УДК 621.316.925

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУГИ НЕСИМЕТРІЇ У ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ З РІЗНИМИ РЕЖИМАМИ НЕЙТРАЛІ

СТЕПАНЕНКО Ю.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: stepanenko.yu.v@nmu.one, ORCID: 0000-0001-5999-1927

Мета роботи. *Визначення впливу параметрів мереж з різними режимами нейтралі на напругу нульової послідовності.*

Методи дослідження. *Методологія дослідження базується на загальній теорії електротехніки і, зокрема, на методі симетричних складових.*

Отримані результати. *Розроблено математичну модель для встановлення характеру зміни напруги нульової послідовності для різних режимів нейтралі мережі. Встановлено значення напруг нульової послідовності та кутів між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності залежно від ємнісної несиметрії, ємності та активного опору ізоляції мережі для різних режимів нейтралі.*

Наукова новизна. *Проведені дослідження показали, що найбільше зростання напруги нульової послідовності відзначається при ємності несиметрії, яка становить 10...30% від ємності ізоляції мережі. Причому найбільш суттєвий вплив відносна ємнісна несиметрія ізоляції при зміні значень ємності мережі відносно землі надає на величину напруги нульової послідовності в мережах з компенсованою нейтраллю і практично виключається при повністю ізольованій нейтралі мережі відносно землі.*

Практична цінність. *Для реальних параметрів мережі за результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна судити про працездатність існуючих засобів захисту та використовувати їх при розробці нових принципів і пристроїв захисту.*

Ключові слова: напруга; нульова послідовність; несиметрія; ізольована нейтраль; компенсована нейтраль; мережа з резистором у нейтралі.

I. ВСТУП

В електричних мережах гірничих підприємств напругою понад 1 кВ відповідно до [1] та галузевих правил безпеки передбачається застосування двоступінчастого захисту від однофазних замикань на землю з дією на відключення.

Дослідження свідчать, що у кар'єрних розподільних мережах другий ступінь має досить великий відсоток хибних спрацьовувань (10...30 %).

Однією з причин неправильного спрацьовування захисту слід вважати появу напруги несиметрії за відсутності у мережі замикання на землю.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В даний час найбільш поширеними типами захисту від замикань на землю (перший ступінь) є так звані спрямовані захисти [2], [3].

За відгуками енергослужб підприємств, з урахуванням середньої кількості спрацьовувань пристроїв, відсотка групових відключень при стійких замиканнях, працездатність першого ступеня захисту їх не задовольняє.

За оцінкою експлуатаційників під час роботи захисту мають місце випадки відмови герконових реле та напівпровідникових приладів. До того ж зазначаються часті відмови захисту при дугових замиканнях на землю, а також неселективні відключення.

Другий ступінь (резервний) захисту від замикань на землю виконується, в основному, на максимальних реле напруги, які реагують на рівень напруги нульової послідовності.

Працездатність цього ступеня захисту на підставі кількості спрацьовувань при зафіксованих та незафіксованих відмовах першого ступеня оцінена енергослужбами як незадовільна.

Захист спрацьовує при групових та дугових замиканнях. Уставка за часом другого ступеня не дозволяє відстроюватися від двох ступенів захистів, що працюють за напрямом нульової послідовності.

Другий ступінь виявляється більш чутливим за перший ступінь захисту по струму.

На підставі результатів опитування енергослужб підприємств можна відзначити: досвід експлуатації першого та другого ступенів захисту від замикань на землю відображає їхню незадовільну роботу, що призводить до невиправданих відключень джерела живлення (секції шин підстанції) і, відповідно, пов'язано зі значними економічними збитками від простою великої кількості гірничодобувних машин.

III. МЕТА РОБОТИ

Для правильного вибору засобів захисту, оцінки можливості створення нових принципів та пристроїв захисту потрібно дослідити вплив несиметрії на амплітудні та фазові параметри напруги нульової послі-

© Степаненко Ю.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-3

довності при різних режимах роботи нейтралі мережі.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У потужній енергетичній системі трикутник лінійних напруг утворює жорстку систему. Його положення щодо точки відліку визначається провідностями на землю на затискачах джерела та в інших точках системи.

Симетричному трикутнику лінійних напруг відповідає симетрична зірка фазових напруг [4], [5]. Однак, це справедливо тільки при нульовому потенціалі нейтралі відносно землі, що має місце при повній симетрії ізоляції фаз, яка складається з активного опору та ємності мережі.

Залежність параметрів нульової послідовності від активних опорів ізоляції розглянута досить детально [6], [7].

Цікавим є дослідження впливу ємностей фаз мережі відносно землі. Величина цих ємностей повністю визначає положення трикутника лінійних напруг відносно землі.

Ємності між фазами не впливають на потенціал системи щодо землі: вони утворюють шлях для взаємного обміну струму між фазами, створюючи додаткове навантаження в контурі, який складається з проводів та обмоток трансформатора.

З іншого боку, для зарядних струмів, що течуть на землю, немає шляху для повернення, якщо система не з'єднана із землею. За першим законом Кірхгофа остання відіграє роль вузла схеми і сума всіх струмів, що притікають до нього, дорівнює нулю.

Позначивши три вектори напруги відносно землі U_{Ae}, U_{Be}, U_{Ce}, отримаємо:

$$\dot{U}_{Ae} \cdot Y_A + \dot{U}_{Be} \cdot Y_B + \dot{U}_{Ce} \cdot Y_C = 0 \quad (1)$$

Нехай деяка точка, що лежить всередині трикутника лінійних напруг, має потенціал землі. Напруги відносно землі, напруги відносно нейтралі та зміщення нейтралі пов'язані такими співвідношеннями [4], [5], [8]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Ae} &= \dot{U}_A + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{Be} &= \dot{U}_B + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{Ce} &= \dot{U}_C + \dot{U}_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Вони справедливі для будь-якої форми трикутника напруги, а не тільки симетричної. Сума трьох фазних потоків трифазних силових трансформаторів точно дорівнює нулю.

Це справедливо і для напруг, індукованих цими потоками в трьох фазах, що призводить до співвідношення, яке визначає положення нульової точки:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (3)$$

Співвідношення (2) та (3) дозволяють надати виразу (1) такої інтерпретації. Струми системи на землю

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{U}_A + \dot{U}_0) \cdot Y_A \\ \dot{I}_B &= (\dot{U}_B + \dot{U}_0) \cdot Y_B \\ \dot{I}_C &= (\dot{U}_C + \dot{U}_0) \cdot Y_C \end{aligned}$$

можуть бути перегруповані та представлені у вигляді:

$$\left(\dot{U}_A \cdot Y_A + \dot{U}_B \cdot Y_B + \dot{U}_C \cdot Y_C\right) + \dot{U}_0 \cdot \left(Y_A + Y_B + Y_C\right) = 0 \quad (4)$$

Вираз у перших дужках є струмом, який протікав би на землю, якби напруги проводів відносно землі дорівнювали напругам фаз відносно нейтралі.

Сума двох членів виразу (4) згідно із законом Кірхгофа дорівнює нулю. Якщо ємності на землю C_A, C_B, C_C рівні між собою, перший член рівняння на підставі (3) зникає.

При цьому і другий член повинен стати рівним нулю, а, отже, і $U_0 = 0$. Таким чином, нейтраль симетричної трифазної системи, що знаходиться в рівновазі, має потенціал землі.

При з'єднанні одного з трьох проводів фаз із землею зміни лінійної напруги не відбувається, якщо джерело живлення досить потужне.

Для дослідження напруги нульової послідовності необхідно скласти схему заміщення розподільної мережі, яка представляє собою сукупність схем заміщення окремих елементів з урахуванням наступних припущень [8]:

1) система ЕРС джерела живлення симетрична та не містить вищих гармонійних;

2) рівномірно розподілені ємності та опори ізоляції фаз мережі відносно землі замінені зосередженими;

3) активні та індуктивні опори проводів ліній прийняті рівними нулю;

4) індуктивність дроселя, що компенсує, не залежить від прикладеної напруги, а активні втрати імітуються активною провідністю;

5) активний опір і індуктивність обмоток трансформатора, що живить, рівні нулю.

З урахуванням вищевикладеного, схеми заміщення розподільної мережі без урахування навантаження для дослідження напруги нульової послідовності в режимі, що встановився, при різних режимах роботи нейтралі мають вигляд, представлений на рис.1 і 2.

На схемах заміщення розподільної мережі позначено:

Y_A, Y_B, Y_C – комплексні провідності ізоляції фаз відносно землі;

$Y_H = Y_K$ – провідність пристрою, що компенсує;

$Y_H = Y_R$ – провідність резистора в нейтралі;

y – провідність, яка визначає несиметрію ізоляції

мережі відносно землі.

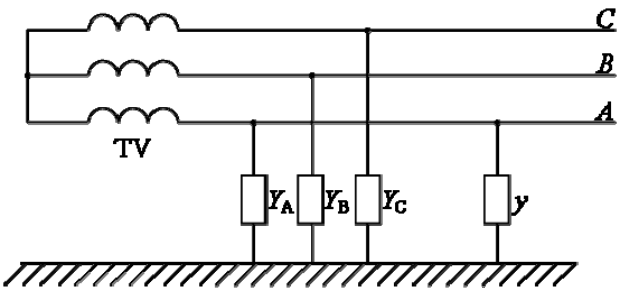

Рисунок 1. Схема заміщення мережі з ізольованою нейтраллю для дослідження U_0

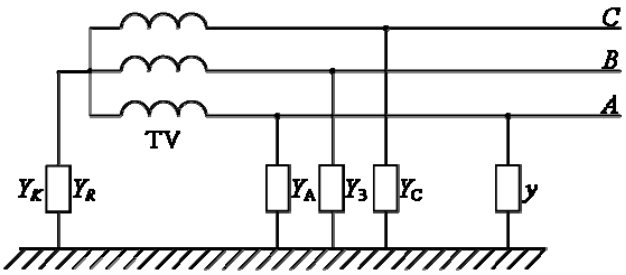

Рисунок 2. Схема заміщення компенсованої мережі та мережі з резистором у нейтралі

При складанні математичної моделі передбачається, що:

• у нормальному режимі роботи мережі провідності кожної фази рівні між собою;

• фазні ЕРС мережі рівні за величиною і зсунуті одна відносно одної на 120°;

• потужність трансформатора, що живить, не обмежена.

Такі припущення, враховуючи відносно невелику протяжність ліній розподільних мереж, що відходять, дозволяють спростити математичні виведення і перетворення, але при цьому практично не впливатимуть на точність кінцевих результатів.

Для представленої на рис. 1 схеми заміщення згідно з першим законом Кірхгофа можна записати:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_З = 0$$

або

$$\dot{U}_{Ae} \cdot Y_A + \dot{U}_{Be} \cdot Y_B + \dot{U}_{Ce} \cdot Y_C + \dot{U}_{Ae} \cdot y = 0$$

З урахуванням $Y_A = Y_B = Y_C = Y$ і виразів (2) та (3) отримуємо:

$$(3 \cdot Y + y) \cdot \dot{U}_0 + y \cdot \dot{U}_A = 0 \qquad (5)$$

Замінивши у виразі (5) провідності їх значеннями $Y = 1/R + j\omega C$ та $y = j\omega C_Д$ отримаємо вираз (6) для напруги нульової послідовності, виражений через параметри електричної мережі:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + j\omega \cdot (3C + C_Д)} \qquad (6)$$

$$\dot{U}_0 = -\frac{U_A \cdot \omega \cdot C_Д}{(3/R)^2 + \omega^2 \cdot (3C + C_Д)^2} \cdot \left[\omega \cdot (3C + C_Д) + j(3/R)\right]$$

де R і C – відповідно активний опір та ємність ізоляції однієї фази мережі відносно землі; $C_Д$ – ємність несиметрії.

Діюче значення напруги нульової послідовності при несиметрії в мережі з ізольованою нейтраллю, виражене через фазну напругу та параметри ізоляції мережі:

$$U_0 = U_Ф \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R)^2 + (3 \cdot \omega \cdot C + \omega \cdot C_Д)^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності визначається з виразу:

$$\varphi_1 = 180° + arctg \frac{3}{\omega \cdot R \cdot (3C + C_Д)}$$

Результати розрахунків параметрів напруги нульової послідовності представлені графічними залежностями.

На рис. 3 наведені характерні криві зміни значення напруги зміщення нейтралі при різних параметрах розподільної мережі, ємнісної несиметрії та їх поєднаннях.

Криві зміни кута вектора напруги нульової послідовності представлені на рис. 4.

Для мережі з компенсованою нейтраллю згідно з першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_K + \dot{I}_З = 0 \qquad (7)$$

З урахуванням того, що

$$\dot{I}_K = \dot{U}_0 \cdot (1/R_K - j(1/\omega L))$$

напруга нульової послідовності через параметри мережі після відповідних перетворень визначається:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + 1/R_K + j(3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д - 1/(\omega L))}$$

Діюче значення напруги нульової послідовності при ємнісній несиметрії в мережі з компенсованою нейтраллю визначається виразом:

$$U_0 = U_Ф \cdot \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R + 1/R_K)^2 + (3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д - 1/(\omega L))^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності:

$$\varphi_1 = 180° + arctg\frac{3/R + 1/R_K}{\omega\cdot(3C + C_Д) - 1/(\omega L)}$$

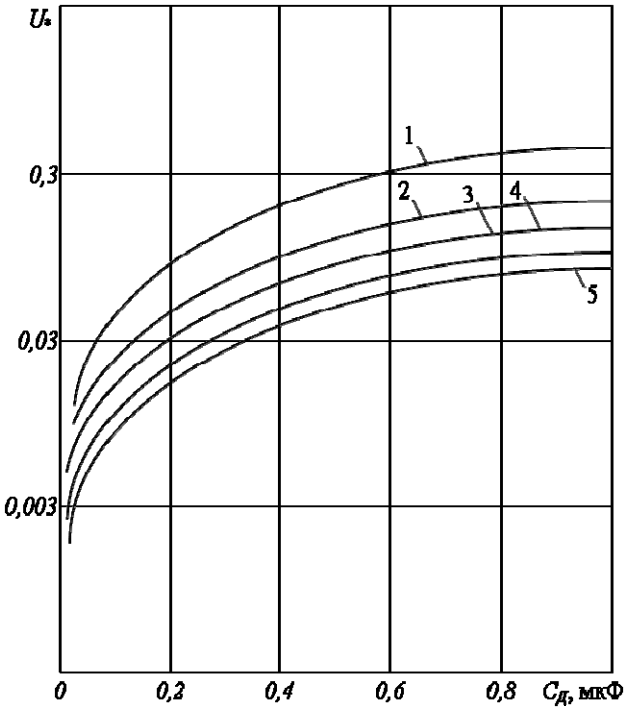

Рисунок 3. Напруга нульової послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю в залежності від ємності несиметрії при R = 5 кОм та C (мкФ), що дорівнює: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0; 4 – 4,0; 5 – 5,0

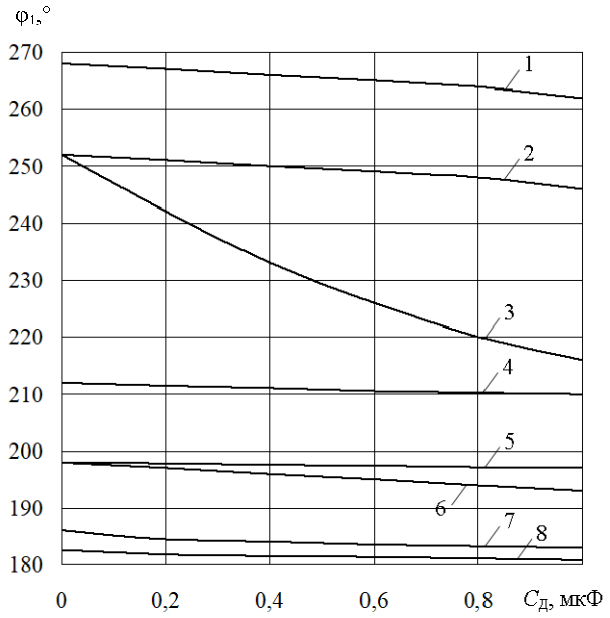

Рисунок 4. Залежність фази напруги нульової послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю від ємності несиметрії при C (мкФ) і R (кОм) відповідно рівних: 1 – 0,1 і 1; 2 – 1,0 та 1; 3 – 0,1 та 10; 4 – 5,0 та 1; 5 – 10 та 1; 6 – 1,0 та 10; 7 – 5,0 та 10; 8 – 10 та 10

При розрахунку параметри мережі змінювалися у досить широкому діапазоні можливих значень активного опору ізоляції та ємності відносно землі розподільних мереж.

Режим компенсації ємнісних струмів приймався резонансним і з різним ступенем розладу дугогасної котушки, як у бік недокомпенсації, так і в бік перекомпенсації.

На рис. 5 і 6 наведені характерні залежності зміни величини і кута напруги нульової послідовності для різних параметрів мережі та режимів налаштування дугогасної котушки.

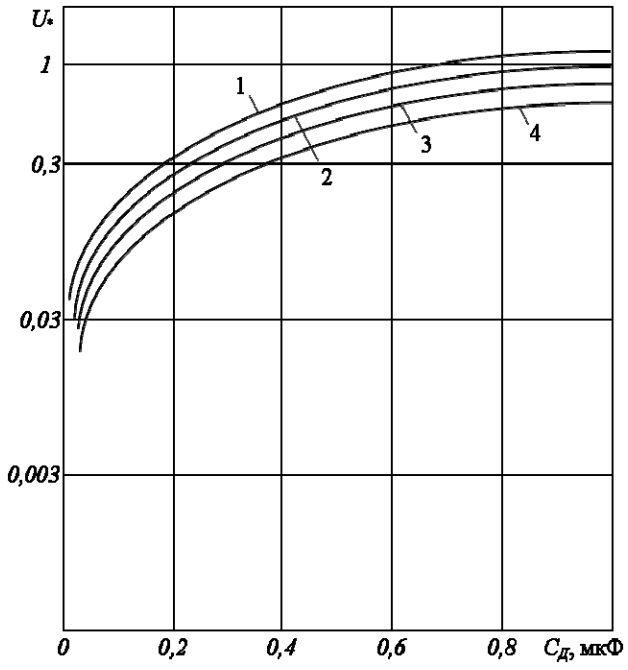

Рисунок 5. Залежність напруги нульової послідовності в мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному налаштуванні дугогасної котушки, від ємності несиметрії при C (мкФ) рівному: 1 – 0,1; 2 – 2,0; 3 – 4,0; 4 – 5,0

Для представленої на рис. 2 схеми заміщення розподільної мережі з нейтраллю, заземленою через резистор і приймаючи $Y_R = 1 / R_N$ аналогічно (7) можна записати:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_R + \dot{I}_З = 0$$

Після відповідних підстановок і перетворень отримаємо вираз для визначення напруги нульової послідовності:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + 1/R_N + j(3\omega\cdot C + \omega\cdot C_Д)}$$

Діюче значення напруги нульової послідовності при ємнісній несиметрії в мережі з резистором у нейтралі визначається:

$$U_0 = U_Ф \cdot \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R + 1/R_N)^2 + (3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д)^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності визначається за виразом:

$$\varphi_1 = 180° + arctg \frac{3/R + 1/R_N}{3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д}$$

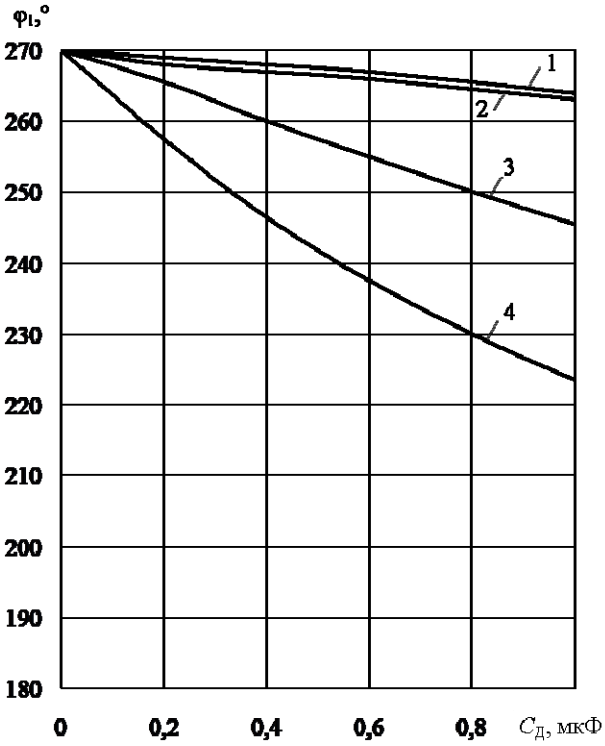

Рисунок 6. Залежність фази напруги нульової послідовності від ємності несиметрії при *C* (мкФ) і *R* (кОм) відповідно рівних: 1 – 10 і 1; 2 – 0,1 та 1; 3 – 10 та 10; 4 – 0,1 та 10

При розрахунках діючого значення та кута напруги несиметрії параметри розподільної мережі змінювалися також у досить широких межах. Величина опору резистора в нейтралі визначалася за умови:

$$R_N = (1/3...2/3) \cdot X_C$$

На рис. 7 та 8 наведені криві зміни значення та кута вектора напруги нульової послідовності в мережі з резистором у нейтралі.

Проведений аналіз результатів досліджень дає можливість встановити характер зміни величини напруги нульової послідовності залежно від ємнісної несиметрії, ємності та активного опору ізоляції мережі для різних режимів нейтралі.

У режимі ізольованої нейтралі напруга несиметрії збільшується за зміни величини ємності мережі відносно землі від 10 мкФ до 0,5 мкФ.

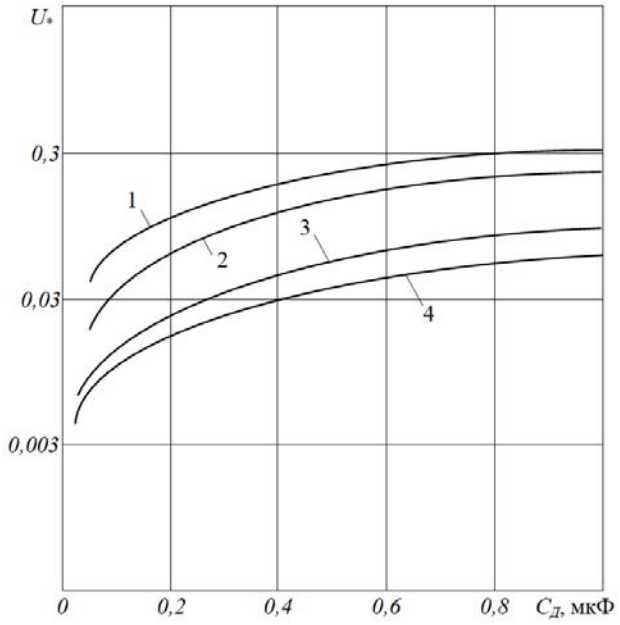

Рисунок 7. Напруга нульової послідовності залежно від ємності несиметрії при *R* = 5 кОм і *C* (мкФ), що дорівнює: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 3,0; 4 – 5,0

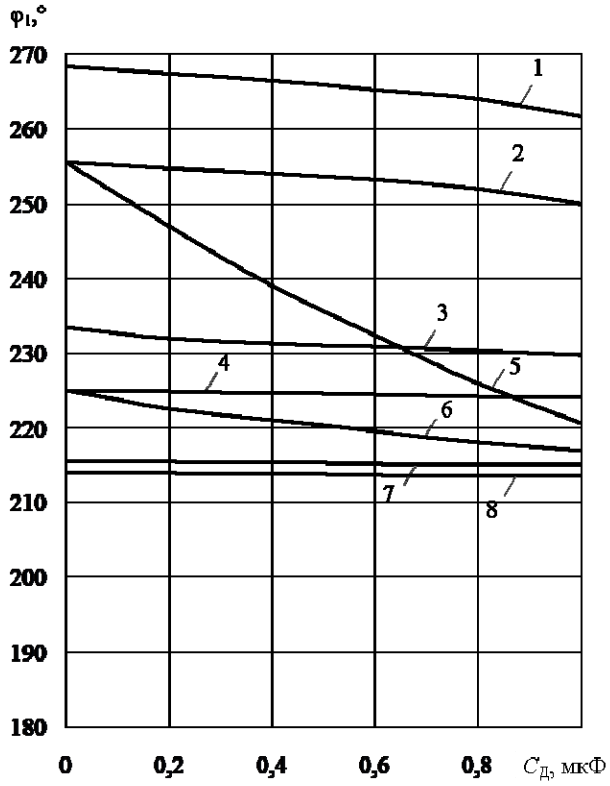

Рисунок 8. Залежність фази напруги нульової послідовності в мережі з резистором в нейтралі від ємності несиметрії при *C* (мкФ) і *R* (кОм) відповідно рівних: 1 – 0,1 і 1; 2 – 1 та 1; 3 – 5 та 1; 4 – 10 та 1; 5 – 0,1 та 10; 6 – 1 та 10; 7 – 5 та 10; 8 – 10 та 10

Значне збільшення напруги нульової послідовності спостерігається у разі зростання ємності несиметрії.

На характер збільшення U_0 залежно від $C_Д$ величини ємності мережі та активного опору ізоляції не впливають.

У мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному режимі налаштування дугогасної котушки, напруга нульової послідовності збільшується зі зростанням ємності несиметрії.

У разі збільшення активного опору ізоляції мережі характер зростання напруги зміщення нейтралі змінюється – наростання відбувається плавніше.

У режимі перекомпенсації збільшення ємності несиметрії спричиняє зростання напруги нульової послідовності тим більше, чим вищий активний опір ізоляції мережі.

У режимі недокомпенсації характер зміни напруги зміщення нейтралі аналогічний характеру зміни при резонансному режимі налаштування котушки.

Причому, величина напруги несиметрії дещо менша, ніж при резонансному режимі.

У мережі з резистором у нейтралі напруга нульової послідовності збільшується зі зростанням ємності несиметрії.

При збільшенні активного опору ізоляції мережі також спостерігається зростання напруги зміщення нейтралі.

Із збільшенням ємності мережі відносно землі величина напруги несиметрії знижується.

На величину кута між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності також впливає значення ємності несиметрії.

Для різних режимів роботи нейтралі відзначаються такі особливості:

• за інших рівних умов менша зміна кута між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності відбувається в мережі з резистором у нейтралі;

• найбільша залежність кута напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції спостерігається у мережі з ізольованою нейтраллю.

При різній ємності несиметрії та зміні параметрів мережі в реальних межах, фазовий кут напруги нульової послідовності змінюється в діапазоні від 270° до 180°.

Найбільше зростання напруги нульової послідовності відзначається при ємності несиметрії, яка становить 10...30% від ємності ізоляції мережі.

Подальше збільшення частки ємності несиметрії надає відносно менший вплив на напругу зміщення нейтралі.

Найбільш суттєвий вплив відносна ємнісна несиметрія ізоляції при зміні значень ємності мережі відносно землі надає на величину напруги нульової послідовності в мережах з компенсованою нейтраллю і практично виключається при повністю ізольованій нейтралі мережі відносно землі.

V. ВИСНОВКИ

Аналізуючи наявні методи та засоби захисту від однофазних замикань на землю [9] – [17], , можна сформулювати певні висновки.

Для реальних параметрів мережі за результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна судити про працездатність існуючих засобів захисту та використовувати їх при розробці нових принципів і пристроїв захисту.

Можна з упевненістю сказати, що другий ступінь захисту від однофазних замикань на землю при певній ємнісній несиметрії ізоляції мережі буде працювати хибно, тим самим призводячи до відключення джерела живлення і, відповідно, значних економічних збитків через простої технологічного обладнання.

Для виключення хибної роботи другого ступеня захисту необхідно розробляти захисний пристрій, ґрунтуючись на новому принципі, що включає, окрім контролю напруги нульової послідовності, інший параметр, який не залежить від ємності несиметрії ме-

режі.

Захисти першого ступеня при ємнісній несиметрії також можуть помилково працювати, оскільки фазові характеристики параметрів нульової послідовності аналогічні режиму однофазного замикання на землю.

Також варто звернути увагу на можливі додаткові втрати електроенергії у обладнанні при зниженні якості напруги [18], оскільки хибне спрацьовування або відмова пристроїв захисту опосередковано впливають і на показники якості електричної енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

[2] Nikander, A., Järventausta, P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. IEEE Trans. Power Deliv. 2017, 32, 1187–1195. https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183.

[3] N. Gana, N. F. Ab Aziz, Z. Ali, H. Hashim, and B. Yunus, 'A comprehensive review of fault location methods for distribution power system', Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci., vol. 6, no. 1, pp. 185–192, 2017, https://doi.org/10.11591/ijeecs.v6.i1.pp185-192.

[4] Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами: підручник / Ю.О. Карпов, С.Ш. Кацив, В.В. Кухарчук, Ю.Г. Ведміцький; під ред. проф. Ю.О. Карпова – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 377 с.

[5] Теоретичні основи електротехніки Частина 2: Навчальний посібник [Електронний ресурс]/ Л.Ю. Спінул, М.П. Бурик, В.Ю. Лободзинський; О.О. Білецький, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 9 Мбайт). – К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 167 с.

[6] Fan, Y., Guang, L., Yu, S., Yongduan, X., Hui, P.; Bingyin, X. Electrical Characteristics of Medium-voltage Distribution Network with Single-phase-to-ground Fault After Arc Extinction. Autom. Electr. Power Syst. 2019, 43, 134. https://doi.org/10.7500/AEPS20180911007.

[7] A. Farughian, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, 'Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks', Electr. Power Syst. Res., vol. 154, pp. 373–380, 2018, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006.

[8] R. Willheim, M Waters, "Neutral Grounding in High Voltage Transmission". Elsevier publishing company, New York, 1956.

[9] Petteri Kangasluoma. Medium Voltage Network Residual Earth Fault Current Estimation Methods / Master of Science Thesis. Tampere University. Master's Degree Programme in Electrical Engineering. November 2019, 97 p. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911155985.

[10] A. K. Abbas, S. Hamad, and N. A. Hamad, 'Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network', vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23. i2.pp621-632.

[11] Altonen, J.; Wahlroos, A.; Vähäkuopus, S.; Oy, E. Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated MV-network. CIRED 2017, 2017, 947–951. https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0967.

[12] Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K. Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents. Energies 2019, 12, 3759. https://doi.org/10.3390/en12193759.

[13] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis, and H. A. Illias, 'Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review', Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 74, no. March, pp. 949–958, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021.

[14] S. Authafa, 'Short Circuit Faults Identification and Localization in IEEE 34 Nodes Distribution Feeder Based on the Theory of Wavelets', Iraqi J. Electr. Electron. Eng., vol. 14, no. 1, pp. 65–79, 2018, https://doi.org/10.37917/ijeee.14.1.7.

[15] Farughian A, Kumpulainen L, Kauhaniemi K. Non-Directional Earth Fault Passage Indication in Isolated Neutral Distribution Networks. Energies. 2020; 13(18):4732. https://doi.org/10.3390/en13184732.

[16] Stojanović, Z.N.; Djurić, M.B. An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs. Electr. Power Syst. Res. 2013, 96, 144–149. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012. 11.004.

[17] M. Baù, R. Benato, S. Dambone Sessa, M. Poli, and C. Quaciari, 'Phase-to-ground fault location methods in unearthed sub-transmission networks: A review', AEIT 2016 - Int. Annu. Conf. Sustain. Dev. Mediterr. Area, Energy ICT Networks Futur., 2016, https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892761.

[18] Втрати енергії в електрообладнанні при низькій якості напруги. Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, М.В. Рогоза, Л.О. Токар, Ю.В. Степаненко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2019 (114), с. 9-13. https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13

Стаття надійшла до редакції 05.06.2024

STUDY OF UNBALANCE VOLTAGE IN THREE-PHASE NETWORKS WITH DIFFERENT NEUTRAL MODES

STEPANENKO Y.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: stepanenko.yu.v@nmu.one, ORCID: 0000-0001-5999-1927

Purpose. *Determination of the influence of network parameters with different neutral modes on the zero-sequence voltage*

Methodology. *The research methodology is based on the general theory of electrical engineering and, in particular, on the method of symmetrical components.*

Findings. *A mathematical model has been developed to establish the nature of the zero-sequence voltage change for different modes of the network neutral. The value of the zero-sequence voltages and the angles between the phase voltage vector with asymmetry and the zero-sequence voltage vector depending on the capacitive asymmetry, capacitance and active resistance of the network insulation for different neutral modes are established.*

Originality. *Conducted studies have shown that the largest increase in the zero-sequence voltage is observed at the asymmetry capacity, which is 10...30% of the network insulation capacity. Moreover, the relative capacitive asymmetry of the insulation when changing the values of the capacitance of the network relative to the ground has the most significant effect on the value of the zero-sequence voltage in networks with a compensated neutral and is practically excluded when the neutral of the network is completely isolated relative to the ground.*

Practical value. *For real parameters of the network, based on the results of theoretical and experimental studies, it is possible to judge the efficiency of existing protection devices and use them in the development of new principles and protection devices.*

Keywords: voltage; zero sequence; asymmetry; isolated neutral; compensated neutral; network with a resistor in the neutral.

REFERENCES

[1] Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok. (2017). Kyiv. Minenergovugillja Ukrai'ny, 617.

[2] Nikander, A.; Järventausta, P. (2017). Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. IEEE Trans. Power Deliv., 32, 1187–1195. https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183.

[3] Gana, N., Ab Aziz, N. F., Ali, Z., Hashim, H. and Yunus, B. (2017). 'A comprehensive review of fault location methods for distribution power system', Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci., 6, 1, 185–192. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v6.i1.pp185-192.

[4] Karpov, Ju.O., Kacyv, S.Sh., Kuharchuk, V.V., Vedmic'kyj, Ju.G.; pid red. prof. Karpova, Ju.O. (2011). Teoretychni osnovy elektrotehniky. Ustaleni rezhymy linijnyh elektrychnyh kil iz zoseredzhenymy ta rozpodilenymy parametramy: pidruchnyk. Vinnycja: VNTU, 377.

[5] Spinul, L.Ju., Buryk, M.P., Lobodzyns'kyj, V.Ju., Bilec'kyj, O.O. (2022). Teoretychni osnovy elektrotehniky Chastyna 2: Navchal'nyj posibnyk [Elektronnyj resurs, KPI im. Igorja Sikors'kogo. – Elektronni tekstovi danni (1 fajl: 9 Mbajt). Kyiv: KPI im. Igorja Sikors'kogo, 167.

[6] Fan, Y., Guang, L., Yu, S., Yongduan, X., Hui, P., Bingyin, X. (2019). Electrical Characteristics of Medium-voltage Distribution Network with Single-phase-to-ground Fault After Arc Extinction. Autom. Electr. Power Syst., 43, 134. https://doi.org/10.7500/AEPS20180911007.

[7] Farughian, A., Kumpulainen, L. and Kauhaniemi, K. (2018). 'Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks', Electr. Power Syst. Res., 154, 373–380. , https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006.

[8] Willheim, R., Waters, M. (1956). "Neutral Grounding in High Voltage Transmission". Elsevier publishing company, New York.

[9] Petteri Kangasluoma. (2019). Medium Voltage Network Residual Earth Fault Current Estimation Methods / Master of Science Thesis. Tampere University. Master's Degree Programme in Electrical Engineering. November, 97. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911155985.

[10] Abbas, A. K., Hamad, S. and Hamad, N. A. (2021). 'Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network', 23, 2, 621–632. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23. i2.pp621-632.

[11] Altonen, J.; Wahlroos, A.; Vähäkuopus, S.; Oy, E. (2017). Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated MV-network. CIRED 2017, 947–951. https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0967.

[12] Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K.

(2019). Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents. Energies, 12, 3759. https://doi.org/10.3390/en12193759.

[13] Gururajapathy, S. S., Mokhlis, H. and Illias, H. A. (2017). 'Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review', Renew. Sustain. Energy Rev., 74, March, 949–958. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021.

[14] Authafa, S. (2018). 'Short Circuit Faults Identification and Localization in IEEE 34 Nodes Distribution Feeder Based on the Theory of Wavelets', Iraqi J. Electr. Electron. Eng., 14, 1, 65–79. https://doi.org/10.37917/ijeee.14.1.7.

[15] Farughian, A, Kumpulainen, L, Kauhaniemi, K. (2020). Non-Directional Earth Fault Passage Indication in Isolated Neutral Distribution Networks. Energies., 13(18), 4732. https://doi.org/10.3390/en13184732.

[16] Stojanović, Z.N.; Djurić, M.B. (2013). An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs. Electr. Power Syst. Res., 96, 144–149. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012. 11.004.

[17] Baù, M., Benato, R., Dambone Sessa, S., Poli, M. and Quaciari, C. (2016) 'Phase-to-ground fault location methods in unearthed sub-transmission networks: A review', AEIT 2016 - Int. Annu. Conf. Sustain. Dev. Mediterr. Area, Energy ICT Networks Futur., , https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892761.

[18] Papai'ka, Ju.A., Lysenko, O.G., Rogoza, M.V., Tokar, L.O., Stepanenko, Ju.V. (2019). Vtraty energii' v elektroobladnanni pry nyz'kij jakosti naprugy. Visnyk KrNU imeni Myhajla Ostrograds'kogo, 1, 114, 9–13.