

## ДО ПИТАННЯ ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРУМОВОЇ ВІДСІЧКИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Баженів В. М., Кулєшова К. В.

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

*Розглянуто теоретичну основу та запропоновано практичні підходи з оцінювання ефективності струмової відсічки для кабельно-повітряних ліній, блоків "лінія-трансформатор" та інших елементів в розподільних електричних мережах.*

**Постановка проблеми.** Під час аварійних ситуацій, які виникають в розподільних електричних мережах систем електропостачання, після спрацьовування релейного захисту та вимикання високовольтних вимикачів, визначальним для оперативного персоналу є швидка і точна оцінка по-дій аварійного режиму і прийняття правильних рішень для відновлення схеми електропостачання в післяаварійному режимі. Особливе значення для прийняття рішень має аналіз ефективності абсолютної і селективної струмової відсічки елементів електричної мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті [1] запропоновано теоретичний підхід щодо оцінювання ефективності струмової відсічки на прикладі повітряної лінії електропередачі. Нами розглянуто теоретичну основу та запропоновано практичні підходи з оцінювання ефективності струмової відсічки для кабельно-повітряних ліній, блоків "лінія-трансформатор" та інших елементів в розподільних електричних мережах.

**Мета статті.** Розробити методику оцінювання ефективності струмової відсічки для об'єктів розподільних мереж з різними питомими опорами.

**Основні матеріали дослідження.** Вихідною точкою є обчислення струму спрацьовування (уставки) струмової відсічки  $I_{C3}$  для об'єктів розподільних мереж [2, 3]. Спрощений розрахунок уставки захисту полягає у забезпеченні нормованої чутливості струмової відсічки:

$$I_{C3} = I_{K1.min} / k_{ч}, \quad (1)$$

де  $k_{ч}$  – нормований коефіцієнт чутливості струмової відсічки;

$I_{K1.min}$  – струм короткого замикання (к.з.) в місці встановлення захисту (К1) в мінімальному режимі роботи джерела живлення і прилеглої електричної мережі (С).

Для досягнення більшої точності уставки струмової відсічки необхідно розраховувати за конкретними умовами для кожного об'єкта. Наприклад, для однорідних розподільних мереж розрахунок проводиться за такими умовами:

1. Умова відлаштування від к.з. в зоні попереднього захисту (умова селективності):

$$I_{C3} \geq k_{HI} \cdot I_{K3.max}, \quad (2)$$

де  $k_{HI}$  – коефіцієнт надійності відлаштування захисту від струму к.з. в кінці зони захисту;

$I_{K3.max}$  – наскрізний струм захисту в максимально-му режимі роботи джерела живлення для прилеглої електричної мережі.

2. Умова неспрацьовування захисту в циклах АПВ та АВР:

$$I_{C3} \geq k_3 \cdot k_{C3П} \cdot I_{P.max}, \quad (3)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу для умови неспрацьовування струмової відсічки;

$k_{C3П}$  – коефіцієнт самозапуску електродвигунного навантаження мережі;

$I_{P.max}$  – розрахункове значення максимального струму в робочому режимі мережі.

Окрім цього, для блоків "лінія – трансформатор" і ліній з трансформаторним навантаженням враховують умову відлаштування від кидків струму намагнічування трансформаторів:

$$I_{C3} \geq k_3 \cdot I_{НАМ}, \quad (4)$$

де  $I_{НАМ}$  – струм намагнічування трансформаторів.

Для розподільних мереж з двостороннім живленням враховують умову відлаштування від максимальних струмів хитань:

$$I_{C3} \geq k_3 \cdot I_{КАЧ}, \quad (5)$$

де  $I_{КАЧ}$  – струм хитань під час порушень синхронної роботи електричної мережі.

Остаточний струм спрацьовування відсічки  $I_{C3.max}$  вибирається за найбільшим значенням з прийнятих умов вибору захисту елементів мережі.

На рис. 1 показаний один з варіантів розподільної мережі у вигляді блоку "реактор - кабельна лінія", де позначено:  $Z_C$  – повний опір живильної електричної мережі;  $Z_P, Z_{КЛ}$  – відповідно повні опори реактора і кабельної лінії;  $Z_{M3}$  – повний опір мертвої зони струмової відсічки; крива  $I_K = f(Z_K)$  – залежність струму короткого замикання (к.з.) в об'єкті захисту від віддаленості пошкодження;  $I_{K-1}, I_{K-2}, I_{K-3}$  – розрахункові струми к.з.;  $I_{C3}$  – розрахункове значення струму спрацьовування захисту.

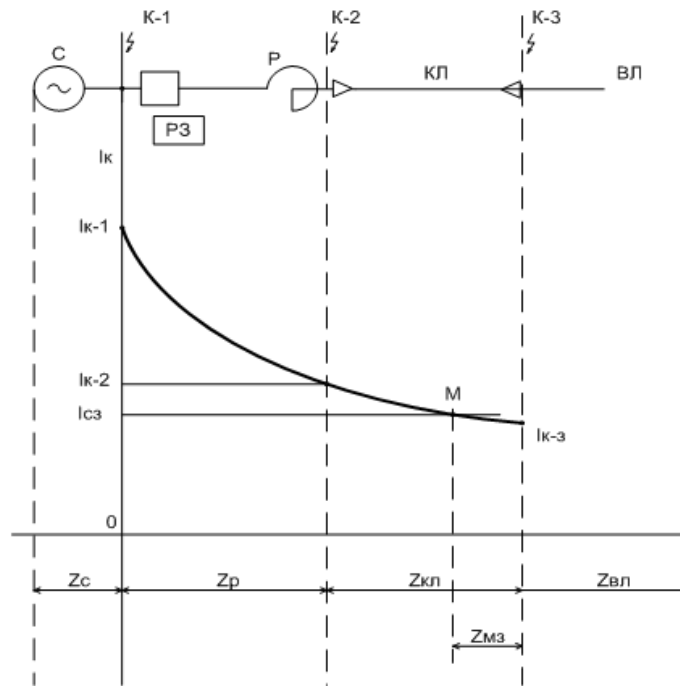


Рисунок 1 – Розрахункова схема розподільної мережі

Згідно рисунку позначимо сумарні опори в максимальному і мінімальному режимах:

$$Z_{\text{СУМ.max}} = Z_{\text{C.max}} + Z_{\text{P}} + Z_{\text{КЛ}}, \quad (6)$$

$$Z_{\text{СУМ.min}} = Z_{\text{C.min}} + Z_{\text{P}} + Z_{\text{КЛ}}. \quad (7)$$

Розрахункова зона дії струмової відсічки (захистоздатність) і зона її недії (мертва зона) визначаються точкою М – точкою перетину прямої струму спрацювання захисту  $I_{\text{CЗ}}$  з характеристикою струму к.з.  $I_{\text{К}} = f(Z_{\text{К}})$  з рівності:

$$I_{\text{CЗ}} = I_{\text{К-М}}, \quad (8)$$

Струм к.з. в точці М дорівнює:

$$I_{\text{К-М}} = U_{\text{Ф}} / z_{\text{М}}, \quad (9)$$

де  $U_{\text{Ф}}$  – фазна напруга об'єкта захисту;  
 $z_{\text{М}}$  – опір від е.р.с. системи С до точки М.

Нижчеподану величину назвемо опором спрацювання струмової відсічки:

$$Z_{\text{CЗ}} = U_{\text{Ф}} / I_{\text{CЗ.max}}. \quad (10)$$

В опір спрацювання струмової відсічки входить опір системи, звідси захистоздатність відсічки дорівнює:

$$Z_{\text{ТО}} = Z_{\text{CЗ}} - Z_{\text{C}}. \quad (11)$$

У процентному вираженні захистоздатність струмової відсічки визначається по відношенню до опору об'єкта, що захищається:

$$Z_{\text{ТО}}\% = Z_{\text{ТО}} \cdot 100 / Z_{\text{OЗ}}, \quad (12)$$

де  $Z_{\text{OЗ}}$  – опір об'єкта, що захищається:

$$Z_{\text{OЗ}} = Z_{\text{P}} + Z_{\text{КЛ}}. \quad (13)$$

Якщо розглядається однорідна розподільна мережа, як в [1], то довжина ділянки об'єкта, що захищається струмовою відсічкою, дорівнюватиме:

$$L_{\text{ТО}} = Z_{\text{ТО}} / Z_{\text{П}}. \quad (14)$$

де  $Z_{\text{П}}$  – питомий опір об'єкта захисту, Ом/км.

Розрахункове значення опору мертвої зони струмової відсічки дорівнює:

$$Z_{\text{МЗ}} = Z_{\text{СУМ}} - Z_{\text{CЗ}}, \quad (15)$$

У відсотках:

$$Z_{\text{МЗ}}\% = Z_{\text{МЗ}} \cdot 100 / Z_{\text{OЗ}}. \quad (16)$$

Розглянемо приклад розрахунку ефективності струмової відсічки в різних режимах живильної системи. Вихідні дані: напруга розподільної мережі  $U=10$  кВ, індуктивний опір живильної системи в різних режимах –  $X_{\text{C.max}} = j 0,55$  Ом,  $X_{\text{C.min}} = j 1,1$  Ом, активний та індуктивний опори реактора –  $R_{\text{P}} = 0,05$  Ом та  $X_{\text{P}} = j 0,5$  Ом, відповідні опори кабельної лінії –  $R_{\text{КЛ}} = 0,45$  Ом та  $X_{\text{КЛ}} = j 0,36$  Ом, струм спрацювання відсічки  $I_{\text{CЗ.max}} = 4,45$  кА.

Розрахуємо опір спрацювання струмової відсічки:

$$Z_{\text{CЗ}} = U_{\text{Ф}} / I_{\text{CЗ.max}} = 5,78 / 4,45 = 1,3 \text{ Ом}. \quad (17)$$

За активними і індуктивними опорами визначаємо повні опори елементів: опори системи  $Z_{C.max} = 0,55$  Ом,  $Z_{C.min} = 1,1$  Ом, опір реактора  $Z_p = 0,5$  Ом, опір кабельної лінії  $Z_{KL} = 0,58$  Ом.

Опір об'єкта захисту:

$$Z_{O3} = Z_p + Z_{KL} = 0,5 + 0,58 = 1,08 \text{ Ом.} \quad (18)$$

Сумарні опори всієї системи:

$$Z_{CYM.max} = Z_{C.max} + Z_p + Z_{KL} = 1,63 \text{ Ом;} \quad (19)$$

$$Z_{CYM.min} = Z_{C.min} + Z_p + Z_{KL} = 2,18 \text{ Ом.} \quad (20)$$

Захистоздатність струмової відсічки в максимальному режимі джерела живлення:

$$Z_{TO.max\%} = (Z_{C3} - Z_{C.max}) \cdot 100 / Z_{O3} = (1,3 - 0,55) \cdot 100 / 1,08 = 69,4\%. \quad (21)$$

Захистоздатність струмової відсічки в мінімальному режимі джерела живлення:

$$Z_{TO.min\%} = (Z_{C3} - Z_{C.min}) \cdot 100 / Z_{O3} = (1,3 - 1,1) \cdot 100 / 1,08 = 18,5\%. \quad (22)$$

Мертва зона струмової відсічки в максимальному режимі джерела живлення:

$$Z_{M3.max\%} = (Z_{CYM.max} - Z_{C3}) \cdot 100 / Z_{O3} = (1,63 - 1,3) \cdot 100 / 1,08 = 30,6\%. \quad (24)$$

Мертва зона струмової відсічки в мінімальному режимі джерела живлення:

$$Z_{M3.min\%} = (Z_{CYM.min} - Z_{C3}) \cdot 100 / Z_{O3} = (2,18 - 1,3) \cdot 100 / 1,08 = 81,5\%. \quad (25)$$

Результати розрахунку ефективності струмової відсічки дозволяють прийти до висновку – внаслідок збільшення опору живильної системи в два рази (з  $j = 0,55$  до  $j = 1,1$  Ом) захистоздатність струмової відсічки зменшилася в 3,7 рази. Для порівняння з результатами, що отримані в [1], розглянемо приклад з однорідною розподільною мережею з параметрами попереднього прикладу: опори системи  $Z_{C.max} = 0,55$  Ом і  $Z_{C.min} = 1,1$  Ом; об'єкта захисту  $Z_{O3} = 1,08$  Ом; сумарні опори всієї системи:  $Z_{CYM.max} = 1,63$  Ом і  $Z_{CYM.min} = 2,18$  Ом; погонний опір об'єкта захисту:  $Z_{\Pi} = 0,12$  Ом / км, опір спрацьовування струмової відсічки  $Z_{C3} = 1,3$  Ом.

Тоді довжина об'єкта захисту дорівнює:

$$L_{O3} = Z_{O3} / Z_{\Pi} = 1,08 / 0,12 = 9 \text{ км.} \quad (26)$$

Довжина ділянки об'єкта захисту струмової відсічки в максимальному режимі системи дорівнює:

$$L_{TO.max} = Z_{TO.max} / Z_{\Pi} = (Z_{C3} - Z_{C.max}) / Z_{\Pi} = (1,3 - 0,55) / 0,12 = 6,25 \text{ км.} \quad (27)$$

Довжина ділянки об'єкта захисту струмової відсічки в мінімальному режимі системи дорівнює:

$$L_{TO.min} = Z_{TO.min} / Z_{\Pi} = (Z_{C3} - Z_{C.min}) / Z_{\Pi} = (1,3 - 1,1) / 0,12 = 1,6 \text{ км.} \quad (28)$$

## Висновки

1. Запропоновано методику оцінювання ефективності струмової відсічки для об'єктів розподільних мереж з різними питомими опорами.

2. Для інтегральної оцінки ефективності струмової відсічки введено термін – опір спрацьовування струмової відсічки  $Z_{C3}$ .

3. Розрахунки з використанням  $Z_{C3}$  дозволяють наочно визначити зони дії захисту з різними питомими опорами і режимами роботи розподільної мережі.

4. Запропонована методика дозволяє легко розрахувати довжину ділянки об'єкта мережі, що захищається струмовою відсічкою, однорідними погонними опорами.

5. Розглядаючи в складі  $Z_C$  опору трансформаторів, можна знайти межі резервної потужності, за яких струмова відсічка забезпечить нормовану чутливість.

## Список використаних джерел

1. Омельчук А. А. Об эффективности токовой отсечки распределительных сетей / А. А. Омельчук // Электрические сети и системы. – 2014. – Вып.3, С. 66 – 67
2. Чернобровов Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 520 с.

## Анотация

### К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Баженов В. Н., Кулешова К. В.

*Рассмотрена теоретическая основа и предложены практические подходы по оценке эффективности токовой отсечки для кабельно-воздушных линий, блоков "линия-трансформатор" и других элементов в распределительных электрических сетях.*

## Abstract

### ON EFFICIENCY OF CURRENT CUTOFF IN THE DISTRIBUTION NETWORKS

V. Bazhenov, K. Kuleshova

*A theory and practice efficiency current cutoff for overhead transmission lines, power "line-transformer" and other elements in the distribution network.*