

Повышение точности одностороннего определения места повреждения в электрической сети произвольной конфигурации

КОЛОБАНОВ П.А., КУЛИКОВ А.Л., ОБАЛИН М.Д.

Для ликвидации повреждения на линиях электропередачи проводится процедура определения места повреждения (ОМП). Рассматривается одностороннее ОМП по составляющим токов и напряжений промышленной частоты. Существующие расчетные выражения ОМП линий электропередачи часто применимы только для частных вариантов конфигурации сети, в остальных случаях они дают методическую погрешность. Разработан общий алгоритм определения места повреждения, в котором использован принцип наложения. Рассмотрена на основе использования этого принципа компенсация влияния переходного сопротивления. Приведен вывод расчетного выражения для одностороннего определения места повреждения в фазных координатах при произвольной конфигурации электрической сети. Результаты имитационных экспериментов, а также расчеты с использованием реальных осциллограмм аварийных событий показали высокую точность предложенного подхода. Рекомендуется область применения разработанного метода.

Ключевые слова: линии электропередачи, место повреждения, определение мест повреждения, алгоритм

В наиболее простой форме дистанционный алгоритм определения места повреждения (ОМП) основан на том, что известно сопротивление линии электропередачи на единицу длины $Z_{уд}$ и измеренное сопротивление $Z_{зам} = U/I$ на одном из концов линии. Тогда искомое расстояние до места повреждения определяется соотношением

$$l = \frac{U}{I} / Z_{уд} = \underline{Z} / \underline{Z}_{уд}. \quad (1)$$

В случае неоднородной линии удельное сопротивление $Z_{уд}$ является функцией длины l . При этом зависимость $Z_{уд}(l)$ содержит изломы и не выражается единой формулой. Такая ситуация определяется следующими основными причинами:

неодинаковые удельные параметры линии (марка провода, троса, опоры, удельного сопротивления земли);

наличие ответвлений на линии электропередачи;

взаимоиндукция с другими линиями, в том числе не по всей длине;

неконтролируемые контуры, связанные с линией, которые взаимоиндуктируют с рассматриваемой, но их токи и напряжения в момент аварии неизвестны;

несимметрия сопротивлений линий (у разных типов опор фазные проводники расположены по-разному).

Реальный алгоритм ОМП гораздо более сложный и содержит еще ряд параметров, которые также зависят от места короткого замыкания (КЗ) и

не имеют единого аналитического выражения для всех возможных конфигураций сети. Известны многочисленные попытки формирования обобщенного алгоритма [например, 1–5], однако и они не содержат решения задачи одностороннего ОМП для произвольной сети в общем виде.

На практике непостоянство удельных параметров электрической сети обычно учитывается итерационным алгоритмом [1]: линия разбивается на участки, где удельные параметры принимаются одинаковыми. Напряжения и токи при переходе с участка на участок пересчитываются по закону Ома.

Однако иногда точный пересчет по закону Ома алгоритмически прост и легко реализуем для электрической сети со сложной конфигурацией. Например, ток в параллельных линиях может быть неизвестен, на участке параллельности может быть ответвление и т.д. Аналитические выражения для пересчета при этом становятся очень сложными, выводить их для каждого участка каждой линии затруднительно, поэтому на практике в формулы вводятся упрощения. Например, для линии рис. 1 стандартным упрощением является игнорирование взаимоиндукции с фазными проводниками параллельной линии – учитывается только заземленный по концам грозотрос.

В статье предлагается алгоритм одностороннего ОМП для электрической сети произвольной конфигурации, включающий точные аналитические зависимости требуемых для его реализации расчетных параметров.

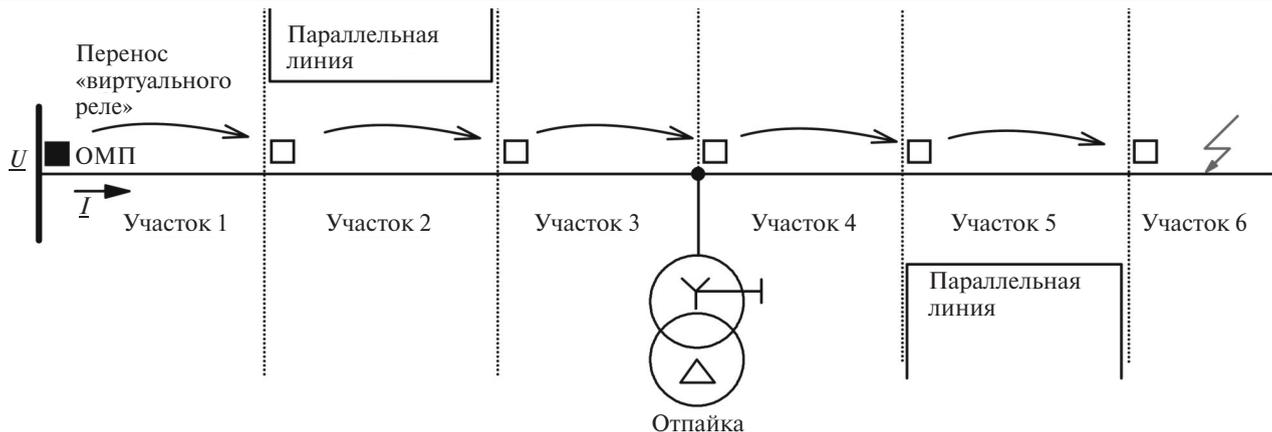


Рис. 1. Метод разбиения на участки

Применение метода наложения. Суть метода наложения [6] рассмотрим на примере однофазной сети, эквивалентная схема которой представлена на рис. 2.

Метод наложения для ОМП линий электропередачи реализуется следующим образом.

1. Рассчитывается доаварийный режим. В место предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь с ЭДС, равной доаварийному напряжению $U_{доавF}$ в заданной точке. Как известно, если между точками сети, имеющими разность потенциалов $U_{доавF}$,

включить источник ЭДС, равный $U_{доавF}$ по значению и соответствующий по направлению, то токораспределение в сети не изменится (рис. 2,а).

2. Рассчитывается послеаварийный режим. В этом случае ветвь КЗ представляет собой «закоротку» (см. рис. 2,б).

3. Из уравнений Кирхгофа для послеаварийной сети вычитаются почленно уравнения для доаварийной сети. Это приводит к появлению так называемой «чисто аварийной схемы» (рис. 2,в).

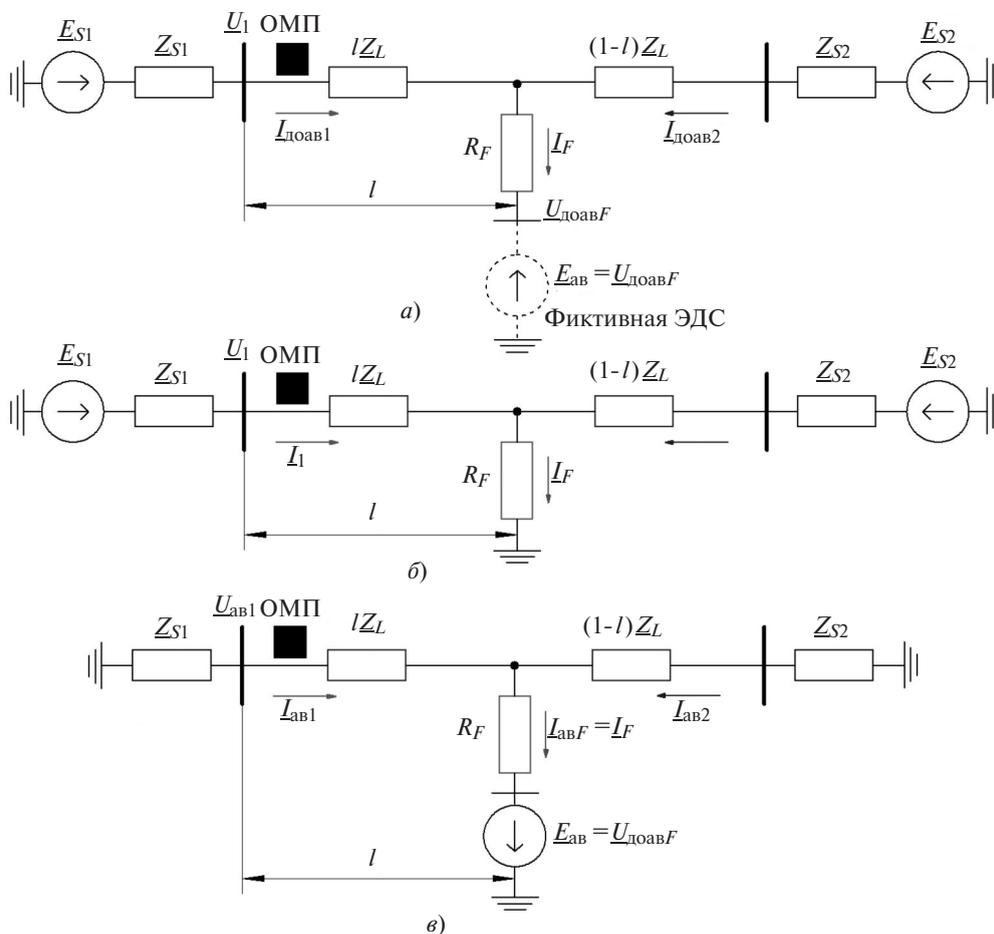


Рис. 2. Эквивалентная схема однофазной сети: а – доаварийный режим; б – послеаварийный режим; в – «чистоаварийная схема»

Чисто аварийная схема содержит только одну ЭДС – в месте КЗ. Значение этой ЭДС равно доаварийному напряжению в этой точке со знаком «минус». Такой подход справедлив, если принять, что ЭДС генераторов до и после КЗ в первые моменты времени одинаковы.

Отношение токов в двух любых ветвях $KI_{ij} = I_i / I_j$ называется коэффициентом токораспределения. В сети с одним источником ЭДС KI_{ij} зависит только от сопротивлений сети и положения точки КЗ. Зависимость $KI_{ij}(l)$ в общем случае – ломаная и не может быть описана единым аналитическим выражением. Целесообразно получение такой зависимости с использованием имитационной модели электрической сети. Для чисто аварийных напряжений можно ввести аналогичным образом коэффициент распределения напряжения KU_{ij} . Также допустимо использовать коэффициент отношения чисто аварийного напряжения в произвольной точке сети к чисто аварийному току линии KZ_{ij} .

Компенсация влияния переходного сопротивления.

За основу процедуры компенсации переходного сопротивления также можно использовать метод наложения. Примем переходное сопротивление R_F чисто активным [1, 2], тогда для схемы на рис. 2,а справедливо равенство

$$\underline{U} = l \underline{Z}_L \underline{I} + R_F \underline{I}_F \tag{2}$$

Фазы тока в месте повреждения \underline{I}_F и в месте установки защиты \underline{I}_1 в общем случае не совпадают. Поэтому нельзя избавиться от влияния переходного

сопротивления, просто взяв мнимую часть от равенства (2).

Обозначим $\underline{K}(l) = \underline{I}_F / \underline{I}_{ав1}$, тогда ток в месте повреждения равен $\underline{I}_F = \underline{K}(l) \underline{I}_{ав1}$. Разделим (2) на $\underline{K}(l) \underline{I}_{ав1}$ и определим мнимую часть, на основе которой формируется классическое расчетное выражение для оценки расстояния до места повреждения [1, 2]:

$$l = \text{Im} \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{K}(l) \underline{I}_{ав1}} \right) / \text{Im} \left(\frac{\underline{Z}_1 \underline{I}_1}{\underline{K}(l) \underline{I}_{ав1}} \right) \tag{3}$$

Если для всех элементов электрической сети принять $\text{arctg}(X/R) = \text{const}$, то фазовые углы тока $\underline{I}_{ав1}$ в месте установки защиты и в месте повреждения \underline{I}_F совпадают. В этом случае можно принять $\underline{K}(l) = 1$ (на принцип компенсации переходного сопротивления такой прием не окажет влияния).

Для трехфазной электрической сети общий подход к применению метода наложения сохранится. Отметим, что составляющие обратной и нулевой последовательности присутствуют только в чисто аварийном токе (доаварийный режим считаем симметричным). Это позволяет использовать в расчетных соотношениях для ОМП токи обратной и нулевой последовательности вместо $\underline{I}_{ав1}$. Именно такой метод изложен в [1].

Отметим, что только для одно- и двухфазных КЗ справедливо утверждение, что источник ЭДС в чисто аварийной схеме – единственный. Для других видов КЗ нельзя определить ток в месте повреждения для произвольной конфигурации сети. Од-

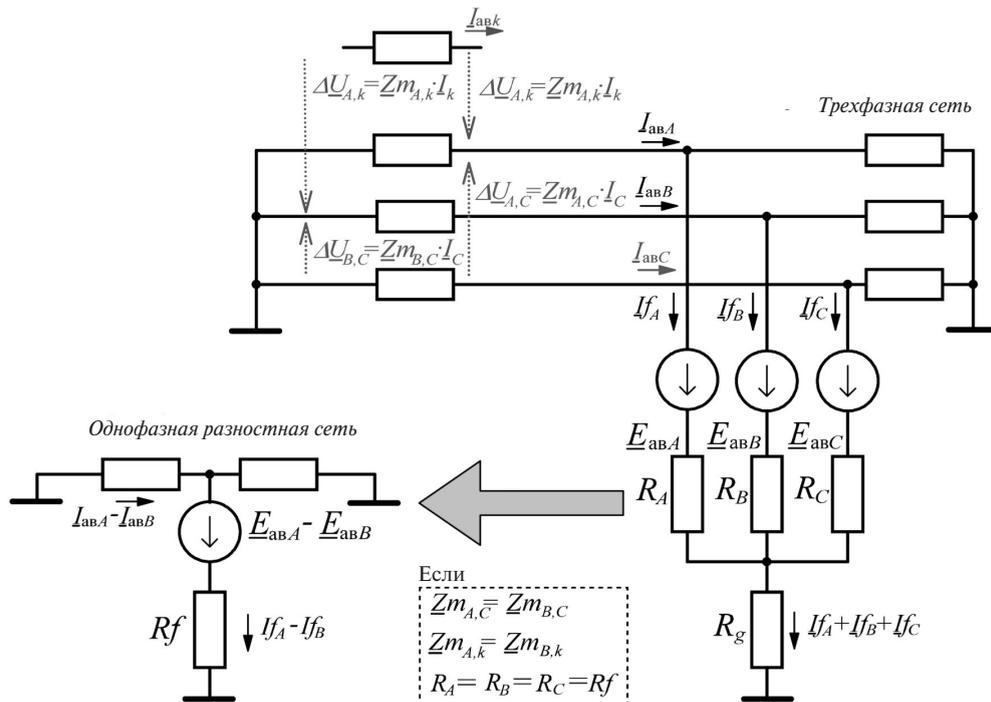


Рис. 3. Переход к однофазной разностной схеме (на примере трехфазного КЗ)

нако возможно воспользоваться фактом трехфазности сети и допустить симметричность ее параметров. Для примера (рис. 3) это означает, что при взаимном вычитании уравнений по второму закону Кирхгофа для двух произвольных фаз все наведенные напряжения от остальных проводников сети исчезнут. Тогда целесообразно заменить исходную многопроводную схему эквивалентной однофазной (рис. 3), где протекают разностные токи под действием единственной разностной ЭДС в месте повреждения.

Неконтролируемые контуры. На рис. 4 приведен пример, когда параллельно участку основной линии электропередачи проходит еще соседняя линия, а ее ток $I_{\text{пар}}$ не подлежит измерению терминалом защиты.

Для каждой фазы параллельной линии ток и напряжение можно выразить как

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{пар}} &= \underline{U}_{\text{пар}}^{\text{ав}} + \underline{U}_{\text{пар}}^{\text{доав}}; \\ \underline{I}_{\text{пар}} &= \underline{I}_{\text{пар}}^{\text{ав}} + \underline{I}_{\text{пар}}^{\text{доав}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Оценку чисто аварийного тока и напряжения в неконтролируемом контуре можно также реализовать через коэффициент токораспределения.

Учтем, что в реальной сети коэффициент связи между каждой парой фазных проводов двух параллельных линий приблизительно одинаков, а доаварийный ток симметричен. Наведенное напряжение от симметричного тока будет близко к нулю, по-

этому для целей ОМП достаточно оценить чисто аварийный ток в параллельной линии, не измеряемый терминалом защиты.

Возможен более точный учет тока в неконтролируемом контуре, если известны доаварийные напряжения по его концам. Для случая рис. 4,а по концам отключенной и заземленной параллельной линии они равны нулю, для рис. 4,б напряжения по концам неконтролируемой линии следует принять равными $U_{\text{НОМ}}$.

Расчетное выражение для одностороннего ОМП в фазных координатах при произвольной конфигурации электрической сети. Принципы формирования аналитических соотношений. Из приведенных обоснований следует, что задача ОМП в общем случае сводится к нахождению корней некоторой непрерывной функции, содержащей изломы и поэтому не имеющей единого аналитического выражения. Рассмотрим пути решения такой задачи.

Из математического определения следует, что функция $y(x)$ – это отображение множества значений y на соответствующее множество x . Применительно к рассматриваемой задаче множество проще всего представить в виде массива (т.е. таблицы) значений: $y \equiv \{y^{(1)} \dots y^{(i)} \dots y^{(m)}\}$, $x \equiv \{x^{(1)} \dots x^{(i)} \dots x^{(m)}\}$ (в круглых скобках сверху обозначен индекс). Очевидно, что базовые математические действия над функциями, такие как сложение, вычитание, умножение и деление, сводятся к поэлементному сложению, вычитанию, умножению и делению значений таблиц:

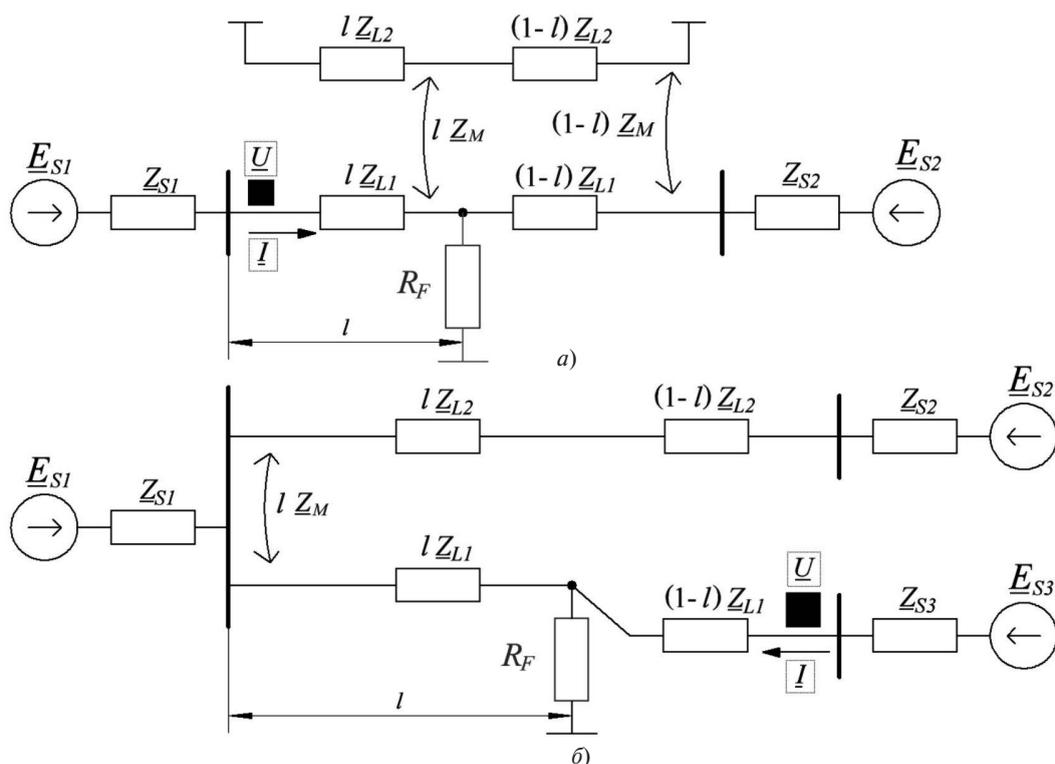


Рис. 4. Неконтролируемые контуры

$$y \equiv a + b \equiv \{a^{(1)} \dots a^{(i)} \dots a^{(m)}\} + \{b^{(1)} \dots b^{(i)} \dots b^{(m)}\} \equiv \quad (5)$$

$$\equiv \{a^{(1)} + b^{(1)} \dots a^{(i)} + b^{(i)} \dots a^{(m)} + b^{(m)}\};$$

$$y \equiv a - b \equiv \{a^{(1)} \dots a^{(i)} \dots a^{(m)}\} - \{b^{(1)} \dots b^{(i)} \dots b^{(m)}\} \equiv \quad (6)$$

$$\equiv \{a^{(1)} - b^{(1)} \dots a^{(i)} - b^{(i)} \dots a^{(m)} - b^{(m)}\};$$

$$y \equiv ab \equiv \{a^{(1)} \dots a^{(i)} \dots a^{(m)}\} \{b^{(1)} \dots b^{(i)} \dots b^{(m)}\} \equiv \quad (7)$$

$$\equiv \{a^{(1)} b^{(1)} \dots a^{(i)} b^{(i)} \dots a^{(m)} b^{(m)}\};$$

$$y \equiv a / b \equiv \{a^{(1)} \dots a^{(i)} \dots a^{(m)}\} / \{b^{(1)} \dots b^{(i)} \dots b^{(m)}\} \equiv \quad (8)$$

$$\equiv \{a^{(1)} / b^{(1)} \dots a^{(i)} / b^{(i)} \dots a^{(m)} / b^{(m)}\}.$$

Здесь и далее массив значений обозначается как таблица в фигурных скобках $\{\}$; знак \equiv (тождественно равно) – равенство массивов между собой, т.е. попарное равенство их элементов $a^{(i)} = b^{(i)}$ для всех i .

Поиск корней функции $y(x)=0$ при таком представлении сводится к поиску индекса i , для которого $y^{(i)} = 0$. По найденному индексу i далее определяется требуемый элемент $x^{(i)}$.

Отметим, что такой механизм поиска корня для непрерывной функции требует формирования бесконечно большой таблицы всех возможных значений y , что на практике нереализуемо. В табличном виде возможно задание набора дискретных значений непрерывной функции только на ограниченном интервале $\{x^{(1)} \dots x^{(m)}\}$.

Однако, если задать функцию $y(x)$ дискретно и аппроксимировать ее выражением $y(x) \approx y_{app}(x)$, то при достаточно большой частоте следования значений y можно на интервале $\{x^{(1)} \dots x^{(m)}\}$ свести поиск корней $y(x)$ к поиску корней $y_{app}(x)$ (рис. 5).

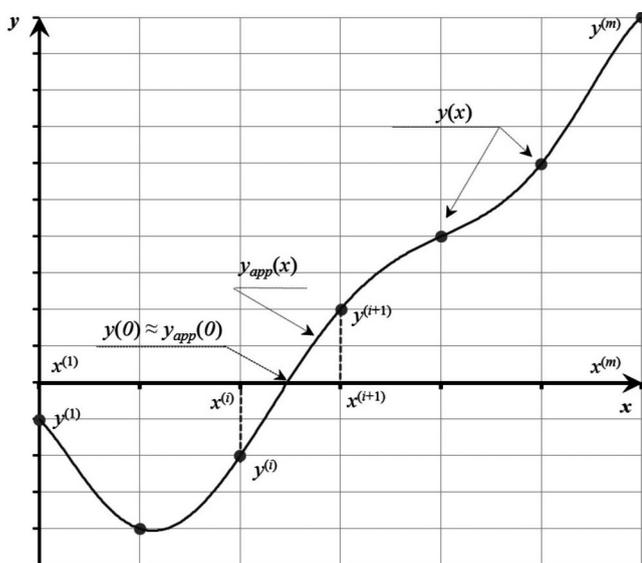


Рис. 5. Принцип поиска корня функции, заданной дискретными значениями

Такой подход целесообразен для функций, не имеющих единого аналитического выражения. При этом допустима кусочная аппроксимация функции с последующим расчетным нахождением корня для каждого из участков ее аппроксимации.

Наилучшим вариантом представляется использование кусочной интерполяции полиномом степени $n \leq 4$, поскольку при более высокой степени интерполяции аналитические выражения для поиска корней отсутствуют (теорема Абеля–Рурфини). Также отметим, что для предотвращения появления ложных корней $y_{app}(x)$ должна быть монотонной на интервале $\{x^{(i)} \dots x^{(i+1)}\}$, т.е. либо убывать, либо возрастать.

С учетом изложенного подходящими вариантами являются:

кусочно-линейная аппроксимация;

кусочно-кубическая аппроксимация монотонным Эрмитовым сплайном [7]; при этом корень уравнения 3-й степени определяется по формуле Кардано.

Вариант кусочно-линейной аппроксимации является наиболее простым, однако требует большой частоты следования точек измерения и, соответственно, большего числа экспериментов на имитационной модели. С учетом того, что имитационная модель сложного участка электрической сети может реализоваться достаточно медленно, более оптимальным видится вариант кусочно-кубической аппроксимации, позволяющий снизить требуемое число точек замера приблизительно в 2–3 раза.

Отметим, что при кусочной аппроксимации функции $y(x)$ на интервале $\{y_{app}^{(i)} \dots y_{app}^{(i+1)}\}$ действительным корнем будет только тот, который принадлежит интервалу $\{x^{(i)} \dots x^{(i+1)}\}$. Все остальные корни $y_{app}(x)$ являются ложными и к задаче ОМП отношения не имеют.

Аналитическое выражение для алгоритма ОМП.

Получим аналитическую зависимость расчетных соотношений для произвольного вида КЗ. На рис. 6 приведена схема замещения при одностороннем ОМП для n -проводной электрической сети, толстым штрихом отмечен массив линий, которые не контролируются по току и напряжению при одностороннем ОМП (например, отключенная и заземленная параллельная линия). Тонкими штриховыми линиями обозначено множество промежуточных линий (контролируемые линии выделены).

Наиболее универсальным способом описания указанного набора линий является представление их в виде многополюсника. Как известно, существуют следующие формы его представления: A, B, Z, Y, H и G [8].

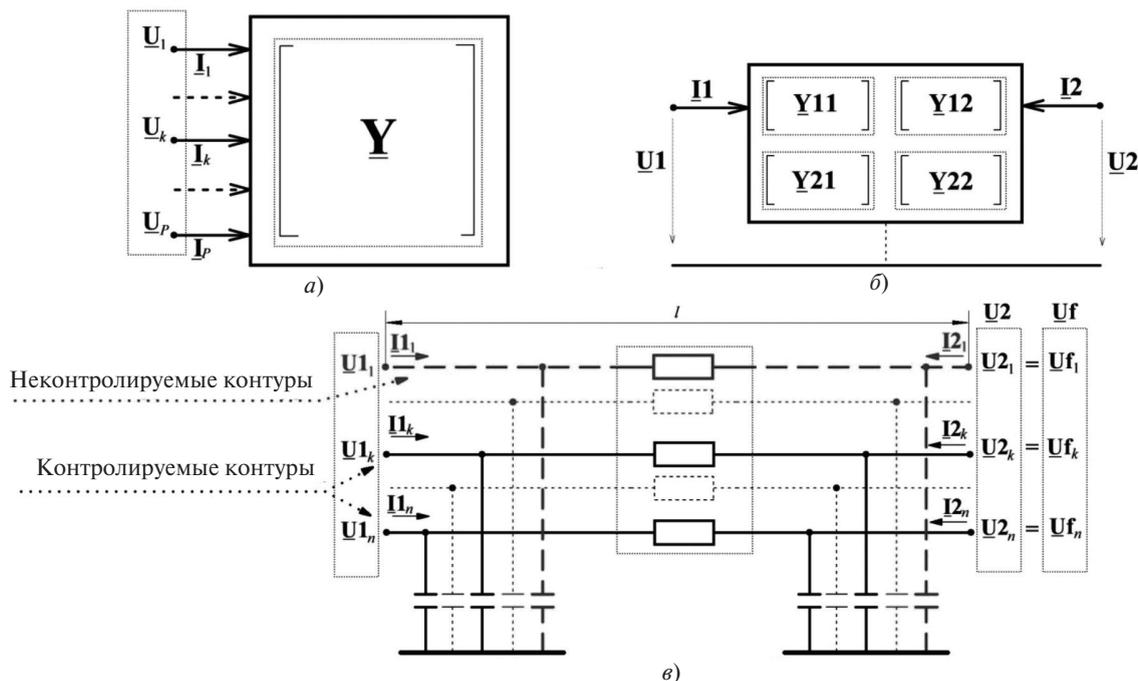


Рис. 6. Поясняющая схема для формирования выражений одностороннего алгоритма ОМП: а – общее представление многополюсника; б – многополюсник с четным числом полюсов; в – соответствие релейной схеме

Для рассматриваемой задачи наиболее удобно использовать так называемые Y -параметры, т.е. представление многополюсника в виде матрицы (рис. 6):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \dots \\ \underline{I}_k \\ \dots \\ \underline{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}^{(l)}_{11} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{1k} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Y}^{(l)}_{k1} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{kk} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Y}^{(l)}_{p1} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{pk} & \dots & \underline{Y}^{(l)}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \dots \\ \underline{U}_k \\ \dots \\ \underline{U}_p \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где p – число полюсов.

Каждый коэффициент $\underline{Y}^{(l)}_{ij}$ представляется в виде таблицы значений:

$$\underline{Y}_{ij} \equiv \underbrace{\{Y_{ij}^{(1)} \dots Y_{ij}^{(k)} \dots Y_{ij}^{(m)}\}}_{m \text{ элементов}} \quad (10)$$

соответствующей таблице расстояний, задаваемых перед расчетом:

$$l \equiv \underbrace{\{l^{(1)} \dots l^{(k)} \dots l^{(m)}\}}_{m \text{ элементов}} \quad (11)$$

Здесь m – число точек линии электропередачи, в которых были проведены измерения с применением имитационной модели участка электрической сети.

Для каждой $l^{(k)}$ из массива (11) формируется посредством моделирования соответствующее значение функции $Y_{ij}^{(k)}$. Эти значения функции сво-

дятся в массив (10); таким образом функция $\underline{Y}_{ij}(l)$ задается в табличной форме. Если для упрощений допустить, что все \underline{Y}_{ij} действительные, тогда по табличным значениям (10) и (11) можно построить график, аналогичный рис. 5.

Следует отметить, что наряду с $\underline{Y}_{ij}(l)$ в дальнейших расчетах участвует еще ряд требуемых для ОМП параметров, зависящих от l . Эти параметры целесообразно также задать в виде массивов (в табличной форме). Дальнейшие математические преобразования базируются на операциях с такими массивами и основываются на выражениях (5)–(8).

При формировании расчетных соотношений учтем, что рассматривается набор параллельных линий электропередачи, каждая из них имеет два конца, поэтому число полюсов является четным. Обозначим как $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_1, \underline{I}_2$ напряжения и токи по концам линии. В этом случае уравнения многополюсника с четным числом полюсов можно уподобить уравнениям четырехполюсника. Для этого составим систему уравнений в Y -параметрах таким образом, чтобы ее можно было разбить на четыре равные части в соответствии с рис. 6,б:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}(l) & \underline{Y}_{12}(l) \\ \underline{Y}_{21}(l) & \underline{Y}_{22}(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Такое разбиение при реализации процедуры ОМП необходимо для разделения известных и неизвестных величин. В случае одностороннего ОМП известными (измеряемыми) величинами являются напряжение \underline{U}_1 и ток \underline{I}_1 одного конца линии. Век-

тор напряжений \underline{U}_2 состоит из напряжений в месте повреждения, они могут быть определены для поврежденных фаз, если вид КЗ известен. Таким образом, основываясь на векторных величинах $\underline{U}_1, \underline{I}, \underline{U}_2$, можно получить из (12) следующее матричное уравнение:

$$\underline{I} = \underline{Y}_{11}(l)\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}(l)\underline{U}_2, \quad (13)$$

отсюда

$$\underline{Y}_{12}(l)^{-1}\underline{I} - \underline{Y}_{12}(l)^{-1}\underline{Y}_{11}(l)\underline{U}_1 = \underline{U}_2. \quad (14)$$

В сокращенной форме, обозначая левую часть выражения как $\underline{C}(l)$, а правую – как $\underline{U}f$, получаем:

$$\underline{C}(l) = \underline{U}f \quad (15)$$

или в расширенном представлении

$$\begin{bmatrix} \underline{C}(l)_1 \\ \vdots \\ \underline{C}(l)_k \\ \vdots \\ \underline{C}(l)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}f_1 \\ \vdots \\ \underline{U}f_k \\ \vdots \\ \underline{U}f_n \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Отметим, что токи и напряжения, используемые при вычислении $\underline{C}(l)$, строго говоря, также зависят от l , так как часть контуров являются неконтролируемыми. В них токи и напряжения находятся через коэффициенты токо- и напряжения-распределения.

Учет неконтролируемых контуров. Обозначим как $\underline{KU}(l)_j, \underline{KI}(l)_j$ коэффициенты токо- и напряжения-распределения между k -м контролируемым и j -м неконтролируемым контурами. Значения коэффициентов $\underline{KU}(l)_j, \underline{KI}(l)_j$ можно получить при применении имитационного моделирования для каждой точки массива (11). Совокупность значений для каждого из коэффициентов представим в табличной форме:

$$\underline{KU}(l)_j \equiv \{\underline{KU}_j^{(1)} \dots \underline{KU}_j^{(k)} \dots \underline{KU}_j^{(m)}\}; \quad (17)$$

$$\underline{KI}(l)_j \equiv \{\underline{KI}_j^{(1)} \dots \underline{KI}_j^{(k)} \dots \underline{KI}_j^{(m)}\}. \quad (18)$$

Напряжения и токи в неконтролируемых контурах могут быть определены из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \underline{U}(l)_j &\equiv \underline{U}_j^{\text{ав}} + \underline{U}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KU}(l)_j \underline{U}_k + \underline{U}_j^{\text{доав}} \equiv \\ &\equiv \{\underline{KU}_j^{(1)} \underline{U}_k^{\text{ав}} + \underline{U}_j^{\text{доав}} \dots \underline{KU}_j^{(k)} \underline{U}_k^{\text{ав}} + \underline{U}_j^{\text{доав}} \dots \\ &\dots \underline{KU}_j^{(m)} \underline{U}_k^{\text{ав}} + \underline{U}_j^{\text{доав}}\}; \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}(l)_j &\equiv \underline{I}_j^{\text{ав}} + \underline{I}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KI}(l)_j \underline{I}_k + \underline{I}_j^{\text{доав}} \equiv \\ &\equiv \{\underline{KI}_j^{(1)} \underline{I}_k^{\text{ав}} + \underline{I}_j^{\text{доав}} \dots \underline{KI}_j^{(k)} \underline{I}_k^{\text{ав}} + \underline{I}_j^{\text{доав}} \dots \\ &\dots \underline{KI}_j^{(m)} \underline{I}_k^{\text{ав}} + \underline{I}_j^{\text{доав}}\}. \quad (20) \end{aligned}$$

Напряжения и токи в контролируемых контурах при расчетах задаются массивами (табличными значениями) одинаковой длины m , при этом учет контролируемых и неконтролируемых контуров происходил одинаково:

$$\underline{U}(l)_k \equiv \underbrace{\{1 \dots 1 \dots 1\}}_{m \text{ элементов}} \equiv \underline{U}_k \underbrace{\{\underline{U}_k \dots \underline{U}_k \dots \underline{U}_k\}}_{m \text{ элементов}}; \quad (21)$$

$$\underline{I}(l)_k \equiv \underbrace{\{1 \dots 1 \dots 1\}}_{m \text{ элементов}} \equiv \underline{I}_k \underbrace{\{\underline{I}_k \dots \underline{I}_k \dots \underline{I}_k\}}_{m \text{ элементов}}. \quad (22)$$

Величины $\underline{U}_k, \underline{I}_k$ известны и могут быть получены из аварийных осциллограмм. Доаварийный ток и напряжение $\underline{U}^{\text{доав}}, \underline{I}^{\text{доав}}$ задаются приближенно и заблаговременно перед расчетом. Допустимо принять $\underline{I}^{\text{доав}} = 0, \underline{U}^{\text{доав}} = 0$ для заземленной по концам параллельной линии (рис. 4,а), $\underline{U}^{\text{доав}} = U_{\text{ном}}$ для прочих случаев, соответствующих рис. 4,б.

Компенсация переходного сопротивления. Отметим, что с учетом приведенного значение

$$\underline{C}(l)_k \equiv \underbrace{\{\underline{C}_k^{(1)} \dots \underline{C}_k^{(k)} \dots \underline{C}_k^{(m)}\}}_{m \text{ элементов}} \quad (23)$$

также представляет собой функцию в табличной форме.

Рассмотрим анализируемую ранее схему с одним источником ЭДС, в которой отношение токов в двух ветвях от значения ЭДС не зависит. Отношение

$$\underline{K}_T(l) \equiv \frac{\underline{I}f(l)}{\underline{I}_{\text{оп}}^{\text{ав}}(l)} \equiv \{\underline{K}_T^{(1)} \dots \underline{K}_T^{(k)} \dots \underline{K}_T^{(m)}\} \quad (24)$$

называется коэффициентом токораспределения.

Значения $\underline{I}f, \underline{I}_{\text{оп}}^{\text{ав}}$ выражаются через соответствующие фазные токи в месте повреждения и в месте установки защиты:

однофазное КЗ i -й фазы:

$$\underline{C} = \underline{C}_i; \underline{I}_{\text{оп}} = \underline{I}_i^{\text{ав}}; \underline{K}_T = \underline{I}_i^{\text{ав}} / \underline{I}_{fi};$$

КЗ между фазами i и j (двухфазное, трехфазное, двухфазное на землю):

$$\underline{C} = \underline{C}_i - \underline{C}_j; \underline{I}_{\text{оп}} = \underline{I}_i^{\text{ав}} - \underline{I}_j^{\text{ав}}; \underline{K}_T = \frac{\underline{I}_i^{\text{ав}} - \underline{I}_j^{\text{ав}}}{\underline{I}_{fi} - \underline{I}_{fj}}.$$

Из выражения (23) следует, что при однофазном замыкании i -й фазы

$$\underline{C}(l)_i \equiv \underbrace{\{ \underline{C}_i^{(1)} \dots \underline{C}_i^{(k)} \dots \underline{C}_i^{(m)} \}}_{m \text{ элементов}} = \underline{U}f_i = Rf \underline{I}f_i. \quad (25)$$

При КЗ между фазами i и j следует использовать разность

$$\begin{aligned} & \{ \underline{C}_{i1} \dots \underline{C}_{ik} \dots \underline{C}_{in} \} - \{ \underline{C}_{j1} \dots \underline{C}_{jk} \dots \underline{C}_{jn} \} \equiv \\ & \equiv \{ \underline{C}_{i1} - \underline{C}_{j1} \dots \underline{C}_{ik} - \underline{C}_{jk} \dots \underline{C}_{in} - \underline{C}_{jn} \} = \\ & = \underline{U}f_i - \underline{U}f_j = Rf(\underline{I}f_i - \underline{I}f_j). \end{aligned} \quad (26)$$

Анализ равенств (25) и (26) показывает, что все виды повреждения сводятся к одному и тому же выражению:

$$\underline{C} \equiv \{ \underline{C}^{(1)} \dots \underline{C}^{(k)} \dots \underline{C}^{(m)} \} \equiv Rf \underline{I}f. \quad (27)$$

Учтем, что $\underline{I}f = \underline{K}_T(l) \underline{I}_{оп}$ и что переходное сопротивление Rf является чисто активным:

$$\frac{\underline{C}}{\underline{K}_T(l) \underline{I}_{оп}^{аб}} = Rf \Rightarrow \text{Im} \left(\frac{\underline{C}}{\underline{K}_T(l) \underline{I}_{оп}^{аб}} \right) = 0. \quad (28)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} H(l) \equiv \text{Im} \left(\frac{\underline{C}}{\underline{K}_T(l) \underline{I}_{оп}^{аб}} \right) \equiv & \left\{ \text{Im} \left(\frac{\underline{C}^{(1)}}{\underline{K}_T^{(1)} \underline{I}_{оп}^{аб}} \right) \dots \right. \\ & \left. \dots \text{Im} \left(\frac{\underline{C}^{(k)}}{\underline{K}_T^{(k)} \underline{I}_{оп}^{аб}} \right) \dots \text{Im} \left(\frac{\underline{C}^{(m)}}{\underline{K}_T^{(m)} \underline{I}_{оп}^{аб}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (29)$$

тогда задача ОМП сведется к поиску такого l , для которого $H(l) = 0$ (рис. 7).

Расчетные соотношения: однофазное КЗ i -й фазы: $\underline{C} = \underline{C}_i$; $\underline{I}_{оп} = \underline{I}_i^{аб}$; $\underline{K}_T = \underline{I}_i^{аб} / \underline{I}f_i$; КЗ между фазами i и j (двухфазное, трехфазное, двухфазное на землю): $\underline{C} = \underline{C}_i - \underline{C}_j$; $\underline{I}_{оп} = \underline{I}_i^{аб} - \underline{I}_j^{аб}$; $\underline{K}_T = (\underline{I}_i^{аб} - \underline{I}_j^{аб}) / (\underline{I}f_i - \underline{I}f_j)$.

Определение удельных параметров сети. Очевидно, что для определения Y -параметров электриче-

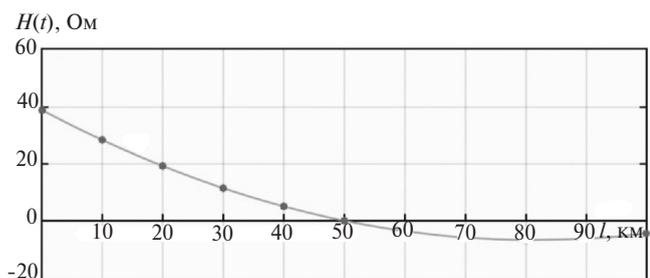


Рис. 7. Зависимость функции $H(l)$ для примера рис. 10

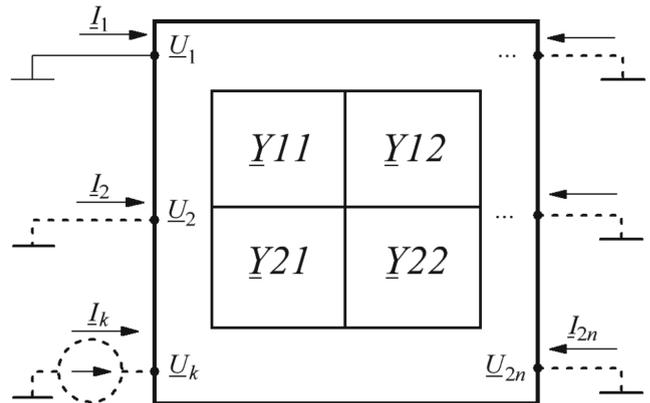


Рис. 8. Схема тестов многополюсника в Y -параметрах

ской сети наиболее простым образом необходимо (рис. 8):

заземлить все полюсы, кроме одного (k -го); тем самым все напряжения полюсов, кроме одного (\underline{U}_k), становятся равными нулю;

через незаземленный полюс подать питание и измерить все выходные токи $\underline{I}_1 \dots \underline{I}_n$;

определить коэффициенты для k -го столбца:

$$\underline{Y}_{-ik} = \frac{\underline{I}_i}{\underline{U}_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (30)$$

Применение Y -параметров целесообразно потому, что при их использовании отсутствует проблема деления на ноль, если какой-то узел оказался отделенным от источника питания.

Полученные значения матрицы \underline{Y} для каждой точки защищаемой линии записываются в базу данных. Теоретически замеры удельных параметров сети указанным методом можно реализовать сразу для всех видов КЗ на всех линиях. При этом весь блок взаимоиндуцирующих параллельных линий делится на две половины (рис. 9). Каждая половина эквивалентуруется многополюсником в Y -параметрах. В ходе определения удельных параметров рассчитываются $\underline{Y}(l)$ для одной из частей блока параллельных линий.

Однако при адаптации алгоритма под произвольную электрическую сеть возникает проблема правильного учета взаимоиндукций между разными линиями. Используемый в алгоритме ОМП расчетный блок рис. 6 может быть скомпонован из произвольных линий электропередачи, в том числе тех, которые взаимоиндуцируют только несколькими участками или не имеют индуктивных связей вовсе. Деление на две части такого блока требует сложного алгоритма, предполагающего анализ структуры магнитных связей электрической сети. Альтернативным вариантом является деление на две части только поврежденных фазных проводов «своей» линии. Все прочие проводники на части не делятся, и точки измерения в них расположены по концам возле шин (рис. 9).

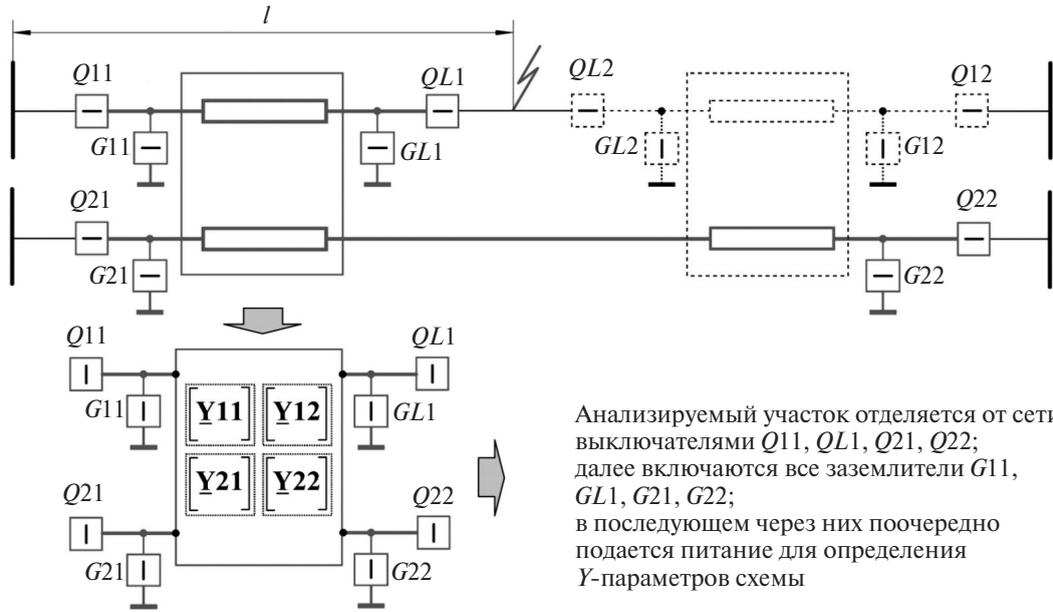


Рис. 9. Пояснения к принципам разделения блока линий для определения удельных параметров (сплошной линией показан анализируемый участок сети)

Коэффициенты токораспределения вычисляются для каждого вида КЗ и каждого сочетания поврежденных фаз отдельно. Конечные результаты расчетов представляют собой зависимости $\underline{Y}(l)$, $\underline{Kf}(l)$, $\underline{KU}(l)_j$, $\underline{KI}(l)_j$ в виде массива то-

чек. Совокупность указанных массивов является своеобразной «установкой» алгоритма ОМП.

Анализ функционирования алгоритма ОМП. Для анализа возможностей разработанного алгоритма ОМП рассмотрим иллюстративный пример, имею-

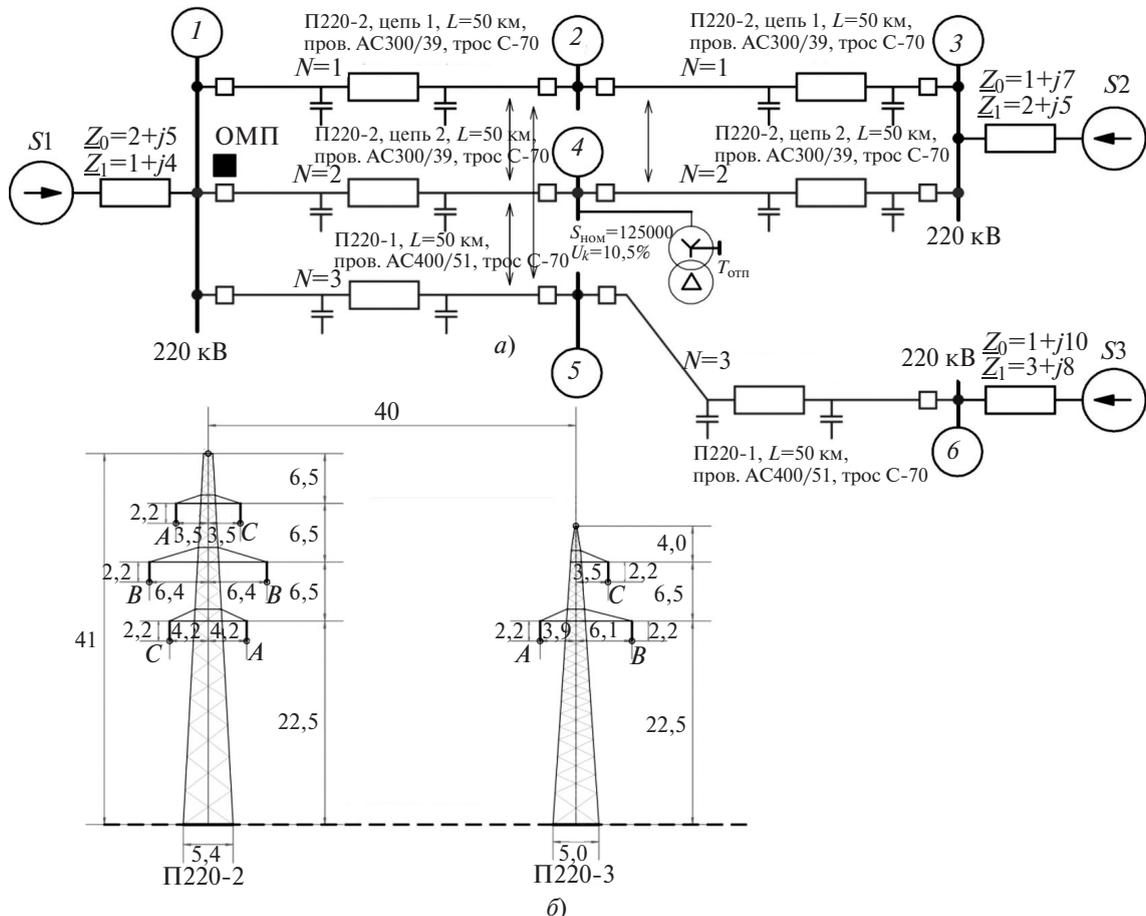


Рис. 10. Модель участка сети 220 кВ для проверки алгоритма ОМП: а – схема сети; б – схема опор (расстояние в метрах)

ший схемное решение рис. 10. Условно отключим и заземлим линию с порядковым номером $N=1$.

Таким образом, в рассматриваемой сети (рис. 10) будут присутствовать: ответвление; неконтролируемый контур; линия, взаимоиндуктирующая с защищаемой не по всей длине; переходное сопротивление и нагрузочный режим, т.е. все факторы, которые в более простых алгоритмах могут вносить методическую погрешность.

Ниже приведены результаты расчетных имитационных экспериментов для разработанного алгоритма ОМП, а также для сравнения показаны результаты их имитационного моделирования применительно к сети рис. 10, исключив в настройках алгоритма необходимость учета ответвления и неконтролируемого контура (н/д – нет данных; для алгоритма не была получена точка КЗ):

Замыкание $A0$, $R_f = 10$ Ом:

$l_{ист}$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$l_{зам}$	0,99899	9,99998	19,99991	29,99980	39,99972	49,99946	59,99918	69,99844	79,99646	91,13725	98,98805
δ , %	0,10077	0,00023	0,00043	0,00067	0,00070	0,00108	0,00137	0,00223	0,00443	1,26361	0,01207

Замыкание AB , $R_f = 10$ Ом:

$l_{ист}$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$l_{зам}$	1,00988	10,01479	20,02046	30,02802	40,03849	50,05364	60,07460	70,10919	80,17208	90,29711	99,37128
δ , %	0,98769	0,14787	0,10232	0,09340	0,09623	0,10728	0,12434	0,15598	0,21510	0,33012	0,37503

Замыкание $A0$, $R_f = 10$ Ом:

$l_{ист}$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$l_{зам}$	0,99755	10,04247	20,23464	30,6975	41,84869	53,29144	62,85531	74,35924	86,52269	н/д	н/д
δ , %	0,24502	0,42474	1,17321	2,32500	4,62173	6,58288	4,75885	6,22748	8,15336	н/д	н/д

Замыкание AB , $R_f = 10$ Ом:

$l_{ист}$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$l_{зам}$	1,00665	10,01136	20,01637	30,02261	40,03033	50,04047	60,06131	70,08933	80,13917	90,23648	99,28696
δ , %	0,66497	0,11362	0,08186	0,07537	0,07582	0,08094	0,10218	0,12761	0,17396	0,26275	0,28986

Как можно видеть из анализа приведенных данных, алгоритм обеспечивает малую методическую погрешность в сети со сложной конфигурацией. В большинстве случаев она составляет сотые и тысячные доли процента и лишь в редких случаях достигает 1%.

Анализ реализации алгоритма ОМП с использованием осциллограмм аварийных событий. Цель анализа – получение характеристик точности алгоритма ОМП при использовании осциллограмм аварийных событий для реальных повреждений в электрических сетях. Большое значение на практике имеет точность задания параметров модели: сопротивлений систем по концам, удельных параметров линии, правильность разбиения ее на участки. Также значительный прирост точности можно по-

лучить привлечением статистической информации, уточнением параметров модели по результатам реальных КЗ и опытным замером реального сопротивления линии [9, 10].

Наиболее существенную роль в формировании погрешности одностороннего ОМП играет, видимо, неточный учет фазы тока в переходном сопротивлении. На примере рис. 2,а запишем коэффициент токораспределения:

$$\underline{K}(l) = \frac{\underline{I}_F}{\underline{I}_{ав}} = \frac{\underline{Z}_{s1} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{s2}}{(1-l)\underline{Z}_L + \underline{Z}_{s2}}. \quad (32)$$

Обозначим $\underline{K}_{рас} = \underline{K}de^{j\delta}$ – коэффициент токораспределения, полученный расчетом на модели; \underline{K} – реальный коэффициент; $de^{j\delta}$ – угловая погреш-

ность, возникшая из-за неточного знания сопротивлений реальной сети.

Тогда расчетное расстояние

$$l_{рас} = \text{Im} \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_{-1}^{ав} \underline{K}_{рас}} \right) / \text{Im} \left(\frac{\underline{Z}_L \underline{I}_1}{\underline{I}_{-1}^{ав} \underline{K}_{рас}} \right) =$$

$$= l - \frac{R_F / d \sin \delta}{\text{Im} \left(\frac{\underline{Z}_L \underline{I}_1}{\underline{I}_{-1}^{ав} \underline{K}_{рас}} \right)}. \quad (33)$$

Видно, что при большом значении R_F даже небольшая угловая погрешность может существенно

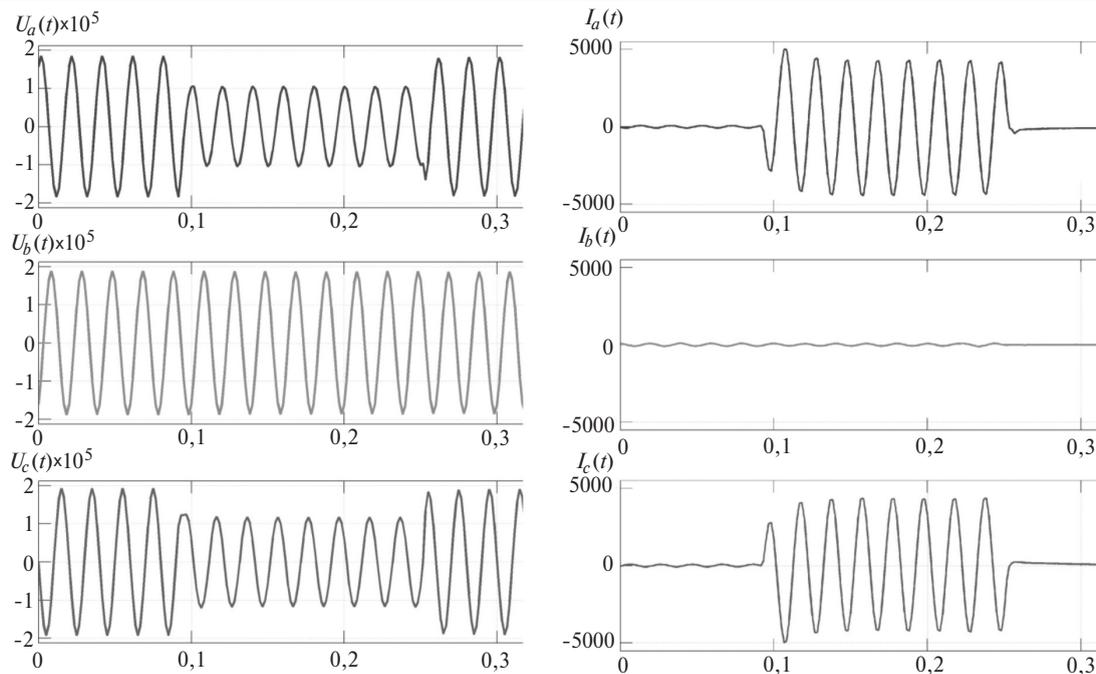


Рис. 11. Осциллограмма КЗ на ВЛ 220 кВ Семеновская–Рыжково–Мантурово (22.08.2016)

повлиять на результаты ОМП. Одной из причин возникновения такой ситуации может быть неточное значение сопротивления системы \underline{Z}_{s2} на противоположном конце.

Указанная особенность присутствует только на линиях с двусторонним питанием. Для одностороннего питания токи в месте установки устройства ОМП и в точке КЗ равны, поэтому погрешность от переходного сопротивления можно скомпенсировать полностью.

Режим одностороннего питания на произвольной линии электропередачи также возникает при опробовании и неуспешном АПВ, так как концы линии никогда не включаются одновременно. В этом случае алгоритм одностороннего ОМП способен функционировать существенно точнее. Однако, как показывает анализ таблицы при неуспешном АПВ ОМП обеспечивает достаточную точность, только если за время бестоковой паузы переходное сопротивление не успело сильно измениться (например, из-за перегорания ветки дерева или деионизации дуги).

Для анализа точности предложенного алгоритма ОМП проводились расчеты с использованием осциллограмм (рис. 11) повреждения на ВЛ 220 кВ Семеновская–Рыжково–Мантурово (с ответвлением) филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Нижегородского ПМЭС. Результаты расчета приведены в таблице. Для сравнения приведены результаты классического одностороннего ОМП [1] по упрощенной формуле (3) без учета ответвления.

Как можно видеть из таблицы, предложенный алгоритм ОМП для произвольной электрической сети с высокой точностью определяет расстояние до места повреждения при правильно заданных параметрах модели.

Выводы. 1. Разработан высокоточный алгоритм одностороннего ОМП, который позволяет адаптироваться к сети произвольной конфигурации. Основа формирования алгоритма – использование принципа наложения.

2. Результаты имитационного моделирования и расчеты с использованием реальных осциллограмм аварийных событий показали, что методическая погрешность алгоритма ОМП составляет доли и

Номер	Дата	Время	Вид	L_f , км	$L_{ист}$, км	δ , %	$L_{класс}$, км	$\delta_{класс}$, %	Оценка R_f , Ом
Со стороны ПС 220 кВ «Семеновская»									
1	27/03/2016	11:48	AB0	81,4	81,1	0,4	94,0	8,2	84,7334
2	22/08/2016	06:45	CA	31,6	30	5,3	32,3	10,0	1,5713
3	04/07/2016	20:43	CA0	161,8	161,64	0,1	158,2	2,2	1,8508
Со стороны ПС 220 кВ «Мантурово»									
1	04/06/2015	14:04	CA	86,8	84,74	2,4	90,0	7,0	1,0045
2	22/08/2016	05:41	CA	158,1	153,1	3,3	164,0	6,0	1,261

единицы процентов длины линии электропередачи. При использовании алгоритма ОМП требуется внесение в память устройства для его реализации параметров схемы замещения электрической сети.

3. Целесообразно применение разработанного алгоритма ОМП на линиях с односторонним питанием, а также при АПВ на линиях с двусторонним питанием и опробовании включения линии электропередачи. Наибольшая точность ОМП достигается при относительно небольшом значении расчетного переходного сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи/Под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003, 272 с.
2. Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: Учебное пос. Ч. 1. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2001, 188 с.
3. Устинов А.А., Висящев А.Н. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи. — Вестник ИргТУ, 2010, № 5, с. 260–265.
4. Лямец Ю.Я., Климатова И.С. Алгоритмическое моделирование в задаче определения места повреждения в линиях электропередачи. — Вестник Чувашского университета, 2007, № 2, с. 147–152.
5. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010, 437 p.
6. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992, 528 с.
7. Fritsch F.N., Carlson R.E. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation. — SIAM Journal on Numerical Analysis, 1980, No. 2(17), pp. 238–246.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. М.: Гардарики, 2007, 701 с.

9. Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов. — Энергетик, 2012, № 1, с. 7–9.

10. Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи. — Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 5, с. 57–62.

[31.10.2018]

А в т о р ы: Колобанов Петр Алексеевич окончил в 2012 г. Нижегородский государственный технический университет (НГТУ им. Р.Е. Алексеева). Ведущий инженер отдела релейной защиты ООО «ЭС-Проект».

Куликов Александр Леонидович окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО им. Говорова Л.А. в 1992 г. Докторскую диссертацию «Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов» защитил в 2007 г. Профессор кафедры «Электроэнергетика, электрооборудование и силовая электроника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Обалин Михаил Дмитриевич окончил в 2011 г. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Кандидатскую диссертацию «Применение имитационного моделирования для адаптации алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима» защитил в 2016 г. Диспетчер Центра управления сетями Нижегородского предприятия магистральных сетей.

Achieving More Exact Unilateral Fault Location in an Arbitrarily Configured Electric Network

KOLOBANOV Piter A. (LLC «ETS-Proyekt», Nizhniy Novgorod, Russia) — *Leading Engineer*

KULIKOV Alexandr L. (Nizhnii Novgorod State Technical University, Nizhniy Novgorod, Russia) — *Professor of the Department, Dr. Sci. (Eng.)*

OBALIN Mikhail D. (Nizhnii Novgorod Enterprise of Bus Network, Nizhnii Novgorod, Russia) — *Controller of Management Center by Network, Cand. Sci (Eng.)*

For clearing faults in power lines, the fault location procedure (FLP) is carried out. Unilateral FLP based on the power frequency current and voltage components is considered. The existing calculation expressions for carrying out power line FLP are often applicable only for partial network configuration cases, and attempts to apply them for other cases result yield results containing a methodical error. A general fault location algorithm in which the superposition principle is used has been developed. A technique for compensating the effect of contact impedance based on the superposition principle is considered. A calculation expression for unilateral fault location written in the phase coordinates for an arbitrarily configured electric network is derived. The results from simulation experiments and calculations

carried out using real time histories of emergency events have shown that the proposed method ensures high accuracy. Recommendation sonusing the developed method are given.

Key words: power lines, fault place, fault location, algorithm

REFERENCES

1. **Arzhannikov Ye.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikhanov M.Sh.** *Opreleniye mesta korotkogo zamykaniya na vysokovol'nykh liniyakh elektroperedachi* (Location of short circuit on the lines of electricity transmission)/Edit. by V.F. Shuin. Moscow, Energoatomizdat, 2003, 272 p.
2. **Visyashchev A.N.** *Pribory i metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi* (Devices and methods of location of damage on the lines of electricity transmission). Irkutsk, Publ. Irkutsk State Techn. University, 2001, 188 p.
3. **Ustinov A.A. and Visyashchev A.N.** *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo technicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of Irkutsk State Technical University)*, 2010, No. 5, pp. 260–265.
4. **Lyamets Yu.Ya., Klimatova I.S.** *Vestnik Chuvashskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of yhe Chuvash University)*, 2007, No. 2, pp. 147–152.
5. **Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E.** *Fault Location on Power Networks*. London: Springer, 2010, 437 p.
6. **Fedosyeyev A.M., Fedosyeyev M.A.** *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* (Relay defence of the electroenergy systems). Moscow, Energoatomizdat, 1992, 528 p.
7. **Fritsch F.N., Carlson R.E. Fritsch F.N., Carlson R.E.** *Monotone Piecewise Cubic Interpolation.* – SIAM Journal on Numerical Analysis, 1980, No. 2 (17), pp. 238–246.
8. **Bessonov L.A.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki: elektricheskkiye tsepi* (Theoretical principles of electrical engineering. Electric circuits). Moscow, Gardariki, 2007, 701 p.
9. **Kulikov A.L., Obalin M.D., Kolobanov P.A.** *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2012, No. 1, pp. 7–9.
10. **Kulikov A.L., Obalin M.D., Kolobanov P.A.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of higher educational institutions. Electromechanics)*, 2013, No. 5, pp. 57–62.

[31.10.2018]