



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи «Розрахунок та аналіз
розподілення ємнісних струмів в сільських розподільних мережах
6-35 кВ»
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної форми навчання
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Харків
2023

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій**
**Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту**

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи «Розрахунок та аналіз розподілення
ємнісних струмів в сільських розподільних мережах 6-35 кВ» для
здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми
навчання
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Затверджено рішенням
науково-методичної ради
факультету енергетики,
робототехніки та комп'ютерних
технологій
Протокол № 3
від 22 лютого 2023 року

Харків
2023

УДК 621.31

С 31

Схвалено на засіданні кафедри
електропостачання та енергетичного
менеджменту Протокол №7 від 8.02.2023 р.

Рецензенти:

С. О. Тимчук, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ;

Ю. М. Хандола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

С 31 Електричні мережі та системи: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи «Розрахунок та аналіз розподілення ємнісних струмів в сільських розподільних мережах 6-35 кВ» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: О. А. Савченко, С. А. Попадченко – Харків: [б. в.], 2023. – 28 с.

Методичні вказівки розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни. Видання включає теоретичну частину, алгоритм виконання лабораторної роботи, контрольні запитання та перелік рекомендованої літератури.

Видання призначена для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.31

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, д-р техн. наук

© Савченко О. А., Попадченко С. А., 2023

© ДБТУ,

Лабораторна робота

«Розрахунок та аналіз розподілення ємнісних струмів в сільських розподільних мережах 6-35 кВ»

МЕТА РОБОТИ: вивчити особливості роботи нейтралі розподільних електричних мереж 6-35 кВ, провести розрахунок режимів роботи розподільних електричних мереж 6-35 кВ з різними варіантами роботи нейтралі.

1 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчення відомостей про особливості роботи нейтралі розподільних електричних мереж 6-35 кВ.

2. Теоретичний розрахунок режимів роботи розподільних електричних мереж 6-35 кВ з різними варіантами роботи нейтралі.

2 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву та мету роботи.
2. Вихідні дані для розрахунків та моделювання для вказаного варіанту за зразком табл. 4.1.
3. Схему розподільної мережі, рис. 4.1.
4. Розрахункові схеми, розрахункові вирази з поясненнями та результатами розрахунків, зведені дані розрахунків та моделювання (табл. 4.2-4.6).
5. Векторні діаграми для кожного з режимів, виконані в масштабі на міліметровому папері (для побудови діаграм використати дані теоретичних розрахунків).

3 ПОЯСНЕННЯ ДО РОБОТИ

Станом на сьогоднішній день в ОЕС України експлуатується понад 400 тис. км ліній електропередачі номінальною напругою 6-35 кВ, що становить приблизно 42% від загальної протяжності всіх електричних мереж. Однак, в ланцюгу «вироблення-передача-розподіл-споживання» питанням пов'язаним з розподільчими мережами цих класів напруг приділяється надзвичайно мало уваги. Ці мережі знаходяться в експлуатації більше 50 років і є морально та фізично застарілими. Так, понад 40% ліній електропередачі знаходяться в незадовільному технічному стані і потребують капітального ремонту, реконструкції або заміни, а електрообладнання підстанцій відпрацювало вже 2 строки служби, задекларовані нормативними документами.

Спосіб заземлення нейтралі мережі є досить важливою характеристикою. Він визначає:

- струм в місці пошкодження і перенапруги на непошкоджених фазах при однофазному замиканні;
- схему побудови релейного захисту від замикань на землю;
- рівень ізоляції електрообладнання;
- вибір апаратів для захисту від грозових і комутаційних перенапруг (обмежувачів перенапруг);
- безперервність електропостачання;
- допустимий опір контуру заземлення підстанції;
- безпеку персоналу і електроустаткування при однофазних замиканнях.

Останнім часом ведуться дискусії щодо доцільності різних режимів роботи нейтралей розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Тому в даній роботі вивчаються аспекти різних режимів роботи нейтралей.

В даний час у світовій практиці застосовуються такі методи заземлення нейтралі мереж середньої напруги (термін

«середня напруга» використовується в зарубіжних країнах для мереж з діапазоном робочих напруг 1-69 кВ) [1-3]:

- ізольована (незаземлена);
 - глухозаземлена (безпосередньо приєднана до заземлювального контуру);
 - заземлена через дугогасний реактор;
 - заземлена через резистор (низькоомним або високоомний).
- Нижче в табл. 3.1 наведені способи заземлення нейтралі, які використовуються в різних країнах світу.

В Україні, відповідно до п.1.2.16 останньої редакції ПУЕ-2017, робота електричних мереж напругою від 3 кВ до 35 кВ може бути передбачена як з ізольованою нейтраллю, так і з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор або резистор, а також заземленою одночасно через дугогасний реактор і резистор.

Розглянемо докладніше способи заземлення нейтралі і дамо їм загальну характеристику.

Для режиму з ізольованою нейтраллю нейтральна точка джерела (генератора або трансформатора) не приєднується до контуру заземлення. В Україні розподільні мережі 6-10 кВ живляться як правило від обмоток трансформаторів, які з'єднуються в трикутник (рис. 3.1), тому нейтральна точка фізично відсутня.

ПУЕ обмежує застосування режиму з ізольованою нейтраллю в залежності від струму однофазного замикання на землю мережі (ємнісного струму). Компенсація струму однофазного замикання на землю (використання дугогасильних реакторів) повинна передбачатися при ємнісних струмах:

- більше 30 А при напрузі 3-6 кВ;
- більше 20 А при напрузі 10 кВ;
- більше 15 А при напрузі 15-20 кВ;
- більше 10 А в мережах напругою 3-20 кВ, що мають залізобетонні і металеві опори на повітряних лініях електропередачі, і у всіх мережах напругою 35 кВ.

Таблиця 3.1 – Способи заземлення нейтралі мереж середньої напруги в різних країнах світу

Країна	Прийнята середня напруга	Спосіб заземлення нейтралі			
		Ізольована нейтраль	Через дугогасний реактор	Через резистор	Глухе заземлення
Австралія	11–12 кВ			+	+
Канада	4–25 кВ			+	+
США	4–25 кВ			+	+
Іспанія	10–30 кВ			+	+
Італія	10–20 кВ	+			
Португалія	10–30 кВ			+	
Франція	12–24 кВ			+	
Японія	6,6 кВ	+		+	
Німеччина	10–20 кВ		+		
Австрія	10–30 кВ		+		
Бельгія	6,3–17 кВ			+	
Великобританія	11 кВ			+	+
Швейцарія	10–20 кВ		+		
Фінляндія	20 кВ	+	+		

Недоліки режиму роботи з ізольованою нейтраллю вельми істотні, а така перевага як відсутність необхідності відключення першого замикання є досить спірною. Так, завжди є ймовірність виникнення другого замикання на іншому приєднанні через перенапругу і відключення відразу двох кабелів, електродвигунів або повітряних ліній. Такий розвиток подій в експлуатації виникає досить часто. Саме з цієї причини в багатьох країнах, таких як США, Канада, Англія, Австралія, Бельгія, Португалія, Франція та інші, відмова від режиму з ізольованою нейтраллю

відбулась ще в 40-50-х роках минулого століття. Як видно з табл. 3.1, в даний час з промислово розвинених країн режим з ізольованою нейтраллю застосовується тільки в Італії, Японії та Фінляндії. Причому в Італії зараз розглядається можливість переходу до роботи з заземленням через дугогасний реактор, а в Японії - із заземленням через резистор.

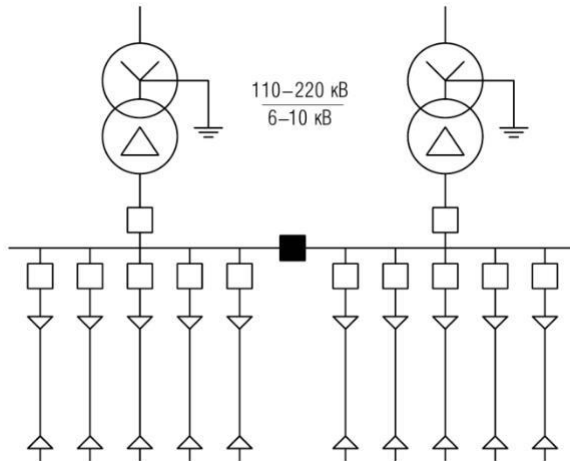


Рисунок 3.1 – Схема двотрансформаторної підстанції з ізольованою нейтраллю

В результаті аналізу можна зробити висновки, що перевагами режиму з ізольованою нейтраллю є:

- відсутність необхідності в негайному відключенні першого однофазного замикання на землю;
- малий струм в місці пошкодження (при малій ємності мережі на землю).

Недоліками цього режиму нейтралі є:

- можливість виникнення дугових перенапруг при переміжному характері дуги з малим струмом (одиниці-десятки ампер) в місці однофазного замикання на землю;

- можливість виникнення багатократних ушкоджень (вихід з ладу кількох електродвигунів, кабелів) через пробоїв ізоляції на інших приєднаннях, пов'язаних з дуговими перенапругами;
- можливість тривалого впливу на ізоляцію дугових перенапруг, що веде до накопичення в ній дефектів і зниження терміну служби;
- необхідність виконання ізоляції електрообладнання відносно землі на лінійну напругу;
- складність виявлення місця пошкодження;
- небезпека електротравм персоналу і сторонніх осіб при тривалому існуванні замикання на землю в мережі;
- складність забезпечення належного функціонування релейних захистів від однофазних замикань, так як реальний струм замикання на землю залежить від режиму роботи мережі (числа включених приєднань).

Нейтраль, заземлена через дугогасний реактор, також досить часто застосовується в Україні. Цей спосіб заземлення нейтралі, як правило, знаходить застосування в розгалужених кабельних мережах промислових підприємств і міст. При цьому спосіб нейтральну точку мережі отримують, використовуючи спеціальний трансформатор (рис. 3.2).

З точки зору історичної послідовності цей спосіб заземлення нейтралі є другим. Він був запропонований німецьким інженером Петерсеном в 20-х роках минулого століття (в європейських країнах дугогасильні реактори називають по імені винахідника «Petersen coil» - котушка Петерсена).

В Україні режим заземлення нейтралі через дугогасний реактор застосовується в основному в розгалужених кабельних мережах з великими ємнісними струмами. Кабельна ізоляція на відміну від повітряної як правило не є самовідновлюваною. Тобто, один раз виникнувши, пошкодження не усунеться, навіть незважаючи на практично повну компенсацію (відсутність) струму в місці пошкодження. Відповідно для кабельних мереж

самоликвідації однофазних замикань як позитивної властивості режиму заземлення нейтралі через дугогасний реактор не існує.

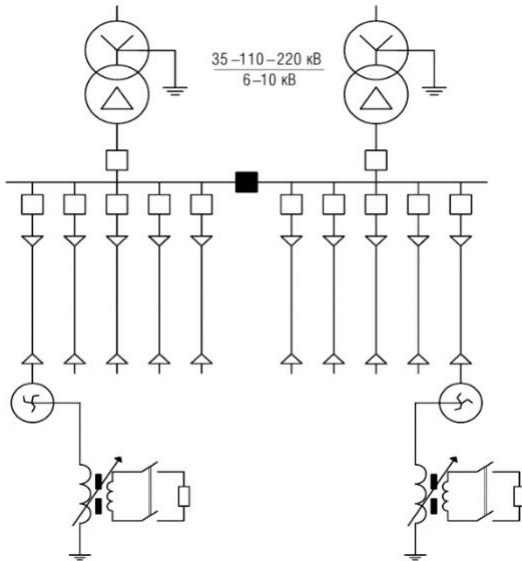


Рисунок 3.2 –
Знижувальна під-
станція із зазем-
леною через дуго-
гасний реактор ней-
траллю на стороні 6-
10 кВ

При дуговому характері однофазного замикання вплив перенапруг на ізоляцію мережі нижче, ніж при ізольованій нейтралі, але й тут існує можливість виникнення багатократних ушкоджень. В останні десятиліття довжина мереж 6-10 кВ виросла, а потужність компенсуючих пристроїв на підстанціях залишилася тією ж, відповідно значна частка мереж середньої напруги зараз працює з істотною недокомпенсацією. Це веде до зникнення всіх позитивних властивостей мереж з компенсованою нейтраллю.

Застосування режиму з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор, в таких країнах, як Фінляндія, Швеція, відрізняється від українського досвіду. У цих країнах він застосовується в мережах з повітряними лініями, де його застосування найбільш ефективне. Застосування режиму заземлення нейтралі через дугогасний реактор в таких країнах, як

Німеччина, Австрія, Швейцарія, носить в деякій мірі традиційний характер. Проте і в цих країнах цей режим заземлення нейтралі застосовується в основному в мережах з повітряними лініями. У мережах середньої напруги зарубіжних промислових підприємств використовується резистивне заземлення нейтралі.

Перевагами цього методу заземлення нейтралі є:

- відсутність необхідності в негайному відключенні першого однофазного замикання на землю;
- малий струм в місці пошкодження (при точній компенсації - налаштування дугогасного реактора в резонанс);
- можливість самоліквідації однофазного замикання, що виникло на повітряній лінії або ошиновці (при точній компенсації - налаштування дугогасного реактора в резонанс);
- виключення ферорезонансних процесів, пов'язаних з насиченням трансформаторів напруги та неповнофазним включенням силових трансформаторів.

Недоліками даного режиму заземлення нейтралі є:

- виникнення дугових перенапруг при значному розладі компенсації;
- можливість виникнення багатократних ушкоджень при тривалому існуванні дугового замикання в мережі;
- можливість переходу однофазного замикання в двофазне при значному розладі компенсації;
- можливість значних зсувів нейтралі при недокомпенсації і виникненні неповнофазних режимів;
- можливість значних зсувів нейтралі при резонансному налаштуванні в повітряних мережах;
- складність виявлення місця пошкодження;
- небезпека електротравм персоналу і сторонніх осіб при тривалому існуванні замикання на землю в мережі;
- складність забезпечення належного функціонування релейних захистів від однофазних замикань, так як струм пошкодженого приєднання дуже незначний.

Варто зауважити, що в мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному налаштування реактора та вимиканні одного або декількох приєднань в режимі замикання фази на землю виникає перекомпенсація, що також приводить до негативних наслідків (зокрема, внаслідок протікання індуктивного струму в місці замикання виникає значна крокова напруга). У зв'язку з цим в таких мережах необхідно передбачати встановлення реакторів з автоматичним регулюванням ступеня компенсації. З нашої точки зору найефективнішими на сьогоднішній день є плунжерні реактори.

Можливість використання резистивного заземлення нейтралі в мережах середньої напруги в Україні введена згідно ПУЕ з 2017 року. У той же час, якщо оцінювати світову практику, то резистивне заземлення нейтралі - це найбільш широко застосований спосіб (див. табл. 3.1).

Резистор в вітчизняних мережах 6-10 кВ може вмикатися так само, як і реактор, в нейтраль спеціального заземлювального трансформатора. Можливі й інші варіанти вмикання резистора, коли нейтраль заземлювального трансформатора наглухо приєднується до контуру заземлення, а резистор вмикається у вторинну обмотку, зібрану в розімкнутий трикутник, або використовується однообмоточний трансформатор (фільтр нульової послідовності) зі з'єднанням обмотки ВН в зигзаг, рис. 3.3.

Можливі два варіанти реалізації резистивного заземлення нейтралі: високоомне або низькоомне.

При високоомному заземленні нейтралі резистор вибирається таким чином, щоб струм, створюваний ним в місці однофазного пошкодження, дорівнював або був більшим ємнісного струму мережі. Це гарантує відсутність дугових перенапруг при однофазних замиканнях. Як правило, сумарний струм в місці пошкодження при високоомному заземленні нейтралі не перевищує 10 А. Тобто високоомним заземленням нейтралі є таке заземлення, яке дозволяє не вимикати однофазне замикання

негайно. Відповідно високоомне заземлення нейтралі може застосовуватися тільки в мережах з малими власними ємнісними струмами до 5-7 А. В мережах з великими ємнісними струмами допустимим є застосування тільки низькоомного заземлення нейтралі.

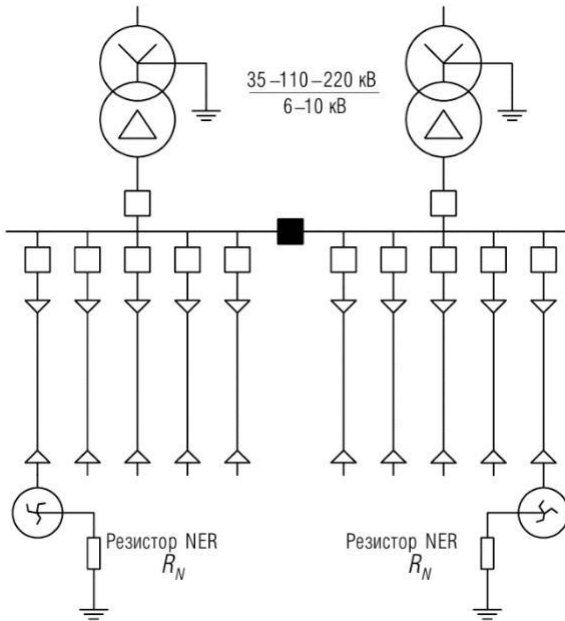


Рисунок 3.3 –
Знижувальна під-
станція із зазем-
леною через резис-
тор нейтралю на
стороні 6-10 кВ

При низькоомному заземленні нейтралі використовується резистор, що забезпечує протікання у випадку однофазного замикання струм в межах 10-2000 А. Величина струму вибирається виходячи з декількох конкретних умов: стійкість опор ПЛ, оболонки і екранів кабелів до протікання такого струму однофазного замикання; наявність в мережі високовольтих електродвигунів і генераторів; чутливість релейного захисту.

Відсутність дугових перенапруг при однофазних замиканнях і можливість організації селективного релейного захисту є незаперечними перевагами режиму резистивного заземлення

нейтралі. Саме ці переваги сприяли значному поширенню такого режиму заземлення нейтралі в різних країнах.

Перевагами резистивного заземлення нейтралі є:

- відсутність дугових перенапруг високої кратності і багатократних ушкоджень в мережі, ферорезонансних процесів;
- відсутність необхідності у відключенні першого однофазного замикання на землю (тільки для високоомного заземлення нейтралі);
- зменшення ймовірності ураження персоналу і сторонніх осіб при однофазному замиканні (тільки для низькоомного заземлення та швидкого селективного відключення пошкодження);
- практично повне виключення можливості переходу однофазного замикання в багатозаземлене (тільки для низькоомного заземлення);
- просте виконання чутливого і селективного релейного захисту від однофазних замикань на землю, заснованого на струмовому принципі.

Недоліками резистивного режиму заземлення нейтралі є:

- збільшення струму в місці пошкодження;
- необхідність у відключенні однофазних замикань (тільки для низькоомного заземлення);
- обмеження на розвиток мережі (тільки для високоомного заземлення).

Ще одним варіантом режиму нейтралі в мережах 6-35 кВ може бути її комбіноване заземлення за допомогою дугасильного реактора та паралельно приєднаного високоомного резистора, рис. 3.4. Проведений аналіз показав, що дане технічне рішення має ряд переваг в порівнянні з компенсованою нейтраллю:

- зниження рівня перенапруг при дугових однофазних замиканнях у випадку неточної компенсації ємнісного струму замикання на землю;
- виключення зверхнормативного зміщення нейтралі в нормальному режимі мережі;

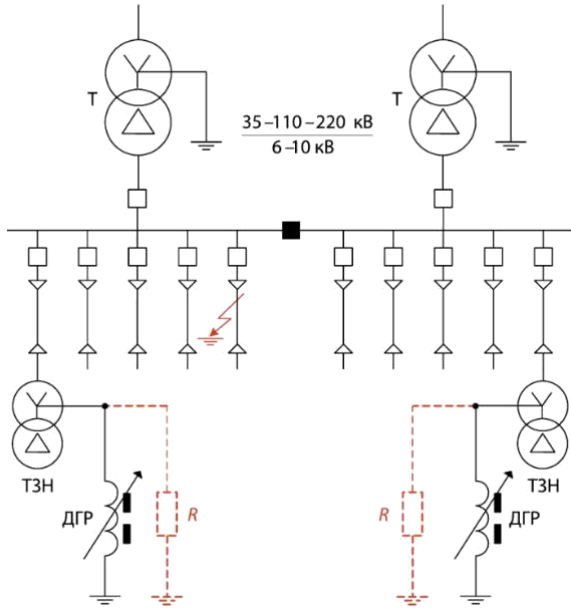


Рисунок 3.4 – Знижувальна підстанція з комбінованим заземленням нейтралі на стороні 6-10 кВ

- організація відносно простого, чутливого та селективного релейного захисту для визначення пошкодженого приєднання.

Перенапруги при дугових однофазних замиканнях на землю за такого режиму заземлення нейтралі розраховуються за виразом [2]

$$U_{\text{max}} = 1,2 \phi$$

де ϕ – фаза напруги мережі;
 U_{max} – максимальна амплітуда напруги на нейтралі, допустимо прийняти ;

d – коефіцієнт демпфування, який залежить від активної провідності реактора та мережі, для існуючих мереж та реакторів приймають $d \approx 0,05$;

ν – ступінь розладу компенсації ємнісного струму замикання на землю;

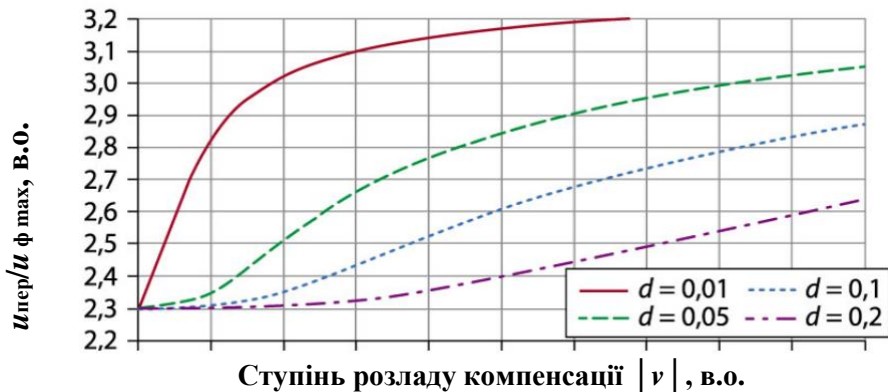
– коефіцієнт зниження амплітуди вільних коливань за половину періоду перехідного процесу накопичення надлишкових зарядів на ємностях непошкоджених фаз при

– коефіцієнт, що запалюванні дуги (приймається $= 0,05 - 0,10$);

визначає вплив міжфазних ємностей на початкові напруги на непошкоджених фазах при запалюванні дуги ($0,1 - 0,2$).

рахунок вмикання паралельно до реактора високоомного резистора коефіцієнт демпфування може бути збільшений до 20 разів. На рис. 3.5 наведено побудовані за виразом (3.1) залежності перенапруг при дугових замиканнях на землю від ступеня розладу компенсації ν за різних значень коефіцієнта демпфування.

Рисунок 3.5 – Залежність перенапруг при дугових замиканнях



на землю від ступеня розладу компенсації ν за різних значень коефіцієнта демпфування d

Як видно, комбіноване заземлення нейтралі дозволяє суттєво знизити рівень перенапруг у випадку неточної компенсації ємнісного струму.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1 Розрахунок розподілення струмів в електричних мережах 6-35 кВ для різних режимів роботи нейтралі

4.1.1 Розрахунок ємностей та ємнісних опорів між фазами ліній та фаз відносно землі в кабельній електричній мережі

За вихідними даними, які наведені в табл. 4.1, провести розрахунок ємностей та ємнісних опорів між фазами ліній та фаз відносно землі в кабельній електричній мережі, схема якої

наведена на рис. 4.1. В розрахунок $\epsilon = 0,2 \text{ мксФ/примитивим}$ питомо ємність фаз

кабелів $\epsilon = \text{відносно } 0,1 \text{ мксФ/сек.м.л. } C$

, питомі міжфазні ємності

C

Ємність фаз відносно землі та міжфазні ємності i -ої лінії

$$C_A^{(i)} = C_B^{(i)} = C_C^{(i)} = C_0 \cdot l^{(i)}, \quad (4.1)$$

$$C_{ABM}^{(i)} = C_{BCM}^{(i)} = C_{CAM}^{(i)} = C_{0M} \cdot l^{(i)}, \quad (4.2)$$

де $l^{(i)}$ – довжина i -ої лінії, км.

Ємнісні опори фаз i -ої лінії відносно землі для промислової частоти 50 Гц

$$X^{(0)} = X_A^{(0)} = X_B^{(0)} = X_C^{(0)} = \frac{1}{C}, \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

Міжфазні ємнісні опори i -ої лінії

$$X^{(i)} = X_A^{(i)} = X_B^{(i)} = X_C^{(i)} = \frac{1}{C_1}, \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунків та моделювання

Номер бригади	Номер варіанта	Клас напруги мережі U , кВ	Номер пошкодженої лінії	Пошкоджена фаза	Довжина лінії, км		
					№1	№2	№3
1	1	6	№1	A	2	1	4
	2	6	№2	A	4	2	8
	3	6	№3	A	6	3	12
	4	6	№1	B	8	4	16
2	5	6	№2	B	10	5	20
	6	6	№3	B	12	6	24
	7	6	№1	C	14	7	28
	8	6	№2	C	16	8	32
3	9	10	№1	A	18	9	36
	10	10	№2	A	20	10	40
	11	10	№3	A	22	11	44
	12	10	№1	B	24	12	48
4	13	10	№2	B	26	13	52
	14	10	№3	B	28	14	56
	15	10	№1	C	30	15	60
	16	10	№2	C	32	16	64
5	17	35	№1	A	34	17	68
	18	35	№2	A	36	18	72
	19	35	№3	A	38	19	76
	20	35	№1	B	40	20	80
6	21	35	№2	B	42	21	84
	22	35	№3	B	44	22	88
	23	35	№1	C	46	23	92
	24	35	№2	C	48	24	96
7	25	6	№1	A	18	9	36
	26	6	№2	A	20	10	40
	27	6	№3	A	22	11	44
	28	6	№1	B	24	12	48

Рисунок 4.1 – Схема розподільної мережі

Результати розрахунку занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку ємностей та ємнісних опорів між фазами ліній та фаз відносно землі

Номер лінії	Ємність, мкФ,		Ємнісний опір, Ом,	
	фаз відносно землі	між фазами	фаз відносно землі	між фазами
1				
2				
3				

4.1.2 Нормальний режим в мережі з ізольованою нейтраллю

Провести розрахунок розподілення струмів в мережі в нормальному режимі. В розрахунках прийняті такі спрощення:

- режим навантаження мережі – неробочий хід (струмами неробочого ходу споживчих ТП 10/0,4 кВ знехтувано);
- вплив поздовжніх параметрів схеми заміщення ліній та їх активної поперечної провідності, а також параметрів схеми заміщення силового трансформатора $T1$ та заземлювального трансформатора $T2$ на електричні процеси в мережі не враховуємо.

Схема заміщення для кожної з ліній в цьому режимі наведена на рис. 4.2.

Струм, що стікає на землю з фаз i -ої лінії у цьому режимі

$$I_A(i) = I_B(i) = I_C(i) = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X}, \text{ А,} \quad (4.5)$$

X

де U – клас напруги мережі, В.

$$I_{A M(i)} = I_{B M(i)} = I_{C M(i)} = \sqrt{3} X_{M(i)}, A. \quad (4.6)$$

Струм, що зумовлений ємністю між фазами i -ої лінії

Сумарний ємнісний струм i -ої лінії $I_{A M(i)}, A.$

$I_{A M(i)}$

$I_{A M(i)}$

$$I_{A M(i)} = I_{B M(i)} = I_{C M(i)} = I_{A M(i)} \quad (4.7)$$

Результати розрахунку занести до табл. 4.3.

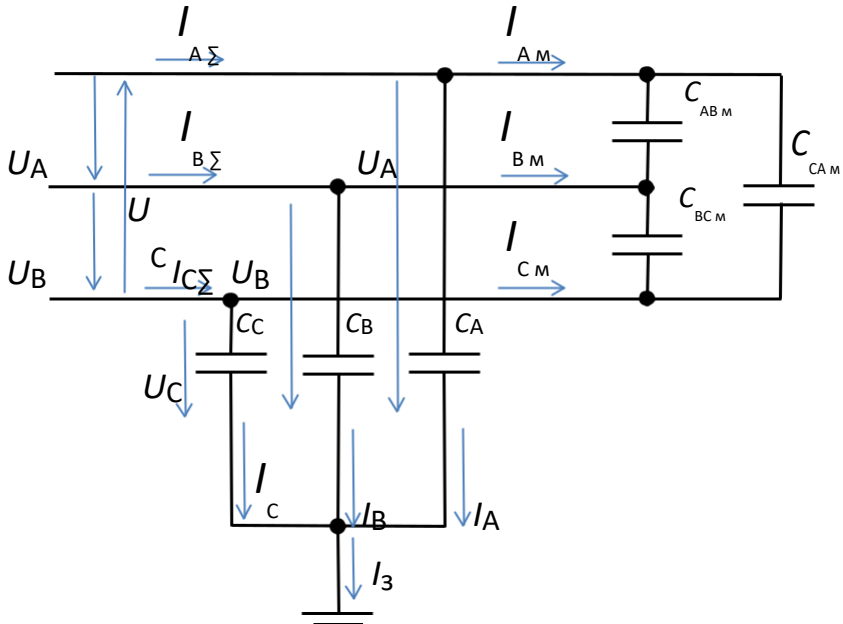


Рисунок 4.2 – Схема розміщення лінії в нормальному режимі

Векторна діаграма напруг та струмів для нормального режиму мережі наведена на рис. 4.3. Струми, що стікають на землю (I_A, I_B, I_C), є однаковими за величиною, але зсунуті один відносно одного на кут 120° , тому струм в землі не протікає.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку ємнісних струмів ліній нормального режимі

Номер лінії	Ємнісний струм, А,		
	що стікає з фаз на землю	зумовлений ємністю між фазами	сумарний ємнісний струм лінії
1			
2			
3			

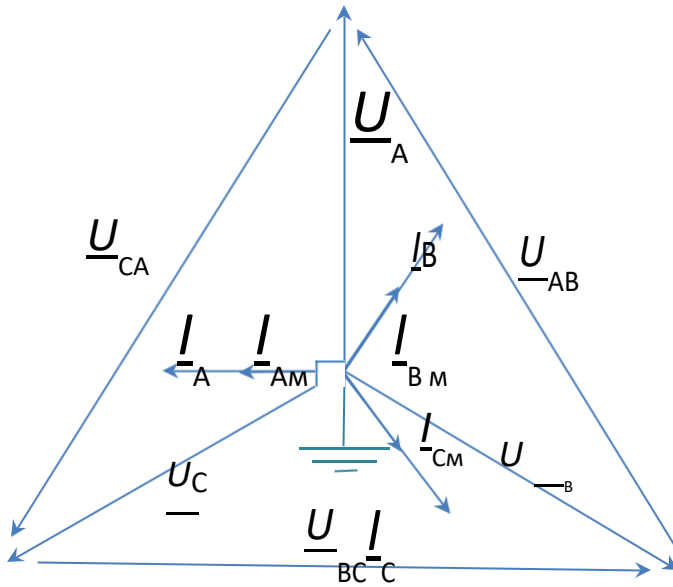


Рисунок 4.3 – Векторна діаграма напруг та струмів для нормального режиму мережі

4.1.3 Режим замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

Провести розрахунок розподілення струмів в мережі в режимі замикання на землю вказаної у вихідних даних фази мережі на вказаній лінії. Прийняти, що перехідний опір в місці замикання на землю рівний нулю. Схема заміщення лінії для випадку замикання на землю фази «С» наведена на рис. 4.4, а векторна діаграма напруг та струмів на рис. 4.5.

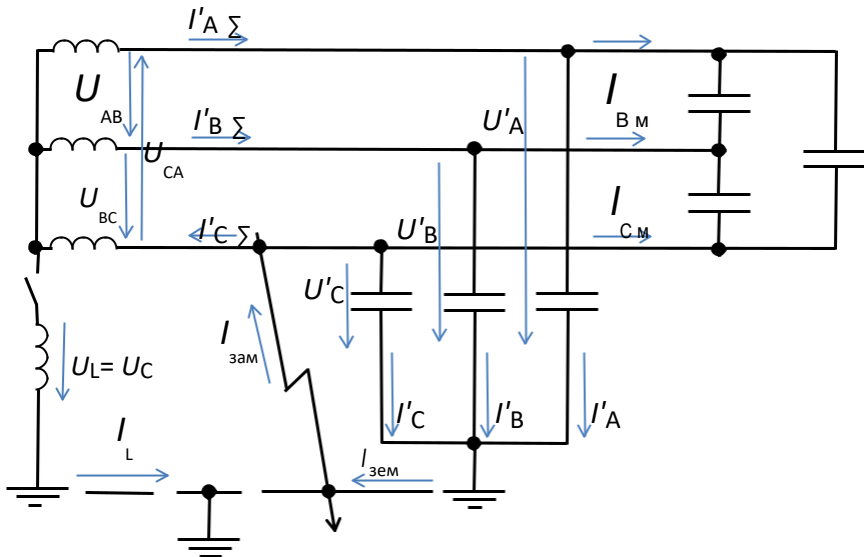


Рисунок 4.4 – Схема заміщення лінії в режимі замикання фази «С» на землю

В такому режимі потенціал відносно землі пошкодженої фази «С» $U'_C = 0$, отже і струм, який стікає з фази «С» на землю в цьому режимі

$$I_{C(i)'} = 0.$$

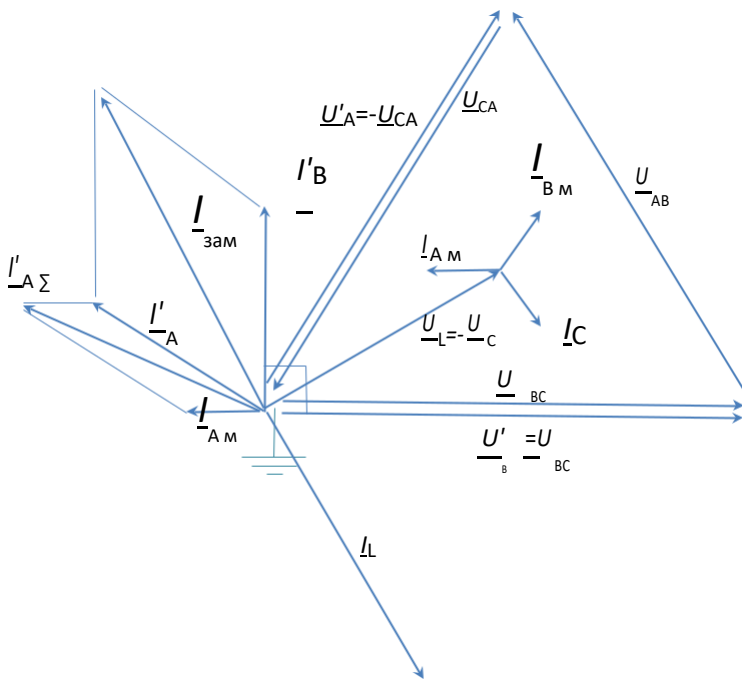


Рисунок 4.5 – Векторна діаграма напруг та струмів в режимі замикання фази «С» на землю

Потенціал непошкоджених фаз «А» та «В» відносно землі збільшується в $\sqrt{3}$ разів, тому і ємнісні струми «фаза-земля» цих фаз також

$$I_{A(i)'} = I_{B(i)'} = I_{A(i)} \sqrt{3}, \text{ А.} \quad (4.8)$$

Струми, що обумовлені міжфазною ємністю, в режимі замикання фази на землю не змінюються і відповідатимуть струмам нормального режиму $I_{A M}^{(i)'} = I_{A M}^{(i)}$, $I_{B M}^{(i)'} = I_{B M}^{(i)}$, $I_{C M}^{(i)'} = I_{C M}^{(i)}$.

Струми, що виникають в землі, визначаються за результатами складання векторів струмів $I_{A}^{(i)'}$ та $I_{B}^{(i)'}$ (рис. 4.5)

$$I_{\text{зем}} = 3 \cdot I_A, \text{ A.}$$

$$I^{(0)} = I^{(1)} + I^{(2)} + I^{(3)}, \text{ A.} \quad (4.9)$$

Струм, що виникає в точці замикання на пошкодженій лінії залежить від кількості ввімкнених на даний момент ліній. Найменшим він буде у випадку вмикання лише пошкодженої лінії, а найбільшим – у випадку вмикання всіх ліній, коли до точки пошкодження підтікатимуть струми від інших ліній.

Величина струму в точці замикання для випадку вмикання всіх ліній

$$I_{\text{зем}} = I_{\text{зем}}^{(1)} + I_{\text{зем}}^{(2)} + I_{\text{зем}}^{(3)}, \text{ A.}$$

$$I^{(1,2,3)} = I^{(1)} + I^{(2)} + I^{(3)}, \text{ A.} \quad (4.10)$$

Сумарні емнісні струми на пошкодженій *i*-ій лінії, коли всі інші лінії також ввімкнені, з урахуванням кутів між векторами струмів та співвідношення фазних та міжфазних емностей складуть (див. рис. 4.4, 4.5):

- для непошкоджених фаз

The diagram shows a horizontal line representing a phase. Above the line, the total current $I^{(i)}$ is shown as a vector. Below the line, it is decomposed into two components: $I^{(i)2}$ (the component due to other phases) and $I^{(i)}$ (the component due to the faulted phase). The angle between $I^{(i)}$ and $I^{(i)2}$ is labeled as 30° . The diagram also shows the current $I^{(i)1}$ flowing towards the fault point.

$$I^{(i)'} = I^{(i)2} + I^{(i)}, \text{ A.} \quad (4.11)$$

- для пошкодженої фази

$$I^{(i)'} = I^{(1,2,3)} + I^{(i)}, \text{ A.} \quad (4.12)$$

Перевірку максимального струму замикання на землю в мережі можна провести за відомим виразом

$$I_{(1,2,3)\Sigma} \approx I_{(1,2,3)} \quad (4.13)$$

зам пер = ≈ зам ,

де U – номінальна напруга мережі, кВ;

l_{Σ} – сумарна довжина приєднань мережі, $l_{\Sigma} = l^{(1)} + l^{(2)} + l^{(3)}$, км;

μ – коефіцієнт, який залежить від виду ліній, для кабельних ліній $\mu \approx 10$.

4.1.4 Режим замикання на землю в мережі з заземленням нейтралі через дугогасний реактор

Провести розрахунок розподілення струмів в мережі з компенсованою нейтраллю (див. рис. 4.4, 4.5) в режимі замикання на землю вказаної у вихідних даних фази мережі на вказаній лінії.

Розрахункова величина індуктивного опору та індуктивності реактора

$$= \sqrt{3} z_{\text{зам}(1,2,3)} \text{ , Ом;} \quad (4.15)$$

$$\underline{-l} \quad (4.14)$$

$$V_{\text{зам}} = 0, \quad = \text{ , Гн.}$$

При повній компенсації струм в точці замикання на землю що відображено на векторній діаграмі рис. 4.5. Струм нейтралі трансформатора

$$I_{\text{нейтр}} = I_{(1,2,3)} \text{ , А.} \quad (4.16)$$

нейтр = зам

4.1.5 Режим замикання на землю в мережі з резистивним високоомним заземленням нейтралі

Провести розрахунок розподілення струмів в мережі з резистивним високоомним заземленням нейтралі в режимі замикання на землю вказаної у вихідних даних фази мережі на вказаній лінії.

У випадку резистивного високоомного заземлення нейтралі опір резистора приймається таким, щоб створюваний ним активний струм був рівним або більшим від струму замикання на землю. Це гарантує відсутність дугових перенапруг при однофазних замиканнях.

Розрахункова величина високоомного опору

$$R = \frac{U_{\text{ном}}(1,2,3)}{I_{\text{зам}}} \text{ , Ом.} \quad (4.17)$$

Активний струм, який протікає в нейтралі реактора

$$I_{\text{нейтр}} = \sum_{\text{зам}} I_{(1,2,3)} \text{ , А} \quad (4.18)$$

За даного режиму нейтралі при замиканні фази на землю в точці замикання протікатиме струм, який є геометричною сумою векторів ємнісного струму замикання на землю активного струму в нейтралі реактора

$$I_{\text{зам}} \Sigma = \sqrt{I_{(1,2,3)}^2 + I^2} \quad (4.19)$$

4.1.6 Режим замикання на землю в мережі з резистивним низькоомним заземленням нейтралі

У випадку резистивного низькоомного заземлення нейтралі величина струму, створюваного резистором, вибирається виходячи з конкретних умов лінії. У якості допустимого струму однофазного замикання на землю може бути прийнято значення $I = 600 \text{ А}$. Розрахункова величина опору

$$R = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{зам доп}}} \text{ , Ом.}$$

В режимі замикання на землю в такій мережі струм в точці замикання визначається аналогічно до випадку мережі з високоомним заземленням нейтралі. Після виникнення даного режиму живлення пошкодженої лінії вимикається від максимального струмового захисту нульової послідовності.

Результати заносяться в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати теоретичних розрахунків для оригіналу мережі

Режим роботи мережі	Струми в лінії № , що розглядається, А,									трансформатора, Струм в нейтралі ^А пошкодження, Струм в точці А
	зумовлені ємністю фаз відносно землі			зумовлені ємністю між фазами			сумарні			
	для фази									
	А	В	С	А	В	С	А	В	С	
Нормальний (ізольована нейтраль)										
ізольована	ізольована									
	заземлена через реактор									
	високоомне зазем-									

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 6 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101-104.

2. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006.

3. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. – 2010. – №2. – С. 36–43.

4. Половой И. Ф. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения / И. Ф. Половой, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 152 с.

5. Качесов В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Электрические станции. – 2002. – № 8. – С. 38–45.

6. Анализ эффективности существующих режимов нейтрали сетей 6–35 кВ в энергетике / Б. С. Стогний, В. В. Масляник, В. В. Назаров [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 3. – С. 37–41.

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи «Розрахунок та аналіз розподілення
ємнісних струмів в сільських розподільних мережах 6-35 кВ»

Автори-укладачі:
САВЧЕНКО Олександр Анатолійович
ПОПАДЧЕНКО Світлана Анатоліївна

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman Папір для цифрового друку. Друк
ризографічний. Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.
Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

