

ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНОСТІ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮЮЧОЇ ДУГИ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ НА ЕОМІ

Кобазев В.П.

Донецький національний технічний університет

c12@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper describes the new approach for accounting of unlinear arc resistance nature at computer calculation of the arcing ground. The unlinear character of arc is taken into account with the help of differential equalization, which is included in general system of equalizations at the describing of the arcing ground process. Analysis of the calculation showed, accounting of unlinear arc resistance nature gives the accuracy of results on 10 % and more.

Постановка задачі. В електричних мережах напругою 6, 10, 35 кВ розрахунки на ЕОМ однофазних замикань на землю (ОЗНЗ) виконуються при виборі способу заземлення нейтралі для конкретної мережі, при визначення рівня перенапруг, які виникають при перемикаючої заземлюючої дуги, для оцінки нових релейних захистів від замикань на землю. В цих розрахунках опір дуги моделюється постійним опором хоча відомо, що він змінюється з часом.

Аналіз останніх досліджень. В практиці розрахунків ОЗНЗ широке розповсюдження отримало врахування опору дуги постійним активним опором [1, 2]. Цей спосіб є простий і наглядний, але при цьому не враховується нелінійний характер опору дуги. Таким чином загально прийнятий підхід не дозволяє виконати точне описання зміни опору дуги у часі.

Задача досліджень. Розробити математичне описання опору заземлюючої дуги и використати його при розрахунку перехідного процесу, що виникає при ОЗНЗ в електричній мережі.

Виклад основного матеріалу. Пропонується наступна методика врахування нелінійності опору дуги R_d . Характер зміни цього опору визначається залежністю напруги на дузі від струму. У [3] приведені ці залежності отримані експериментальним шляхом, а також приклади графоаналітичних розрахунків процесу горіння дуги. Аналіз даних і результатів розрахунків [3] показав, що можна прийняти експонентний закон зміни опору дуги від часу. Фізика процесу горіння дуги така: у початковий момент часу опір дуги має деяке початкове значення, потім у процесі горіння дуги її опір або збільшується, або зменшується. Отже, при моделюванні зміни R_d є два варіанти розвитку дугового однофазного замикання на землю: дуга гасне і дуга горить стійко.

З врахуванням викладеного характер зміни опору дуги можна описати наступними аналітичними співвідношеннями:

$$\text{дуга гасне (рис. 1) } R_{dd}(t) = R_n + \Delta R \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad \text{дуга горить стійко (рис. 2) } R_{dd}(t) = R_k + \Delta R \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Розглянемо два варіанти врахування нелінійності опору електричної дуги при розрахунку перехідного процесу.

У першому варіанті задається якість початкове значення опору R_d , що відповідає початковому моменту часу, а потім розраховується система диференціальних рівнянь. Після цього коректується R_d з урахуванням настання іншого моменту часу і виробляється повторний розрахунок.

При другому варіанті характер зміни опору задається диференціальним рівнянням, що додається у вже існуючу систему диференціальних рівнянь, що описують режим ОЗНЗ. Для розрахунку однофазного замикання на землю в другому випадку були використані диференціальні рівняння, що приводяться нижче.

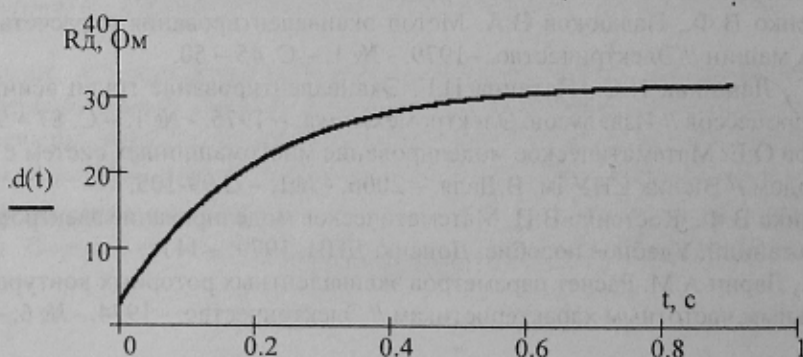


Рисунок 1 – Характер зміни опору дуги $R_d(t)$ при $R_n=3$, $\Delta R=29$, $T=0,1$

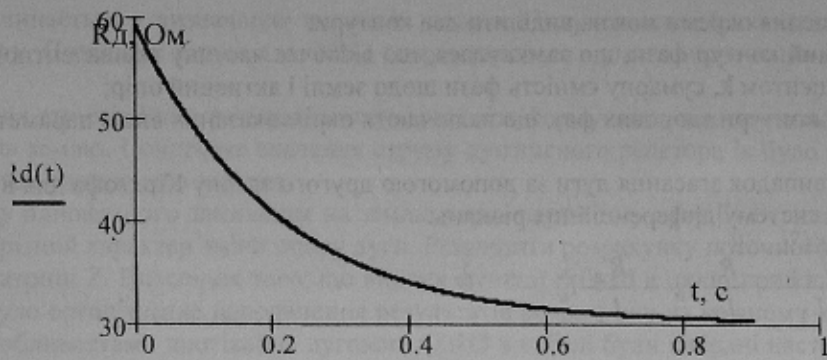


Рисунок 2 – Характер зміни опору дуги $R_d(t)$ при $R_k=30$, $\Delta R=29$, $T=0,2$

Для випадку загасання дуги було складено наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dR_d}{dt} = \left(\frac{R_H + \Delta R}{T} \right) - \frac{R_d}{T},$$

приватним рішенням, якого є наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} R_d(t) = R_H + \Delta R - C \cdot e^{-\frac{t}{T}} \\ R_d(0) = R_H \end{cases} \quad (1)$$

Для випадку стійкого горіння дуги диференціальне рівняння має такий вигляд:

$$\frac{dR_d}{dt} = \frac{R_k}{T} - \frac{R_d}{T},$$

Приватне рішення цього рівняння має вигляд:

$$\begin{cases} R_d(t) = R_k - C \cdot e^{-\frac{t}{T}} \\ R_d(0) = R_k + \Delta R \end{cases} \quad (2)$$

При $t=0$ з системи рівнянь (1) і (2) можна отримати $C=\Delta R$, як для випадку згасання дуги, так і при стійкому горінню.

На рис.3 приведена трифазна схема заміщення компенсованої електричної мережі напругою 10 кВ.

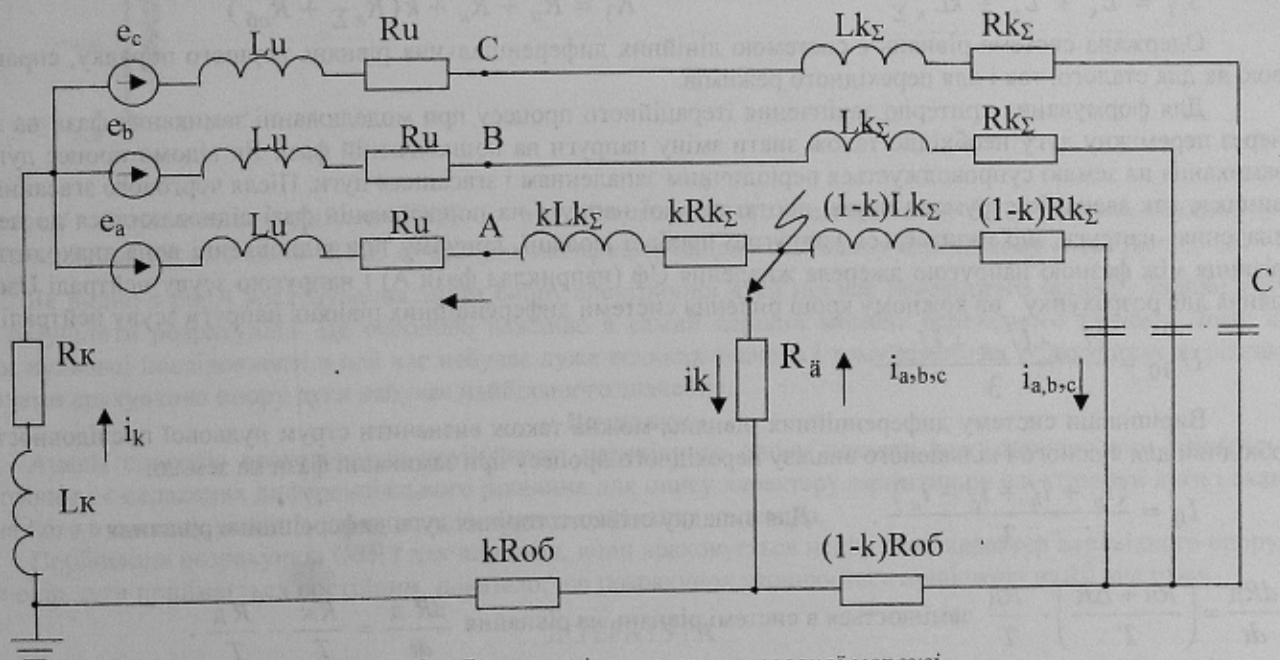


Рисунок 3 – Схема заміщення компенсованої мережі

В схемі заміщення використовуються стандартні припущення. Крім того, в схемі за допомогою коефіцієнта k враховується відстань від підстанції до місця однофазного замикання на землю. Оскільки опір оболонки кабелю $R_{об}$ значно менше опору землі, то основна частина струму замикання саме проходить через оболонку. Тому в схемі заміщення враховується опір оболонки, а не землі. В цьому випадку практично не може бути глухого замикання на землю, тому в колі замикання завжди буде опір оболонки кабелю. Дугогасний реактор вводить в схему заміщення у вигляді послідовно з'єднаних активного опору R_k і індуктивності L_k .

У схемі заміщення окремо можна виділити два контури:

а) розрядний контур фази, що замкнулася, що включає частину еквівалентної індуктивності лінії, що визначається коефіцієнтом k , сумарну ємність фази щодо землі і активний опір;

б) зарядні контури здорових фаз, що включають окрім вказаних вище параметрів ще і параметри джерела живлення.

Враховуючи випадок згасання дуги за допомогою другого закону Кірхгофа для вищезазначених контурів можна скласти таку систему диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= -\frac{U_{cA}}{L_1} - \frac{R_1}{L_1} i_a - \frac{R_d}{L_1} i_a \\ \frac{dU_{cA}}{dt} &= \frac{1}{C} i_a \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{\sqrt{3}U_m \cos(\omega t + \psi - \frac{\pi}{3})}{L_2} - \frac{R_d}{L_2} i_b - \frac{R_2}{L_2} i_b - \frac{U_{cB}}{L_2} \\ \frac{dU_{cB}}{dt} &= \frac{1}{C} i_b \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{\sqrt{3}U_m \cos(\omega t + \psi + \frac{\pi}{3})}{L_2} - \frac{R_d}{L_2} i_c - \frac{R_2}{L_2} i_c - \frac{U_{cC}}{L_2} \\ \frac{dU_{cC}}{dt} &= \frac{1}{C} i_c \\ \frac{di_k}{dt} &= \frac{U_m \sin(\omega t + \psi)}{L_3} - \frac{R_d}{L_3} i_k - \frac{R_3}{L_3} i_k \\ \frac{dR_d}{dt} &= \frac{R_H + \Delta R}{T} - \frac{R_d}{T} \end{aligned} \right.$$

В системі рівнянь введені наступні позначення:

$$L_1 = (1 - k)L_{k\Sigma}$$

$$R_1 = (1 - k)(R_{об} + R_{k\Sigma})$$

$$L_2 = 2L_u + (k + 1)L_{k\Sigma}$$

$$R_2 = 2R_u + R_{k\Sigma}(k + 1) + (1 - k)R_{об}$$

$$L_3 = L_k + L_u + kL_{k\Sigma}$$

$$R_3 = R_u + R_k + k(R_{k\Sigma} + R_{об})$$

Одержана система рівнянь є системою лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, справедливою як для сталого, так і для перехідного режимів.

Для формування критерію закінчення ітераційного процесу при моделюванні замикання фази на землю через переміжну дугу необхідно також знати зміну напруги на пошкодженій фазі. Як відомо процес дугового замикання на землю супроводжується періодичним запаленням і згасанням дуги. Після чергового згасання дуги виникає так звана безструмова пауза, протягом якої напруга на пошкодженій фазі відновлюється до певного значення напруги, що називається напругою пробою ізоляції, причому при відновленні вона знаходиться як різниця між фазною напругою джерела живлення U_f (наприклад фази А) і напругою зсуву нейтралі U_{30} . Рівняння для розрахунку на кожному кроці рішення системи диференціальних рівнянь напруги зсуву нейтралі:

$$U_{30} = \frac{U_{cA} + U_{cB} + U_{cC}}{3}$$

Вирішивши систему диференціальних рівнянь, можна також визначити струм нульової послідовності, необхідний для якісного і кількісного аналізу перехідного процесу при замиканні фази на землю.

$$I_0 = \frac{(i_a + i_b + i_c - i_k)}{3} \quad \text{Для випадку стійкого горіння дуги диференціальне рівняння}$$

$$\frac{dR_d}{dt} = \left(\frac{R_H + \Delta R}{T} \right) - \frac{R_d}{T} \quad \text{замінюється в системі рівнянь на рівняння} \quad \frac{dR_d}{dt} = \frac{R_k}{T} - \frac{R_d}{T}$$

Для вирішення систем диференціальних рівнянь, що описують аварійний і нормальний режими роботи, в Mathcad програмі використовується вбудована функція `rkfixed`, в якій реалізований метод Рунге-Кутта четвертого порядку з постійним кроком. При складанні програми були враховані співвідношення, які були одержані в результаті математичного моделювання мережі. Програма розрахунку складається з чотирьох частин, що виконують наступні функції: введення початкових даних і розрахунок параметрів мережі, розрахунок початкових умов, розрахунок ОЗНЗ і виведення результатів.

Розрахунок починається з визначення активних опорів і індуктивностей схеми заміщення, складеної для нормального режиму. Початкові умови для ОЗНЗ розраховуються з умови включення мережі при нульових умовах.

Здобуті значення струмів і напруг використовуються для формування вектора початкових умов для однофазного замикання на землю. Початкове значення струму дугогасного реактора i_k було прийнято рівним нулю, оскільки розглядалася симетрична мережа.

Для розрахунку однофазного замикання на землю через переміжну дугу були складені дві окремі програми, що враховують різний характер зміни опору дуги. Результати розрахунку поточного режиму на кожному кроці зберігаються в матриці Z . Внаслідок того, що виклик функції $rkfixed$ в циклі приводить до зміни матриці Z на кожній ітерації, було організоване накопичення результатів розрахунку на кожному кроці в одновимірних масивах. У зв'язку з особливостями протікання дугового ОЗНЗ в кабелі були вибрані наступні умови розрахунку нормального і аварійного режимів: для нормального режиму: $U_{пр} < U_a < U_{пр}$, де $U_{пр}$ – напруга, достатня для пробою ізоляції; для аварійного режиму: U_a – напруга пошкодженої фази відносно землі: $|I_o| \leq 0,002$ тобто прийняте допущення про згасання дуги під час переходу через нуль струму промислової частоти після згасання високочастотної складової перехідного процесу.

При розрахунках ОЗНЗ згідно математичної моделі, що враховує нелінійний характер зміни перехідного опору електричної дуги в місці замикання $R_d(t)$, в порівнянні з моделлю, що враховує цей опір за допомогою постійної величини $R_d = const$ були отримані наступні характеристики рис.4, що характеризують процес замикання на землю при виникненні електричної дуги.

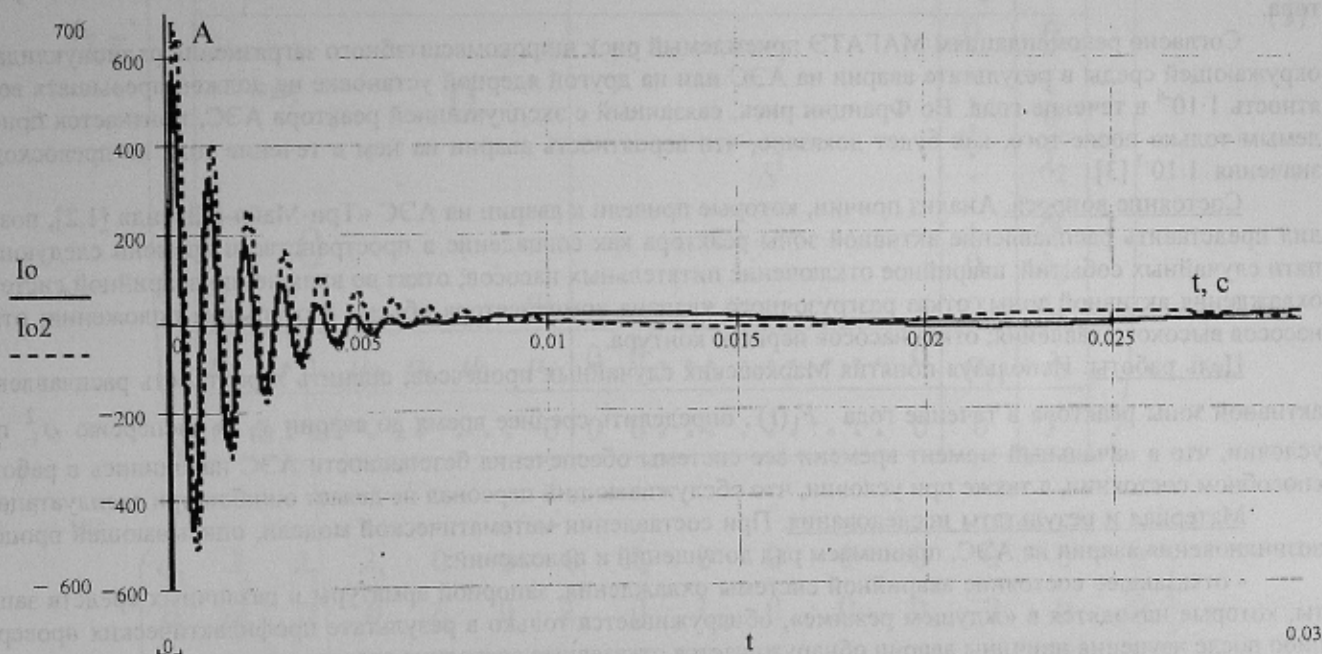


Рисунок 4 – Результати розрахунку ОЗНЗ: I_o – характеристика, що враховує зміну R_d за законом згасання при $R_n = 1,5 \text{ Ом}$, $\Delta R = 1,5 \text{ Ом}$, $T = 0,005 \text{ с}$; I_o2 – характеристика при постійному перехідному опорі $R_d = 1,5 \text{ Ом}$

Як видно з рис.4 врахування зміни опору електричної дуги під час перехідного процесу значно уточнює результати розрахунків. Це особливо важливо в самий перший момент перехідного процесу, тому що струм нульової послідовності в цей час набуває дуже великих значень і тому різниця в розрахунках за різними методами врахування опору дуги набуває найбільшого значення.

Висновки

Аналіз способів врахування нелінійності перехідного опору показав, що найпростішим і найбільш ефективним є складання диференціального рівняння для опису характеру зміни опору електричної дуги і включення його в систему рівнянь, що описують процес замикання на землю.

Порівняння розрахунків ОЗНЗ для випадків, коли враховується нелінійний характер перехідного опору, і коли опір дуги приймається постійним, показало, що розрахунок уточнюється приблизно на 10 відсотків.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6 – 10 кВ // Электричество. - № 12, 1998. – С.8 – 22.
- 2 Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Махинда Сильва Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС // Збірник наукових праць Донату. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 17. – Донецьк: ДонДТУ, 2000. – С. 129 – 133.
- 3 Брон О.Б. Автоматы гашения магнитного поля. – М : Госэнергоиздат, 1961. – 138 с.

Рекомендовано доц., к.т.н. Дергилевым М.П.