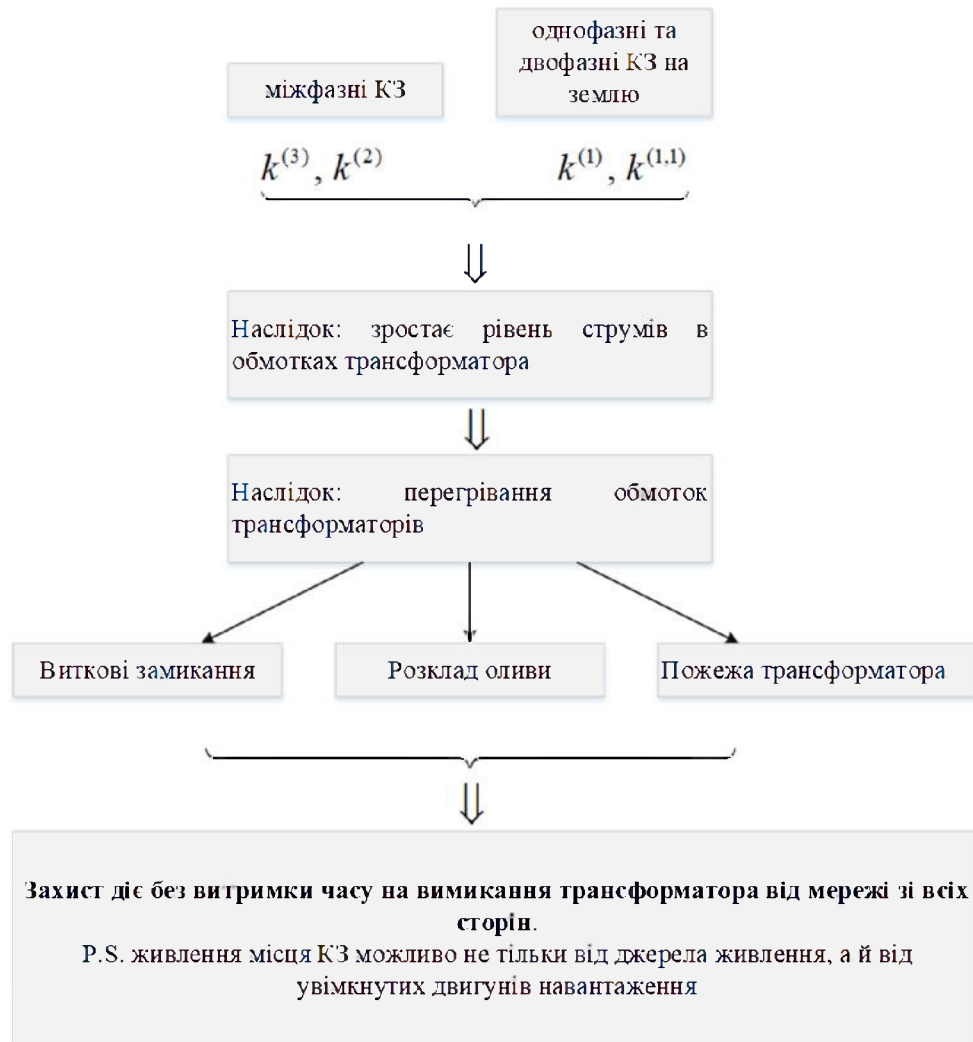
Зауважимо, що в силових трансформаторах можуть виникати наступні ушкодження



або ненормальні режими

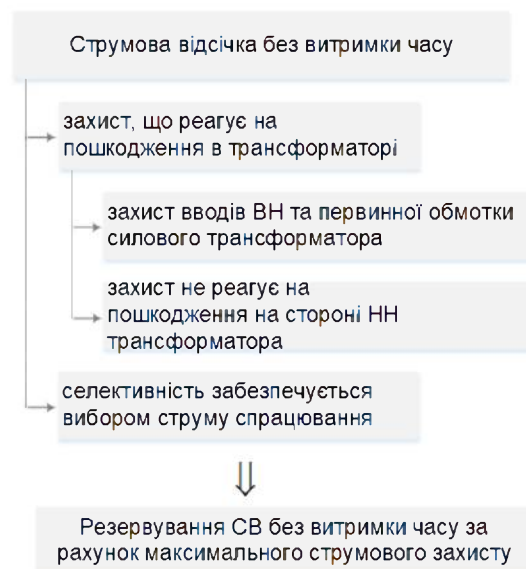


Їх наслідки є наступними



Розглянемо види захистів трансформаторів.

Якщо це струмова відсічка, то



Вона має наступну схему – рис.3.1.

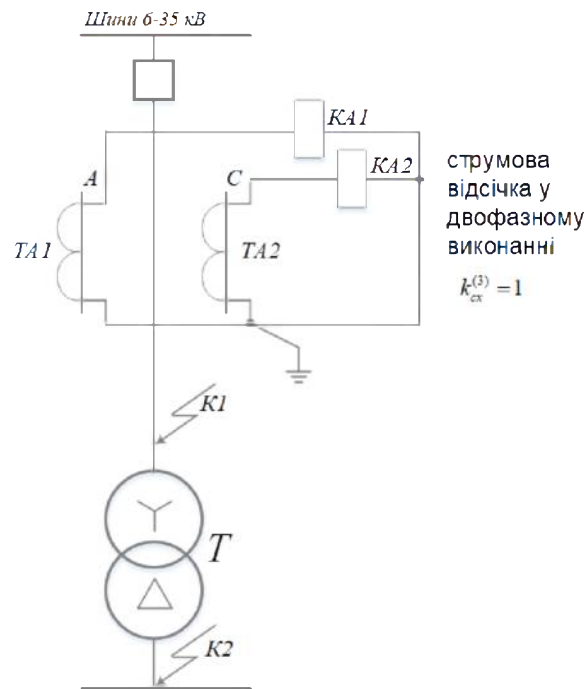
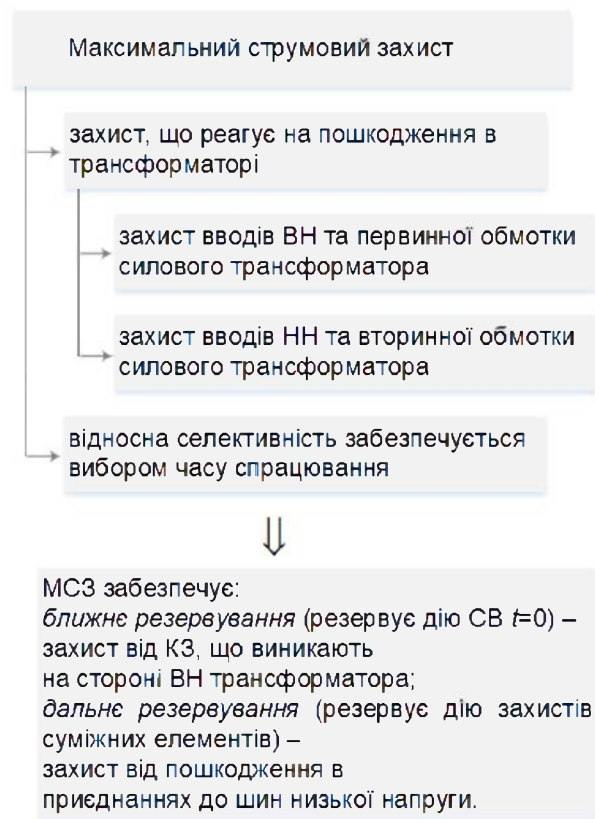


Рисунок 3.1 – Принципова схема СВ

Якщо це максимальний струмовий захист:



Покажемо схему МСЗ – рис.3.2.

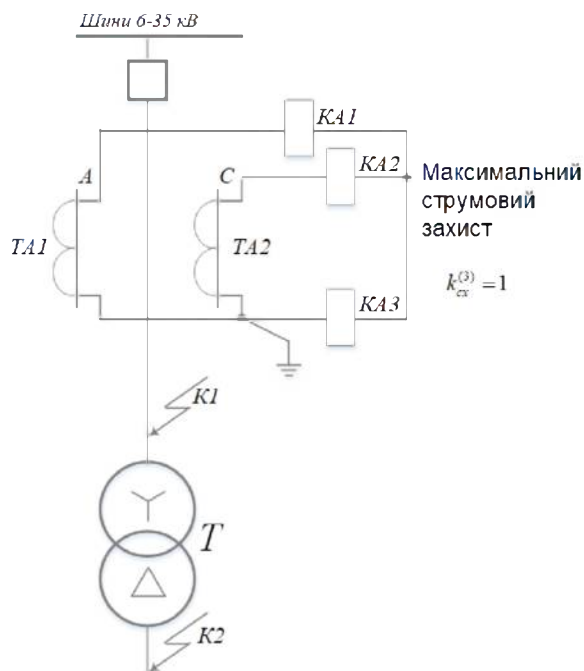
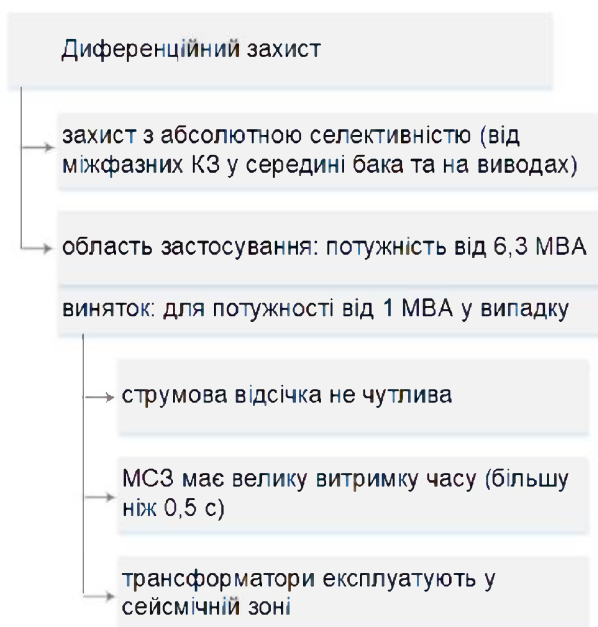


Рисунок 3.2 – Принципова схема МСЗ

Якщо це диференційний захист, то



Покажемо схему диференційного захисту – рис. 3.3.

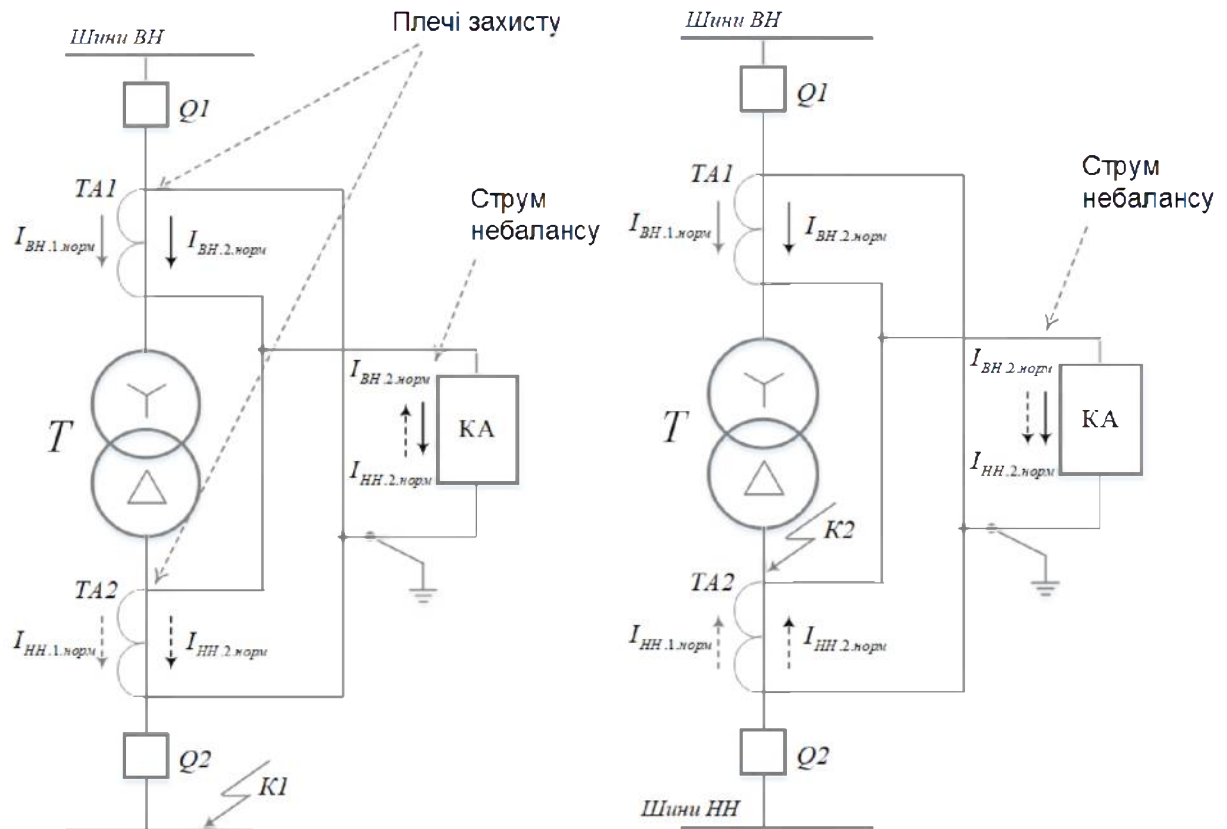


Рисунок 3.3 – Робота ДЗТ

Таблиця 3.1 – Максимальні струми $I_{\text{кз.макс}}^{(3)}$

	Нап. В. [кВ]	Нап. Н. [кВ]	Коеф.	Вк" [МВА/МВА]	Ik" [кА/кА]	Ip [кА/кА]	Id [кА]	Id [МВА]	Ik [кА]	Idk [кА]
Воздушка-110	110,00	0,00	0,00	1,10	416,75 MVA	2,19 кА	-74,54	4,51 кА	2,19	2,20
1с					416,75 MVA	2,19 кА	105,06	4,51 кА		
ЛЕЛ №6	Солма-110(1)	Воздушка	Воздушка		0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Т1 Воздушная										
Воздушная-35	35,00	0,00	0,00	1,10	71,56 MVA	1,18 кА	-82,75	2,08 кА	1,10	1,20
1с					71,56 MVA	1,18 кА	96,21	2,08 кА		
Т1 Воздушная	Воздушная	Воздушная								
Воздушная-6	6,00	0,00	0,00	1,10	48,06 MVA	4,62 кА	-83,52	11,25 кА	4,62	4,73
1с					48,06 MVA	4,62 кА	94,08	11,25 кА		
Т1 Воздушная	Воздушная	Воздушная								
Солма-110	110,00	0,00	0,00	1,10	525,41 MVA	2,82 кА	-75,26	5,22 кА	2,82	2,83
1с					525,41 MVA	2,82 кА	104,64	5,22 кА		
ЛЕЛ №2	Солма-110	Солма-110			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Т1	Солма-6	Солма-6			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Солма-6	6,00	0,00	0,00	1,10	114,33 MVA	11,00 кА	-82,16	26,51 кА	11,00	11,16
1с					114,33 MVA	11,00 кА	96,84	26,51 кА		
Т1	Солма-110	Солма-110								
Солма-110 кВ	110,00	0,00	0,00	1,10	438,80 MVA	2,30 кА	-75,01	4,75 кА	2,30	2,32
1с					438,80 MVA	2,30 кА	104,95	4,75 кА		
ЛЕЛ №5	Солма-110	Солма-110			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Т1 Солма-110	Солма-6	Солма-6								
Солма-6 кВ	6,00	0,00	0,00	1,10	114,58 MVA	11,03 кА	-82,54	27,02 кА	11,03	11,20
1с					114,58 MVA	11,03 кА	96,06	27,02 кА		
Т1 Солма-110	Солма-110	Солма-110								
Солма-110	110,00	0,00	0,00	1,10	663,05 MVA	3,48 кА	-75,75	7,28 кА	3,40	3,50
1с					663,05 MVA	3,48 кА	104,21	7,28 кА		
ЛЕЛ №2	Солма-110	Солма-110			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Т1 Солма-110	Солма-6	Солма-6			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
Солма-6	6,00	0,00	0,00	1,10	136,46 MVA	2,25 кА	-83,88	5,47 кА	2,25	2,28
1с					136,46 MVA	2,25 кА	96,43	5,47 кА		
Т1 Солма-110	Солма-110	Солма-110								
Солма-6	6,00	0,00	0,00	1,10	93,08 MVA	8,96 кА	-81,65	22,82 кА	8,96	9,16
1с					93,08 MVA	8,96 кА	94,21	22,82 кА		
Т1 Солма-110	Солма-110	Солма-110								
Солма-110 ТЭС(1)	110,00	0,00	0,00	1,10	2100,00 MVA	16,27 кА	-84,25	40,18 кА	16,27	16,33
1 СБ					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
2 СБ					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		
ЛЕЛ №1	Солма-110	Солма-110			0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА		

Продовження табл. 3.1 – Максимальні струми $I_{кз.макс}^{(3)}$

	Ном. У. [кВ]	Напр. [кВ]	дуг	с=	Жодф.	Вк" [MVA/MVA]	Ik" [кА/кА]	Ik" [дуг]	Ip [кА/кА]	Ib [кА]	Иb [MVA]	Ik [кА]	Ibн [кА]
Система'мощный ТЭС						2100,00 MVA	16,27 кА	-84,25	40,18 кА				
2 СМ	110,00	0,00	0,00	1,10		3100,00 MVA	16,27 кА	-84,25	40,18 кА	16,27	3100,00	16,27	16,55
СВЗ	1 СМ					2100,00 MVA	16,27 кА	85,71	0,00 кА				
Соль-110(1)													
1с	110,00	0,00	0,00	1,10		466,74 MVA	2,45 кА	-75,11	5,06 кА	2,45	466,74	2,45	2,47
СВЗ	Т1.2					466,74 MVA	2,45 кА	104,89	0,00 кА				
ЛЕЛ 94	Ваньоль-110					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т2 Соль	Соль-35(3)	Соль-6кВ(3)				0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Соль-110													
1с	110,00	0,00	0,00	1,10		466,74 MVA	2,45 кА	-75,11	5,06 кА	2,45	466,74	2,45	2,47
СВЗ	Т2.1					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
ЛЕЛ 94	Соль-110					466,74 MVA	2,45 кА	104,89	5,06 кА				
ЛЕЛ 95	Соль-110					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т1 Соль	Соль-35	Соль-6кВ				0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Соль-35(3)													
1с	35,00	0,00	0,00	1,10		192,99 MVA	3,18 кА	-81,74	7,45 кА	3,18	192,99	3,18	3,22
СВЗ	Т2.1					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т2 Соль	Соль-110(1)	Соль-6кВ(3)				192,99 MVA	3,18 кА	88,26	7,45 кА				
Соль-35													
1с	35,00	0,00	0,00	1,10		167,96 MVA	2,77 кА	-81,28	6,42 кА	2,77	167,96	2,77	2,80
СВЗ	Т2.1					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т1 Соль	Соль-110	Соль-6кВ				167,96 MVA	2,77 кА	98,62	6,42 кА				
Соль-6кВ(3)													
1с	6,00	0,00	0,00	1,10		145,31 MVA	13,98 кА	-82,82	24,18 кА	13,98	145,31	13,98	14,20
СВЗ	Т2.1					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т2 Соль	Соль-110(1)	Соль-35(3)				145,31 MVA	13,98 кА	96,17	24,18 кА				
Соль-6кВ													
1с	6,00	0,00	0,00	1,10		123,25 MVA	11,86 кА	-82,76	28,55 кА	11,86	123,25	11,86	12,04
СВЗ	Т2.1					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т1 Соль	Соль-110	Соль-35				123,25 MVA	11,86 кА	96,24	28,55 кА				
Ваньоль-110													
1с	110,00	0,00	0,00	1,10		881,76 MVA	4,63 кА	-76,53	5,81 кА	4,63	881,76	4,63	4,66
ЛЕЛ 91	Соль-110					881,76 MVA	4,63 кА	102,45	5,81 кА				
ЛЕЛ 92	Соль-110					0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Т1 Ваньоль	Ваньоль-35	Ваньоль-6				0,00 MVA	0,00 кА	0,00	0,00 кА				
Ваньоль-35													
1с	35,00	0,00	0,00	1,10		113,53 MVA	1,87 кА	-85,44	4,74 кА	1,87	113,53	1,87	1,91
Т1 Ваньоль	Ваньоль-110	Ваньоль-6				113,53 MVA	1,87 кА	94,56	4,74 кА				
Ваньоль-6													
1с	6,00	0,00	0,00	1,10		74,80 MVA	7,20 кА	-87,06	18,92 кА	7,20	74,80	7,20	7,43
Т1 Ваньоль	Ваньоль-110	Ваньоль-35				74,80 MVA	7,20 кА	92,54	18,92 кА				

Для трансформаторів:

$$\begin{aligned}
 X_{T_B}^{\max} &= \frac{(U_{k_{BH}}^{\max} + U_{k_{BC}}^{\max} - U_{k_{CH}})}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[U_{BH} \cdot (1 + \Delta U_{РПН})]^2}{S_{НОМ}} = \\
 &= \frac{(19,49 + 12,04 - 6,0)}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[115 \cdot (1 + 0,16)]^2}{40} = 56,79 \text{ Ом}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{T_B}^{\min} &= \frac{(U_{k_{BH}}^{\min} + U_{k_{BC}}^{\min} - U_{k_{CH}})}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[U_{BH} \cdot (1 - \Delta U_{РПН})]^2}{S_{НОМ}} = \\
 &= \frac{(13,25 + 8,18 - 6,0)}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[115 \cdot (1 - 0,16)]^2}{40} = 18,0 \text{ Ом}
 \end{aligned}$$

$$X_{T_C} \approx 0 \text{ Ом}$$

$$X_{T_H}^{\max} = \frac{(U_{\dot{k}_{BH}}^{\max} + U_{\dot{k}_{CH}} - U_{\dot{k}_{BC}}^{\max})}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[U_{BH} \cdot (1 + \Delta U_{ППН})]^2}{S_{НОМ}} =$$

$$= \frac{(19,49 + 6,0 - 12,04)}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[115 \cdot (1 + 0,16)]^2}{40} = 29,92 \text{ Ом}$$

$$X_{T_H}^{\min} = \frac{(U_{\dot{k}_{BH}}^{\min} + U_{\dot{k}_{CH}} - U_{\dot{k}_{BC}}^{\min})}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[U_{BH} \cdot (1 - \Delta U_{ППН})]^2}{S_{НОМ}} =$$

$$= \frac{(13,25 + 6,0 - 8,18)}{2 \cdot 100} \cdot \frac{[115 \cdot (1 - 0,16)]^2}{40} = 12,91 \text{ Ом}$$

Для ДЗТ

$$I_{ТРНОМВН} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМВН}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201 \text{ А}$$

$$I_{ТРНОМСН} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМСН}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 600 \text{ А}$$

$$I_{ТРНОМНН} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМНН}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 3499 \text{ А}$$

Визначимо коефіцієнти схеми

$$K_{сх.ВН} = \sqrt{3}$$

$$K_{сх.СН} = \sqrt{3}$$

$$K_{сх.НН} = 1$$

Визначимо коефіцієнти трансформації

$$K_{TT\ BH} = \frac{300}{5} = 60$$

$$K_{TT\ CH} = \frac{1000}{5} = 200$$

$$K_{TT\ HH} = \frac{3000}{5} = 600$$

Номінальні струми

$$I_{2HOM_{TT\ BH}} = \frac{K_{cx.BH} \cdot I_{TP\ HOM\ BH}}{K_{TT\ BH}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 201}{60} = 5,80\ A$$

$$I_{2HOM_{TT\ CH}} = \frac{K_{cx.CH} \cdot I_{TP\ HOM\ CH}}{K_{TT\ CH}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 600}{200} = 5,20\ A$$

$$I_{2HOM_{TT\ HH}} = \frac{K_{cx.HH} \cdot I_{TP\ HOM\ HH}}{K_{TT\ HH}} = \frac{1 \cdot 3499}{600} = 5,83\ A$$

Для захисту

$$I_{C.3.} = K_H \cdot I_{TP\ HOM\ HH} = 1,5 \cdot 3499 = 5248,5\ A$$

$$I_{C.P.} = \frac{I_{C.3.} \cdot K_{cx.HH}}{K_{TT\ HH}} = \frac{5248,5 \cdot 1}{600} = 8,75\ A$$

З міркувань надійності визначається струм небалансу.

$$\begin{aligned} I_{K2\ MAX}^{(3)} &= \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3} \cdot (X_{GS}^{\min} + X_L + X_{I_b}^{\min} + X_{I_c}^{\min})} = \\ &= \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (2,67 + 17,39 + 18,0 + 0)} = 1744,5\ A \end{aligned}$$

$$I'_{НБ} = k_{ОДН} \cdot k_{ПЕР} \cdot \varepsilon \cdot I_{К.МАХ}^{(3)} =$$

$$= 1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 1744,5 = 174,45 \text{ А}$$

$$I'_{НБ} = (\Delta U_{\alpha} k_{\alpha} + \Delta U_{\beta} k_{\beta}) I_{К2МАХ}^{(3)} =$$

$$= 0,16 \cdot 1744,5 = 279,12 \text{ А}$$

В даному випадку зауважимо, що для робочої обмотки реле

$$W_{НН.РОЗР.} = \frac{F_{СП}}{I_{С.Р.}} = \frac{100}{8,75} = 11,4$$

Приймається

$$W_{НН} = 11$$

$$W_{ВН.РОЗР.} = \frac{W_{НН} \cdot I_{2НОМ_{ТТ.НН}}}{I_{2НОМ_{ТТ.ВН}}} = \frac{11 \cdot 5,83}{5,80} = 11,1$$

Приймається

$$W_{ВН} = 11$$

$$W_{СН.РОЗР.} = \frac{W_{НН} \cdot I_{2НОМ_{ТТ.НН}}}{I_{2НОМ_{ТТ.СН}}} = \frac{11 \cdot 5,83}{5,20} = 12,3$$

Приймається

$$W_{СН} = 12$$

Для уточнення результату

$$\begin{aligned}
 I_{HB} &= I'_{HB} + I''_{HB} + I'''_{HB} = \\
 &= I'_{HB} + I''_{HB} + \left[\left| \frac{W_{BH} - W_{BH.RO3P}}{W_{BH.RO3P}} \right| + \left| \frac{W_{HH} - W_{HH.RO3P}}{W_{HH.RO3P}} \right| \right] \cdot I_{K2 \max}^{(3)} = \\
 &= 174,45 + 279,12 + \left[\left| \frac{11 - 11,1}{11,1} \right| + \left| \frac{11 - 11,4}{11,4} \right| \right] \cdot 1744,5 = 530,5 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Так само для гальмівної обмотки

$$W_{Г.РОЗР} = \frac{K_{ОГ} \cdot I_{HB} \cdot W_{CH}}{I_{ГАЛМ} \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{1,5 \cdot 530,5 \cdot 12}{1744,5 \cdot 0,87} = 6,3$$

Приймається

$$W_{Г}=6$$

Для перевірки

$$\begin{aligned}
 I_{K3MN}^{(3)} &= \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot (X_{GS}^{\max} + X_L + X_{TB}^{\max} + X_{TH}^{\max})} = \\
 &= \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (3,14 + 17,39 + 56,79 + 29,92)} = 619,1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{K3MN}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3MN}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 619,1 = 536,2 \text{ A}$$

$$I_{K3MN}^{(2)HH} = I_{K3MN}^{(2)} \cdot K_{TH} = 536,2 \cdot \frac{115}{6,3} = 9788 \text{ A}$$

$$K_{\psi} = \frac{I_{K3MN}^{(2)HH}}{I_{с.з.}} = \frac{9788}{5248,5} = 1,86 > 1,5$$

Для МСЗ спочатку визначаю робочі струми

$$I_{РОБ.МАХ} = \frac{1,4 \cdot S_{TP.НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{1,4 \cdot 40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 281,1 \text{ A}$$

$$I_{POB.MAX} = \frac{1,4 \cdot S_{TP.HOM}}{\sqrt{3} \cdot U_{HOM}} = \frac{1,4 \cdot 40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38,5} = 839,8 \text{ A}$$

$$I_{POB.MAX} = \frac{1,4 \cdot S_{TP.HOM}}{\sqrt{3} \cdot U_{HOM}} = \frac{1,4 \cdot 40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 4898,7 \text{ A}$$

За отриманими даними визначаю струми захисту і реле

$$I_{C.3.} = \frac{k_H}{k_B} \cdot I_{POB.MAX} = \frac{1,1}{0,9} \cdot 281,1 = 343,5 \text{ A}$$

$$I_{C.P.} = \frac{k_{CX}}{k_{TT}} \cdot I_{C.3.} = \frac{\sqrt{3}}{60} \cdot 343,5 = 9,92 \text{ A}$$

$$I_{C.3.} = \frac{k_H}{k_B} \cdot I_{POB.MAX} = \frac{1,1}{0,9} \cdot 839,8 = 1026,4 \text{ A}$$

$$I_{C.P.} = \frac{k_{CX}}{k_{TT}} \cdot I_{C.3.} = \frac{\sqrt{3}}{200} \cdot 1026,4 = 8,9 \text{ A}$$

$$I_{C.3.} = \frac{k_H}{k_B} \cdot I_{POB.MAX} = \frac{1,1}{0,9} \cdot 4898,7 = 5987,3 \text{ A}$$

$$I_{C.P.} = \frac{k_{CX}}{k_{TT}} \cdot I_{C.3.} = \frac{1}{600} \cdot 5987,3 = 9,98 \text{ A}$$

$$K_{\psi} = \frac{I_{K3MIN}^{(2)}}{I_{C.3.}} = \frac{536,2}{343,5} = 1,56 > 1,5$$

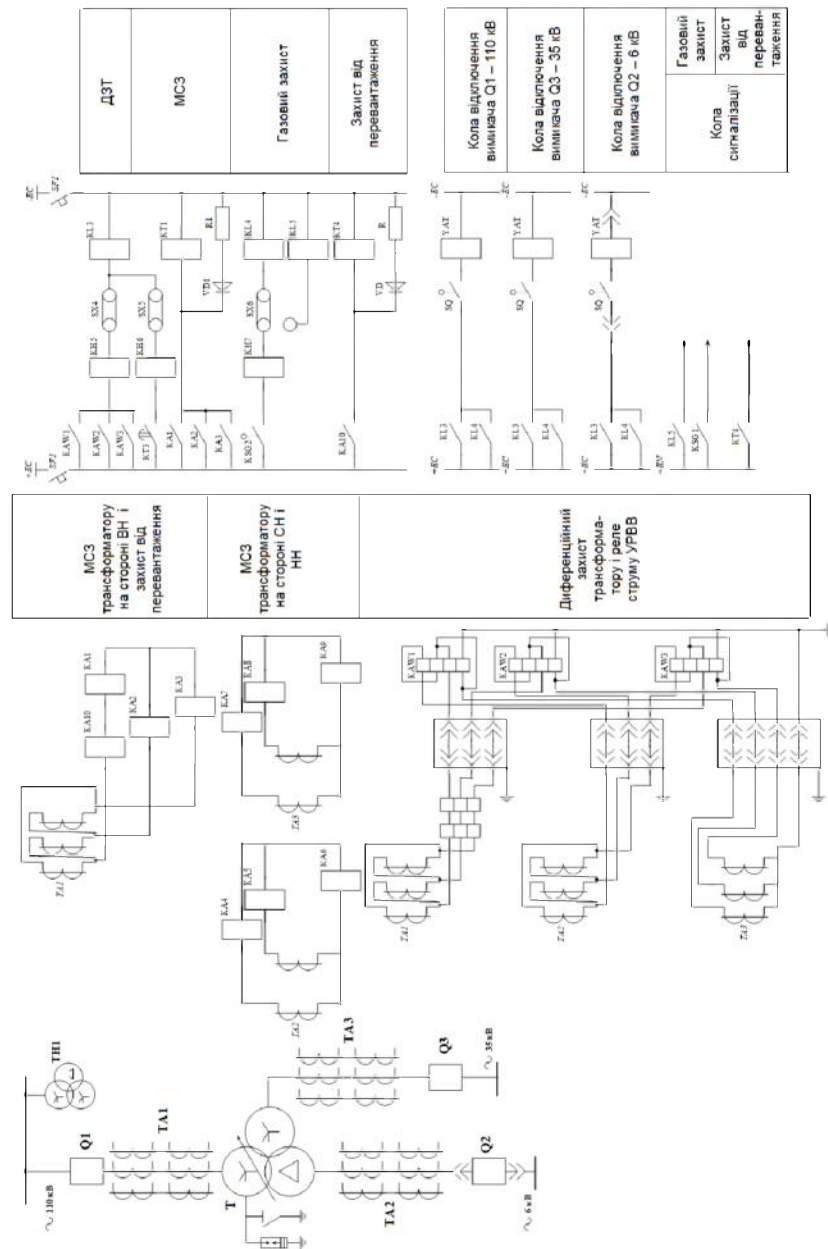
Наступний захист – від перевантаження.

$$I_{C.3.ПЕР.} = \frac{k_H \cdot I_{TP.HOM.}}{k_B} = \frac{1,05 \cdot 201}{0,85} = 248,3 \text{ A}$$

$$I_{C.P.} = \frac{k_{CX}}{k_{IT}} \cdot I_{C.3.ПЕР} = \frac{\sqrt{3}}{60} \cdot 248,3 = 7,17 \text{ A}$$

Газовий захист трансформатора є вбудованим в трансформатор.

Повна схема захисту трансформаторів



РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

У розділі розглянуті системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок. Безпечна експлуатація електроустановок забезпечується: конструкцією електроустановок; технічними способами та засобами захисту; організаційними та технічними заходами, класифікація яких представлена на рис. 4.1.

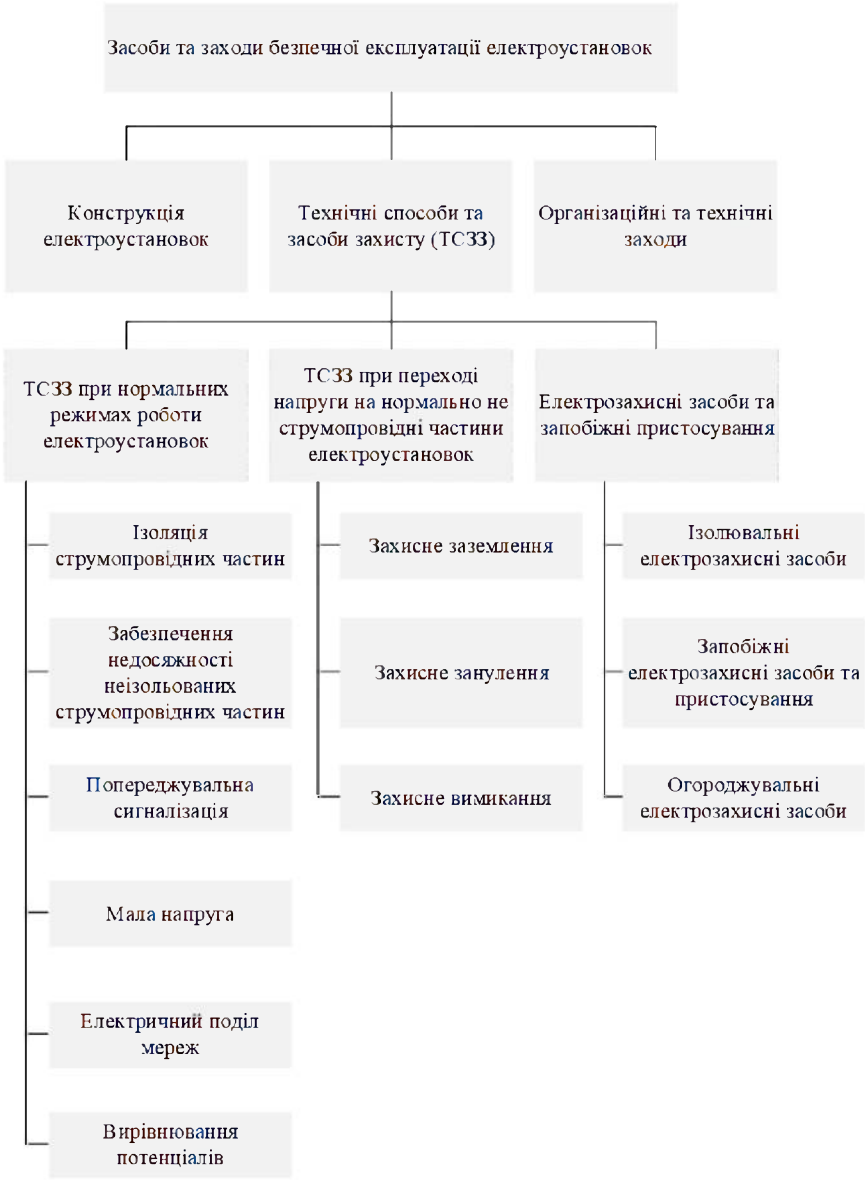


Рисунок 4.1 – Класифікація засобів та заходів безпечної експлуатації електроустановок

Роздивимося технічні способи та засоби захисту при нормальних режимах роботи електроустановок.

По-перше, ізоляція струмопровідних частин забезпечується шляхом покриття їх шаром діелектрика для захисту людини від випадкового доторкання до частин електроустановок, через які проходить струм. Розрізняють робочу, додаткову, подвійну та посилену ізоляцію. Робочою називається ізоляція струмопровідних частин електроустановки, яка забезпечує її нормальну роботу та захист від ураження струмом. Додатковою називається ізоляція, яка застосовується додатково до робочої і у випадку її пошкодження забезпечує захист людини від ураження струмом. Подвійною називається ізоляція, яка складається з робочої та додаткової. Посиленою називається покращена робоча ізоляція. Механічні пошкодження, волога, перегрівання, хімічні впливи зменшують захисні властивості ізоляції. Навіть у нормальних умовах ізоляція поступово втрачає свої початкові властивості, «старіє». Тому необхідно систематично проводити профілактичні огляди та випробовування ізоляції. У приміщеннях з підвищеною небезпекою та в особливо небезпечних, відповідно не рідше одного разу в два роки та в півріччя, перевіряють шляхом вимірювання відповідність опору ізоляції до норм. Для електромереж напругою до 1000 В опір ізоляції струмопровідних частин повинен бути не меншим ніж 0,5 МОм.

Забезпечення недосяжності неізольованих струмопровідних частин передбачає застосування захисних огорож, блокувальних пристроїв та розташування неізольованих струмопровідних частин на недосяжній висоті чи в недосяжному місці. Захисні огорожі можуть бути суцільними та сітчастими. Блокувальні пристрої за принципом дії поділяються на механічні, електричні та електронні. Вони забезпечують зняття напруги із струмопровідних частин при відкриванні огорожі та спробі проникнути в небезпечну зону.

Розташування неізолюваних струмопровідних частин на недосяжній висоті чи у недосяжному місці забезпечує безпеку без захисних огорож та блокувальних пристроїв. Вибираючи необхідну висоту підвісу проводів під напругою враховують можливість випадкового доторкання до них довгих струмопровідних елементів, інструменту чи транспорту.

Попереджувальна сигналізація є пасивним засобом захисту, який не усуває небезпеки ураження, а лише інформує про її наявність. Така сигналізація може бути світловою та звуковою

Мала напруга застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. До малих напруг належать номінальні напруги, що не перевищують 42 В. При таких напругах струм, що може пройти через тіло людини є дуже малим і вважається відносно безпечним. Однак, гарантувати абсолютної безпеки неможливо, тому поряд з малою напругою використовують й інші способи та засоби захисту. Отже, застосування малих напруг суттєво зменшує небезпеку ураження електричним струмом, однак при цьому зростає значення робочого струму, а відтак і площа поперечного перерізу, що в свою чергу збільшує витрати кольорових металів (міді, алюмінію). Крім того, при малих напругах істотно зростають втрати електроенергії в мережі, що обмежує її протяжність. У силу вищеназваних обставин малі напруги мають обмежене використання.

Вирівнювання потенціалів є способом зниження напруги доторкання та кроку між точками електричного кола, до яких можливе одночасне доторкання людини, або на яких вона може одночасно стояти. Вирівнювання потенціалів досягається шляхом штучного підвищення потенціалу опорної поверхні ніг до рівня потенціалу струмопровідної частини, а також при контурному заземленні.

Вертикальні заземлювачі в контурному заземленні розміщуються як по контуру, так і всередині зони захисту і з'єднуються сталевими полосами.

При замиканні струмопровідних частин на корпус, що приєднаний до такого контурного заземлення ділянки землі всередині контуру набувають високих потенціалів, які наближаються до потенціалу заземлювачів. Завдяки цьому максимальні напруги доторкання та кроку знижуються до допустимих значень.

Електричний поділ мережі передбачає поділ електромережі на окремі, електрично не з'єднані між собою, ділянки за допомогою роздільних трансформаторів з коефіцієнтом трансформації 1:1. Якщо єдину, сильно розгалужену мережу з великою ємністю та малим опором ізоляції, поділити на низку невеликих мереж такої ж напруги, які мають незначну ємність та високий опір ізоляції, то при цьому різко зменшується небезпека ураження людини струмом.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуті основи теорії релейного захисту енергосистеми, її функції, та вимоги до релейного захисту.

Основним завданням релейного захисту є виявлення несправності та швидке її усунення, а також забезпечення того, щоб неушкоджена частина ЕЕС могла продовжувати працювати в звичайному режимі.

Релейний захист, якщо його параметри обрані вірно повинен відповідати вимогам надійності, вибіркової, швидкості та чутливості. Для того, щоб відповідати вимогам складної мережі необхідно застосовувати складні види захистів, а також підвищити їх вибірковість та надійність, що корисно для інтелектуального прийняття рішень щодо захисту.

Мережеві розподільні системи призначені для забезпечення надлишкових потужностей для споживачів. Втрата хоч одного приєднання може призвести до аварійної ситуації.

Метою даної роботи є розробка релейного захисту для силового трифазного трансформатора.

У першому розділі приведені основи теорії електричних мереж, які дозволяють розраховувати, аналізувати та оцінювати несиметричні короткі замикання. У другому розділі показані всі етапи створення математичної моделі електричної мережі напругою 110 кВ. У третьому розділі виконаний розрахунок захистів силових триобмоткових трансформаторів. Четвертий розділ присвячений розділу охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Koshkareva L.A. Simulation of MCSR to Analyze and Optimize It's Relay Protection / L.A. Koshkareva // 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). 2019.
2. L. Xue. Relay protection of DC transmission system / L. Xue // AIP Conference Proceedings. 2018.
3. J. Ma. Hierarchical protection for smart grids / J. Ma, Z. Wang. 2018.
4. Sleva A. M. Protective Relay Principles / A. M. Sleva. 2010.
5. Lebedev V.D. Specific features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering / V.D. Lebedev, A.A. Yablokov, G.A. Filatova, N.V. Lebedeva // International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA). 2018.
6. Khromtsov E.I. Applications of synchrophasors in relay protection of digital substations and digital grids / E.I. Khromtsov, A.V. Mokeev, P.I. Andreev, K.V. Petrov, A.V. Rodionov, D.N. Ulyanov // 2nd International youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RPA). 2019.
7. Hai Bo K. Research on the process layer and substation layer relay protection in smart substation relay protection / K. Hai Bo // Journal of electronic research and application. – 2018. – vol. 2, iss. 1.
8. Perera N. Performance evaluation of an enhanced bus differential protection relay / N. Perera, K Ponram // 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). 2019.
9. Hartmann W. Improving transformer protection / W. Hartmann // 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). 2019.
10. Proctor M. Application of undervoltage protection to critical motors / M. Proctor // 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). 2018.