

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего учебного пособия является оказание помощи студентам при самостоятельном изучении методов расчетов токов короткого замыкания и проведении самих расчетов в период курсового проектирования по предмету «Электрические станции и подстанции», а также при выполнении семестрового задания по предмету «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Пособие содержит основы методики расчетов токов короткого замыкания, примеры расчетов и необходимые при проектировании справочные данные.

Студентам рекомендуется вначале изучить физические процессы короткого замыкания по основной учебной литературе. Явление короткого замыкания протекает по-разному в зависимости от видов короткого замыкания, мощности питающих источников (бесконечной или ограниченной мощности), удаленности точки короткого замыкания от источника питания и т. д.

Только усвоив предварительно особенности процессов короткого замыкания, протекающих в различных условиях, можно обоснованно выбрать нужный метод расчета, правильно подобрать справочный материал и использовать в качестве образца тот или иной пример расчета.

На точность расчетов, а, следовательно, и на их методику существенно влияет цель расчетов токов короткого замыкания. В данном пособии рассматриваются методы расчетов, которые используются для выбора электрооборудования. Для целей проектирования релейной защиты, как правило, применяют более точные методы токов короткого замыкания, которые в пособии не рассматриваются. В этих случаях нужно пользоваться специальной литературой.

При изучении настоящего пособия очень важно обратить внимание на принципы составления расчетных схем, схем замещения и выражений для определения сопротивления цепи короткого замыкания, как в относительных единицах, так и в именованных.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

А. Определение величины:

I_{γ} – начальный сверхпереходный ток, необходимый для определения ударного тока;

i_y – ударный ток КЗ, необходимый для проверки электрических аппаратов, шин и изоляторов на динамическую устойчивость;

I_{kt} – действующее значение полного тока КЗ для некоторого момента времени, необходимо для выбора по отключающей способности выключателей высокого напряжения;

I_{∞} – действующее значение установившегося тока КЗ, необходимо для проверки электрооборудования на термическую устойчивость;

S_{kt} – мощность короткого замыкания для момента времени t , необходимая для проверки выключателей по отключаемой ими мощности.

Б. Допущения при расчетах:

В установках напряжением до 1000 В и выше при определении токов короткого замыкания для целей выбора аппаратов и проводников *допускают целый ряд упрощений.*

1. Считают трехфазную систему симметричной.

2. Короткое замыкание наступает в такой момент времени, при котором ток КЗ будет иметь наибольшее значение.

3. Электродвижущие силы источников питания, значительно удаленных от места КЗ ($X_{*расч} > 3$), считаются неизменными.

4. В электроустановках напряжением выше 1000 В пренебрегают активным сопротивлением элементов цепи КЗ.

5. В случае питания электрических сетей напряжением до 1000 В от понижающих трансформаторов исходят из того, что подведенное к трансформатору напряжение неизменно и равно его номинальному напряжению.

В. Базисные условия:

Для вычисления тока цепи короткого замыкания определяют результирующее сопротивление этой цепи. Так как элементы цепи КЗ могут оказаться под различными номинальными напряжениями, то определять результирующее сопротивление цепи обычными методами, известными из курса электротехники, нельзя. Чтобы не допустить ошибки при определении результирующего сопротив-

ления, все сопротивления элементов цепи, выраженные в относительных единицах, следует привести к одной общей величине. Такой одинаковой для различных ступеней напряжения величиной будет только мощность.

Произвольно выбранную и одинаковую для всех ступеней напряжения мощность называют базисной и обозначают: S_6 .

Выбор величины базисной мощности в каждом конкретном случае производят исходя из соображений наибольшего возможного упрощения вычислительной работы, целесообразно S_6 принимать равной 100, 1000 МВА и т. д. или брать ее равной номинальной мощности источника питания. В последнем случае упрощаются расчетные формулы.

Если базисную мощность выбирают одинаковой для всех ступеней напряжения, то величину базисного напряжения выбирают для одной ступени. Наиболее удобно принимать базисное напряжение равным среднему номинальному напряжению $U_{ср}$ той ступени, для которой определяется ток короткого замыкания. Это напряжение называется расчетным напряжением ступени и должно быть на 5 % выше номинального напряжения сети.

Шкала расчетных напряжений:

231; 115; 37; 10,5; 6,3; 0,69; 0,4 кВ.

Если величины базисного напряжения и базисной мощности выбраны, то величину базисного тока уже не имеем права выбирать произвольно. Она определяется по формуле 16.

Рассмотренные базисные величины вводят для того, чтобы оперировать с сопротивлениями, выраженными в относительных единицах. Если расчет токов КЗ ведут в именованных единицах, то для того чтобы не допустить ошибки при определении результирующего сопротивления цепи, все сопротивления пересчитывают к тому напряжению, для которого составлена схема замещения.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ И ПРИВЕДЕНИЕ ИХ К БАЗИСНЫМ УСЛОВИЯМ

Относительные сопротивления при номинальных условиях определяются по формулам:

$$X_{*n} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot X}{U_n} = X \cdot \frac{S_n}{U_n^2}, \quad (1)$$

где U_n – номинальное междуфазное напряжение, кВ; I_n – номинальный ток, кА; S_n – номинальная мощность, МВА;

$$R_{*n} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot R}{U_n} = R \cdot \frac{S_n}{U_n^2}, \quad (2)$$

$$Z_{*n} = \sqrt{R_{*n}^2 + X_{*n}^2}, \quad (3)$$

где Z ; X ; R – соответственно полное, реактивное и активное сопротивление данного участка цепи, Ом.

Звездочками в индексе отмечают сопротивления, выраженные в относительных единицах, индексом n – номинальные условия.

Сопротивления элементов электроустановки задаются либо в именованных единицах (воздушные и кабельные линии), либо в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям (генераторы, трансформаторы, реакторы).

К базисным условиям эти сопротивления приводят с помощью следующих формул:

В общем случае:

$$X_{*б} = X_{*n} \cdot \frac{S_б}{S_n}, \quad (4)$$

где X_{*n} – относительное номинальное сопротивление; $X_{*б}$ – относительное базисное сопротивление; $S_б$ – базисная мощность МВА; S_n – номинальная мощность в МВА.

Если базисную мощность выбирают равной номинальной мощности питающих источников, то формула (4) упрощается:

$$X_{*б} = X_{*n}. \quad (4.1)$$

В конкретных случаях:

1. *Сопротивление синхронных генераторов:*

$$X_{*б} = X_{*d}'' \cdot \frac{S_б}{S_n}, \quad (5)$$

где X_{*d}'' – относительное сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси полюсов.

Относительное сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси полюсов X_{*d}'' задается заводами-изготовителями (табл. 1).

Таблица 1

Сверхпереходные сопротивления некоторых дизель-генераторов

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, кВ	X_{*d}
СД-323-5/20	400	0,4	0,2
	400	6,3	0,21
СРС-1370-750	1100	6,3	0,136

При отсутствии точных данных используют средние значения сверхпереходных сопротивлений:

- для генераторов – 0,725;
- для дизель-генераторов быстроходных – 0,14;
- для дизель-генераторов тихоходных – 0,165;
- для синхронных и асинхронных двигателей – 0,20.

2. Сопротивление трансформаторов:

Для силовых трансформаторов при номинальной мощности

$$S_{н.т.} \geq 750 \text{ кВА},$$

$$X_{*\bar{\sigma}} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.т.}}, \quad (6)$$

где $u_k \%$ – напряжение короткого замыкания в процентах, определяемое по паспортным данным.

Для маломощных силовых трансформаторов

$$X_{*\bar{\sigma}} = \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100}\right)^2 - R_{*н}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.т.}}, \quad (7)$$

где $R_{*н} = \frac{\Delta P}{S_{н.т.}}$; ΔP – потери в меди трансформаторов в кВт;

$S_{н.т.}$ – номинальная мощность трансформатора в кВА.

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к базисной мощности

$$R_{*\bar{\sigma}} = R_{*н} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.т.}}. \quad (8)$$

Для трехобмоточных трансформаторов задаются три значения напряжения короткого замыкания по парам обмоток $U_{кВН}$, $U_{кВС}$, $U_{кСН}$. По каталожным значениям напряжений КЗ для пар обмоток

$U_{кВН}\%$, $U_{кВС}\%$, $U_{кСН}\%$ определяются напряжения КЗ для лучей схемы замещения:

$$U_{кВ} \% = 0,5(U_{кВН} + U_{кВС} - U_{кСН}); \quad (9)$$

$$U_{кС} \% = 0,5(U_{кВС} + U_{кСН} - U_{кВН}); \quad (10)$$

$$U_{кН} \% = 0,5(U_{кВН} + U_{кСН} - U_{кВС}). \quad (11)$$

По найденным значениям $U_{кВ}\%$, $U_{кС}\%$, $U_{кН}\%$ определяются реактивные сопротивления обмоток $X_{ТВ}$, $X_{ТС}$, $X_{ТН}$ по выражению (6), аналогичному для двухобмоточного трансформатора. Реактивное сопротивление одного из лучей схемы замещения трехобмоточного трансформатора (обычно среднего напряжения) близко к нулю.

3. Сопротивление реакторов:

$$X_{*б} = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{н.р.}}, \quad (12)$$

где $X_p, \%$ – реактивное сопротивление реактора в процентах, берётся из справочников.

4. Сопротивления воздушных и кабельных линий:

$$X_{*б} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{cp}^2}; \quad (13)$$

$$R_{*б} = R_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{cp}^2}, \quad (14)$$

где l – длина линии в км; $S_б$ – базисная мощность в МВА; U – расчетное напряжение ступени в кВ; X_0 , R_0 – соответственно реактивное и активное сопротивления 1 км линий в Ом/км.

3. РАСЧЁТНАЯ СХЕМА И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Для вычисления токов короткого замыкания составляется расчетная схема, представляющая собой упрощенную однолинейную схему установки (рис. 1). Расчетная схема должна соответствовать нормальному режиму работы электроустановки в условиях длительной ее эксплуатации. Кратковременные изменения в системе электроснабжения при выборе расчетной схемы не учитываются.

В схему включаются генераторы, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы и наносятся: параметры, необходимые для расчета: номинальные напряжения и мощности,

длины линий, материал и сечения проводов (кабелей) или индуктивные сопротивления линий (при необходимости и активные сопротивления).

Сопротивления выключателей, разъединителей и других аппаратов, также соединительных кабелей и шин в распределительных устройствах напряжением выше 1000 В не учитываются и сами элементы на расчетную схему не наносятся.

После составления расчетной схемы на ней определяются те точки, для которых следует определить ток КЗ. Эти точки называются расчетными точками короткого замыкания. Для определения числа и мест точек короткого замыкания прежде всего нужно знать какое электрооборудование расчетной схемы подлежит проверке на устойчивость от действия токов КЗ (ПУЭ п. п. 1.4.1, 1.4.2 и 1.4.3).

Расчетные точки намечаются так, чтобы по выбираемому оборудованию протекал наибольший ток КЗ, т. е. чтобы оборудование попадало в наиболее тяжелые условия. Исключение представляет выбор отключающих аппаратов на реактированных линиях. В последнем случае расчетная точка берется за реактором. Так, например, для проверки на действие токов КЗ шин 10 кВ намечена точка К-1, для выбора отключающих аппаратов реактированной линии – точка К-2 (см. рис. 1).

Сопротивления элементов расчетной схемы задаются различными единицами измерения: именованными, в процентах, относительными номинальными величинами. Это вызывает необходимость для определения результирующего сопротивления цепи КЗ расчетную схему заменять эквивалентной схемой замещения, в которой бы все сопротивления были выражены в одних и тех же единицах и приведены к одинаковым условиям.

Схема замещения составляется, как правило, для каждой точки КЗ. Все элементы на схемах замещения показываются в виде индуктивных и активных сопротивлений. Для установок напряжением выше 1000 В сопротивления обычно выражаются в относительных единицах, а для установок напряжением ниже 1000 В – в именованных единицах.

Все сопротивления на схеме замещения нумеруются в виде дроби, числителем которой является порядковый номер элемента, а знаменателем – его величина. На схеме замещения указываются

также средние номинальные напряжения ступеней (рис. 2).

При вычислении сопротивлений в относительных единицах все сопротивления приводятся к базисным условиям. При производстве расчетов в именованных единицах все сопротивления приводятся к той ступени напряжения, где находится расчетная точка (приложение А).

Схема замещения постепенно упрощается путем эквивалентных преобразований, и сводится к одному результирующему сопротивлению. При этом допустимо для определения полных сопротивлений (Z) элементов, соединенных параллельно или последовательно, оперировать только с модулями сопротивлений.

Пример 1. Определить результирующее сопротивление до точки К-1 и К-2 в относительных единицах для расчетной схемы установки, приведённой на рис. 1.

Решение.

1. Задается базисная мощность $S_{\sigma} = 300$ МВА.

2. Составляется схема замещения (см. рис. 2), нумеруются все индуктивные сопротивления цепи.

Сопротивления приводятся к базисным условиям, индексы для простоты опускаются:

- сопротивление системы определяется по формуле (4.1):

$$X_{*1} = X_{*c} = 0,8;$$

- сопротивление воздушных линий:

$$X_{*2} = X_{*3} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{300}{115^2} = 0,362;$$

- сопротивление трансформаторов:

$$X_{*4} = X_{*5} = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.т.}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{300}{31,5} = 1,0;$$

- сопротивление реакторов:

$$X_{*6} = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.р.}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{300}{7,26} = 1,65;$$

$$S_{np} = \sqrt{3} \cdot I_{np} \cdot U_{cp} = 1,73 \cdot 0,4 \cdot 10,5 = 7,26 \text{ МВА}.$$

Найденные значения базисных сопротивлений наносятся на схему замещения.

3. Преобразуется схема замещения (см. рис. 2) для вычисления

результатирующего сопротивления до точки К-1.

4. Определяется результирующее сопротивление до точки К-1:

$$X_{*рез.1} = X_1 + X_3 + X_5 = 0,8 + 0,362 + 1,0 = 2,162.$$

5. Определяется результирующее сопротивление до точки К-2:

$$X_{*рез.2} = X_1 + X_3 + X_5 + X_6 = 2,162 + 1,65 = 3,812.$$

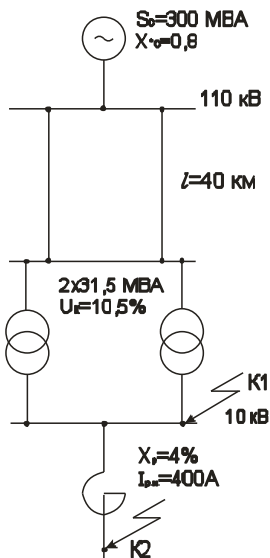


Рис. 1. Расчетная схема

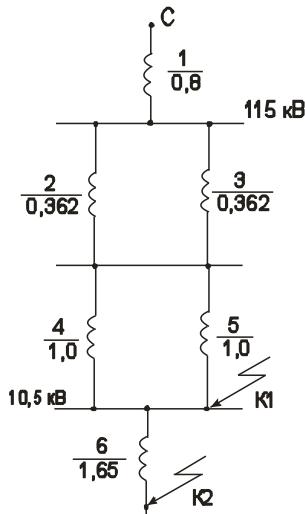


Рис. 2. Схема замещения

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕПИ, ПИТАЮЩЕЙСЯ ОТ СИСТЕМЫ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Если мощность системы достаточно велика по сравнению с мощностью присоединенных к ней потребителей, то напряжение на шинах системы практически можно считать неизменным при любых потребляемых токах. В этом случае мощность системы условно считают равной бесконечности, а сопротивление системы равным нулю ($S_c = \infty$, $X_c = 0$).

Для практических расчетов важно определить, можно ли в данном конкретном случае считать питающую систему системой неограниченной мощности. Если известна суммарная мощность

генераторов системы, то при выполнении одного из условий:

$$X_c \cdot \frac{S}{U^2} \leq 3; \quad \frac{S_c}{S^{(3)}} \leq 3,$$

где U – междуфазное напряжение системы, кВ; $S^{(3)}$ – мощность трехфазного КЗ на шинах подстанции, МВА; S_c – мощность системы, МВА; X_c – сопротивление системы, Ом, систему принимают за систему неограниченной мощности.

Сопротивление системы можно принимать равным нулю, а ее мощность равной бесконечности и в случае, когда точка короткого замыкания значительно удалена от источника и результирующее сопротивление цепи короткого замыкания во много раз (в 10–20) превышает сопротивление системы.

Так как напряжение на пиках системы неограниченной мощности при коротком замыкании практически остается неизменным, то периодическая составляющая тока КЗ будет представлять собою синусоидальный ток с неизменной во времени амплитудой. При этом действующее значение периодической составляющей будет равно сверхпереходному и установившемуся токам КЗ.

$$\Gamma^{\wedge} = I_{\infty} = I_{\kappa}.$$

Если расчет сопротивлений производится в относительных единицах, то для вычисления периодической составляющей тока при трехфазном КЗ пользуются формулой:

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\delta}}{X_{*рез}}, \quad (15)$$

где I_{κ} – ток короткого замыкания, кА; $X_{*рез}$ – результирующее сопротивление до точки КЗ в относительных единицах; I_{δ} – базисный ток в кА, вычисляемый по формуле:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}, \quad (16)$$

где S_{δ} – базисная мощность, МВА; U_{δ} – базисное напряжение, кВ.

Если расчет производится в именованных единицах, то

$$I_{\kappa} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot X_{рез}}, \quad (17)$$

где U_{cp} – расчётное напряжение, кВ; $X_{рез}$ – результирующее сопротивление, Ом.

В случае учета активных сопротивлений в формуле расчета

(12), (14) вместо индуктивного результирующего сопротивления подставляется полное сопротивление:

$$Z_{*H} = \sqrt{R_{*H}^2 + X_{*H}^2}, \quad Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}.$$

Ударный ток определяется по формулам:

$$i_y = K_y \sqrt{2} \cdot I_k; \quad (18)$$

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}; \quad (19)$$

$$T_a = \frac{X_{pez}}{3,14 \cdot R_{pez}}, \quad (20)$$

где K_y – ударный коэффициент; e – основание натурального логарифма; T_a – постоянная времени затухания апериодического тока, сек.

Если расчет сопротивлений ведется без учета активных сопротивлений, то обычно принимают следующие значения ударного коэффициента:

- при КЗ на шинах, питаемых непосредственно от генераторов средней и большей мощности – 1,9;
- при КЗ на стороне вторичного напряжения понижающих трансформаторов мощностью 1000 кВА и менее – 1,3.

Подводя итог сказанному выше, можно рекомендовать следующую *последовательность расчета токов КЗ*:

1. Выбор расчетных условий:
 - а) составление расчетной схемы,
 - б) определение вида и мест расположения короткого замыкания (расчетные точки КЗ).
2. Определение сопротивлений элементов расчётной схемы.
3. Составление схемы замещения.
4. Определение результирующего сопротивления цепи короткого замыкания и проверка возможности считать питающую систему системой неограниченной мощности.
5. Определение токов короткого замыкания.

Пример 2. Определить токи I_k , I_y , мощность S_k короткого замыкания в точках К-1 и К-2. Все данные для расчета приведены на рис. 3.

Решение:

Расчет производится в относительных единицах, принимается

значение $S_{\delta} = 100 \text{ МВА}$.

1. Определяется сопротивление цепи и наносится на схему замещения (рис. 4).

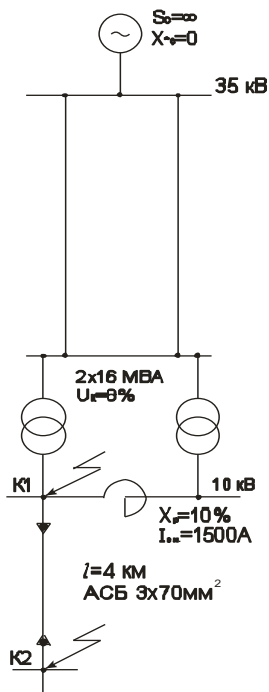


Рис. 3. Расчетная схема

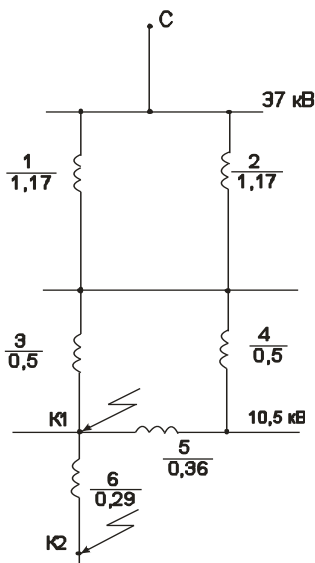


Рис. 4. Схема замещения

$$X_{*1} = X_{*2} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{100}{37^2} = 1,17;$$

$$X_{*3} = X_{*4} = \frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{8}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,5;$$

$$X_{*5} = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_{\delta}}{I_{o.n.}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{5,5}{1,5} = 0,15;$$

$$I_{\delta} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА};$$