

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И УЧАСТКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6...35 КВ

Нараева Р.Р. , Хусайнов Ш.Н.

Южно-Уральский Государственный Университет, г. Челябинск, Россия

Аннотация. Исследован метод определения параметров и участка повреждения изоляции в сетях 6...35 кВ с изолированной нейтралью на основе измерения режимных параметров сети. В рассматриваемой трехфазной цепи с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой произошло повреждение изоляции в одной из фаз. Расчеты проводятся для схемы замещения линии с отпайкой методом узловых потенциалов. Исследование влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения разных участках сети на точность определения проводимости изоляции проводится с использованием данных из цифровых моделей. Исследование данного метода ведется с выдвиганием гипотез о месте повреждения и с учетом влияния кратности увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класса точности измерительных приборов.

Ключевые слова: Цифровая модель, гипотезы повреждения, суммарная проводимость изоляции, активная проводимость.

STUDIUL INFLUENȚEI DIFERIȚOR FACTORI ASUPRA DETERMINĂRII PRECISE A PARAMETRILOR ȘI A PĂRȚILOR DETERIORATE A IZOLAȚIEI ÎN REȚELE DE DISTRIBUȚIE 6...35 kV

Naraeva R.R., Husainov S.N.

Universitatea Ural-SUD, Celiabinsk, Federația Rusă

Rezumat. S-a studiat o metodă de determinare a parametrilor secțiunilor deteriorate a izolației fazei în rețelele de 6 ... 35 kV izolat neutru prin măsurarea parametrilor de modul de rețea. În circuitul trifazat studiat cu o sursă simetrică de EMF și sarcină simetrică defecte au avut loc defecte de izolație în una din faze. Calculele sunt efectuate pentru un circuit echivalent cu linie cu derivație prin metodă potențialelor nodale. Investigația influenței valorilor de conductivitate a izolației în diferite locuri deteriorate ale rețelei la precizia determinării conductivității izolației se efectuează cu ajutorul modelelor numerice. Studiul metodei date se efectuează cu înaintarea ipotezelor despre locul avariat și influența clasei de precizie a instrumentelor de măsurat.

Cuvinte-cheie: Modelul numeric, ipoteză de deteriorare, conductivitate de izolare, conductivitatea activă.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE ACCURACY OF DETERMINING OF PARAMETERS AND PLACE OF INSULATION DAMAGE IN THE ELECTRIC NETWORKS OF 6 TO 35 KV

Naraeva R.R. , Khusainov S.N.

Southern Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The present paper is devoted to the research of the method for determining the parameters and plot of insulation damage in the networks of 6 to 35 kV with isolated neutral on the basis of measuring the operating parameters of the network. In the considered three-phase circuit with a symmetric source of EMF and symmetric loading there was a damage of insulation in one of the phases. The calculations are carried out for the transmission line equivalent circuit with a branch line by means of node-potential method. An investigation of the influence of the magnitude of insulation conductivity in the place of damage of different sections of the network upon the accuracy of determining the insulation conductivity is conducted using the data from digital models. The research of this method is performed by advancing hypotheses about the place of damage and by considering the influence of the multiplicity of increasing insulation conductivity of the damaged section and accuracy class of measuring devices.

Keywords: Digital model, hypotheses of damage, total conductivity of insulation, active conductivity.

Введение

Надежность и безопасность эксплуатации распределительных электрических сетей, а также бесперебойность электроснабжения потребителей зависят от состояния электрической изоляции [1, 2].

Как известно, повреждение изоляции воздушных и кабельных линий приводят к однофазным замыканиям на землю, которые представляют большую опасность для самих электроустановок, а также для обслуживающего персонала и посторонних лиц. Для предотвращения подобных ситуаций в распределительных сетях необходимо, чтобы электрическая изоляция находилась в рабочем состоянии. Однако применяемые в сетях 6...35 кВ устройства контроля изоляции не позволяют определить фактический уровень сопротивления изоляции и место его повреждения. Поэтому методам определения параметров изоляции придается большое значение.

Существующие на сегодняшний день методы определения параметров изоляции имеют некоторые особенности, которые в определенной степени влияют на рабочий режим работы сети. Сюда можно отнести методы, требующие полного отключения электроустановки либо установки дополнительного высоковольтного оборудования, либо применения оперативного тока, что отражается на безопасности и надежности электроснабжения. Ряд известных методов лишь фиксирует изменение сопротивления изоляции, не определяя при этом саму его величину.

Среди методов определения параметров изоляции, заслуживают внимание методы, разработанные в Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ), г. Челябинск, Россия, не требующие установки дополнительного оборудования, а, следовательно, не влияющие на рабочий режим работы сети. Эти методы основаны на измерении режимных параметров сети [3, 4], позволяют осуществить периодический контроль изоляции. Для линии без отпайки (т.е. без ответвления) в работе [5] приведена методика определения участка повреждения изоляции. Для обеспечения непрерывного контроля изоляции, позволяющего существенно повысить безопасность эксплуатации электрических сетей, необходимо дальнейшее развитие и исследование методов, основанных на измерении режимных параметров сети.

Постановкой задачи является исследование различных факторов, влияющих на определение величины проводимости изоляции, таких как: кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класс точности измерительных приборов, а также определение участка повреждения изоляции. Исследования проводятся на основе измерения режимных параметров сети с выдвижением гипотез о месте повреждения изоляции.

Определение проводимости изоляции сети и погрешности ее определения

Рассматривается трехфазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, в которой произошло повреждение изоляции в фазе А, поэтому расчеты проводимостей изоляции выполняются для схемы фазы А и сопоставляются с проводимостями изоляции неповрежденной фазы В.

Как и в работах [6, 7, 8] расчеты выполняются по методу узловых потенциалов (МУП) с использованием цифровых моделей (ЦМ) линии с отпайкой для П-образной схемы замещения, записанной в пакете MathCAD:

- одна ЦМ рассчитана в работе [6] для симметричного режима,
- вторая ЦМ рассчитана в данной работе по аналогии с работой [8] для трех случаев ухудшения изоляции в фазе А поочередно для каждого участка сети:

1) на первом участке (1–0) главной линии;

- 2) на втором участке (0–2) главной линии;
- 3) на третьем участке (0–3) отпаечной линии, соответственно с величиной ухудшения проводимости изоляции:

$$\underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{b1} + k \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}) \frac{1}{2}, \quad \underline{Y}_{a2} = \underline{Y}_{b2} + k \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}), \quad \underline{Y}_{a3} = \underline{Y}_{b3} + k \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}),$$

здесь \underline{Y}_{a1} , \underline{Y}_{a2} , \underline{Y}_{a3} – проводимости изоляции соответственно первого, второго, третьего участков поврежденной фазы А; \underline{Y}_{b1} , \underline{Y}_{b2} , \underline{Y}_{b3} – проводимости изоляции соответственно первого, второго, третьего участков неповрежденной фазы В; \underline{Y}_{sb} – суммарная проводимость изоляции неповрежденной фазы В ($\underline{Y}_{sb} = \underline{Y}_{b1} + \underline{Y}_{b2} + \underline{Y}_{b3}$); k – коэффициент кратности увеличения активной проводимости изоляции; Re – реальная часть комплексной величины \underline{Y}_{sb} .

При решении задачи цифрового моделирования, как и в работе [6] заданными считаем следующие параметры неповрежденных линий:

- \underline{Z} – продольное комплексное сопротивление главной линии и \underline{Z}_3 – продольное комплексное сопротивление отпаечной линии;
- l – длина главной линии и l_3 – длина отпаечной линии;
- m – коэффициент распределения сопротивления (проводимости) или доля сопротивления (проводимости) первого участка в основной линии.

Главная линия длиной l делится местом присоединения отпайки на две части:

- $\underline{Z}_1 = m\underline{Z}$ – сопротивление первого участка главной линии и $\underline{Z}_2 = (1-m)\underline{Z}$ – сопротивление второго участка главной линии;
- $\underline{Y}_1 = m\underline{Y}$ – проводимость первого участка главной линии и $\underline{Y}_2 = (1-m)\underline{Y}$ – проводимость второго участка главной линии;
- \underline{Y}_3 – проводимость отпаечной линии;
- U_0 – напряжение в точке присоединения отпайки;
- \underline{Z}_{a2} – нагрузка в конце главной линии и \underline{Z}_{a3} – нагрузка в конце отпаечной линии.

Данные для цифрового моделирования представлены в пункте 1 приложения.

Расчет цифровых моделей основан на последовательном определении напряжений и токов на участках цепи, начиная с места присоединения отпайки и постепенно продвигаясь к концам и началу линии.

Схема замещения фазы участка сети представлена на рис. 1.

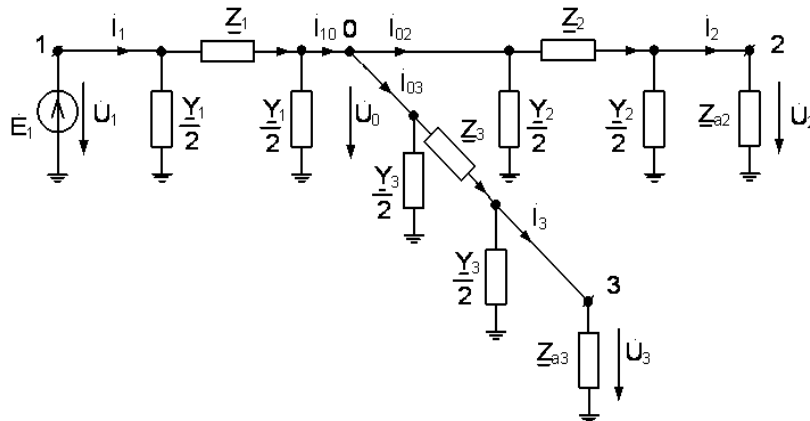


Рис. 1. П-образная схема замещения фазы участка сети

Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений. При моделировании измерений в действительные значения измеряемых величин вносится погрешность в пределах точности измерительных приборов по случайному закону. В результате получаем измеренные значения напряжений, токов и углов сдвига, которые затем подставляем в уравнения, рассмотренные ниже. Для определения диапазона измерения измеряемых и рассчитываемых величин в зависимости от величины погрешностей выполняется 100 циклов измерений и соответствующих им расчетов.

Обычно в сети предусмотрены измерения напряжений, токов и углов сдвига на подстанциях. В нашем случае это подстанции в начале и в конце основной линии и в конце отпаечной линии. В некоторых случаях имеется возможность подключения измерительных приборов в месте присоединения отпайки. Использование этой дополнительной информации позволяет уменьшить погрешности определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли. Соответственно рассмотрим три варианта расчетов цепи с П-образной схемой замещения по МУП (рис. 1):

Вариант 1 – расчет цепи по МУП без дополнительных уравнений.

Записываем уравнения по МУП для схемы (рис. 1), после преобразования этих уравнений, получаем [8]:

$$\left[U_1 \left(1 + \frac{mY Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 Z_1 \right] \left(g + \frac{Y + Y_3}{2} \right) - U_1 \frac{1}{Z_1} - U_2 e^{j \operatorname{Re}(\psi)} \frac{1}{Z_2} - U_3 e^{j \operatorname{Im}(\psi)} \frac{1}{Z_3} = 0; \quad (1)$$

$$\left[U_1 \left(1 + \frac{mY Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 Z_1 \right] \left(\frac{-1}{Z_2} \right) + \left[U_2 \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{(1-m)Y}{2} \right) + \dot{I}'_2 \right] e^{j \operatorname{Re}(\psi)} = 0; \quad (2)$$

$$\left[U_1 \left(1 + \frac{mY Z_1}{2} \right) - \dot{I}_1 Z_1 \right] \left(\frac{-1}{Z_3} \right) + \left[U_3 \left(\frac{1}{Z_3} + \frac{Y_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \right] e^{j \operatorname{Im}(\psi)} = 0, \quad (3)$$

здесь:

$\dot{U}_1 = U_1$ – фазное напряжение в начале главной линии;

$\dot{U}_2 = U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)}$ – фазное напряжение в конце второго участка главной линии;

$\dot{U}_3 = U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)}$ – фазное напряжение в конце отпаечной линии;

$\psi = \psi_2 + j\psi_3$ – комплексная переменная, где ψ_2 – начальная фаза напряжения U_2 в конце второго участка главной линии; ψ_3 – начальная фаза напряжения U_3 в конце отпаечной линии;

так же, как и в работе [6] вводятся обозначения:

$\dot{I}_1 = I_1 \cdot e^{-j\varphi_1}$ – ток в начале главной линии;

$\dot{I}'_2 = I_2 \cdot e^{-j\varphi_2}$, где I_2 – ток в конце главной линии;

$\dot{I}'_3 = I_3 \cdot e^{-j\varphi_3}$, где I_3 – ток в конце отпаечной линии,

здесь углы сдвига фаз между напряжением и током в начале главной линии (φ_1), в конце главной линии (φ_2) и в конце отпаечной линии (φ_3).

Составляем программу определения параметров схемы по уравнениям (1), (2), (3) в пакете MathCAD.

Как показано в [6] характер распределения проводимости изоляции по участкам сети при отсутствии повреждений практически не влияет на определение суммарной

проводимости изоляции, поэтому можно считать, что проводимость распределяется пропорционально длине участков.

При наличии повреждения, особенно при большой величине проводимости в месте повреждения, расчет в предположении равномерности распределения проводимости изоляции дает неверный результат. С другой стороны, по данным измерений режимных параметров мы не можем судить о том, где расположено повреждение. В связи с этим проводим расчет с выдвиганием гипотез о месте повреждения. Рассматриваем три гипотезы: гипотеза 1 – повреждение на первом участке; гипотеза 2 – повреждение на втором участке; гипотеза 3 – повреждение на третьем участке, по которым и выполняем перерасчет коэффициента распределения проводимости m , по участкам сети.

В исследованиях по гипотезам поврежденного участка (при определении параметров изоляции) используем:

- суммарную проводимость $\underline{Y}_{sa} = \underline{Y}_{a1} + \underline{Y}_{a2} + \underline{Y}_{a3}$ равную сумме проводимостей первого, второго и третьего участков при ухудшении изоляции в фазе А поочередно на одном из участков сети с k -кратным увеличением активной проводимости;

- средние значения из диапазона проводимостей, полученных при определении параметров изоляции исправной симметричной сети по трем вариантам расчетов (варианты 2 и 3 приводятся ниже), определяемые как:

$$\underline{Y}_{sb} = \frac{G_{s\max} + G_{s\min}}{2} + j \frac{B_{s\max} + B_{s\min}}{2} \quad - \quad \text{средняя суммарная проводимость}$$

неповрежденной фазы В;

$$\underline{Y} = \frac{G_{\max} + G_{\min}}{2} + j \frac{B_{\max} + B_{\min}}{2} \quad - \quad \text{средняя проводимость главной линии}$$

неповрежденной фазы В;

$$\underline{Y}_3 = \frac{G_{3\max} + G_{3\min}}{2} + j \frac{B_{3\max} + B_{3\min}}{2} \quad - \quad \text{средняя проводимость отпаечной линии}$$

неповрежденной фазы В;

- величину ухудшения суммарной проводимости изоляции $\Delta \underline{Y} = \underline{Y}_{sa} - \underline{Y}_{sb}$.

Гипотеза 1:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на первом участке (1–0) главной линии. Тогда для второго участка без повреждения величина проводимости

$$\underline{Y}_2 = (1 - m) \underline{Y}$$

определяется по заданному для нормального режима коэффициенту распределения проводимости m .

На первом участке проводимость \underline{Y}_1 определяем с учетом ухудшения изоляции как

$$\underline{Y}_1 = (\underline{Y} + \Delta \underline{Y}) - \underline{Y}_2.$$

Перерасчет коэффициента распределения проводимости выполняется по формуле:

$$m = \frac{\underline{Y}_1}{\underline{Y} + \Delta \underline{Y}}.$$

Гипотеза 2:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на втором участке (0–2) главной линии. Тогда для первого участка без повреждения величина проводимости

$$\underline{Y}_1 = m \underline{Y}$$

определяется по заданному для нормального режима коэффициенту распределения проводимости m .

На втором участке проводимость \underline{Y}_2 определяем с учетом ухудшения изоляции как

$$\underline{Y}_2 = (\underline{Y} + \underline{\Delta Y}) - \underline{Y}_1.$$

Перерасчет коэффициента распределения проводимости выполняется по формуле:

$$m = 1 - \frac{\underline{Y}_2}{\underline{Y} + \underline{\Delta Y}}.$$

Гипотеза 3:

Предполагается ухудшение изоляции в фазе А на третьем участке (0–3) отпаечной линии. Тогда для третьего участка величина проводимости: $\underline{Y}_3 + \underline{\Delta Y}$.

Коэффициент распределения проводимости m сохранился.

С учетом полученных коэффициентов распределения проводимости изоляции по предполагаемым гипотезам повреждения участков сети выполняется расчет П-образной схемы замещения линии с отпайкой по МУП по варианту 1 уравнений цепи.

Алгоритм расчета приведен в пункте 2 приложения (рис.2).

Вариант 2 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для токов. Как и в работе [8] к уравнениям (1), (2), (3) добавляются дополнительные уравнения для токов I_{10} , I_{02} , I_{03} в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left| \dot{I}_1 - \frac{m \cdot \underline{Y}}{2} \left[U_1 \left(2 + \frac{m \underline{Y} \underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \right] \right| - I_{10} = 0; \quad (4)$$

$$\left| \dot{I}'_2 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} \left[U_2 \left(2 + \frac{(1-m) \underline{Y} \underline{Z}_2}{2} \right) + \dot{I}'_2 \underline{Z}_2 \right] \right| - I_{02} = 0; \quad (5)$$

$$\left| \dot{I}'_3 + \frac{\underline{Y}_3}{2} \left[U_3 \left(2 + \frac{\underline{Y}_3 \underline{Z}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \underline{Z}_3 \right] \right| - I_{03} = 0. \quad (6)$$

здесь параметры, входящие в данные уравнения такие же, как и в варианте 1;

I_{10} – ток в месте присоединения отпайки со стороны первого участка главной линии;

I_{02} – ток в месте присоединения отпайки со стороны второго участка главной линии;

I_{03} – ток в месте присоединения отпайки со стороны третьего участка отпаечной линии.

При повреждении изоляции коэффициент m пересчитывается аналогично по гипотезам 1, 2, 3, приведенным выше.

Вариант 3 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для напряжений. Как и в работе [8] к уравнениям (1), (2), (3) добавляются дополнительные уравнения для напряжения U_0 в месте присоединения отпайки, записанные по законам Кирхгофа и Ома для трех участков линии:

$$\left| U_1 \cdot \left(1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \right| - U_0 = 0; \quad (7)$$

$$\left| U_2 \cdot \left(1 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_2}{2} \right) + \dot{I}'_2 \cdot \underline{Z}_2 \right| - U_0 = 0; \quad (8)$$

$$\left| U_3 \cdot \left(1 + \frac{\underline{Y}_3 \cdot \underline{Z}_3}{2} \right) + \dot{I}'_3 \cdot \underline{Z}_3 \right| - U_0 = 0. \quad (9)$$

здесь параметры, входящие в данные уравнения такие же, как и в варианте 1;
 U_0 – напряжение в месте присоединения отпайки.

При повреждении изоляции коэффициент m пересчитывается аналогично по гипотезам 1, 2, 3, приведенным выше.

Исследования проводятся для относительно небольшого (10-кратного) увеличения проводимости изоляции в линии с отпайкой, позволяющего обнаружить ее ухудшение и определить участок повреждения в цепи с П-образной схемой замещения по МУП.

Все три варианта уравнений с данными цифровых моделей (симметричной и с ухудшением изоляции на первом, втором и третьем участках сети) решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в программе MathCAD.

Алгоритм расчета параметров изоляции и погрешностей их определения для участка сети с П-образной схемой замещения, рассчитанной по МУП по всем трем вариантам уравнений приведен в пункте 2 приложения (рис. 2).

Увеличение активной проводимости на один порядок и сохранение малой величины реактивной проводимости в случае ухудшения изоляции позволяют в допустимых пределах рассчитать погрешности определения активных проводимостей, а для реактивных проводимостей дают большой процент погрешности. Кроме того, повреждение изоляции добавляет активные токи утечки, и поэтому, с учетом изложенного выше, анализу подлежат только активные проводимости.

Результаты расчета погрешности определения проводимости изоляции по участкам повреждения и проводимости изоляции для случая повреждения на первом участке приведены в пункте 3 приложения (табл. 1, 2, 3, 4). Поскольку проводимость 3-го участка мала по сравнению с проводимостью поврежденного участка (табл. 4), то погрешности ее определения превышают саму проводимость. Поэтому эти значения для вариантов 1 (без дополнительных уравнений) и 3 (с дополнительными уравнениями по напряжению) в табл. 1 и 2 не приведены. В табл. 1–4 максимальные и минимальные значения величины проводимости изоляции главной линии (G), отпаечной линии (G_3) и суммарной всей сети (G_S) обозначены соответственно (G_{\max}, G_{\min}) , $(G_{3\max}, G_{3\min})$, $(G_{S\max}, G_{S\min})$.

Результаты, приведенные в табл. 1, 2, 3 показывают, что для правильных гипотез погрешности определения суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка находятся в допустимых пределах и являются меньше, чем для ошибочных гипотез. То есть достаточно точно можно определить проводимость поврежденного участка и суммарную проводимость изоляции сети.

Кроме того, подтверждением правильности гипотез по предполагаемым участкам повреждения являются величины суммарной проводимости изоляции и проводимости изоляции поврежденного участка.

Критерием правильной гипотезы считается:

- положительная величина проводимости изоляции;
- увеличение суммарной проводимости и проводимости поврежденного участка на один и тот же порядок (табл. 4).

Действительно, при повреждении на первом участке (табл. 1) по всем трем вариантам уравнений цепи проходит гипотеза 1, по которой предполагается повреждение на участке (1–0) с более точными результатами по 2-му варианту (с дополнительными уравнениями по току).

В случае повреждения на втором участке (табл. 2) правильной является гипотеза 2, с предполагаемым ухудшением изоляции на участке (0–2) и с лучшими результатами по 3-му варианту (с дополнительными уравнениями по напряжению).

При повреждении на третьем участке с большими погрешностями определяются проводимости изоляции не третьего участка как в табл. 4, а проводимости изоляции главной линии, поэтому из табл. 3 исключаются проводимости главной линии.

Для третьего участка повреждения (табл. 3) правильной является гипотеза 3 с предполагаемым ухудшением изоляции на участке (0–3). Однако для 2-го варианта (с дополнительными уравнениями по току) гипотеза 1 с предполагаемым повреждением на участке (1–0) дает малый процент погрешности суммарной проводимости $G_{S_{\min}} = -4,47\%$, но сопоставление результатов погрешности определения проводимости изоляции главной линии $G_{\min} = -77\%$ и отпайки (3-го участка) $G_{3_{\max}} = 4,13\%$ показывает повреждение на 3-ем участке, что и является критерием неверности гипотезы 1.

Погрешности определения проводимости изоляции сети в зависимости от класса точности измерительных приборов

Для исследования возможностей использования измерительных приборов классов точности 0,1; 0,5 и 1 при моделировании на ЭВМ 100 циклов измерений напряжений, токов и углов сдвига между напряжением и током выполнены расчеты при различных значениях коэффициента кратности увеличения активной проводимости изоляции (k), а именно, при 10-кратном, 20-кратном, 30-кратном, 40-кратном, 50-кратном и 60-кратном увеличении проводимости изоляции в месте ее повреждения. В пункте 4 приложения (табл. 5) представлены подтверждения гипотез, полученные по анализу результатов расчета проводимости изоляции при ее ухудшении на первом участке линии с отпайкой при использовании измерительных приборов различных классов точности.

При анализе результатов исследований учитывались следующие критерии:

- критерий правильной гипотезы – проводимость поврежденного участка близка к суммарной проводимости сети;
- критерий неправильной гипотезы – отрицательная величина проводимости изоляции.

При выборе гипотезы поврежденного участка за верную гипотезу принимается та, номер которой соответствует номеру участка повреждения. Если номера не совпадают или несколько гипотез удовлетворяют критериям подтверждения гипотезы, то это означает, что на данном участке повреждения при расчете цепи пользоваться данным вариантом уравнений нельзя, так как этот вариант дает сомнительные результаты, не позволяющие определить участок повреждения и величину его проводимости изоляции. В пункте 5 приложения (табл. 6) приведены погрешности определения суммарной проводимости изоляции при различной кратности ее увеличения на первом участке линии с отпайкой по верной гипотезе 1, предполагающей ухудшение изоляции на первом участке с применением измерительных приборов классов точности 0,1; 0,5; 1.

В результате проведенных исследований для приборов различных классов точности установлена минимальная величина увеличения проводимости изоляции поврежденного участка, позволяющая фиксировать ухудшение изоляции:

- 20-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 0,1;
- 30-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 0,5;
- 60-кратное увеличение проводимости – для приборов класса 1.

Выводы

Разработан метод определения участка повреждения изоляции в линии с отпайкой и исследовано влияние таких факторов как кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класс точности измерительных приборов на точность определения проводимости изоляции на основе измерения режимных параметров сети.

Установлено, что использование в уравнениях цепи дополнительно измеренных токов в месте присоединения отпайки позволяет уменьшить погрешность определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

Приложение

1. Данные для цифрового моделирования.

- Параметры неповрежденной линии:

$Z_i = 0,306 + j0,421$ Ом/км – сопротивление на единицу длины главной линии; $Z_{3i} = 0,603 + j0,5$ Ом/км – сопротивление на единицу длины отпаечной линии; $Y_i = 0,00001 + j0,00002$ См/км – проводимость на единицу длины линии; $l = 24$ км – длина главной линии; $l_3 = 12$ км – длина отпаечной линии; $m = 0,6$ – коэффициент распределения сопротивления (проводимости); $U_0 = 10/\sqrt{3}$ кВ – фазное напряжение в точке присоединения отпайки; $Z_{a2} = 10/(0,04\sqrt{3})$ Ом, $Z_{a3} = 10/(0,04\sqrt{3})$ Ом – нагрузка соответственно в конце главной и отпаечной линии.

- Кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка: $k = 10$.

Алгоритм расчета параметров изоляции и погрешностей их определения для участка сети с П-образной схемой замещения, рассчитанной по МУП.



Рис. 2. Алгоритм расчета параметров изоляции

PROBLEMELE ENERGETICE REGIONALE 3(23) 2013
ELECTROENERGETICĂ

2. Погрешности определения проводимости изоляции по участкам повреждения (табл. 1, 2, 3) и проводимости изоляции при повреждении на первом участке (табл. 4).

Таблица 1

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax, %	26,5	1847	-180
Gmin, %	-61,9	8,95	-289
Gsmax, %	4,68	13,9	7,77
Gsmin, %	-2,03	-1310	4,34
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	4,77	-95,6	-97,4
Gmin, %	-3,82	-96,1	-137
G3max, %	138	-82,6	945
G3min, %	-154	-84,4	-10,8
Gsmax, %	2,55	-95,2	-94,4
Gsmin, %	-2,99	-95,7	-114
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax, %	19,0	318	-15,4
Gmin, %	-49,2	198	-631
Gsmax, %	7,79	108	41,5
Gsmin, %	-13,1	46,0	-235

Таблица 2

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на втором участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax, %	1588	-59,4	444
Gmin, %	1564	-102	320
Gsmax, %	-1872	0,420	-48,3
Gsmin, %	-2035	-1,45	-76,2
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	-72,1	1,38	-33,6
Gmin, %	-97,7	-49,9	-103
G3max, %	-25,9	172	1130
G3min, %	-41,0	-111,399	-654,151
Gsmax, %	-70,7	1,568	-52,386
Gsmin, %	-96,0	-49,159	-92,996
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax, %	143	9,46	159
Gmin, %	-35,8	-45,8	-112
Gsmax, %	20,4	17,4	24,8
Gsmin, %	-55,5	-28,1	-87,3

Таблица 3

Погрешности определения проводимости изоляции
при повреждении на третьем участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
G3max, %	82,3	37,5	60,1
G3min, %	-48,4	-236	-63,7
Gsmax, %	5,39	0,737	2,87
Gsmin, %	-4,30	-12,7	-3,93
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax, %	4,97	-3,32	78,6

PROBLEMELE ENERGETICE REGIONALE 3(23) 2013
ELECTROENERGETICĂ

Gmin, %	-77,0	-854	-60,9
G3max, %	4,13	52,6	3,53
G3min, %	-1,06	-21,6	-4,91
Gsmax, %	-0,107	38,9	2,29
Gsmin, %	-4,47	-49,6	-0,917
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
G3max, %	53,3	42,9	46,1
G3min, %	-38,6	-65,2	-39,4
Gsmax, %	15,4	17,7	7,21
Gsmin, %	-39,0	-56,5	-21,3

Таблица 4

Проводимости изоляции для случая повреждения на первом участке

Гипотеза	1	2	3
Вариант	1 (без дополнительных уравнений)		
Gmax	0,004859056	0,0747694704	-0,0030812604
Gmin	0,001461284	0,0041836666	-0,0072425392
G3max	0,0026842204	0,0000403735	0,0113743338
G3min	-0,0009795854	-0,1225406288	0,0073489507
Gsmax	0,0041455044	0,004510612	0,0042676903
Gsmin	0,0038794706	-0,0479096911	0,0041317946
Вариант	2 (с дополнительными уравнениями по току)		
Gmax	0,0040232722	0,0001687614	0,0001007959
Gmin	0,0036932454	0,0001515308	-0,0014109121
G3max	0,0002861972	0,0000208262	0,0012545261
G3min	-0,0000646915	0,00001867	0,000107045
Gsmax	0,0040609996	0,0001887098	0,0002212639
Gsmin	0,0038414305	0,0001710893	-0,000554867
Вариант	3 (с дополнительными уравнениями по напряжению)		
Gmax	0,0045705545	0,016039022	0,0032492156
Gmin	0,0019502798	0,0114573486	-0,020405956
G3max	0,0019365197	-0,0049995483	0,0158257856
G3min	-0,0007284265	-0,0079230047	0,0000980228
Gsmax	0,0042684794	0,0082258381	0,0056044664
Gsmin	0,0034423664	0,0057807775	-0,0053535956

3. Подтверждения гипотез при повреждении изоляции на первом участке линии с отпайкой при использовании измерительных приборов различных классов точности.

Таблица 5

Подтверждения гипотез при повреждении на первом участке

Приборы класса точности	Кратность увеличения проводимости	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
			по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	2	3	4	5	6
0,1	10-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотезы 1; 2	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
	20-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
0,5	20-кратное	1	Гипотезы 1; 3	СР	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	30-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

PROBLEMELE ENERGETICE REGIONALE 3(23) 2013
ELECTROENERGETICĂ

1	30-кратное	1	Гипотезы 1; 3	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1,2	СР
		3	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
	40-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 2; 3	СР
		3	Гипотезы 1; 2	Гипотезы 1; 2; 3	СР
	50-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотезы 1; 3	СР
		2	Гипотеза 1	Гипотезы 1,2	СР
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	60-кратное	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
		3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

В таблице принято обозначение СР – сомнительный результат.

4. Погрешности определения суммарной проводимости изоляции при различной кратности ее увеличении на первом участке линии с отпайкой по верной гипотезе 1, предполагающей ухудшение изоляции на первом участке с применением измерительных приборов разных классов точности.

Таблица 6

Погрешности определения суммарной проводимости изоляции
при ухудшении изоляции на первом участке

Приборы класса точности	Кратность увеличения проводимости изоляции	Суммарная проводимость	Вариант уравнений		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
0,1	10-кратное	G _{max} , %	4,68	2,55	7,79
		G _{min} , %	-2,03	-2,99	-13,1
	20-кратное	G _{max} , %	1,76	0,515	2,09
		G _{min} , %	-2,23	-0,628	-7,34
0,5	20-кратное	G _{max} , %	5,1	8,16	12,9
		G _{min} , %	-16,2	-5,96	-37,6
	30-кратное	G _{max} , %	3,34	4,99	8,6
		G _{min} , %	-9,57	-2,66	20,7
1	30-кратное	G _{max} , %	5,2	8,9	19,6
		G _{min} , %	-26,4	-8,1	-45,0
	40-кратное	G _{max} , %	3,96	5,8	28,2
		G _{min} , %	-18,6	-6,1	-55,9
	50-кратное	G _{max} , %	3,2	-9,95	-1,87
		G _{min} , %	-14,4	-29,3	-48,6
60-кратное	G _{max} , %	2,8	4,3	15,8	
	G _{min} , %	-11,8	-4,2	-30,1	

Литература

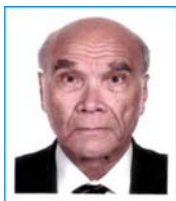
- [1] Arora, R. “High Voltage and Electrical Insulation Engineering” / R. Arora, W. Mosch // IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-IEEE Press, 1 edition, August 2011. – 394 p.
- [2] James, R.E. “Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment” / R.E. James, Q. Su // IET Power and Energy, Series: Iet Power and Energy, January 2007. – 288 p.
- [3] Хусаинов, Ш.Н. Определение параметров изоляции для линии с отпайкой по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров,

- Н.А. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(04). – С. 55–59.
- [4] Хусаинов, Ш.Н. Определение поврежденного участка сети, содержащего основную и отпаечную линии, по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 16–19.
- [5] Хусаинова, Н.А. Метод диагностики состояния изоляции электрических распределительных сетей по результатам измерения режимных параметров / Н.А. Хусаинова, Ю.В. Косоротова, А.И. Сидоров // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Сборник материалов второй Всероссийской научно-практической конференции. – Челябинск: Изд-во ЗАО «Челябинская межрайонная типография». 2003. – С. 81–82.
- [6] Хусаинов, Ш.Н. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып.8. – № 20(92). – С.32–37.
- [7] Нараева, Р.Р. Анализ погрешности результатов расчета параметров изоляции, в зависимости от выбранных схем замещения линии электропередачи / Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: сб. науч. тр. – Москва: РАН, 2007. – С. 364–374.
- [8] Хусаинов, Ш.Н. Исследование влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения на точность ее определения косвенным методом / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 9–15.

Сведения об авторах



Нараева Рузалия Раисовна, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук, область научных интересов – онлайн-мониторинг состояния электрической изоляции в сетях 6...35 кВ.
Контактный адрес: Россия, г Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, e-mail: nar.ru@mail.ru



Хусаинов Шамиль Нагимович, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, область научных интересов – теория электрических схем с многополюсными элементами.
Контактный адрес: Россия, г Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, e-mail: shanh@mail.susu.ac.ru