

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В статье рассматривается математическая модель для исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью и несимметрии нагрузок потребителей на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности. Для исследования процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции и величины нагрузки, предлагается использовать математические и имитационные модели.

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

Введение

Постановка проблемы. Для обеспечения бесперебойного и качественного электроснабжения и безопасной эксплуатации низковольтных линий электропередачи прежде всего необходима информация о состоянии их изоляции.

Правильное представление о состоянии изоляции низковольтных линий электропередачи может быть получено в том случае, если оно измерено в нормальных эксплуатационных условиях, т.е. при рабочем напряжении и при включенных токоприемниках.

Следует особо отметить необходимость обеспечения непрерывного контроля изоляции, потому что как бы ни были проведены периодические эксплуатационные измерения сопротивления изоляции и ремонт сети, изоляция в течение периода времени между очередными эксплуатационными испытаниями может оказаться в аварийном состоянии.

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. Установившиеся методы контроля сопротивления изоляции базируются на проведении периодических плановых испытаний повышенным напряжением [8]. Эти методы в условиях обеспечения бесперебойности и надежности электроснабжения ответственных потребителей не всегда являются приемлемыми, поскольку они ведут к перерыву в электроснабжении потребителей, созданию на время

производства испытаний временных схем электрооборудования, часто имеющих пониженную надежность.

Кроме этого, эти методы увеличивают возможность дополнительных разрушений изоляции, приводящих оборудование в негодность.

В настоящее время распространение получили следующие методы контроля состояния изоляции [1 – 7]:

1. Методы, основанные на использовании наложения оперативного тока на контролируруемую сеть:

- а) метод наложения переменного оперативного тока;
- б) метод наложения постоянного оперативного тока.

2. Методы, основанные на измерении симметричных составляющих контролируемой сети:

- а) методы измерения токов или напряжений нулевой последовательности;
- б) метод измерения фазовых соотношений тока нулевой последовательности и фазного напряжения;
- в) метод измерения фазовых соотношений тока и напряжения нулевой последовательности.

3. Методы, основанные на использовании выпрямленных токов контролируемой сети.

Существующие методы не удовлетворяют требованиям по обеспечению точности и достоверного контроля изоляции низковольтных фидеров по следующим причинам:

- значительная погрешность измерения;
- большое количество ложных срабатываний;
- значительное влияние емкости сети на результаты контроля;
- снижение общего сопротивления контролируемой сети при подключении устройств контроля.

Целью статьи является разработка математической модели для исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с различным режимами работы нейтрали, а также несимметрии нагрузок потребителей на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности.

Изложение основного материала

Для анализа процессов, происходящих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции и величины нагрузки, как правило, используются математические, имитационные и эвристиче-

ские модели. При этом для исследования влияния несимметрии нагрузок и параметров сопротивления однофазного замыкания на землю на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности предлагается использовать математическую модель системы электроснабжения. Для проверки адекватности разработанной математической модели целесообразно использование имитационных моделей.

Для построения математической модели вначале составим схему замещения трехфазной электрической сети с различным режимами работы нейтрали (рис. 1).

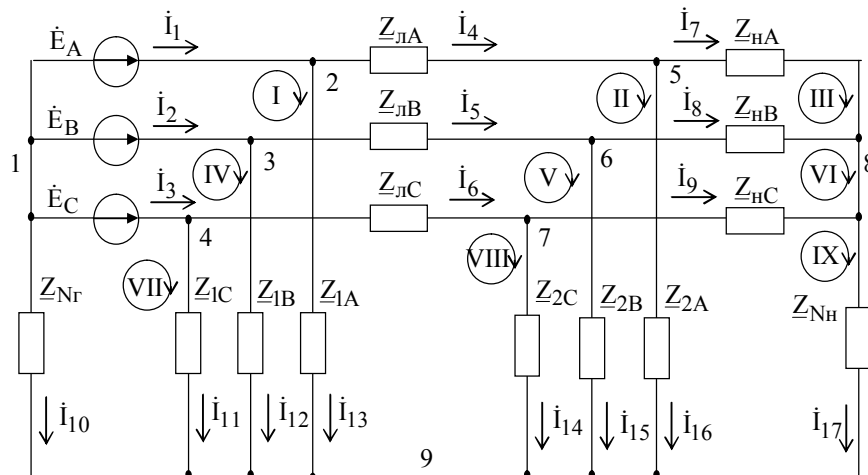


Рис. 1. Схема замещения трехфазной электрической сети

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$\dot{E}_A = U$ – напряжение фазы А ;

$\dot{E}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$ – напряжение фазы В ;

$\dot{E}_C = U \cdot e^{-j240^\circ}$ – напряжение фазы С ;

$Z_{ли} = R_{ли} + j \cdot \omega \cdot L_{ли}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление фазных проводов линии электропередачи;

$R_{ли}, L_{ли}$ – соответственно активное сопротивление и индуктивность фазных проводов линии электропередачи;

$Z_{ни} = R_{ни} + j \cdot \omega \cdot L_{ни}$, $i = A, B, C$ – комплексное сопротивление нагрузки фаз;

$R_{ни}, L_{ни}$ – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки фаз;

$Z_{ли}, i = A, B, C$ – комплексное сопротивление изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера,

$$\frac{1}{Z_{ли}} = \frac{1}{R_{ли}} + j \cdot \omega \cdot C_{ли};$$

$R_{ли}, C_{ли}, i = A, B, C$ – соответственно сопротивление утечки и емкость изоляции фаз всей сети без учета контролируемого фидера;

$Z_{2i}, i = A, B, C$ – комплексное сопротивление изоляции фаз контролируемого фидера,

$$\frac{1}{Z_{2i}} = \frac{1}{R_{2i}} + j \cdot \omega \cdot C_{2i};$$

$R_{2i}, C_{2i}, i = A, B, C$ – соответственно сопротивление утечки и емкость изоляции фаз контролируемого фидера;

$Z_{NГ}$ – комплексное сопротивление нейтрали источника электроэнергии (генератора или трансформатора), $\frac{1}{Z_{NГ}} = \frac{1}{R_{NГ}} + j \cdot \omega \cdot C_{NГ} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L_{NГ}}$;

$R_{NГ}, C_{NГ}, L_{NГ}$ – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали источника электроэнергии;

$Z_{NН}$ – комплексное сопротивление нейтрали нагрузки, $\frac{1}{Z_{NН}} = \frac{1}{R_{NН}} + j \cdot \omega \cdot C_{NН} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L_{NН}}$;

$R_{NН}, C_{NН}, L_{NН}$ – соответственно активное сопротивление, емкость и индуктивность нейтрали нагрузки.

Будем полагать, что средства для измерения тока I_0 и напряжения U_0 нулевой последовательности (трансформатор тока нулевой последовательности)

ности и асимметр) установлены в начале контролируемого фидера (узлы 2, 3, 4 на рис. 1). Тогда выражение для тока I_0 нулевой последовательности будет иметь вид:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6}{3}, \quad (1)$$

а выражение для напряжения U_0 нулевой последовательности будет иметь вид:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{I}_{11} \cdot \underline{Z}_{1C} + \dot{I}_{12} \cdot \underline{Z}_{1B} + \dot{I}_{13} \cdot \underline{Z}_{1A}}{3}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения тока I_0 и напряжения U_0 нулевой последовательности необходимо предварительно определить токи в ветвях электрической схемы (рис. 1).

Задача отыскания токов в ветвях электрической схемы может быть решена различными методами: методом уравнений Кирхгофа, методом контурных токов, методом узловых потенциалов, методом эквивалентного генератора и т.п.

Анализ исходных данных позволяет сделать вывод о том, что для данной топологии схемы (17 ветвей, 9 узлов, 9 независимых контуров, 6 искоемых токов) рациональнее использовать метод контурных токов.

Запишем систему уравнений для решения задачи в соответствии с методом контурных токов. Количество уравнений в системе будет равно количеству независимых контуров, а именно 9. Номера контуров, а также направление их обхода указано на рис. 1:

$$\begin{aligned} & \underline{z}_{11}\dot{I}_I + \underline{z}_{12}\dot{I}_{II} + \underline{z}_{13}\dot{I}_{III} + \underline{z}_{14}\dot{I}_{IV} + \underline{z}_{15}\dot{I}_V + \underline{z}_{16}\dot{I}_{VI} + \\ & + \underline{z}_{17}\dot{I}_{VII} + \underline{z}_{18}\dot{I}_{VIII} + \underline{z}_{19}\dot{I}_{IX} = \dot{E}_A; \\ & \underline{z}_{21}\dot{I}_I + \underline{z}_{22}\dot{I}_{II} + \underline{z}_{23}\dot{I}_{III} + \underline{z}_{24}\dot{I}_{IV} + \underline{z}_{25}\dot{I}_V + \underline{z}_{26}\dot{I}_{VI} + \\ & + \underline{z}_{27}\dot{I}_{VII} + \underline{z}_{28}\dot{I}_{VIII} + \underline{z}_{29}\dot{I}_{IX} = 0; \\ & \dots \\ & \underline{z}_{91}\dot{I}_I + \underline{z}_{92}\dot{I}_{II} + \underline{z}_{93}\dot{I}_{III} + \underline{z}_{94}\dot{I}_{IV} + \underline{z}_{95}\dot{I}_V + \underline{z}_{96}\dot{I}_{VI} + \\ & + \underline{z}_{97}\dot{I}_{VII} + \underline{z}_{98}\dot{I}_{VIII} + \underline{z}_{99}\dot{I}_{IX} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{N\Gamma}; \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{лA} + \underline{Z}_{2A}; \\ \underline{Z}_{33} &= \underline{Z}_{2A} + \underline{Z}_{нA} + \underline{Z}_{NH}; \\ \underline{Z}_{44} &= \underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{N\Gamma}; \underline{Z}_{55} = \underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{лB} + \underline{Z}_{2B}; \\ \underline{Z}_{66} &= \underline{Z}_{2B} + \underline{Z}_{нB} + \underline{Z}_{NH}; \\ \underline{Z}_{77} &= \underline{Z}_{1C} + \underline{Z}_{N\Gamma}; \underline{Z}_{88} = \underline{Z}_{1C} + \underline{Z}_{лC} + \underline{Z}_{2C}; \\ \underline{Z}_{99} &= \underline{Z}_{2C} + \underline{Z}_{нC} + \underline{Z}_{NH} - \text{собственные контурные сопротивления}; \\ \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_{1A}; \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = -\underline{Z}_{2A}; \\ \underline{Z}_{45} &= \underline{Z}_{54} = -\underline{Z}_{1B}; \underline{Z}_{56} = \underline{Z}_{65} = -\underline{Z}_{2B}; \\ \underline{Z}_{78} &= \underline{Z}_{87} = -\underline{Z}_{1C}; \underline{Z}_{89} = \underline{Z}_{98} = -\underline{Z}_{2C}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{14} &= \underline{Z}_{41} = \underline{Z}_{17} = \underline{Z}_{71} = \underline{Z}_{47} = \underline{Z}_{74} = \underline{Z}_{N\Gamma}; \\ \underline{Z}_{36} &= \underline{Z}_{63} = \underline{Z}_{39} = \underline{Z}_{93} = \underline{Z}_{69} = \underline{Z}_{96} = \underline{Z}_{NH}; \\ \underline{Z}_{13} &= \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{15} = \underline{Z}_{51} = \underline{Z}_{16} = \underline{Z}_{61} = \\ &= \underline{Z}_{18} = \underline{Z}_{81} = \underline{Z}_{19} = \underline{Z}_{91} = 0; \\ \underline{Z}_{24} &= \underline{Z}_{42} = \underline{Z}_{25} = \underline{Z}_{52} = \underline{Z}_{26} = \underline{Z}_{62} = \\ &= \underline{Z}_{27} = \underline{Z}_{72} = \underline{Z}_{28} = \underline{Z}_{82} = \underline{Z}_{29} = \underline{Z}_{92} = 0; \\ \underline{Z}_{34} &= \underline{Z}_{43} = \underline{Z}_{35} = \underline{Z}_{53} = \underline{Z}_{37} = \\ &= \underline{Z}_{73} = \underline{Z}_{38} = \underline{Z}_{83} = 0; \\ \underline{Z}_{46} &= \underline{Z}_{64} = \underline{Z}_{48} = \underline{Z}_{84} = \underline{Z}_{49} = \underline{Z}_{94} = 0; \\ \underline{Z}_{57} &= \underline{Z}_{75} = \underline{Z}_{58} = \underline{Z}_{85} = \underline{Z}_{59} = \underline{Z}_{95} = 0; \\ \underline{Z}_{67} &= \underline{Z}_{76} = \underline{Z}_{68} = \underline{Z}_{86} = \underline{Z}_{79} = \underline{Z}_{97} = 0 \quad - \text{ком-} \\ & \text{плексные взаимные сопротивления между контурами;} \\ \dot{I}_i, i &= I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX - \text{контурные токи} \\ & \text{в независимых контурах.} \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда искоемые токи определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \dot{I}_4 &= \dot{I}_{II}; \dot{I}_5 = \dot{I}_V; \dot{I}_6 = \dot{I}_{VIII}; \dot{I}_{11} = \dot{I}_{VII} - \dot{I}_{VIII}; \\ \dot{I}_{12} &= \dot{I}_{IV} - \dot{I}_V; \dot{I}_{13} = \dot{I}_I - \dot{I}_{II}. \end{aligned} \quad (6)$$

Система (3) с учетом (4) и (5) принимает вид:

$$\begin{aligned} & (\underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{N\Gamma})\dot{I}_I - \underline{Z}_{1A}\dot{I}_{II} + \\ & + \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_{IV} + \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_{VII} = \dot{E}_A; \\ & -\underline{Z}_{1A}\dot{I}_I + (\underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{лA} + \underline{Z}_{2A})\dot{I}_{II} - \underline{Z}_{2A}\dot{I}_{III} = 0; \\ & -\underline{Z}_{2A}\dot{I}_{II} + (\underline{Z}_{2A} + \underline{Z}_{нA} + \underline{Z}_{NH})\dot{I}_{III} + \\ & + \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{VI} + \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{IX} = 0; \\ & \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_I + (\underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{N\Gamma})\dot{I}_{IV} - \\ & - \underline{Z}_{1B}\dot{I}_V + \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_{VII} = \dot{E}_B; \\ & -\underline{Z}_{1B}\dot{I}_{IV} + (\underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{лB} + \underline{Z}_{2B})\dot{I}_V - \\ & - \underline{Z}_{2B}\dot{I}_{VI} = 0; \\ & \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{III} - \underline{Z}_{2B}\dot{I}_V + (\underline{Z}_{2B} + \underline{Z}_{нB} + \underline{Z}_{NH})\dot{I}_{VI} + \\ & + \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{IX} = 0; \\ & \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_I + \underline{Z}_{N\Gamma}\dot{I}_{IV} + (\underline{Z}_{1C} + \underline{Z}_{N\Gamma})\dot{I}_{VII} - \\ & - \underline{Z}_{1C}\dot{I}_{IX} = \dot{E}_C; \\ & -\underline{Z}_{1C}\dot{I}_{VII} + (\underline{Z}_{1C} + \underline{Z}_{лC} + \underline{Z}_{2C})\dot{I}_{VIII} - \underline{Z}_{2C}\dot{I}_{IX} = 0; \\ & \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{III} + \underline{Z}_{NH}\dot{I}_{VI} - \underline{Z}_{2C}\dot{I}_{VIII} + \\ & + (\underline{Z}_{2C} + \underline{Z}_{нC} + \underline{Z}_{NH})\dot{I}_{IX} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) может быть решена различными способами. С точки зрения возможности применения для решения системы (7) средств вычислительной техники представляется целесообразным использование метода Гаусса решения системы линейных уравнений.

При этом расширенная матрица коэффициентов при неизвестных имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} Z_{1A}+Z_{N\bar{e}} & -Z_{1A} & 0 & Z_{N\bar{e}} & 0 & 0 & Z_{N\bar{e}} & 0 & 0 & \dot{E}_A \\ -Z_{1A} & Z_{1A}+Z_{N\bar{e}}+Z_{2A} & -Z_{2A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{2A} & Z_{2A}+Z_{N\bar{e}}+Z_{N\bar{i}} & 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 \\ Z_{N\bar{e}} & 0 & 0 & Z_{1B}+Z_{N\bar{e}} & -Z_{1B} & 0 & Z_{N\bar{e}} & 0 & 0 & \dot{E}_B \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{1B} & Z_{1B}+Z_{N\bar{e}}+Z_{2B} & -Z_{2B} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 & -Z_{2B} & Z_{2B}+Z_{N\bar{e}}+Z_{N\bar{i}} & 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 \\ Z_{N\bar{e}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{1C}+Z_{N\bar{e}} & Z_{1C} & 0 & \dot{E}_C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{1C} & Z_{1C}+Z_{N\bar{e}}+Z_{2C} & -Z_{2C} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 & 0 & Z_{N\bar{i}} & 0 & -Z_{2C} & Z_{2C}+Z_{N\bar{e}}+Z_{N\bar{i}} & 0 \end{bmatrix}$$

Для проведення оцінки ступені впливу на результат рішення задачі несиметрії нагрузок і параметрів опору ізоляції однофазного замикання на землю цілесообразно розділити процес рішення системи (7) на декілька етапів, кожен з яких характеризує роботу схеми (рис. 1) в критичних режимах роботи:

режиме замикання на землю в контролюємої лінії електропередачі;
режиме несиметрії нагрузки.

Висновки

1. Для обґрунтування можливості використання величини сдвигу фаз між током і напругою нульової послідовності для контролю стану ізоляції електричної мережі з різними режимами роботи нейтралі цілесообразно використовувати математичну модель в формі системи рівнянь, складених відповідно до методу контурних токів для схеми заміщення вказаної електричної мережі.

2. Процес рішення задачі цілесообразно розділити на декілька етапів, кожен з яких характеризує роботу системи електроживлення в критичних режимах роботи: режиме замикання на землю в контролюємої лінії електропередачі і режиме несиметрії нагрузки.

Список літератури

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. – 224 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. – 164 с.
4. Ревякин А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А.И. Ревякин, Б.И. Кашилкин. – М.: Энергия, 1980. – 204 с.
5. Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках / Б.А. Князевский. – М.: Энергия, 1987. – 120 с.
6. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – Л-д.: Энергоатомиздат, 1991. – 188 с.
7. Разумный О.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт / О.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабеч. – К.: Техника, 1986. – 144 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.

Поступила в редколлегию 31.03.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА ВЕЛИЧИНУ КУТА МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

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

У статті розглядається математична модель для дослідження впливу параметрів однофазного замикання на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю й несиметрії навантажень споживачів на величину зсуву фаз між струмом і напругою нульової послідовності. Для дослідження процесів, що відбуваються в електричних мережах при зміні опору ізоляції й величини навантаження, пропонується використовувати математичні й імітаційні моделі.

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

MATHEMATICAL MODEL FOR RESEARCH OF THE POWER DISTRIBUTION SYSTEM PARAMETERS INFLUENCE ON THE ANGLE BETWEEN ZERO-SEQUENCE CURRENT AND VOLTAGE

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

The mathematical model for research of influence of parameters of single-phase earth fault in power distribution systems with the isolated neutral and power load asymmetry by phase shifting between zero-sequence current and voltage is considered in this article. 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.