УДК 621.316.1

Ф.П. Шкрабець, *д-р техн. наук*
(Україна, Дніпропетровськ, Національний гірничий університет),
В.Г. Скосирєв, *канд. техн. наук*
(Україна, Маріуполь, Приазовський державний технічний університет)

ВПЛИВ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ НА ПАРАМЕТРИ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Для дослідження характеристик напруги та струмів нульової послідовності скористаємося схемою заміщення, приведеною на рис. 1, що представлена у вигляді двох приєднань, підключених до одного силового трансформатора [1]. При цьому провідності ізоляції відповідних фаз мережі щодо землі контрольованого приєднання ($Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1} = Y_1$) і всієї частини, що залишилася, розподільної мережі ($Y'_A = Y'_B = Y'_C = Y'$) зв'язані співвідношенням $Y_1 + Y' = Y$. При цьому

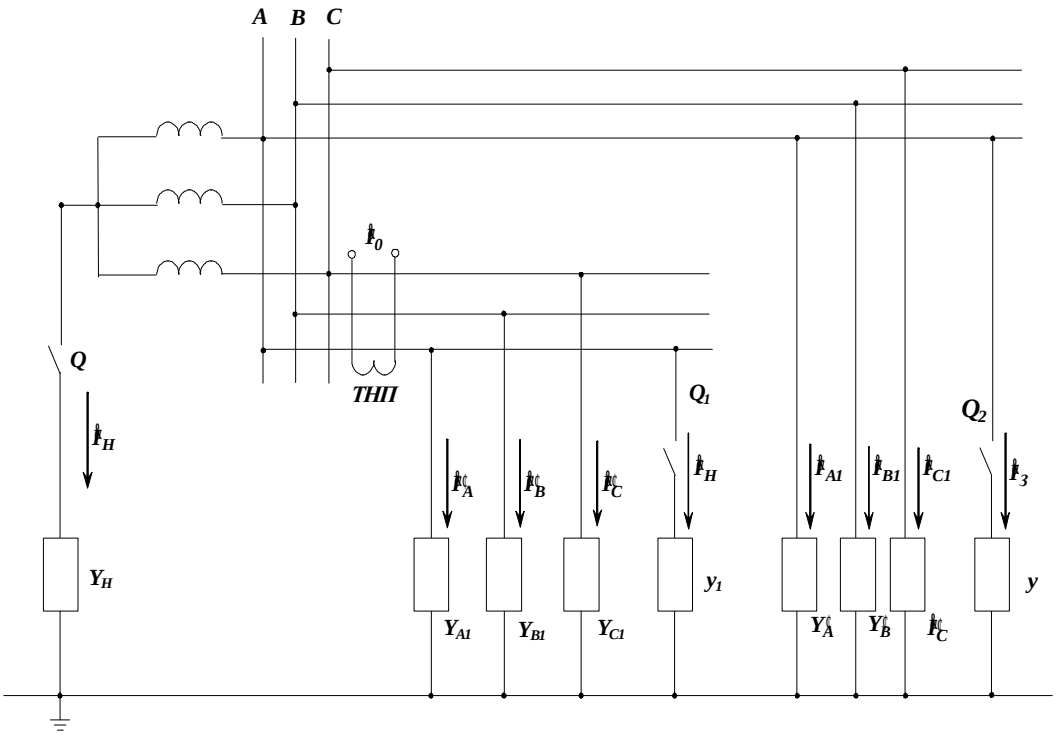

Рис. 1. Схема заміщення розподільної мережі для дослідження напруги та струмів нульової послідовності

$$Y = \frac{1}{R} + jwC \; ; Y_1 = \frac{1}{R_1} + jwC_1 \; ; Y_K = \frac{1}{R_K} - j\frac{1}{wL} \; ; Y_н = \frac{1}{R_н} \;\text{ і }\; y_i = \frac{1}{r_i}.$$

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

На схемі заміщення (рис.1) зображено: фільтр струму нульової послідовності СНП, установлений на пошкодженому приєднанні та призначений для виділення струму нульової послідовності $\dot{I}_0$; струми, що протікають через провід-ності ізоляції фаз щодо землі контрольованої лінії ($\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$), і струми, що протікають через відповідні провідності фаз зовнішньої мережі ($\dot{I}'_A, \dot{I}'_B, \dot{I}'_C$); $\dot{I}_{З1}, \dot{I}_З$ – струми однофазного замикання на землю відповідно в контрольованій лінії та у зовнішній мережі; $\dot{I}_н$ – струм, що протікає через провідності нейтральної точки мережі щодо землі.

Для цієї схеми, у загальному випадку, для режиму однофазного замикання на землю, наприклад, у контрольованому приєднанні ($y = 0$) можна, відповідно до закону Кирхгофа [2], записати

$$\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C + \dot{I}_{З1} + \dot{I}_H = 0. \qquad (1)$$

З урахуванням виразів $\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_0$; $\dot{U}'_B = \dot{U}_B + \dot{U}_0$; $\dot{U}'_C = \dot{U}_C + \dot{U}_0$, а також значень струмів через відповідні провідності ізоляції маємо:

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U}'_A Y_1; \dot{I}_{B1} = \dot{U}'_B Y_1; \dot{I}_{C1} = \dot{U}'_C Y_1; \dot{I}_{З1} = \dot{U}'_A y_1;$$

$$\dot{I}'_A = \dot{U}'_A Y'; \dot{I}'_B = \dot{U}'_B Y'; \dot{I}'_C = \dot{U}'_C Y'; \dot{I}_H = \dot{U}_0 Y_H. \qquad (2)$$

Струм нульової послідовності у загальному випадку для схеми заміщення, зображеної на рис. 1, при однофазному замиканні на землю у контрольованій лінії (вимикач Q_1 – увімкнений, а Q_2 – вимкнений) у мережі з будь-яким режимом нейтралі визначається як сума всіх струмів, що протікають у цій лінії (струм навантаження дорівнює нулю):

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{З1} \quad \text{або} \quad \dot{I}_0 = -(\dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C + \dot{I}_H). \qquad (3)$$

Струм нульової послідовності у контрольованій лінії (вимикач Q_1 – вимкнений, а Q_2 – ввімкнений) при однофазному замиканні на землю у зовнішній мережі (власний струм контрольованого приєднання) також у загальному випадку для схеми заміщення, зображеної на рис. 1, у мережі з будь-яким режимом нейтралі визначиться як сума всіх струмів, що протікають у контрольованій лінії (струм навантаження дорівнює нулю):

$$\dot{I}_{OC} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} \quad \text{або} \quad \dot{I}_{OC} = -(\dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C + \dot{I}_H + \dot{I}_З). \qquad (4)$$

Для мережі з неізольованою нейтраллю вираз для напруги нульової послідовності буде мати вигляд:

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_\phi \frac{y_i}{3Y + Y_н + y_i} \quad . \tag{5}$$

Мережа з компенсованою нейтраллю ($Y_H = Y_K$).

Підставивши у вираз (5) значення провідностей, з урахуванням режиму розладження компенсувального пристрою $\nu = 1 - 3\omega^2 CL$, і виконавши необхідні перетворення, одержимо:

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_\phi \frac{R_k R \omega L\left[\omega L\left(3R_k r_i + R_k R + R r_i\right) + jR_k R r_i \nu\right]}{\omega^2 L^2 \left(3R_k r_i + R_k R + R r_i\right)^2 + \left(R_k R r_i \nu\right)^2}, \tag{6}$$

де ν – ступінь розладження компенсувального пристрою від резонансного режиму.

Замінивши у виразі (3) відповідні струми їх значеннями з урахуванням виразів (2), одержимо рівняння для струму нульової послідовності при пошкодженні у контрольованій лінії, виражений через напругу нульової послідовності та провідності ізоляції мережі щодо землі:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 (3Y' + Y_k) = -\dot{U}_0 \left[3(Y - Y_1) + Y_k\right]. \tag{7}$$

Підставивши в цей вираз значення провідностей і виконавши необхідні перетворення, запишемо:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 \frac{wL(3R_k R_1 - 3R_k R + R R_1) - jR R_1 R_k (n - 3w^2 C_1 L)}{R R_1 R_k wL} \quad . \tag{8}$$

Аналогічним чином з (4) одержимо вираз для власного струму контрольованої лінії (струму нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішньому замиканні однієї фази на землю):

$$\dot{I}_{OC} = 3\dot{U}_0 Y_1 \quad \text{або} \quad \dot{I}_{OC} = 3\dot{U}_0 \frac{1 + jw C_1 R_1}{R_1} \quad . \tag{9}$$

Струм через нейтраль мережі або складова струму замикання, обумовлена компенсувальним пристроєм, визначається так

$$\dot{I}_K = \dot{U}_0 Y_H = \dot{U}_0 \frac{wL - j R_k}{wL R_k} \quad . \tag{10}$$

Аналіз виразів (6), (8) – (10) показує, що при однофазному замиканні на землю в мережі з компенсованою нейтраллю:

– напруга нульової послідовності визначається (крім фазної напруги мережі) параметрами ізоляції мережі щодо землі, провідністю компенсувального

пристрою (ступенем розладження компенсувального пристрою, що компенсує, від резонансного режиму) і значенням перехідного опору в точці замикання фази на землю;

– струм нульової послідовності у пошкодженій лінії визначається напругою нульової послідовності та параметрами ізоляції зовнішньої мережі щодо землі, тобто, параметрами ізоляції всієї мережі щодо землі (включаючи й параметри компенсувального пристрою) за винятком параметрів ізоляції пошкодженого приєднання;

– власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності в контрольованій лінії при зовнішніх пошкодженнях) визначається напругою нульової послідовності та параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання;

– струм у компенсувальному пристрої при замиканні на землю визначається напругою нульової послідовності та безпосередньо параметрами компенсувального пристрою.

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

Користуючись виразом (8) з урахуванням уявної та дійсної частин струму, одержимо формулу, що визначає залежність фази вектора струму нульової послідовності стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції відносно землі всієї мережі, контрольованого приєднання та ступеня розладження компенсації від резонансного режиму:

$$\varphi_{01} = 180° - arctg \frac{R R_1 R_K \left(\nu - 3\omega^2 C_1 L\right)}{\omega L \left(3R_K R_1 - 3R_K R + R R_1\right)}. \qquad (11)$$

Таким чином з виразу (9) одержимо формулу, що визначає залежності фази вектора власного струму контрольованої лінії (струму нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішньому замиканні однієї фази на землю) стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції:

$$j_{02} = arctg\, w\, C_1 R_1. \qquad (12)$$

З виразу (10) одержимо формулу, що визначає залежність фази вектора струму дугогасного реактора (компенсувального пристрою) стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції:

$$\varphi_{03} = -arctg\frac{R_K}{w\,L}. \qquad (13)$$

Аналіз виразів (11) - (13) показує, що з урахуванням реальних значень параметрів ізоляції щодо землі всієї мережі та окремого приєднання, а також беручи до уваги реальне взаємне співвідношення ємнісного й активного опорів ізоляції та з огляду на реальні значення параметрів дугогасного реактора, можна зробити такі висновки:

– кут між вектором струму нульової послідовності і вектором напруги нульової послідовності не залежить від повноти замикання (перехідного опору в точці замикання) та визначається в значній мірі значенням розладження компенсувального пристрою, від резонансного режиму і для резонансного настроювання становить практично 180 ел. градусів; при розладженні компенсувального пристрою, від резонансного режиму як убік перекомпенсації, так і убік недокомпенсації, вектор струму відхиляється на кут відповідно до плюс 90 ел. градусів і мінус 90 ел. градусів, у такий спосіб діапазон зміни кута між вектором струму нульової послідовності і вектором напруги нульової послідовності теоретично становить 180 ел. градусів;

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

– кут між вектором струму в дугогасному реакторі і вектором напруги нульової послідовності визначається тільки параметрами безпосередньо дугогасного реактора і для реальних їхніх значень становить практично мінус 90 ел. градусів.

Мережа з резистором у нейтралі ($Y_H = Y_R$).

У такій мережі вираз для напруги нульової послідовності буде мати вигляд:

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_\phi \frac{RR_H}{(3R_H r_i + Rr_i + R_H R) - j3wCRR_H r_i}{(3R_H r_i + Rr_i + R_H R)^2 + (3wCRR_H r_i)^2}. \qquad (14)$$

Замінивши у виразі (3) відповідні струми їхніми значеннями, одержимо формулу для струму нульової послідовності при пошкодженні у контрольованій лінії, виражене через напругу нульової послідовності та провідності ізоляції мережі щодо землі:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0(3Y' + Y_R) = -\dot{U}_0[3(Y - Y_1) + Y_R]. \qquad (15)$$

Підставивши в цей вираз значення відповідних провідностей і виконавши необхідні перетворення, одержимо:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_o \frac{(3R_н R_1 - 3R_н R + R R_1) + jw(C - C_1) R R_1 R_н}{R R_1 R_н} \quad . \qquad (16)$$

Таким чином з виразу (4) одержимо формулу для власного струму контрольованої лінії:

$$\dot{I}_{0C} = 3\dot{U}_0 Y_1 \qquad \text{або} \qquad \dot{I}_{0C} = 3\dot{U}_0 \frac{1 + jw C_1 R_1}{R_1} \quad . \qquad (17)$$

Струм через нейтраль мережі або складова струму замикання, обумовлена резистором у нейтралі R_H, визначається виразом

$$\dot{I}_H = \dot{U}_0 Y_H = \frac{\dot{U}_0}{R_H} \quad . \qquad (18)$$

Аналіз виразів (16) – (18) виявив, що при однофазному замиканні на землю у мережі з резистором у нейтралі:

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

– струм нульової послідовності у пошкодженій лінії визначається напругою нульової послідовності та параметрами ізоляції зовнішньої мережі й нейтралі щодо землі, тобто параметрами ізоляції всієї мережі щодо землі за винятком параметрів ізоляції пошкодженого приєднання та значенням опору резистора у нейтралі;

– власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішніх пошкодженнях) визначається напругою нульової послідовності та параметрами ізоляції щодо землі тільки контрольованого приєднання;

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

Навіть поверхневий погляд на вирази (9) і (17) дозволяє зробити важливий висновок про те, що власний струм контрольованого приєднання (струм нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішніх пошкодженнях), виражений через напругу нульової послідовності, визначається тільки параметрами ізоляції контрольованої лінії та не залежить від режиму роботи нейтралі електричної мережі.

Користуючись виразом (16) та з врахуванням уявної та дійсної частин струму, одержимо формулу, що визначає залежність фази вектора струму нульової послідовності стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції щодо землі всієї мережі, контрольованого приєднання та резистора в нейтралі:

$$j_{01} = 180° + arctg \frac{w(C - C_1)R R_1 R_H}{(3R_H R_1 - 3R_H R + RR_1)}. \quad (19)$$

Аналогічним чином з виразу (17) одержимо формулу, що визначає залежність фази вектора власного струму контрольованої лінії (струму нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішньому замиканні однієї фази на землю) стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції:

$$j_{02} = arctg\, w\, C_1 R_1. \quad (20)$$

З виразу (18) одержимо формулу, що визначає залежність фази вектора струму в резисторі, увімкненому в нейтраль мережі, стосовно вектора напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції:

$$j_{03} = arctg\, 0 = 0°. \quad (21)$$

Аналіз виразів (19) – (21) показує, що з урахуванням реальних значень параметрів ізоляції щодо землі всієї мережі та окремого приєднання, а також беручи до уваги реальне взаємне співвідношення ємнісного та активного опорів ізоляції та значення опору резистора в нейтралі, можна зробити наступні висновки:

– кут між вектором струму нульової послідовності та вектором напруги нульової послідовності не залежить від повноти замикання (перехідного опору в точці замикання) і, на відміну від мереж з повністю ізольованою нейтраллю, знаходиться в межах від 180 до 270 ел. градусів; для реальних параметрів ізоляції мережі щодо землі та значення, що *рекомендується* $R_н = (1 \div 2) X_c$ цей кут становить приблизно 225…240 ел. градусів.

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

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

Висновки

1. Для мереж з компенсованою нейтраллю, а також мереж з резистором у нейтралі, при оцінці фазових характеристик необхідно враховувати, що складо-

ва струму нульової послідовності, обумовлена елементом, увімкненим у нейтраль мережі, буде мати зсув по фазі на 180 ел. градусів стосовно вектора відповідного струму в нейтралі.

2. Фаза власного струму контрольованого приєднання (струму нульової послідовності у контрольованій лінії при зовнішньому замиканні однієї фази на землю) не залежить від режиму роботи нейтралі, визначається тільки параметрами безпосередньо контрольованого приєднання та практично жорстко прив'язана до напруги нульової послідовності.

Список литературы

1. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. – М.: Недра, 1976. – 175 с.