



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы в электро-
энергетике»

Сборник задач по дисциплине

«Переходные электромагнитные процессы в энергосистемах»

Автор
Шелест В.А.

Ростов-на-Дону, 2023



Аннотация

Сборник задач предназначен подготовки студентов всех форм обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Автор

К.т.н. доцент кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»
Шелест В.А.

Оглавление

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	4
1. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ СВЕРПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ	5
1.1. Расчет тока короткого замыкания в точке К1.....	9
1.2. Выбор реактора.....	15
1.3. Расчет тока короткого замыкания в точке К2.....	16
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕРПЕРЕХОДНЫХ И УДАРНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ С УЧЕТОМ ПОДПИТКИ	19
2.1. Расчеты для короткого замыкания в точке К1.....	21
2.2. Построение графиков токов короткого замыкания в точке К1.....	24
2.3. Расчеты для короткого замыкания в точке Кр.....	25
3. ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ	28
3.1. Расчеты для точки К1.....	28
3.2. Расчеты при коротком замыкании в точке К3.....	30
3.3. Построение графиков изменений токов и напряжений.....	32
4. РАСЧЕТЫ СВЕРХПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ	34
4.1. Схемы замещения.....	34
4.2. Расчет однофазного и двухфазного коротких замыканий.....	36
4.3. Расчет двухфазного короткого замыкания на землю..	37
Перечень использованных информационных ресурсов	38

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Переходные электромагнитные процессы в энергосистемах» предназначена для развития у студентов навыков самостоятельного расчета длительных нормальных и кратковременных аварийных режимов в электрических системах. Наиболее важным является определение критических параметров, необходимых для проектирования электрических станций, подстанций и сетей.

При разработке заданий использованы задачи, составленные С. А. Ульяновым [1, 2] и А.Д. Дроздовым [3,4].

Задание для практических занятий (контрольной работы для студентов заочной формы обучения) состоит из 4-х задач: определение токов короткого замыкания (ТКЗ) различными методами (№1), определение сверхпереходного и ударного ТКЗ с учетом подпитки (№2), определение ТКЗ и остаточных напряжений по расчетным кривым (№3) и определение сверхпереходных токов несимметричных коротких замыканий (№4).

При выполнении преобразований схем замещения следует приводить промежуточные схемы, дающие возможность видеть последовательность преобразования. Сопротивления всех элементов на схемах должны иметь порядковые номера. Выполнять задачи следует в порядке их размещения.

Для решения задач можно применить компьютерную программу MathCad [5]. Это позволит получить навыки применения этой программы, которые будут полезны при решении различных задач в процессе дальнейшего обучения и на производстве.

Полезной будет литература по теоретической части курса [6] и по справочной информации [7].

В отчете по практическим занятиям и контрольной работе приводится перечень использованной литературы.

1.МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ СВЕРПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ.

(Задача 1)

Для схемы рис. 1.1. определить сверхпереходный ток трехфазного КЗ в точке К1 без учета активных сопротивлений и в точке К2 с учетом активного сопротивления кабеля.

Расчет выполнить четырьмя методами:

- в именованных единицах с точным приведением;
- в относительных единицах с точным приведением;
- в именованных единицах с приближенным приведением;
- в относительных единицах с приближенным приведением.

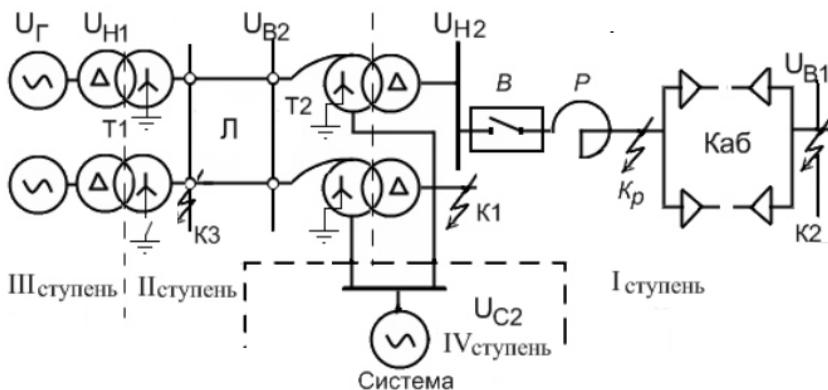


Рис.1.1. Схема электрической сети

Номер варианта

$nv := 1$

Gen :=

Таблица 1.1

Генераторы ГЭС						
N	Pном МВт	cosφ	Uном кВ	X''d Ω	X2 Ω	Ta сек
1	44	0.8	10.5	0.23	0.24	0.1
2	50.4	0.9	11	0.18	0.19	0.09
3	45	0.8	10.5	0.2	0.222	0.095
4	55	0.85	10.5	0.22	0.23	0.09
5	56	0.85	10.5	0.21	0.215	0.085
6	60	0.9	11	0.14	0.15	0.095
7	57	0.85	10.5	0.2	0.195	0.1

Извлечение параметров генератора из массива Gen:

- тип электростанции ГЭС

 - мощность генератора $P_{i\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,1} \cdot \text{MW} = 44 \cdot \text{MW}$

 - номинальный $\cos\varphi_{\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,2} = 0.8$

$$\sin\varphi_{\tilde{a}} := \sqrt{1 - \cos\varphi_{\tilde{a}}^2} = 0.6$$

номинальное напряжение

$$U_{i\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,3} \cdot \text{kV} = 10.5 \cdot \text{kV}$$

- сверхпереходное сопротивление генератора

$$X''_{d*i\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,4} = 0.23$$

- сопротивление обратной последовательности генератора

$$X_{2*i\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,5} = 0.24$$

- постоянная времени

$$T_{\tilde{a}} := \text{Gen}_{nv+2,6} \cdot \text{s} = 0.1 \text{ s}$$

Tr1 :=

Таблица 1.2

Трансформаторы электростанции

Tran	Sr1	Uвт1	Uнт1	Uкт1	Pк1
N	MVA	кВ	кВ	%	кВт
1	40	158	10.5	10	170
2	40	165	11	10.5	170
3	40	158	10.5	11	170
4	63	165	10.5	11.5	245
5	63	158	10.5	12	245
6	63	165	11	10	245
7	63	158	10.5	10.5	245

Параметры трансформаторов электростанции:

- мощность трансформатора

$$S_{\delta 1} := Tr1_{nv+2,1} \cdot MW = 40 \cdot MW$$

- высшее напряжение трансформатора

$$U_{\hat{\delta} 1} := Tr1_{nv+2,2} \cdot kV = 158 \cdot kV$$

- низшее напряжение трансформатора

$$U_{\hat{\delta} 1} := Tr1_{nv+2,3} \cdot kV = 10.5 \cdot kV$$

- напряжение короткого замыкания

$$u_{k\delta 1} := Tr1_{nv+2,4} \cdot \% = 10 \cdot \%$$

- потери короткого замыкания

$$P_{k\delta 1} := Tr1_{nv+2,5} \cdot kW = 170 \cdot kW$$

 $Tr2 :=$

Таблица 1.3

Трансформаторы подстанции						
Вар	Ст2	Увт2	Уст2	Унт2	Уквс	Уквн
N	MBA	кВ	кВ	кВ	%	%
1	80	150	115	6.6	11	24
2	100	150	121	11	11.5	26
3	80	150	115	6.6	12	28
4	100	150	121	11	12.5	30
5	80	150	115	6.6	13	32
6	100	150	121	11	11	24
7	80	150	115	6.6	11.5	26

Параметры автотрансформаторов подстанции:

- мощность автотрансформатора

$$S_{\delta 2} := Tr2_{nv+2,1} \cdot MW = 80 \cdot MW$$

- высшее напряжение автотрансформатора

$$U_{\hat{\delta} 2} := Tr2_{nv+2,2} \cdot kV = 150 \cdot kV$$

- среднее напряжение автотрансформатора

$$U_{CT2} := Tr2_{nv+2,3} \cdot kV = 115 \cdot kV$$

- низшее напряжение автотрансформатора

$$U_{\hat{\delta} 2} := Tr2_{nv+2,4} \cdot kV = 6.6 \cdot kV$$

- напряжения короткого замыкания

$$u_{k\hat{\delta} 2} := Tr2_{nv+2,5} \cdot \% = 11 \cdot \%$$

$$c_{k\hat{a}i} := Tr2_{nv+2,6} \cdot \% = 24 \cdot \%$$

$$c_{k\hat{n}i} := Tr2_{nv+2,7} \cdot \% = 13 \cdot \%$$

- потери короткого замыкания

$$P_{k\hat{a}n} := Tr2_{nv+2,8} \cdot kW = 220 \cdot kW$$

$$P_{k\hat{a}i} := Tr2_{nv+2,9} \cdot kW = 180 \cdot kW$$

$$P_{k\hat{n}i} := Tr2_{nv+2,10} \cdot kW = 140 \cdot kW$$

SRV :=

Таблица 1.4

Вар	Унс	Xс	Система Реактор		
			Xс/Rс	Унр	Інр
N	кВ	Ом	-	кВ	кА
1	110	4	7	6	0.4
2	110	5	8	10	0.63
3	110	6	9	6	1
4	110	7	10	10	0.4
5	110	8	11	6	0.63
6	110	4	7	10	1
7	110	5	8	6	0.4

Параметры системы:

- номинальное напряжение системы

$$U_{\hat{n}} := SRV_{nv+4,1} \cdot kV = 110 \cdot kV$$

- сопротивление системы

$$X_{\hat{n}} := SRV_{nv+2,2} \cdot ohm = 4 \cdot ohm$$

- отношение Xс к Rс

$$XkR := SRV_{nv+2,3} = 7$$

Параметры реактора:

- номинальное напряжение реактора

$$U_{i\hat{\delta}} := SRV_{nv+2,4} \cdot kV = 6 \cdot kV$$

- номинальный ток реактора

$$I_{i\hat{\delta}} := SRV_{nv+2,5} \cdot kA = 0.4 \cdot kA$$

Параметры выключателя:

- номинальный ток отключения выключателя

$$I_{i\hat{\delta}\hat{e}} := SRV_{nv+2,7} \cdot kA = 10 \cdot kA$$

Параметры воздушной линии передачи:

- длина воздушной линии

$$L_{\hat{e}} := LK_{nv+2,1} \cdot km = 40 \cdot km$$

- удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$X_{удл} := LK_{nv+2,2} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 0.4 \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

-сечение алюминиевых проодов

$$S_{i\delta\hat{a}} := LK_{nv+2,3} \cdot \text{mm}^2 = 70 \cdot \text{mm}^2$$

LK :=

Таблица 1.5

Вар	ЛЭП			Кабели		
	Ln	Xудл	Sпров	Lk	Xудк	Гудк
N	км	Ом/км	мм ²	км	Ом/км	Ом/км
1	40	0.4	70	1	0.078	0.326
2	41	0.41	70	1.5	0.081	0.258
3	42	0.42	70	2	0.074	0.206
4	43	0.4	70	2.5	0.077	0.167
5	44	0.41	70	3	0.071	0.129
6	45	0.42	95	1	0.083	0.326
7	46	0.4	95	1.5	0.076	0.258

Параметры кабельных линий:

- длина кабеля

$$L_{\hat{e}} := LK_{nv+2,5} \cdot \text{km} = 1 \cdot \text{km}$$

- удельное индуктивное сопротивление кабелей

$$X_{\acute{o}\acute{a}\acute{e}} := LK_{nv+2,6} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 0.078 \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

- удельное активное сопротивление кабелей

$$R_{\acute{o}\acute{a}\acute{e}} := LK_{nv+2,7} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 0.326 \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

Составляем схему замещения (рис. 1.2)

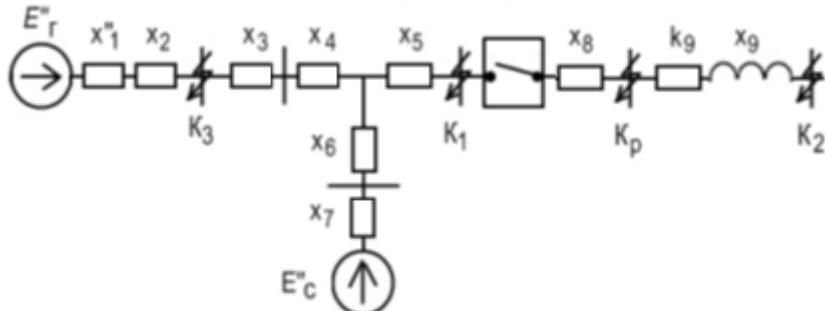


Рис.1.2. Схема замещения

1.1. Расчет тока короткого замыкания в точке K_1

1.1.1. Расчет в именованных единицах с точным приведением

Расчет приведенных сопротивлений:

генераторов

$$X_{i1} := X_{d1} \cdot \frac{\cos \varphi_{\hat{a}} \cdot U_{f\hat{a}}^2}{2 \cdot P_{f\hat{a}}} \cdot \left(\frac{U_{\hat{\delta}1}}{U_{f\hat{\delta}1}} \cdot \frac{U_{f\hat{\delta}2}}{U_{\hat{\delta}2}} \right)^2 = 0.101 \Omega$$

трансформаторов электростанции

$$X_{i2} := \frac{u_{k\hat{\delta}1}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\hat{\delta}1}^2}{2 \cdot S_{\hat{\delta}1}} \cdot \left(\frac{U_{f\hat{\delta}2}}{U_{\hat{\delta}2}} \right)^2 = 0.06 \Omega$$

воздушной линии

$$X_{i3} := X_{\hat{\delta}\hat{\delta}} \cdot L_{\hat{\delta}} \cdot \left(\frac{U_{f\hat{\delta}2}}{U_{\hat{\delta}2}} \right)^2 = 0.031 \Omega$$

автотрансформаторов подстанции

Напряжение КЗ, приходящееся на одну обмотку

$$u_{k\hat{a}} := 0.5 \cdot (u_{k\hat{a}\hat{n}} + u_{k\hat{a}\hat{i}} - u_{k\hat{n}\hat{i}}) = 11 \cdot \%$$

$$u_{k\hat{n}} := 0.5 \cdot (u_{k\hat{a}\hat{n}} + u_{k\hat{n}\hat{i}} - u_{k\hat{a}\hat{i}}) = 0 \cdot \%$$

$$u_{k\hat{i}} := 0.5 \cdot (u_{k\hat{a}\hat{i}} + u_{k\hat{n}\hat{i}} - u_{k\hat{a}\hat{n}}) = 13 \cdot \%$$

$$X_{i4} := \frac{u_{k\hat{a}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{f\hat{\delta}2}^2}{2 \cdot S_{\hat{\delta}2}} = 0.03 \Omega$$

$$X_{i5} := \frac{u_{k\hat{i}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{f\hat{\delta}2}^2}{2 \cdot S_{\hat{\delta}2}} = 0.035 \Omega$$

$$X_{i6} := 0$$

системы

$$X_{i7} := X_{\hat{n}} \cdot \left(\frac{U_{f\hat{\delta}2}}{U_{\hat{n}\hat{\delta}2}} \right)^2 = 0.013 \Omega$$

Определение сверхпереходных ЭДС

Электростанции

$$E_{\Gamma\Gamma}'' := U_{\text{HT}} \cdot \sqrt{\left(1 + X''_{d\Gamma\text{HT}} \cdot \sin\varphi_{\Gamma}\right)^2 + \left(X''_{d\Gamma\text{HT}} \cdot \cos\varphi_{\Gamma}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{BT1}}}{U_{\text{HT1}}} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}}{U_{\text{BT2}}} = 8.014 \cdot \text{kV}$$

СИСТЕМЫ

$$E_{\tilde{n}}'' := U_{\tilde{n}} \cdot \frac{U_{\tilde{n}\delta 2}}{U_{\tilde{n}\delta 2}} = 6.313 \cdot \text{kV}$$

Определение эквивалентных параметров. преобразуем схему замещения для K1 (рис.1.3)

$$X_{\tilde{i}10} := X_{\tilde{i}1}'' + X_{\tilde{i}2} + X_{\tilde{i}3} + X_{\tilde{i}4} = 0.222 \Omega$$

$$X_{\tilde{i}11} := X_{\tilde{i}6} + X_{\tilde{i}7} = 0.013 \Omega$$

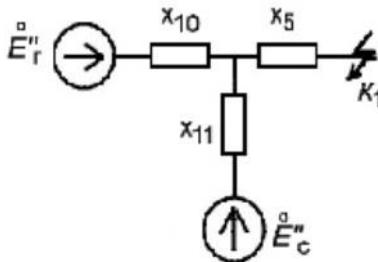


Рис.1.3. Упрощенная схема замещений

Эквивалентная ЭДС

$$E_{\tilde{i}}'' := \frac{E_{\tilde{i}\tilde{a}}'' \cdot \frac{1}{X_{\tilde{i}10}} + E_{\tilde{i}\tilde{n}}'' \cdot \frac{1}{X_{\tilde{i}11}}}{\frac{1}{X_{\tilde{i}10}} + \frac{1}{X_{\tilde{i}11}}} = 6.408 \cdot \text{kV}$$

Эквивалентное сопротивление

$$X_{\tilde{i}\Sigma k1}'' := \frac{X_{\tilde{i}10} \cdot X_{\tilde{i}11}}{X_{\tilde{i}10} + X_{\tilde{i}11}} + X_{\tilde{i}5} = 0.048 \Omega$$

Ток КЗ в точке K1

$$I_{\tilde{k}1\delta\delta}'' := \frac{E_{\tilde{i}}''}{\sqrt{3} \cdot X_{\tilde{i}\Sigma k1}''} = 77.351 \cdot \text{kA}$$

1.1.2. Расчет в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации.

Принимаем $S_{\tilde{a}} := 1000 \cdot \text{MW}$

Определяем базисные напряжения

$$U_{\acute{a}1} := U_{\acute{f}\grave{o}2} = 6.6 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\acute{a}2} := U_{\acute{a}1} \cdot \frac{U_{\acute{a}\grave{o}2}}{U_{\acute{f}\grave{o}2}} = 150 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\acute{a}3} := U_{\acute{a}2} \cdot \frac{U_{\acute{f}\grave{o}1}}{U_{\acute{a}\grave{o}1}} = 9.968 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\acute{a}4} := U_{\acute{a}1} \cdot \frac{U_{\acute{n}\grave{o}2}}{U_{\acute{f}\grave{o}2}} = 115 \cdot \text{kV}$$

Определяем базисный ток I степени

$$I_{\acute{a}1} := \frac{S_{\acute{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\acute{a}1}} = 87.477 \cdot \text{kA}$$

Расчет сопротивлений

генераторов

$$X_{*1} := X_{\acute{d}*\acute{f}\grave{a}} \cdot \frac{S_{\acute{a}} \cdot \cos \varphi_{\acute{a}}}{2 \cdot P_{\acute{f}\grave{a}}} \cdot \left(\frac{U_{\acute{f}\grave{a}}}{U_{\acute{a}3}} \right)^2 = 2.32$$

трансформаторов электростанции

$$X_{*2} := \frac{u_{\acute{k}\grave{o}1}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\acute{o}1}} \cdot \left(\frac{U_{\acute{a}\grave{o}1}}{U_{\acute{a}2}} \right)^2 = 1.387$$

воздушной линии

$$X_{*3} := X_{\acute{o}\acute{a}\acute{e}} \cdot L_{\acute{e}} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{U_{\acute{a}2}^2} = 0.711$$

трансформаторов подстанции

$$X_{*4} := \frac{u_{\acute{k}\acute{a}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\acute{o}2}} \cdot \left(\frac{U_{\acute{a}\grave{o}2}}{U_{\acute{a}2}} \right)^2 = 0.687$$

$$X_{*6} := 0$$

$$X_{*5} := \frac{u_{\acute{k}\acute{i}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\acute{o}2}} \cdot \left(\frac{U_{\acute{f}\grave{o}2}}{U_{\acute{a}1}} \right)^2 = 0.813$$

СИСТЕМЫ

$$X_{*7} := X_{\acute{n}} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{U_{\acute{a}4}^2} = 0.302$$

Определение сверхпереходных ЭДС

электростанции

$$E_{\acute{a}} := U_{\acute{f}\grave{a}} \cdot \sqrt{\left(1 + X_{\acute{d}*}\sin \varphi_{\acute{a}} \right)^2 + \left(X_{\acute{d}*}\cos \varphi_{\acute{a}} \right)^2} = 12.104 \cdot \text{kV}$$

$$E''_{*ā} := \frac{E''_{\tilde{a}}}{U_{\tilde{a}3}} = 1.214$$

системы

$$E''_{*\tilde{n}} := \frac{U_{\tilde{n}}}{U_{\tilde{a}4}} = 0.957$$

Определение эквивалентных параметров.

Преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3.)

$$X_{*10} := X_{*1} + X_{*2} + X_{*3} + X_{*4} = 5.105$$

$$X_{*11} := X_{*6} + X_{*7} = 0.302$$

Эквивалентная ЭДС

$$E''_{*k1} := \frac{E''_{*\tilde{a}} \cdot \frac{1}{X_{*10}} + E''_{*\tilde{n}} \cdot \frac{1}{X_{*11}}}{\frac{1}{X_{*10}} + \frac{1}{X_{*11}}} = 0.971$$

Эквивалентное сопротивление

$$X''_{*\Sigma k1} := \frac{X_{*10} \cdot X_{*11}}{X_{*10} + X_{*11}} + X_{*5} = 1.098$$

Ток в точке К1

$$I_{k1\hat{\delta}} := \frac{E''_{*k1}}{X''_{*\Sigma k1}} \cdot I_{\hat{a}1} = 77.351 \cdot \text{kA}$$

1.1.3. Расчет именованных единиц с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Замена напряжений обмоток трансформаторов на средние номинальные напряжения

Вводим вектор средних номинальных напряжений

$$U_{\text{срн}} := \begin{pmatrix} 340 \cdot \text{kV} \\ 230 \cdot \text{kV} \\ 154 \cdot \text{kV} \\ 115 \cdot \text{kV} \\ 37 \cdot \text{kV} \\ 24 \cdot \text{kV} \\ 20 \cdot \text{kV} \\ 18 \cdot \text{kV} \\ 15.75 \cdot \text{kV} \\ 13.8 \cdot \text{kV} \\ 10.5 \cdot \text{kV} \\ 6.3 \cdot \text{kV} \end{pmatrix}$$

Выбор ближайших средних номинальных напряжений из вектора

$$U_{\tilde{n}1} := U_{\hat{a}01} = 158 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}\hat{a}01} := U_{\tilde{n}0}(U_{\tilde{n}\hat{a}1}, U_{\tilde{n}1}) = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}1} := U_{\hat{a}02} = 150 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}\hat{a}02} := U_{\tilde{n}0}(U_{\tilde{n}\hat{a}1}, U_{\tilde{n}1}) = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}1} := U_{\tilde{n}02} = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}\tilde{n}02} := U_{\tilde{n}0}(U_{\tilde{n}\hat{a}1}, U_{\tilde{n}1}) = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}1} := U_{\hat{i}02} = 6.6 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\tilde{n}\hat{i}02} := U_{\tilde{n}0}(U_{\tilde{n}\hat{a}1}, U_{\tilde{n}1}) = 6.3 \cdot \text{kV}$$

Расчет приведенных приближенных сопротивлений генераторов

$$X_{\tilde{n}1} := X_{d^* \tilde{f}\tilde{a}} \cdot \frac{\cos \varphi_{\tilde{a}} \cdot U_{\tilde{n}\hat{i}02}^2}{2 \cdot P_{\tilde{f}\tilde{a}}} = 0.083 \Omega$$

трансформаторов электростанции

$$X_{\tilde{n}2} := \frac{u_{k01}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\tilde{n}\hat{i}02}^2}{2 \cdot S_{01}} = 0.05 \Omega$$

$$X_{\tilde{n}3} := X_{0\tilde{a}\tilde{e}} \cdot L_{\tilde{e}} \cdot \left(\frac{U_{\tilde{n}\hat{i}02}}{U_{\tilde{n}\hat{a}02}} \right)^2 = 0.027 \Omega$$

воздушной линии

автотрансформаторов подстанции

$$X_{\tilde{n}6} := 0$$

$$X_{\tilde{n}4} := \frac{u_{k\tilde{a}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\tilde{n}\hat{i}02}^2}{2 \cdot S_{02}} = 0.027 \Omega$$

$$X_{\tilde{n}5} := \frac{u_{k\tilde{i}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\tilde{n}\hat{i}02}^2}{2 \cdot S_{02}} = 0.032 \Omega$$

системы

$$X_{\tilde{n}7} := X_{\tilde{n}} \cdot \left(\frac{U_{\tilde{n}\hat{i}02}}{U_{\tilde{n}\tilde{n}02}} \right)^2 = 0.012 \Omega$$

Определение сверхпереходных ЭДС.

При приближенном расчете приведенная эквивалентная ЭДС равна среднему номинальному напряжению I ступени.

$$E_{\tilde{n}1} := U_{\tilde{n}\hat{i}02} = 6.3 \cdot \text{kV}$$

Преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3.)

$$X_{\tilde{n}10} := X_{\tilde{n}1} + X_{\tilde{n}2} + X_{\tilde{n}3} + X_{\tilde{n}4} = 0.187 \Omega$$

$$X_{\tilde{n}11} := X_{\tilde{n}6} + X_{\tilde{n}7} = 0.012 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$X_{\text{II}''} \Sigma_{\text{K1}} := \frac{X_{\text{II}10} \cdot X_{\text{II}11}}{X_{\text{II}10} + X_{\text{II}11}} + X_{\text{II}5} = 0.044 \Omega$$

Ток КЗ в точке К1

$$I_{\text{K1}} \text{II}'' := \frac{E_{\text{II}''}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{II}''} \Sigma_{\text{K1}}} = 83.564 \cdot \text{kA}$$

1.1.4. Расчет в относительных единицах с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Замена напряжений обмоток трансформаторов как в пункте 1.1.3.

Базисные напряжения принимаем равными соответствующим средним номинальным напряжениям.

$$U_{\text{н}\delta\acute{a}1} := U_{\text{н}\delta\acute{o}2} = 6.3 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{н}\delta\acute{a}2} := U_{\text{н}\delta\acute{o}2} = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{н}\delta\acute{a}3} := U_{\text{н}\delta\acute{o}1} = 10.5 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{н}\delta\acute{a}4} := U_{\text{н}\delta\acute{o}2} = 115 \cdot \text{kV}$$

Базисный ток I ступени

$$I_{\text{н}\delta\acute{a}1} := \frac{S_{\acute{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}\delta\acute{a}1}} = 91.643 \cdot \text{kA}$$

Расчет сопротивлений генераторов

$$X_{\text{I}^*1} := X_{\text{d}^*1\acute{a}} \cdot \frac{S_{\acute{a}} \cdot \cos \varphi_{\acute{a}}}{2 \cdot P_{\text{I}\acute{a}}} = 2.091$$

трансформаторов электростанции

$$X_{\text{I}^*2} := \frac{u_{\text{K}\delta 1}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\delta 1}} = 1.25$$

воздушной линии

$$X_{\text{I}^*3} := X_{\text{ó}\acute{a}\acute{e}} \cdot L_{\acute{e}} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{U_{\text{н}\delta\acute{a}2}^2} = 0.675$$

трансформаторов подстанции

$$X_{\text{I}^*4} := \frac{u_{\text{K}\acute{a}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\delta 2}} = 0.687$$

$$X_{\text{I}^*5} := \frac{u_{\text{K}\acute{i}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\acute{a}}}{2 \cdot S_{\delta 2}} = 0.813$$

$$X_{\text{I}^*6} := 0$$

системы

$$X_{i*7} := X_{i*} \cdot \frac{S_a}{U_{\text{н\delta\acute{a}4}}^2} = 0.302$$

Эквивалентная сверхпереходная ЭДС $E_{i*k1} := 1$

Преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3.)

$$X_{i*10} := X_{i*1} + X_{i*2} + X_{i*3} + X_{i*4} = 4.703$$

$$X_{i*11} := X_{i*6} + X_{i*7} = 0.302$$

Эквивалентное сопротивление

$$X_{i*\Sigma k1} := \frac{X_{i*10} \cdot X_{i*11}}{X_{i*10} + X_{i*11}} + X_{i*5} = 1.097$$

Ток КЗ в точке К1

$$I_{k1\text{н\delta\acute{a}1}} := \frac{E_{i*k1}}{X_{i*\Sigma k1}} \cdot I_{\text{н\delta\acute{a}1}} = 83.564 \cdot \text{kA}$$

1.2. Выбор реактора

Реактор должен ограничивать ТКЗ в точке Кр до тока отключения выключателя. Тогда необходимое сопротивление реактора

$$X_{\delta} := \frac{E_{i*}}{I_{\text{н\delta\acute{a}1}}} - X_{i*\Sigma k1} = 0.593 \Omega$$

Переводим сопротивление реактора в %

$$X_{\delta\%} := X_{\delta} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н\delta\acute{a}1}} \cdot 100 \cdot \%}{U_{\text{н\delta\acute{a}1}}} = 6.847 \cdot \%$$

Вводим вектор стандартных сопротивлений ректора в %

$$X_{\text{рст}} := \begin{pmatrix} 3\% \\ 4\% \\ 5\% \\ 6\% \\ 7\% \\ 8\% \\ 10\% \\ 12\% \\ 15\% \\ 20\% \\ 25\% \\ 30\% \end{pmatrix}$$

Выбор ближайшего стандартного сопротивления ректора в %.

$$X_{\delta\tilde{\delta}\%} := X_{\tilde{\delta}\%}(X_{\delta\tilde{\delta}\%}, X_{\delta\%}) = 7\%$$

1.3. Расчет тока короткого замыкания в точке K₂

1.3.1. Расчет в именованных единицах с точным приведением.

Расчет сопротивлений
реактора

$$X_8 := \frac{X_{\delta\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{f\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{f\delta}} = 0.593 \Omega$$

кабеля

$$X_9 := \frac{1}{2} \cdot X_{\delta\tilde{\delta}} \cdot L_{\tilde{\delta}} = 0.039 \Omega$$

$$R_9 := \frac{1}{2} \cdot R_{\delta\tilde{\delta}} \cdot L_{\tilde{\delta}} = 0.163 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{1'' \Sigma K2} := \sqrt{(X_{1'' \Sigma K1} + X_8 + X_9) \cdot (X_{1'' \Sigma K1} + X_8 + X_9) + R_9^2} = 0.699 \Omega$$

Ток КЗ в точке K₂

$$I_{\tilde{\delta}\%} := \frac{E_{1''}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1'' \Sigma K2}} = 5.292 \text{ kA}$$

1.3.2. Расчет в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации.

Расчет сопротивления
реактора

$$X_{*8} := X_8 \cdot \frac{S_{\tilde{\delta}}}{U_{\tilde{\delta}1}^2} = 13.613$$

кабеля

$$X_{*9} := X_9 \cdot \frac{S_{\tilde{\delta}}}{U_{\tilde{\delta}1}^2} = 0.895$$

$$R_{*9} := R_9 \cdot \frac{S_{\tilde{\delta}}}{U_{\tilde{\delta}1}^2} = 3.742$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{1'' \Sigma K2} := \sqrt{(X_{1'' \Sigma K1} + X_{*8} + X_{*9}) \cdot (X_{1'' \Sigma K1} + X_{*8} + X_{*9}) + R_{*9}^2} = 16.049$$

Ток КЗ в точке K₂

$$I_{\text{в2в1}} := \frac{E_{\text{к1}}}{Z_{\Sigma \text{к2}}} \cdot I_{\text{а1}} = 5.292 \cdot \text{kA}$$

1.3.3. Расчет в именованных единицах с приближенным приведением.

Расчет сопротивлений

реактора

$$X_{\text{г8}} := X_{\text{г}} = 0.593 \Omega$$

кабеля

$$X_{\text{г9}} := X_{\text{г}} = 0.039 \Omega$$

$$R_{\text{г9}} := R_{\text{г}} = 0.163 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{\text{г1}}^{\Sigma \text{к2}} := \sqrt{(X_{\text{г1}}^{\Sigma \text{к1}} + X_{\text{г8}} + X_{\text{г9}})^2 + R_{\text{г9}}^2} = 0.695 \Omega$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{\text{в2в1}} := \frac{E_{\text{г1}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{г1}}^{\Sigma \text{к2}}} = 5.234 \cdot \text{kA}$$

1.3.4. расчет в относительных единицах с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Расчет сопротивлений

реактора

$$X_{\text{г*8}} := X_{\text{г8}} \cdot \frac{S_{\text{а}}}{U_{\text{н\delta\а1}}^2} = 14.94$$

кабеля

$$X_{\text{г*9}} := X_{\text{г9}} \cdot \frac{S_{\text{а}}}{U_{\text{н\delta\а1}}^2} = 0.983$$

$$R_{\text{г*9}} := R_{\text{г9}} \cdot \frac{S_{\text{а}}}{U_{\text{н\delta\а1}}^2} = 4.107$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{\text{г1}^*}^{\Sigma \text{к2}} := \sqrt{(X_{\text{г1}^*}^{\Sigma \text{к1}} + X_{\text{г*8}} + X_{\text{г*9}})^2 + R_{\text{г*9}}^2} = 17.508$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{\text{в2в1}} := \frac{E_{\text{г*к1}}}{Z_{\text{г1}^*}^{\Sigma \text{к2}}} \cdot I_{\text{н\delta\а1}} = 5.234 \cdot \text{kA}$$

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕРПЕРЕХОДНЫХ И УДАРНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ С УЧЕТОМ ПОДПИТКИ

(Задача 2)

Для схемы (рис.2.1.) определить сверхпереходный и ударный ток КЗ в точке К1 с учетом подпитки от синхронного компенсатора (СК), нагрузки и асинхронного двигателя (АД). Построить осциллограммы ТКЗ от синхронного компенсатора, нагрузки и питающей сети для 3х периодов. Определить сверхпереходный ТКЗ в точке Кр и остаточное напряжение на шинах.

Дано:

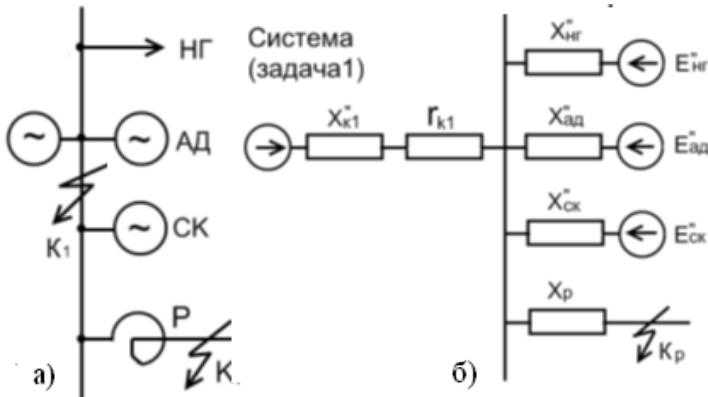


Рис. 2.1. Упрощенная схема(а) и схема замещения(б)

Нагр :=

Таблица 2.1

вар№	Нагрузка		cosφ _{нг}
	U _{нг} кВ	P _{нг} МВт	
1	6	40	0,8
2	10	50	0,85
3	6	60	0,9
4	10	40	0,8
5	6	50	0,85
6	10	60	0,9
7	6	40	0,8

Параметры нагрузки:

- номинальное напряжение

$$U_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := N_{\text{agr}_{\text{nv}+2,1}} \cdot \text{kV} = 6 \cdot \text{kV}$$

- активная мощность

$$P_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := N_{\text{agr}_{\text{nv}+2,2}} \cdot \text{MW} = 40 \cdot \text{MW}$$

- коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := N_{\text{agr}_{\text{nv}+2,3}} = 0.8$$

Параметры обобщенной нагрузки:

- сверхпереходное сопротивление $X''_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := 0.35$

- сверхпереходная ЭДС $E''_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := 0.85$

- ударный коэффициент $k_{\text{of}\ddot{a}\ddot{a}} := 1$

AD :=

Таблица 2.2

Асинхронные двигатели						
вар№	Uад	Rкад	cosφ	Кпуск	КуАД	Iад
	кВ	кВт				*Н
1	6	3200	0,74	5,2	1,5	0,7
2	10	3500	0,75	5,5	1,55	0,75
3	6	4000	0,78	6	1,6	0,8
4	10	5000	0,79	6,5	1,65	0,85
5	6	6300	0,8	7	1,7	0,9
6	10	3200	0,81	5,2	1,5	0,7
7	6	3500	0,83	5,5	1,55	0,75

Параметры АД:

- номинальное напряжение $U_{\text{ад}} := AD_{\text{nv}+2,1} \cdot \text{kV} = 6 \cdot \text{kV}$

- активная мощность $P_{\text{ад}} := AD_{\text{nv}+2,2} \cdot \text{kW} = 3.2 \times 10^3 \cdot \text{kW}$

$$\cos \varphi_{\text{ад}} := AD_{\text{nv}+2,3} = 0.74$$

СК :=

Таблица 2.3

Синхронные компенсаторы					
вар№	Uск	Qск	X''дск	Tаск	Iск
	кВ	МВАр	*Н	сек	*Н
1	6,6	5	0,16	0,14	0,75
2	11	10	0,18	0,15	0,8
3	6,6	16	0,2	0,16	0,85
4	11	25	0,22	0,17	0,9
5	6,6	32	0,24	0,18	0,95
6	11	10	0,16	0,19	0,75
7	6,6	16	0,18	0,2	0,8

- коэффициент мощности

- коэффициент пуска $k_{\text{f}\ddot{a}\ddot{a}} := AD_{\text{nv}+2,4} = 5.2$

- ударный коэффициент $k_{\text{о\ddot{a}a}} := AD_{\text{nv}+2,5} = 1.5$
- загрузка асинхронного двигателя $I_{*\ddot{a}a} := AD_{\text{nv}+2,6} = 0.7$

Параметры СК:

- номинальное напряжение $U_{\text{н\hat{e}}} := CK_{\text{nv}+2,1} \cdot \text{kV} = 6.6 \cdot \text{kV}$
- реактивная мощность $Q_{\text{н\hat{e}}} := CK_{\text{nv}+2,2} \cdot \text{MW} = 5 \cdot \text{MW}$
- сверхпереходное сопротивление СК $X_{*\text{dн\hat{e}}} := CK_{\text{nv}+2,3} = 0.16$
- постоянная времени СК $T_{\text{\ddot{a}н\hat{e}}} := CK_{\text{nv}+2,4} \cdot \text{s} = 0.14 \text{ s}$
- загрузка СК $I_{*\text{н\hat{e}}} := CK_{\text{nv}+2,5} = 0.75$

Параметры реактора:

- номинальный ток реактора $I_{\text{f}\ddot{o}} = 0.4 \cdot \text{kA}$
- номинальное напряжение реактора $U_{\text{f}\ddot{o}} = 6 \cdot \text{kV}$
- сопротивление реактора $X_{\text{\ddot{o}н\ddot{o}}\%} = 7\%$

Параметры системы:

- эквивалентное индуктивное сопротивление системы из точного расчета в именованных единицах $X_{\text{r}''\Sigma\text{k1}} = 0.048 \Omega$
- ток короткого замыкания от системы $I_{\text{k1}\ddot{o}\ddot{e}\text{i}} = 77.351 \cdot \text{kA}$
- сверхпереходное приведенное сопротивление генератора $X_{\text{r}''1} = 0.101 \Omega$
- постоянная времени генератора $T_{\text{\ddot{a}}} = 0.1 \text{ s}$
- мощность потерь КЗ в трансформаторе Т1 $P_{\text{k}\ddot{o}1} = 170 \cdot \text{kW}$
- мощность трансформатора Т1 $S_{\ddot{o}1} = 40 \cdot \text{MW}$
- номинальные напряжения Т1 $U_{\text{f}\ddot{o}1} = 10.5 \cdot \text{kV}$, $U_{\text{\ddot{a}}\ddot{o}1} = 158 \cdot \text{kV}$
- мощности потерь КЗ в обмотках трансформатора Т2 $P_{\text{k}\ddot{a}\text{n}} = 220 \cdot \text{kW}$, $P_{\text{k}\ddot{a}\text{f}} = 180 \cdot \text{kW}$, $P_{\text{k}\text{n}\text{f}} = 140 \cdot \text{kW}$
- мощность трансформатора Т2 $S_{\ddot{o}2} = 80 \cdot \text{MW}$
- номинальное напряжение Т2 $U_{\text{\ddot{a}}\ddot{o}2} = 150 \cdot \text{kV}$, $U_{\text{\ddot{n}}\ddot{o}2} = 115 \cdot \text{kV}$, $U_{\text{f}\ddot{o}2} = 6.6 \cdot \text{kV}$
- длина воздушной линии $L_{\text{\ddot{e}}} = 40 \cdot \text{km}$
- сечение алюминиевых проводов $S_{\text{r}\ddot{o}\text{f}\ddot{a}} = 70 \cdot \text{mm}^2$
- проводимость алюминия $\gamma_{\text{\ddot{a}e}} := 32 \cdot \frac{10^6}{\Omega \cdot \text{m}}$

- для системы в задаче 1 $X_{kR} = 7$
- индуктивное приведенное сопротивление системы $X_{17} = 0.013 \Omega$

2.1. Расчеты для короткого замыкания в точке К₁

Определяем сверхпереходную ЭДС:

СК:

$$E''_{*n\hat{e}} := \frac{U_{\hat{n}\hat{o}}}{U_{\hat{n}\hat{e}}} + I''_{*n\hat{e}} \cdot X''_{d\hat{n}\hat{e}} = 1.075$$

АД:

$$E''_{*a\hat{a}} := \frac{U_{\hat{n}\hat{o}}}{U_{a\hat{a}}} - I''_{*a\hat{a}} \cdot \frac{1}{k_{\hat{o}\hat{n}\hat{e}}} \cdot \sqrt{1 - \cos\varphi_{a\hat{a}}} = 0.959$$

Определяем токи короткого замыкания в точке К₁ от СК:

$$I''_{n\hat{e}} := \frac{E''_{*n\hat{e}}}{X''_{d\hat{n}\hat{e}}} \cdot \frac{Q_{\hat{n}\hat{e}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\hat{n}\hat{e}}} = 2.937 \cdot \text{kA}$$

АД:

$$I''_{a\hat{a}} := \frac{E''_{*a\hat{a}}}{\frac{1}{k_{\hat{o}\hat{n}\hat{e}}}} \cdot \frac{P_{a\hat{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{a\hat{a}} \cdot \cos\varphi_{a\hat{a}}} = 2.076 \cdot \text{kA}$$

Обобщенная нагрузка:

$$I''_{\hat{a}\hat{a}} := \frac{E''_{*f\hat{a}\hat{a}}}{X''_{f\hat{a}\hat{a}}} \cdot \frac{P_{\hat{a}\hat{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\hat{a}\hat{a}} \cdot \cos\varphi_{\hat{a}\hat{a}}} = 11.684 \cdot \text{kA}$$

Ток КЗ в точке К₁ с учетом ТКЗ от системы

$$I''_{\Sigma\hat{e}1} := I''_{k1\hat{o}\hat{e}1} + I''_{n\hat{e}} + I''_{a\hat{a}} + I''_{\hat{a}\hat{a}} = 94.049 \cdot \text{kA}$$

Определяем ударные коэффициенты:

СК:

$$k_{\hat{o}\hat{n}\hat{e}} := 1 + e^{-\frac{0.01 \cdot s}{T_{a\hat{n}\hat{e}}}} = 1.931$$

$$k_{\hat{o}\hat{a}\hat{a}} = 1.5$$

АД:

Обобщенная нагрузка:

$$k_{\text{отд}} = 1$$

Система (схема в задаче 1):

активное сопротивление генераторов:

$$R_{\text{Г1}} := \frac{X_{\text{Г1}}}{\frac{314}{1 \cdot \text{s}} \cdot T_{\text{а}}} = 3.218 \times 10^{-3} \Omega$$

активное сопротивление трансформаторов электростанции

$$R_{\text{Т2}} := \frac{P_{\text{кд1}}}{S_{\text{д1}}} \cdot \frac{U_{\text{д1}}^2}{2 \cdot S_{\text{д1}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{фд2}}}{U_{\text{д2}}} \right)^2 = 2.568 \times 10^{-3} \Omega$$

активное сопротивление воздушной линии

$$R_{\text{Л3}} := \frac{L_{\text{л}}}{\gamma_{\text{л}} \cdot S_{\text{л}} \cdot 2} \cdot \left(\frac{U_{\text{фд2}}}{U_{\text{д2}}} \right)^2 = 0.017 \Omega$$

Активные сопротивления трансформаторов подстанции.

Определяем потери мощности КЗ в обмотках трансформатора Т2.

$$P_{\text{кд}} := 0.5 \cdot (P_{\text{кд1}} + P_{\text{кдн}} - P_{\text{кдн}}) = 130 \cdot \text{kW}$$

$$P_{\text{кн}} := 0.5 \cdot (P_{\text{кн1}} + P_{\text{кдн}} - P_{\text{кд1}}) = 90 \cdot \text{kW}$$

$$P_{\text{кф}} := 0.5 \cdot (P_{\text{кд1}} + P_{\text{кн1}} - P_{\text{кдн}}) = 50 \cdot \text{kW}$$

Активные сопротивления в относительных номинальных единицах

$$R_{\text{д1}} := \frac{P_{\text{кд}}}{S_{\text{д2}}} = 1.625 \times 10^{-3}$$

$$R_{\text{н1}} := \frac{P_{\text{кн}}}{S_{\text{д2}}} = 1.125 \times 10^{-3}$$

$$R_{\text{ф1}} := \frac{P_{\text{кф}}}{S_{\text{д2}}} = 6.25 \times 10^{-4}$$

Активные сопротивления в именованных единицах

$$R_{\text{Т4}} := R_{\text{д1}} \cdot \frac{U_{\text{фд2}}^2}{2 \cdot S_{\text{д2}}} = 4.424 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_{\text{Л5}} := R_{\text{ф1}} \cdot \frac{U_{\text{фд2}}^2}{2 \cdot S_{\text{д2}}} = 1.702 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_{i6} := R_{\bar{n}i} \cdot \frac{U_{i\delta 2}^2}{2 \cdot S_{\delta 2}} = 3.063 \times 10^{-4} \Omega$$

Схема замещения для активного сопротивления аналогична рис.1.2. Преобразуем ее:

$$R_{i10} := R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4} = 0.024 \Omega$$

$$R_{i11} := R_{i6} + \frac{X_{i7}}{X_{kR}} = 2.188 \times 10^{-3} \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{i \Sigma k1} := \frac{R_{i10} \cdot R_{i11}}{R_{i10} + R_{i11}} = 2.002 \times 10^{-3} \Omega$$

Постоянная времени переходного процесса

$$T_{k1} := \frac{X_{i'' \Sigma k1}}{314 \cdot \frac{1}{s} \cdot R_{i \Sigma k1}} = 0.076 \text{ s}$$

Ударный коэффициент для системы

$$k_{\delta \bar{n}} := 1 + e^{-\frac{0.01 \cdot s}{T_{k1}}} = 1.877$$

Суммарный ударный ток КЗ в точке К1

$$i_{\Sigma \delta k1} := \sqrt{2} \cdot (k_{\delta \bar{n}} \cdot I_{k1 \delta \bar{e}i} + k_{\delta \bar{n}e} \cdot I_{n\bar{e}} + k_{\delta \bar{a}a} \cdot I_{a\bar{a}} + k_{\delta i\bar{a}a} \cdot I_{i\bar{a}a}) = 234.26 \cdot \text{kA}$$

2.2. Построение графиков токов короткого замыкания в точке К₁

Диапазон времени для построения графиков

$$t := 0, 0.001 \dots 0.06$$

2.2.1. Графики ТКЗ системы (рис. 2.2)

Периодическая составляющая ТКЗ

$$i_{\bar{n}i} (t) := -\sqrt{2} \cdot I_{k1 \delta \bar{e}i} \cdot \cos(314 \cdot t)$$

Апериодическая составляющая ТКЗ

$$i_{\text{н}â}(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{к1}} \cdot e^{-\frac{t-s}{T_{\text{к1}}}}$$

Полный ток короткого замыкания

$$i_{\text{н}}(t) := i_{\text{н}î}(t) + i_{\text{н}â}(t)$$

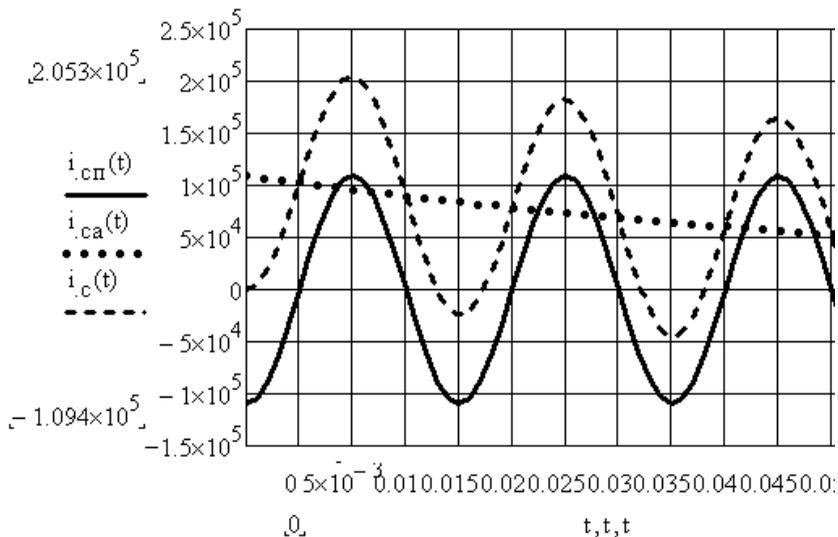


Рис. 2.2. Графики периодического, аperiodического и полного токов в точке К₁

2.2.2. Графики ТКЗ СК (рис. 2.3)

Периодическая составляющая ТКЗ

$$i_{\text{н}êî}(t) := -\sqrt{2} \cdot I_{\text{н}ê} \cdot \cos(314 \cdot t)$$

Аperiodическая составляющая ТКЗ

$$i_{\text{н}êâ}(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{н}ê} \cdot e^{-\frac{t-s}{T_{\text{ан}ê}}}$$

Полный ток короткого замыкания

$$i_{\text{н}ê}(t) := i_{\text{н}êî}(t) + i_{\text{н}êâ}(t)$$

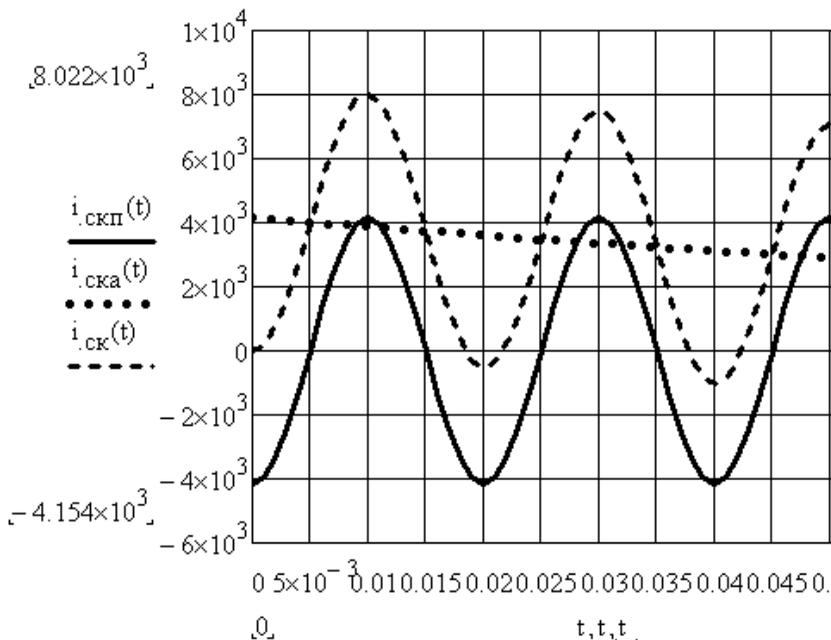


Рис. 2.3. Графики периодического, аperiodического и полного токов синхронного компенсатора

$$T_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}} := 0.025 \cdot s$$

2.2.3. Графики ТКЗ нагрузки (рис. 2.4)

Периодическая составляющая ТКЗ

$$i_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}\text{r}}(t) := -\sqrt{2} \cdot I_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}} \cdot \cos(314 \cdot t) \cdot e^{-\frac{t \cdot s}{T_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}}}}$$

Аperiodическая составляющая ТКЗ

$$i_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}\text{a}}(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}} \cdot e^{-\frac{t \cdot s}{T_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}}}}$$

Полный ток короткого замыкания

$$i_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}}(t) := i_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}\text{r}}(t) + i_{\text{f}\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}\text{a}}(t)$$

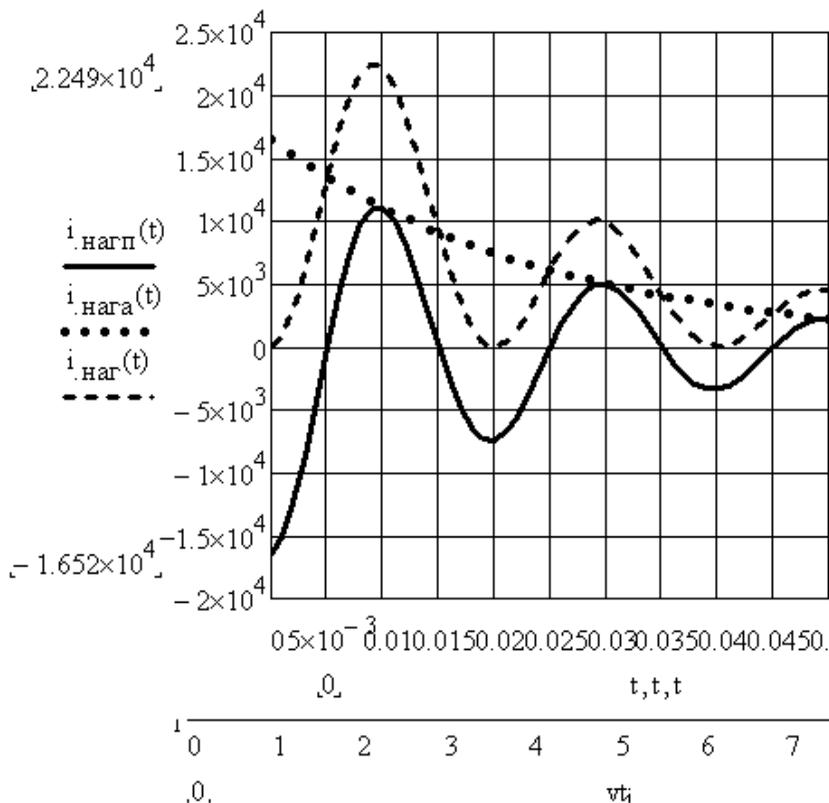


Рис. 2.4. Графики периодического, аperiodического и полного токов обобщенной нагрузки

2.3. Расчеты для короткого замыкания в точке Кр.

Нагрузку и АД не учитываем. Применяем метод приближенного расчета в относительных единицах, тогда $E''_* := 1$

Расчет сопротивлений в относительных единицах

СК:

$$X_{\text{нê}}^* := X_{\text{дê}}^* \cdot \frac{S_{\text{á}}}{Q_{\text{нê}}} = 32$$

Реактора

$$X_{\text{д}}^* := \frac{X_{\text{днò}} \%}{100 \%} \cdot \frac{I_{\text{нòá1}}}{I_{\text{д}}^*} \cdot \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{нòá1}}} = 15.274$$

Эквивалентное сопротивление до точки Кр

$$X_{\Sigma \hat{e}\hat{\delta}}^{**} := \frac{X_{\Gamma^* \Sigma k1} \cdot X_{*\hat{n}\hat{e}}}{X_{\Gamma^* \Sigma k1} + X_{*\hat{n}\hat{e}}} + X_{*\hat{\delta}} = 16.334$$

Сверхпереходный ток КЗ в точке К.р

$$I_{\hat{e}\hat{\delta}}^{**} := \frac{E_{**}}{X_{\Sigma \hat{e}\hat{\delta}}^{**}} \cdot I_{\hat{n}\hat{\delta}1} = 5.611 \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах при КЗ за реактором

$$U_{\hat{n}\hat{\delta}} := \frac{E_{**}}{X_{\Sigma \hat{e}\hat{\delta}}^{**}} \cdot X_{*\hat{\delta}} \cdot 100 \cdot \% = 93.508 \cdot \%$$

3. ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ

(Задача 2)

Построение кривых изменения тока КЗ.

Для схемы рис.1. (задача 1) произвести расчет тока электростанции при КЗ в точках К1 и К3 по методу расчетных кривых. Построить изменение токов и напряжений на шинах станции во времени.

3.1. Расчеты для точки К1.

Используем схему на рис 1.3. с приведенными параметрами для приближенного расчета в именованных единицах:

$$X_{ii10} = 0.187 \Omega$$

$$X_{ii11} = 0.012 \Omega$$

$$X_{ii5} = 0.032 \Omega$$

Преобразуем схему замещения к виду с независимыми ветвями для источников, преобразуя звезду в треугольник

$$X_{ii\hat{e}1} := X_{ii10} + X_{ii5} + \frac{X_{ii10} \cdot X_{ii5}}{X_{ii11}} = 0.72 \Omega$$

Другие стороны многоугольника не понадобятся.

Определяем расчетное сопротивление в относительных номинальных единицах:

$$X_{\hat{a}\hat{a}\hat{e}1} := X_{ii\hat{e}1} \cdot \frac{2 \cdot P_{i\hat{a}}}{\cos \varphi_{\hat{a}} \cdot U_{\hat{a}}^2} = 1.996$$

По аппроксимированным расчетным кривым для турбогенераторов определяем токи КЗ для различных моментов времени:

$$vt := \begin{pmatrix} 0 \cdot s \\ 0.2 \cdot s \\ 1 \cdot s \\ 2 \cdot s \\ 4 \cdot s \\ 10 \cdot s \end{pmatrix}$$

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в относительных номинальных и номинальных единицах при t=0 сек:

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.051 \cdot X_{\text{дл}}^{-1.04} = 0.512$$

при $t=0.2$ сек:

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.01 \cdot X_{\text{дл}}^{-1} = 0.506$$

при $t=1$ сек:

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.026 \cdot X_{\text{дл}}^{-0.95} = 0.532$$

при $t=2$ сек:

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.086 \cdot X_{\text{дл}}^{-0.94} = 0.567$$

при $t=4$ сек:

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.148 \cdot X_{\text{дл}}^{-0.97} = 0.587$$

при $t = 10$ (установившийся режим):

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} := 1.178 \cdot X_{\text{дл}}^{-0.97} = 0.602$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в относительных номинальных единицах

$$I_{\text{кз}}^{\text{н}} = \begin{pmatrix} 0.512 \\ 0.506 \\ 0.532 \\ 0.567 \\ 0.587 \\ 0.602 \end{pmatrix}$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в номинальных единицах

$$I_{\text{кз}} := I_{\text{кз}}^{\text{н}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{дл}}}{\cos \varphi_{\text{дл}} \cdot U_{\text{н}}^2} = \begin{pmatrix} 8.941 \\ 8.833 \\ 9.289 \\ 9.9 \\ 10.25 \\ 10.518 \end{pmatrix} \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах станции при кз в точке К1.

Результирующее сопротивление в относительных номинальных единицах от шин до точки короткого замыкания К1:

$$X_{\text{кз}} := X_{\text{дл}} - X_{\text{т}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{дл}}}{\cos \varphi_{\text{дл}} \cdot U_{\text{н}}^2} = 1.766$$

Массив остаточных напряжений в относительных номинальных единицах

$$U_{*i\theta 1} := X_{*i\theta \hat{e}1} \cdot I_{*i\hat{e}1} = \begin{pmatrix} 0.905 \\ 0.894 \\ 0.94 \\ 1.002 \\ 1.037 \\ 1.064 \end{pmatrix}$$

3.2. Расчеты при коротком замыкании в точке КЗ

Используем схему на рис. 1.1. Расчет сопротивлений генераторов:

$$X_{*i1} := X_{*d*fa} \cdot \frac{\cos \varphi \bar{a} \cdot U_{\bar{n}\hat{a}\hat{o}1}^2}{2 \cdot P_{fa}} = 49.588 \Omega$$

трансформаторов Т1:

$$X_{*i2} := \frac{u_{k\hat{o}1}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\bar{n}\hat{a}\hat{o}1}^2}{2 \cdot S_{\hat{o}1}} = 29.645 \Omega$$

Определяем результирующее сопротивление до точки КЗ

$$X_{\bar{n}\hat{o}\hat{e}3} := X_{*i1} + X_{*i2} = 79.233 \Omega$$

Определяем расчетное сопротивление до точки КЗ:

$$X_{\hat{o}\hat{a}\bar{n}\hat{e}3} := X_{\bar{n}\hat{o}\hat{e}3} \cdot \frac{2 \cdot P_{fa}}{\cos \varphi \bar{a} \cdot U_{\bar{n}\hat{a}\hat{o}1}^2} = 0.368$$

По аппроксимированным расчетным кривым для турбогенераторов определяем токи КЗ в точке КЗ для различных моментов времени:

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в относительных номинальных и номинальных единицах при $t=0$ сек:

$$I_{*i\hat{e}3_0} := 1.051 \cdot X_{\hat{o}\hat{a}\bar{n}\hat{e}3}^{-1.04} = 2.977$$

при $t=0.2$ сек:

$$I_{*i\hat{e}3_1} := 1.01 \cdot X_{\hat{o}\hat{a}\bar{n}\hat{e}3}^{-1} = 2.748$$

при $t=1$ сек:

$$I_{*i\hat{e}3_2} := 1.026 \cdot X_{\hat{o}\hat{a}\bar{n}\hat{e}3}^{-0.95} = 2.656$$

при $t=2$ сек:

$$I_{*1\dot{\epsilon}3}^3 := 1.086 \cdot X_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}3}^{-0.94} = 2.783$$

при $t=4$ сек:

$$I_{*1\dot{\epsilon}3}^4 := 1.148 \cdot X_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}3}^{-0.97} = 3.031$$

при $t = 10\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\epsilon}$ (установившийся режим):

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в относительных номинальных единицах

$$I_{*1\dot{\epsilon}3} = \begin{pmatrix} 2.977 \\ 2.748 \\ 2.656 \\ 2.783 \\ 3.031 \\ 3.111 \end{pmatrix}$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в номинальных единицах

$$I_{\dot{\epsilon}3} := I_{*1\dot{\epsilon}3} \cdot \frac{2 \cdot P_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{\cos \varphi_{\dot{\alpha}} \cdot U_{\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\alpha}1}} = \begin{pmatrix} 2.126 \\ 1.963 \\ 1.897 \\ 1.988 \\ 2.165 \\ 2.222 \end{pmatrix} \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах станции при кз в точке K1.

Сопротивление в относительных номинальных единицах от шин до точки короткого замыкания :K₃

$$X_{*1\dot{\epsilon}3} := X_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}2} \cdot \frac{2 \cdot P_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{\cos \varphi_{\dot{\alpha}} \cdot U_{\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\alpha}1}^2} = 0.138$$

Массив остаточных напряжений в относительных номинальных единицах

$$U_{*\text{нш}3} := X_{*\text{нш}3} \cdot I_{*\text{тк}3} = \begin{pmatrix} 0.409 \\ 0.378 \\ 0.365 \\ 0.383 \\ 0.417 \\ 0.428 \end{pmatrix}$$

3.3. Построение графиков изменений токов и напряжений

На одном рисунке совмещаем графики изменений токов при КЗ в точках К1 и К3 (рис. 3.1).

Диапазон индексов массива

$i := 0..5$

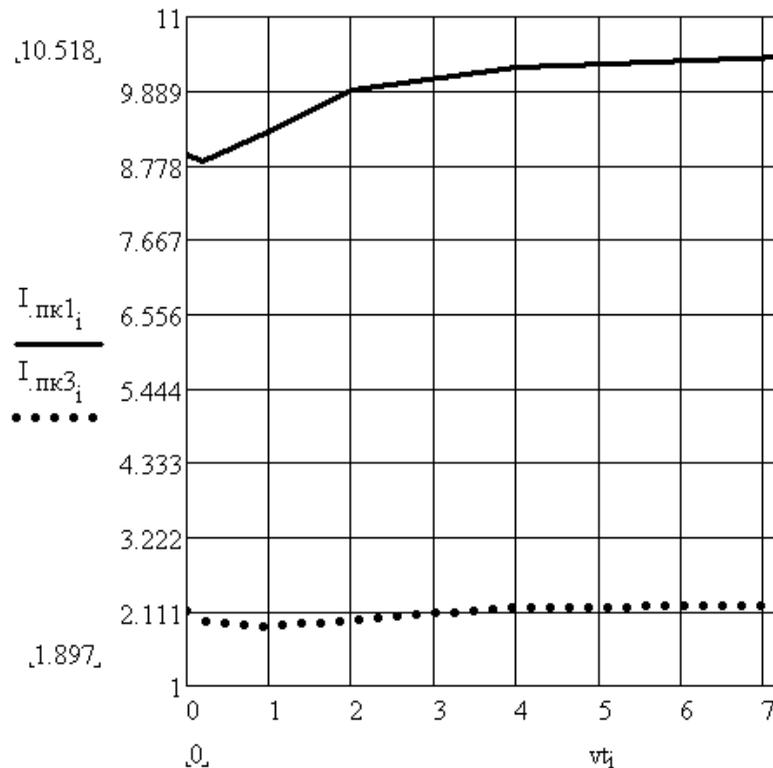


Рис. 3.1. Графики изменений токов во времени

На одном рисунке совмещаем графики изменений напряжений при КЗ в точках К1 и К3 (рис. 3.2).

Диапазон индексов массива

$i := 0..5$

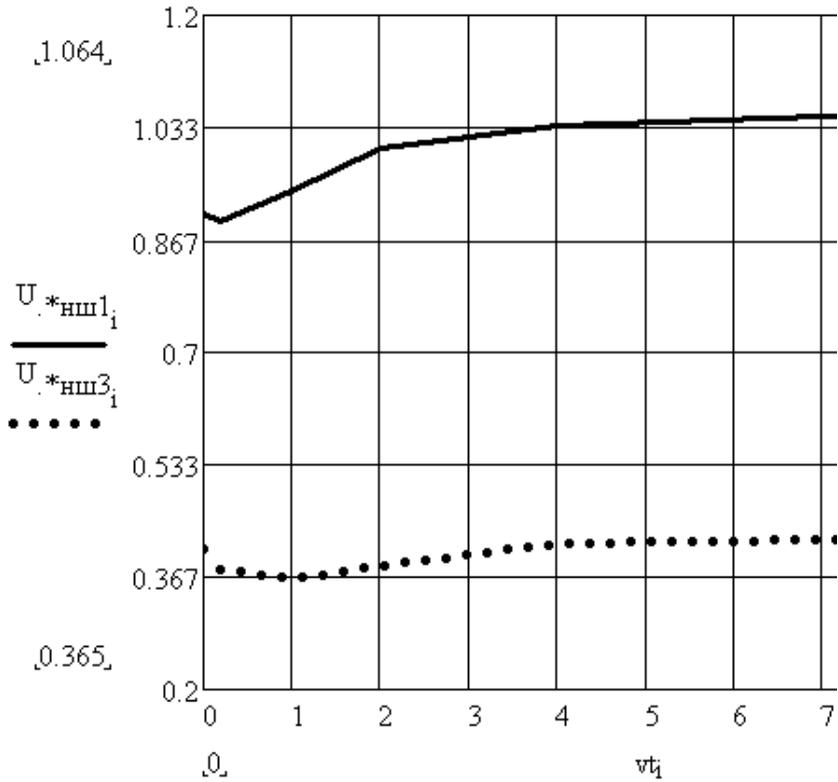


Рис. 3.2. Графики изменений напряжений во времени

4. РАСЧЕТЫ СВЕРХПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

(Задача 4)

Для схемы на рис 1.1. произвести расчет сверхпереходных токов всех видов несимметричных КЗ в точке К3.

Расчет выполняем в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации. Сохраняем базисную мощность $S_b = 1000\text{MVA}$.

Сохраняем прежние базисные напряжения:

$$U_{\dot{a}2} = 150 \cdot \text{kV}$$

-здесь находится точка К.3

$$U_{\dot{a}4} = 115 \cdot \text{kV} \quad U_{\dot{a}3} = 9.968 \cdot \text{kV}$$

Определяем базисный ток 2 ступени, где точка К3

$$I_{\dot{a}2} := \frac{S_{\dot{a}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\dot{a}2}} = 3.849 \cdot \text{kA}$$

Из первой задачи используем сопротивление генераторов, трансформаторов станции, воздушной линии, трансформаторов подстанции и системы.

$$X_{*1} = 2.32 \quad X_{*2} = 1.387 \quad X_{*3} = 0.711 \quad X_{*4} = 0.687$$

$$X_{*6} = 0 \quad X_{*7} = 0.302$$

Из первой задачи используем сверхпереходную ЭДС генераторов и сверхпереходную ЭДС системы

$$E''_{*a} = 1.214 \quad E''_{*n} = 0.957$$

4.1. Схемы замещения.

Схема замещения прямой последовательности имеет вид:

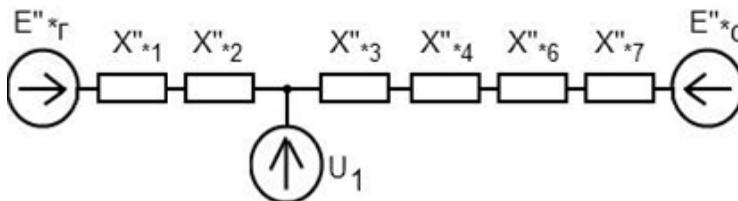


Рис.4.1. Схема замещения прямой последовательности.

Преобразуем схему замещения

$$X_{*8} := X_{*1} + X_{*2} = 3.707$$

$$X_{*9} := X_{*3} + X_{*4} + X_{*6} + X_{*7} = 1.701$$

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} := \frac{X_{*8} \cdot X_{*9}}{X_{*8} + X_{*9}} = 1.166$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_{*\hat{\epsilon}3} := \frac{\frac{E_{*a}}{X_{*8}} + \frac{E_{*n}}{X_{*9}}}{\frac{1}{X_{*8}} + \frac{1}{X_{*9}}} = 1.038$$

Схема замещения прямой последовательности принимает вид:

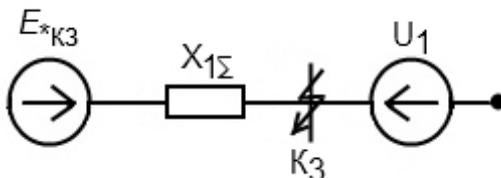


Рис.4.2. Свернутая схема замещения прямой последовательности.

В схеме замещения обратной последовательности только генератор имеет сопротивление обратной последовательности немного больше сопротивления прямой последовательности. Этим можно пренебречь, тогда свернутая схема замещения обратной последовательности имеет вид:

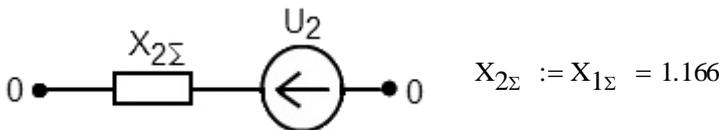


Рис.4.3. Свернутая схема замещения обратной последовательности.

Схема замещения нулевой последовательности составляется с учетом режимов работы нейтралей трансформаторов.

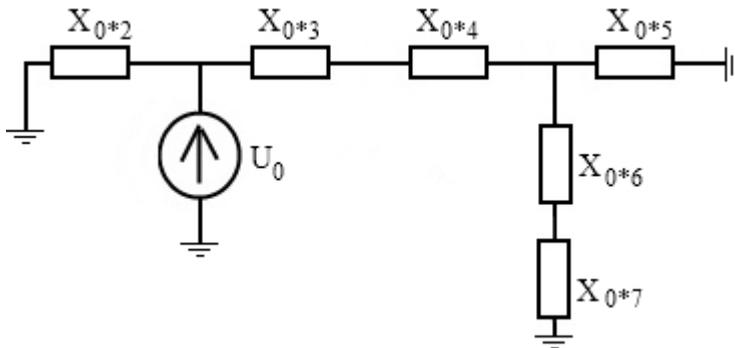


Рис.4.4.Схема замещения нулевой последовательности.

Так как у половины трансформаторов нейтраль отключена, то

$$X_{0*2} := X_{*2} = 1.387$$

Остальные сопротивления нулевой последовательности согласно теории и заданию равны соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

$$X_{0*3} := X_{*3} = 0.711 \quad X_{0*4} := X_{*4} = 0.687 \quad X_{0*5} := X_{*5} = 0.813$$

$$X_{0*6} := X_{*6} = 0 \quad X_{0*7} := X_{*7} = 0.302$$

Преобразуем схему замещения к одному сопротивлению

$$X_{0*8} := \frac{X_{0*5} \cdot (X_{0*6} + X_{0*7})}{X_{0*5} + (X_{0*6} + X_{0*7})} + X_{0*3} + X_{0*4} = 1.619$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$X_{0\Sigma} := \frac{X_{0*2} \cdot X_{0*8}}{X_{0*2} + X_{0*8}} = 0.747$$

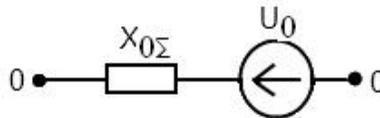


Рис.4.5. Свернутая схема замещения нулевой последовательности.

4.2. Расчет двухфазного и однофазного КЗ

Составляем комплексную схему замещения

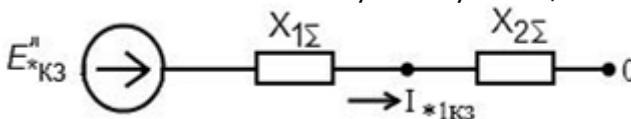


Рис.4.6. Комплексная схема замещения при 2-х фазном КЗ.

Ток двухфазного короткого замыкания

$$I_{2\hat{\delta}\hat{\epsilon}\zeta} := \frac{\sqrt{3} \cdot E''_{*\hat{\epsilon}\zeta}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}} \cdot I_{\hat{a}2} = 2.966 \cdot \text{kA}$$

Составляем комплексную схему замещения (рис. 4.7).

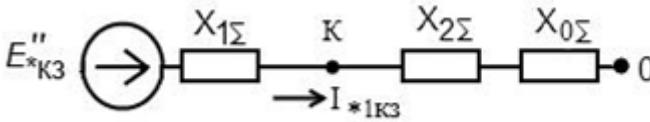


Рис.4.7. Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании.

Ток однофазного короткого замыкания

$$I_{1\hat{\delta}\hat{\epsilon}\zeta} := \frac{3 \cdot E''_{*\hat{\epsilon}\zeta}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \cdot I_{\hat{a}2} = 3.891 \cdot \text{kA}$$

4.3. Расчет двухфазного короткого замыкания на землю

Составляем комплексную схему замещения

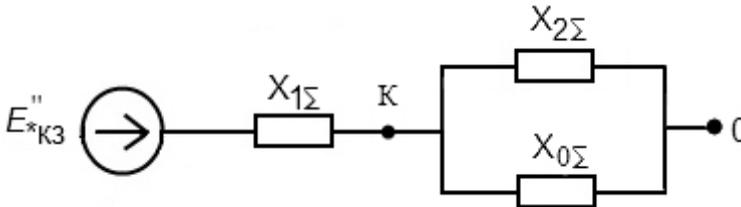


Рис.4.8. Комплексная схема замещения при 2-х фазном коротком замыкании на землю.

Ток двухфазного КЗ на землю

$$I_{11\hat{\delta}\hat{\epsilon}\zeta} := \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \cdot \frac{E''_{*\hat{\epsilon}\zeta}}{X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}} \cdot I_{\hat{a}2} = 3.724 \cdot \text{kA}$$

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы / С.А. Ульянов; М.: Энергия, 1970. – 519 с.
2. Ульянов С. А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам / С.А. Ульянов; М.: Энергия, 1968. – 495 с.
3. Дроздов А. Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / А.Д. Дроздов; Новочеркасск: НПИ. 1976. – 79 с.
4. Дроздов А. Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты: учебное пособие; / А.Д. Дроздов; Новочеркасск: НПИ, 1977. – 75 с.
5. Очков В.Ф. Mathcad 14: для студентов и инженеров, русская версия / В..Ф. Очков; Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. 2009. – 498 с.
6. Цыгулев Н.И. . Основы электромагнитных переходных процессов в электрических системах: учебное пособие / Н.И. Цыгулев, В.А. Шелест, В.К. Хлебников; Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – 98 с.
7. Неклепаев Б.Н. Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков; М.: Энергия, 1978. – 380 с.