

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто вибір методу заземлення нейтралі в мережі напругою 6-35 кВ. Встановлено, що обрана стратегія заземлення нейтралі має великий вплив на широкий спектр технічних рішень, що застосовуються в розподільчій мережі. Визначені критерії ефективності для даного режиму нейтралі. Проведено аналіз впливу режиму роботи нейтралі на рівень перенапруг, кількість пошкоджень, час пошуку пошкоджень, а також на ступінь небезпеки для людини при однофазному замиканні на землю. Здійснено дослідження його впливу на використання захисного шунтування, релейного захисту, режиму заземлення через реактор і резистор, а також їх комбінацію.

Ключові слова: режими роботи нейтралі, електробезпека, технічний стан мереж напругою 6-35кВ.

Abstract

The selection of the neutral grounding method in a 6-35 kV voltage network has been considered. It has been established that the chosen neutral grounding strategy significantly influences a broad spectrum of technical solutions implemented in the distribution network. Criteria for the effectiveness of this neutral mode have been identified. An analysis of the impact of the neutral operation mode on overvoltage levels, the number of damages, the time required for fault detection, and the degree of danger to individuals in the event of a single-phase ground fault has been conducted. Research has been carried out on its influence on the use of protective shunting, relay protection, grounding mode through a reactor and resistor, as well as their combination.

Keywords: neutral operating modes, electrical safety, technical condition of networks with a voltage of 6-35 kV.

Вступ

Актуальність проблеми полягає в складності та неоднорідності розподільчої мережі напругою 6-35 кВ, що має високу ціну відмови та вимагає автономного обслуговування. Вибір режиму заземлення нейтралі у такій мережі є важливою задачею при проектуванні, виготовленні та експлуатації.

Режим заземлення нейтралі системи електропостачання визначає параметри, такі як струм у місці пошкодження, перенапряг на непошкоджених фазах, вибір засобів захисту від однофазних замикань на землю (ОЗЗ), параметри і характеристики ізоляції, захист від перенапруг, надійність електропостачання, опір контура заземлення на підстанції, безпека обслуговуючого персоналу та захист від перенапруг електрообладнання при ОЗЗ.

У сучасний період велика увага приділяється забезпеченню високого рівня надійності, безпеки та ефективності використання розподільчих мереж [1-2]. Для досягнення цього проводиться робота, така як створення додаткових центрів живлення, скорочення довжини радіальних ліній та їх ділянок, які можна виділити комутаційними апаратами, і впровадження засобів релейного захисту та протиповарійної автоматики.

Незважаючи на це, електроустановки з ізольованою нейтраллю стикаються з великою кількістю однофазних замикань на землю. У кабельних мережах переважають однофазні замикання на землю, а в повітряних мережах спостерігається обрив проводу з наступним замиканням на землю. Ці явища негативно позначаються на надійності, безпеці та ефективності використання систем електропостачання. Вони викликають кратності внутрішніх перенапруг, що є характерними для мереж з ізольованою нейтраллю, і компенсацію ємнісних струмів ОЗЗ. Крім того, існує ризик виникнення подвійних замикань на землю, пошкодження трансформаторів напруги та засобів контролю ізоляції, що впливає на ефективність компенсації струмів ОЗЗ, збільшує кількість коротких замикань (к.з), підвищує імовірність помилкових дій обслуговуючого персоналу та погіршує характеристики релейного захисту.

Проблема оптимізації режиму нейтралі [3, 4] досліджувалася на різних етапах розвитку мереж 6-35 кВ. У певних роботах, зокрема в [5], представлені результати досліджень режимів нейтралі

та описані процеси при однофазних замиканнях, а також пристрої, які використовуються головним чином для компенсації ємнісного струму. Однак у публікаціях, включаючи [5], тільки частково враховується необхідність комплексного вирішення задачі мінімізації експлуатаційних витрат, залежних від режиму нейтралі мережі та використовуваних пристроїв автоматики. Загалом, ці питання детально розглянуті лише для кар'єрних мереж у [6], і тому існує необхідність у розробці ефективних методів роботи нейтралі систем електропостачання.

Мета роботи. Основною метою цього дослідження є підвищення рівня надійності, безпеки та ефективності використання розподільчих мереж через оптимізацію режиму заземлення нейтралі.

Результати досліджень.

Виходячи з результатів аналізу сучасних засобів захисту мереж 6-35 кВ від однофазних замикань на землю, сформульовані критерії ефективності заземлення нейтралі. Для оцінки комплексного показника ефективності (якості) режиму нейтралі використані методи кваліметрії [6], відповідно до яких властивості об'єкту, тобто розподільної мережі, відображаються точкою n – мірного простору (n – число незалежних показників, що визначають ефективність режиму нейтралі за підсумками порівняння об'єктів між собою і з еталоном).

Визначимо показник ефективності режиму нейтралі за умовою обмеження перенапруг y_n у вигляді відношень:

$$y_{n2} = S_1/S_2; y_{n3} = S_1/S_3 \quad (1)$$

де S_1, S_2, S_3 - площі під кривими $P = f(k_{п1})$ (рис. 2.) між ординатами, проведеними через точки $k_{п1} = 2,4$ і $k_{п2} = k_{п,макс}$, де $P = f(k_{п1})$ - розподіли кратностей перенапруг на непошкоджених фазах при всіх видах однофазних замикань, причому $k_{п1} = 2,4$ - точка на осі $k_{п1}$, яка відповідає перенапругам, безпечним для ізоляції розподільної мережі із середнім рівнем експлуатації; $k_{п,макс}$ максимально можливі перенапруга яка практично не перевищує 3,6. Визначений у такий спосіб показник y_n достатньо повно характеризує ефективність режиму нейтралі, оскільки він пов'язаний тільки з найбільш небезпечними перенапругами, кратності яких знаходяться за точкою $k_{п1}$.

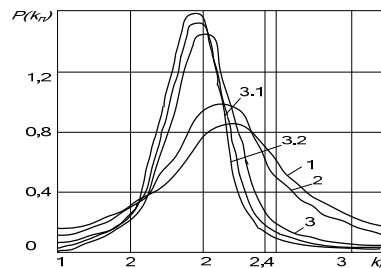


Рис. 1 – Розподіл кратностей перенапруг при однофазних замиканнях

Точка $k_{п1} = 2,4$ вибрана на підставі експериментів, проведених в [4].

Враховуючи опубліковані дані щодо перенапруг при однофазних замиканнях, зокрема [4,7,8], а також вимірювань перенапруг у мережах напругою 6-35 кВ різного призначення, на рис. 1 побудовані диференціальні криві розподілу кратностей перенапруг. Для нейтралі, яка заземлена через резистор, представлені залежності: 3.1 - отримана на основі [7,8] та інших робіт вітчизняних та зарубіжних авторів при $k_I = I_A/I_C > 2$; 3.2 - складена з результатів [9] і експериментальних вимірювань при $I_c=50\div 80$ А, $k_I = 0,6 \div 0,8$; 3 - отримана на основі вимірювань [4], проведених в сільських мережах при $I_c=4\div 9$ А, $k_I = 0,5 \div 0,8$, а також за результатами аналізу моделювання перекидних однофазних замикань.

Обробка результатів вимірювань Значення k різні для трьох режимів нейтралі, як і параметри a (математичне очікування) і σ , приведені в таблиці 1.

показала, що кратності перенапруг характеризуються нормальним законом розподілу.

Таблиця 1 – Параметри нормального закону розподілу при різних режимах нейтралі

№	Нейтраль мережі	σ	a	k
1	Ізолювана	0,46	2,27	1,01
2	Заземлена через реактор	0,4	2,07	1
3	Заземлена через резистор	0,3	1,92	1

Показники ефективності режиму нейтралі за умовою обмеження перенапруг визначаються

виразом

$$y_{п2(3)} = \int_{2,4}^{3,6} f_1(k_n) dk_n \left[\int_{2,4}^{3,6} f_2(3)(k_n) dk_n \right]^{-1}. \text{ тоді } y_{п2} = 1,55; y_{п3} = 8,2. \quad (2)$$

При $x_{п1} = 0$; $x_{п2} = 0,36$, $x_{п3} = 0,876$, то з урахуванням прийнятих допущень отримаємо достатньо високу ефективність заземлення нейтралі через високоомний резистор. У випадку більш глибокого обмеження перенапруг, коли вірогідність кратностей $k_n > 2,4$ наближається до малої величини, оцінка x_n наближається до одиниці.

При розгляді значення $x_{п2}$ і $x_{п3}$, необхідно мати на увазі і те, що крива 2 на рис. 1. побудована на підставі даних, отриманих в мережах з точністю компенсації ємнісних струмів, що не перевищувала $\pm 5\%$.

Вплив режиму нейтралі на аварійні вимикання. Показники ефективності режиму нейтралі по умові зниження збитку x_y можна визначити як відношення

$$x_{y1} = t_{y1}/t_{y1} = 1; x_{y2} = t_{y1}/t_{y2}; x_{y3} = t_{y1}/t_{y3} = 1,$$

де t_{y1}, t_{y2}, t_{y3} - середній (зважений) час відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі, в мережі з ізольованою нейтраллю; з компенсацією ємнісних струмів однофазних замикань; при заземленні нейтралі через резистор.

Якщо повне число пошкоджень n_n , число однофазних замикань n_0 , з яких n_{0k} перешли за час визначення пошкодженої ділянки в короткі замикання і багатомісні пошкодження, тоді ефективність компенсації ємнісних струмів однофазних замикань (за методикою [10.11])

$$I_k = 1 - n_{0k}/n_0 \quad (3)$$

може істотно перевищувати її реальне значення, особливо в мережах де $I_c > 100$ А, якщо під n_{0k} розуміти тільки зафіксовані персоналом випадки переходу однофазних замикань в короткі. Для обчислення I_k необхідно враховувати всі короткі замикання, за винятком тих, що виникли в результаті механічних пошкоджень (в основному, поривів). Тоді значення I_k на рівні 0,1...0,3 відображатиме дійсну ефективність компенсації в кабельних мережах при $I_c > 100$ А і 0,3...0,7 - при $I_c < 100$ А тільки по показнику зниження числа переходів однофазних замикань в короткі, який лише побічно відображає вплив режиму нейтралі на надійність мережі і збиток від аварійних відключень споживачів.

У загальному вигляді показники ефективності режиму нейтралі за умовою збитку

$$x_{y2} = \eta_{1-2} \left(\sum_{i=1}^{i=k} t_{yi1} n_{oi1} \right) \sum_{i=1}^{i=m} n_{oi2} \left(\left(\sum_{i=1}^{i=k} n_{oi1} \right) \left(\sum_{i=1}^{i=m} t_{yi2} n_{oi2} \right) \right)^{-1}; x_{y3} = x_{y2} \eta_{1-3} \left(\eta_{1-2} \frac{1-a_{p3}}{1-a_{p2}} \right), \quad (4)$$

де η_{1-2}, η_{1-3} - відносне зниження числа пошкоджень при переході від ізольованої нейтралі до заземленої відповідно через реактор і резистор; t_{yi1}, t_{yi2} - час одного аварійного відключення споживачів в мережі відповідно з ізольованою і заземленою через реактор нейтраллю; n_{oi1}, n_{oi2} - число однофазних замикань в мережі при тих же режимах нейтралі; a_{p2}, a_{p3} - показники селективності реле сигналізації в мережі із заземленням нейтралі відповідно через реактор і резистор.

Запишемо показник селективності реле сигналізації в міській мережі, що складається з k ділянок

$$a_p = \left(\sum_{i=1}^{i=k} n_{pi} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{i=k} \left(\frac{n_{ci}}{n_{oi}} \right) n_{pi} \quad (5)$$

де n_{ci} - число селективних спрацьовувань реле; n_{pi} - число встановлених на ділянці k мережі реле сигналізації.

З урахуванням даних, представлених в [10,12], показники ефективності режиму нейтралі за умови зниження збитку від аварійних відключень споживачів $x_{y2} = 1,2$; $x_{y3} = 9,7$.

Такі істотні переваги заземлення нейтралі мережі через резистор забезпечуються не тільки тим, що при такому режимі знижується число пошкоджень в мережі і при однофазних замиканнях поліпшуються умови функціонування пристроїв селективної сигналізації, але і високим ступенем резервування живлення споживачів.

Висновки

Розгляд режимів роботи розподільчих мереж напругою 6-35 кВ вказує на важливий вплив режиму нейтралі на характеристики релейного захисту від однофазних замикань на землю (ОЗЗ), зокрема на його селективність, чутливість і надійність. Заземлення нейтралі за допомогою високоомного резистора зміщує характеристику намагнічування трансформатора струму нульової послідовності, що призводить до підвищення рівня сигналу, що надходить на вхід захисту від ОЗЗ, і внаслідок цього підвищує його чутливість.

У виборі резистора для заземлення нейтралі в розподільчих мережах враховується вимога, щоб

при дугових замиканнях на землю в перехідному процесі відсутня була високочастотна складова. Основним варіантом схеми підключення високоомного резистора є безпосереднє з'єднання його з нейтраллю силового трансформатора за допомогою запобіжника, обладнаного засобами контролю його справності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник /А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матєенко, О. Р. Пастух. Київ. :КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 456 с.
2. Яндульський О.С., Дмитренко О.О., Касьянов Г.П. Релейний захист електричних систем. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем: навч. посіб., 2007 р. 72 с.
3. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 180 с.
4. Kutin V. Workability conditions determination of network distribution with overhead lines power transmission with the 6-35 kV./ V Kutin, M Kutina, A Kovalov // Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021) Kryvyi Rih, Ukraine, May 19-21, 2021. - E3S Web of Conferences 280, 05008 (2021). Сирота І.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режим нейтралі електричних мереж. 1985. 264 с.
5. Кутін, В. М. Метод ризик-аналізу для прогнозування технічного стану електрообладнання трансформаторних підстанцій / В. М. Кутін, С. А. Бондаренко, М. В. Кутіна // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. 2019. № 2 (56). С. 84–90.
6. Бржезицький В.О., Ісакова, А.В., Рудаков В.В. та інші. Техніка і електрофізика високих напруг. Навчальний посібник. За редакцією В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. Харків: НТУ "ХП" Торнадо, 2005.
7. Martinez-Velasco, J. A., ed. "Power system transients: parameter determination", CRC press, 2017. 632 p. ISBN 978-1-4200-6529-9
8. Кутіна М. Вдосконалення засобів протиправильної автоматики в системах електропостачання кар'єріву [Текст] / Марина Кутіна, Микола Свіргун // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. № 3. С. 58-64.
9. Кутін В. М. Математична модель визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж постійного струму та її аналіз [Текст] / В. М. Кутін, М. В. Кутіна // Вісник Криворізького національного університету. 2016. Вип. 42. С. 65-68. Кутін В.М. Визначення умов роботоздатності розподільчих мереж /В.М. Кутін, С.В. Матвієнко, Вінниця : ВНТУ, 2015. 148 с.
10. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник / В.М. Кутін, м. О. Люхін, М.В. Кутіна. Вінниця: ВНТУ, 2014. 161 с

Кутін Василь Михайлович — д-р техн. наук, професор, кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, vmkytin@gmail.com.

Кутіна Марина Василівна – канд. технічн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: mkytina@gmail.com.

Завальнюк Олег Володимирович – студент групи ЕСЕ-22м, кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Vasyl Mykhailovych Kutin — Dr. Tech. of Sciences, professor, department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, vmkytin@gmail.com.

Kutina Marina Vasylivna – Candidate of Science, senior lecturer in Department of electrical power consumption and power management, e-mail: mkytina@gmail.com.

Oleg Volodymyrovych Zavalnyuk – student of the ESE-22m group, Department of Electrical Engineering Systems of Power Consumption and Energy Management.