

УДК 621.311

Г.И. Лагутин¹, В.Н. Лысенко², В.Д. Заболотный³¹ Харьковський університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Сумської національний аграрний університет, Суми³ Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рассматриваются результаты исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности. Для исследования процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции, предлагается использовать математические и имитационные модели.

Ключевые слова: электрические сети, контроль изоляции, однофазное замыкание на землю, ранжирование.

Введение

Постановка проблемы. Состояние изоляции трехфазных сетей с изолированной нейтралью принято оценивать, осуществляя непрерывные измерения величины тока нулевой последовательности. Однако, такая оценка в ряде случаев оказывается недостаточно точной в связи с тем, что токи нулевой последовательности появляются не только при несимметричных замыканиях в сетях, но и в случае, когда нагрузка по фазам распределена неравномерно. **Анализ последних исследований и публикаций.** В современных условиях для непрерывного контроля состояния изоляции широко используются следующие методы [1 – 7]: наложения переменного или постоянного оперативного тока; измерения токов или напряжений нулевой последовательности либо фазовых соотношений между ними; основанные на использовании выпрямленных токов контролируемой сети. Существующие методы периодического контроля сопротивления изоляции основаны на проведении испытаний повышенным напряжением [8], что приводит к перерыву в электроснабжении потребителей, понижению на время проведения испытаний надежности электроснабжения. Кроме этого, эти использование повышенных напряжений может вывести электрооборудование из строя.

Целью статьи является обоснование возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности для контроля состояния изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Изложение основного материала

Для обоснования возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности для контроля состояния изоляции электрической сети с различными ре-

жимами работы нейтрали целесообразно использовать математическую модель [9] в виде системы уравнений, составленных в соответствии с методом контурных токов для схемы замещения рассматриваемой электрической сети на рис. 1, где приняты такие обозначения: $\dot{E}_A = U$ – напряжение фазы А; $\dot{E}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$, $\dot{E}_C = U \cdot e^{-j240^\circ}$ – напряжения фаз В и С; $\underline{Z}_{ли} = R_{ли} + j \cdot \omega \cdot L_{ли}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление фазных проводов линии электропередачи; $R_{ли}$, $L_{ли}$ – активное сопротивление и индуктивность фазных проводов линии электропередачи; $\underline{Z}_{ни} = R_{ни} + j \cdot \omega \cdot L_{ни}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление нагрузки фаз; $R_{ни}$, $L_{ни}$ – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки фаз; $\underline{Z}_{ли}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера, $1/\underline{Z}_{ли} = 1/R_{ли} + j \cdot \omega \cdot C_{ли}$; $R_{ли}$, $C_{ли}$, $i = A, B, C$ – сопротивления утечки и емкость изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера; $\underline{Z}_{2и}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление изоляции фаз контролируемого фидера, $1/\underline{Z}_{2и} = 1/R_{2и} + j \cdot \omega \cdot C_{2и}$; $R_{2и}$, $C_{2и}$, $i = A, B, C$ – соответственно сопротивления утечки и емкость изоляции фаз контролируемого фидера; $\underline{Z}_{NГ}$ – комплексное сопротивление нейтрали источника электроэнергии (генератора или трансформатора), $1/\underline{Z}_{NГ} = 1/R_{NГ} + j \cdot \omega \cdot C_{NГ} - j \cdot 1/(\omega \cdot L_{NГ})$; $R_{NГ}$, $C_{NГ}$, $L_{NГ}$ – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали источника электроэнергии; $\underline{Z}_{NН}$ – комплексное сопротивление нейтрали нагрузки, $1/\underline{Z}_{NН} = 1/R_{NН} + j \cdot \omega \cdot C_{NН} - j \cdot 1/(\omega \cdot L_{NН})$; $R_{NН}$, $C_{NН}$, $L_{NН}$ – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали нагрузки.

Процесс решения задачи целесообразно разделить на несколько этапов, каждый из которых характеризует работу системы электрообеспечения в критических режимах работы: режиме замыкания на землю в контролируемой линии электропередачи и режиме несимметрии нагрузки.

Режим однофазного замыкания на землю характеризуется тем, что к сопротивлению изоляции поврежденной фазы в контролируемом фидере добавляется активное сопротивление R_3 , подключенное параллельно сопротивлению изоляции. Его величина может изменяться в широких пределах – от 0 Ом при металлическом замыкании на землю до единиц килоом при заплывающем пробое или снижении изоляции по другим причинам. Все остальные сопротивления, а также питающие напряжения остаются неизменными и, в большинстве случаев, симметричными.

Поэтому решение системы уравнений для схемы замещения (рис. 1) для режима однофазного замыкания на землю будем искать при следующих допущениях:

$$\underline{Z}_{Nr} = R_{Nr} \left(-j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) // \left(R_{Nr} - j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{lA} = \underline{Z}_{lB} = \underline{Z}_{lC} = \underline{Z}_l = \frac{R_l \left(-j \frac{1}{\omega C_l} \right)}{R_l - j \frac{1}{\omega C_l}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{лA} = \underline{Z}_{лB} = \underline{Z}_{лC} = \underline{Z}_л = R_л + j\omega L_л = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{2B} = \underline{Z}_{2C} = \underline{Z}_2 = \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_A = \frac{R_2 R_3 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 R_3 + R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_3 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)} = \text{var};$$

$$\underline{Z}_{нA} = \underline{Z}_{нB} = \underline{Z}_{нC} = \underline{Z}_н = R_н + j\omega L_н = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{Nh} = \frac{R_{Nh} \left(-j \frac{1}{\omega C_{Nh}} \right)}{R_{Nh} - j \frac{1}{\omega C_{Nh}}} = \text{const}.$$

При таких допущениях после соответствующих преобразований выражение, связывающее ток I_0 и напряжение U_0 нулевой последовательности при-

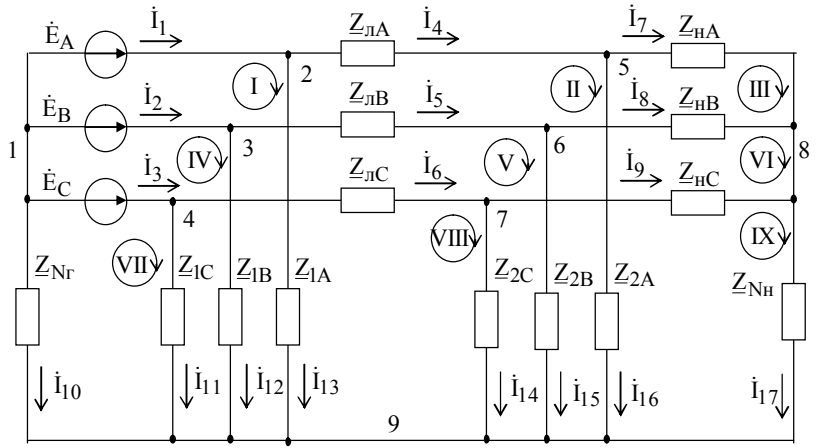


Рис. 1. Схема замещения рассматриваемой электрической сети

нимает вид:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \dot{I}_0, \quad (1)$$

а выражение для определения угла между током I_0 и напряжением U_0 нулевой последовательности определяется соотношением:

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{\Im \left(\frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \right)}{\Re \left(\frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_l}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_l} + Z_l + 3R_3 \right] \right)} \right). \quad (2)$$

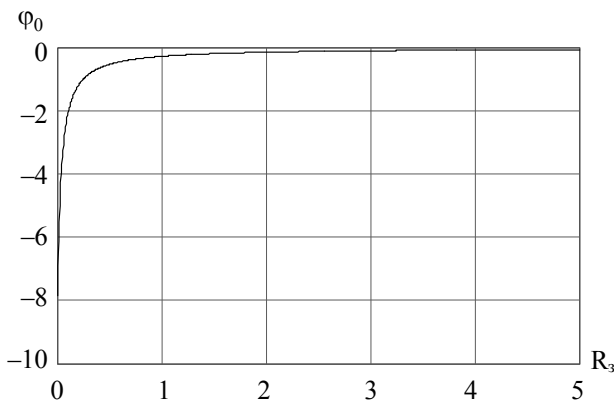
Придадим элементам эквивалентной схемы замещения (рис. 1) конкретные физические значения. Реальная система электроснабжения с разветвленной кабельной сетью, питающим генератором (трансформатором) мощностью $S_r = 1000$ кВА и нагрузкой контролируемого фидера $S_н = 100$ кВА с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$ характеризуется следующими значениями:

- $R_l = 50$ кОм; $C_l = 5$ мкФ;
- $R_{Nr} = 50$ кОм; $C_{Nr} = 0,05$ мкФ;
- $R_r = 0,042$ Ом; $L_r = 0,15$ мГн;
- $R_л = 0,1$ Ом; $L_л = 0,1$ мГн;
- $R_2 = 500$ кОм; $C_2 = 0,5$ мкФ;
- $R_н = 2,217$ Ом; $L_н = 5,293$ мГн;
- $R_{Nh} = 50$ кОм; $C_{Nh} = 0,05$ мкФ;
- $R_3 = 0 \dots 1000$ Ом.

Тогда выражение (2) для φ_0 принимает вид:

$$\varphi_0 = \arg \left[\begin{aligned} &(0.418 - j0.156) \times \\ &\times (j17.3 + 77.4 + 21.0R_3 + j78.3R_3) \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

График зависимости φ_0 от R_3 приведен на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость φ_0 от R_3

При этом величина тока I_0 нулевой последовательности изменяется в пределах от 0,039 мА при $R_3=5$ кОм до 1,071 мА при $R_3=1$ Ом, а величина напряжения U_0 нулевой последовательности изменяется в пределах от 7,914 В при $R_3=5$ кОм до 219,685 В при $R_3=1$ Ом.

Из анализа формульных соотношений и графика зависимости φ_0 от R_3 (рис. 2) можно сделать вывод о том, что в случае повреждения изоляции в одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью ток нулевой последовательности отстает от напряжения нулевой последовательности.

Выводы

1. Для обоснования возможности использования величины сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности при осуществлении контроля состояния изоляции электрической сети с различными режимами работы нейтрали целесообразно использовать математическую модель в виде системы уравнений, составленных в соответствии с методом контурных токов для схемы замещения рассматриваемой электрической сети.

2. Проведя формальный анализ соотношений принятой математической модели, можно сделать

вывод о том, что в случае повреждения изоляции в одной из фаз трехфазной сети с изолированной нейтралью ток нулевой последовательности отстает от напряжения нулевой последовательности.

Список литературы

1. Правила безпечної експлуатації військових електроустановок, затверджені наказом МО України від 13.05.03 (зі змінами згідно наказу МО України від 12.11.10 №589). – К., 2011.
2. Основи електробезпеки та енергонагляду: підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, А.М. Панченко, О.В. Степанюк. – Х.: ХУПС, 2011. – 248 с.
3. Електробезпека: Навчально-методичний посібник для проведення лабораторних занять / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, А.О. Нечаус, О.О. Ручка. – Х.: ХУПС, 2011. – 144 с.
4. Ревякин А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А.И. Ревякин, Б.И. Кашолкин. – М.: Энергия, 1980. – 180 с.
5. Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках / Б.А. Князевский. – М.: Энергия, 1987. – 222 с.
6. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. анойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 188 с.
7. Разумный О.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт / О.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабец. – К.: Техника, 1986. – 160 с.
8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Мінпаливенерго України від 25.07.06 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості від 13.02.2012 № 91). – К., 2012.
9. Лагутин Г.И. Математическая модель для исследования влияния параметров электрической сети на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности / Г.И. Лагутин, В.Н. Лысенко, В.Д. Заболотный // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2(43) . – С. 89-92

Поступила в редколлегию 20.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ НА ВЕЛИЧИНУ КУТА МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Г.І. Лагутін, В.М. Лисенко, В.Д. Заболотний

У статті розглядаються результати дослідження впливу параметрів однофазного замикання на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю на величину зсуву фаз між струмом і напругою нульової послідовності. Для дослідження процесів, що відбуваються в електричних мережах при зміні опору ізоляції, пропонується використовувати математичні й імітаційні моделі.

Ключові слова: електричні мережі, контроль ізоляції, однофазне замикання на землю, ранжирування.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE SINGLE-PHASE EARTH FAULT PARAMETERS ON THE ANGLE BETWEEN ZERO-SEQUENCE CURRENT AND VOLTAGE

G.I. Lagutin, V.N. Lysenko, V.D. Zabolotniy

This article discusses the results of research of the influence of single-phase earth fault parameters in power distribution systems with the isolated neutral by phase shifting between zero-sequence current and voltage. For research of the processes occurring in electric networks at variation of resistance of isolation and size of a load, it is offered to use mathematical and simulation models.

Keywords: power distribution systems, the control of isolation, ground single-phase short circuit, ranging.