

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Спеціальні розділи електроенергетики»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

**за темою № 5 – Несиметричні ушкодження в розподільних мережах
напругою 6-35 кВ**

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокар'єв Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Види несиметричних ушкоджень і режими нейтралі мереж.
2. Однофазні замикання на землю.
 - 2.1. Струми замикання на землю в сталому режимі.
 - 2.2. Струми замикання на землю в перехідному режимі.
3. Амплітудні і фазові характеристики аварійних струмів при однофазних замиканнях на землю.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.
2. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.И. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.
5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. –Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

Допоміжна література:

1. Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О., Ялова О.М. Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювана енергетика. Навчальний посібник – Кривий Ріг –Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В. 2017, – 218 с.
2. Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О., Мельник О.Є. Нормативно-правова база енергетики Навчальний посібник – Кривий Ріг – Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О.В. 2017, – 150 с.
3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : www.rada.gov.ua.
2. Нормативні акти України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.nau.kiev.ua.
3. Закон України "Про ринок електричної енергії" – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
4. Закон України "Про електроенергетику" – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: - <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>.

Текст лекції

1. Види несиметричних ушкоджень і режими нейтралі мереж.

Основна маса ушкоджень у мережах підприємств зв'язана з ушкодженням ізоляції фаз мережі щодо землі, тобто появою несиметричних ушкоджень.

Несиметричні ушкодження в розподільних мережах напругою 6-35 кВ шахт можна розділити на два основних види:

- 1) замикання однієї фази мережі на землю;
- 2) подвійні замикання на землю (замикання на землю в різних точках розподільної мережі).

Крім приведеної загальної класифікації несиметричних ушкоджень варто розрізняти металеві (глухі) замикання на землю, дугові (через перемержовану дугу) і через перехідні опори в точках ушкодження.

Усі несиметричні ушкодження характеризуються появою складових (струми і напруги) нульової послідовності. Характеристики параметрів нульової послідовності в перехідному й у сталому режимі ушкодження визначаються видом ушкодження, параметрами електричної мережі і місцем ушкодження і, у значній мірі, режимом роботи нейтралі електричної мережі.

Однофазні замикання на землю (на корпус) з'являються внаслідок механічного ушкодження чи електричного пробоя ізоляції фази мережі щодо землі. Такі ушкодження в сталому режимі практично не представляють небезпеки для роботи електроприймачів, тому що симетрія міжфазних напруг практично не порушується, а значення струму однофазного замикання, як правило, у багато разів менше струму навантаження. Однак з погляду електробезпеки такі ушкодження становлять значну небезпеку за рахунок появи на корпусах електроустаткування значних потенціалів (особливо в перехідних режимах). Крім того при таких ушкодженнях різко зростає ймовірність появи подвійних замикань на землю.

Подвійні замикання на землю в різних місцях розподільної мережі з'являються в результаті дії внутрішніх перенапруг і є розвитком виниклих однофазних замикань на землю. Подвійні замикання можуть позначатися на режимі роботи електроприймачів і становлять особливу небезпеку з погляду поразки людей електричним струмом.

Такі ушкодження за певних умов супроводжуються появою високих потенціалів на корпусах усього заземленого електроустаткування (практично по мережі, що заземлює, розподіляється лінійна напруга).

Аварійні струми при подвійних замиканнях на землю можуть досягати значень небезпечних для елементів електричних мереж і устаткування.

Електричні мережі напругою 6 - 35 кВ відповідно до ПУЕ можуть працювати з ізольованою нейтраллю, з компенсованою нейтраллю (з метою компенсації ємнісного струму замикання на землю) і з включенням у нейтраль мережі резистора (з метою створення додаткової активної складової струму замикання в аварійному режимі).

У загальному випадку оцінка ефективності і вибір режиму роботи нейтралі розподільних і живильних мереж здійснюється на основі техніко-економічного порівняння варіантів. При цьому визначальними критеріями оцінки режимів нейтралі варто вважати: надійність електропостачання; електробезпеку; забезпеченість захистом від однофазних замикань на землю і якість її роботи; економічність системи.

Мережі з цілком ізольованою нейтраллю.

Такий режим нейтралі мережі не завжди є оптимальним з погляду зазначених раніше критеріїв. За інших рівних умов надійність електропостачання електроприймачів чи надійність розподільних мереж в основному визначається пошкоджуваністю елементів мережі і якістю роботи пристроїв релейного захисту. Ступінь впливу зазначених факторів на надійність роботи розподільних мереж залежить від режиму нейтралі, що у свою чергу визначає рівень внутрішніх перенапруг і характер перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю. Рівень перенапруг впливає на пошкоджуваність і електробезпеку електричних мереж і їхніх елементів, а характер перехідних процесів – на якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю.

Для реальних параметрів розподільних мереж максимальне значення напруги між здоровими фазами і землею може досягати рівня 4,5 фазної напруги. Для цих же мереж теоретичний максимум напруги зсуву нейтралі складає трикратну фазну напругу.

Однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю супроводжуються перехідними процесами, що виникають у момент появи замикання й в момент відключення ушкодженої ділянки (процес відновлення напруги в мережі). Відзначені перехідні процеси забезпечують значну частину помилкових спрацьовувань пристроїв захисту від замикань на землю в мережах з цілком ізольованою нейтраллю.

Системи електропостачання з цілком ізольованою нейтраллю в порівнянні з мережами з іншими режимами нейтралі не вимагають додаткових капітальних витрат. Однак експлуатаційні витрати в мережах з цілком ізольованою нейтраллю за рахунок більшої пошкоджуваності, а також за рахунок збитку від перерв електропостачання значно більше, ніж у мережах, що працюють з іншими можливими режимами нейтралі.

Слід також зазначити, що можна до деякої міри знизити експлуатаційні витрати і збиток від перерв за рахунок застосування устаткування й електричних мереж з більш високим рівнем ізоляції, що, природно, вимагає додаткових капітальних вкладень.

Мережі з компенсованою нейтраллю.

Компенсація ємнісних струмів замикання на землю здійснюється включенням у нейтраль мережі індуктивності, за допомогою якої при замиканні на землю створюється індуктивна складова струму однофазного замикання на землю, що має в точці замикання напрямок, протилежний ємнісній складовій струму замикання. Ефективність компенсації ємнісних

струмів і ефективність роботи електричних мереж з компенсованої нейтраллю в значній мірі залежить від режиму настроювання пристрою, що компенсує. Більшість дослідників при цьому віддають перевагу резонансному настроюванню індуктивності компенсуючого пристрою, з ємністю мережі щодо землі.

Крім резонансного з ємністю мережі режиму настроювання пристрою, що компенсує, розрізняють також режим недокомпенсації (залишковий реактивний струм замикання на землю носить ємнісний характер) і перекомпенсації (залишковий реактивний струм замикання на землю носить індуктивний характер).

Якщо оцінювати надійність електропостачання електроприймачів пошкоджуваністю елементів мережі і якістю роботи релейного захисту, то необхідно відзначити, що в основному застосування компенсованих мереж, де потрібна дія захисту на відключення, стримується другою умовою. Що стосується пошкоджуваності елементів розподільних мереж, то необхідно відзначити безпосередній зв'язок цього показника з режимом настроювання компенсуючого пристрою, тому що саме настроюванням компенсуючого пристрою визначається рівень перенапруг у мережі при однофазних замиканнях на землю.

На рис. 1 показані криві залежності максимальної кратності перенапруг від ступеня розстройки компенсації. Значення коефіцієнта η , що враховує перенапруги, що знижують, фактори, у загальному випадку залежить від частоти коливань вільних складових струмів замикання, довжин ліній розподільної мережі, розташування місця ушкодження щодо джерела, опору в ланцюзі замикання і для реальних параметрів розподільних мереж зазначений коефіцієнт знаходиться на рівні 0,8...0,9.

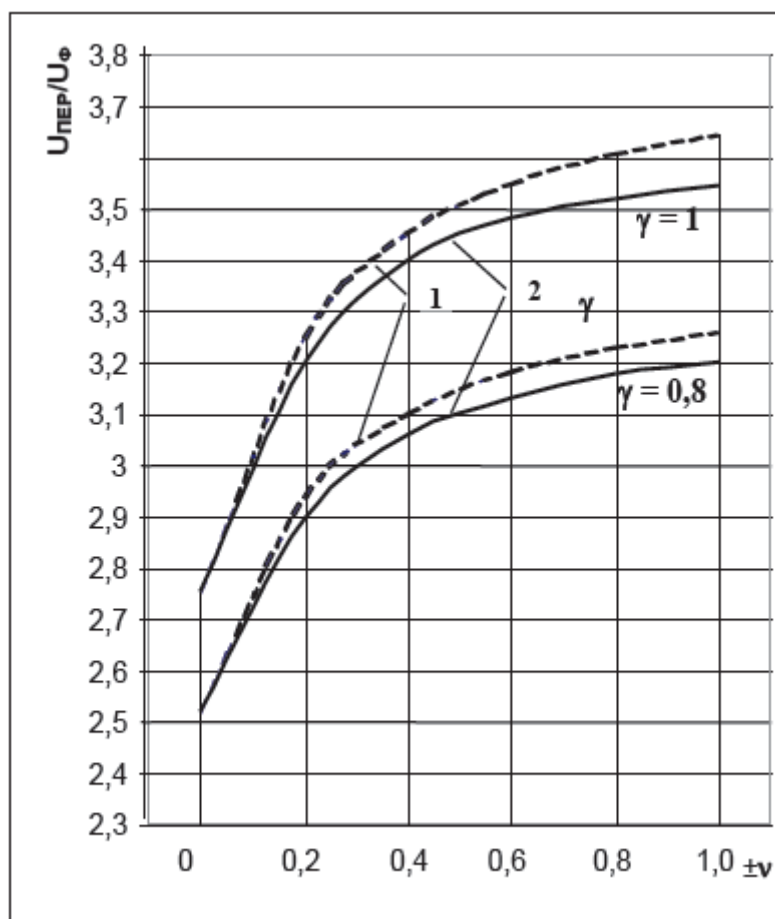


Рисунок 1 - Залежності максимальної кратності перенапруг від ступеня розстройки компенсації в режимі: 1 – перекомпенсації; 2 – недокомпенсації

З рис. 1 видно, що при резонансному настроюванні пристрою, що компенсує, а також при його розстройці в межах 5%, навіть теоретичні перенапруги на неушкоджених фазах не можуть перевищити 2,7 УФ. Зниження рівня перенапруг обумовлено створенням зручного шляху для стоків статичних зарядів по фазах за рахунок включення в нейтраль мережі дугогасящого реактора. Збільшення ступеня розстройки компенсації від 5 до 30...40% приводить до швидкого наростання рівня перенапруг. Необхідно відзначити, що при розстройці пристрою, що компенсує, на 20% від резонансної, ефективність пристроїв, що компенсують, у частині обмеження перенапруг при замиканнях на землю практично не відчувається в порівнянні з мережами з цілком ізольованою нейтраллю.

Перенапруга в нейтралі мережі, приблизно в 1,5...2 рази менше кратності перенапруг на неушкоджених фазах, що також сприяє зниженню пошкоджуваності елементів системи електропостачання.

Одним з факторів, що роблять вплив на вибір режиму настроювання компенсуючих реакторів є можливість порушення нормальної роботи мережі за рахунок резонансних явищ у компенсованих мережах. У реальних розподільних мережах спостерігається постійна чи тимчасова несиметрія ізоляції фаз мережі щодо землі. З огляду на те, що в кабельних мережах

ємнісний опір ізоляції значно менше активного, можна вважати, що несиметрія створюється ємністю фаз мережі. Максимальна напруга зсуву нейтралі UOC в компенсованих мережах у відповідності з режимом резонансного настроювання від ємнісної несиметрії може бути визначене за співвідношенням сумарного ємнісного струму замикання на землю I_c й активної складової залишкового струму I_a :

$$\dot{U}_{oc} = U_n I_c / I_a$$

Для зменшення напруги зсуву нейтралі варто вживати заходів несиметрії, що приводять до зменшення напруги, чи збільшення залишкового активного струму замикання.

Необхідно нагадати, що ефективність компенсації ємнісних струмів замикання на землю спостерігається при резонансному і близьких до нього режимах настроювання пристроїв, що компенсують. З огляду на можливу зміну параметрів розподільних мереж (оперативні й аварійні переключення, нарощування ЛЕП і т.п.), необхідно орієнтуватися на застосування пристроїв автоматичного настроювання дугогасящих реакторів. При резонансному настроюванні пристрою, що компенсує, і при незначних розстройках компенсації в електричних мережах запаси електричної міцності ізоляції стосовно перенапруг, що впливають, збільшуються до 30%.

Мережі з активним опором у нейтралі.

Основною причиною помилкових спрацьовувань захистів від замикань на землю в мережах з цілком ізолюваною і компенсованою нейтраллю варто вважати виникнення в мережі після відключення ушкодженого приєднання (чи після самоліквідації ушкодження) коливального процесу з частотою близької до частоти 50 Гц. Одним з ефективних методів усунення коливання є зменшення добротності коливального контуру, що досягається зменшенням значення активного опору ізоляції мережі щодо землі, що включено паралельно реактивним опорам ізоляції. У результаті з'являється активна складова струму, що накладається на електричну мережу і збільшує активну складову струму однофазного замикання на землю. Ефективність методу подавлення перехідного процесу істотно виявляється при величині створюваного активного струму замикання на землю на рівні 50% від ємнісного.

Електричні мережі з резистором у нейтралі, володіють, у порівнянні з мережами з цілком ізолюваною чи компенсованою нейтраллю, більш високою надійністю за рахунок поліпшення якості роботи пристроїв захисту від однофазних замикань на землю, виключення ферорезонансних процесів і зменшення пошкоджуваності елементів системи електропостачання. Останнє обумовлено значним зниженням внутрішніх перенапруг, що супроводжують однофазні замикання на землю.

На рис. 2 показана залежність максимальної кратності внутрішніх перенапруг у мережі з резистором у нейтралі від співвідношення активної і ємнісний складових струму однофазного замикання на землю $K_a = I_a / I_c$.

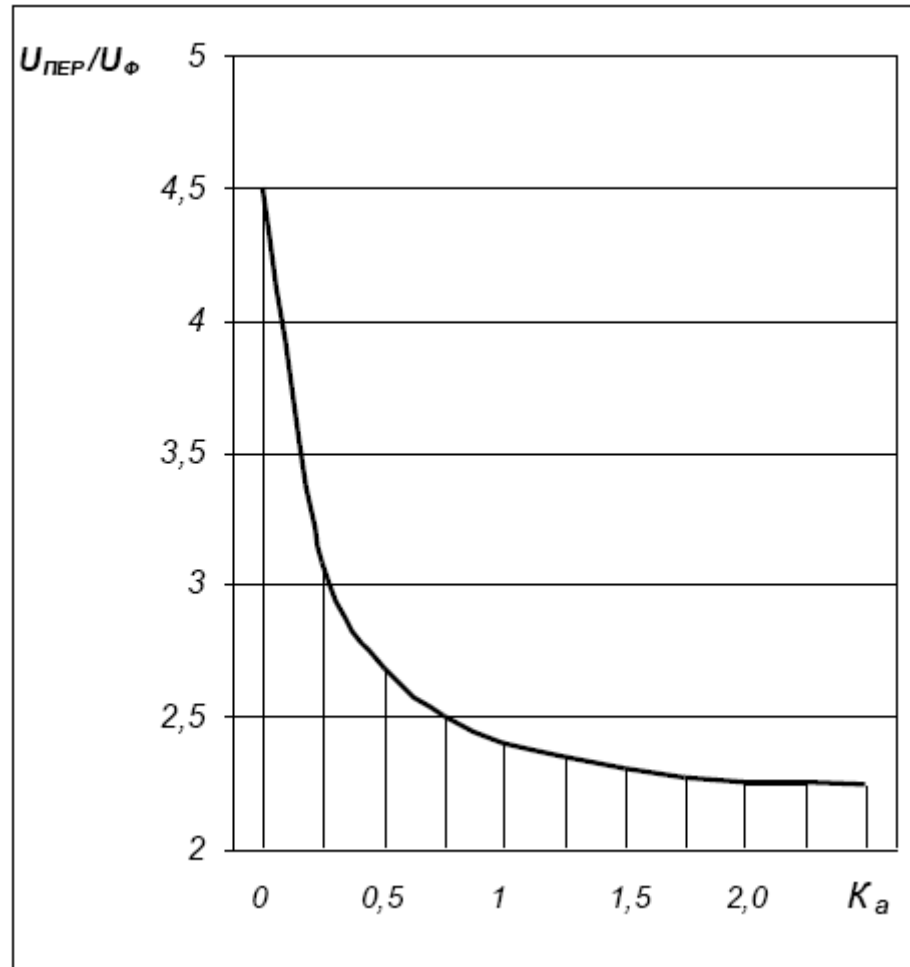


Рисунок 2 - Залежність максимальної кратності перенапруг у мережі з резистором у нейтралі від відношення активної і ємнісний складових струму замикання

За рахунок зниження пошкоджуваності елементів мережі і поліпшення якості роботи пристроїв захисту від однофазних замикань на землю значно зменшуються й експлуатаційні витрати.

2. Однофазні замикання на землю.

Для оцінки характеру процесів у мережах з різними режимами нейтралі і впливу їх на умови електробезпеки і працездатність застосовуваних і створюваних засобів захисту від замикань на землю, необхідно вивчити характер зміни амплітудних і фазових значень напруги і струмів нульової послідовності в сталому і перехідному режимах однофазного замикання.

Найбільш розповсюдженим і доступним методом дослідження аварійних режимів у системах електропостачання є метод математичного моделювання, заснований на формалізації досліджуваних процесів і побудови приватних математичних моделей. Використання для цієї мети активного експерименту в умовах діючої системи електропостачання сполучена з організаційними труднощами і, крім того, зв'язана зі створенням

умов підвищеної небезпеки поразки електричним струмом і зі створенням небезпечних для устаткування аварійних режимів. У загальному випадку математичну модель як сукупність математичних виражень, що зв'язують параметри об'єкта з характеристиками досліджуваного процесу, одержують у результаті формалізації досліджуваного процесу і побудови його формалізованої схеми з необхідним ступенем наближення до дійсності.

2.1. Струми замикання на землю в сталому режимі.

У симетричній трифазній системі лінійні (межфазні) напруги представляють рівносторонній трикутник. При відсутності навантаження

вектори фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ при строгій рівності провідностей ізоляції фаз мережі щодо землі утворюють симетричну трипроменеву зірку фазних напруг, а нейтраль мережі має потенціал, що дорівнює потенціалу землі. При порушенні рівності провідностей ізоляції фаз мережі щодо землі точка нульового потенціалу системи зміститься, і нейтраль системи одержить потенціал \dot{U}_o щодо землі, а симетрія фазних напруг щодо землі порушиться.

На підставі загальноприйнятих допущень схема заміщення розподільної мережі для дослідження аварійних струмів буде мати вид представленої на рис. 3. Отримана схема враховує у своїй структурі лише ті елементи і зв'язки, що впливають на досліджувані аварійні струми при замиканнях однієї фази на землю. На рисунку прийняті наступні позначення: Y_n – провідність нейтральної точки мережі що-до землі; Y_A, Y_B, Y_C – провідності відповідно фаз А, В і С щодо землі; y – провідність перехідного опору в точці замикання; \dot{U}_o – напруга зсуву нейтралі мережі або напруга нульової послідовності; $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазні напруги живильного трансформатора (напруги фаз мережі відносно нейтралі системи); \dot{I}_n – струм через провідність нейтральної точки мережі щодо землі; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – струми через провідності щодо землі відповідних фаз; \dot{I}_z – струм однофазного замикання на землю.

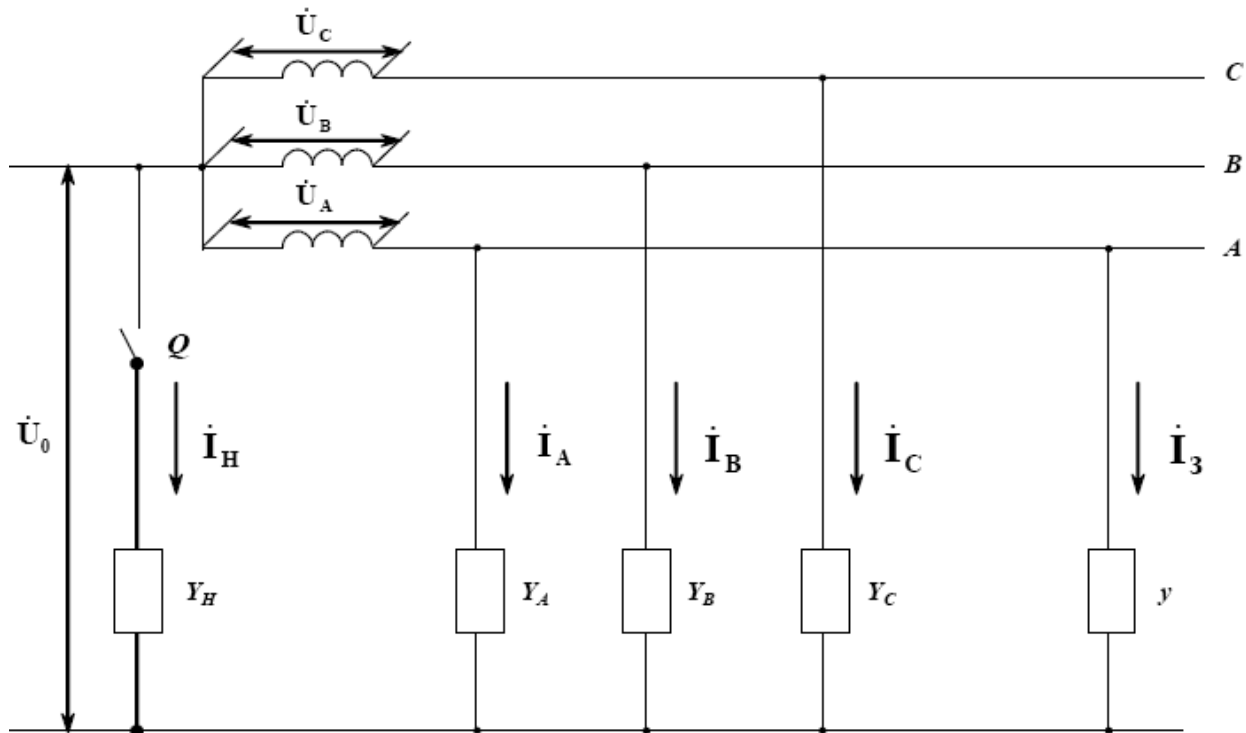


Рисунок 3 - Схема заміщення розподільчої мережі.

Мережа з цілком ізолюваною нейтраллю.

З врахуванням того, що

$$\dot{I}_3 = \dot{U}'_A y; \dot{I}_A = \dot{U}'_A Y_A; \dot{I}_B = \dot{U}'_B Y_B; \dot{I}_C = \dot{U}'_C Y_C$$

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_0; \dot{U}'_B = \dot{U}_B + \dot{U}_0; \dot{U}'_C = \dot{U}_C + \dot{U}_0$$

і приймаючи в увагу, що система є симетричною, для якої справедливе співвідношення

$$Y_A = Y_B = Y_C = Y,$$

після відповідних підстановок і перетворень одержимо в загальному виді вираження для струму однофазного замикання на землю в мережі з цілком ізолюваною нейтраллю

$$\dot{I}_3 = -3\dot{U}_0 Y = 3\dot{U}_\phi Y \frac{y}{3Y + y},$$

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C \quad \text{і} \quad y = \frac{1}{r}, \quad \dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$$

де
землі R і

- напруги фаз мережі щодо

C – відповідно активний опір ізоляції і ємність усієї електрично зв'язаної мережі щодо землі; r – перехідний опір у точці замикання фази на землю.

Діюче значення струму однофазного замикання на землю, що враховує всі складові ізоляції щодо землі мережі з цілком ізольованою нейтраллю:

$$I_3 = 3U_\phi \frac{\sqrt{(R+3r+3\omega^2 C^2 R^2 r)^2 + j(\omega C R^2)^2}}{(R+3r)^2 + (3\omega C R r)^2}.$$

У реальних мережах напругою 6-35 кВ систем електропостачання підприємств активна складова опору ізоляції щодо землі більш ніж на порядок перевищує ємнісну складову і, природно, впливає на значення струму замикання на землю. Можна, без врахування названого опору, одержати спрощену формулу для струму замикання:

$$I_3 = 3U_\phi \frac{\omega C}{\sqrt{1+(3\omega C r)^2}}$$

Мережа з компенсованою нейтраллю.

Прийнявши на схемі заміщення, представленій на рис. 3 провідність нейтральної точки мережі щодо землі рівною провідності пристрою, що компенсує ($Y_H = Y_K$), і вважаючи вимикач Q, що знаходиться у включеному положенні, провівши необхідні перетворення одержимо в загальному виді вираження для струму однофазного замикання на землю в мережі з компенсованою нейтраллю:

$$\dot{I}_3 = -\dot{U}_0(3Y + Y_K) = \dot{U}_\phi y \frac{3Y + Y_K}{3Y + Y_K + y},$$

$$Y_K = \frac{1}{R_K} - j \frac{1}{\omega L}$$

Де $\frac{1}{\omega L}$ - провідність пристрою, що компенсує.

Для випадку повної компенсації ємнісної складової струму однофазного замикання на землю, тобто резонансного настроювання компенсуючого пристрою з ємністю мережі щодо землі ($I_C = I_L$ чи $k = I_C / I_L = 3\omega^2 CL = 1$), струм однофазного замикання на землю в сталому режимі буде

$$I_3 = 3U_\phi \frac{3r + R}{3R_K r + Rr + R R_K}.$$

З виразу видно, що в резонансному режимі настроювання дугогасячого реактора струм однофазного замикання на землю в сталому режимі є чисто активним і визначається практично тільки активними опорами ізоляції мережі щодо землі і пристрою, що компенсує.

Якщо зневажити активними втратами в сердечнику компенсуючого пристрою $R_K = \infty$ одержимо

$$I_3 = 3U_\phi \frac{1}{R+3r}; \quad \text{та при } r=0, \quad I_{3\text{м}} = 3U_\phi \frac{1}{R}.$$

Загальний вираз для струму однофазного замикання на землю електричної мережі з компенсованою нейтраллю можна записати по іншому:

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_\phi \frac{3Y_y}{3Y+Y_K+y} + \dot{U}_\phi \frac{Y_K y}{3Y+Y_K+y} = \dot{I}_{3\text{с}} + \dot{I}_{3\text{к}}.$$

З останнього вираження видно, що струм однофазного замикання на землю в мережі з компенсованою нейтраллю в загальному випадку за іншими рівними умовами складається з двох складових:

- $I_{3\text{с}}$ – струм обумовлений провідністю ізоляції щодо землі всієї електрично зв'язаної мережі;

- $I_{3\text{к}}$ – струм обумовлений провідністю компенсуючого пристрою.

Мережа з резистором у нейтралі.

Прийнявши на схемі заміщення провідність нейтральної точки мережі щодо землі рівною провідності резистора включеного в нейтраль $Y_H = Y_R$, після перетворень одержимо в загальному виді вираз для струму однофазного замикання на землю для мережі з резистором у нейтралі:

$$\dot{I}_3 = -\dot{U}_0(3Y+Y_R) = \dot{U}_\phi y \frac{3Y+Y_R}{3Y+Y_R+y},$$

$$I_3 = U_\phi y \frac{3Y}{3Y+Y_R+y} + U_\phi y \frac{Y_R}{3Y+Y_R+y} = I_{3\text{с}} + I_{3\text{R}}.$$

З останнього виразу видно, що струм однофазного замикання на землю в мережі з резистором у нейтралі в загальному випадку за інших рівних умов складається з двох складових:

- $I_{3\text{с}}$ – струм обумовлений провідністю ізоляції щодо землі всієї електрично зв'язаної мережі;

- $I_{3\text{R}}$ – струм обумовлений провідністю включеного в нейтраль резистора.

Діюче значення другої складової, або струм, що протікає через включеного в нейтралі резистора при однофазному замиканні на землю, виражений через параметри мережі і резистора буде дорівнювати

$$I_{3\text{R}} = U_\phi \frac{R}{\sqrt{(3R_a r + R R_a + R r)^2 + (3\omega C R R_a r)^2}}.$$

Без обліку активного опору ізоляції мережі щодо землі, що більш ніж на порядок перевищує ємнісне, одержимо спрощений вираз для струму однофазного замикання на землю в мережі з резистором у нейтралі

$$I_3 = U_\phi \frac{\sqrt{(9\omega^2 C^2 R_a r + R_a + r)^2 + (3\omega C R_a^2)^2}}{(R_a + r)^2 + (3\omega C R_a r)^2}.$$

Максимальне значення струму, чи струм металевого ($r = 0$) однофазного замикання на землю для тих же умов буде дорівнювати

$$I_{3M} = U_\phi \frac{\sqrt{1 + 9\omega^2 C^2 R_a^2}}{R_a}.$$

2.2. Струми замикання на землю в перехідному режимі.

Перехідний процес характеризує зміну електричних величин відповідних переходу системи з одного стійкого стану в інше і стосовно до систем електропостачання являє собою результат накладення змін електричних величин, що представляють собою перехідні аварійні складові, на електричні величини нормального режиму. Для оцінки дії пристроїв захисту від замикань (витоків) на землю важливо мати уяву про перехідні процеси як на початку аварійного режиму, так після його завершення, тобто, після відключення або самоліквідації замикання на землю.

Перехідний процес у початковій стадії аварійного режиму.

У мережах з ізольованою нейтраллю ушкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз приводить до повного перерозподілу напруг фазних проводів у всій системі і джерелом зміни є місце ушкодження. Перехідний процес характеризується в цьому випадку стіканням заряду з провідників ушкодженої фази і розряду їх до потенціалу землі та переносом додаткового заряду неушкодженим фазам для надання їм нового потенціалу щодо землі. Відповідно до спрощеної схеми заміщення мережі, представленої на рис. 4, запишемо вираз для максимальних значень трьох складових струму металевого замикання на землю, що створюють струм замикання в перехідному режимі.

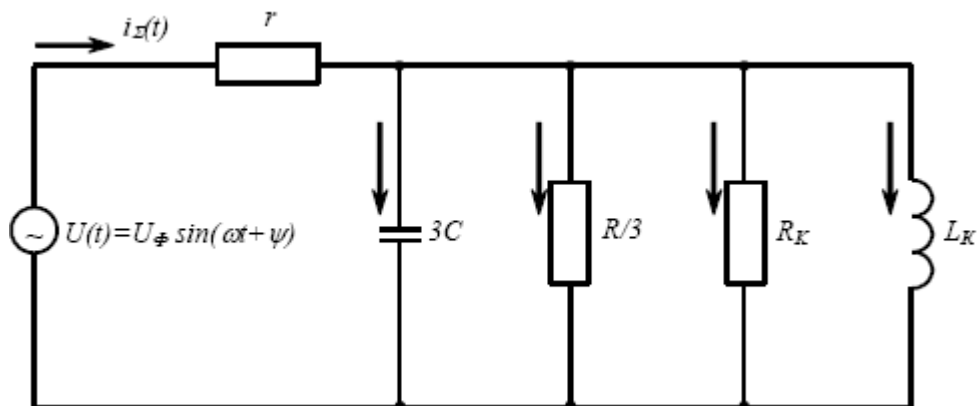


Рисунок 4 - Схема заміщення розподільної мережі для дослідження перехідних процесів, виникаючих при замиканні фази на землю.

1. Стала складова перехідного струму $I_3 = 3U_\phi \omega C$.
2. Перехідна складова, залежна від моменту замикання фази на землю й обумовлена стрибкоподібною зміною потенціалу нейтралі при виникненні замикання на землю при напрузі ушкодженої фази відмінної від нуля:

$$i_{a1} = -\frac{2}{3} I_{3M} \frac{C}{C + C_M} \sin \omega t_0$$

3. Перехідна складова, обумовлена зміною напруг неушкоджених фаз:

$$i_{a1} = -\frac{2}{3} I_{3M} \frac{C}{C + C_M} \cos \omega t_0 ,$$

де C_M – міжфазна ємність усієї електрично зв'язаної мережі; t_0 – початок відліку часу, що відповідає моменту позитивного максимуму напруги ушкодженої фази; $\omega_{св}$ – кутова частота вільних коливань системи в режимі однофазного замикання на землю.

З виразів видно, що амплітудне значення перехідної складової i_{a1} в порівнянні зі значенням сталої складової струму замикання I_3 , визначається в основному відносними значеннями фазної і міжфазної ємностей мережі. Максимальне значення перехідної складової i_{a2} в порівнянні зі сталим струмом замикання залежить, крім співвідношення фазної і міжфазної ємностей, від відношення частоти вільних коливань і примусових коливань (промислової частоти). З огляду на те, що

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{3 L_\phi (c + c_M)}}$$

і для реальних параметрів розподільних мереж у 2,5...22 рази перевищує промислову, максимальне значення перехідної складової i_{a2} може перевищувати значення сталої струму замикання, приблизно, від 1,4 до 14 разів.

У мережі з ізольованою нейтраллю перехідний струм при виникненні замикання на землю з урахуванням перехідного опору в точці замикання і без обліку індуктивного опору фаз мережі визначиться виразом (рис. 4, R_k , L_k приймаються рівними нескінченності):

$$i_\Sigma(t) = 3 U_\phi \sqrt{\frac{(\omega CR)^2 + 1}{(3\omega CRr)^2 + (3r + R)^2}} \left[\frac{\sin(\omega t + \psi - \phi) + \frac{R}{3r \sqrt{(\omega CR)^2 + 1}} \sin(\psi + \gamma) \cdot e^{-\frac{3r+R}{3Rr\omega C} t}}{1} \right] ,$$

де r – перехідний опір у точці ушкодження; ψ – початкова фаза напруги ушкодженої фази; $y = \arctg \left[-3\omega CRr / (3r + R) \right]$; φ – фазова характеристика загального опору ланцюга, що дорівнює

$$\varphi = \arctg \frac{-\omega C R^2 r}{r(3r + R) + (\omega CRr)^2}.$$

Максимальна амплітуда вільної складової перехідного струму буде мати місце за умовами $\psi + \gamma = \pm \pi / 2$ і визначиться як

$$i_{a.c\varphi} = U_{\varphi} \frac{R}{r \sqrt{(3\omega CRr)^2 + (3r + R)^2}}$$

Спільний аналіз виразів, після перетворень, дозволяє одержати вираження для вільної складової перехідного струму через максимальне значення сталого струму замикань на землю

$$i_{a.c\varphi} = I_{3M} \frac{y}{3Y} = I_{3M} \frac{z}{r} = I_{3M} \frac{R}{3r \sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$$

і зробити висновок, що кратність кидка вільної складової струму замикання визначається відношенням повного опору ізоляції всієї мережі щодо землі

$$Z = \frac{R}{3 \sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$$

і перехідного опору в точці замикання на землю r .

Вільна складова перехідного струму дорівнює нулю при виконанні умови $\psi + \gamma = 0$. У цьому випадку перехідний процес відсутній, а струм у ланцюзі стає рівним примушеній складовій (сталому значенню).

Аналіз отриманих виразів показує, що кратність перехідного струму при замиканнях на землю в мережах з ізолюованою нейтраллю залежить від моменту замикання (від діючого значення фазної напруги), до деякої міри від параметрів ізоляції мережі щодо землі і від значення перехідного опору в точці замикання. З ростом останнього, амплітуда перехідного струму різко зменшується. Параметри ізоляції мережі щодо землі і перехідного опору в місці ушкодження впливають також на тривалість перехідного процесу. При значенні перехідного опору в точці замикання на землю на рівні 100...200 Ом перехідний процес у мережі з ізолюованої нейтраллю з періодичного затухаючого переходить в аперіодичний. При металевих замиканнях на землю в мережі з ізолюованою нейтраллю можна вважати, що для реальних параметрів мережі перехідний процес практично закінчується за 10...15 мс.

У мережах з компенсованою нейтраллю в залежності від співвідношення параметрів розподільної мережі (включаючи і параметри компенсуючого пристрою) перехідний процес може носити коливальний або

аперіодичний характер. Коливальний перехідний процес виникає при виконанні умови

$$\frac{1}{4R_{\Sigma}^2(3C)^2} < \frac{1}{3L_k C}$$

аперіодичний перехідний процес настає при

$$\frac{1}{4R_{\Sigma}^2(3C)^2} \geq \frac{1}{3L_k C_{\Sigma}},$$

де R_{Σ} – сумарний активний опір усієї мережі щодо землі в аварійному режимі, з урахуванням перехідного опору визначається виразом

$$R_{\Sigma} = \frac{R R_k r}{R R_k + R r + 3 R_k r}.$$

Найбільше значення вільна складова перехідного струму при замиканні на землю однієї з фаз мережі буде мати в початковий момент при початковій фазі напруги $\psi = \pm \pi / 2$. У цьому випадку

$$i_{cv} = U_{\Phi} \frac{z}{z_n r} = \frac{I_3 z}{r}, \quad z = \frac{1}{3Y + Y_k}, \quad z_n = z + r.$$

З цього виразу видно, що максимум вільної складової перехідного струму в мережі з компенсованою нейтраллю так само, як і в мережі з ізольованою нейтраллю може перевищувати амплітуду сталого струму в кількість раз, що обумовлене відношенням модуля повного опору ізоляції мережі щодо землі до перехідного опору в точці замикання.

Найбільше значення перехідного струму буде мати місце при максимальних значеннях примушеної і вільної складових і при збігу їх по фазі. У момент часу $t = 0$ це здійснено при $\psi = 0$, У цьому випадку перехідний струм

$$i_{\Sigma(t)} = \frac{U_{\Phi}}{r}$$

Тривалість перехідного процесу в компенсованих мережах складає кілька періодів промислової частоти.

У мережі з резистором у нейтралі перехідний процес по характеру практично не відрізняється від перехідного процесу в мережі з ізольованою нейтраллю. Однак включення резистора в нейтраль мережі R_a , значення якого вибирається за умовою

$$R_a = (1 \dots 2) X_c = (1 \dots 2) \frac{1}{3 \omega C}$$

приводить до різкого зменшення активного опору ізоляції мережі щодо землі і відповідно до збільшення коефіцієнта загасання перехідного процесу, чим досягається різке скорочення тривалості перехідного процесу.

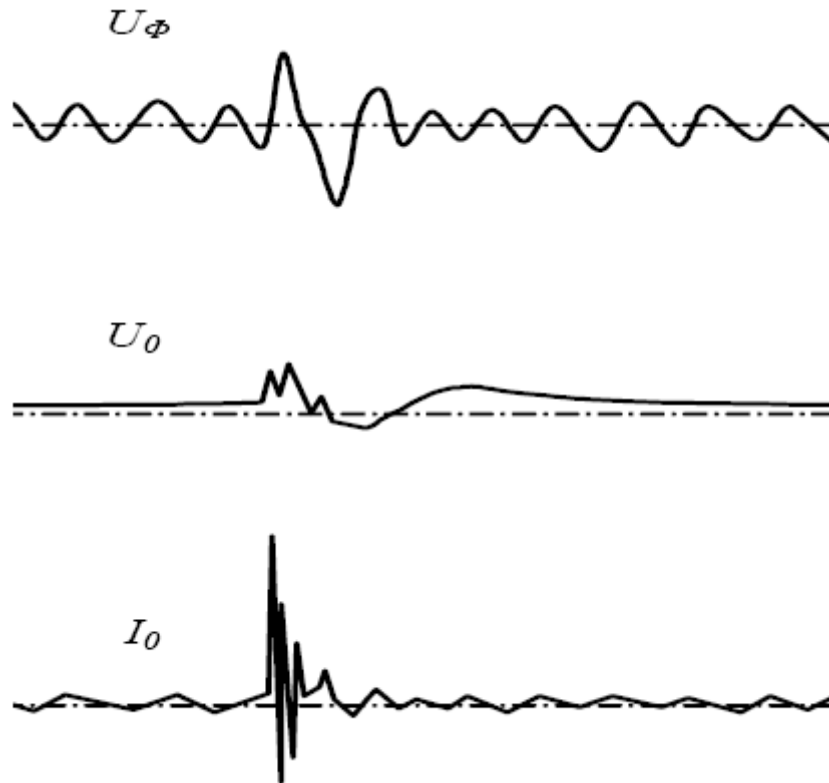


Рисунок 5 - Осцилограми перехідного процесу при замиканні на землю в мережі з ізолюованою нейтраллю.

Для приклада на рис. 5 наведена осцилограма зміни струму нульової послідовності в ушкодженному приєднанні I_0 , напруги нульової послідовності U_0 і напруги неушкодженої фази при нетривалому однофазному замиканні на землю в мережі з ізолюованою нейтраллю. На рис. 5 дуже чітко просліджується перехідний процес у мережі і вплив його на напруги неушкоджених фаз.

Перехідний процес у мережі в після аварійному режимі При замиканні на землю система електропостачання працює в змушеному режимі і характер ушкодження (металеве замикання або через перехідний опір) визначає значення напруги зсуву нейтралі (у даному випадку і напруга нульової послідовності), що може приймати значення від нуля (перехідний опір у точці ушкодження дорівнює нескінченності) до фазної напруги (перехідний опір дорівнює нулю).

З огляду на те, що ушкодження, що самоусуваються, а також примусовий розрив струму замикання, при його відключенні комутаційним апаратом, відбувається при переході значення струму замикання на землю через нуль, можна вважати, що процес відновлення напруги на ушкодженій фазі буде походити від нульового значення (для випадку металевого

замикання фази на землю) до фазного за якийсь проміжок часу, тривалість якого і є однією з найважливіших характеристик перехідного процесу. Аналогічно від фазного значення до нуля буде змінюватися значення напруги нульової послідовності (напруга нейтралі). Задачею досліджень даного перехідного процесу є вивчення впливу режимів роботи нейтралі на характер протікання і тривалість перехідного процесу.

Напруга джерела живлення ушкодженої фази буде дорівнювати

$U(t) = U_{\phi} \sin(\omega t + \phi)$ й у момент відключення ушкодження визначиться виразом:

$$U(t=0) = U_{\phi} \sin \phi,$$

де ϕ – початкова фаза напруги ушкодженої фази (момент розриву струму замикання).

Після відключення ушкодженого приєднання вимикачем у мережі усувається режим створюваний фазною напругою, а індуктивність і ємність мережі утворюють коливальний контур з початковими значеннями струмів і напруги відповідними аналогічним значенням, що передують безпосередньо відключенню ушкодження. Кутова частота вільних коливань, що починаються, буде дорівнювати:

$$\omega'_{cs} = 1 / \sqrt{3 L_p C},$$

де L_p – результуюча індуктивність щодо землі (дугогасних реакторів або вимірювальних трансформаторів напруги).

З огляду на те, що в системі маються активні опори, у яких губиться попередньо запасена в ємності й індуктивності енергія, коливальний перехідний процес носить загасаючий характер. Коефіцієнт заспокоєння коливань у розглянутій системі є величиною зворотної добротності коливального контуру і визначається параметрами ізоляції мережі щодо землі

$$d' = 1 / (3 \omega C R_{\Sigma})$$

$$d' = \frac{3 R_n + R}{3 \omega C R R_n},$$

де R_n – активний опір у нейтралі системи (дугогасячого реактора або резистора).

Постійна часу загасання коливань для схеми відповідної рис. 4 визначиться вираженням:

$$\tau = 2 L_p \frac{3 R_n + R}{R_n R}.$$

У загальному виді процес зміни в часі напруги нульової послідовності в системі після відключення або самоусунення ушкодження може бути описаний диференціальним рівнянням

$$\frac{d^2 U_0(t)}{dt^2} + \left(\frac{3R_n + R}{3\omega C R_n R} \cdot \frac{dU_0(t)}{dt} \right) - \frac{1}{3CL_p} U_0(t) = 0,$$

рішення якого і аналіз результатів, виконаний з урахуванням реальних параметрів розподільних мереж з різними режимами роботи нейтралі дозволили зробити наступні висновки.

1. У мережах з цілком ізольованою нейтраллю коливальний процес визначається наявністю в мережі вимірювальних трансформаторів напруги з заземленою нульовою точкою первинної обмотки.

Характер перехідного процесу (частота власних коливань напруги і струмів нульової послідовності і тривалість процесу) визначається в основному сумарною ємністю мережі щодо землі і кількістю одночасно включених вимірювальних трансформаторів напруги. Для реальних параметрів розподільних мереж тривалість перехідного процесу знаходиться в межах від 2 до 10 періодів промислової частоти, а частота вільних коливань має значення, як правило менше промислової частоти, причому частота вільних коливань безпосередньо в процесі загасання коливань змінюється за рахунок нелінійного характеру реактивного опору вимірювальних трансформаторів напруги (рис.6, а).

2. У мережах з компенсованою нейтраллю характер перехідного процесу за інших рівних умов залежить від режиму настроювання компенсуючого пристрою. Загасання напруги на нейтралі визначається в основному параметрами ізоляції розподільної мережі щодо землі і не залежить від режиму настроювання компенсуючого пристрою. Частота вільних коливань і постійна часу їхнього загасання в компенсованих мережах значно перевищують аналогічні характеристики в мережах з цілком ізольованою нейтраллю.

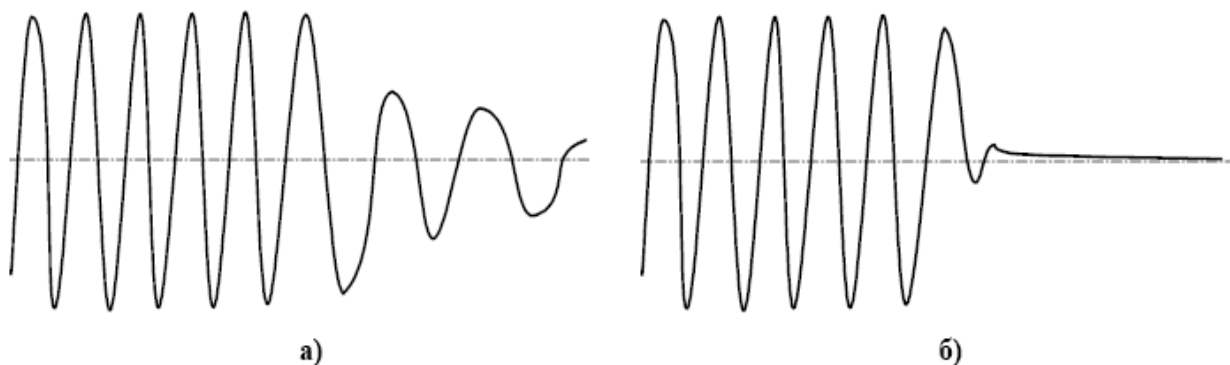


Рисунок 6 - Осцилограми затухання напруги нульової послідовності після відключення ушкодження в мережі з ізольованою нейтраллю (а) і з резистором в нейтралі (б)

3. Перехідний процес у мережах з резистором у нейтралі в значній мірі залежить від значення зазначеного резистора. У випадку установки резистора, за рахунок різкого збільшення коефіцієнта заспокоєння (загасання) перехідний процес практично закінчується за півперіоду промислової частоти. На рис. 6 представлені для порівняння осцилограми зміни напруги нульової послідовності в реальній розподільній мережі напругою 6 кВ після відключення металевого однофазного замикання на землю в мережі без накладення (а) і з накладенням на мережу (б) активної складової струму замикання на рівні 0,6 ємнісного струму.

3. Амплітудні і фазові характеристики аварійних струмів при однофазних замиканнях на землю.

Для дослідження характеристик напруги і струмів нульової послідовності скористаємося схемою заміщення показаної на рис. 7, що представлена у виді двох приєднань, підключених до одного силового трансформатора. При цьому провідності ізоляції відповідних фаз мережі щодо землі контрольованого приєднання ($Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1} = Y_1$) і всієї частини розподільної мережі, що залишилася, $Y'_A = Y'_B = Y'_C = Y'$ зв'язані співвідношенням:

$$Y_1 + Y' = Y$$

Однофазне замикання на землю може відбутися в контрольованій лінії $y_1 \neq 0$ або в зовнішній мережі $y \neq 0$..

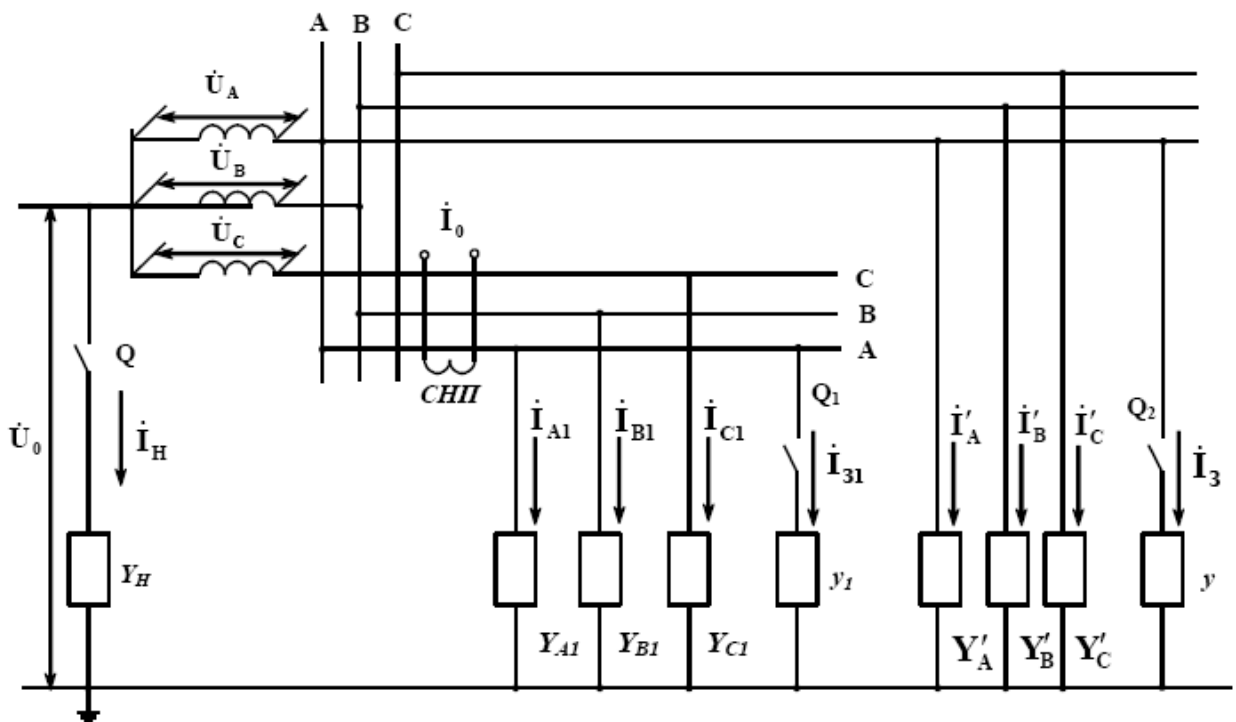


Рисунок 7 - Схема заміщення розподільчої мережі для дослідження напруги і струмів нульової послідовності

Для цієї схеми в загальному випадку для режиму однофазного замикання на землю в контрольованому приєднанні або в зовнішній мережі ми можемо записати вираження:

- для напруги нульової послідовності

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_\phi \frac{y_1}{3Y + Y_H + y_1}; \quad \text{чи} \quad \dot{U}_0 = -\dot{U}_\phi \frac{y}{3Y + Y_H + y};$$

- для струму нульової послідовності при ушкодженні в контрольованій лінії

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0(3Y + Y_H') = -\dot{U}_\phi(3Y - 3Y_1 + Y_H) \frac{y_1}{3Y + Y_H + y_1};$$

- для власного струму контрольованої лінії (струму нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішнім замиканні однієї фази на землю)

$$\dot{I}_{oc} = 3\dot{U}_0 Y_1 = -3\dot{U}_\phi \frac{y}{3Y + Y_H + y}$$

де Y_H – провідність нейтральної точки мережі щодо землі.

Виконані дослідження представлених залежностей по оцінці впливу на значення напруги і струмів нульової послідовності параметрів ізоляції і характеру режиму нейтралі мережі та їх аналіз дозволяють констатувати:

1. Мережа з цілком ізолюваною нейтраллю.

– напруга нульової послідовності визначається (крім значення фазної напруги мережі) параметрами ізоляції мережі щодо землі і значенням перехідного опору в точці замикання фази на землю;

– струм нульової послідовності в ушкодженій лінії визначається напругою нульової послідовності і параметрами ізоляції зовнішньої мережі щодо землі, тобто, параметрами ізоляції всієї мережі щодо землі за винятком параметрів ізоляції ушкодженого приєднання;

– власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішніх ушкодженнях) визначається напругою нульової послідовності і параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання.

2. Мережа з компенсованою нейтраллю.

– напруга нульової послідовності визначається параметрами ізоляції мережі щодо землі, провідністю компенсуючого пристрою (ступенем розстройки компенсуючого пристрою від резонансного режиму) і значенням перехідного опору в точці замикання фази на землю;

– при металевих (глухих) замиканнях однієї фази на землю режим настроювання компенсуючого пристрою не впливає на значення напруги нульової послідовності, яка при таких ушкодженнях дорівнює фазній напрузі мережі;

- струм нульової послідовності в ушкодженій лінії визначається напругою нульової послідовності, параметрами ізоляції зовнішньої мережі щодо землі, тобто, параметрами ізоляції всієї мережі щодо землі (включаючи і параметри компенсуючого пристрою) за винятком параметрів ізоляції ушкодженого приєднання;

- власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішніх ушкодженнях) визначається напругою нульової послідовності і параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання;

- струм у компенсуючому пристрої при замиканні на землю визначається напругою нульової послідовності і безпосередньо параметрами компенсуючого пристрою.

3.Мережа з резистором у нейтралі.

- напруга нульової послідовності визначається параметрами ізоляції мережі щодо землі, значенням опору резистора в нейтралі і значенням перехідного опору в точці замикання фази на землю;

- струм нульової послідовності в ушкодженій лінії визначається напругою нульової послідовності і параметрами ізоляції зовнішньої мережі та нейтралі щодо землі, тобто, параметрами ізоляції всієї мережі щодо землі за винятком параметрів ізоляції ушкодженого приєднання і значенням опору резистора в нейтралі;

- власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішніх ушкодженнях) визначається напругою нульової послідовності і параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання;

- струм у нейтралі мережі (струм у резисторі в нейтралі) при замиканні на землю визначається напругою нульової послідовності і безпосередньо параметрами самого резистора.

Загальний висновок - власний струм контрольованого приєднання, виражений через напругу нульової послідовності, визначається тільки параметрами ізоляції контрольованої лінії і не залежить від режиму роботи нейтралі електричної мережі.

Фазові характеристики.

Пристрої захисту від замикань на землю, що реагують на параметри сталого аварійного режиму, використовують в основному струми і напруги нульової послідовності. Для спрямованих пристроїв захисту від замикань на землю крім значень потрібно також знати фазу чи взаємне положення векторів порівнюваних величин, тобто положення векторів напруги і струмів нульової послідовності для захистів, що реагують на потужність нульової послідовності. З точки зору створення нових методів і засобів спрямованих пристроїв захисту або сигналізації від замикань на землю становлять інтерес також амплітудні і фазові характеристики власного струму захищеної лінії і струму в нейтралі мережі.

Мережа з цілком ізольованою нейтраллю.

Кут між вектором напруги нульової послідовності і вектором напруги ушкодженої фази в мережі з цілком ізольованою нейтраллю визначиться з вираження

$$\varphi_1 = 180^\circ - \arctg \frac{3\omega C R r}{(R + 3r)},$$

і змінюється в межах від 180 до 90 при зміні перехідного опору в точці замикання від нуля до нескінченності.

Фази стосовно вектора напруги нульової послідовності:

- вектора струму нульової послідовності

$$\varphi_{02} = 180^\circ + \arctg \frac{\omega (C - C_1) R R_1}{R_1 - R},$$

- вектора власного струму контрольованої лінії

$$\varphi_{03} = \arctg \omega C_1 R_1.$$

Аналіз виражень показує, що з урахуванням реальних значень параметрів ізоляції щодо землі всієї мережі й окремого приєднання, а також приймаючи в увагу реальне взаємне співвідношення ємнісного й активного опорів ізоляції, можна зробити наступні висновки:

– кут між векторами струму і напруги нульової послідовності не залежить від повноти замикання (перехідного опору в точці замикання) і складає практично 270 ел. градусів, або мінус 90 ел. градусів;

– кут між вектором власного струму контрольованої лінії і вектором напруги нульової послідовності визначається параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання і складає практично 90 ел. градусів.

Мережа з компенсованою нейтраллю.

Кут між вектором напруги нульової послідовності і вектором напруги ушкодженої фази в мережі з компенсованою нейтраллю залежить від параметрів ізоляції мережі, параметрів компенсуючого пристрою, величини перехідного опору в місці замикання та визначається вираженням:

$$\varphi_1 = 180^\circ + \arctg \frac{R_K R r v}{\omega L (3R_K r + R_K R + R r)},$$

де $v = 1 - 3\omega^2 C L_K$ – ступінь розстройки компенсуючого пристрою від резонансного режиму.

У залежності від параметрів мережі, режиму настроювання дугогасної котушки і значення перехідного опору у точці замикання, кут між вектором напруги нульової послідовності і вектором напруги ушкодженої фази може приймати значення в інтервалі від 90 до 270 ел. градусів, тобто теоретично може змінюватися в межах 180 ел. градусів. При настроюванні

компенсуючого пристрою у резонанс із ємністю мережі щодо землі зазначений кут практично дорівнює 180 ел. градусів і не залежить від параметрів мережі і значення перехідного опору в точці замикання.

Фази стосовно вектора напруги нульової послідовності:

- вектора струму нульової послідовності

$$\varphi_{02} = 180^\circ - \arctg \frac{R R_1 R_K (\nu - 3\omega^2 C_1 L)}{\omega L (3R_K R_1 - 3R_K R + R R_1)};$$

- вектора власного струму контрольованої лінії

$$\varphi_{03} = \arctg \omega C_1 R_1;$$

- вектора струму дугогасячого реактора (компенсуючого пристрою)

$$\varphi_{04} = -\arctg \frac{R_K}{\omega L}.$$

Аналіз показує, що з урахуванням реальних значень параметрів ізоляції щодо землі всієї мережі й окремого приєднання, а також приймаючи в увагу реальне взаємне співвідношення ємнісного й активного опорів ізоляції, а також з огляду на реальні значення параметрів дугогасячого реактора, можна зробити наступні висновки:

– кут між векторами струму і напруги нульової послідовності не залежить від повноти замикання (перехідного опору в точці замикання) і визначається в значній мірі значенням розстройки компенсуючого пристрою від резонансного режиму і для резонансного настроювання складає практично 180 ел. градусів;

– кут між вектором власного струму контрольованої лінії і вектором напруги нульової послідовності визначається параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання і складає 90 ел. градусів;

– кут між вектором струму в дугогасячому реакторі і вектором напруги нульової послідовності визначається тільки параметрами безпосередньо дугогасячого реактора і для їх реальних значень складає 90 ел. градусів.

Мережа з резистором у нейтралі.

Для мережі з резистором у нейтралі кут між вектором напруги нульової послідовності і вектором напруги ушкодженої фази

$$\varphi_1 = 180^\circ - \arctg \frac{3\omega C R R_H r}{(3R_H r + R r + R R_H)}.$$

Вплив значення активного опору в нейтралі мережі на значення і фазу напруги нульової послідовності в порівнянні з мережею з цілком ізолюваною нейтралі можна оцінити як істотне зниження активного опору ізоляції фаз мережі щодо землі.

Фази стосовно вектора напруги нульової послідовності:

- вектора струму нульової послідовності

$$\varphi_{02} = 180^\circ + \arctg \frac{\omega (C - C_1) R R_1 R_H}{(3R_H R_1 - 3R_H R + R R_1)},$$

- вектора власного струму контрольованої лінії

$$\varphi_{03} = \arctg \omega C_1 R_1;$$

- вектора струму в нейтралі мережі (в резистори в нейтралі)

$$\varphi_{03} = \arctg 0 = 0^\circ.$$

Аналіз показує, що з урахуванням реальних значень параметрів ізоляції щодо землі значення опору резистора в нейтралі, можна зробити наступні висновки:

– кут між векторами струму і напруги нульової послідовності не залежить від повноти замикання (перехідного опору в точці замикання) і, на відміну від мереж з цілком ізолюваною нейтраллю, дорівнює значенню в межах від 180 до 270 ел. градусів; для реальних параметрів ізоляції мережі щодо землі і рекомендуємо значення

$$R_H = (1 \dots 2) X_C$$

цей кут складає приблизно 225...240 ел. градусів;

– кут між вектором власного струму контрольованої лінії (струму нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішнім замиканні однієї фази на землю) і вектором напруги нульової послідовності визначається параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання і складає практично 90 ел. градусів;

– кут між вектором струму в резисторі, включеному в нейтраль мережі і вектором напруги нульової послідовності не залежить від параметрів ізоляції мережі, резистора і режиму замикання та збігається по напрямку з вектором напруги нульової послідовності (кут дорівнює 0 ел. градусів).

Важливо відзначити, що фаза власного струму контрольованого приєднання не залежить від режиму роботи нейтралі, визначається тільки параметрами безпосередньо контрольованого приєднання і практично жорстко прив'язана до напруги нульової послідовності.

Подвійні замикання на землю в різних точках розподільної мережі є, як правило, розвитком однофазних ушкоджень і обумовлені впливом внутрішніх перенапруг, що з'являються при цьому. Варто розрізняти два основних види подвійних замикань на землю: одночасне ушкодження ізоляції щодо землі однієї і тієї ж фази в двох точках розподільної мережі; одночасне ушкодження ізоляції щодо землі різних фаз розподільної мережі. Дослідження показали, що:

1. При подвійних замиканнях на землю діюче значення і положення вектора напруги нульової послідовності визначаються в основному значеннями перехідних опорів у точках ушкоджень та режимом нейтралі.

2. Діюче значення і положення вектора струму нульової послідовності в контрольованій лінії при подвійних замиканнях на землю за інших рівних умов визначаються відносним розташуванням місць ушкодження.

3. Взаємне розташування векторів напруги і струму нульової послідовності при подвійних замиканнях на землю не є фіксованим для заданих параметрів ізоляції мережі, а залежить від виду подвійного замикання.

Контрольні питання

1. Назвіть основні причини замикань на землю в розподільних мережах підприємств.

2. Від чого залежать значення сталих аварійних струмів при замиканнях на землю?

3. Як режим роботи нейтралі електричної мережі впливає на значення напруги й струму нульової послідовності?

4. Як режим роботи нейтралі електричної мережі впливає на фазові характеристики напруги й струму нульової послідовності.?

5. Які негативні наслідки перехідних процесів, що супроводжують однофазні замикання на землю?

6. Як зменшити тривалість перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю?