

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації»

КНУ.МР.141.24.780-03

Виконав студент II курсу , групи ЗСЕП-23м /Сергій ШИЛЕНКО/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Системи електропостачання промислових підприємств,
міст та локальних об'єктів»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____ /Ігор СІНЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____ /Ігор СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Олексій МИХАЙЛЕНКО/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ШИЛЕНКО Сергій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж; II. Дослідження ефективності режиму роботи розподільчих електричних мереж.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Режими роботи мережі; II. Критерій ефективності режиму роботи мережі; III. Показники ефективності роботи мережі; IV. Засоби захисту мережі.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Загальна характеристика	10.09.24
2	Властивості мережі	12.09.24
3	Однофазні замикання на землю	17.10.24
4	Компенсація ємнісних струмів	19.10.24
5	Релейний захист	24.10.24
6	Захисне шунтування	26.11.24
7	Контроль ізоляції	28.11.24
8	Критерії ефективності	30.11.24
9	Вплив на релейний захист	04.12.24
10	Засоби заземлення нейтралі	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Сергій ШИЛЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації»

В роботі вирішена задача аналізу сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації.

В результаті встановлено критерії ефективності режиму роботи розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю.

Також вдосконалено підхід щодо розробки технічних засобів підвищення ефективності та безпеки експлуатації розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю.

Ключові слова: РОЗПОДІЛЬЧА ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, ОДНОФАЗНІ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ, ЗАХИСТ, КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ, ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ.

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж	9
1.1. Загальна характеристика	9
1.2. Властивості мережі	10
1.3. Однофазні замикання.....	14
1.4. Компенсація ємнісних струмів	22
1.5. Релейний захист	30
1.6. Захисне шунтування	31
1.7. Контроль ізоляції.....	32
1.8. Висновки	33
Розділ 2. Дослідження ефективності режиму роботи розподільчих електричних мереж	34
2.1. Критерії ефективності.....	34
2.2. Перенапруга при коротких замиканнях.....	37
2.3. Аварійні вимикання	40
2.4. Напруга дотику та напруга кроку.....	42
2.5. Захисне вимикання.....	44
2.6. Вплив на релейний захист.....	45
2.7. Засоби заземлення	46
2.8. Висновки	55
Висновки	57

Вступ

Електричні мережі систем електропостачання мають розгалужену структуру та налічують безліч елементів у своєму складі.

Найпоширенішим видом пошкоджень у мережі живлення, як кабельних так й повітряних ліній є однофазні замикання живлячих дротів на землю.

На заземлюючий дріт у кабельних лініях та обрив дроту із подальшим замиканням на землю у повітряних лініях електропостачання мереж електроживлення.

При цьому виникають побічні явища, такі як перенапруга, виникнення струмів стікання, пошкодження обладнання.

Підвищити рівень безпеки експлуатації ліній електропостачання можливо при застосуванні методів контролю та виявлення передаварійних режимів роботи.

Неперервний контроль ізоляції електричної мережі відносно землі сприяє вирішенню питання надійності функціонування електроенергетичної системи.

Також поліпшенню ефективності роботи системи захисту електричної мережі від струмів короткого замикання сприяє компенсація ємнісної складової струму.

При цьому робота релейного захисту налаштовується у відповідності із повним омичним опором кабельної або повітряної лінії електропередач енергосистеми.

Також дієвим методом усунення наслідків однофазних замикань фазного дроту на землю є накладання захисного шунту на пошкоджену фазу живлення.

Метод накладання захисного шунтування на пошкоджену фазу є дієвим засобом обмеження пошкодженої ділянки.

Але ефективність його застосування залежатиме від конфігурації мережі живлення.

Велике значення для цього має спосіб приєднання нульового дроту мережі живлення, тобто від режиму приєднання і роботи нейтрального дроту до трансформатору живлення.

Для визначення ефективності роботи нейтралі та аналізу її впливу на роботу засобів захисту проводять дослідження режимів роботи енергетичної системи.

Від способу приєднання а також режиму роботи визначається ступінь впливу на функціонування захисту.

Завданням є створення оптимальних умов функціонування енергетичної системи у межах області електричних значень за рахунок енергетичних співвідношень.

Дослідження показують, що для критерію ефективності заземлення нейтрального дроту враховують такі параметри, як кратність перенапруги при однофазному замиканні на землю та час протікання перехідного процесу при цьому.

При враховуванні та визначенні рівню перенапруги слід враховувати комутаційну перенапругу яка виникає у внутрішньому контурі, та дуговий опір.

При виборі режиму нейтралі також порівнюють тривалості перехідного процесу при однофазному замиканні.

Захисне шунтування допомагає знизити час гасіння дуги, при цьому знижується значення теплової енергії що виділяється у простір, що сприяє підвищенню надійності роботи захисту.

Для режиму роботи нейтралі важливою є підвищена чутливість до спрацьовування релейного захисту.

Підвищується рівень сигналу, тому слід перевіряти налаштування захисного контуру.

Розділ 1. Аналіз сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж

1.1. Загальна характеристика

Забезпечення безперебійного електропостачання промислових споживачів напругої живлення зі стабілізацією її параметрів, є важливим завданням енергетики.

Для вирішення цього завдання важливими чинниками є налагодження роботи системи захисту електричних ліній та можливість переходу на резервне живлення при їх пошкодженнях.

Одними з най розповсюджених проявів пошкоджень повітряних ліній електропередач є однофазні замикання на землю з подальшим обривом дроту живлення.

При виборі способів захисту ліній електропередач та правильному налаштуванні їх роботи важливим є вибір режиму роботи нейтрального дроту.

Тому у роботі необхідно розглянути можливі варіанти приєднання нейтрального дроту та вплив режиму роботи нейтралі на ефективність функціонування системи електропостачання промислових об'єктів та виробничих споруд.

1.2. Властивості мережі

Для мережі з ізольованою нейтраллю можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{E}_A + \underline{U}_N; \\ \underline{U}_B &= \underline{E}_B + \underline{U}_N; \\ \underline{U}_C &= \underline{E}_C + \underline{U}_N;\end{aligned}\tag{1.1}$$

де $\underline{E}_A \cdot e^{j0}$, $\underline{E}_B \cdot e^{-j120}$, $\underline{E}_C \cdot e^{j120}$ - система фазних ЕРС;

\underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C - напруга мережі;

\underline{U}_N - напруга нейтралі.

Тоді рівняння струмів матимуть наступний вигляд:

$$\underline{I}_{Ax} + \underline{I}_{Bx} + \underline{I}_{Cx} = \mathbf{0}\tag{1.2}$$

Проілюструємо розглянуті процеси на прикладі принципової схеми мережі електропостачання.

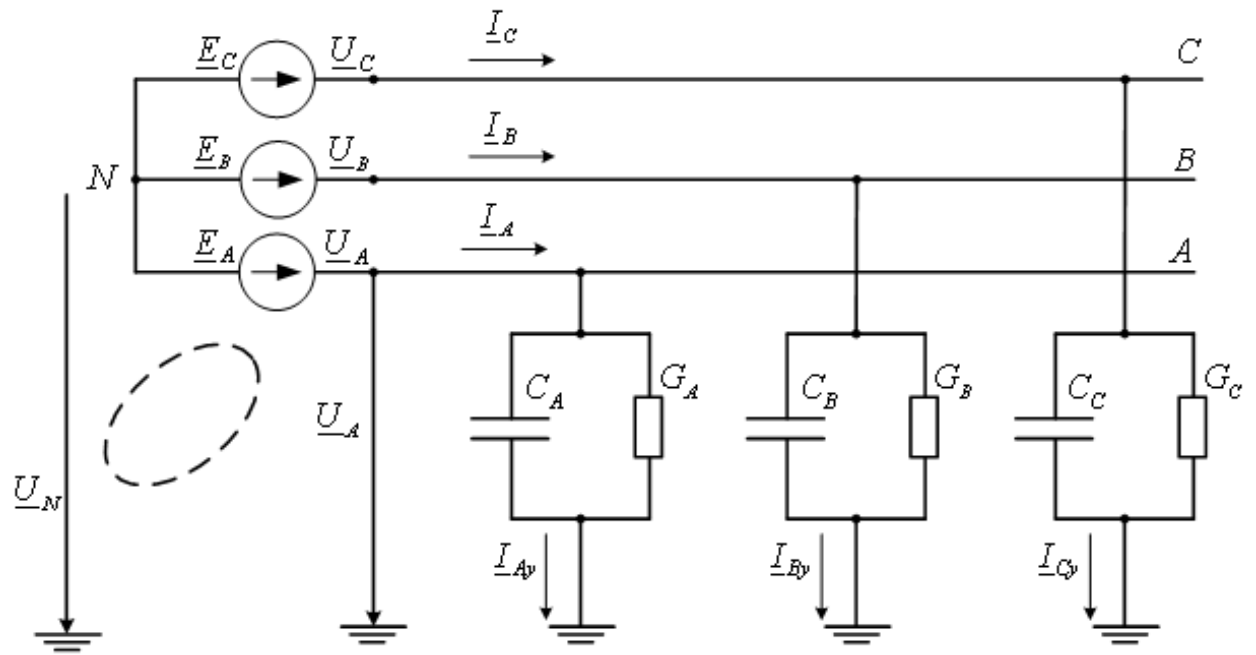


Рисунок 1.1 – Мережа

Тоді різнісне рівняння:

$$\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C = \mathbf{0} \quad , \quad (1.3)$$

де \underline{Y}_A , \underline{Y}_B , \underline{Y}_C - провідності мережі:

$$\underline{Y}_A = G_A + jC_A;$$

$$\underline{Y}_B = G_B + jC_B;$$

$$\underline{Y}_C = G_C + jC_C.$$

У контурі напруги живлення:

$$\underline{U}_N = - \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (1.4)$$

Тоді представимо діаграму розглянутих процесів.

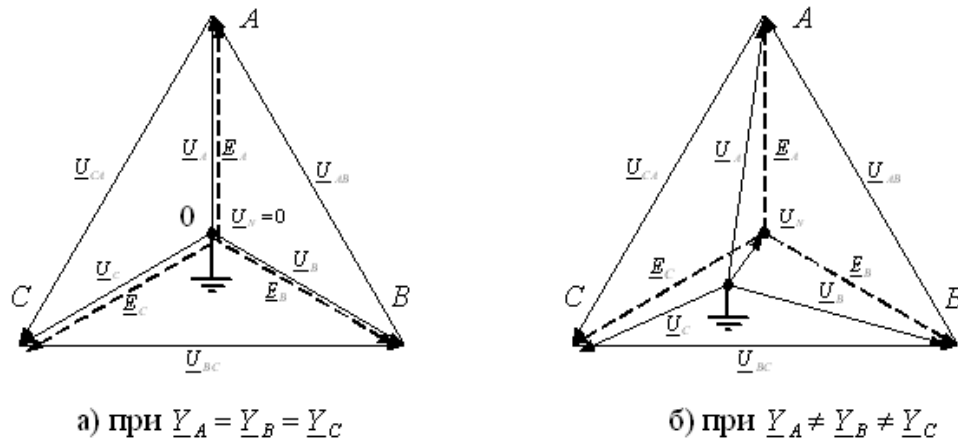


Рисунок 1.2 – Режим напруги в мережі

Отже, визначимо несиметричну складову:

$$u = \frac{|\underline{U}_N|}{|\underline{U}_A|} = |u' - ju''| \cdot \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

де $\underline{U}_A = \underline{E}_A$ - напруга мережі,

u' та u'' - ступені несиметрії:

$$u' = \frac{C_A + aC_B + a^2C_C}{C_A + C_B + C_C}; \quad (1.6)$$

$$u'' = \frac{G_A + aG_B + a^2G_C}{\omega \cdot (C_A + C_B + C_C)}; \quad (1.7)$$

$$a = e^{120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

де d - коефіцієнт демпфування:

$$d = \frac{G_A + G_B + G_C}{\omega \cdot (C_A + C_B + C_C)};$$

$$\omega = 314 \text{ рад/с.}$$

1.3. Однофазні замикання

Розглянемо рівняння за струмом у контурі мережі з ізольованою нейтраллю.

$$\underline{I}_{Ay} + \underline{I}_{By} + \underline{I}_{Cy} + \underline{I}_c = \mathbf{0}, \quad (1.9)$$

Отже

$$\underline{U}_{Ay} \left(\underline{Y}_A + \frac{\mathbf{1}}{r_\theta} \right) + \underline{U}_{By} \underline{Y}_B + \underline{U}_{Cy} \underline{Y}_C = \mathbf{0} \quad (1.10)$$

де r_θ - еквівалентний опір дуги.

Тоді

$$\underline{U}_{Ay} = \frac{\underline{E}_A \left(\underline{Y}_A + \frac{\mathbf{1}}{r_\theta} \right) + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C = \mathbf{0}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \frac{\mathbf{1}}{r_\theta}}. \quad (1.11)$$

Проілюструємо розглянуті процеси на прикладі принципової схеми мережі електропостачання з ізольованою нейтраллю.

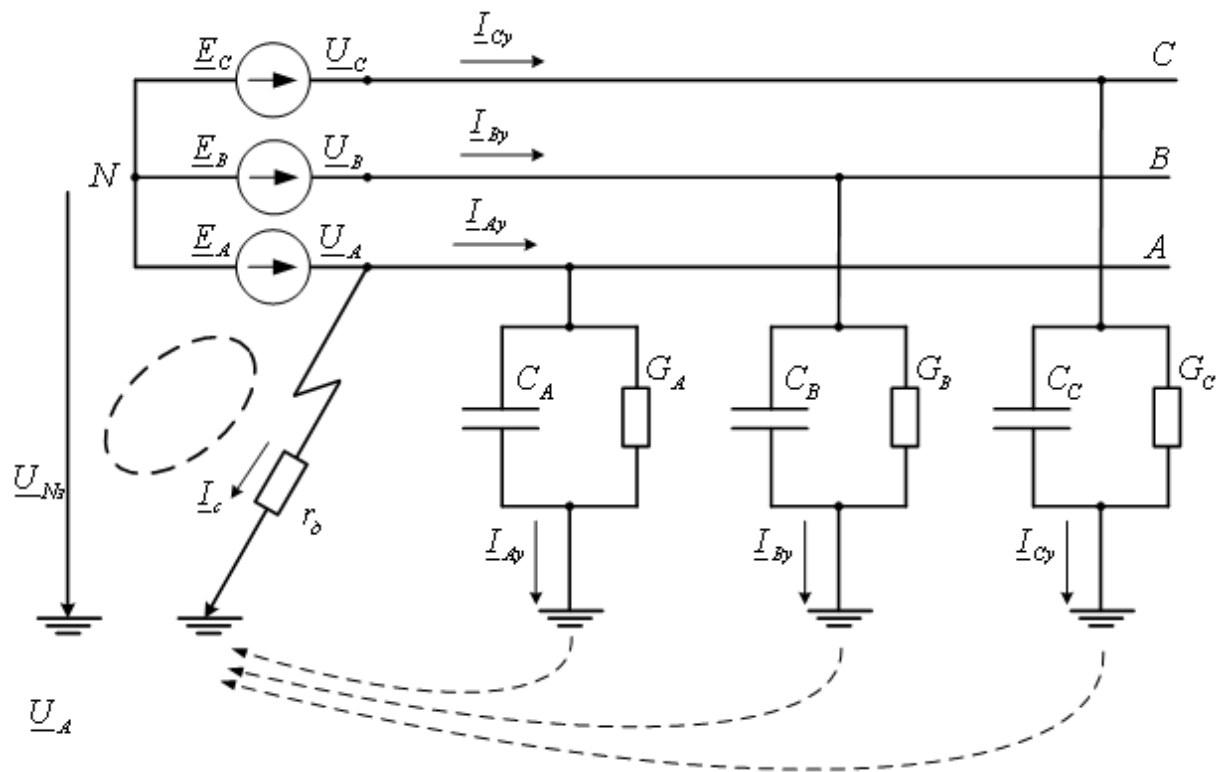


Рисунок 1.3 – Однофазне замикання

$$\underline{U}_{N\delta} = -\underline{E}_A \frac{r_\theta}{\frac{1}{r_\theta} + j3\omega C_{cp}} = -\underline{E}_A \frac{1}{1 + j3\omega C_{cp} r_\theta}, \quad (1.12)$$

де

$$C_{cp} = \frac{C_A + C_B + C_C}{3}, \quad (1.13)$$

Отже вишукана напруга:

$$\underline{U}_{N\delta} = -\underline{E}_A = -\underline{U}_A, \quad (1.14)$$

Розрахуємо інші складові проілюстрованої діаграми напруг у схемі з ізолюваною нейтраллю.

$$\underline{U}_{A_2} = \mathbf{0}, \quad (1.15)$$

$$\underline{U}_{B_2} = \underline{E}_B - \underline{E}_A = \underline{U}_B - \underline{U}_A = -\underline{U}_{AB}; \quad (1.16)$$

$$\underline{U}_{C_2} = \underline{E}_C - \underline{E}_A = \underline{U}_C - \underline{U}_A = -\underline{U}_{CA}; \quad (1.17)$$

де - \underline{U}_{N_2} , \underline{U}_{A_2} , \underline{U}_{B_2} , \underline{U}_{C_2} напруга мережі,

\underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C , \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{CA} - напруга мережі.

На основі розрахованих складових проілюстрованої діаграми напруг у схемі з ізолюваною нейтраллю побудуємо та представимо векторну діаграму напруг.

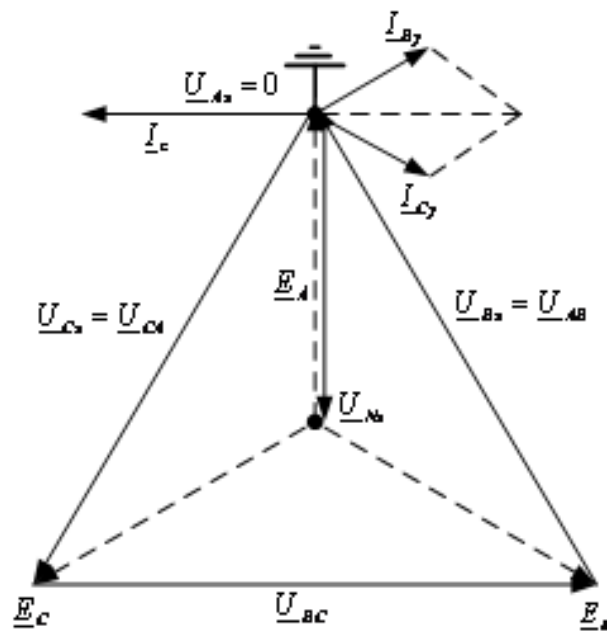


Рисунок 1.4 – Векторна діаграма напруги та струму ($r_0 = 0$)

При розгляді несиметричного режиму роботи нейтралі можна записати наступні рівняння:

$$\underline{U}_{A0} = \underline{E}_A + \underline{U}_{N0} = \underline{U}_A \frac{j3\omega C_{cp} r_0}{1 + j3\omega C_{cp} r_0}; \quad (1.18)$$

$$\underline{U}_{B0} = \underline{E}_B + \underline{U}_{N0} = \underline{U}_A \frac{a^2(1 + j3\omega C_{cp} r_0) - 1}{1 + j3\omega C_{cp} r_0}; \quad (1.19)$$

$$\underline{U}_{C0} = \underline{E}_C + \underline{U}_{N0} = \underline{U}_A \frac{a(1 + j3\omega C_{cp} r_0) - 1}{1 + j3\omega C_{cp} r_0}. \quad (1.20)$$

На основі розрахованих складових проілюстрованої діаграми напруг у схемі з ізольованою нейтраллю при розгляді несиметричного режиму роботи

побудуємо та представимо векторну діаграму напруг у мережі живлення системи електропостачання.

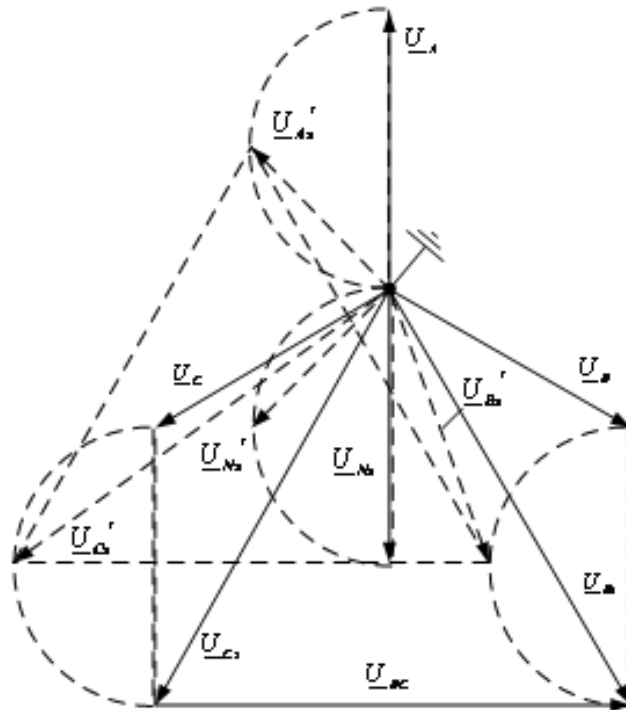


Рисунок 1.5 – Діаграма зміни векторів напруги у мережі

Представимо графіки розрахованих величин.

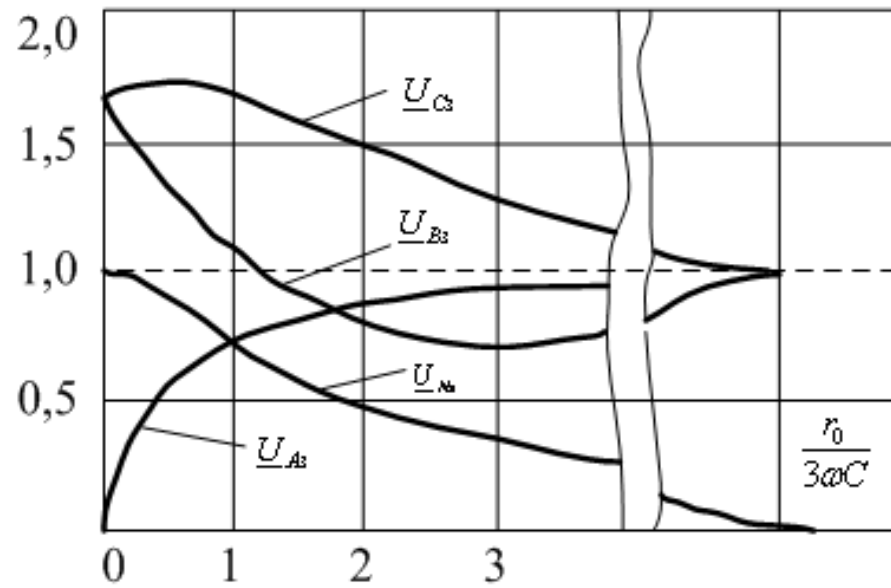


Рисунок 1.6 – Залежність модулю напруги

Визначимо струм витоку:

$$\underline{I}_c = - \left[(\underline{E}_A + \underline{U}_{Ns}) \underline{Y}_A + (\underline{E}_B + \underline{U}_{Ns}) \underline{Y}_B + (\underline{E}_C + \underline{U}_{Ns}) \underline{Y}_C \right] \quad (1.21)$$

Тоді

$$\underline{I}_c = - \underline{E}_A (\underline{Y}_A + \alpha \underline{Y}_B + \alpha^2 \underline{Y}_C) - \underline{U}_{Ns} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) \quad (1.22)$$

з останнього виразу:

$$\underline{I}_c = \underline{U}_N (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) - \underline{U}_{Ns} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) \quad (1.23)$$

де \underline{U}_N за (1.4),

$\underline{U}_{N\bar{z}}$ за (1.12).

Складемо рівняння для струму витоку з врахуванням розрахованих значень:

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{aC} + \underline{I}_{aG} + \underline{I}_{sC} + \underline{I}_{sG} \quad (1.24)$$

де \underline{I}_{aC} - складова струму:

$$\underline{I}_{aC} = \underline{U}_N j\omega (C_A + C_B + C_C) , \quad (1.25)$$

де \underline{I}_{aG} - складова провідності:

$$\underline{I}_{aG} = \underline{U}_N (G_A + G_B + G_C) \quad (1.26)$$

де \underline{I}_{sC} - ємнісна складова:

$$\underline{I}_{sC} = -\underline{U}_{N\bar{z}} j\omega (C_A + C_B + C_C) , \quad \text{де} \quad (1.27)$$

де \underline{I}_{sG} - активна складова:

$$\underline{I}_{sG} = -\underline{U}_{N\bar{z}} (G_A + G_B + G_C) \quad (1.28)$$

Тоді значення струму:

$$\underline{I}_c = j\underline{E}_A \omega (C_A + C_B + C_C) = j\underline{E}_A 3\omega C_{cp} , \quad (1.29)$$

отже

$$\underline{I}_c = j3\omega C_{cp} \underline{U}_A . \quad (1.30)$$

тоді

$$\underline{I}_c = 3\omega C_{cp} U_\phi \quad (1.31)$$

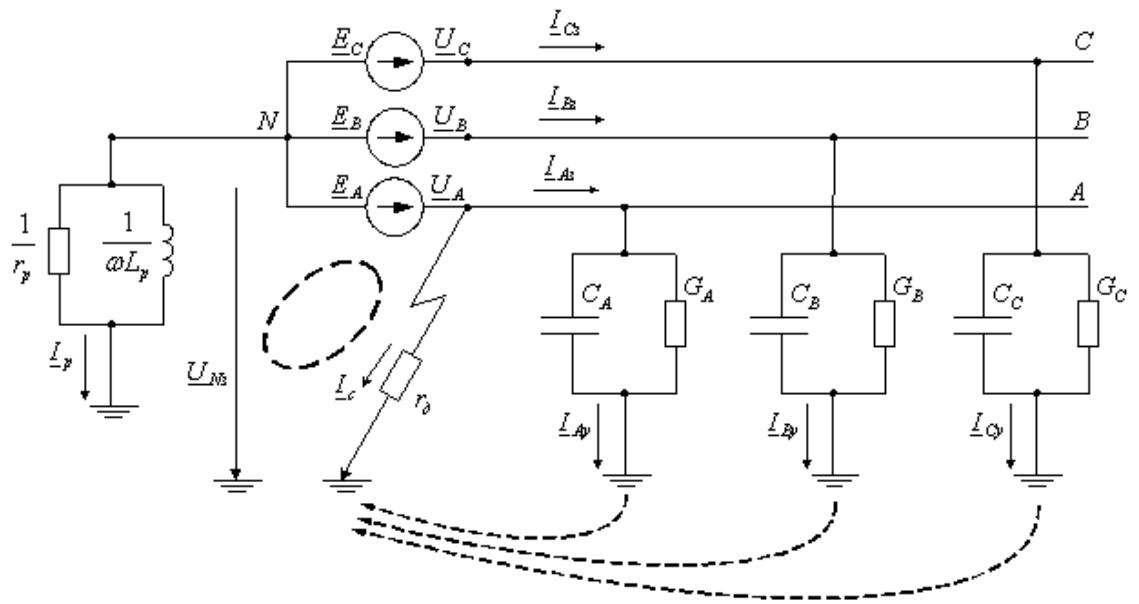
Остаточно маємо:

$$\underline{I}_c = \sqrt{3}\omega C_{cp} U , \quad (1.32)$$

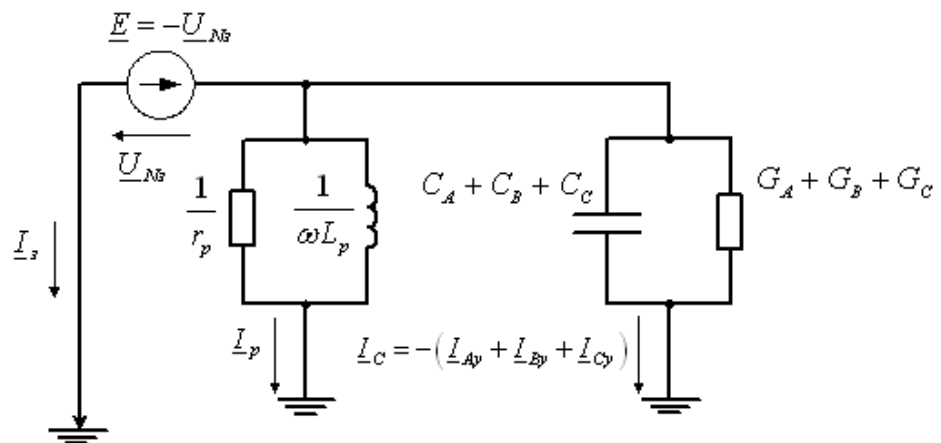
де U_ϕ та U - модулі напруги.

1.4. Компенсація ємнісних струмів

Компенсувати ємнісні складові струмів розраховані у попередніх розділах можна на прикладі наступної схеми електропостачання мережі живлення.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Замикання на землю:

- а) мережа;
- б) еквівалентна схема

Складемо рівняння струмів для аварійного режиму роботи:

$$\underline{I}_s = \underline{I}_c - \underline{I}_p \quad (1.33)$$

тоді

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{aC} + \underline{I}_{aG} + \underline{I}_{sC} + \underline{I}_{sG} - \underline{I}_p \quad (1.34)$$

де

$$\underline{I}_p = \underline{U}_{Ns} \underline{Y}_p = \underline{U}_{Ns} \left(\frac{1}{r_p} + \frac{1}{j\omega L_p} \right);$$

$\frac{1}{r_p}$ та $\frac{1}{j\omega L_p}$ - складові провідності.

ВИЗНАЧИМО

$$\underline{I}_s = -\underline{U}_{Ns} j \left[\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{1}{\omega L_p} \right] - \underline{U}_{Ns} \left(G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p} \right) \quad (1.36)$$

Резонансна частота:

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega(C_A + C_B + C_C)}, \quad (1.37)$$

або

$$\omega \underline{I}_p = \frac{1}{3\omega C_{cp}} \quad (1.38)$$

На основі розрахованих складових побудуємо та представимо векторну діаграму напруг у мережі живлення системи електропостачання.

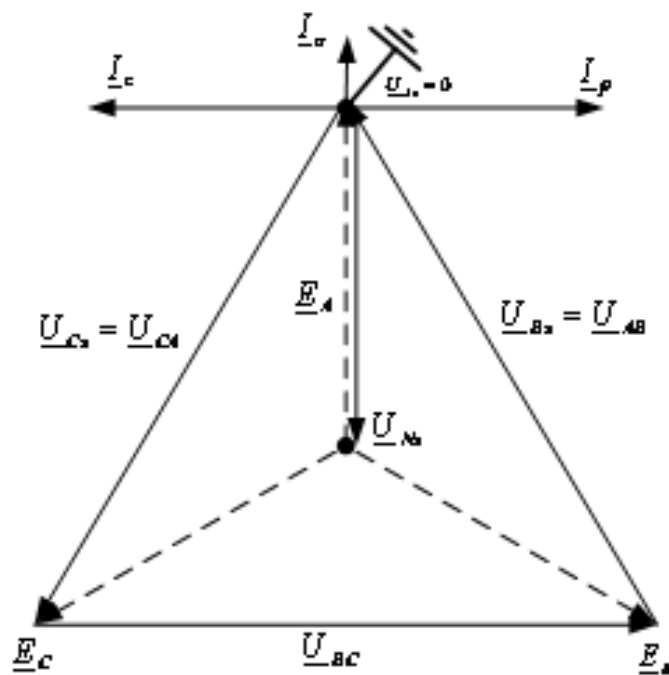


Рисунок 1.8 – Діаграма напруги і струму ($r_o = 0$)

Відповідно до діаграми складемо рівняння для струмів

$$\underline{I}_s = \underline{I}_a = -\underline{U}_{N0} \left(G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p} \right), \quad (1.39)$$

Активна складова струму:

$$\underline{I}_a = -\underline{U}_{Ns} \left(3G_{cp} + \frac{1}{r_p} \right), \quad (1.40)$$

Отже провідність:

$$G_{cp} = \frac{G_A + G_B + G_C}{3}$$

Тоді:

$$d = \frac{\underline{I}_a}{\underline{I}_c} \cdot 100\% = \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p}}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \cdot 100\% \quad (1.41)$$

Отже:

$$\nu = \frac{\underline{I}_c - \underline{I}_p}{\underline{I}_c} \cdot 100\% \quad (1.42)$$

Представимо вираз для визначення резонансного струму:

$$\underline{I}_s = 0,01 \cdot \underline{I}_c \cdot \sqrt{\nu^2 + d^2} \quad (1.43)$$

Отже частота резонансу:

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (1.44)$$

Проілюструємо розглянуті процеси на прикладі принципової схеми мережі електропостачання.

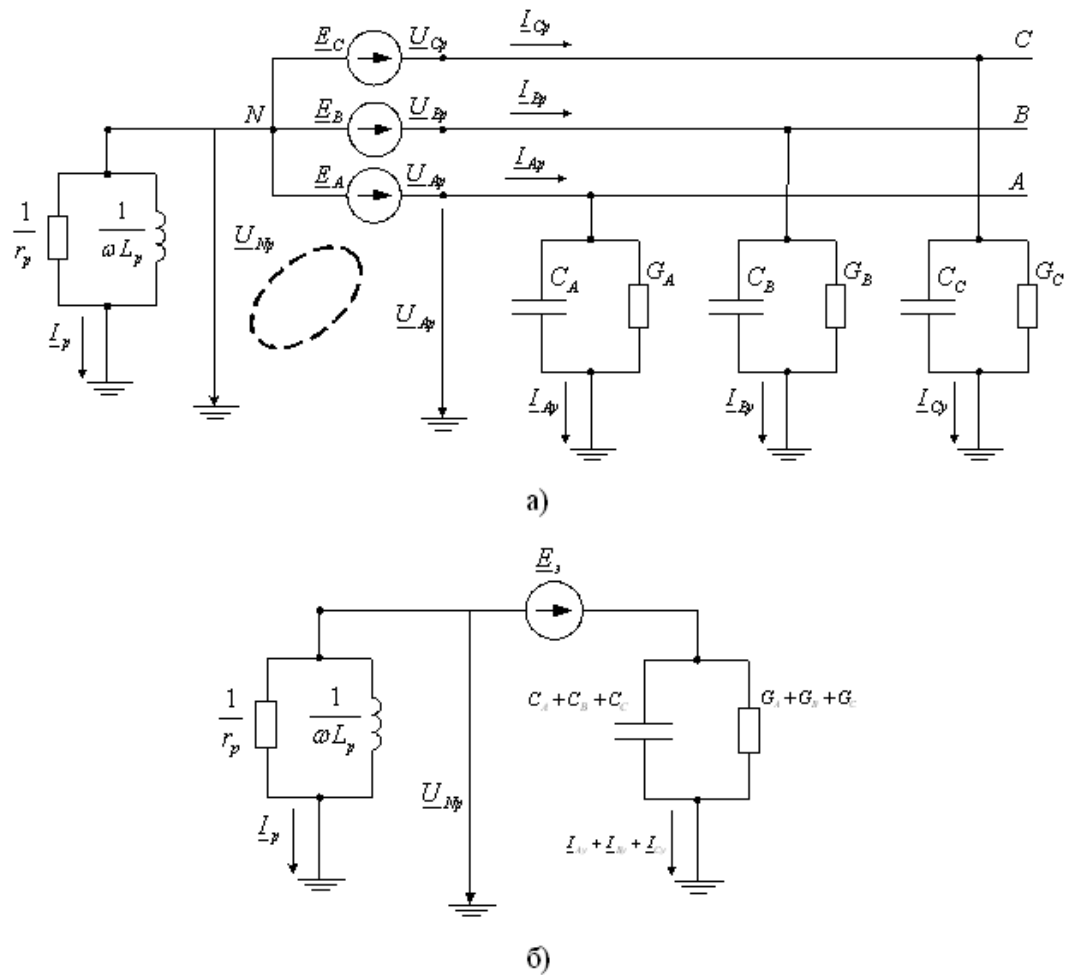


Рисунок 1.9 – Мережа:

а) трифазна;

б) еквівалентна

Запишемо рівняння:

$$\underline{I}_{Ap} + \underline{I}_{Bp} + \underline{I}_{Cp} + \underline{I}_p = \mathbf{0} \quad (1.45)$$

Також:

$$\underline{U}_{Ap}\underline{Y}_A + \underline{U}_{Bp}\underline{Y}_B + \underline{U}_{Cp}\underline{Y}_C + \underline{U}_{Np}\underline{Y}_p = 0 \quad (1.46)$$

Визначимо напругу:

$$\underline{U}_{Np} = \frac{\underline{E}_A\underline{Y}_A + \underline{E}_B\underline{Y}_B + \underline{E}_C\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_p} \quad (1.34)$$

отже

$$\underline{U}_{Np} = \underline{U}_{Ns} = -\underline{E}_A,$$

а \underline{U}_{Ap} , \underline{U}_{Bp} , \underline{U}_{Cp} за (1.1).

Остаточно:

$$\underline{U}_{Np} = -\underline{E}_A (u' - ju'') \frac{\mathbf{1}}{d - j\nu} \quad (1.48)$$

де u' та u'' — за (1.6) та (1.7).

Тоді резонансна напруга:

$$u_p = \frac{|\underline{U}_{M\Phi}|}{|\underline{U}_A|} = |u' - ju''| \frac{1}{\sqrt{d^2 + \nu^2}} \cdot 100\% \quad (1.49)$$

А напруга зсуву:

$$\frac{U_{M\Phi}}{*_}(\nu) = u_p = \frac{|u' - ju''|}{d} \quad (1.50)$$

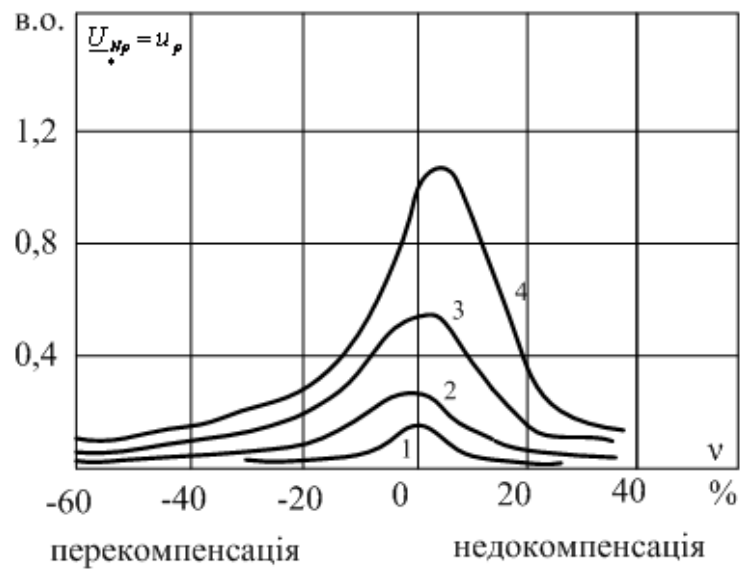


Рисунок 1.10 – Резонансні криві

1.5. Релейний захист

Виходячи з обраного режиму роботи нейтралі необхідно відповідним чином налаштувати систему релейного захисту для мережі електропостачання.

Системи релейного захисту необхідно налаштувати виходячи зі струмів нульової послідовності.

Таким чином може бути забезпечена необхідна чутливість системи захисту.

Зазвичай системи захисту представлені складними електричними схемами, що перевірені на практиці.

Але не зважаючи на складність їх виконання, таке застосування є цілковито оправданим, адже забезпечує високу швидкодію та вибірковість спрацьовування захисту.

1.6. Захисне шунтування

Шунтування пошкодженого дроту схеми електропостачання мережі живлення виконується виходячи зі складових струмів розрахованих у попередніх розділах.

Шунтування пошкодженого дроту мережі живлення можна виконувати на прикладі наступної схеми електропостачання.

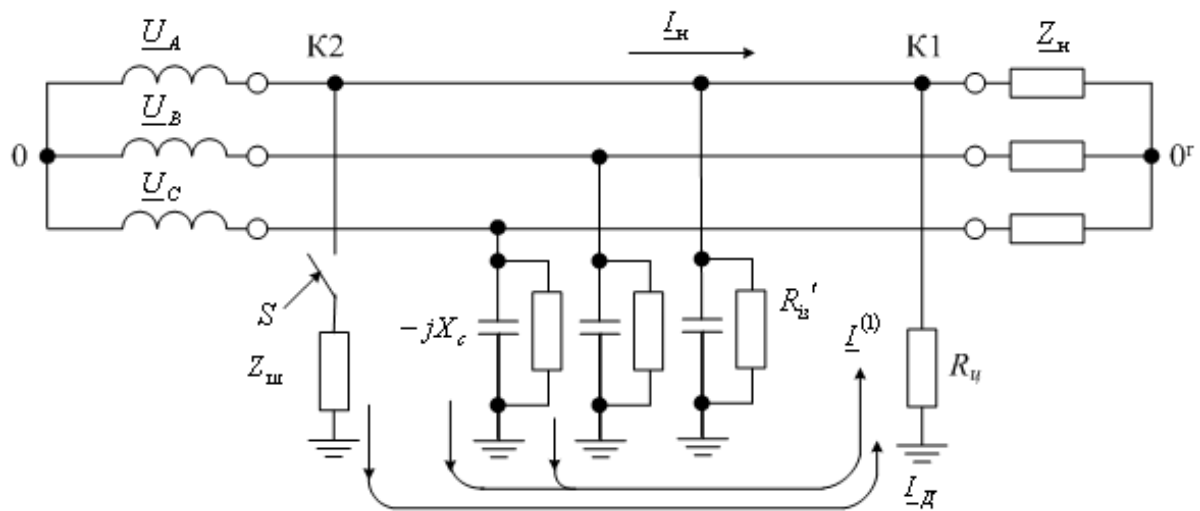


Рисунок 1.11 – Принципова схема

Коефіцієнт шунтування:

$$K_{e,ш} = 1 - \frac{\sum I_{ш}^{(1)}}{I^{(1)}} \quad (1.51)$$

де $I^{(1)}$ - струм шунтування.

1.7. Контроль ізоляції

Неперервний контроль ізоляції електричної мережі відносно землі сприяє вирішенню питання надійності функціонування електроенергетичної системи.

Розробка діагностичних комплексів заснована на застосуванні системи безперервного контролю стану ізоляції мережевих дротів системи електропостачання.

При розробці та налагодженні таких діагностичних комплексів важливим є можливість забезпечена необхідна чутливість при роботі захисного обладнання.

1.8. Висновки

Найпоширенішим видом пошкоджень у мережі живлення, як кабельних так й повітряних ліній є однофазні замикання живлячих дротів на землю.

При цьому виникають побічні явища, такі як перенапруга, виникнення струмів стікання, пошкодження обладнання.

Підвищити рівень безпеки експлуатації ліній електропостачання можливо при застосуванні методів контролю та виявлення передаварійних режимів роботи.

Неперервний контроль ізоляції електричної мережі відносно землі сприяє вирішенню питання надійності функціонування електроенергетичної системи.

Розділ 2. Дослідження ефективності режиму роботи розподільчих електричних мереж

2.1. Критерії ефективності

Розглянемо на прикладі представлених функціональних схем критерії що висуваються до режимів роботи нейтрального дроту системи електропостачання.



Рисунок 2.1 – Захист мережі 6 - 35 кВ



Рисунок 2.2 – Критерії ефективності

Виходячи з наведених критеріїв ефективності функціонування нейтрального дроту у схемі електропостачання представимо узагальнююче рівняння для такого визначення:

$$E_x = \sum_{i=1}^n V_i \rho_{ik} \quad (2.1)$$

де k – порядковий номер;

n - відповідність критерію;

V_i - ваговий коефіцієнт;

$\rho_{ik} = f_{ik}(y)$ - оцінка ефективності.

Запишемо рівняння для визначення вагових коефіцієнтів узагальненого критерію ефективності функціонування нейтрального дроту у схемі електропостачання:

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n W_{j,i} \quad (2.2)$$

2.2. Перенапряга при коротких замиканнях

Розглянемо яким чином відбувається вплив режиму роботи нейтралі технічні характеристики системи електропостачання.

У аварійному режимі в залежності від режиму роботи нейтрального дроту системи електропостачання виникають значні перенапряги у мережі живлення.

$$y_{п2} = S_1 / S_2 ; y_{п3} = S_1 / S_3 \quad (2.3)$$

де S_1, S_2, S_3 - площа,

$$k_{п1} = 2,4 ;$$

$$k_{п2} = k_{п.маж} .$$

Відповідно до розглянутих рівнянь, наведемо графічне представлення отриманих розрахунків.

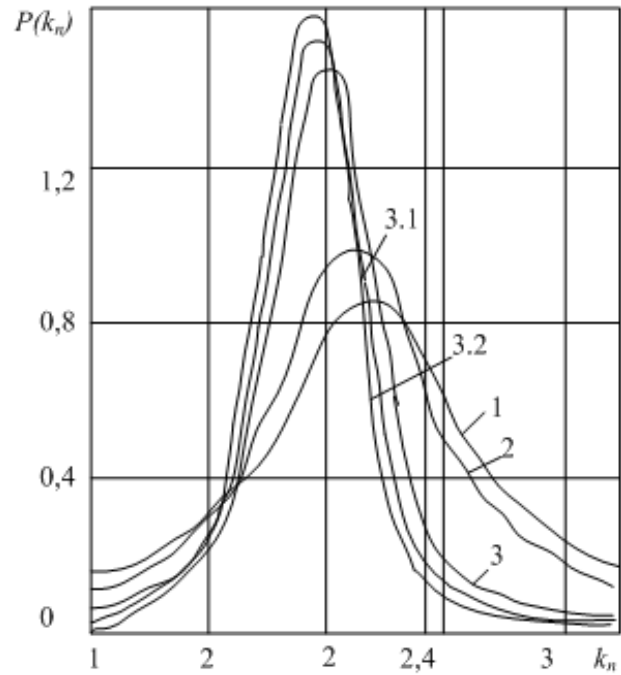


Рисунок 2.3 – Кратність напруги

Складемо рівняння закону розподілу отриманої величини перенапруги у мережі живлення:

$$P = \frac{k}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(k_n - a)^2}{2\sigma^2}} . \quad (2.4)$$

Таблиця 2.1 – Розподіл параметрів при різних режимах роботи

Нейтраль мережі	σ	A	k
Ізольована (1)	0,462	2,274	1,012
Заземлена через реактор (2)	0,397	2,067	1,004
Заземлена через резистор (3)	0,261	1,924	1,001

Розрахункові коефіцієнти:

$$y_{\pi 2(3)} = \int_{2,4}^{3,6} f_1(k_{\pi}) dk_{\pi} \left[\int_{2,4}^{3,6} f_{2(3)}(k_{\pi}) dk_{\pi} \right]^{-1}. \quad (2.5)$$

Тоді щодо перенапруги:

$$\rho_{\pi I} = 1 - \frac{1}{y_{\pi I}}. \quad (2.6)$$

2.3. Аварійні вимикання

Розглянемо яким чином в залежності від режиму роботи нейтрального дроту системи електропостачання змінюються значення перенапруги у мережі живлення.

$$\rho_{y1} = \frac{t_{y1}}{t_{y1}} = \mathbf{1}; \rho_{y2} = \frac{t_{y1}}{t_{y2}}; \rho_{y3} = \frac{t_{y1}}{t_{y3}} = \mathbf{1},$$

де t_{y1} - час відключення;

t_{y2} - час відключення при компенсації ємнісного струму;

t_{y3} - час відключення при компенсації активного струму.

Отже, враховуючи попередні розрахунки складемо рівняння узагальнюючого критерію впливу режиму роботи нейтралі на ефективність системи електропостачання.

$$E_k = \mathbf{1} - \frac{n_{0k}}{n_0} \quad (2.7)$$

Тоді:

$$\rho_{y2} = \frac{\eta_{1-2} \left(\sum_{i=1}^{i=k} t_{yi1} \cdot N_{0i1} \right) \sum_{i=1}^{i=m} N_{0i2}}{\left(\sum_{i=1}^{i=k} N_{0i1} \right) \left(\sum_{i=1}^{i=m} t_{yi2} \cdot N_{0i2} \right)}; \quad \rho_{y3} = \frac{\rho_{y2} \eta_{1-3}}{\eta_{1-2} \frac{1 - a_{p3}}{1 - a_{p2}}}, \quad (2.8)$$

де η_{1-2} , η_{1-3} - число пошкоджень;

t_{yi1} , t_{yi2} - час відключення;

N_{0i1} , N_{0i2} - число режимів короткого замикання;

a_{p2} , a_{p3} - вибіркковість дії реле захисту.

Вибірковість роботи системи захисту описуємо наступним розрахунковим рівнянням:

$$a_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} (n_{ci}/n_{0i}) n_{pi}}{\sum_{i=1}^{i=k} n_{pi}} \quad (2.9)$$

де n_{ci} - спрацьовування реле;

n_{pi} - кількість ділянок сигналізації.

2.4. Напряга дотику та напряга кроку

Розглянемо чинники що впливають на безпеку людини при виникненні аварійних ситуацій.

Таблиця 2.2 – Значення напруг дотику

Підстанція	Опори заземлювачів, Ом			
	10	15	20	30
1	-	-	268	402
2	188	-	-	-
3	149	224	298	447
4	142	213	-	-
5	102	153	204	-
6	-	-	428	642
7	86	129	172	-

Запишемо рівняння:

$$\rho_{HI} = 1 - \frac{1}{y_{HI}} \quad (2.10)$$

де; $y_{HI} = t_{\max} / t_p$

t_{\max} - час існування короткого замикання;

t_p - час існування короткого замикання для альтернативного варіанту мережі.

Отже:

$$\rho_{TI} = 1 - \frac{1}{\gamma_{TI}} \quad (2.11)$$

де $\gamma_{TI} = I_{z, \text{срmax}} / I_{z, \text{срр}}$;

$$\rho_{T1} = 0,17 ;$$

$$\rho_{T2} = 0,86 ;$$

$$\rho_{T3} = 0 .$$

2.5. Захисне вимикання

Як захід щодо підвищення ефективності роботи системи електропостачання можна віднести захисне відключення пошкодженої ділянки мережі.

При цьому слід також виконувати роз'єднання ізолюючого дроту, яке має виконуватись у автоматичному або напівавтоматичному режимі з використанням спеціального обладнання та схем реалізації подібного вимкнення.

2.6. Вплив на релейний захист

Струм спрацьовування системи захисту можна розрахувати виходячи з методики, що розглянута у попередніх розділах за наступним розрахунковим рівнянням:

$$I_h = \frac{I_s R_s}{R_h} = \frac{\sqrt{I_C^2 + I_A^2} R_s}{R_h} \quad (2.12)$$

де $I_C = 10 \text{ А}$, $I_A = 4 \text{ А}$, $R_s = 4 \text{ Ом}$,

$R_h = 700 \div 1000 \text{ Ом}$,

$I_h < 65 \text{ мА}$.

Отже:

$$\rho_{3I} = 1 - \frac{1}{y_{3I}} \quad (2.13)$$

отримаємо $\rho_{3I} = 0,25$;

а $\rho_{33} = 0,95$.

2.7. Засоби заземлення

Розглянемо схемні рішення та пристрої що забезпечують необхідний режим роботи нейтрального дроту системи електропостачання мережі живлення.

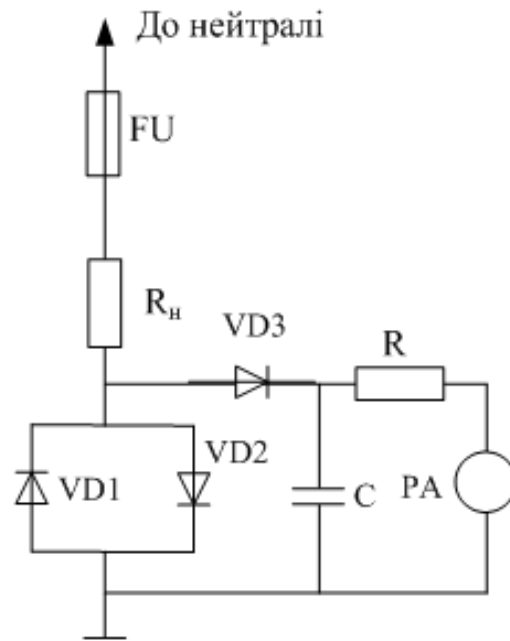


Рисунок 2.3 – Схема пристрою заземлення

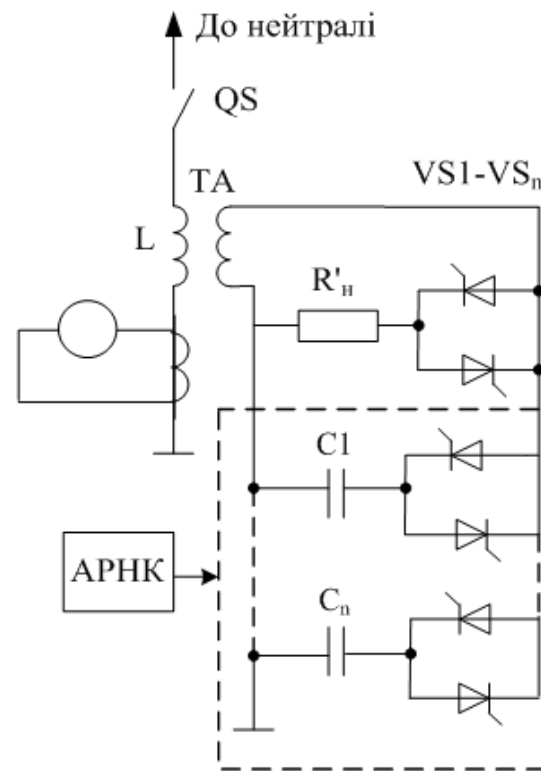


Рисунок 2.4 – Схема пристрою заземлення

Напруга спрацьовування:

$$U_{см} = \frac{U_{н} \omega L}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} ; \quad I = \frac{U_{см}}{X_L} = \frac{U_{н}}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} \quad (2.14)$$

де L - індуктивність;

R - активний опір;

C - ємність.

Компенсаційний струм:

$$I_k = I_L - \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_c',$$

де I_L - індуктивний струм;

I_c' - ємнісний струм.

Отже:

$$I_k = \sqrt{\left(I_L - \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_c' \right)^2 + \left(\frac{1}{k_{\text{тр}}} I_A' \right)^2}; \quad (2.15)$$

Або:

$$I_3 = \sqrt{\left(I_L - \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_c' - I_c \right)^2 + \left(\frac{1}{k_{\text{тр}}} I_A' \right)^2}; \quad (2.16)$$

Узагальнююче рівняння:

$$3I_{\text{оп}} = \sqrt{\left(I_L - \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_c' - I_c - I_{\text{с.п.}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_{\text{тр}}} I_A'\right)^2}; \quad (2.17)$$

де I_c - ємнісний струм;

$I_{\text{с.п.}}$ - струм лінії;

I_A' - струм активний.

Розглянемо роботу наступного пристрою що забезпечує необхідний режим роботи нейтрального дроту системи електропостачання мережі живлення.

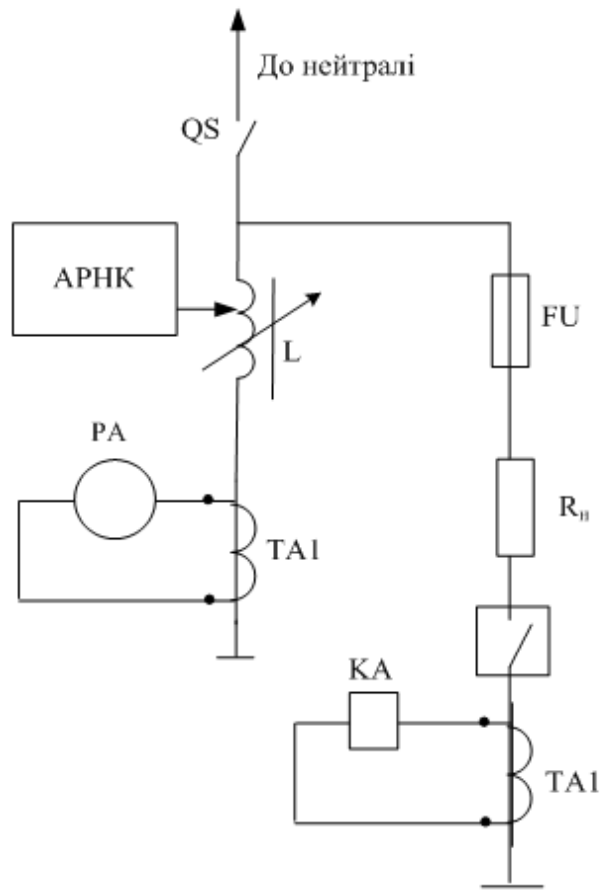


Рисунок 2.5 – Пристрій заземлення

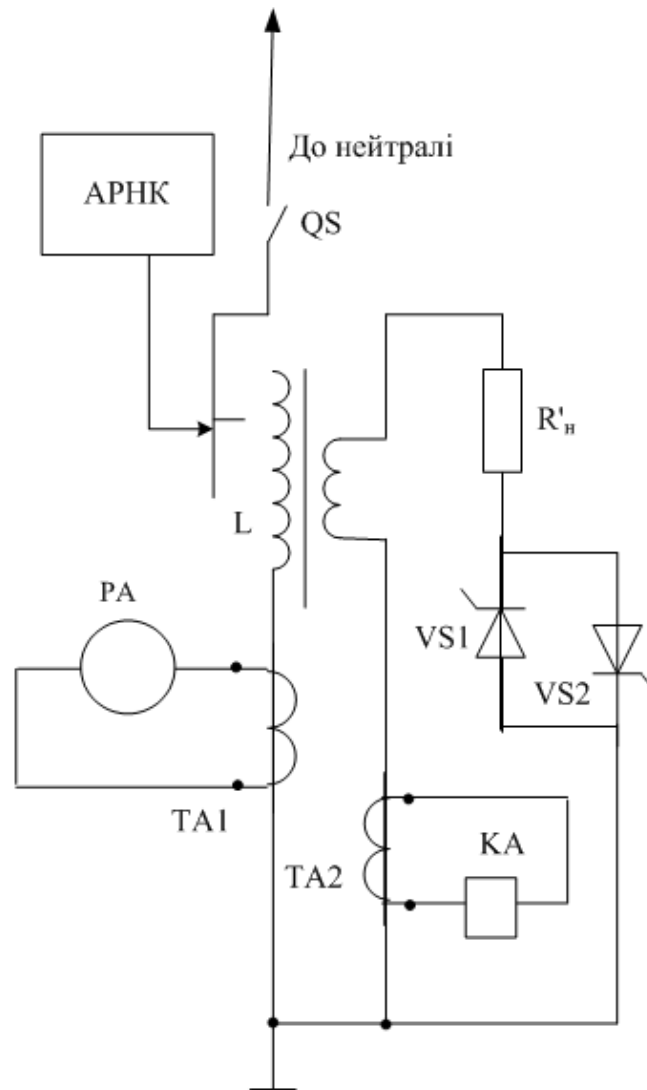


Рисунок 2.6 – Схема пристрою заземлення

Струм короткого замикання:

$$I_3 = I_{з.п} + ne^{pt} + (k-n)e^{pt}, \quad (2.18)$$

де I_3 - струм замикання;

$I_{з.п}$ - сталий струм,

$$I_{3, \pi} = \sqrt{2} I_3 \sin(\omega t + \psi_1),$$

$$\text{де } I_3 = U_{\phi} / \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \text{ а}$$

$$R_{\Sigma} = R_3 + \frac{R X_c^2}{R_{\Sigma}^2 + (X_x - X_c)^2}; \quad X_{\Sigma} = -\frac{X_c (X_x^2 - X_x X_c + R_{\Sigma}^2)}{R_{\Sigma}^2 + (X_x - X_c)^2};$$

$$\psi_1 = \psi - \varphi, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}};$$

$$p_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}; \quad a = \frac{L + R_3 R_2 C}{R_3 R_2 C}; \quad b = \frac{R_3 + R_2}{R_3 R_2 C};$$

$$k = \sqrt{2} I_3 \left(\frac{R' \sin \psi_1 + X' \cos \psi_1}{R_3} - \sin \psi_1 \right), \quad (2.19)$$

$$d = \sqrt{2} I_3 \omega \left(\frac{R' \sin \psi_1 - X' \cos \psi_1}{R_3} - \frac{R' \sin \psi_1 - X' \cos \psi_1}{R_3^2 \omega C} - \cos \psi_1 \right), \quad (2.20)$$

$$n = \frac{1}{p_1 - p_2} (d - p_2 k), \quad (2.21)$$

Тоді миттєве значення струму:

$$I_{3, \pi} = \sqrt{\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt},$$

де

$$\begin{aligned}
\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt &= 2I_3^2 \left[\frac{t_1}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t_1 + \psi_1) + \frac{n^2}{2p_1} e^{2pn} + \frac{(k-n)^2}{2p_2} e^{2pn} \right] + \\
&+ 2\sqrt{2}I_3 n \frac{e^{pn}}{p_1^2 + \omega^2} \left[p_1 \sin(\omega t_1 + \psi_1) - \omega \cos(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ 2\sqrt{2}I_3 (k-n) \frac{e^{pn}}{p_2^2 + \omega^2} \left[p_2 \sin(\omega t_1 + \psi_1) - \omega \cos(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ \frac{2n(k-n)}{p_1 + p_2} e^{(n+p_1)n} + 2I_3^2 \frac{1}{4\omega} \sin 2\psi_1 - \frac{n^2}{2p_1} - \frac{(k-n)^2}{2p_2} - \\
&- \frac{2\sqrt{2}I_3 n}{p_1^2 + \omega^2} (p_1 \sin \psi_1 - \omega \cos \psi_1) - \frac{2\sqrt{2}I_3 (k-n)}{p_2^2 + \omega^2} (p_2 \sin \psi_1 - \omega \cos \psi_1) - \\
&- \frac{2n(k-n)}{p_1 + p_2}.
\end{aligned}$$

Тоді струм сверхпровідності:

$$I_{3, \text{св}} = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \nu),$$

$$A = \frac{k}{\sin \nu}; \quad \nu = \text{arcctg} \frac{d + \delta k}{k\omega^2}; \quad (2.22)$$

$$\delta = \frac{L + R_3 RC}{2R_3 LC}; \quad \omega' = \sqrt{\frac{R_3 + R}{R_3 LC} - \delta^2}; \quad (2.23)$$

Отже:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt &= 2I_3^2 \left[\frac{t_1}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ \sqrt{2}I_3 A \frac{e^{-\delta t_1}}{\delta^2 + (\omega - \omega')^2} \left[-\delta \cos((\omega - \omega')t_1 + \psi_1 - \nu) \right] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (\omega - \omega') \sin((\omega - \omega')t_1 + \psi_1 - \nu) - \sqrt{2}I_3 A \frac{e^{-\delta t_1}}{\delta^2 + (\omega + \omega')^2} \times \\
& \times [-\delta \cos((\omega + \omega')t_1 + \psi_1 + \nu)] + (\omega + \omega') \sin((\omega + \omega')t_1 + \psi_1 + \nu) - \\
& - \frac{1}{4\delta} A^2 e^{-2\delta t_1} - \frac{1}{4} A^2 \frac{e^{-2\delta t_1}}{\delta^2 + \omega'^2} [-\delta \cos(2\omega t_1 + 2\nu) + \omega' \cos(2\omega t_1 + 2\nu)] + \\
& 2I_3^2 \frac{1}{4\omega} \sin 2\psi_1 - \sqrt{2}I_3 A \frac{1}{\delta^2 + (\omega - \omega')^2} [-\delta \cos(\psi_1 - \nu) + (\omega - \omega') \sin(\psi_1 - \nu)] + \\
& + \sqrt{2}I_3 A \frac{1}{\delta^2 + (\omega - \omega')^2} [-\delta \cos(\psi_1 + \nu) + (\omega + \omega') \sin(\psi_1 + \nu)] + \frac{1}{4\delta} A^2 + \\
& + \frac{1}{4} A^2 \frac{1}{\delta^2 + \omega'^2} [-\delta \cos 2\nu + \omega' \sin 2\nu].
\end{aligned}$$

2.8. Висновки

Поліпшенню ефективності роботи системи захисту електричної мережі від струмів короткого замикання сприяє компенсація ємнісної складової струму.

При цьому робота релейного захисту налаштовується у відповідності із повним омичним опором кабельної або повітряної лінії електропередач енергосистеми.

Також дієвим методом усунення наслідків однофазних замикань фазного дроту на землю є накладання захисного шунту на пошкоджену фазу живлення.

Метод накладання захисного шунтування на пошкоджену фазу є дієвим засобом обмеження пошкодженої ділянки.

Але ефективність його застосування залежатиме від конфігурації мережі живлення.

Велике значення для цього має спосіб приєднання нульового дроту мережі живлення, тобто від режиму приєднання і роботи нейтрального дроту до трансформатору живлення.

Для визначення ефективності роботи нейтралі та аналізу її впливу на роботу засобів захисту проводять дослідження режимів роботи енергетичної системи.

Від способу приєднання а також режиму роботи визначається ступінь впливу на функціонування захисту системи електропостачання від шкідливих впливів.

Завданням є створення оптимальних умов функціонування енергетичної системи у межах області електричних значень за рахунок енергетичних співвідношень.

Дослідження показують, що для критерію ефективності заземлення нейтрального дроту враховують такі параметри, як кратність перенапруги при однофазному замиканні на землю та час протікання перехідного процесу при цьому.

При враховуванні та визначені рівню перенапруги слід враховувати комутаційну перенапругу яка виникає у внутрішньому контурі, та дуговий опір.

При виборі режиму нейтралі також порівнюють тривалості перехідного процесу при однофазному замиканні.

Захисне шунтування допомагає знизити час гасіння дуги, при цьому знижується значення теплової енергії що виділяється у простір, що сприяє підвищенню надійності роботи захисту.

Для режиму роботи нейтралі важливою є підвищена чутливість до спрацьовування релейного захисту.

Підвищується рівень сигналу, тому слід перевіряти налаштування захисного контуру.

Висновки

В роботі вирішена задача аналізу сучасних методів захисту розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ від однофазних замикань на землю із розробкою технічних засобів підвищення ефективності та безпеки їх експлуатації.

В результаті встановлено критерії ефективності режиму роботи розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю.

Також вдосконалено підхід щодо розробки технічних засобів підвищення ефективності та безпеки експлуатації розподільчих електричних мереж напругою 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю.