

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

ОГИЕНКО В.А.

Рассматривается автоматизированная система расчета токов короткого замыкания в городских электросетях. Система предназначена для создания и редактирования схем, автоматически формирует схемы замещения и позволяет выполнять расчет токов короткого замыкания при симметричных и несимметричных коротких замыканиях.

Для городских электросетей существует ряд задач, при решении которых необходим расчет токов короткого замыкания. Как правило, схемы городских электросетей весьма громоздки и расчет токов короткого замыкания для таких схем — задача достаточно сложная и трудоемкая. Разработанная автоматизированная система расчета токов короткого замыкания в городских электросетях представляет собой оболочку, позволяющую создавать и редактировать ранее созданные схемы электросетей, редактировать параметры элементов схемы и производить расчет токов короткого замыкания при симметричных (трехфазное) и несимметричных (двухфазное, однофазное, двухфазное на землю) коротких замыканиях. Схемы замещения формируются автоматически на основании оперативной информации о текущем состоянии элементов системы [1].

Составление эквивалентной схемы замещения сводится к приведению всех элементов, находящихся на различных ступенях трансформации заданной схемы, к какой-либо одной ступени, принимаемой в данной схеме за основную или базисную. Такое приведение осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из общей теории трансформатора. Схему замещения можно составить точно или приближенно, причем ее элементы можно выразить в именованных или относительных единицах. Точность расчета не зависит от того, в какой системе единиц выражают величины. Остановимся на именованных единицах.

При составлении схемы замещения в именованных единицах необходимо выбрать основную ступень напряжения. Тогда электрическая цепь произвольной ступени напряжения схемы связана с выбранной основной ступенью напряжения рядом последовательно включенных трансформаторов с коэффициентами трансформации  $k_1, k_2, \dots, k_n$ . Используя известные соотношения для эдс (напряжений), токов и сопротивлений при пересчете их с одного напряжения трансформатора на другое, имеем общие выражения для определения приведенных к основной ступени значений отдельных величин этой цепи [2], т.е.

$$\overset{\circ}{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E, \quad \overset{\circ}{I} = \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)} I, \quad \overset{\circ}{x} = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 x.$$

Таким образом, истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько трансформаторов имеется на пути между приводимой цепью и принятой основной ступенью. При этом такая запись предполагает, что коэффициенты трансформации определены в направлении от выбранной основной ступени напряжения к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

Схемы замещения с учетом действительных коэффициентов трансформации составляют только при необходимости большой точности расчета. Поэтому используем упрощенное составление схем замещения. Для каждой ступени напряжения устанавливаем среднее номинальное напряжение  $U_{cp}$ , а именно:

$$230, 115, 37, 15, 75, 10, 5, 6, 3, 3, 15, 0, 525 \text{ кВ.}$$

При этом условно принимаем, что все элементы одной ступени напряжений, кроме реакторов, номинальное напряжение которых значительно выше номинальных напряжений ступеней, на которых они установлены, имеют номинальные напряжения, равные соответствующим значениям  $U_{cp}$  по указанной шкале. В этом случае коэффициент трансформации каждого трансформатора равен отношению  $U_{cp}$  тех ступеней, которые он связывает между собой. При этом имеем:

$$\overset{\circ}{E} = \frac{U_{cp,б}}{U_{cp}} E, \quad \overset{\circ}{I} = \frac{U_{cp}}{U_{cp,б}} I, \quad \overset{\circ}{x} = \left( \frac{U_{cp,б}}{U_{cp}} \right)^2 x,$$

где  $U_{cp}$  — среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет;  $U_{cp,б}$  — среднее номинальное напряжение выбранной основной (базисной) ступени.

Как отмечалось выше, в данной работе наряду с симметричными рассматриваются несимметричные короткие замыкания. В отличие от симметричного, любое несимметричное короткое замыкание создаст для отдельных фаз неодинаковые условия. Токи в фазах какого-либо участка цепи при несимметричном коротком замыкании имеют различные величины, и углы сдвига между ними также различны. Если рассматривать действительные токи, то для их определения необходимо составить систему уравнений для отдельных узлов и контуров, образующихся в заданной трехфазной системе при данном несимметричном коротком замыкании. В этих уравнениях необходимо учитывать индуктивную связь между фазами в соответствии с принятыми направлениями токов для отдельных участков схемы. Такое определение токов даже для сравнительно простой схемы является сложным вследствие необходимости решения большого числа уравнений. Для расчета токов при несимметричных коротких замыканиях мы применяем метод симметричных составляющих. Данный метод позволяет с наибольшей простотой и вместе с тем с полной строгостью подойти к исследованию несимметричных режимов в многофазных системах.

Суть метода заключается в том, что любую несимметричную трехфазную систему величин (токов, напряжений и др.) можно однозначно разложить на три симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Система прямой последовательности имеет порядок чередования фаз А, В, С, а система обратной последовательности – обратный порядок чередования фаз. Система нулевой последовательности состоит из трех одинаковых величин, совпадающих по фазе. В симметричных трехфазных цепях симметричные составляющие действуют независимо друг от друга, что позволяет составлять отдельные схемы замещения для каждой последовательности.

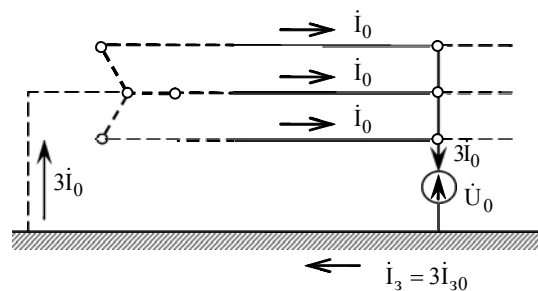
**Схема прямой последовательности.** Она является обычной схемой, которая применяется для вычисления токов трехфазного короткого замыкания. Отличается лишь тем, что концы нагрузочных ветвей нельзя соединять с точкой короткого замыкания в этой схеме, так как напряжение этой точки не равно нулю, как при трехфазном коротком замыкании.

**Схема обратной последовательности.** Токи обратной последовательности протекают по тем же элементам схемы, что и токи прямой последовательности. Поэтому схема нулевой последовательности состоит из тех же элементов, что и схема прямой последовательности. Генераторы и нагрузки входят в нее своими реактивностями обратной последовательности, а все остальные элементы – теми же реактивностями, что и в схему прямой последовательности.

Поскольку эдс обратной последовательности генератора принимаются равными нулю, то начала всех генераторных ветвей в схеме обратной последовательности можно объединять с концами нагрузочных ветвей той же схемы. Эта общая точка – начало схемы обратной последовательности, концом же схемы является точка короткого замыкания.

**Схема нулевой последовательности.** Ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи (тросы линий, оболочки кабелей). Поэтому путь токов нулевой последовательности резко отличается от пути, по которому протекают токи прямой или обратной последовательностей. Схема нулевой последовательности в основном определяется соединением обмоток участвующих трансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности следует начинать с точки короткого замыкания, считая, что в ней все фазы замкнуты накоротко и к этой общей точке приложено напряжение нулевой последовательности (рисунок). Необходимо выявить возможные пути протекания токов нулевой последовательности в пределах каждой электрически связанной цепи. Замкнутый контур для токов нулевой последовательности возможен только в том случае, когда в цепи, электрически связанной с точкой короткого замыкания, имеется по меньшей мере одна заземленная нейтраль. При наличии нескольких заземленных нейтралей в этой цепи образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.



Протекание токов нулевой последовательности

Трансформация токов нулевой последовательности возможна только при соблюдении определенных условий. Так, если трансформатор имеет соединение обмоток  $Y_0 / \Delta$ , то ток нулевой последовательности в звезде наводит в треугольнике ток, который протекает в фазах треугольника, не выходя за его пределы. Вся сеть, которая присоединена со стороны треугольника, в схему нулевой последовательности не входит, независимо от того, имеются ли в ней заземленные нейтрали или нет. При трансформаторе с соединением  $Y_0 / Y_0$  трансформация токов нулевой последовательности возможна лишь при условии, что в цепях, присоединенных к каждой обмотке такого трансформатора, обеспечен путь для этих токов. Если это условие соблюдено, то в схему нулевой последовательности входят этот трансформатор, а также все элементы, по которым протекают токи нулевой последовательности на стороне каждой обмотки.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной, так как схема нулевой последовательности составляется для одной фазы, а через сопротивление в нейтрали протекает сумма токов нулевой последовательности трех фаз. Следовательно, чтобы учесть действительное сопротивление напряжения в нем, его нужно увеличить в три раза.

По существу, задача вычисления токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин при некотором фиктивном трехфазном коротком замыкании. Таким образом, как только симметричные составляющие найдены, мы легко получим действительные значения токов и напряжений.

**Литература:** 1. *Тевяшев А.Д.* и др. Алгоритмические методы и информационные технологии в исследованиях надежности // Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием / Под ред. Манова Н.А., Сеннова Е.В., Сухарева М.Г. М., 2000. С.190-259. 2. *Ульянов С.А.* Короткие замыкания в электрических системах. М.: Госэнергоиздат, 1952. 280 с.

Поступила в редколлегию 01.11.2002

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Дикарев В.А.

**Огиенко Владимир Александрович**, аспирант кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, (0572) 40-94-36; e-mail: va@kture.kharkov.ua.