

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Вибір оптимальної схеми заземлення нейтралі
для забезпечення надійної роботи обладнання в
електричних мережах”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
_____Куцоконь М.Р.
« ____ » _____2024р.
Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Андрій КОТИШ
« ____ » _____2024р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Будівництва транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Куцоконю Микиті Романовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Вибір оптимальної схеми заземлення нейтралі для забезпечення надійної роботи обладнання в електричних мережах

Selection of the optimal neutral grounding scheme to ensure reliable operation of equipment in electrical networks

2. Керівник роботи (проекту)

Котили Андрій Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Вступ; 1.Надійність роботи обладнання та електричних розподільних мереж; 2.Режими заземлення нейтралі в розподільних електричних мережах; 3.Ефективність застосування резистивного та комбінованого заземлення нейтралі в електричних мережах 10-35 кВ; 4.Охорона праці; Висновки; Перелік посилань.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Іван САВЕЛЕНКО</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Надійність роботи обладнання та електричних розподільних мереж</i>	<i>12.10.24.</i>	
3	<i>Режими заземлення нейтралі в розподільних електричних мережах</i>	<i>16.10.24</i>	
4	<i>Ефективність застосування резистивного та комбінованого заземлення нейтралі в електричних мережах 10-35 кВ</i>	<i>20.10.24.</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>20.11.24</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>29.11.24.</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 87 с.; 32 рис.; 2 табл.; 18 джерел.

Куцоконь М.Р. Вибір оптимальної схеми заземлення нейтралі для забезпечення надійної роботи обладнання в електричних мережах. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2024 р.

Мета кваліфікаційної роботи: Підвищення надійності розподільних електричних мереж напругою 10 – 35 кВ шляхом правильного вибору режиму роботи нейтралі.

У магістерській роботі досліджено та проаналізовано різні типи заземлення нейтралі розподільних мереж. В результаті дослідження були виявлені переваги та недоліки кожного типу.

На основі детального вивчення перехідних процесів, що виникають в електромережі при замиканнях на землю, було запропоновано використовувати резистивне або комбіноване заземлення в розподільчих мережах напругою від 10 до 35 кВ. Цей захід не тільки підвищить надійність обладнання в розподільчих мережах, але й дозволить реалізувати ефективний релейний захист від замикань на землю.

Отримані результати кваліфікаційної роботи планується використати у ПрАТ Кіровоградобленерго при плануванні заходів по підвищенню надійності роботи розподільних мереж.

Ключові слова: режим заземлення нейтралі, розподільна мережа, надійність електропостачання, активний опір, однофазне замикання на землю, електрична дуга, релейний захист, компенсація.

SUMMARY

Kutsokon M.R. Selection of the optimal neutral grounding scheme to ensure reliable operation of equipment in electrical networks. 141 "Electric power, electrical

engineering and electromechanics" EPP, "Electrical power consumption systems". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2024.

In the master's thesis, various types of neutral grounding of distribution networks were investigated and analyzed. As a result of the study, the advantages and disadvantages of each type were revealed.

Based on a detailed study of the transient processes that occur in the power grid during ground faults, it was proposed to use resistive or combined grounding in distribution networks with a voltage from 10 to 35 kV. This measure will not only increase the reliability of equipment in distribution networks, but will also allow the implementation of effective relay protection against earth faults.

The obtained results of the qualification work are planned to be used at PrJSC Kirovohradoblenergo in planning measures to increase the reliability of distribution networks.

Key words: neutral grounding mode, distribution network, power supply reliability, active resistance, single-phase ground fault, electric arc, relay protection, compensation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	9
1.1 Основні поняття про надійність розподільних мереж.....	9
1.2. Загальний аналіз надійності елементів систем електропостачання.....	11
1.3. Причинно-наслідкові зв'язки пов'язані з відмовами в розподільних електричних мережах.....	15
1.4. Захист від однофазних замикань на землю (ОЗЗ).....	19
2. РЕЖИМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	26
2.1. Електричні мережі з ізолюованою нейтраллю.....	27
2.2. Електричні мережі із компенсованою нейтраллю.....	35
2.3. Електричні мережі із резистивним заземленням нейтралі.....	41
3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗИСТИВНОГО ТА КОМБІНОВАНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 10-35 КВ.....	47
3.1. Електричні мережі із резистивним заземленням нейтралі в нормальному режимі роботи та при стійкому замиканні фази на землю.....	47
3.2. Вплив заземлення нейтралі через резистор на величину перенапруг в електричній мережі.....	52
3.3. Електричні мережі із комбінованим заземленням нейтралі.....	62
3.4. Практика застосування резистивного та комбінованого заземлення в електричних мережах напругою 10 – 35 кВ.....	66
3.4.1. закордонний досвід.....	67
3.4.2. вітчизняний досвід.....	72
3.4.3. схеми включення резисторів в нейтраль електричної мережі.....	75

3.4.4. комбіноване заземлення нейтралі мережі.....	76
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	79
4.1. Основні види робіт при заземленні електроустановок.....	79
4.2. Розрахунок заземлення електроустановки.....	80
ВИСНОВКИ.....	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	87

ВСТУП

Питання надійності електростанцій, підстанцій, ліній електропередач, мереж та систем є одним з найпріоритетніших в енергетиці. У деяких енергосистемах кількість аварій на рік сягає десятків, а річний обсяг недовідпущеної споживачам електроенергії через аварії - мільйонів кіловат-годин. Сумарна потужність генераторів, які одночасно виведені в аварійний ремонт, сягає мільйонів кіловат. Такі високі показники аварійності в енергосистемі роблять першочерговим завданням оцінку надійності окремих видів обладнання та споруд і пошук шляхів підвищення їх надійності як під час експлуатації, так і при проектуванні.

З іншого боку, збитки споживачів від відключень електроенергії, вартість аварійних ремонтів та витрати на підвищення надійності можуть бути оцінені для визначення оптимального рівня надійності енергетичних об'єктів, обладнання та систем.

З розвитком нових енергетичних технологій питання надійності стали одними з найважливіших. При введенні в експлуатацію нових енергетичних об'єктів, таких як атомні електростанції та лінії електропередач надвисокої напруги, як відомо, виявляються та усуваються причини ненадійної роботи обладнання та споруд. Більшість з цих причин можна пояснити недоліками при розробці проекту, коли не було приділено достатньої уваги аналізу та оцінці надійності.

Тому в цій роботі основна увага приділяється саме цьому питанню. А саме, мета роботи може бути сформульована наступним чином - «підвищення надійності розподільчої мережі 6-35 кВ». Для вирішення цієї проблеми були розглянуті наступні питання

- Надійність обладнання в розподільчій мережі, аналіз причин та наслідків пошкоджень;
- Детальне дослідження режимів заземлення нейтралі в розподільчій мережі, виявлення переваг та недоліків кожного з них;

- Дослідження процесів, що відбуваються при замиканнях на землю в розподільчих мережах з різними типами заземлення;
- Детальне дослідження ефективності резистивного та комбінованого заземлення; огляд зарубіжного та вітчизняного досвіду.

РОЗДІЛ 1. НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

1.1 Основні поняття про надійність розподільних мереж

Надійність електропостачання - це здатність системи електропостачання постачати споживачам електроенергію необхідної кількості та якості. Поточний рівень надійності електропостачання споживачів залежить від чотирьох взаємопов'язаних факторів

- Конструкція електричної мережі (ступінь резервування)
- Надійність елементів електричної мережі
- Оснащення електромережі пристроями керування.
- Організація експлуатації.

Теорія надійності є науковою основою діяльності підприємств, проектних, науково-дослідних, дослідно-конструкторських та експлуатаційних підрозділів, лабораторій, бюро та груп надійності.

Практичні питання, пов'язані з проблемами надійності в енергетиці, включають статистичну оцінку та аналіз надійності існуючого обладнання та об'єктів, прогнозування надійності обладнання та об'єктів, стандартизацію рівнів надійності, випробування на надійність, розрахунок та аналіз надійності, забезпечення необхідних рівнів надійності, а також проектування, розробку та експлуатацію енергетичного обладнання, об'єктів та систем. Сюди входить оптимізація технічних рішень для забезпечення надійності.

Чинна нормативна база з питань надійності в Україні базується на ДСТУ 2860.94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». Основні положення цього документу відповідають ГОСТу, прийнятому в СРСР.

ГОСТ 27.002-83 визначає надійність як «властивість об'єкта зберігати у встановлених межах і протягом тривалого часу значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати задані функції при заданих

режимах і умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування».

В існуючих моделях надійності широко використовуються поняття «система» і «елемент». Об'єкт, надійність якого розглядається виключно в силу його функціональної ролі і положення в об'єкті або системі, незалежно від надійності його складових, називається елементом. Сукупність взаємозалежних елементів або об'єктів, призначених для виконання певного циклу завдань, з централізованим управлінням функціонуванням і розвитком, називається системою.

Обладнання в енергосистемі є, з одного боку, елементом відповідної системи або підсистеми, а з іншого - виробом, тобто об'єктом, надійність якого розглядається відповідно до технічних умов і Держстандартів на даний вид продукції, незалежно від його ролі в системі. Виробами є всі машини, прилади та інше обладнання, що поставляється виробником.

Тяжкість аварії залежить від тривалості роботи обладнання та способу відновлення. У деяких установках, наприклад, на допоміжних електростанціях атомних електростанцій, навіть короточасне падіння напруги під час короткого замикання може призвести до виходу з ладу механізму. Відключення пошкоджених ділянок мережі релейним захистом не може відновити працездатність механізму, навіть якщо є джерело живлення, що працює в постійно увімкненому режимі очікування. У більшості установок таке падіння напруги не є несправністю, а випадкові пошкодження оцінюються тільки для відключеного споживача.

Робота обладнання відновлюється шляхом відключення пошкоджених елементів за допомогою релейного захисту, пристроїв протиаварійної автоматики (АПВ та АВР), оперативних перемикачів, що виконуються черговим персоналом, диспетчерами мережі або енергосистеми, а також аварійних ремонтів.

Частота, тривалість і глибина інцидентів в енергосистемах значною мірою визначаються наявністю планових і позапланових відключень

електроенергії та зупинок обладнання, які знижують ступінь резервування об'єктів.

Планові зупинки здійснюються згідно з графіком поточних і капітальних ремонтів, який коригується залежно від того, чи сталася аварія напередодні планової зупинки, чи ні.

Позапланові зупинки здійснюються при таненні льоду, усуненні виявлених несправностей, досягненні небезпечних режимів роботи або граничних режимів.

Виникнення таких інцидентів в енергосистемах більшості розвинених країн ілюструє важливість питань надійності на етапі розвитку енергетичного сектору. Особливо гостро постають проблеми забезпечення життєздатності енергосистеми, керованості обладнання, безпеки обладнання та безперебійного електропостачання споживачів.

1.2. Загальний аналіз надійності елементів систем електропостачання

Лінії електропередач є найменш надійним елементом системи електропостачання (СЕП). Наприклад, у міських мережах на лінії електропередач припадає близько 85,0% відключень електроенергії. У сільських мережах цей показник сягає 90-95% [1].

Основні причини ушкоджень повітряних ліній (ПЛ):

- грозові (атмосферні) перекриття ізоляції;
- гололідно - паморозеві відкладення;
- навантаження проводів від вітру;
- танок і вібрація проводів;
- займання дерев'яних опор;
- ослаблення механічної міцності різних деталей опор й арматури;
- пошкодження опор та проводів сторонніми механізмами автотранспортом і та ін.

Зовнішні впливи можуть спричинити перекриття ізоляції, пошкодження ізоляції, розплавлення металевих частин, обриви дротів, втрату механічної міцності під час вібрації, «танці» через обриви окремих дротів, пошкодження компонентів і падіння стійок з дротами. Найсерйозніші наслідки спричиняють навантаження від холодного вітру.

Нормальній роботі повітряних ліній електропередач може перешкоджати низка факторів:

- Перевищення фактичних зовнішніх навантажень над розрахунковими значеннями;
- Дефекти при виготовленні опор та ізоляційних проводів (наприклад, використання неякісного цементу або металу, неспіввісність арматури в залізобетонних виробках, неякісна деревина, просочена консервантами, неякісне з'єднання проводів при виготовленні електричних кабелів).
- Невідповідне використання проводів, розпірок та ізоляторів відповідно до природи та клімату країни;
- Використання глухих затискачів замість затискачів з низькою міцністю ущільнення;
- Порушення правил прокладання та будівництва повітряних ліній електропередач (наприклад, неправильний демонтаж залізобетонних опор, недостатнє заглиблення опор під час прокладання, намотування проводів вздовж поперечних балок опор, неправильне встановлення стрілок відхилення)
- порушення під час введення лінії в експлуатацію (непроведення ревізії дефектних ізоляторів та термічних зварних з'єднань, невідповідність типу використаної продукції зазначеному в проекті);
- експлуатаційні недоліки (недотримання термінів, обсягів та складу оглядів ПЛ, вимірювань, заміни несправного обладнання, капітального ремонту, фарбування, підтяжок та інших робіт);

- Порухення з боку сторонніх організацій або осіб (зіткнення зі стовпами, проїзд великогабаритної техніки під повітряними лініями, перекриття).

Основною причиною пошкодження кабельних ліній (КЛ) є порушення їх механічної міцності будівельними машинами та механізмами під час проведення земляних робіт. З цієї причини близько 60-70% пошкоджень кабельних ліній відбувається в міських електромережах. Серед інших причин - старіння міжфазної та поясної ізоляції, сильна корозія (електрична та хімічна) оболонки, перевантаження кабелю, проникнення вологи в кабель та пошкодження ізоляції гризунами.

Пошкодження повітряних кабелів залежать від способу прокладки повітряного кабелю (під землею, в блоці, трубі або тунелі), перепаду горизонтального рівня перерізу повітряного кабелю (великі перепади викликають розширення масла і висихання ізоляції), агресивності навколишнього середовища, величини блукаючих струмів і передбаченого захисту від них, інтенсивності будівництва в районі прокладки повітряного кабелю, терміну служби років, залежно від режиму експлуатації.

Електричні пошкодження зазвичай виникають в місцях встановлення з'єднувачів, на кінцевих обривах і у вертикальних ділянках кабелю, а не по всьому кабелю.

Трансформатори пошкоджуються набагато рідше, ніж лінії електропередач, але пошкодження трансформаторів мають серйозні наслідки і потребують тривалого часу для відновлення.

Основними причинами пошкодження трансформаторів є

- Пошкодження ізоляції обмоток трансформатора через конструктивні та виробничі дефекти, зовнішні перенапруги в мережі та струми короткого замикання;
- Пошкодження вимикачів (переважно управління навантаженням) через конструктивні та виробничі дефекти;

- Пошкодження вводів, переважно через зовнішні перенапруги в мережі (перекриття зовнішньої або внутрішньої ізоляції, механічні пошкодження, погана якість контактних з'єднань).

Великі трансформатори ремонтуються на місці. Такий ремонт вимагає демонтажу осердя трансформатора і використання вантажопідійомної техніки, що може зайняти кілька днів.

6... 20 кВ малі трансформатори інтенсивно ремонтуються в майстернях електропередавальних компаній. Пошкоджені трансформатори замінюються на інший, готовий до експлуатації.

Основними шляхами підвищення надійності роботи трансформаторів є

- Ретельне введення в експлуатацію з контрольними випробуваннями.
- Періодичні огляди та перевірки в процесі експлуатації відповідно до встановлених термінів та діапазонів випробувань;
- дотримання режиму роботи трансформатора, що не допускає тривалих перевантажень
- Встановлення в мережі пристроїв захисту від короткого замикання та перенапруги.

Відмови комутаційної апаратури (вимикачів, роз'єднувачів, автоматичних вимикачів і роз'єднувачів) відбуваються при коротких замиканнях, під час різних операцій і в стаціонарному стані.

Основними причинами пошкоджень КРП є механічні пошкодження, пов'язані з недосконалістю конструкції, технології виготовлення або порушенням правил експлуатації. Електричні пошкодження КРП виникають внаслідок перекриття ізоляції під дією зовнішніх або внутрішніх перенапруг, а також внаслідок пробоя внутрішньої ізоляції КРП.

Значна кількість лінійних роз'єднувачів 6-10 кВ була пошкоджена через недосконалу конструкцію [2].

1.3. Причинно-наслідкові зв'язки, пов'язані з відмовами в розподільних електричних мережах

Відмова - одне з основних понять теорії надійності. Поняття повної та часткової відмови відображають той факт, що система електропостачання (СЕП) та її компоненти є об'єктами з різним рівнем працездатності. Наприклад, при пошкодженні сегментованої лінії електропередачі буде відключена лише частина лінії, що означає часткову відмову лінії електропередачі. Обмежене постачання електроенергії низької якості є частковою відмовою системи передачі, на відміну від повного відключення, коли споживач повністю втрачає електроенергію.

Давайте класифікувати несправності.

За тривалістю розрізняють такі перебої в електропостачанні

- Тривалі перерви в електропостачанні споживачів (до декількох діб), як правило, пов'язані з усуненням серйозних пошкоджень системи електропередачі, спричинених ожеледицею або вітром на опорах або лініях електропередачі;

- Перерва в електропостачанні споживачів на час, необхідний для відновлення експлуатаційної готовності системи передачі, що вийшла з ладу (4-24 години);

- час (1,5-6 годин), необхідний оперативній бригаді електропередавальної організації для ручного включення резервного джерела живлення;

- перерва в електропостачанні на час, необхідний для оперативного перемикавання черговим персоналом підстанції (кілька хвилин);

- короточасні перерви в електропостачанні споживачів (кілька секунд) під час автоматичного введення резервного живлення або автоматичного відключення пошкоджених ділянок мережі.

З точки зору інформування, можливі наступні відмови.

- Раптові, коли споживач не отримав жодної інформації про відключення; або
- незаплановані відключення, коли споживач отримує інформацію незадовго до відключення; та
- Планові відключення, коли споживач отримує попереднє попередження.

Наслідки аварії включають будь-яке явище, процес або подію, що відбуваються після аварії та безпосередньо пов'язані з нею (наприклад, зупинка двигуна, розморожування холодильника). Наслідки відмови також можуть бути ознакою відмови.

Для об'єктів енергетики основним нормативно-технічним документом, що встановлює критерії відмови, є «Інструкція з розслідування та обліку аварій та інших порушень в роботі електростанцій, електричних і теплових мереж, енергосистем і енергетичних об'єднань». Згідно з цим документом, перерва в роботі енергетичного об'єкта вважається аварією, пошкодженням першого ступеня, пошкодженням другого ступеня або знеструмленням споживача, залежно від характеристик перерви, обсягу пошкодження та його наслідків.

Що таке аварія I категорії?

- невідповідність системи електропостачання вимогам ПУЕ, що призвело до перерви в електропостачанні від 0,5 до 2,5 години для одного або декількох споживачів I категорії або одного або декількох споживачів II категорії, від 2 до 10 годин для сільськогосподарських споживачів та від 8 до 24 годин для одного або декількох споживачів III категорії; або Порушення нормальної роботи електромережі, що мало місце;
- недовідпущення електричної енергії споживачам від 5 до 20 тис. кВт.год;
- пошкодження основних електроустановок електромережі, що потребують відновлення та ремонту у визначений термін;

- пошкодження повітряних ліній електропередачі 35 кВ та 110 кВ або кабельних ліній електропередачі, які потребують ремонту протягом 24 (36) годин.

До аварій II класу відносяться порушення нормальної роботи електричної мережі, такі як

- перерва в електропостачанні споживачів, не класифікована як інцидент класу I; пошкодження окремих видів обладнання;

- невиконання графіка електричних навантажень або оперативних завдань диспетчера; - невиконання графіка електричних навантажень або оперативних завдань диспетчера

- автоматичне або випадкове відключення обладнання персоналом;

- знеструмлення електромережі нижче 6 кВ.

Як зазначалося вище, розподільчі мережі напругою 10-35 кВ є традиційно ненадійними. Основною технічною причиною високої аварійності розподільчих мереж є те, що більшість з них є повітряними. Як такі, ці мережі зазнають пошкоджень від ураганного вітру, ожеледі та прямих ударів блискавки; пошкодження ліній електропередачі 10 кВ є найпоширенішою причиною відключень споживачів.

Однією з особливостей повітряних розподільчих мереж є відсутність автоматики після аварійних перемикачів. Аварійні перемикачання в основному виконуються вручну виїзними бригадами (ВБ), які працюють з територіально розподіленими розподільчими пристроями (РП) на великих відстанях. Таким чином, тривалість аварійного відключення розподільчих ліній залежить від конфігурації схеми та місця розташування розподільчого пристрою (з урахуванням можливості роботи розподільчого пристрою під навантаженням та з безперервним живленням схеми), місцевих умов експлуатації та обслуговування (наявність та стан доріг, природних перешкод тощо), а також вибору послідовності операцій, що виконуються оперативно-виїзною бригадою визначається як логікою управління процесом.

Основними типами пошкоджень розподільчих мереж є короткі замикання, обриви проводів, обриви контактів розподільчих пристроїв, обрив фази через перегорання запобіжників та замикання на землю, спричинені перекриттям, накладанням або пошкодженням ізоляції. Всі ці інциденти мають досить серйозні наслідки. У разі короткого замикання лінія від'єднується і припиняється подача електроенергії. Неповнофазний режим призводить до виходу з ладу електродвигуна і переривання технологічних процесів споживача. У разі замикання на землю існує ризик ураження електричним струмом людей і тварин, а перенапруга може призвести до пожежі.

Замикання на землю в розподільчих мережах 10-35 кВ є надзвичайно поширеним явищем і становлять щонайменше 75% усіх замикань. У мережах з ізольованою нейтраллю однофазні замикання на землю самі по собі не є аварійними. Однак зі збільшенням довжини мережі зростає потужність і збільшується струм замикання на землю. Коли струм протікає через місце замикання, виділяється багато тепла, що пошкоджує активні компоненти та ізоляцію. Однофазне замикання перетворюється на трифазне, і постачання електроенергії споживачеві переривається. Крім того, струм при однофазному замиканні багаторазово підвищує напругу неушкодженої фази відносно землі. Тривалий режим призводить до виникнення подвійного замикання на землю, що створює небезпечні потенціали в металевому корпусі обладнання та підвищену небезпеку для працівників, навіть якщо заземлювальне обладнання знаходиться в справному стані.

Причини однофазних замикань на землю в розподільних мережах різноманітні. Вони виникають внаслідок механічного пошкодження ізоляції, обриву проводу або кабелю, удару блискавки або пошкодження ізоляції, спричиненого внутрішніми перенапругами. До внутрішніх перенапруг відносяться комутаційні та резонансні перенапруги. Комутаційні перенапруги виникають внаслідок перехідних процесів і не можуть мати великих мультиплікаторів. Теоретична електротехніка показує, що, як

правило, комутаційне збільшення напруги і струму в лінійному ланцюзі не повинно перевищувати подвоєної амплітуди стаціонарного режиму. Що стосується резонансних перенапруг, то вони змінюються в широкому діапазоні і (теоретично) можуть досягати нескінченно великих значень. Перенапряга залежить від того, наскільки співвідношення активних, індуктивних і ємнісних елементів у даній мережі близьке до резонансного стану. Очевидно, що якщо в мережі відсутня індуктивність замикання на землю, то резонансні перенапруги не виникатимуть.

Резонансні перенапруги на землю в повітряних розподільних мережах 10-35 кВ з ізольованою нейтраллю виникають внаслідок утворення резонансного контуру індуктивності та ємності між фазами мережі та землею. Індуктивність вимірювального трансформатора напруги зазвичай присутня в мережі. Ємність в мережі присутня завжди, як між фазами, так і між фазою і землею. Згідно з дослідженнями, проведеними в розподільчих мережах 10 кВ [3,4], саме резонансна перенапряга призводить до виходу з ладу трансформаторів контролю ізоляції (трансформаторів напруги).

Пошкодження трансформаторів напруги (ТН) відбувається під час тривалих однофазних дугових замикань на землю внаслідок струмів у високовольтних (ВН) обмотках, що значно перевищують допустимий рівень термічного опору обмоток, або при збудженні субгармонійних ферорезонансних коливань (ФРК) в мережах з глухозаземленою нейтраллю і появою небезпечних струмів у ВН обмотках.

1.4. Захист від однофазних замикань на землю (ОЗЗ)

Ефективним засобом усунення замикання на землю є швидке автоматичне відключення ушкодженої ділянки мережі.

Захист від однофазних замикань на землю в розподільчих мережах 10-35 кВ має велике значення для надійності електропостачання та безпеки

персоналу, який обслуговує розподільчу мережу та електрообладнання споживачів.

Якщо розглядати захист від замикань на землю з точки зору електробезпеки, основним завданням є зменшення ризику однополюсного дотику. Добре відомо, що дотик до фази мережі 10 кВ або 35 кВ є надзвичайно небезпечним для життя людини. Однак можна з упевненістю стверджувати, що за умови своєчасного відключення напруги в багатьох випадках можна уникнути нещасних випадків зі смертельними наслідками, особливо якщо потерпілому буде надана ефективна перша допомога. Таке відключення можна здійснити за допомогою пристроїв захисного відключення однофазного замикання на землю. Коли людина потрапляє під високу напругу, опір швидко падає, і захист може спрацювати під дією струму, що проходить через тіло людини. Тому захист від замикання на землю повинен також виконувати функцію пристрою захисного відключення. І це дуже важливо з цієї точки зору.

Наразі використовуються такі типи захистів: нульфазний, що реагує на напругу, нульфазний, що реагує на струм, і нульфазний, що реагує на напругу і струм.

Нульовий захист, що реагує на напругу, отримує сигнал від вторинної обмотки трансформатора напруги, з'єднаної у розімкнутий трикутник. Принципова схема реактивного захисту від нульової фазної напруги показана на рисунку 1.1.

Якщо немає факту замикання фази на землю, фазні напруги U_a, U_b, U_c рівні між собою і звичайно здвинуті по фазі на кут 120° (рис.1.2). З цієї причини вторинна напруга нульової послідовності на вторинній обмотці дорівнює нулю.

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c) = 0 \quad (1.1)$$

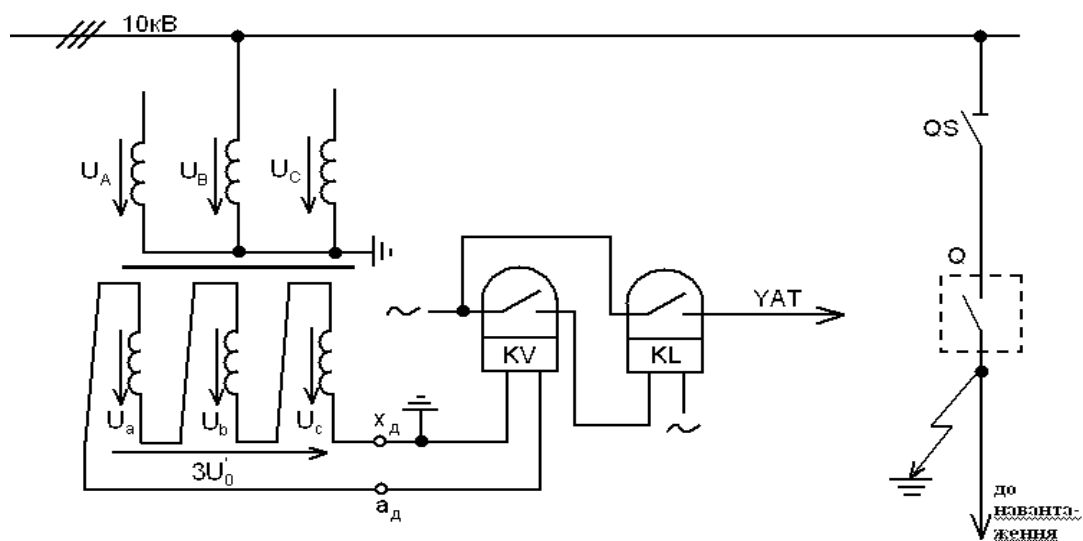


Рис.1.1. Принципова схема захисту, яка реагує на напругу нульової послідовності

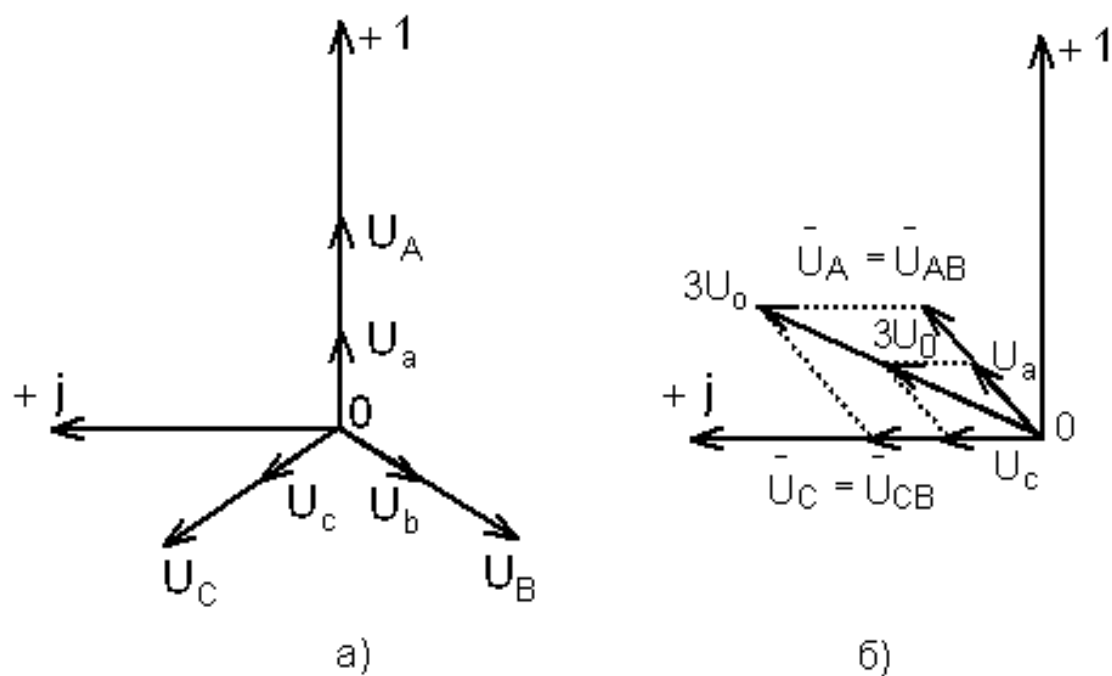


Рис.1.2. Векторна діаграма напруг

При замиканні на землю однієї із фаз, наприклад фази В:

$$\bar{U}_b = 0,$$

$$\bar{U}_a = \frac{1}{K} \bar{U}_{AB} = \frac{1}{K} \bar{U}_л e^{j30^\circ}, \quad (1.2)$$

$$\bar{U}_c = \frac{1}{K} \bar{U}_{CB} = \frac{1}{K} \bar{U}_л e^{j90^\circ}$$

Тому

$$\bar{U}'_0 = (\bar{U}_a + 0 + \bar{U}_c) = \frac{U_л}{\sqrt{3}K} e^{j60^\circ} \quad (1.3)$$

де $U_л$ - лінійна напруга мережі;

K - коефіцієнт трансформації (ТН) трансформатора напруги.

На рис. 1.2,б показана векторна діаграма первинних й вторинних напруг при ОЗЗ фази В.

Таким чином, напруга нульової послідовності на вторинній обмотці (ТН) трансформатора зростає від нуля до:

$$U'_0 = \frac{U_л}{\sqrt{3}K}. \quad (1.4)$$

При умові глухого замикання на землю напруга $3U'_0$ у трансформаторів напруги типу НАМИ – 10, НТМИ, ЗНОЛ, ЗНОМ складає зазвичай 100 В.

Напруга $3U'_0$ підводиться до реле напруги KV (див. рис. 1.1). При спрацюванні цього реле сигнал поступає на проміжне реле KL, яке своїми контактами подає напругу на катушку відключення УАТ вимикача. І в результаті проходить відключення ушкодженого відгалуження від шин підстанції. За реле напруги звичайно править реле типу РН53/60Д.

Цей метод не може діяти селективно і тому використовується там, де до шини підстанції підключені нерозгалужені мережі.

Для мереж, що відходять більше ніж на 8-10 ліній від шини підстанції, використовується простий струмовий захист, який використовує нульовий трансформатор струму як датчик сигналу і різні струмові реле як пристрої реагування для селективного відключення пошкодженої ділянки.

У пошкоджених секціях струм нейтралі є найвищим, а отже, напруга на вторинній стороні трансформатора струму також є найвищою. Отже, чим більше секцій у мережі, тим вища селективність захисту. На практиці струмовий захист нульової послідовності використовується, коли до шин підстанції підключено не менше п'яти зовнішніх приєднань. У цьому випадку умови для чіткої селективної роботи захисту є достатніми.

На рис. 1.3 показана принципова схема струмового захисту від ОЗЗ. Якщо є факт замикання на землю, у вторинній обмотці трансформатора струму (ТС) нульової послідовності ТА починає протікати струм $3I'_0$, під дією якого включається струмове реле КА і своїм замикаючим контактом подасть напругу на проміжне реле КЛ. Контакт цього ж реле поєднаний послідовно з електромагнітом відключення УАТ вимикача.

В якості давача сигналу нульової послідовності промисловістю випускається трансформатори струму нульової послідовності ТЗ, ТЗР, ТФ, ТТНП-2 та інші.

Основним недоліком захисту від надструмів є те, що непошкоджені ділянки мережі можуть відключатися неселективно, особливо коли кількість приєднань на шинах підстанції невелика. Наприклад, якщо є два захищених відходящих приєднання, то пошкодження одного з них призведе до відключення обох приєднань. У цьому випадку через вплив ємнісної складової струм нульової послідовності нешкодженої лінії, для якої встановлено захист, буде дорівнювати струму замикання на землю пошкодженої лінії. Недоліком цієї системи захисту є те, що кількість одночасно працюючих приєднань змінюється в процесі експлуатації мережі,

що ускладнює вибір заданого значення струму спрацьовування i , відповідно, сумарного струму замикання на землю.

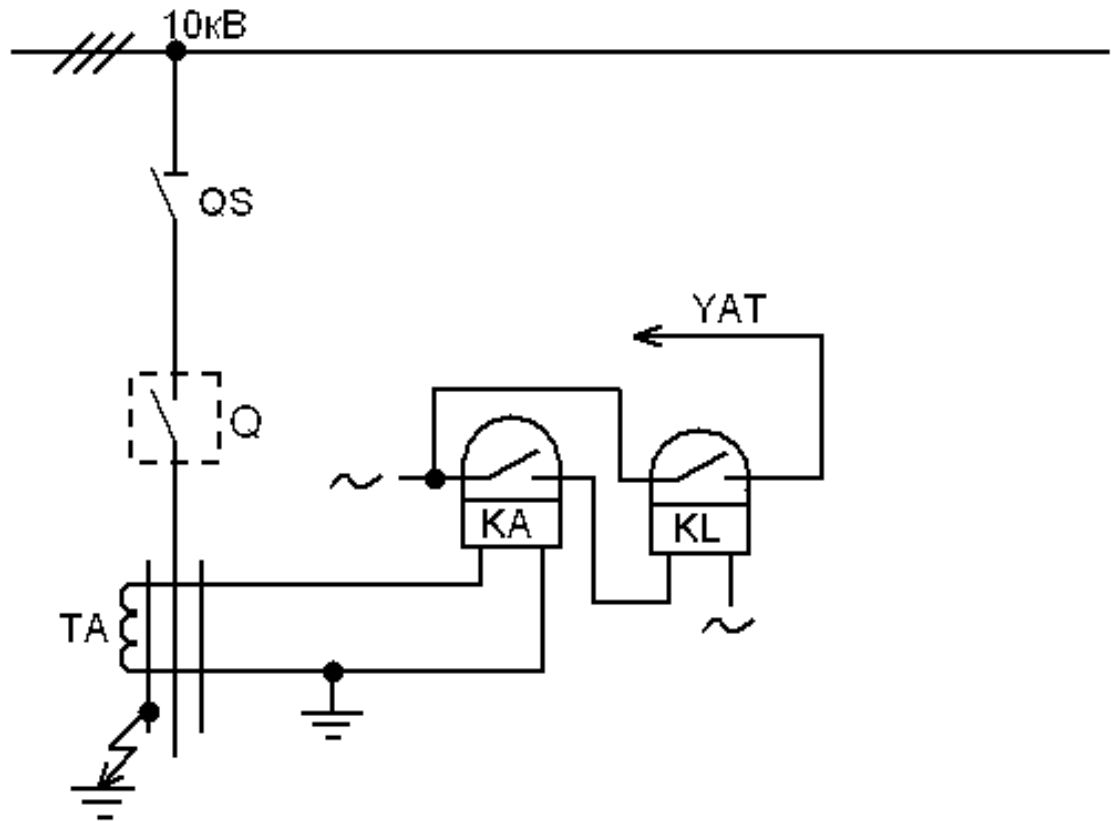


Рис. 1.3. Принципова схема струмового захисту від однофазних замикань на
землю

Захист, який реагує на початковий знак потужності нульової послідовності перехідних процесів, позбавлений цього недоліку. При перехідних процесах перерозподіл фазних напруг в точці пошкодження поширюється вздовж лінії у вигляді електромагнітних хвиль в шини. Напрямок поширення хвилі визначається законом миттєвої швидкості $p = u \cdot i$, де хвилями є напруги і струми. Тому миттєва потужність має негативний знак у початковій точці пошкодженого дроту і позитивний знак у початковій точці непошкодженого дроту. Це справедливо для будь-якої складної мережі.

Згідно з дослідженням, на ранніх стадіях перехідного процесу результуюча потужність нульової послідовності та електромагнітна потужність мають однаковий знак. Це дає можливість реалізувати імпульсно-спрямований захист нульової послідовності, підключений до стандартних вимірювальних трансформаторів струму та трансформаторів. Структурна схема пристрою наведена на рисунку 1.4. Пристрій виконано на напівпровідниковій основі. Основним пристроєм захисту є імпульсне реле напрямку потужності KW, яке визначає початковий знак перехідної миттєвої потужності в разі замикання на землю.

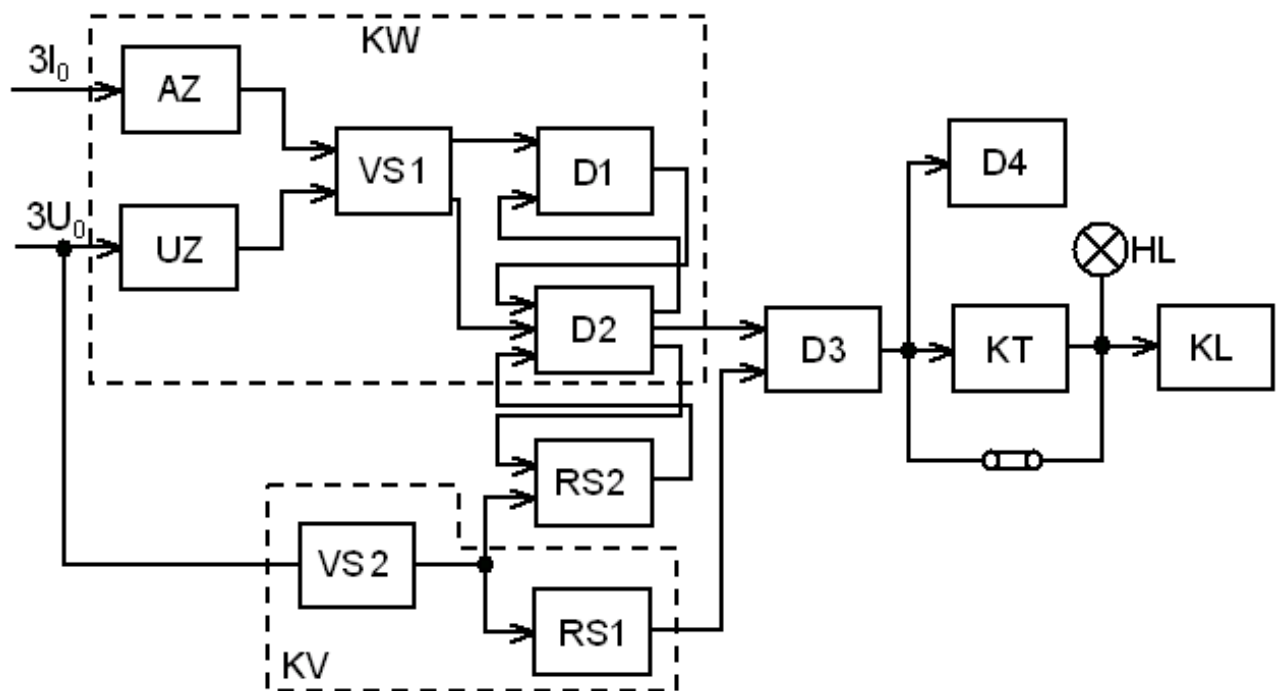


Рис. 1.4. Функціональна схема захисту від замикань на землю, що реагує на початковий знак потужності нульової послідовності перехідного процесу

Однак навіть найсучасніші з цих заходів не можуть забезпечити 100% захист обладнання від пошкоджень, що виникають в розподільчій мережі. Тому необхідно детально вивчити процеси, які відбуваються в мережі 10-35 кВ у разі замикання на землю, і прийняти принципові рішення щодо захисту обладнання.

РОЗДІЛ 2. РЕЖИМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

На практиці проблема режиму нейтралі не вирішується окремо при побудові конкретної електроустановки. Великий досвід проектування, будівництва та експлуатації електроустановок показав, що ця проблема вже давно однозначно вирішена в залежності від номінальної напруги електроустановки: для напруги 0,4 кВ використовується глухе заземлення нейтралі; для напруги від 6 до 35 кВ - ізольоване заземлення нейтралі та заземлення з дугогасильними реакторами (ємнісна компенсація струму). Для мереж вище 110 кВ використовується так зване ефективне заземлення нейтралі.

Останніми роками, спираючись на результати численних наукових досліджень та вітчизняний і міжнародний досвід, у вітчизняній енергетиці відбувається частковий перегляд форм заземлення нейтралі в електроустановках напругою 6-35 кВ, які прийнято називати середньою напругою, що неухильно прогресує. Наприклад, були запропоновані та впроваджені на практиці такі методи заземлення нейтралі:

- Заземлення активним опором (резистивне заземлення), особливо в повітряних мережах електропередачі, де загальна довжина лінії відносно невелика;
- Комбіноване. Полягає в тому, що паралельно з дугогасильним реактором додатково підключається резистор з певним чином підібраним значенням опору;
- Заземлення нейтралі за допомогою елементів, які компенсують як ємнісну, так і активну складові струму в місці пошкодження.

Метод заземлення нейтралі має вирішальний вплив на перенапруги, що виникають внаслідок замикання на землю. Тому питання вибору методу заземлення нейтралі тісно переплітається із засобами обмеження перенапруг

за допомогою різних технічних засобів, що використовуються в даний час, наприклад, розрядників, нелінійних обмежувачів перенапруг тощо. Важливо також зазначити, що метод заземлення нейтралі визначає метод селективного захисту від замикань на землю. За інших рівних умов перевагу слід надавати методу заземлення нейтралі, який забезпечує простіший і надійніший захист від замикань на землю.

У цій роботі розглядається експлуатація електроустановок у розподільчих мережах напругою 10-35 кВ з використанням методу заземлення нейтралі.

2.1. Електричні мережі з ізолюованою нейтраллю

В електричних мережах з ізолюованою нейтраллю проводи трьохфазної системи зв'язані із землею через ємності й активні опори ізоляції, що розподілені по всій довжині лінії. На рис. 2.1 наведено схему заміщення незаземленої мережі без навантаження.

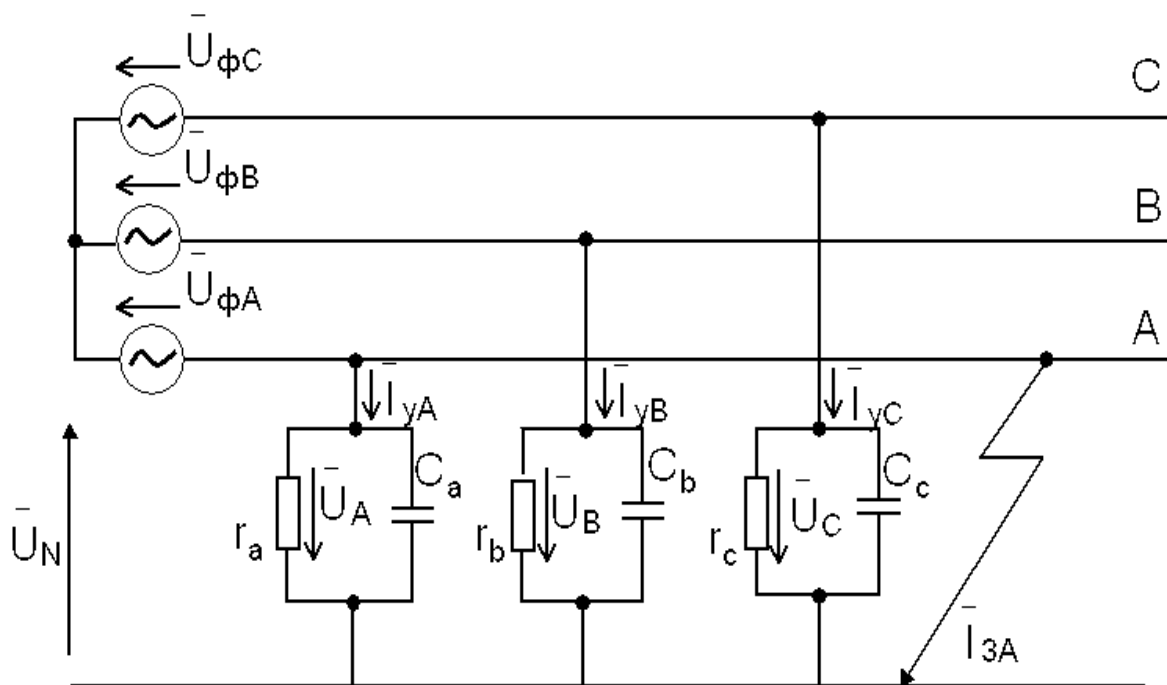


Рис. 2.1. Схема заміщення трифазної ідеалізованої мережі з ізолюованою нейтраллю

Для показаної мережі справедливі наступні відношення. Повні комплексні провідимості фаз А, В і С відносно землі:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_A &= \frac{1}{r_A} + j\omega C_A \\ \bar{Y}_B &= \frac{1}{r_B} + j\omega C_B \\ \bar{Y}_C &= \frac{1}{r_C} + j\omega C_C\end{aligned}\quad (2.1)$$

Напруга зміщення нейтралі:

$$\bar{U}_N = U_\phi \frac{\bar{Y}_S}{\bar{Y}_\Sigma} \quad (2.2)$$

де $\bar{Y}_\Sigma = \bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C$ - сумарна комплексна провідність мережі відносно землі;

U_ϕ - модуль фазної напруги мережі;

$\bar{Y}_S = \bar{Y}_A + a^2 \bar{Y}_B + a \bar{Y}_C$ - фазна комплексна провідність мережі відносно землі, котра дорівнює нулю при факті рівності провідностей

фаз $\bar{Y}_A = \bar{Y}_B = \bar{Y}_C$;

$$a = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad - \text{ фазний множник.}$$

Якщо взяти до уваги, що струм витоку у фазі А дорівнює

$\bar{I}_{yA} = (\bar{U}_{\phi A} - \bar{U}_N) \bar{Y}_A$, то враховуючи вираз (2.2) отримуємо:

$$\bar{I}_{yA} = U_{\phi} \frac{\bar{Y}_{\Sigma} - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_{\Sigma}} \bar{Y}_A \quad (2.3)$$

аналогічно й для інших фаз:

$$\bar{I}_{yB} = U_{\phi} \frac{a^2 \bar{Y}_{\Sigma} - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_{\Sigma}} \bar{Y}_B \quad (2.4)$$

$$\bar{I}_{yC} = U_{\phi} \frac{a \bar{Y}_{\Sigma} - \bar{Y}_S}{\bar{Y}_S} \bar{Y}_C \quad (2.5)$$

Відношення (2.3) - (2.5) дозволяють нам визначити струми витоку влюбій фазі мережі при відомих активних опорах r_a, r_b, r_c а також ємностях C_a, C_b, C_c відносно землі.

З одержаних співвідношень отримуємо вираз для струмів глухого (металевого) замикання на землю для кожної фази мережі. Так для струму замикання у фазі А ($\bar{Y}_A = \infty$):

$$\bar{I}_{3A} = U_{\phi} [\bar{Y}_B (1 - a^2) + \bar{Y}_C (1 - a)] \quad (2.6)$$

аналогічно й для інших фаз:

$$\bar{I}_{3B} = U_{\phi} [\bar{Y}_A (a^2 - 1) + \bar{Y}_C (a^2 - a)] \quad (2.7)$$

$$\bar{I}_{3C} = U_{\phi} [\bar{Y}_A (a - 1) + \bar{Y}_B (a - a^2)] \quad (2.8)$$

Таким чином для аналітичного визначення струмів ЗНЗ необхідно знати параметри ізоляції мережі відносно землі.

У мережах з ізолюваною нейтраллю ЗНЗ можуть бути стійкі (металеві або через перехідний опір) або ж дугові [5]. На рис. 2.2. показані векторні

діаграми напруг як для нормального режиму мережі так і при стійкому замиканні на землю.

Але в даній роботі необхідно звернути увагу на більш цікаві процеси, які можуть виникати в результаті замикань на землю, що додатково супроводжуються електричною дугою.

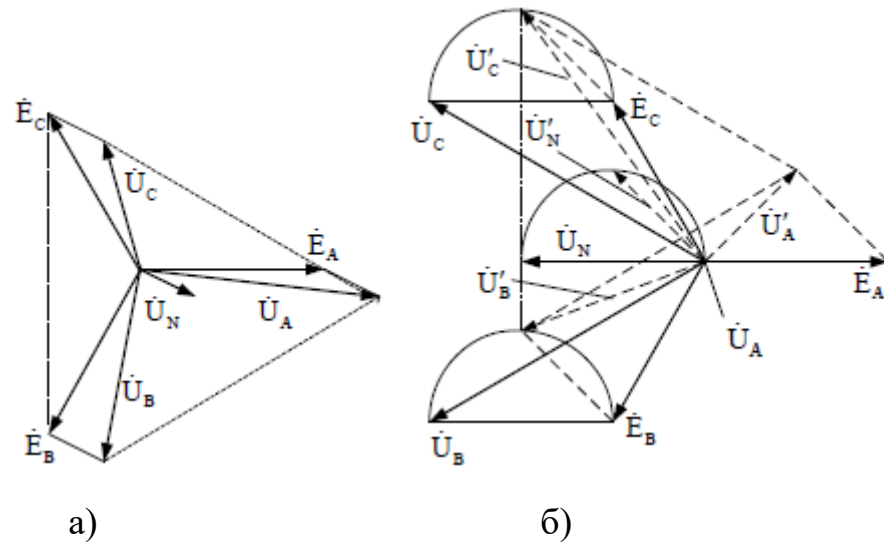


Рис. 2.2. Векторні діаграми напруг мережі

а – для нормального режиму при $U_N \neq 0$

б – при замиканні однієї фази А на землю

При однофазних замиканнях на землю в мережах 10-35 кВ часто виникають електричні дуги в місцях контакту провідників із землею. Процес аварії характеризується безперервним циклом запалювання та гасіння дуги. Дуга діє як своєрідний перемикач, періодично замикаючи пошкоджену ємність фази на землю, а потім знову підключаючи її до джерела живлення. Періодичне гасіння та запалювання дуги викликає складні перехідні процеси, інтенсивність яких залежить від таких факторів, як характеристики дуги, ємність, індуктивність та опір ланцюга.

Слід зазначити, що врахування всіх факторів, які впливають на перехідні процеси при переривчастих замиканнях на землю, є дуже складним завданням. Через складність фізичних явищ, пов'язаних з дуговими замиканнями, точного аналітичного опису не існує [6].

Згідно з теорією Петерсена, максимальна кратність перенапруг під час перехідних процесів не перевищує 3 - 4 порівняно з номінальним значенням фазної напруги системи.

Розглянемо як «поводиться» трьохфазна ідеальна симетрична мережа рис. 2.3 при однофазному дуговому ЗНЗ фази А.

Можемо припустити, що замикання виникло у момент часу $t = 0$, коли напруга фази А відносно землі має своє максимальне значення. Тоді фазні напруги мережі будуть дорівнювати:

$$u_{\phi A} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2});$$

$$u_{\phi B} = U_{\text{мф}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}); \quad (2.9)$$

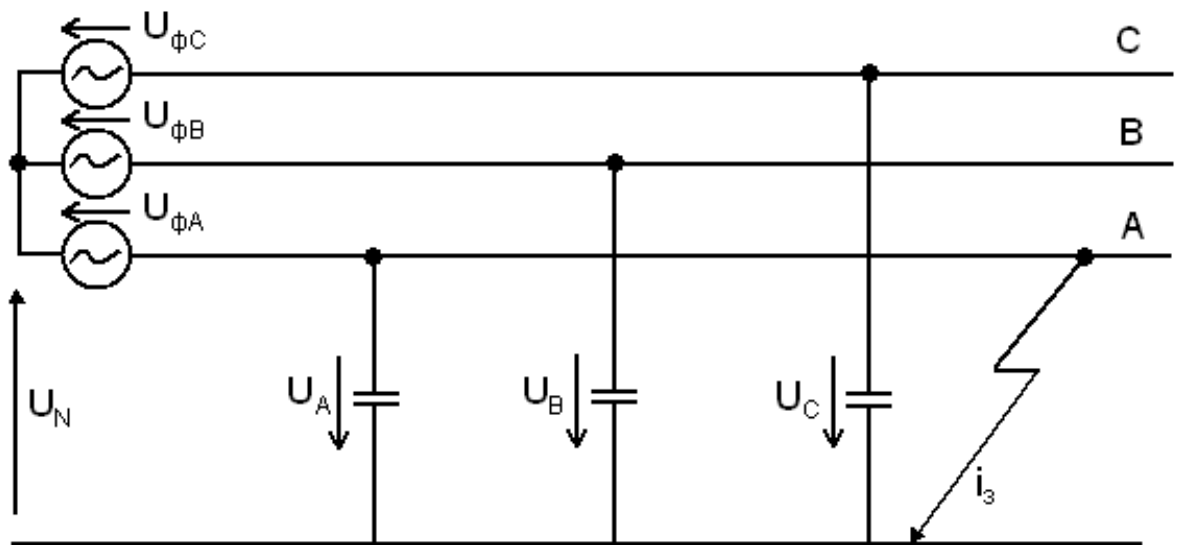


Рис. 2.3. Розрахункова схема для ідеалізованої мережі при однофазному ЗНЗ

Безпосередньо перед замиканням фази А на землю, тобто при умові $t = (-0)$, напруга фаз А, В й С відносно землі мали такі значення (див. рис.2.3)
 $u_A(-0) = U_{\text{мф}}; u_B(-0) = u_C(-0) = 0,5U_{\text{мф}}.$

У інтервалі часу від $\omega t=0$ до $\omega t=\pi$ струм замикання на землю (ЗНЗ) змінювався по закону:

$$i_3 = 3U_{\text{мф}}\omega C \sin(\omega t + \pi) \quad (2.10)$$

а напруга зміщення нейтралі (U_N) дорівнює напрузі фази А.

Згідно із гіпотезою Петерсена дуга має згасати при проходженні струму замикання на землю через найближчий нуль. Це відбувається (рис.2.4) в момент $\omega t=\pi$. Ємність пошкодженої фази більше не буде шунтуватися струмом дуги, опір якої у даний момент дорівнюватиме нулю. Отже, відбувається як би миттєвий перерозподіл напруг на ємностях електричної мережі відносно землі.

Напруга зміщення нейтралі у наступному інтервалі, при зміні часу $\pi \leq \omega t \leq 3\pi/2$ буде $U_N = -U_{\text{мф}}$. Й таким чином, нульова точка джерела трьохфазного живлення відносно землі вже після згасання дуги прийматиме потенціал, який з часом змінюється й дорівнюватиме по значенню амплітуді фазної напруги електричної мережі.

Тому напруги в електричній мережі в інтервалі згасання дуги будуть визначатися таким чином:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{\text{мф}} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right] \\ u_B &= U_{\text{мф}} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) + 1 \right] \\ u_C &= U_{\text{мф}} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right) + 1 \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

У момент $\omega t = 3\pi/2$ напруга фази А знову досягне свого максимуму, тобто знову виникне струм дуги на землю і відбудеться кидок струму i_3 (рис. 2.4). Далі процес повторюється, але з протилежним знаком.

Таким чином, ми бачимо із рис. 2.4, що при дугових замиканнях на землю в ідеальній електричній мережі, перенапруги не можуть перевищувати подвійної амплітуди фазної напруги. Про це свідчать також дослідження [6].

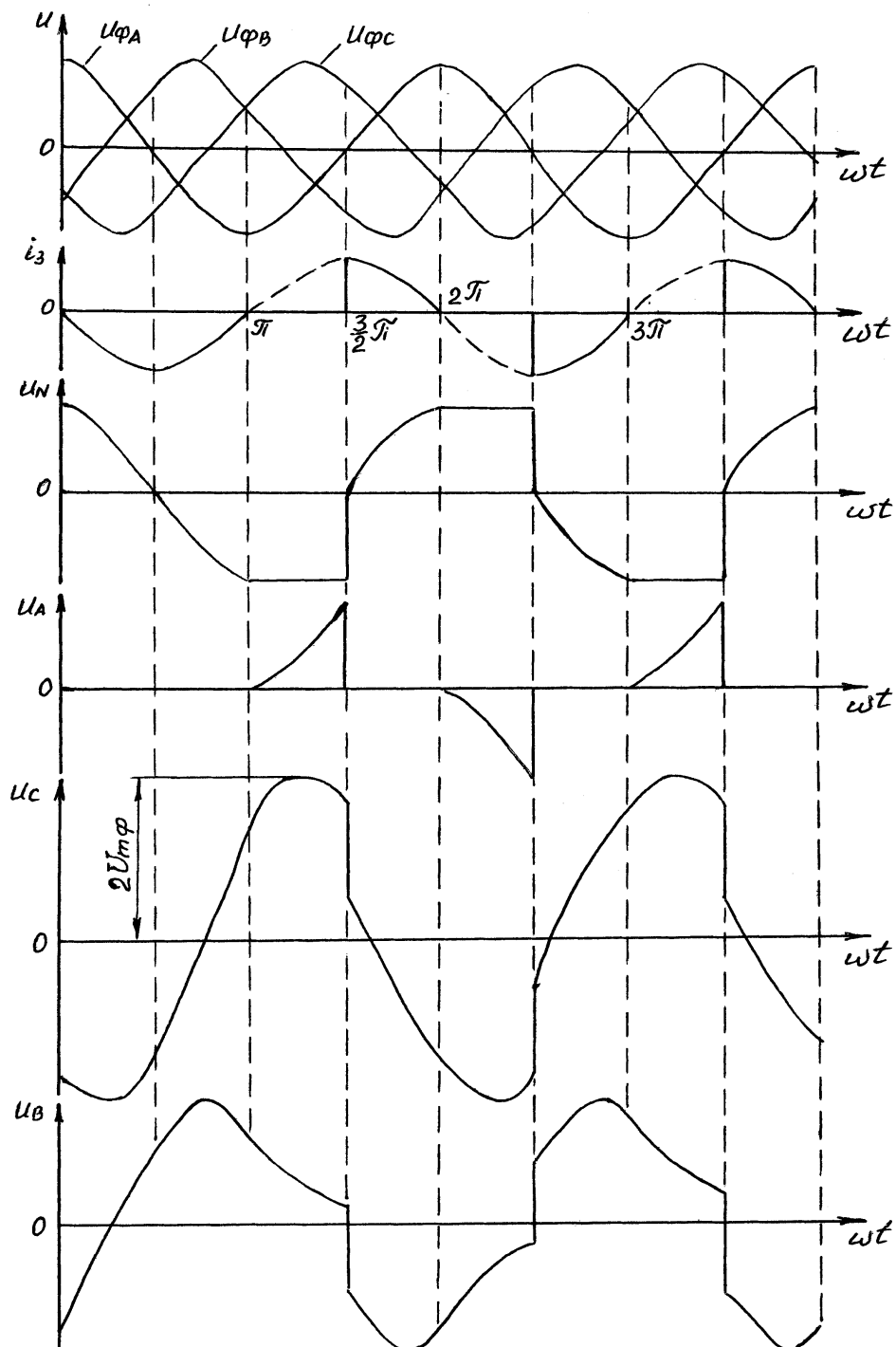


Рис. 2.4. Криві, що характеризують перехідний процес при дуговому ЗНЗ в ідеалізованій мережі

Однак реальна електрична мережа має активний та індуктивний опір проводів на додаток до ємнісної провідності фаз по відношенню до землі. Тому, якщо відбувається переривчасте замикання на землю з дуговим розрядом, можуть виникати коливальні процеси. Перенапруга залежить від того, наскільки співвідношення активних, індуктивних і ємнісних елементів сприяє виникненню резонансних умов у конкретній мережі. Резонансні перенапруги можуть змінюватися в широких межах і теоретично можуть досягати нескінченно великих значень [3]. У зв'язку з цим доцільно дослідити процеси, що відбуваються під час переривчастих дуг, за схемою, наведеною на рисунку 2.5.

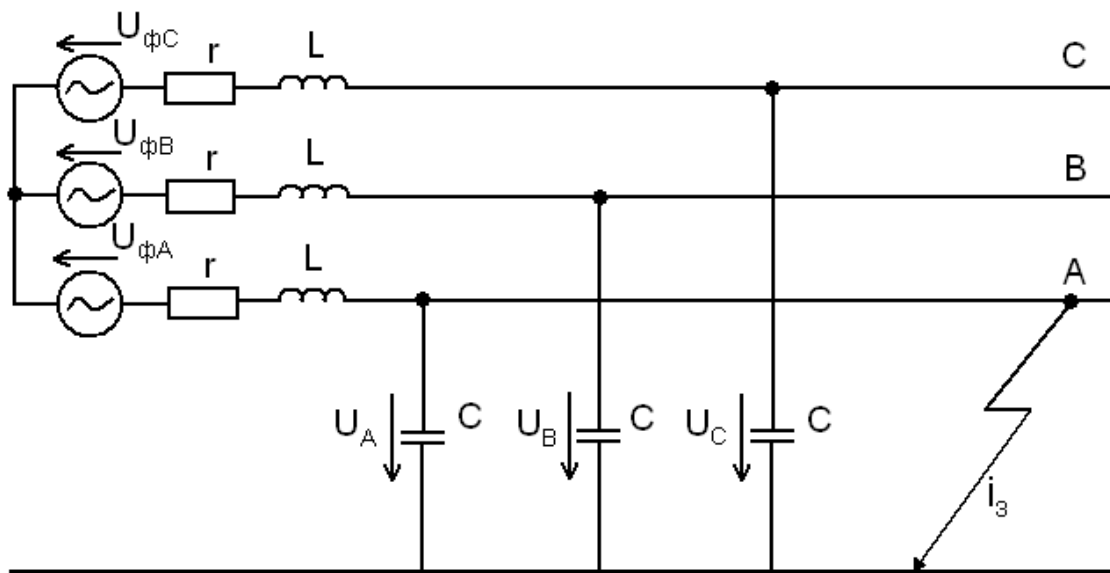


Рис. 2.5. Розрахункова схема трифазної мережі при замиканні на землю

Для перехідних процесів ефективніше розглядати перехідні процеси поступово, поетапно, починаючи з моменту виникнення електричної дуги.

Рішення полягає в наступному. Припустимо, що дуга виникає в момент, коли напруга фази наближається до свого амплітудного значення. Визначивши початкову фазу ψ напруги живлення, знайдемо напругу пошкодженої фази А в момент проходження нею максимального значення:

$$u_{\phi A} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \psi)$$

$$u_{\phi B} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3})$$

$$u_{\phi C} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3})$$

Згідно зі схемою напруга фази А безпосередньо до факта замикання на землю визначається виразом:

$$u_A = \frac{U_{m\phi}}{\sqrt{r^2 \omega^2 C^2 + (1 - \omega^2 LC)}} \sin(\omega t + \psi - \phi), \quad (2.12)$$

$$\text{де } \phi = \arctg \frac{r\omega C}{1 - \omega^2 LC}$$

Очевидно, що для певного моменту часу $t = 0$ найбільше значення u_A буде приймати при $\psi = \pi/2 - \phi$.

Таким чином, розглядаючи інтервал між гасінням і запалюванням дуги, можна отримати картину перехідного процесу, з якої можна визначити кратність перенапруг, що виникають для заданого параметра r , L або C електричної мережі.

2.2. Електричні мережі із компенсованою нейтраллю

Як обговорювалося в розділі 2.1, за відносно низьких струмів переривчасті дуги ємнісного струму в мережі з ізольованою нейтраллю можуть спричинити значні перенапруги. За вищих струмів дуги стабілізуються, і тривале горіння зрештою призводить до коротких замикань між фазами.

Тому необхідно вжити заходів для якнайшвидшого усунення дуг. Одним з відомих і широко використовуваних рішень цієї проблеми є заземлення

нейтралі через котушку (рис. 2.6), індуктивність котрої підбирається певним чином. Котушка заземлення називається дугогасильною котушкою або дугогасильним реактором.

Цей термін дуже точно відображає призначення і механізм дії цього пристрою, як буде показано далі. Дугогасні реактори мають подвійний ефект у разі замикання на землю. По-перше, вони значно зменшують (компенсують) струм в точці пошкодження, а по-друге, затримують відновлення напруги на пошкодженій фазі після переривання дуги. Обидві ці ситуації сприяють гасінню дуги.

У ПУЕ [7] зазначено, що при експлуатації мереж електропередачі 3-35 кВ слід забезпечувати ізолювану або заземлену нейтраль через дугогасильний реактор.

Компенсація ємнісних струмів замикання на землю повинна використовуватися за значенням цього струму в нормальному режимі:

10 А для мереж 3-20 кВ і всіх мереж 35 кВ із залізобетонними та металевими опорами на повітряних лініях електропередачі.

У мережах без залізобетонних і металевих опор повітряних ліній: для 3-6 кВ - >30 А; для 10 кВ - >20 А; для 15-20 кВ - >15 А.

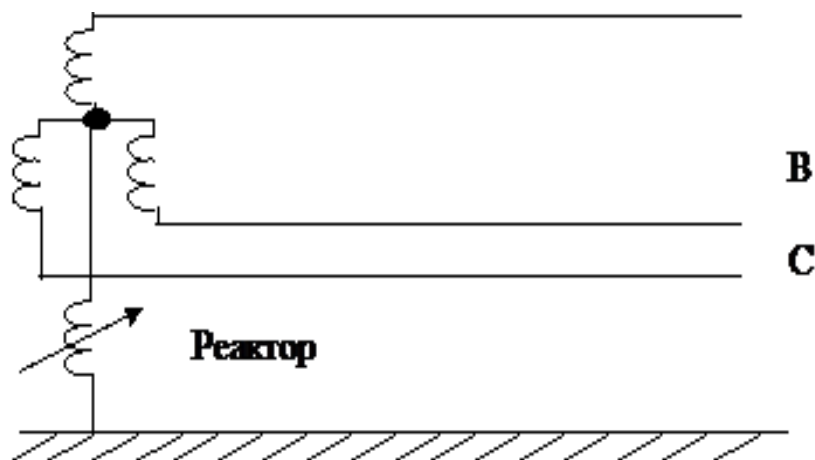


Рис.2.6. Схема електричної мережі з компенсованою нейтраллю

Тепер розглянемо ідеальну симетричну електричну мережу рис.2.7.

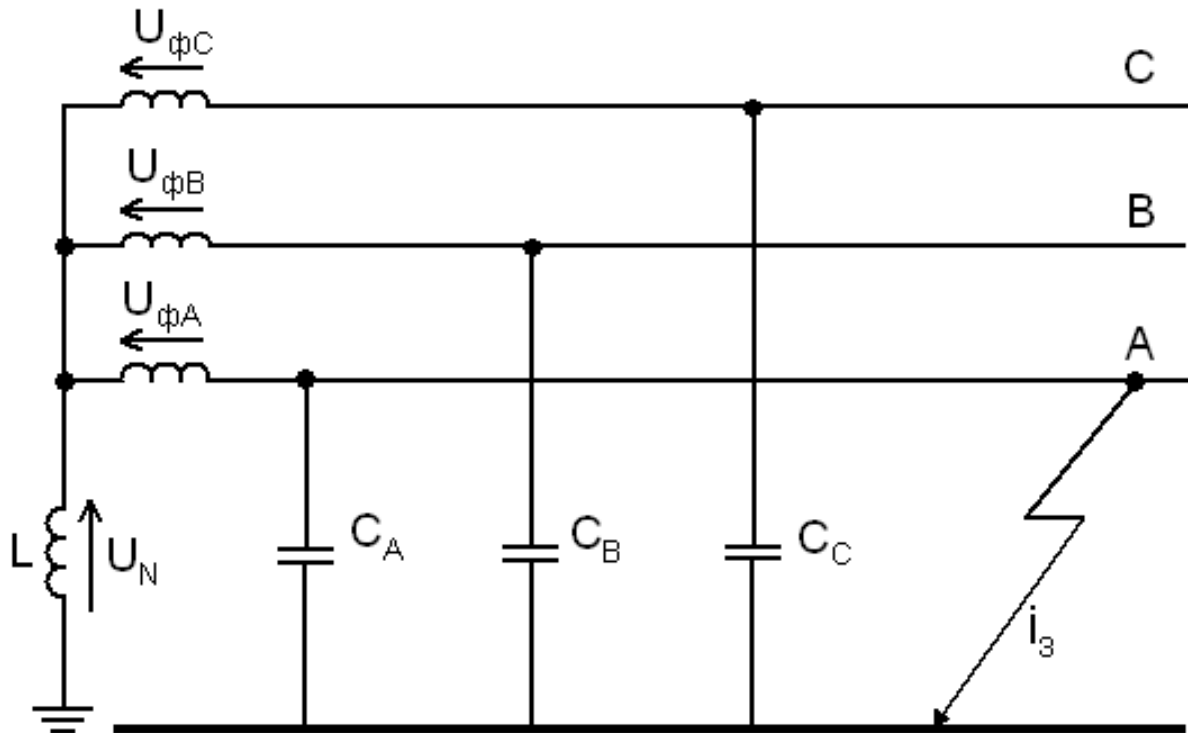


Рис. 2.7. Схема компенсації ємнісних струмів ЗНЗ при ідеальних параметрах мережі і котушки.

В мережі $C_A = C_B = C_C = C$, струм замикання на землю дорівнює:

$$I_3 = U_{\phi} \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (2.13)$$

Якщо виконується умова резонансу $3\omega C - 1/\omega L = 0$.

Таким чином, проблема гасіння дуги ніби то вирішена. При ідеальних умовах не виникає перенапруга відносно землі. Напруга зміщення нейтралі U_N при умові $C_A = C_B = C_C$ дорівнюватиме нулю.

Але мережі й котушки мають ще й активний опір, а ємності електричної мережі відносно землі можуть мати різне значення одне від одного, тобто $C_A \neq C_B \neq C_C$. Є також велика принципова різниця між

замиканням металевим (без дуги) та із переривчастою дугою. В зв'язку із цими міркуваннями схема зображена на рис. 2.7 предстане у такому вигляді:

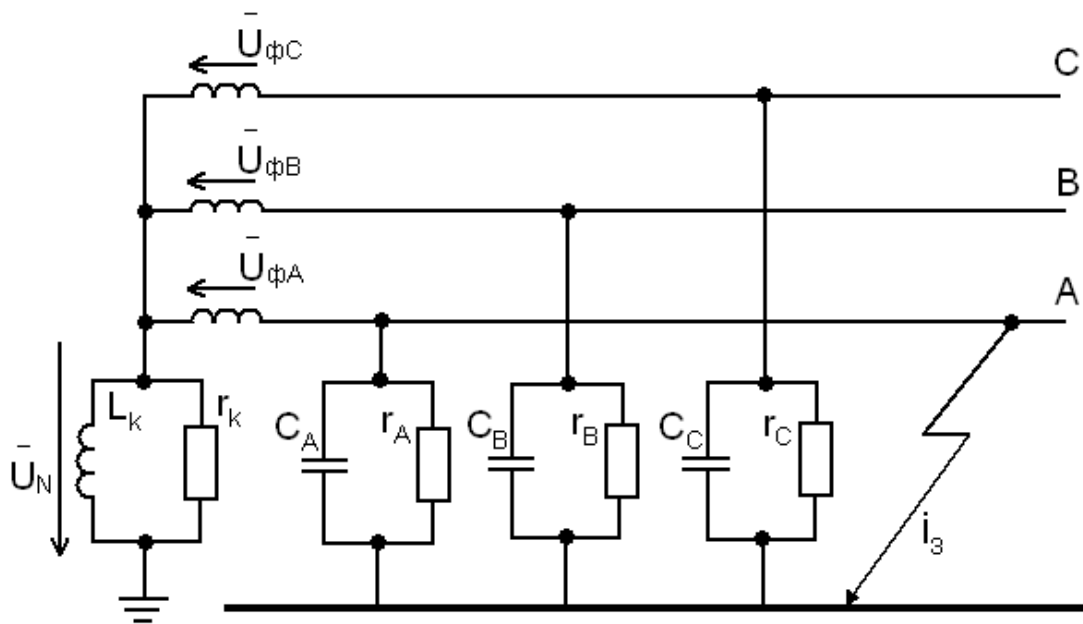


Рис. 2.8. Схема електричної мережі з компенсованою нейтраллю з урахуванням активних опорів мережі та реактора.

Якщо вважати схему (рис. 2.8.) симетричною, тобто ($C_A = C_B = C_C = C$), ($r_A = r_B = r_C = r$) приведемо її до більш зручної розрахункової схеми рис. 2.9.

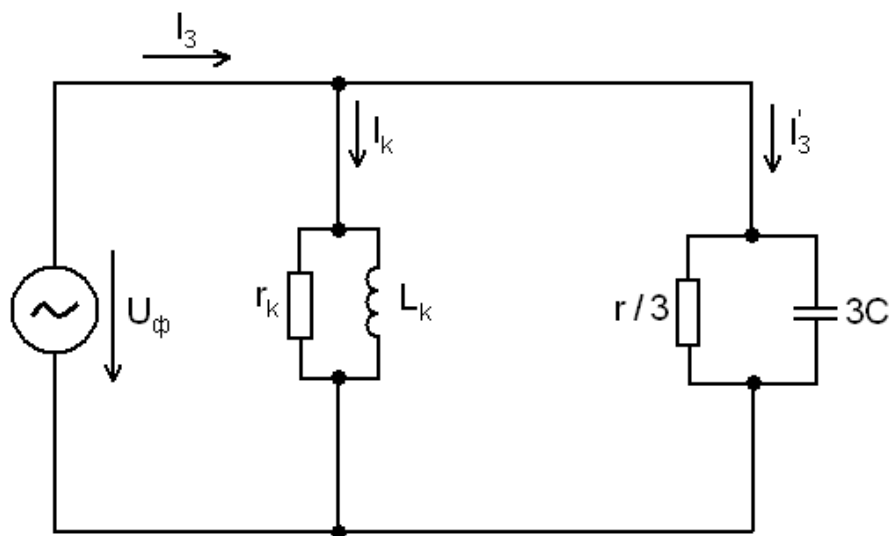


Рис. 2.9. Розрахункова схема мережі із компенсованою нейтраллю

Умовою резонансу є рівність індуктивного I_L та ємнісного I_C струмів. Струм ЗНЗ у цьому випадку визначиться з виразу:

$$I_3 = U_\phi \left(\frac{1}{r_k} + \frac{3}{r} \right) \quad (2.14)$$

Як видно із цього рівняння, що навіть при резонансній настройці струм ЗНЗ не дорівнює 0 й визначається опорами ізоляції та параметрами котушки.

І оскільки ємнісна складова струму ЗНЗ не може бути визначена прямим безпосереднім вимірюванням, то резонансна настройка, що відповідає умові $I_C = I_L$, також не може бути здійснена безпосередньо, тому настройку компенсації здійснюють по розрахунковому струму:

$$I_C = 3U_\phi \omega C$$

Тому резонансне налаштування котушок для компенсації ємнісних струмів може бути лише наближеним, і струм замикання на землю завжди буде дорівнювати нулю.

Якщо в компенсованій мережі виникає дугове замикання на землю (рис. 2.8), припускаючи резонансне налаштування, фазні напруги записуються в наступному вигляді

$$u_{\phi A} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$u_{\phi B} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3})$$

$$u_{\phi C} = U_{m\phi} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3})$$

струм ЗНЗ в перший інтервал часу буде дорівнювати:

$$i_{3A} = \frac{U_m}{r_e} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

$$\text{де } r_e = \frac{3r_k}{3r_k + r}.$$

У момент проходження струму i_{3A} через 0, тобто при $\omega t = \pi/2$, дуга згасне. А безпосередньо перед згасанням дуги напруги у непошкоджених фазах будуть дорівнювати:

$$u_B(\frac{\pi}{2}-) = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m; \quad u_C(\frac{\pi}{2}-) = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_m$$

Струм в котушці L_K на момент згасання дуги ($i_{3A} = 0$) дорівнюватиме своєму амплітудному значенню:

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L_K} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{U_m}{\omega L_K}$$

Згідно джерелу [8] при дослідженнях наступних інтервалів запалювання й згасання електричної дуги напруга вільної складової між землею й нульовою точкою трансформатора буде носити затухаючий коливальний характер із наступною кутовою частотою:

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{L_K C} - \frac{1}{4C^2} (\frac{1}{r} + \frac{1}{3r_k})^2} \quad (2.15)$$

Для ідеалізованої мережі й котушки, коли виконується умова $1/r = 1/3 \cdot r_k = 0$, кутова частота незатухаючих коливань

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K C}}.$$

Таким чином, в інтервалі часу після гасіння дуги напруга на гасильному реакторі не дорівнює нулю, навіть у симетричних мережах. Вона коливається з постійною кутовою частотою. За таких умов між окремими лініями мережі та землею можуть виникати перенапруги. Її величина визначається різницею між напругою зсуву фаз і напругою зсуву нейтралі:

$$U_A = U_{fA} - U_N; U_B = U_{fB} - U_N; U_C = U_{fC} - U_N.$$

Дуга запалюється знову, коли напруга досягає свого останнього максимуму. Потім процес повторюється. Однак при розрахунку перехідних струмів і напруг для наступної секції необхідно враховувати інші початкові значення струмів, що протікають в індуктивності котушки, як в момент замикання на землю, так і в момент гасіння дуги.

2.3. Електричні мережі із резистивним заземленням нейтралі

Режим з ізольованою нейтраллю має серйозний недолік, який полягає в можливості виникнення великих перенапруг під час повторного запалювання дуги. Причиною великих перенапруг є те, що в ємності фази мережі генерується надмірний заряд, який не встигає розрядитися до наступного запалювання дуги через природну провідність між фазою мережі та землею, в результаті чого на нейтралі виникає залишкова напруга. Тому очевидним способом зменшення перенапруги є створення шляху для стікання надлишкового заряду до повторного запалювання дуги, тобто протягом періоду, що дорівнює половині промислової частоти, шляхом заземлення нейтралі мережі через резистор з таким значенням опору, яке гарантує майже повне стікання надлишкового заряду.

Стверджують, що в подальшому, якщо значення опору заземлювального резистора вибирати, виходячи лише з цієї умови, струм в точці замикання не зросте настільки (приблизно в 1,5 рази), що буде допустима експлуатація мережі деякий час при однофазних замиканнях в більшості випадків, а також при ізольованій нейтралі і ємнісній компенсації струму.

Пропозиції щодо використання резистивного заземлення нейтралі відомі вже давно [9, 10]. В роботі детально розглянуті всі основні питання, пов'язані з цим режимом заземлення нейтралі. Наразі питання, пов'язані з теорією і практикою резистивного заземлення нульової точки, активно розвиваються.

У цьому випадку мережа повинна бути обладнана швидкодіючим захистом від замикань на землю, який працює на відключення, оскільки неприпустимо допускати тривале протікання таких струмів у місці пошкодження.

Важливо відзначити, що реалізація захисту від замикань на землю для струмів замикання 30-60 А є найпростішою за інших рівних умов. Простота швидкодіючого селективного захисту є одним з аргументів на користь такого вибору опору заземлювального резистора. У цьому випадку потужність заземлювального резистора можна вибрати, виходячи з умови, що струм протікає протягом короткого проміжку часу.

Основними сферами застосування резистивного заземлення нейтралі є мережі з відносно невеликими ємнісними струмами, де існуючі стандарти ще не рекомендують встановлювати дугогасильні реактори. Найпоширенішими типами таких мереж є мережі 6-10 кВ для унікальних потреб електростанцій, мережі, що живлять мобільні механізми для відкритих гірничих робіт, та повітряні розподільчі мережі 6-35 кВ.

Заземлювальні резистори можуть підключатися до нейтралі спеціальних трансформаторів зі з'єднанням обмоток зірка-трикутник, таких як дугогасильні реактори, або до силових трансформаторів з обмотками трикутника (рис. 2.10).

Якщо резистивне заземлення нейтралі підтримує струм на такому рівні, що дозволяє експлуатувати мережу протягом тривалого часу в разі однофазного замикання, такий режим умовно називають високоомним резистивним заземленням. Якщо збільшення струму є таким, що неприпустимо експлуатувати мережу протягом тривалого часу в разі замикання на землю, цей режим умовно називається низькоомним резистивним заземленням.

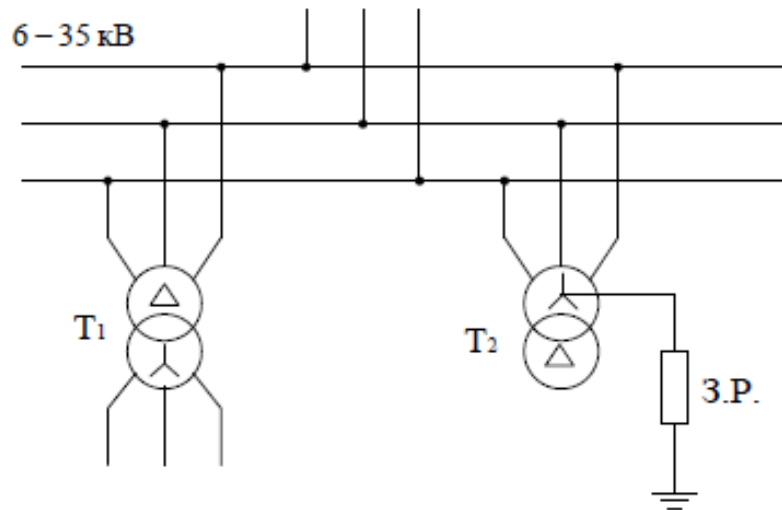


Рис. 2.10. Схема електричної мережі із резистивним заземленням нейтралі

Ефективність резистивного заземлення нейтралі більш детально розглянута в розділі 3 даної роботи. Логічним завершенням 2-го розділу слід вважати огляд переваг та недоліків кожного із зазначених типів заземлення нейтралі.

Ізольована нейтраль мережі

Переваги:

1. Струми замикання на землю відносно низькі.
2. Безперебійна робота мережі може підтримуватися навіть за наявності однофазного замикання на землю.
3. Низький вплив на сусідні установки (відносно проста система заземлення).
4. Можливість самовідновлення пошкоджень в умовах гасіння дуги.

Недоліки:

1. Продовження режиму роботи мережі у аварійному режимі (підвищене навантаження на ізоляцію з причини підвищення напруги непошкоджених фазмережі у 3 рази).

2. Дуже висока вірогідність виникнення міжфазних, подвійних ЗНЗ та ушкоджень обладнання.
3. Значна кратність внутрішніх перенапруг при дугових ЗНЗ та пов'язаних з цим ферорезонансних явищ.
4. Недостатньо безпечна експлуатації мережі, не завжди задовольняє сучасним вимогам, тобто (можливість тривалого існування в мережі небезпечних напруг дотику), поява однофазних замикань на землю через залізобетонні опори, можливість перекриття ізоляції комутаційних апаратів і пристроїв при оперативних перемиканнях, обривах й падіннях на землю проводів повітряних ліній.
5. Незадовільні умови селективності та перешкодостійкості пристроїв релейного захисту, автоматики, та їх недостатня чутливість і швидкодія згідно відповідних вимог.
6. Складність адекватного визначення місця замикання на землю.
7. Зміщення нейтралі мережі.

Компенсована нейтраль мережі

Переваги:

1. Зниження кратності перенапруг в мережі.
2. Малий залишковий струм (I_z) замикання на землю.
3. Підтримання певний час безперебійної роботи мережі при наявності ЗНЗ.
4. Незначний вплив процесу на сусідні електроустановки (відносно прості пристрої й схеми заземлення).
5. Можливість самоусунення зазначеного пошкодження при дотриманні умов згасання дуги.

Недоліки:

1. Подальше продовження аварійного режиму роботи електричної мережі (підвищене навантаження на ізоляцію мережі в зв'язку із підвищенням напруги непошкоджених фаз у 3 рази).

2. Складність визначення місця ЗНЗ - ще більша, ніж у випадку із ізольованою нетральною, тобто значно затруднюється реалізація з побудови селективного захисту від ЗНЗ.
3. Складність регулювання й настройки ДГР та їх узгодження одне з одною.
4. Додаткові витрати коштів на пристрої автоматичної компенсації та котушок.
5. Недостатня надійна безпека експлуатації мережі, яка не задовольняє сучасним вимогам (можливість тривалого існування небезпечних, з точки зору ураження напруг дотику (до 2 годин), виникнення ЗНЗ через залізобетонні опори, ймовірна можливість перекриття ізоляції комутаційних апаратів та пристроїв при оперативних перемиканнях, обривах й падіннях проводів повітряних ліній електропередач.
6. Незадовільні згідно вимог селективність та завадозахищеність пристроїв релейного захисту і автоматики, а як наслідок недостатні їхня чутливість і швидкодія.
7. Зміщення нейтралі мережі.

Резистивне заземлення нейтралі мережі

Переваги:

1. Зменшення кратності перенапруг до такого рівня, який безпечний для електрообладнання електричної мережі.
2. Можливість побудови й застосування простого, селективного й надійного захисту від ЗНЗ, який заснований на принципі протікання активної складової струму ЗНЗ тільки в межах пошкодженого приєднання.
3. Значно менші (у порівнянні з ДГР) витрати на виробництво заземлюючих активних опорів.
4. Відсутність потреби узгоджувати зазначені активні опори (резистори) один з одним та автоматично змінювати їх параметри в мережі.
5. Незначна напруга нейтралі.
6. Мала у часі тривалість ЗНЗ (при роботі релейного захисту на відключення).

7. Селективне (вибіркове) визначення приєднання, що пошкоджено із подальшим його відключенням (при роботі на сигнал).
8. Можливість збереження переваг електричних мереж мереж з ізольованою нейтраллю, обумовлених відносно невеликими струмами ЗНЗ, при правильному виборі величин опору та інших характеристик резисторів й засобів релейного захисту (РЗ) та автоматики (при потребі застосуванні високоомних резисторів).

Недоліки:

1. Збільшення струму ЗНЗ в порівнянні із режимами, що протікають в ізольованої нейтралі.
2. Не завжди є можливість підтримання безперебійної експлуатації мережі при наявності ЗНЗ (при дії пристроїв РЗ на відключення).

Слід зазначити, що недоліки мереж з резистивним заземленням нейтралі насправді не є недоліками, а об'єктивними факторами, що впливають із цього методу заземлення нейтралі. Крім того, замикання на землю є аварією, і пошкоджене з'єднання має бути відключене. Методологія базується на системному підході, що включає в себе розгляд завдань і проектування мережі, аналіз перенапруг, розрахунок усталених режимів і перехідних процесів, визначення необхідних параметрів резисторів (значень опорів і їх енергетичних характеристик), вибір схеми приєднання, принципу дії, різних за конструкцією і призначенням пристроїв 6-35 кВ. Вмикає технічні засоби, необхідні для релейного захисту мережі.

РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗИСТИВНОГО ТА КОМБІНОВАНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 10-35 КВ

3.1. Електричні мережі із резистивним заземленням нейтралі в нормальному режимі роботи та при стійкому замиканні фази на землю

Необхідні математичні співвідношення при стійкому замиканні фази на землю та в нормальному режимі для мережі із резистивним заземленням нейтралі можна отримати згідно схеми заміщення, яка наведена на рис. 3.1.

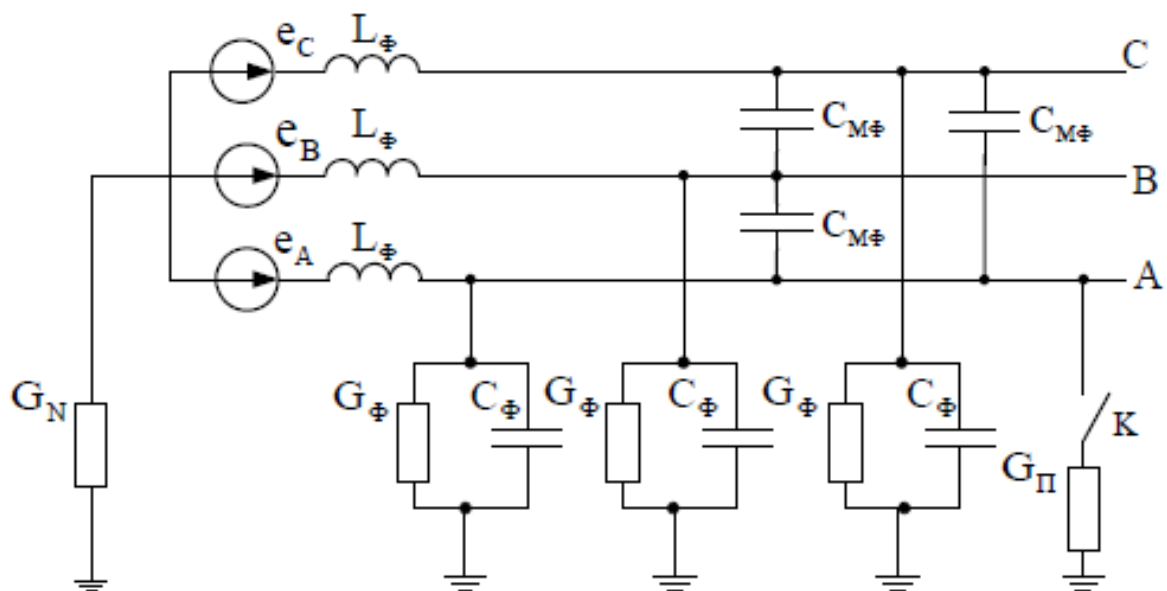


Рис. 3.1. Схема заміщення електричної мережі із резистивним заземленням нейтралі

Зображена схема заміщення є окремим випадком схеми, що використовується для розгляду мережі із компенсацією ємнісного струму, якщо

$$B_L = \frac{1}{\omega L} = 0$$

$$G_L = G_N = \frac{1}{R_N}$$

Очевидно, що співвідношення, отримані в компенсованій мережі, відповідають співвідношенням у мережі з резистивним заземленням нейтралі за вищезазначених умов.

Однак, на відміну від мереж, що компенсують ємнісні струми, у цьому випадку складова вищих гармонік у резистивному заземленні нейтралі для повного струму замикання значно менша, ніж у мережах, що компенсують залишковий струм, так що визначення струму може бути обмежене лише робочою частотою. Отже, електричні величини, що характеризують режим мережі з резистивним заземленням нейтралі у випадку стійкого замикання на землю, визначаються наступним співвідношенням:

напруга у нейтралі

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A G_{\Pi}}{3Y_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (3.1)$$

напруга на пошкодженій фазі А

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A (3Y_{\Phi} + G_N)}{3Y_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (3.2)$$

струм в місці замикання на землю

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_A \cdot G_{\Pi} = \frac{\dot{E}_A (3Y_{\Phi} + G_N) G_{\Pi}}{3Y_{\Phi} + G_{\Pi} + G_N}; \quad (3.3)$$

напруга у непошкоджених фазах В та С

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_B (3Y_{\Phi} + G_N) - \dot{E}_A G_{\Pi}}{3Y_{\Phi} + G_N + G_{\Pi}}; \quad (3.4)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_C (3Y_{\Phi} + G_N) - \dot{E}_A G_{\Pi}}{3Y_{\Phi} + G_N + G_{\Pi}}. \quad (3.5)$$

У виразах (3.1) – (3.5)

$E_A = E_B = E_C = E_\Phi$ - діючі значення фазних ЕРС робочої частоти ω ;

$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_\Phi = G_\Phi + j\omega C_\Phi$ - повні провідності фаз відносно землі;

$G_\Pi = 1/R_\Pi$ – провідність в місці ЗНЗ;

G_N – провідність заземлюючого резистора.

Якщо рівняння (3.5) представити у вигляді

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_A}{R_\Pi + \frac{1}{3G_\Phi + G_N + j3\omega C_\Phi}}. \quad (3.6)$$

то з цього виразу (3.6) відповідатиме схема заміщення нульової послідовності, яка має зображення на рис. 3.2.

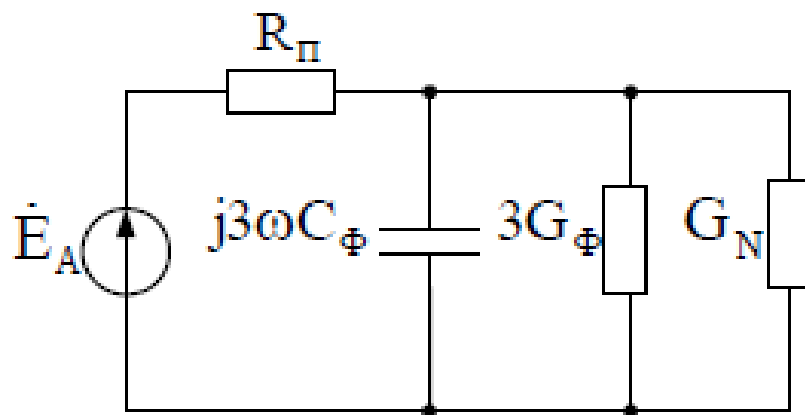


Рис. 3.2. Схема заміщення нульової послідовності мережі

Прийнявши, як і раніш за базисну сумарну емністну провідність фаз мережі відносно землі ($3\omega C_\Phi$) перетворимо рівняння (3.6) наступним чином

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_C \frac{1}{R_{\Pi^*} + \frac{1}{d + G_{N^*} + j}}, \quad (3.7)$$

де

$$R_{\Pi*} = R_{\Pi} 3\omega C_{\Phi}, \quad d = \frac{3G_{\Phi}}{3\omega C_{\Phi}}, \quad G_{N*} = \frac{G_N}{3\omega C_{\Phi}},$$

$$\dot{I}_C = \dot{E}_A 3j\omega C_{\Phi} - \text{ємнісна складова струму ЗНЗ.}$$

Якщо прийняти до уваги, що $R_{II}=0$, то отримуємо

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_a + \dot{I}_{aN} + \dot{I}_C \quad (3.8)$$

де $\dot{I}_a = \dot{I}_C d$ - активна складова струму ЗНЗ, що обумовлена активною провідністю фаз електричної мережі відносно землі,

$\dot{I}_{aN} = \dot{E}_{\Phi} G_N$ - активна складова струму ЗНЗ, що обумовлена заземленням нейтралі через активний опір (резистор).

Очевидно, що при цьому відносна провідність G_N дорівнює також відношенню додаткового активного струму до ємнісного струму ЗНЗ, яке позначимо як:

$$I_{aN*} = \frac{I_{aN}}{I_C}$$

Тоді для абсолютних значень величин отримуємо наступні вирази:
напряга у нейтралі

$$U_N = \frac{E_{\Phi}}{\sqrt{(dR_{\Pi*} + G_{N*}R_{\Pi*} + 1)^2 + R_{\Pi*}^2}}; \quad (3.9)$$

напряга на непошкоджених фазах

$$U_{CB} = E_{\Phi} \sqrt{\left(0,5 + \frac{(dR_{\Pi*} + G_{N*}R_{\Pi*} + 1)}{(dR_{\Pi*} + G_{N*}R_{\Pi*} + 1)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \pm \frac{R_{\Pi*}}{(dR_{\Pi*} + G_{N*}R_{\Pi*} + 1)^2 + R_{\Pi*}^2}\right)^2} \quad (3.10)$$

У виразі (3.10) знак «+» відноситься до фази, яка випереджає по відношенню до пошкодженої, а «-» до фази, яка відстає.

На рис. 3.3 побудовано графіки зміни напруг на нейтралі і непошкоджених фазах в залежності від перехідного опору при різноманітних значеннях G_N .

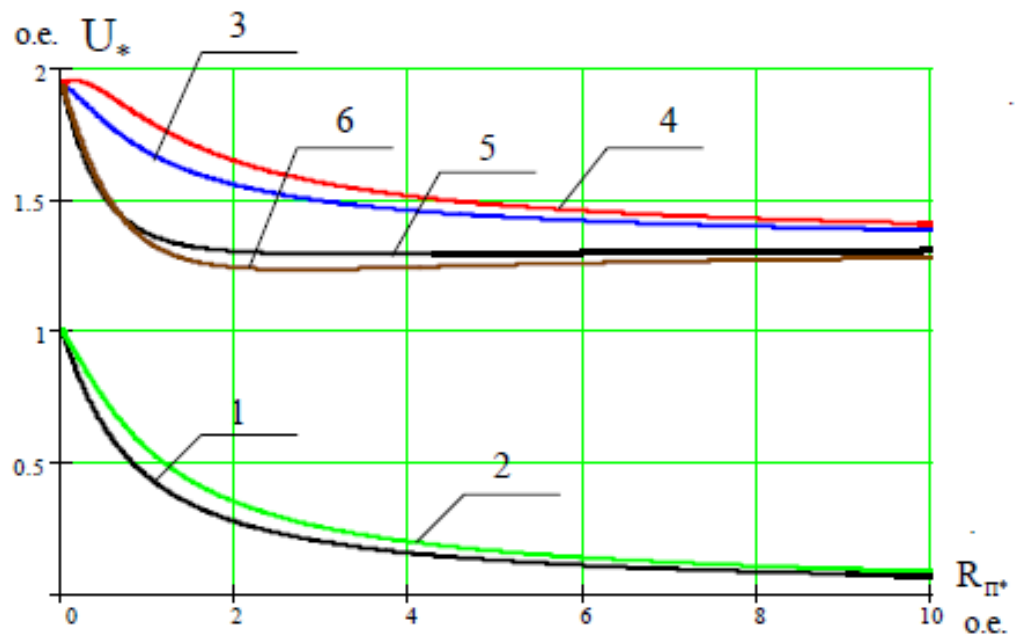


Рис. 3.3. Графіки зміни напруги в залежності від перехідного опору

1, 2 – напруга на нейтралі

3, 4 – напруга у фазі С

5, 6 – напруга у фазі В

1, 3, 5 – побудовані при $G_{N*}=1,0$

2, 4, 6 – побудовані при $G_{N*}=0,50$

Як можна було очікувати, при $R_{П}=0$ й при будь-якому значенні G_N напруга на неушкоджених фазах дорівнює лінійній напрузі мережі і, для прийнятих нами значень G_{N*} опір прямої й зворотної послідовностей значно

менше за опір нульової послідовності. Також стає цілком зрозумілим і те, що при одних і тих же самих значеннях перехідного опору напруга нульової послідовності менша, ніж в мережі з ізольованою нейтраллю й в мережі з компенсацією ємнісного струму.

Напруга зміщення нейтралі, яка викликана ємнісною несиметрією, при відсутності ЗНЗ визначається так само як і в мережі з ізольованою нейтраллю при умові $G_L = G_N$

$$U_{NCK} = E_{\Phi} \frac{\alpha_c}{\sqrt{(d + G_{N*})^2 + 1}}. \quad (3.11)$$

З виразу (3.11) випливає, що при резистивному заземленні нейтралі напруга зміщення на ній при інших рівних умовах (певній ємнісній несиметрії) тим менше, чим більше значення G_N .

3.2. Вплив заземлення нейтралі через резистор на величину перенапруг в електричній мережі

В принципі, заземлюючий резистор впливає на перехідні процеси після гасіння дуги. При розгляді перехідних процесів, викликаних обривом фази в ємнісних мережах компенсації струму, передбачалося, що дугогасильні реактори практично не впливають на ці перехідні процеси через їх дуже високий опір на високих перехідних частотах. Не є очевидним фактом, що такого ефекту немає, коли нейтраль заземлена через резистор.

Спочатку розглянемо вплив опору заземлення на перехідний процес зміни заряду ємності неущожденної фази. При оцінці цього впливу нехтуємо індуктивністю трансформатора заземлення, яка, очевидно, має більший вплив, оскільки вищезгаданий процес має високочастотну природу.

Отримані у попередньому розділі рівняння показують, що перехідний процес у неушкоджених фазах однаковий й проходить синхронно. Саме тому схема заміщення, яка відображає цей самий процес представлена на рис. 3.4, де $U_{пр}$ – (пробивна напруга), тобто та при якій запалюється дуга.

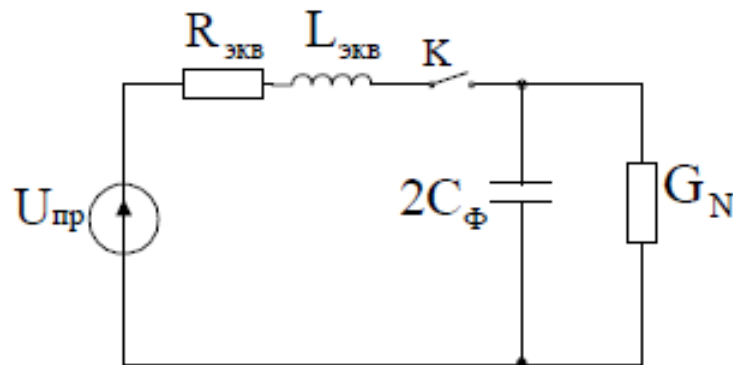


Рис. 3.4. Схема заміщення контуру неушкоджених фаз для розгляду перехідного процесу при запалюванні дуги

Диференціальне рівняння, яке описує вільну складову перехідного процесу у схемі (рис. 3.4), щодо напруги на її ємності

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \left(\frac{G_N}{2C_\Phi} + \frac{R_{\text{экв}}}{L_{\text{экв}}} \right) \frac{du_c}{dt} + \left(\frac{1}{2L_{\text{экв}} C_\Phi} + \frac{G_N R_{\text{экв}}}{2L_{\text{экв}} C_\Phi} \right) u_c = 0 \quad (3.12)$$

Коефіцієнти цього диференціального рівняння

$$\delta_1 = \left(\frac{G_N}{4C_\Phi} + \frac{R_{\text{экв}}}{2L_{\text{экв}}} \right) \quad \omega_{p1}^2 = \left(\frac{1}{2L_{\text{экв}} C_\Phi} + \frac{G_N R_{\text{экв}}}{2L_{\text{экв}} C_\Phi} \right)$$

є відповідно коефіцієнтом загасання та квадратом резонансної частоти еквівалентного контуру ємнісного перехідного струму, які з урахуванням того, що

$$G_N = G_{N^*} 3\omega C_\Phi$$

представимо їх у іншому вигляді

$$\delta_1 = \delta'_1 + \frac{3}{4} \omega G_{N^*} \quad (3.13)$$

$$\omega_{p1}^2 = \omega_{p1}'^2 + 3\delta'_1 \omega G_{N^*} \quad (3.14)$$

де
$$\delta'_1 = \frac{R_{\text{згб}}}{2L_{\text{згб}}}, \quad \omega_{p1}'^2 = \frac{1}{2L_{\text{згб}} C_\Phi}$$

- відповідно коефіцієнт загасання та резонансна частота контуру ємнісного перехідного струму, не враховуючи при цьому вплив заземлюючого резистора.

Таким чином, в електричній мережі із резистивним заземленням нейтралі коефіцієнт загасання ємнісного перехідного струму ЗНЗ визначається за формулою (3.13), а частота вільних коливань буде дорівнювати

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_{p1}^2 - \delta_1^2} \quad (3.15)$$

Як видно з виразів (3.13), (3.14), ступінь впливу провідності резистора, що використовується для заземлення на значення δ_1 та ω_{p1} залежить від їхніх вихідних значень при $G_{N^*}=0$. Щоб визначити кількісну оцінку цього впливу, згідно рекомендацій [5] приймаємо конкретні значення $\delta_1=420,0$; $\omega_{p1}=12566,0$ 1/с (2000 Гц) відповідно до прийнятих при розрахунках перенапруг значенням $k_{д1}=0,10$ (див. розділ 2).

Зазначені залежності δ_1 та ω_{p1} в функції від G_{N^*} наведено на рис. 3.5.

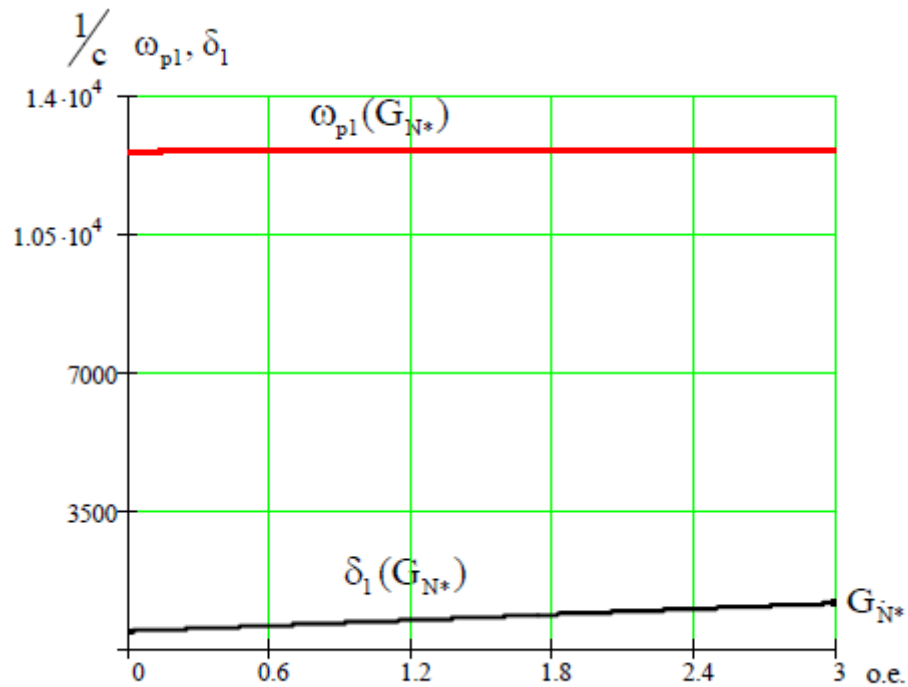


Рис. 3.5. Залежності коефіцієнта загасання та резонансної частоти від провідності резистора

Як бачимо, навіть при відносно великих значеннях G_{N*} перехідний процес, зумовлений запалюванням дуги, залишається коливальним і слабо загасаючим. Тому навіть у мережах з резистивним заземленням нейтралі гасіння дуги може відбутися, коли повний струм КЗ перейде через нуль, тобто майже через половину циклу складової з частотою ω_1 , або коли вимушена складова струму перейде через нуль.

Залишкова напруга на нейтралі через ці заряди є однією з основних причин великих перенапруг і тому визначає значення G_{N*} , при якому виконується умова, що надлишковий заряд майже повністю розряджається за півциклу промислової частоти після гасіння дуги. Схема обміну нульової послідовності на цьому етапі показана на рисунку 3.6.

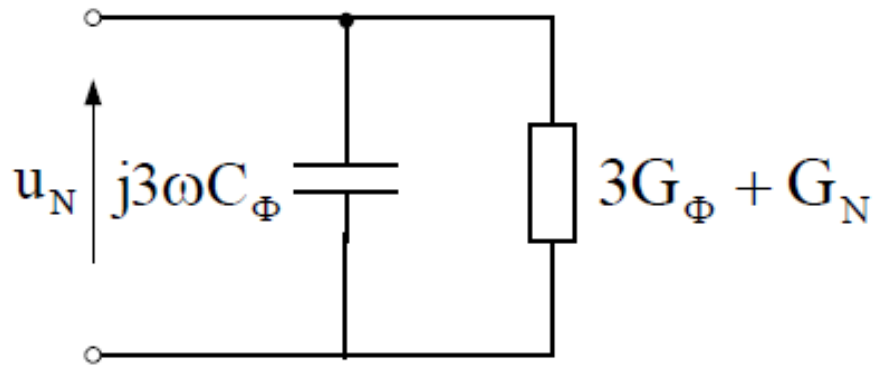


Рис. 3.6. Схема заміщення електричної мережі із резистивним заземленням нейтралі після згасання дуги

Напруга на нейтралі після згасання електричної дуги змінюється по закону [5]

$$u_N = u_{N0} e^{-\frac{t}{\tau_N}} \quad (3.16)$$

де u_{N0} – напруга в нейтралі на момент гасіння дуги

$$\tau_N = \frac{3C_\Phi}{3G_\Phi + G_N} \quad \text{- постійна часу процесу стікання (витоку) надлишкових зарядів.}$$

Помноживши та поділивши цей вираз для τ_N на промислову частоту ω , можемо привести його до вигляду

$$\tau_N = \frac{1}{(d + G_{N*})\omega} \quad (3.17)$$

Так як перехідний процес по умові (3.16) практично закінчується за час, що дорівнює $3\tau_N$, шукане нами значення G_{N*} знайдемо із умови

$$3\tau_N = \frac{T}{2} \quad (3.18)$$

де $T=2\pi/\omega$ - період напруги промислової частоти (50 Гц).

Підставляючи (3.18) у (3.17) отримуємо

$$G_{N*} = \frac{3}{p} - d \quad (3.19)$$

Оскільки $d \ll 3/p$, буде що $G_{N*} \approx 3/p = 0,9550$.

Іншими словами, позитивний ефект від резистивного заземлення, який проявляється в усуненні наслідків накопичення надлишкового заряду при повторному запалюванні дуги, практично повністю реалізується, коли додаткова ефективна складова струму замикання приблизно дорівнює ємнісній складовій.

Оскільки вартість заземлювального резистора зменшується зі зменшенням струму, на який він розрахований, доцільно розглянути, якою мірою зберігається ефект зниження перенапруги при використанні $G_{N*} < 3/p$.

У прийнятому діапазоні значень G_{N*} (приблизно від 0,0 до 1,0) перехідний струм в місці ЗНЗ може залишатися коливальним із порівняно невеликим згасанням, то і в електричній мережі із резистивним заземленням нейтралі формування факту перенапруги може відбуватися по будь-якій з відомих теорій (Петерсона, Петерса, Слепяна, Беякова) [5].

Проаналізуємо в роботі, як змінюються розрахункові перенапруги по теорії Петерсена при зміні G_{N*} . Для цього, очевидно, слід у вираз для напруги на нейтралі, яка формується при черговому циклі запалювання й загасання дуги, ввести певний множник, що враховує його затухання за півперіоду промислової частоти. В результаті одержимо

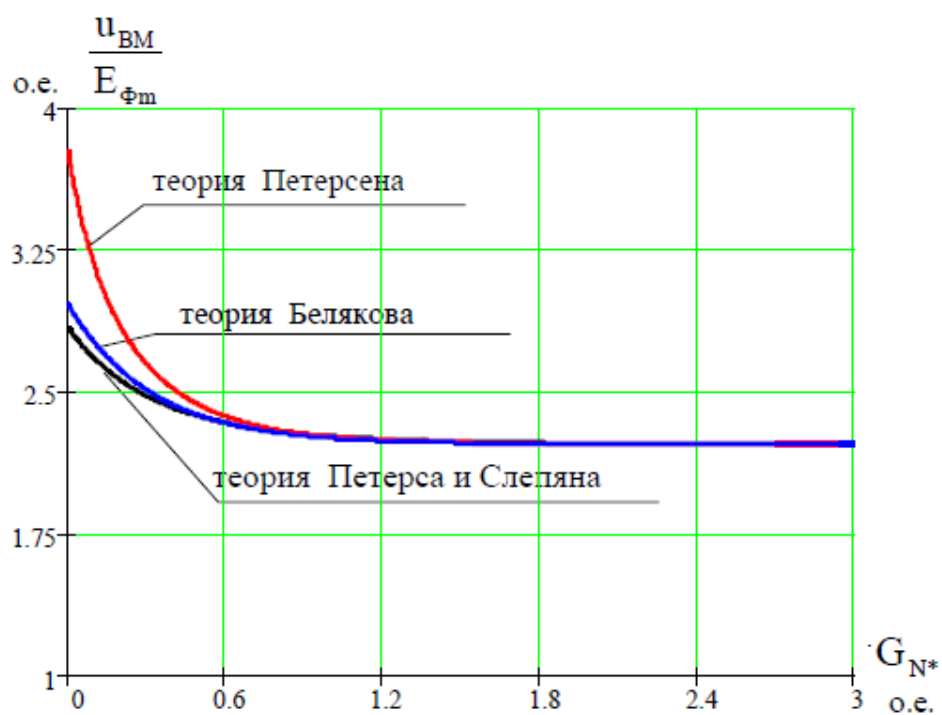
$$u_{Nn} = \frac{2}{3} u_{BM(n-1)} e^{-p(d+G_{N*})} \quad (3.20)$$

При цій умові максимальна розрахункова перенапруга буде:

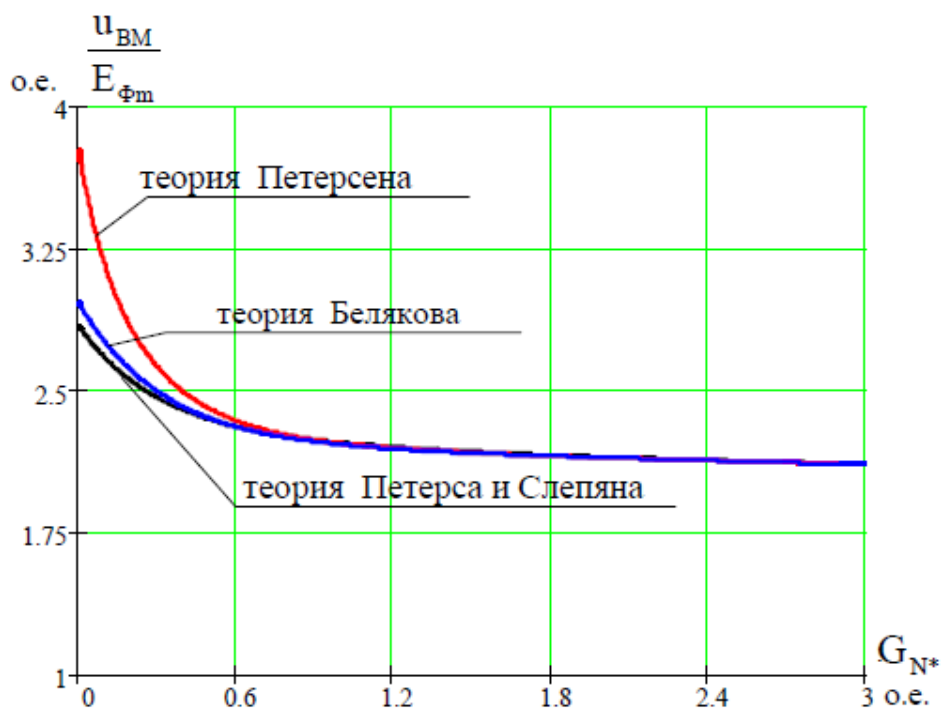
$$u_{BMn} = E_{\Phi m} \frac{1,5 + (1 - k_c)(1 - k_{\delta 1})}{1 - \frac{2}{3}(1 - k_c)(1 - k_{\delta 1})e^{-\pi(d+G_{N*})}} \quad (3.21)$$

Залежність перенапруги від G_{N*} згідно виразу (3.21) наведено на рис. 3.7. Зазначимо, що при розрахунку перенапруг було враховано певне збільшення загасання напруги із частотою ω_1 відповідно до формули (3.13), тому було прийнято конкретне значення $\delta_1=420,0$ (1/с).

Вплив заземлення через опір на формування перенапруг згідно з теорією Петерса і Слепяна пояснюється не тільки тим, що нейтральна напруга спадає до того, як дуга знову запалюється, але й тим, що момент переходу вимушеної складової струму КЗ через нуль зміщений відносно максимальної нейтральної напруги. Тому в момент гасіння дуги початкове значення нейтральної напруги менше амплітуди фазної напруги, а отже, час від моменту гасіння дуги до найближчого максимуму напруги пошкодженої фази становить менше половини циклу (рис. 3.8).



а)



б)

Рис. 3.7. Залежності перенапруг від провідності резистора

а) враховуючи вплив резистора на коефіцієнт затухання

б) не враховуючи вплив резистора на коефіцієнт затухання

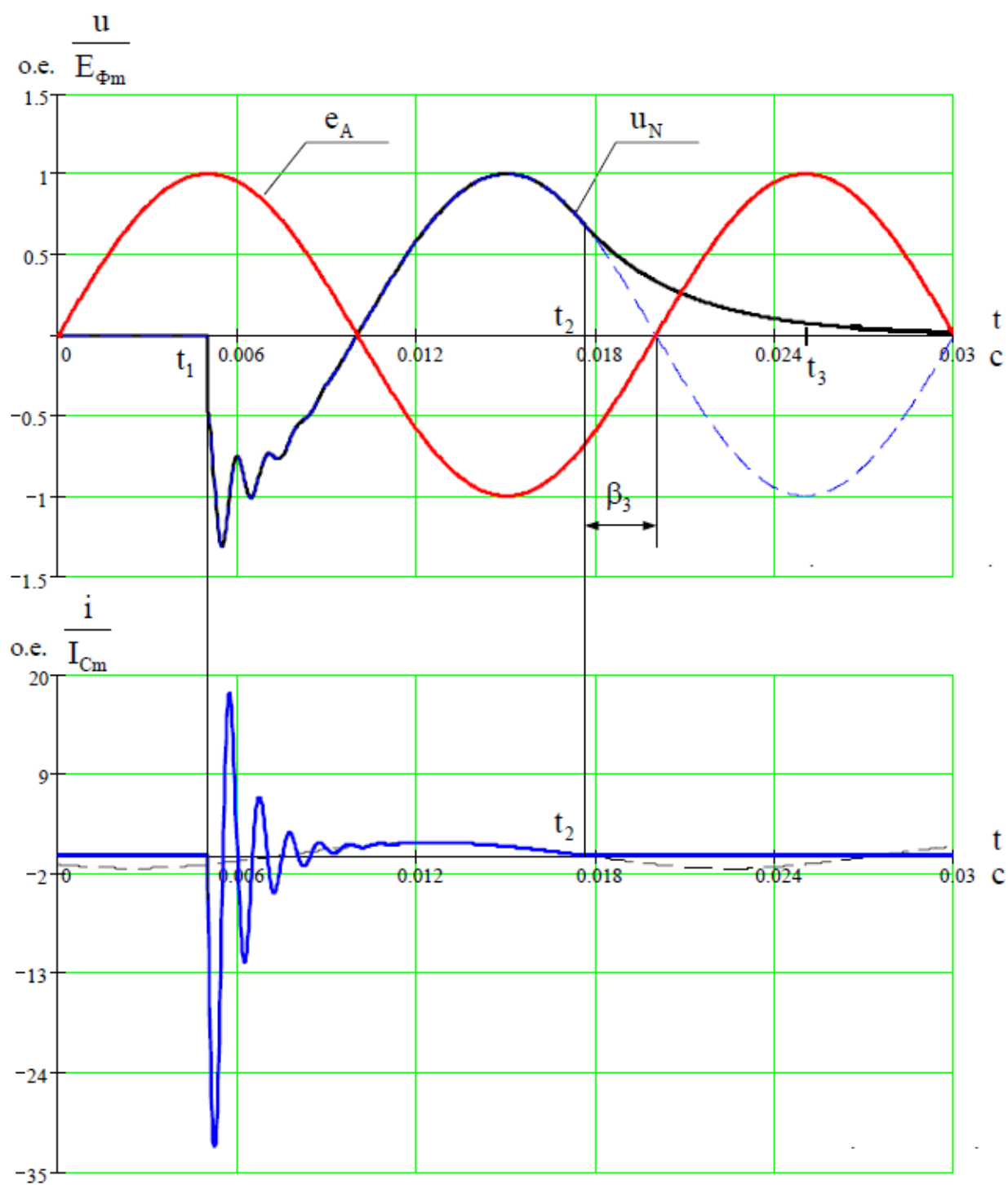


Рис. 3.8. Вплив заземлення мережі через резистор на перенапруги за теоріями
 Петерса та Слєпіана
 (процес показаний при умові $G_{N^*}=1$)

При згасанні електричної дуги у момент часу t_2 , коли повністю згасає перехідний процес, що викликаний попереднім запалюванням дуги, напруга у нейтралі (рис. 3.8) дорівнює

$$u_N = -E_{\Phi m} \sin(2\pi - \beta_3) = E_{\Phi m} \sin(\beta_3) \quad (3.22)$$

Кут (β_3) визначається співвідношенням між активною й ємнісною складовими струму ЗНЗ, тобто

$$\beta_3 = \arctg \frac{1}{d + G_{N*}} \quad (3.23)$$

Проміжок часу від моменту загасання дуги (момент часу t_2) до моменту досягнення максимуму напруги у пошкодженій фазі (момент часу t_3) буде:

$$t_3 - t_2 = \frac{\frac{\pi}{2} + \beta_3}{\omega} \quad (3.24)$$

Напруга у пошкодженій фазі на момент повторного запалювання дуги (момент часу t_3)

$$u_A(t_3) = E_{\Phi m} + E_{\Phi m} \sin(\beta_3) e^{-\left(\frac{\pi}{2} + \beta_3\right)(d + G_{N*})} \quad (3.25)$$

В момент часу t_3 вимушена складова напруги на неушкоджених фазах дорівнює $1,50E_{\Phi m}$. Якщо знехтувати, її зміною за півперіоду перехідного ємнісного струму одержимо

$$u_{BM} = u_{CM} = 1,5E_{\Phi m} + u_A(t_3)(1 - k_C)(1 - k_{\delta 1}) \quad (3.26)$$

Для визначення впливу заземлення нейтралі через активний опір на виникнення перенапруг розглянуто спад напруги в точці нейтралі на половині промислової частоти з теорії Белякова.

$$u_{\text{ВМ}} = 1,5E_{\Phi\text{м}} + (1,2E_{\Phi\text{м}}e^{-\pi(d+G_{N^*})} + E_{\Phi\text{м}})(1-k_c)(1-k_{\delta 1}) \quad (3.27)$$

Ефект зниження перенапруг в мережі істотно проявляється при значенні $G_{N^*} < 1,0$ починаючи приблизно із значення $G_{N^*} = 0,50$. Цей факт має важливе значення бо дозволяє одержати суттєвий ефект при меншій потужності, а отже й при меншій вартості резистора.

3.3. Електричні мережі із комбінованим заземленням нейтралі

В останні роки в ряді досліджень [10,11] було запропоновано заземлення нульової точки з паралельним дугогасильним реактором і резистором з вибраним постійним опором. Цей метод заземлення нейтралі відомий як комбінований.

Зрозуміло, що додавання резистора паралельно з дугогасильним реактором на практиці лише збільшує коефіцієнт ослаблення d . Тому всі співвідношення, отримані для мереж з компенсацією ємнісного струму, підходять для аналізу мереж з комбінованим заземленням нейтралі.

Комбіноване заземлення нейтралі слід застосовувати там, де характеристики компенсації ємнісного струму є достатніми для всіх факторів, що впливають на ефективність компенсації, і де з якихось причин компенсація ємнісного струму не може бути реалізована з малими збуреннями. Типовими прикладами випадків, коли слід використовувати комбіноване заземлення нейтралі, є повітряні мережі з відносно великими ємнісними струмами, розташовані у вічній мерзлоті або скелястому ґрунті, де важко виконати обладнання підстанції або заземлювачі опор з опором, який

би забезпечував прийнятні напруги дотику та кроку при замиканнях на землю.

Перешкодою для використання звичайної ємнісної компенсації струму для зменшення струмів замикання на землю та зниження напруги дотику і кроку є велика ємнісна несиметрія фаз мережі. Це може призвести до неприпустимого зміщення нейтралі під час нормальної роботи, якщо компенсація налаштована неправильно.

В принципі, можна автоматично підтримувати компенсаційну затримку таким чином, щоб напруга зсуву нейтралі не перевищувала допустимого значення $0,15 U_{\phi, \text{ном}}$. У цьому випадку розузгодження компенсації може досягати 20% і більше [5].

Такі розузгодження знижують ефективність компенсації ємнісного струму. Поєднання суперечливих вимог зменшення струму замикання на землю та обмеження напруги зсуву нейтралі в нормальному режимі може бути досягнуто паралельним підключенням дугогасильних реакторів та резистивних елементів.

Багато фахівців [10, 11] вважають доцільним спільне заземлення нейтралі у всіх випадках, включаючи свідомо симетричні кабельні мережі. Це пояснюється тим, що дугові перенапруги можна зменшити без застосування дорогих технічних засобів - дугогасильних реакторів і пристроїв для їх плавного автоматичного регулювання.

Тому значення опору резистора, підключеного паралельно дугогасильному реактору, зазвичай можна вибрати з наступних двох умов

1. Межа перенапруги дуги при максимально можливому налаштуванні компенсації під час роботи.
2. Максимально можливий робочий ємнісний коефіцієнт небалансу мережі та обмеження напруги зсуву нейтралі при точному налаштуванні компенсації.

Далі визначаємо сумарне значення коефіцієнту демпфування, при якому може бути виключена причина виникнення дугових перенапруг. При цьому необхідно, щоб за певний час t_M напруга на нейтралі після загасання дуги практично повністю зникла. Це буде лише у тому випадку, якщо постійна часу затухання амплітуди вільних коливань у нейтралі $\tau_3 = 2/d\omega$ буде задовольняти наступній вимозі:

$$3\tau_3 = t_M \quad (3.28)$$

При виконанні цієї умови (3.28), напруга на ушкодженій фазі після чергового обриву дуги практично не зможе перевищувати амплітуду фазної напруги, тому що після закінчення часу $t_M e^{-3\tau_3} \approx 0,50$. Тому й перенапруження не зможе перевищити значення, яке має місце при первинному пробії ізоляції в момент, коли напруга на ушкодженій фазі дорівнюватиме $E_{\phi m}$. При самих початкових умовах побудови кривих розрахункових перенапруг в мережі, наведених на рис. 3.9, воно дорівнює $2,220 E_{\phi m}$.

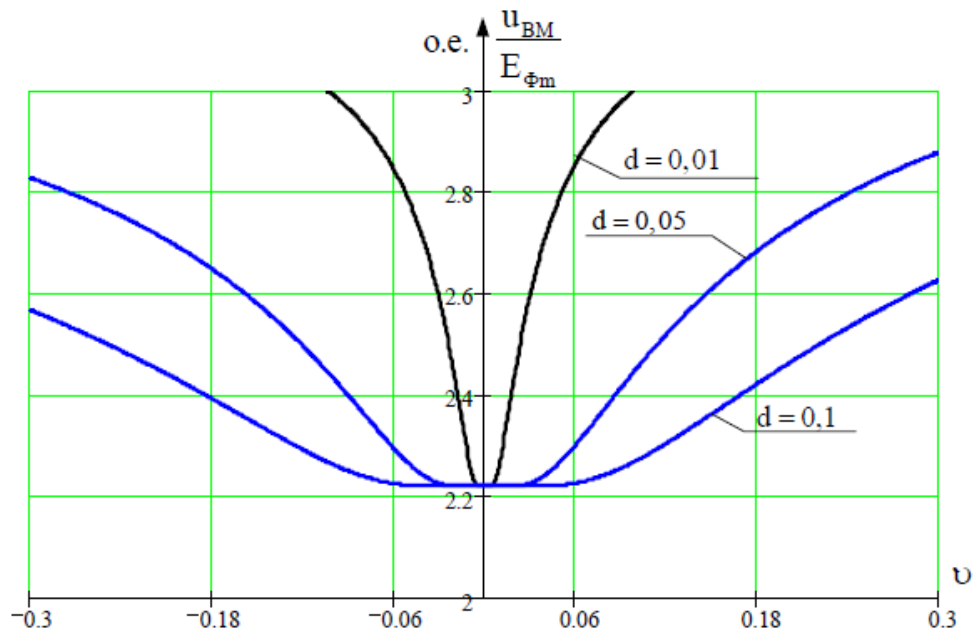


Рис. 3.9. Розрахункові напруги у неушкоджених фазах при повторних запалюваннях електричної дуги

Підсумовуючи вищесказане - необхідний сумарне значення d в залежності від точності настройки компенсації можна визначити з системи рівнянь, що отримана з умови (3.28).

$$t_M \omega \left[1 - \sqrt{(1 - \nu) - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right] = \pm \pi, \quad (3.29)$$

$$\frac{6}{d\omega} = t_M.$$

Результати розрахунків по формулі (3.29) наведено на рис. 3.10. Як видно звідти, при повторному запаленні дуги ефект зниження дугових перенапружень практично повністю реалізується, якщо виконується наступна умова $d \approx |\nu|$.

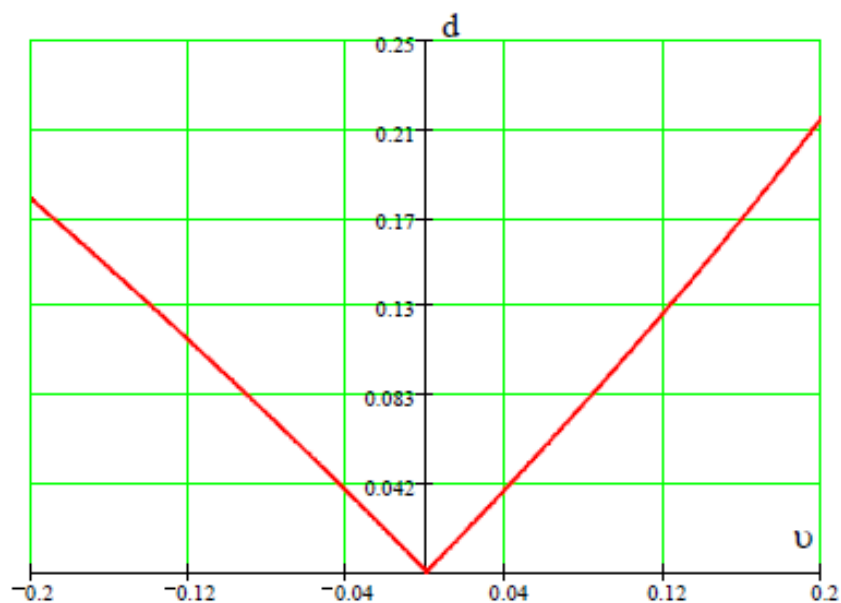


Рис. 3.10. Значення коефіцієнту демпфування, при якому проявляється ефект зниження перенапруг при комбінованому заземленні нейтралі

Тут також як і в мережі із резистивним заземленням нейтралі можна очікувати, що найбільше ефект зниження перенапруги буде мати місце при умові $d \approx |\nu|$. Цей факт підтверджується побудованими кривими залежностей розрахункових перенапруг (рис. 3.11), які отримані при зміні d при кількох значеннях ν .

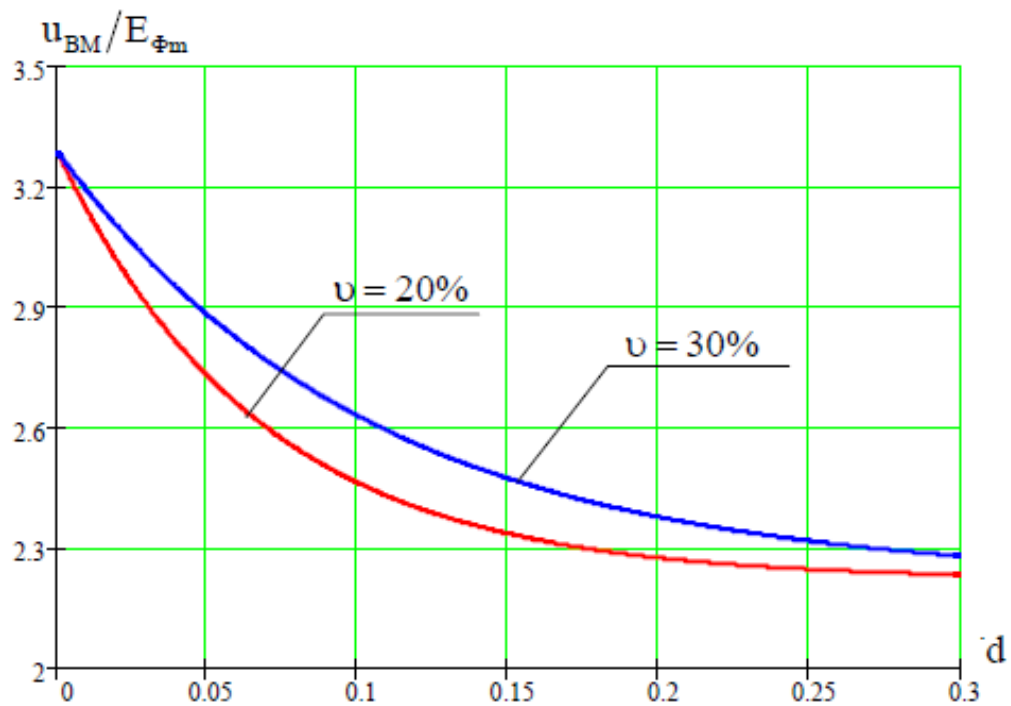


Рис. 3.11. Залежність перенапруг від коефіцієнту демпфування в мережі із комбінованим заземленням нейтралі

3.4. Практика застосування резистивного та комбінованого заземлення в електричних мережах напругою 10 – 35 кВ

Режим заземлення нейтралі мережі 6-35 кВ у разі замикання на землю визначає величину перенапруги, що впливає на ізоляцію всієї електрично приєднаної мережі, і, зрештою, режим нейтралі має значний вплив на результат «аварійної ситуації». Слід зазначити, що в останні роки з'являється

все більше пропозицій розглядати однофазні замикання на землю (ОЗЗ) як аварійну ситуацію і відключати пошкоджені приєднання негайно або із затримкою (як це робиться в більшості мереж середньої напруги в Білорусі) [12].

Відомо, що полімерна ізоляція надзвичайно чутлива до високочастотних перенапруг, що виникають внаслідок однофазних замикань на землю та перемикань високовольтними вимикачами, особливо вакуумними. На відміну від паперової або масляної ізоляції, полімерна ізоляція не самовідновлюється. Це зумовлює необхідність мінімізації часу, необхідного для пошуку пошкоджених фідерів у разі замикання на землю в таких мережах, а також зменшення не тільки рівня перенапруги, але й тривалості її дії. Прикладом може слугувати застосування низькоомних резистивних заземлень нейтралі із захистом від замикань на землю із відключенням пошкодженої ділянки.

3.4.1. закордонний досвід

При експлуатації мереж середньої напруги (до 70 кВ за стандартами МЕК) використовуються три основні типи заземлення нейтралі:

- Ізольована нейтраль;
- Заземлення нейтралі через дугогасильний реактор (ДР), так звану котушку Петерсена;
- Заземлення нейтралі через активний резистор (високовольтний резистор).

У деяких випадках сьогодні широко використовується так зване комбіноване заземлення нейтралі, коли ДР і резистор підключаються паралельно.

Заземлення нейтралі через котушки Петерсена використовується в деяких європейських країнах (Німеччина, Швейцарія, Австрія, та Фінляндія), переважно в мережах з повітряними лініями. Тому охоплення розподільчих

мереж цим типом заземлення нейтралі не є 100%. Наприклад, станом на 2000 рік 35% мереж 10 кВ у Німеччині працювали з ізольованою нейтраллю, 63% - з компенсуючою нейтраллю і лише 2% - з нейтраллю з резистивним заземленням [13]. У таблиці 3.1 показано використання конкретних методів заземлення нейтралі в декількох країнах світу. Цікавим є той факт, що котушки Петерсена виробляються лише в п'яти країнах: Російській Федерації, Австрії (TRENCH), Чехії (EGE), Китаї (JUNFA) та Індії.

Табл. 3.1.

Країна	Спосіб заземлення нейтралі			
	Ізольована	Заземлена через реактор	Заземлена через резистор	Глухозаземлена
Україна	+	+		
Австралія			+	+
Канада			+	+
США			+	+
Іспанія		+	+	+
Португалія			+	
Франція		+	+	
Японія	+		+	
Німеччина		+	+	
Австрія		+	+	
Бельгія			+	
Великобританія			+	+
Швейцарія		+	+	
Фінляндія	+	+	+	
Італія	+	+	+	
Чехія		+	+	
Словаччина		+	+	
Швеція		+	+	
Норвегія		+	+	

Перші промислові та комерційні мережі із заземленням нейтралі через резистори з'явилися у Франції в 1970-х роках з метою використання простої та надійної системи захисту від струмів короткого замикання та обмеження

переростання коротких замикань у системи з подвійним або багатофазним замиканням. Заземлення нейтралі здійснювалося через низькоомні резистори з розрахунковим струмом замикання на землю 500 А і навіть до 1000 А.

Резистори заземлення нейтралі виробляють понад 50 компаній по всьому світу: в Індії (NATIONAL RESISTORS ONIES), США (JENKINS), Італії (TELEMA), Німеччині (GINO ESE), Японії (MILUOKI RESISTOR), Канаді (AVTRON, ICP), Туреччина (HILKAR) тощо. - В принципі, слід використовувати стандарт ANSI/IEEE Std 32-1972 «Вимоги, термінологія та процедури випробувань пристроїв заземлення нейтралі» або його переклад «Вимоги, термінологія та процедури випробувань пристроїв заземлення нейтралі». Вимоги, терміни та процедури випробувань для пристроїв заземлення нейтралі» (перезатверджено у 1990 році) [12].

Методологічне обґрунтування використання резистивного заземлення нульової точки наведено в стандарті IEEE 142-1991 та його наступнику IEEE 142-2007 «Рекомендована практика заземлення промислових і комерційних енергосистем» або в перекладі «Рекомендована практика заземлення промислових і громадських енергосистем». У виданні 1991 року зазначено, що для високоомного заземлення нейтралі значення струму замикання на землю зазвичай не повинно перевищувати 10 А, а для низькоомного заземлення значення опору резистора повинно бути підібране таким чином, щоб забезпечити необхідний струм релейного захисту. Останнє твердження продубльовано в редакції стандарту IEEE Std 142 від 2007 року: «Для забезпечення струму, необхідного для селективного спрацьовування релейного захисту, можуть застосовуватися більші струми замикання на землю, як правило, в діапазоні від 100 до 1000 А».

У чинній редакції стандарту IEEE Std 142, 2007, межа між високоімпедансним і низькоімпедансним заземленням визначається відношенням струму заземлення за наявності резистора до струму трифазного замикання в конкретній мережі. Нейтральне заземлення вважається низькоомним, якщо (до 100-1000 А). В іншому випадку це

високоомне заземлення. Це означає, що для високоомних заземлювачів струм від резистора в режимі однофазного замикання на землю не повинен бути меншим за ємнісний струм УЗО в мережі.

Слід зазначити, що згідно зі стандартом IEEE 142 (обидві редакції), значення струму 10 А для УЗО відповідає лише режиму тривалого протікання без пошкодження обладнання і не слугує межею між високоомним заземленням нульової точки та низькоомним заземленням нульової точки в мережі.

Оцінка міжнародної світової практики засвідчує, що резистивне заземлення нейтралі – це найбільш широко використаний спосіб, який застосовується в електричних мережах середньої напруги закордонних промислових підприємств [14]. Одним із можливих варіантів виконання металевого резистора з номінальними параметрами $U_{\text{ном}} = 3,45 \text{ кВ}$, $I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$, $R_{\text{ном}} = 35,6 \text{ Ом}$, $T_{\text{терм}} = 10 \text{ с}$ наведено на рис. 3.12 а.





Рис.3.12

а) резистор 6,0 кВ/34, 5 Ом/100 А виробництва GINO ESE GmbH
(Німеччина)

б) резистор 2,5 кВ / 3,45 Ом/400 А виробництва Avtron Loadbank Inc
(США)

Фізично резистивні елементи зображеної конструкції являють собою «штамповані» листи чавуну, зібрані послідовно і з'єднані у два блоки з мідними шинами. Температура нагріву резистивних елементів становить 420 °С, а час спрацьовування - до 10 с. Максимальний нагрів перевищує 700 °С (для резистивних елементів з нікель-хромової сталі допустима температура нагріву в режимі навантаження, що перевищує номінальний час відключення, становить 650 °С).GINO ESE GmbH (Німеччина) та AVTRON Loadbank Inc. (США) показані на рис. 3.12.

Низькоомні резистори використовуються для заземлення нейтралі за кордоном, тоді як високоомні використовуються рідше. Для виготовлення самих резисторів використовуються такі металеві сплави, як ніхром, константан, чавун і алюмохромово сталь. Конструктивно такі резистори для

заземлення нульової точки виготовляються у вигляді корпусів з нержавіючої сталі з класом захисту IP 23, температура поверхні резистивного елемента за стандартом IEEE Std 32-1972 становить 610°C , а для імпульсних навантажень тривалістю 10, 30 і 60 с - 760°C . Згідно з національними стандартами (ГОСТ 11677-85, ГОСТ 24183-80), струмопровідні частини, безпосередньо підключені до обладнання, можуть нагріватися лише до 300°C . Це ставить під сумнів правомірність використання цих пристроїв опору в побуті.

3.4.2. вітчизняний досвід

В Україні на режим заземлення нейтралі через резистор в розподільних електричних мережах все частіше останнім часом акцентується тільки увага. Заземлення нейтралі через активний опір не є поширеним явищем через низку причин, пов'язаних із технічними, економічними та історичними факторами. Хоча існують методичні рекомендації щодо заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ через резистор, які розроблені Науково-проектним центром розвитку Об'єднаної енергетичної системи України НЕК «Укренерго» (НПЦР ОЕС України) 2018 року.

З кінця 90-х р. по теперішній час в деяких країнах СНД встановлені і знаходяться в експлуатації досить велика кількість резисторів для заземлення нейтралі типу РЗ виробництва ТОВ «ПНП Болід».

Резистори зарекомендували себе як ефективний засіб обмеження перенапруг в енергетичних установках, усунення однофазних замикань на землю та вирішення багатьох інших проблем. Використання композитних матеріалів в активних частинах і технології виготовлення дозволяють виробляти резистори, що характеризуються мінімальною індуктивністю і рівномірним розсіюванням потужності елементами цього високовольтного пристрою, що підвищує надійність і термін служби резистора і вигідно відрізняє його від резисторів традиційної провідникової технології інших виробників (наприклад, EGE).



Рис. 3.13 Резистор заземлення:

а— рідинний зовнішнього встановлення;

б — суцільний металевий внутрішнього встановлення



Рис. 3.14. Резистор РЗ-8000-51-35 на підстанції 110/35/10 кВ



Рис. 3.15. Резистори РЗ-800-15-6 в мережі ГРП ТЕЦ 6 кВ



Рис. 3.16. Резистори РЗ-4000-102-35 на ВРП-35 кВ

3.4.3. *схеми включення резисторів в нейтраль електричної мережі*

Спосіб підключення резистора до мережі може відрізнятися в залежності від наявності або відсутності нейтралі. У більшості випадків низькоомне та високоомне резистивне заземлення мереж 6-35 кВ, а також комбіноване заземлення нульової точки здійснюється через спеціально встановлений заземлюючий трансформатор нульової точки ТЗН. ТЗН - це понижуючий трансформатор 6-10-35/0,38 (0,23) кВ зі схемою з'єднання обмоток $Y-0/\Delta$ з резистором, підключеним до нейтральної точки обмотки високої напруги [19].

Для організації нейтралі мереж 6-10 кВ також використовуються фільтри типу ФМЗО. Основні варіанти підключення резистора до нейтралі мережі показані на рисунку 3.17. Незалежно від обраного варіанту, резистор може бути підключений окремо або паралельно з ДГР.

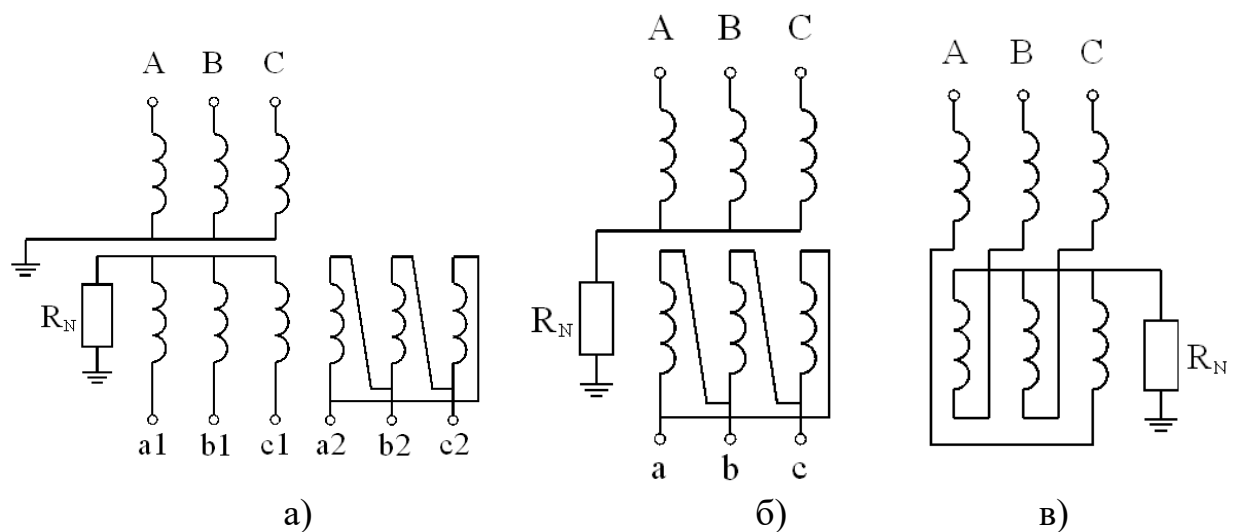


Рис. 3.17. Схеми включення резисторів в мережі 6 – 35 кВ

а) в нейтраль обмотки середньої напруги

б) в нейтраль обмотки високої напруги ТВП

в) в нейтраль ФМЗО

Це пов'язано з тим, що правильний вибір номіналу резистора захищає всю електрично підключену мережу обладнання від перенапруг на землю внаслідок дугових замикань.

Ефективний релейний захист від замикань на землю може бути реалізований на основі резисторів в нейтральній точці, оскільки ефективний струм не залежить від резисторів, клімату та інших факторів (на відміну від ефективного струму витoku через ізоляцію) і протікає тільки через пошкоджене з'єднання. Там, де це можливо, слід використовувати спрямований захист від замикань на землю, враховуючи напрямок і фазу струму замикання на землю в лінії замикання.

Зокрема, роботи [17, 18] присвячені вибору типу, налаштуванню та роботі релейного захисту від коротких замикань при різних режимах заземлення нейтралі мереж середньої напруги.

Слід підкреслити, що відсутність селективного захисту від коротких замикань у приєднаннях електроустановок 6-35 кВ є вкрай негативним фактором з точки зору електробезпеки, оскільки не тільки збільшує час, необхідний для виявлення короткого замикання, але й підвищує перенапруги та ймовірність переростання короткого замикання в багатократне коротке замикання. Це особливо актуально при експлуатації мережі передачі в межах міста. Це не тільки міські кабельні мережі напругою 6-10 кВ. Наприклад, існують також кабельні лінії 35 кВ, прокладені безпосередньо в житлових і промислових зонах.

3.4.4. комбіноване заземлення нейтралі мережі

Наразі енергетичні та енергогенеруючі компанії розглядають комбіноване заземлення нейтралі, коли високоомний резистор підключається паралельно з дугогасильним реактором, як основний метод заземлення нейтралі, коли потрібно компенсувати ємнісні струми. Цей тип заземлення має явні переваги як над чисто резонансним заземленням нейтралі, так і над резистивним високоомним заземленням нейтралі. Правильно підібравши

резистор і точно налаштувавши ДГР на резонансний режим компенсації ємнісних струмів замикання на землю, перенапругу в мережі можна обмежити до $(1,80-2,0) U_{\phi}$, тобто майже лінійної напруги мережі. Безсумнівною перевагою такого режиму нейтралі є те, що селективний струмовий захист може бути реалізований навіть за допомогою простих струмових реле. Це пов'язано з появою додаткової активної складової в струмі КЗ, що визначається величиною нульового резистора.

Слід зазначити, що зарубіжні виробники дугогасильних реакторів і систем управління ними (TRENCH, EGE) використовують цей спосіб заземлення в дещо «усіченому» вигляді. Тобто, паралельно котушці підключається резистор високого опору (або резистор низького опору підключається до додаткової обмотки ДГР) на час дії ПЗВ. Такий спосіб підключення резистора пояснюється недоліками пристроїв автоматичного керування ДГР вищезазначених виробників, що базуються на старому принципі керування реактором, і не вирішує основної задачі - зниження перенапруги у разі замикання на землю, а лише слугує додатковим засобом виявлення пошкоджених приєднань.

Сучасне розуміння проблеми захисту від перенапруг при однофазних замиканнях на землю показує, що ефективність «чистої» компенсації ємнісних струмів в ОПН є низькою в мережах з великою кількістю гармонік вищих порядків, що циркулюють в колі нульової фази (КНФ). Згідно з експериментальними дослідженнями [12], значення вищих гармонік можуть досягати десятків відсотків від одиниці 50 Гц складової струму НЗП і не компенсуються ДГТ. Тому залишкові струми в точці замикання на землю, що визначаються некомпенсованими ємнісними струмами (струмами індуктивної перекомпенсації), активними струмами витоку на землю через ізоляцію та вищими гармоніками, можуть бути досить великими. У цьому випадку, звичайно, не доводиться говорити про самогасіння однофазних дуг (пряме призначення ДГР). Можливі також резонансні процеси у вищих гармоніках.

Однак, єдиною перевагою ступінчастих ДГР над плунжерними є їхня вартість. Це означає, що використання сучасних компенсаторів (які насправді є ступінчастими регулюючими реакторами), на жаль, обмежене суто з економічних причин.

Слід зазначити, що спосіб заземлення нейтралі через ДГР безпосередньо впливає на термін служби кабелів у змішаних кабельно-повітряних мережах: дослідження, проведені в Сибірському енергетичному інституті у 80-90-х роках, показали, що термін служби кабелів із заземленням нейтралі через ДГР скорочується вдвічі. Показано, що термін служби кабелю скорочується в два рази. Встановлено, що дворазове зменшення напруги (причому несиметричної) на оболонці заземленого кабелю знижує швидкість електрохімічної корозії приблизно в 10 разів. Тому максимальна симетрія мережі (наприклад, використання високовольтних резисторів) є дуже важливим питанням, особливо при використанні кабелів з деградованою ізоляцією.

Тому в мережах 6-35 кВ, де струм замикання на землю перевищує нормовані в ПУЕ значення (зазвичай 30, 20 і 10 А для мереж 6, 10 і 35 кВ і 10 А для мереж з лініями на залізобетонних опорах), паралельно з плунжером ДГР необхідно встановлювати високоомні резистори повинні бути встановлені високоомні резистори. Це забезпечує найбільш ефективну систему захисту від ЗНЗ.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Основні види робіт при заземленні електроустановок

Основні види робіт при заземленні в електроустановках включають наступні заходи:

- Проєктування заземлення:

Розрахунок необхідного опору заземлювального пристрою залежно від типу мережі, типу ґрунту та умов експлуатації.

Вибір матеріалів і конструкцій для заземлюючих електродів, враховуючи корозійні та механічні властивості.

- Монтаж заземлюючих пристроїв:

Установлення заземлюючих електродів (стрижнів, смуг, пластин) у ґрунт з урахуванням глибини та розміщення відповідно до проєкту.

З'єднання заземлюючих електродів між собою та з нейтраллю трансформатора або генератора.

Організація дренажних і антикорозійних заходів (якщо необхідно).

- Перевірка стану та параметрів заземлення:

Вимірювання опору заземлення, перевірка ізоляції, контроль корозії та механічного зношення елементів.

Випробування заземлюючих пристроїв на працездатність та відповідність нормативним вимогам.

- Обслуговування та технічний нагляд:

Регулярне обслуговування заземлювального пристрою, включаючи очищення з'єднань та перевірку на наявність корозії.

Оцінка умов ґрунту та коригування конструкції при зміні зовнішніх факторів (вологість, температура, забруднення).

Планове проведення вимірювань для оцінки змін у параметрах заземлення.

- Ремонт та модернізація:

Ремонт або заміна елементів, які мають ознаки зносу або корозії, у тому числі з'єднувальних деталей та електродів.

Модернізація системи заземлення для забезпечення кращої провідності або збільшення кількості заземлюючих електродів при підвищенні потужності мережі.

- Документування та звітність:

Оформлення технічної документації (акти випробувань, протоколи вимірювань).

Ведення журналу обліку стану заземлення та його періодичного технічного обслуговування.

Кожен із цих видів робіт виконується для забезпечення надійного захисту від ураження електричним струмом та безпеки роботи електрообладнання.

4.2. Розрахунок заземлення електроустановки

Відповідно до ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які під час роботи не контактують із струмопровідними частинами, але можуть опинитися під напругою, повинні бути заземлені. У трансформаторних підстанціях з напругою 10/0,38 кВ на стороні 0,38 кВ передбачено глухозаземлену нейтраль. Обмотки цехових трансформаторів виконані зі схемою з'єднання типу Δ/Y з нульовим виводом. Струм замикання на землю становить 27,0 А. Для цехового обладнання застосовується система заземлення. Цехові підстанції живляться від двох кабелів, прокладених в одній траншеї.

Ґрунт – чорнозем, 2-й кліматичний район.

Мета розрахунку зводиться до визначення вертикальних заземлювачів та довжини поєднувальної смуги з розміщенням цього на плані.

1. Визначається R_z норма на опір заземлення

Якщо пристрій для заземлення застосовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище 1000 В, то:

$$R_z \leq \frac{125}{I_z} = \frac{125}{27} = 4,64 \text{ Ом}$$

Згідно ПУЕ [7], якщо сумарна потужність струмоприймачів більше ніж 100 кВА то R_z повинно бути не більше 4 Ом. Тобто приймається $R_z = 4 \text{ Ом}$.

2. Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

3.

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{\text{табл}}$ табличне значення, для чорнозему $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

ψ - підвищуючий коефіцієнт, для держави Україна, щодо стрижневих заземлювачів $\psi = 1,40$.

4. Для одинарного вертикального заземлювача його опір:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{350}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 20,36 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – це довжина заземлювача і приймається 5,0 м; d – діаметр заземлювача (тут приймаються стрижні діаметром 2,50 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де h – глибина прокладки смуги (згідно [7] – 0,50...0,80 м).

Приймаються до встановлення електроди, що прокладені по замкнутому контуру, визначається орієнтовна кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3^n \cdot \eta_t} = \frac{20,36}{4 \cdot 0,59} = 8,638 \approx 9 \text{ шт}$$

де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l=4/5=0.8$, $\eta_o=0,59$.

а параметр $a = 4,0$ м – відстань між електродами згідно [7].

5. Довжина горизонтально-поєднувальної смуги:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м.}$$

6. Опір смуги, враховуючи її екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом,}$$

де η_n – коефіцієнт використання поєднувальної смуги із шириною $b = 10,0$ мм та товщиною $5,0$ мм.

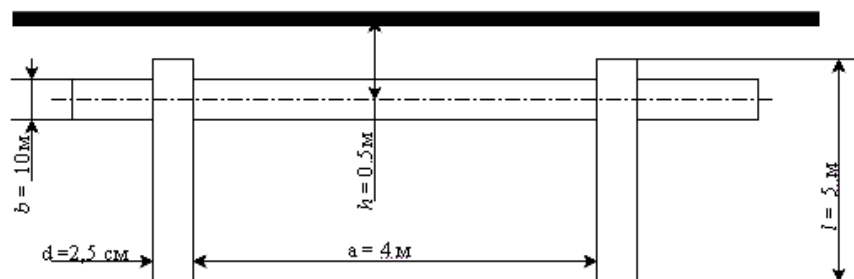


Рис. 4.1 - Схема прокладки заземлення електроустановки

6. Необхідний опір вертикальних заземлювачів, враховуючи опір поєднувальної смуги:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3}{R_n + R_3} = \frac{24 \cdot 4}{24 + 4} = 4,81 \text{ Ом.}$$

7. Остаточно визначаємо кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{20,36}{4,81 \cdot 0,59} = 7,492 \approx 8 \text{ шт.}$$

8. На останок проводимо перевірку опору заземлювача й порівнюємо одержане значення із нормою:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.}$$

Дійсний опір нашого заземлюючого пристрою із вісьмома заземлювачами не перевищує нормованого значення.

ВИСНОВКИ

1. Лінії електропередач є найменш надійною ланкою в системі електропостачання. Більшість аварійних відключень з різних причин відбувається саме в розподільчих мережах.

2. Найбільш типовою несправністю в мережі 10-35 кВ є однофазне замикання на землю, яке саме по собі не є аварією, але може спричинити високі багатократні перенапруги в мережі

3. Наразі не існує універсального та надійного захисту обладнання від пошкоджень, спричинених пунктом 2. Тому видається необхідним вирішувати цю проблему іншими способами, які б відповідали всім сучасним вимогам.

4. Одним з варіантів вирішення проблеми, порушеної в цій статті, може бути використання резистивного або комбінованого заземлення мережі, оскільки компенсація ємнісних струмів замикання на землю не призводить до бажаного результату

5. Останнім часом накопичено достатній досвід експлуатації резисторів на нейтралі мереж 6-35 кВ. Цей досвід є безумовно позитивним, оскільки після встановлення резисторів на нейтралі спостерігається помітне зменшення пошкоджень критичного мережевого обладнання та відповідне зменшення економічних втрат.

6. Використання резистивного та комбінованого заземлення нейтралі не тільки підвищує надійність обладнання в розподільчій мережі, але й дозволяє забезпечити ефективний релейний захист від ЗНЗ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Журахівський А.В. Надійність електричних систем і мереж / А.В. Журахівський, Б.М. Кінаш, О.Р. Пастух. – Львів. «Львівська політехніка», 2016. – 280 с.
2. Рожков П.П., Рожкова С.Е. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність електричних мереж» (для студентів 5 курсу денної форми навчання спец. 7.090603, 8.090603 - “Електротехнічні системи електроспоживання” та спец. 7.050701, 8.050701 - “Електротехніка та електротехнології”) Харків – ХНАМГ – 2008
3. Гапон Д.А. Резонансні явища у енергосистемі як причина пошкодження електрообладнання / Д.А. Гапон, Н.В. Рудевич // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. 2019. Ч. II. С. 139-140.
4. Саєнко Ю.Л. Дослідження режимів роботи захистів від однофазних замикань на землю у мережі з ізольованою нейтраллю за умови існування ферорезонансних процесів / Ю.Л. Саєнко, А.С. Попов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 4. С. 61-68.
5. 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
6. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 6 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебеда // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101-104.
7. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. 6-те видання, перероблене та доповнене. Затверджено та надано чинності: Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476
8. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник

/ Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців ; за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 530 с

9. Электричні мережі та системи. Режимы работы розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл. В.В. Кирик. – К. НТУУ «КПІ», 2014. – 130 с.

10. Методичні рекомендації щодо заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ через резистор. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77549

11. Визначення максимального опору резистора заземлення нейтралі мережі напругою 20 кВ. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/04557915-1d01-4331-a9ae-b784872a9ddf/content>

12. Емельянов Н.И., Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ // Энергоэксперт, 2010, №2, с.44-51.

13. Дослідження режимів роботи нейтралі розподільних електричних мереж 6-35 кВ на основі квазіфізичного моделювання. Режим доступу: <https://salo.li/adfB6bb>

14. Alff J., Houhanessian V. D., Zaengl W. S., Kachler A. J. Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus // Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 00CH37075. – 2000. – PP. 161-167.

15. Zaengl W. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment // Theoretical considerations. Part I. – IEEE Electr. Insul. Magazine. – Vol. 19. – 2013. – No.5. – PP. 5-19.

16. Глушко В., Ямный О. Е., Ковалев Э. П., Бохан Н. В.. Белорусские сети 6–35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор // Новости Электротехники, 2006, №3(39).

17. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с

18. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярський, Е.В. Майструк, І.П. Козярський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.