УДК: 621.3.064.1

МЕТОД РЕАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СЛОЖНО-ЗАМКНУТЫХ СЕТЯХ

Е.В. Лесных, Н.С. Бурянина

В статье рассмотрен метод реальных параметров для составления универсальных программ расчета токов коротких замыканий сложно-замкнутых сетей, особенно с разными коэффициентами трансформации в неоднородных кольцах, который достаточно просто реализуется в системе MATHCAD.

Ключевые слова: линия электропередачи, трансформатор, схема замещения, токи короткого замыкания, метод реальных параметров.

Повсеместно применяемые методы расчета токов короткого замыкания (КЗ) в именованных и относительных единицах имеют существенные недостатки:

- необходимо приводить параметры к одному напряжению при расчете в именованных единицах;
- если имеется замкнутые неоднородные контуры с разными коэффициентами трансформации, точно выполнить расчет вообще невозможно, так как непонятно к какому базисному напряжению приводить параметры сети.

Для расчета режимов КЗ предлагается использовать метод, который предварительно назван методом реальных параметров. Метод применим при использовании вычислительной техники.

Рассмотрим уравнения узловых напряжений в матричной форме. Токи и напряжения в узлах связаны уравнением:

$$|I| = |Y| \cdot |U| \qquad (1)$$

где $|\mathbf{I}|$, $|\mathbf{U}|$ – матрицы-векторы напряжений в узлах и токов нагрузок схемы рассчитываемой сети, $|\mathbf{Y}|$ – квадратная матрица проводимостей схемы.

Рассмотрим электрическую сеть, изображенную на рисунке 1.

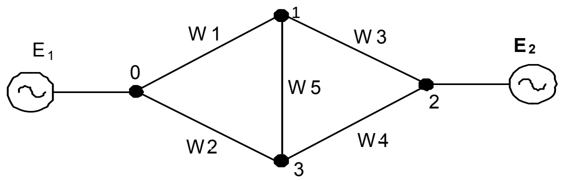

Рисунок 1 – Электрическая сеть

Схема замещения данной сети приведена на рисунке 2. В нее входят П-образные схемы замещения пяти линий и двух электрических систем с ЭДС E_1 и E_2 (полностью приведена схема замещения только линии, включенной между узлами 2 и 3),

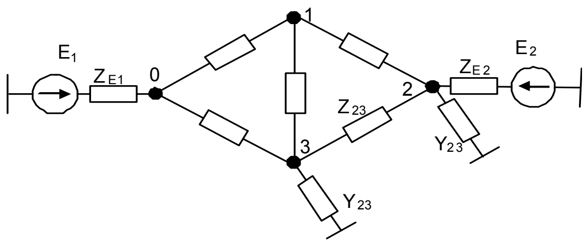

Рисунок 2 – Схема замещения

где $\mathbf{Y_{ij}}$ –поперечная проводимость П-образной схемы замещения линии; $\mathbf{Z_{ij}}$ – ее продольное сопротивление.

Уравнение узловых напряжений в матричной форме будут иметь вид:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_{E1}} + \underline{Y}_{01} + \underline{Y}_{03} + \frac{1}{\underline{Z}_{01}} + \frac{1}{\underline{Z}_{03}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{01}} & 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{03}} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_{01}} & \underline{Y}_{01} + \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{13} + \frac{1}{\underline{Z}_{01}} + \frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{13}} \\ 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & \frac{1}{\underline{Z}_{E2}} + \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{23} + \frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{23}} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_{03}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{23}} & \underline{Y}_{03} + \underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{23} + \frac{1}{\underline{Z}_{03}} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\dot{E}_1}{\underline{Z}_{E1}} \\ 0 \\ \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}_{E2}} \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$
|Y| = \begin{vmatrix}
\frac{1}{\underline{Z}_{E1}} + \underline{Y}_{01} + \underline{Y}_{03} + \frac{1}{\underline{Z}_{01}} + \frac{1}{\underline{Z}_{03}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{01}} & 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{03}} \\
-\frac{1}{\underline{Z}_{01}} & \underline{Y}_{01} + \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{13} + \frac{1}{\underline{Z}_{01}} + \frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{13}} \\
0 & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & \frac{1}{\underline{Z}_{E2}} + \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{23} + \frac{1}{\underline{Z}_{12}} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{23}} \\
-\frac{1}{\underline{Z}_{03}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{12}} & -\frac{1}{\underline{Z}_{23}} & \underline{Y}_{03} + \underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{23} + \frac{1}{\underline{Z}_{03}} + \frac{1}{\underline{Z}_{13}} + \frac{1}{\underline{Z}_{23}}
\end{vmatrix}
$$

$$
|U| = \begin{vmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{vmatrix} \qquad |I| = \cdot \begin{vmatrix} \frac{\dot{E}_1}{\underline{Z}_{E1}} \\ 0 \\ \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}_{E2}} \\ 0 \end{vmatrix}
$$

Трехфазное короткое замыкание задается проводимостью на несколько порядков большей максимальной проводимости схемы замещения сети. Если максимальная проводимость в схеме замещения находится в пределах 10 См, то проводимость ветви КЗ $Y_{КЗ}$ можно принять равной 10^5 См. Проводимость ветви КЗ прибавляется к собственной проводимости узла матрицы Y. Например, при коротком замыкании в узле 1 диагональный член матрицы Y - Y_{11} записывается как

$$
Y_{01} + Y_{12} + Y_{13} + \frac{1}{Z_{01}} + \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{13}} + Y_{КЗ}
$$

Напряжения в узлах находятся решением уравнения (1):

$$
|U| = |Y|^{-1} \cdot |I| \tag{2}
$$

Перенос короткого замыкания в другой узел сводится к переносу проводимости короткого замыкания в другой диагональный элемент.

Ток короткого замыкания определяется через произведение напряжения в узле с коротким замыканием на проводимость ветви короткого замыкания:

$$
\dot{I}_{кз} = \frac{\dot{U}_{кз} \cdot Y_{кз}}{\sqrt{3}} \tag{3}
$$

При задании напряжений в кВ, сопротивлений в Ом токи получаются в кА.

Рассмотрим, как определяются токи в ветвях. Если ветвь, включенная между узлами i и j, задана продольным сопротивлением, то протекающий по ней ток из узла i определяется по формуле:

$$
\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{ij}} \tag{4}
$$

Если ветвь задана П-образной схемой замещения, используется формула:

$$
\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{ij}} + \dot{U}_i \cdot Y_i \tag{5}
$$

где Y_i – поперечная проводимость ветви в узле i.

Нетрудно заметить, что уравнения (1) и (2) применительно к приведенному примеру можно использовать и при расчете токов КЗ именованными и относительными единицами. В рассмотренном примере вся сеть одного номинального напряжения. Преимуществ метода реальных параметров здесь нет, они появляются, если рассчитывается неоднородная сеть с разными номинальными напряжениями на отдельных участках. Связь между сетями разных напряжений осуществляется трансформаторами. Выведем уравнения трансформатора, не учитывая токов холостого хода, на основании которых составим его схему замещения.

Представим трансформатор в виде каскадного соединения его сопротивления приведенного к напряжению U_1, и идеального трансформатора с коэффициентом трансформации (рисунок 3,а.):

$$
k = \frac{U_1}{U_2}
$$

Воспользуемся уравнениями четырехполюсника в форме А для каждого элемента каскадной схемы замещения трансформатора и определим параметры эквивалентного четырехполюсника. Для продольного сопротивления и идеального трансформатора имеем:

$$
\begin{vmatrix} \dot{A}_{Z_T} & \dot{B}_{Z_T} \\ \dot{C}_{Z_T} & \dot{D}_{Z_T} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \underline{Z}_T \\ 0 & 1 \end{vmatrix}
$$

$$\begin{vmatrix} \dot{A}_T & \dot{B}_T \\ \dot{C}_T & \dot{D}_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_T & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_T} \end{vmatrix}$$

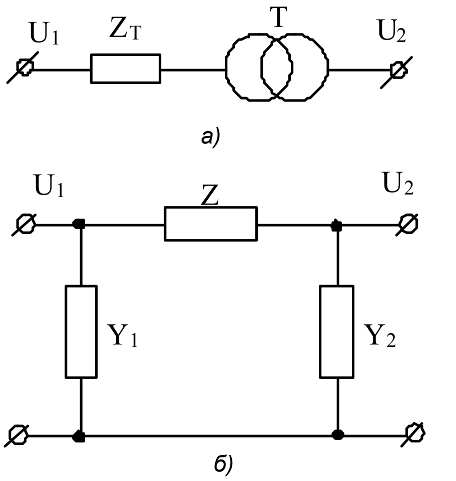

Рисунок 3 – Трансформатор: а) схема трансформатора; б) П-образная схема замещения

Параметры эквивалентного четырехполюсника получаются произведением матриц параметров четырехполюсников сопротивления и идеального трансформатора.

$$\begin{vmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \underline{Z}_T \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} k_T & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_T} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_T & \frac{\underline{Z}_T}{k_T} \\ 0 & \frac{1}{k_T} \end{vmatrix}$$

Известно, что любой четырехполюсник через его параметры можно представить П– или Т–образной схемой замещения. П-образная схема изображена на рисунке 3б, а ее параметры равны:

$$\underline{Z} = \dot{B} = \frac{\underline{Z}_T}{k_T};\ \underline{Y}_1 = \frac{\dot{D}-1}{\dot{B}};\ \underline{Y}_2 = \frac{\dot{A}-1}{\dot{B}} \qquad (6)$$

Таким образом, трансформатор с индуктивной связью замещается П–образной схемой с исключительно электрическими связями.

В достоверности такого замещения можно убедиться на примере двухобмоточного трансформатора с номинальными напряжениями 110 и 11 кВ и с активным сопротивлением, приведенным к стороне высокого напряжения, равным для простоты 10 Ом. Коэффициенты эквивалентного четырехполюсника:

A = 10; B = 1; D = 0,1.

В П–образной схеме замещения:

Z = 1, Y1 = - 0,9, Y2 = 9.

Матрица проводимостей трансформатора:

$$|Y| = \begin{vmatrix} 0{,}1 & -1 \\ -1 & 10 \end{vmatrix}$$

Так как токи холостого хода не учитываются, то при номинальных напряжениях токи в обмотках должны быть равны нулю, в чем нетрудно убедиться, используя уравнение (1).

Второй способ проверки основывается на уравнении (2). Добавим со стороны высокого напряжения ветвь с сопротивлением 1 Ом, за которой включим ЭДС по величине, равной 110 кВ. Тогда:

$$|Y| = \begin{vmatrix} 1{,}1 & -1 \\ -1 & 10 \end{vmatrix},$$

$$|U| = \begin{vmatrix} 1{,}1 & -1 \\ -1 & 10 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \frac{110}{1} \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0{,}1 \\ 0{,}1 & 0{,}11 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 110 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 110 \\ 11 \end{vmatrix}$$

Т.е., полученные в результате расчета напряжения равны заданным.

В качестве примера рассмотрим систему, изображенную на рисунке 4.

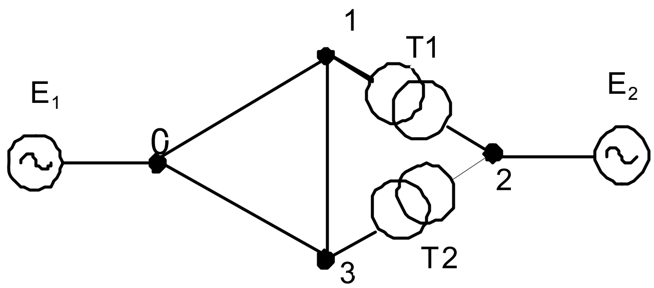

Рисунок 4 – Электрическая сеть

Схема замещения приведена на рисунке 5. Чтобы не затемнять схему, линии заданы только продольными сопротивлениями и нет их обозначений.

Существенно, что коэффициенты трансформации у трансформаторов могут быть разными, что неприменимо при расчете традиционными методами.

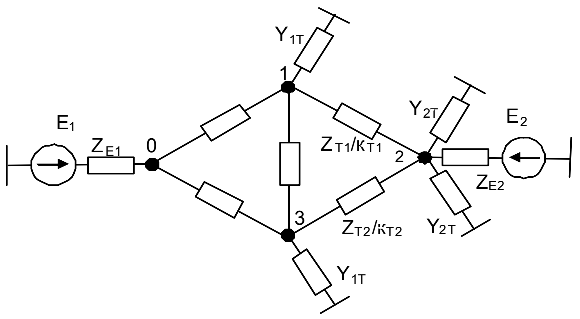

Рисунок 5 – Схема замещения

Коэффициент трансформации есть отношение напряжения обмотки, к которому приведено сопротивление трансформатора, к напряжению противоположной обмотки. И проводимость Y_1 П-образной схемы замещения будет со стороны напряжения, к которой приведено сопротивление трансформатора.

Формирование схемы замещения трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора

Общепринятой схемой замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов является трехлучевая схема с сопротивлениями обмоток высокой, средней и низкой сторон напряжения. Все сопротивления приводятся к одной ступени напряжения, обычно к стороне высокого напряжения. Примем за напряжение, к которому приведены сопротивления обмоток, высокое напряжение. Отличие традиционной схемы замещения от схемы в методе реальных параметров видно из рисунков 6б и 6в.

Если внимательно рассмотреть схему замещения, изображенную на рисунке 6в, то можно увидеть, что трехобмоточный трансформатор замещен сопротивлением обмотки высокого напряжения, соединяющим узел схемы с высоким напряжением и общим узлом, и двумя схемами замещения двухобмоточных трансформатора с сопротивлениями, приведенными к высшему напряжению. Коэффициент трансформации одного трансформатора равен отношению высшего напряжения к среднему, а второго – высшего напряжения к низшему.

Дальнейшее преобразование схемы осуществляется с помощью уравнений (6). Окончательная схема замещения приведена на рисунке 6,г.

Аналогично формируется схема замещения автотрансформаторов и трансформаторов с расщепленными обмотками.

Следует отметить, что в некоторой технической литературе можно встретить ошибку **–** сначала вычисляются напряжения короткого замыкания обмоток, затем через них считаются сопротивления. А надо наоборот – сначала следует определить сопротивления $Z_{В\text{-}С}$, $Z_{В\text{-}Н}$ и $Z_{С\text{-}Н}$, а затем сопротивления $Z_В$, $Z_С$ и $Z_Н$.

$$\underline{Z}_B = 0{,}5\cdot(\underline{Z}_{B-C} + \underline{Z}_{B-H} - \underline{Z}_{C-H}),$$
$$\underline{Z}_C = 0{,}5\cdot(\underline{Z}_{B-C} + \underline{Z}_{C-H} - \underline{Z}_{B-H}),$$
$$\underline{Z}_H = 0{,}5\cdot(\underline{Z}_{B-H} + \underline{Z}_{C-H} - \underline{Z}_{B-C}).$$

Иначе у мнимой части одного сопротивления теряется минус. Ошибка объясняется тем, что раньше не учитывались активные составляющие сопротивлений при ручных расчетах КЗ, а сейчас учитываются, так как для вычислительной техники это не принципиально.

Несколько советов по автоматизации программирования в среде MATHCAD.

1. Использование процедур на порядки снижает ошибки программирования.

2. Автоматизация при заполнении матриц. Матрицы задаются сначала нулевыми членами. Матрица-столбец задается одной командой I_k := 0, квадратная матрица Y задается как $Y_{k,k}$:= 0.

3. Заполнение матрицы осуществляется через процедуру. Например, между узлами 3 и 0 включено сопротивление, равное 10 Ом, а между узлами 3 и 2 – 20 Ом. Процедура внесения сопротивления Z может быть составлена так, как показано на рисунке 7.

Командой $Y_{3,3}$:= 0 формируется квадратная матрица четвертого порядка (первые строка и столбец имеют нулевой индекс). Далее программируется тело процедуры. В скобках заносятся узлы m и n, между которыми включается сопротивление Z. Первой командой заносится в процедуру матрица Y. Далее проводимость 1/Z суммируются с содержимым соответствующих элементов матрицы Y. Результатом работы процедуры является матрица Y с занесенными новыми проводимостями.

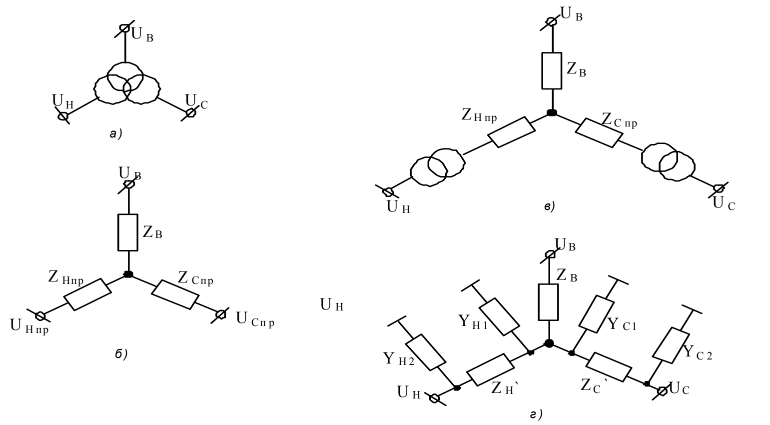

Рисунок 6 – Трехобмоточный трансформатор:
а) схема трансформатора; б) схема замещения; в) схема замещения в методе реальных параметров, г) схема замещения после преобразования

$$Y_{3,3} := 0$$

$$\mathrm{Zy}(m,n,Z) := \left| \begin{array}{l} Y' \leftarrow Y \\ Y'_{m,m} \leftarrow \dfrac{1}{Z} + Y'_{m,m} \\ Y'_{n,n} \leftarrow \dfrac{1}{Z} + Y'_{n,n} \\ Y'_{m,n} \leftarrow -\dfrac{1}{Z} + Y'_{m,n} \\ Y'_{n,m} \leftarrow -\dfrac{1}{Z} + Y'_{n,m} \\ Y' \end{array} \right.$$

$$Y := \mathrm{Zy}(3,2,20) \qquad Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & -0.05 \\ 0 & 0 & -0.05 & 0.05 \end{pmatrix}$$

$$Y := \mathrm{Zy}(3,0,10) \qquad Y = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1 & 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix}$$

Рисунок 7-Процедура заполнения матрицы

Расчеты несимметричных коротких замыканий методом реальных параметров

Началами схем отдельных последовательностей являются точки с нулевыми потенциалами. В схемах прямой и обратной последовательностей это нейтрали синхронных машин и нагрузок, в схеме нулевой последовательности – обмотки трансформаторов, соединенные треугольником.

Концами схем всех последовательностей является точка КЗ.

Комплексные схемы замещения это эквивалентные схемы отдельных последовательностей, соединенные определенным образом, согласно граничным условиям (рисунок 8).

Но можно рассматривать комплексную схему и по-другому. Рассмотрим ее только как схему прямой последовательности, в точке КЗ которой включен шунт, образованный соединением эквивалентных схем обратной и нулевой последовательностей, схема соединения которых определяется видом КЗ. При однофазном КЗ шунт образован из последовательно соединенных эквивалентных схем обратной и нулевой последовательностей, при двухфазном – из параллельного их соединения, а при двухфазном – шунт образован только эквивалентной схемой обратной последовательности.

Но, если рассматривать комплексную схему как схему прямой последовательности с шунтом в точке КЗ, то не имеет смысла приводить такую схему к эквивалентной. Чтобы рассчитать токи и напряжения прямой последовательности, достаточно рассчитать схему (такую же, как и при расчете трехфазного КЗ), но не с проводимостью трехфазного короткого замыкания в точке КЗ, а с шунтом, параметры которого зависят от вида короткого замыкания. Например, при двухфазном КЗ на землю в узле 2 собственная проводимость:

$$Y`_{2,2} = Y_{2,2} + Y_{Ш}\ ,$$

где $Y_{2,2}$ – собственная проводимость узла 2 схемы замещения прямой последовательности без КЗ, $Y_{Ш}$ - проводимость шунта.

$$\underline{Y}_{Ш} = \frac{1}{\underline{Z}_{2Э}} + \frac{1}{\underline{Z}_{0Э}}$$

Эквивалентную проводимость шунта отдельной последовательности можно определить, задав в узле, где произошло короткое замыкание, напряжение, равное 1 В. Ток, вытекающий из этого узла, численно будет равен проводимости шунта.

Рекомендации при составлении программ:

1. Топология схем прямой и обратной последовательностей рассчитываемой сети одинакова. Для обеих схем началами являются нейтрали синхронных машин и нагрузок. А конфигурация схемы нулевой последовательности другая. Так как началами в схеме нулевой последовательности являются обмотки трансформаторов, соединенные треугольником, то схема нулевой последовательности имеет меньше узлов, чем схемы обратной и нулевой последовательностей. И, если не принять меры, то у одних и тех же узлов в схемах прямой (обратной) и нулевой последовательностей будут разные номера.

Опыт программирования показывает, что разные номера одних и тех же узлов приводят к ошибкам, особенно при расчете КЗ в больших системах. Поэтому одним и тем же узлам в схемах всех последовательностей необходимо задавать одинаковые номера. А, чтобы матрица Y схемы нулевой последовательности не оказалась особенной, диагональным элементам, соответствующим узлам, не входящим в схему, нужно присваивать единичные значения. Например, предположим, что в сети из четырех узлов с нулевым, узла 1 нет в схеме замещения нулевой последовательности. А в схемах прямой и обратной последовательностей этот узел есть. В этом случае матрица Y_0 (нулевая последовательность) будет иметь вид:

$$Y_0 = \begin{vmatrix} Y_{0,0} & 0 & Y_{0,2} & Y_{0,3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Y_{2,0} & 0 & Y_{2,2} & Y_{2,3} \\ Y_{3,0} & 0 & Y_{3,2} & Y_{3,3} \end{vmatrix}$$

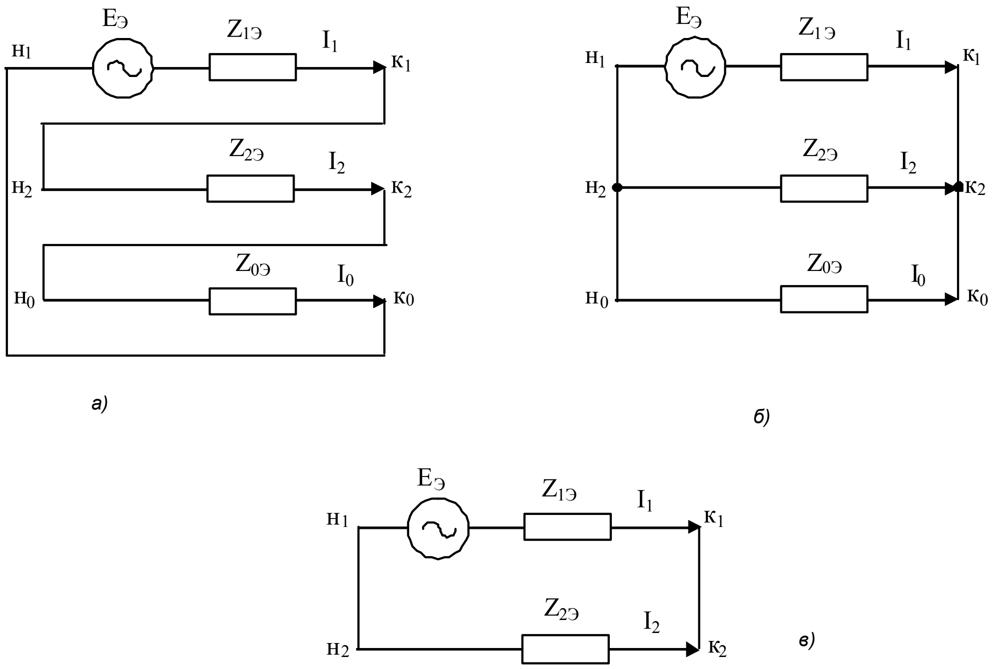

Рисунок 8 – Комплексные схемы замещения для расчета: а) однофазного КЗ; б) двухфазного КЗ на землю; в) двухфазного КЗ

2. Эквивалентную проводимость схемы последовательности любой сложности можно вычислить за 6 операций, которые приводятся ниже для схемы из ***a*** узлов. КЗ в узле 4.

$$I_a := 0$$
$$I_4 := 10000$$
$$Y_{4,4} := Y_{4,4} + 10000$$
$$U := Y^{-1} \cdot I$$
$$Y_Ш := \frac{1 - U_4}{\sqrt{3}} \cdot 10000$$
$$Y_{4,4} := Y_{4,4} - 10000$$

Первой операцией формируется матрица токов.

Второй – формируется ток узла 4 (ЭДС, равная 1 В, умножается на дополнительную проводимость, через которую она включается в узел 4).

Третьей – к собственной проводимости узла 4 добавляется дополнительная проводимость, так как через нее к 4 узлу подключается ЭДС.

Четвертой – определяются напряжения в узлах.

Пятой – определяется ток, протекающий от ЭДС в узел 4, который в числовом выражении равен эквивалентной проводимости (Е = 1 В).

$$Y_Ш = \frac{I_{E-4}}{E} = I_{E-4} = \frac{E - U_4}{\sqrt{3}} \cdot 10000 = \frac{1 - U_4}{\sqrt{3}} \cdot 10000$$

Шестой – восстанавливается проводимость узла 4, чтобы можно было повторить расчет для другого узла.

Дополнительная проводимость должна быть на несколько порядков большей максимальной проводимости схемы замещения, чтобы вносимая в расчет погрешность укладывалась в сотые и тысячные доли процента.

Составляющая прямой последовательности тока КЗ определяется произведением фазного напряжения в узле КЗ на проводимость шунта.

Напряжения, приложенные к схемам обратной и нулевой последовательностям, при расчете двухфазного КЗ и двухфазного КЗ на землю, определяются из расчета схемы прямой последовательности, как напряжения в точке короткого замыкания.

При однофазном КЗ напряжения, приложенные к схемам обратной и нулевой последовательности, определяются частным от деления составляющей прямой последовательности тока КЗ на эквивалентную проводимость соответствующей последовательности.

Напряжения в узлах схем замещения обратной или нулевой последовательностей определяются подключением ЭДС, равной напряжению, приложенному к схеме последовательности в узел с КЗ через дополнительную проводимость, на несколько порядков большую максимальной проводимости схемы замещения.

Токи в ветвях рассчитываются по формулам (4), (5).

Выводы

1. Метод реальных параметров очень удобен при расчете коротких замыканий сложно-замкнутых сетей, особенно с разными коэффициентами трансформации в неоднородных кольцах.

2. Метод может быть использован для составления универсальных программ расчета токов коротких замыканий в произвольных электрических сетях и достаточно просто реализуется в системе MATHCAD. При этом учитываются как активные сопротивления элементов схемы замещения, так и поперечные емкостные проводимости линий электропередачи, что необходимо, если имеются длинные линии.

Лесных Е.В., *доцент, к.т.н., Сибирский Государственный университет путей сообщения, кафедра «Электротехника, диагностика и сертификация», E-mail: abbiel@mail.ru, тел.: 8 (383) 328-05-11;*

Бурянина Н.С., *д.т.н., профессор, действительный член Международной академии экологии и природопользования, ФГАОУ ВПО "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова", зав. кафедрой "Электроснабжение" Физико-технического института», E-mail: bns2005_56@mail.ru*