Практическое занятие

Расчет тока кз

ПРИМЕР

Определить ток трехфазного КЗ в точках К1, К2, К3 (рис. 5.5, *а*). Питание осуществляется от системы бесконечной мощности. Параметры, необходимые для расчета, приведены на рис. 5.5. *а*. Проведем решение в относительных и именованных единицах

1. Принимаем за базисные единицы $S_б = 100$ МВ·А и средние напряжения ступеней $U_{б1} = 37$; $U_{б2} = 10{,}5$ кВ. Определяем базисные токи кА по (5.4),

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б1}} = \frac{100}{\sqrt{3}\cdot 37} = 1{,}56;$$

$$I_{б2} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б2}} = \frac{100}{\sqrt{3}\cdot 10{,}5} = 5{,}5.$$

Составляем схему замещения и определяем сопротивления элементов в базисных единицах в соответствии с табл. 5.1.

Трансформаторы Т1 и Т2:

$$x_{т1*} = \frac{u_{кт1}}{100}\cdot\frac{S_б}{S_{ном.т}} = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{100}{63} = 0{,}167;$$

$$x_{т2*} = \frac{8}{100}\cdot\frac{100}{10} = 0{,}8.$$

Воздушная линия Л1:

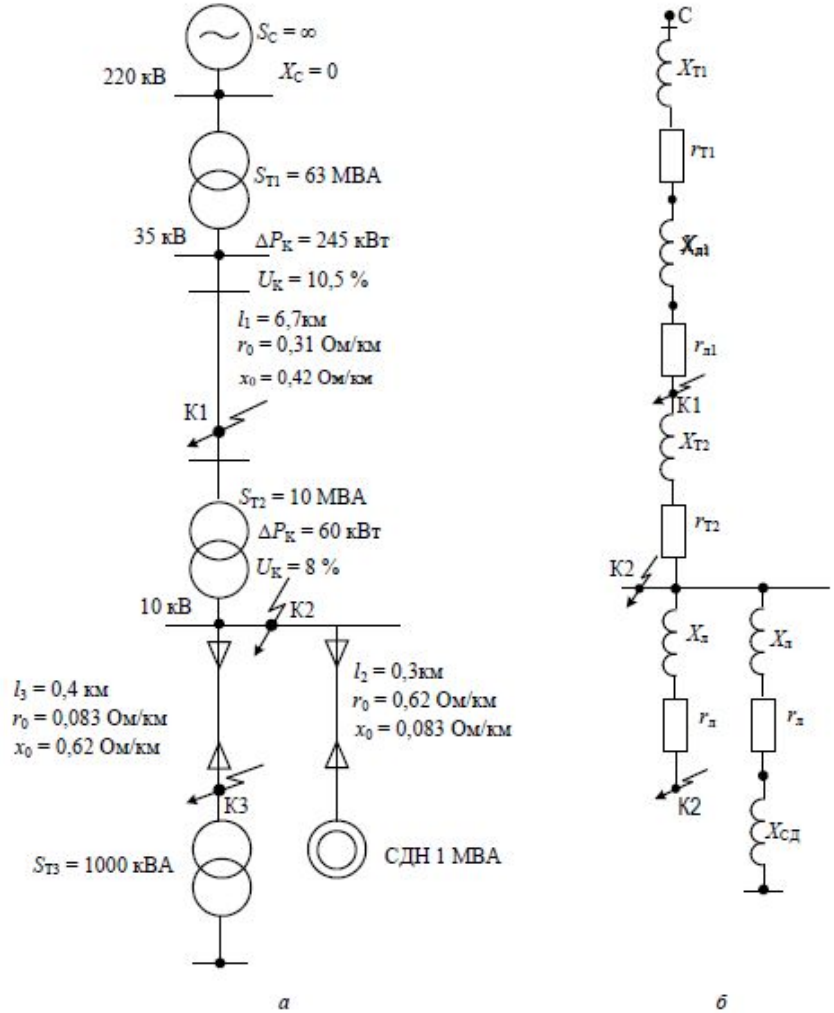
$$x_{л1*} = x_0 l\frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}4\cdot 6{,}7\frac{100}{37^2} = 0{,}196;$$

$$r_{л1*} = r_0 l\frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}31\cdot 6{,}7\frac{100}{37^2} = 0{,}152.$$

Кабельные линии Л2, Л3:

$$x_{л2*} = 0{,}62\cdot 0{,}4\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}225; \qquad r_{л2*} = 0{,}08\cdot 0{,}4\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}029;$$

$$x_{л3*} = 0{,}62\cdot 0{,}3\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}169; \qquad r_{л3*} = 0{,}08\cdot 0{,}3\frac{100}{10{,}5^2} = 0{,}022.$$



Синхронный двигатель:

$$x''_{сд*} = x''_d\frac{S_б}{S_{ном.сд}} = 0{,}2\frac{100}{1} = 20.$$

3. Определяем суммарное сопротивление до точки К1:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{т1*} + x_{л1*} = 0{,}167 + 0{,}196 = 0{,}363; \quad r_{\Sigma 1*} = r_{л1*} = 0{,}152.$$

4. Определяем ток К3, кА, в точке К1. Так как условие $r_\Sigma < x_\Sigma/3$ для точки К1 не выполняется, то учитываем в расчетах активное сопротивление

$$I_{к.К1} = \frac{I_б}{Z_{\Sigma 1*}} = \frac{1{,}56}{\sqrt{0{,}363^2 + 0{,}152^2}} = 3{,}96.$$

5. Определяем суммарное сопротивление со стороны системы и со стороны синхронного двигателя до точки К2:

$$x_{\Sigma c2*} = x_{\Sigma 1*} + x_{т2*} = 0{,}363 + 0{,}8 = 1{,}163; \qquad r_{\Sigma c2*} = r_{\Sigma 1*} = 0{,}152;$$

$$x_{\Sigma сд2*} = x''_{сд} + x_{л3*} = 20 + 0{,}169 = 20{,}169; \qquad r_{\Sigma сд2*} = r_{л3*} = 0{,}022.$$

Так как условие $r_\Sigma < x_\Sigma/3$ для точки К2 выполняется, то не учитываем в расчетах активное сопротивление.

6. Определяем токи, кА, в точке К2 отдельно от системы и от синхронного двигателя:

$$I_{к.с.К2} = \frac{1}{x_{рез1*}} I_{б2} = \frac{1}{1{,}163} \cdot 5{,}5 = 4{,}73;$$

$$I_{к.сд.К2} = \frac{1}{x_{рез2*}} I_{б2} = \frac{1}{20{,}169} \cdot 5{,}5 = 0{,}27.$$

Суммарный ток, кА, в точке К2:

$$I_{к.К2} = I_{к.с.К2} + I_{к.сд.К2} = 4{,}73 + 0{,}27 = 5{,}0.$$

7. Определяем результирующие сопротивления до точки К3.

Объединять систему бесконечной мощности и синхронный двигатель нельзя, поэтому определяем токи с помощью коэффициентов распределения. Находим эквивалентное сопротивление от источников питания, коэффициенты распределения и результирующие сопротивления до точки К2 по (5.11), (5.12), (5.13).

$$x_{\text{экв2*}} = \frac{x_{\Sigma\text{с2*}} x_{\Sigma\text{сд2*}}}{x_{\Sigma\text{с2*}} + x_{\Sigma\text{сд2*}}} = \frac{1{,}163 \cdot 20{,}169}{1{,}163 + 20{,}169} = 1{,}1;$$

$$K_{\text{р1}} = \frac{x_{\text{экв2*}}}{x_{\Sigma\text{с2*}}} = \frac{1{,}1}{1{,}163} = 0{,}946; \quad K_{\text{р2}} = \frac{x_{\text{экв2*}}}{x_{\Sigma\text{сд2*}}} = \frac{1{,}1}{20{,}169} = 0{,}0545;$$

$$x_{\text{рез3*}} = x_{\text{экв2*}} + x_{\text{л2*}} = 1{,}1 + 0{,}225 = 1{,}325;$$

$$x_{\text{рез13*}} = \frac{x_{\text{рез3*}}}{K_{\text{р1}}} = \frac{1{,}325}{0{,}946} = 1{,}4; \quad x_{\text{рез23*}} = \frac{x_{\text{рез3*}}}{K_{\text{р2}}} = \frac{1{,}325}{0{,}0545} = 24{,}3.$$

8. Определяем токи, кА, в точке К3 отдельно от системы и от синхронного двигателя

$$I_{\text{к.с.К3}} = \frac{1}{x_{\text{рез13*}}} I_{б2} = \frac{1}{1{,}4} \cdot 5{,}5 = 3{,}93;$$

$$I_{\text{к.сд.К3}} = \frac{1}{x_{\text{рез23*}}} I_{б2} = \frac{1}{24{,}3} \cdot 5{,}5 = 0{,}226.$$

Суммарный ток, кА, в точке К3:

$$I_{\text{к.К3}} = I_{\text{к.с.К3}} + I_{\text{к.сд.К3}} = 3{,}93 + 0{,}226 = 4{,}156.$$

9. Определяем ударный ток, кА, в точке К1. Находим ударный коэффициент по кривой (рис. 5.3) в зависимости от отношения x_{Σ}/r_{Σ}:

$$T_{\text{а1}} = \frac{x_{\Sigma 1*}}{r_{\Sigma 1*}} = \frac{0{,}363}{0{,}152} = 2{,}39;$$

$$K_{\text{уд1}} = 1{,}24;$$

$$i_{\text{уд1}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К1}} K_{\text{уд1}} = 1{,}41 \cdot 3{,}96 \cdot 1{,}24 = 6{,}92.$$

10. Определяем ударные токи, кА, в точках К2, К3. Находим ударные коэффициенты, $K_{\text{уд1}} = K_{\text{уд2}} = 1{,}8$.

$$i_{\text{уд2}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К2}} K_{\text{уд2}} = 1{,}41 \cdot 5{,}0 \cdot 1{,}8 = 12{,}69;$$

$$i_{\text{уд3}} = \sqrt{2} I_{\text{к.К3}} K_{\text{уд3}} = 1{,}41 \cdot 4{,}156 \cdot 1{,}8 = 10{,}54.$$

КЗ в удаленных от генератора точках ударный коэффициент определяют по кривой зависимости $K_{уд} = f(T_а)$ (рис. 5.3).

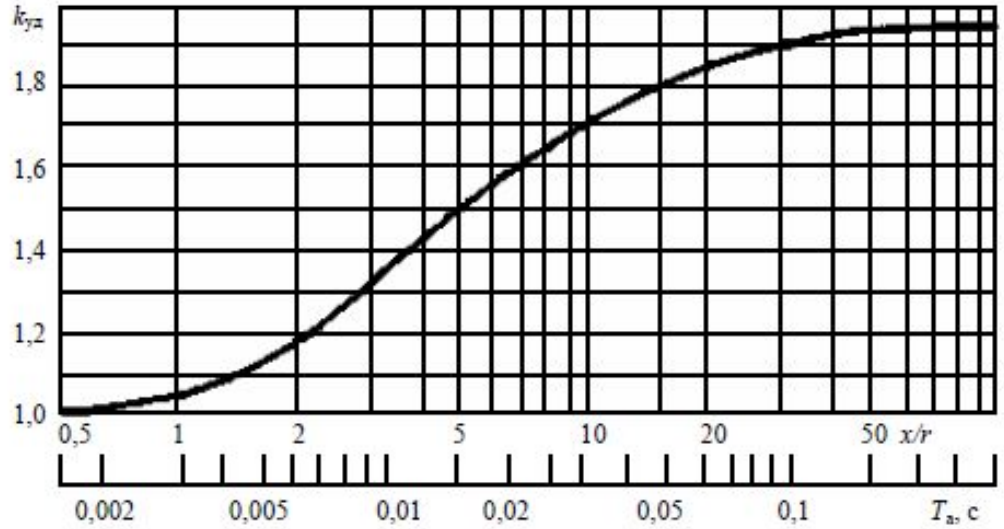


Рис. 5.3. Зависимость ударного коэффициента $K_{уд}$ от постоянной времени $T_а = x/r$

Таблица 5.3

Значения коэффициентов $K_{уд}$, q

Место короткого замыкания	Коэффициенты	
	$K_{уд}$	q
Выводы явнополюсного генератора без успокоительной обмотки	1,95	1,68
То же с успокоительной обмоткой	1,93	1,65
Выводы турбогенератора	1,91	1,63
В цепи, когда не учитывается активное сопротивление	1,8	1,52
На низшей стороне трансформаторов:		
1600; 2500	1,4	–
630; 1000 кВА	1,3	–
100; 250; 400 кВА	1,2	1,09
Удаленные точки КЗ с учетом величины активного сопротивления	По рис. 5.1	

Действующее значение полного тока КЗ за первый период определяют по формуле

$$I_у = I_{по}\sqrt{1 + 2(K_{уд} - 1)^2}\,. \qquad (5.6)$$

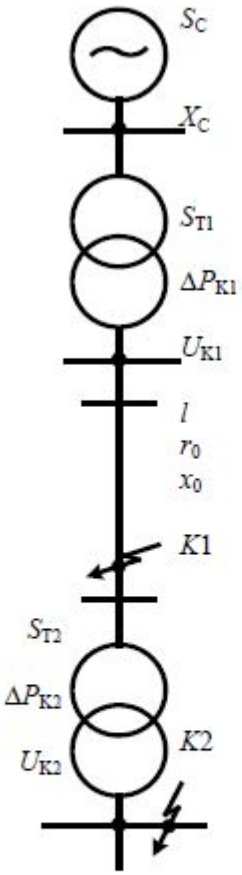


Рис. 5.1. Расчетная схема

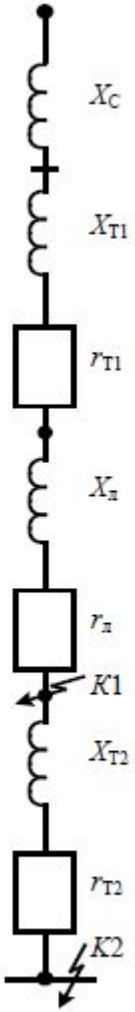


Рис. 5.2. Схема замещения

Таблица 5.1

Средние удельные значения индуктивных сопротивлений воздушных и кабельных линий электропередачи

Линия электропередачи	$x_{уд}$, Ом/км
Одноцепная воздушная линия, кВ:	
6–220	0,4
220–330 (при расщеплении на два провода в фазе)	0,325
400–500 (при расщеплении на три провода в фазе)	0,307
750 (при расщеплении на четыре провода в фазе)	0,28
Трехжильный кабель, кВ:	
6–10	0,08
35	0,12
Одножильный маслонаполненный кабель 110–220 кВ	0,16

Таблица 5.2

Расчетные выражения для определения приведенных значений сопротивлений

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы, о.е.
1	2	3	4
Генератор (G)	$x''_{d*ном}$; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = x''_{d*ном} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = x''_{d*ном} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
	x''_d, %; $S_{ном\,G}$, МВ·А	$x_б = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном\,G}}$	$x_{*б} = \frac{x''_d\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,G}}$
Энергосистема (C)	$S_к$, МВ·А	$x_б = \frac{U_б^2}{S_к}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{S_к}$
	$I_{откл.ном}$, кА	$x_б = \frac{U_б^2}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$	$x_{*б} = \frac{S_б}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{ср}}$
	$x_{*ном\,C}$; $S_{ном\,C}$, МВ·А	$x_б = x_{*номC} \frac{U_б^2}{S_{ном\,C}}$	$x_{*б} = x_{*номC} \frac{S_б}{S_{ном\,C}}$
Трансформатор (T)	$u_к$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_б = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*б} = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Автотрансформатор и трехобмоточный трансформатор (Т) (схема замещения – звезда)	$u_{к,B-C}$, %; $u_{к,B-H}$, %; $u_{к,C-H}$, %; $S_{ном}$, МВ·А	$x_{бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бB} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,B-H} - u_{к,C-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бC} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-C} + u_{к,C-H} - u_{к,B-H}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*бH} = \frac{1}{200}\left(u_{к,B-H} + u_{к,C-H} - u_{к,B-C}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$

1	2	3	4
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (Т)	$U_{к,В-Н}$, %; $S_{ном.т}$, МВ·А	$x_{бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$; $x_{б1} = x_{б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.т}}$	$x_{*бВ} = \left(\frac{u_{к,В-Н}}{100} - 0{,}5\frac{u_{к,Н1-Н2}}{100}\right)\frac{S_б}{S_{ном.т}}$; $x_{*б1} = x_{*б2} = \frac{2u_{к,В-Н}}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.т}}$
Синхронные и асинхронные электродвигатели, компенсаторы (M)	x''_d; $S_{ном.М}$, МВ·А	$x_б = x''_d \cdot \frac{U_б^2}{S_{ном.М}}$	$x_{*б} = x''_d \cdot \frac{S_б}{S_{ном.М}}$
Реактор (LR)	$x_{ном.LR}$, Ом	$x_б = x_{номLR}\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{номLR}\frac{S_б}{U_{ср}^2}$
Линия электропередачи (W)	$x_{уд}$, Ом/км; l, км	$x_б = x_{уд} \cdot l\frac{U_б^2}{U_{ср}^2}$	$x_{*б} = x_{уд} \cdot l\frac{S_б}{U_{ср}^2}$

Примечание: $S_{ном}$ – номинальные мощности элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), МВА; $S_б$ – базисная мощность, МВ·А; $S_к$ – мощность КЗ энергосистемы, МВ·А; $I_{откл.ном}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА; $x_{*ном.С}$ – относительное номинальное сопротивление энергосистемы; $u_к$% – напряжение КЗ трансформатора; $I_б$ – базисный ток, кА; $U_{ср}$ – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ; $x_{уд}$ – индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км; l – длина линии, км.

Таблица 5.4

Средние значения сверхпереходной ЭДС E''_* и сверхпереходного сопротивления x''_*, отнесенные к номинальной мощности источников питания

Источники питания	E''_*, отн. ед.	x''_*, отн. ед.
Турбогенератор до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор 100–500 МВт	1,13	0,2
Гидрогенератор с успокоительной обмоткой	1,13	0,2
Гидрогенератор без успокоительной обмотки	1,18	0,27
Синхронный компенсатор	1,2	0,2
Синхронный двигатель	1,1	0,2
Асинхронный двигатель	0,9	0,2