

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Электроэнергетика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО КОНТРОЛЬНО-КУРСОВОЙ РАБОТЕ

учебной дисциплины (модуля)
**«Переходные процессы в электроэнергетических
системах»**

Уровень профессионального образования:
высшее образование – бакалавриат

Направление (специальность) подготовки:
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль (специализация) подготовки:
«Электроснабжение»

Квалификация выпускника: бакалавр
Форма обучения: (очная, заочная)

Тула 2015 г.

Методические указания по ККР учебной дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» разработана доцентом Ю.И.Гореловым и обсуждена на заседании кафедры «Электроэнергетика» института высокоточных систем им. В.П. Грязева, протокол заседания кафедры № 6 от "03" июня 2015 г.
Зав. кафедрой_____В.М. Степанов

Введение

Задания и методические указания на выполнение контрольно-курсовой работы охватывают основные разделы курса «Переходные процессы электроэнергетических систем».

Целью контрольно-курсовой работы является закрепление знаний студентов по основным разделам курса, а также более глубокое изучение методов и приемов расчета токов короткого замыкания (как симметричных, так и при нарушении симметрии системы).

Общие указания к выполнению контрольно-курсовой работы

Для каждого студента варианты заданий определяются последней цифрой договора и приведены вместе со схемой электроэнергетической системы (ЭЭС) в приложении 1.

Перед выполнением заданий студенты изучают теоретический материал по литературе.

При выполнении заданий необходимо:

Стремиться к наиболее рациональному порядку решения задач.

Указать применяемую систему единиц.

Векторные диаграммы построить с указанием выбранного масштаба.

Схемы и векторные диаграммы выполнять по ГОСТу.

Все рисунки, схемы нумеровать согласно ГОСТа с обязательной ссылкой на них в тексте работы.

Формулы записываются сначала в общем виде, затем подставляются цифры и записывается результат вычислений.

Контрольно-курсовая работа должна содержать титульный лист, оглавление, шифр варианта задания, исходную и расчетную схемы, а также:

исходные данные, текст пояснительной записки, приложения (если требуется), список литературы.

Решая поставленные задачи, не следует ограничиваться написанием формул и вычислениями, а следует кратко объяснить физическую суть рассматриваемых процессов и по каждому пункту задания привести основные положения и сделать выводы.

Список используемых источников приводится согласно ГОСТа: автор, его инициалы, название, место издания, издательство, год издания.

Задание на контрольно - курсовую работу по дисциплине

«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

1. Рассчитать упрощенно электромагнитный переходный процесс в синхронном генераторе без демпферных контуров при трехфазном коротком замыкании на шинах высокого напряжения одной из станций схемы. Принять, что до короткого замыкания генератор (станция) работал в номинальном режиме.

Определить ударный ток короткого замыкания и его действующее значение.

Построить графики изменения действующего значения периодического тока короткого замыкания, напряжения на шинах генератора, ЭДС E_q, E'_q и тока возбуждения в функции времени от $t=0$ до $t=3T'_d$ для заданного варианта. Построить векторную диаграмму генератора для номинального режима генератора по данным задания на курсовую работу.

2. При коротком замыкании в точке «К» схемы определить ток в фазах и построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания и векторную диаграмму напряжений в точке подключения нагрузки для начального момента времени и несимметричного короткого замыкания $K^{(2)}$.

Методические указания к выполнению ККР

1. Составление схемы замещения для расчетов токов короткого замыкания. Определение параметров схемы

Расчеты режимов электроэнергетических систем, токов короткого замыкания (ТКЗ) в частности, можно проводить в именованных или относительных единицах. В первом случае сопротивления выражены в омах, токи, напряжения, мощности - в килоамперах (кА), киловольтах (кВ), мегавольтамперах (МВА) соответственно. Во втором случае перечисленные величины безразмерны, их получают делением величин в именованных единицах на базисные. Из четырех величин: $U_{\sigma}, I_{\sigma}, Z_{\sigma}, S_{\sigma}$ при выборе базисных величин две можно назначить произвольно (предположим U_{σ}, S_{σ}), а две другие вычислить по известным соотношениям:

$$I_{\sigma} = S_{\sigma} / (\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}); \quad Z_{\sigma} = U_{\sigma} / (\sqrt{3} \cdot I_{\sigma}) = U_{\sigma}^2 / S_{\sigma}.$$

Величины в относительных базисных единицах:

$$I_{(\sigma)}^* = I / I_{\sigma}; \quad U_{(\sigma)}^* = U / U_{\sigma}; \quad Z_{(\sigma)}^* = Z / Z_{\sigma}; \quad S_{(\sigma)}^* = S / S_{\sigma}.$$

$$P_{(\sigma)}^* = P / S_{\sigma}, \text{ и т.д.}$$

Использование относительных единиц имеет ряд преимуществ. Есть возможность сопоставлять порядок величины и контролировать правильность вычислений; фазные и междуфазные величины в относительных единицах численно совпадают, нет необходимости учитывать в расчете коэффициенты $\sqrt{3}, \sqrt{3}$.

Иногда величины представляют в относительных номинальных единицах. Здесь за базисные выбирают номинальные величины: номинальная мощность, ток, напряжение. В этой системе единиц часто приводят паспортные данные на пример, генераторов.

Схема замещения для расчета ТКЗ существенно проще схемы замещения для расчета нормального режима. При расчете ТКЗ в сетях 110 - 220 кВ схема замещения

обычно учитывают только индуктивные сопротивления (пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы, емкостными проводимостями ЛЭП, потерями холостого хода трансформаторов).

При определении тока КЗ в начальный момент времени, генераторы замещаются сверхпереходной ЭДС сверхпереходным сопротивлением. ЭДС определяют по формуле:

$$E'' = \sqrt{\left(U_G + \frac{Q_0}{U_G} X''_d\right)^2 + \left(\frac{P_0}{U_G} X''_d\right)^2} \cong 1 + X''_d \cdot I_0 \cdot \sin \varphi$$

где: X''_d - сверхпереходное сопротивление генератора

в относительных единицах;

P_0, Q_0, I_0 – активная и реактивная мощности и ток, выдаваемые генератором в доаварийном режиме в относительных единицах;

φ – угол между током и напряжением в доаварийном режиме;

U_G – напряжение генератора в относительных единицах.

Полученная по этим формулам ЭДС, выраженная в относительных базисных единицах, приближенно совпадает с ЭДС в относительных номинальных единицах. Нагрузки замещают ЭДС сопротивлением $E''_{нагр} = 0,85$; $X''_{нагр} = 0,35$. Эти значения приведены в относительных номинальных единицах нагрузки. В схеме замещения следует учитывать только мощные нагрузки, расположенные близко к точке КЗ. Если нагрузка удалена от точки КЗ на две и более трансформации, то такую нагрузку можно не учитывать.

В схеме замещения для расчетов ТКЗ коэффициенты трансформации учитывают на этапе определения параметров, выполняя так называемое приведение в единую основную ступень напряжения. В качестве основной частоты выбирают ступень, где необходимо определять токи, напряжения; например, ступень, где расположена точка КЗ.

В приближенных расчетах коэффициенты трансформации учитывают по так называемым среднему номинальному напряжению,

$U_{ср.н.}$

, которые задаются специальной шкалой: 6,3;10,5;13,8;15,75;18;20;37;115;230;515 кВ. В этом случае расчетные формулы упрощаются.

Формулы для определения сопротивлений в относительных базисных единицах при приближенном расчете.

Сопротивления	В исходных данных сопротивления приведены в:		
	%	Омах	Отн.ном.ед.
В относительных базисных единицах	$X_{(\bar{o})}^* = \frac{X\%}{100\%} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}$	$X_{(\bar{o})}^* = X_{(Om)} \frac{S_{\bar{o}}}{u_{cp.H.}^2}$	$X_{(\bar{o})}^* = X_{(H)}^* \frac{S_{\bar{o}}}{S_H}$

ПРИМЕР. Для трехфазного короткого замыкания на шинах высокого напряжения автотрансформатора Т2 (рис.1) составить схему замещения и определить ее параметры.

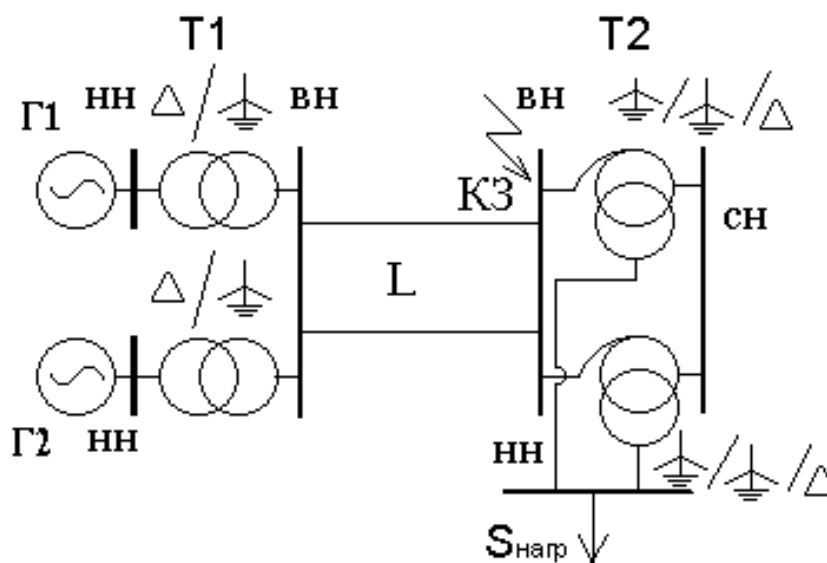


Рис.1

Исходные данные:

Генератор (Г1 и Г2) $P_{(H)}=63\text{МВт}$, $\cos\varphi_{(H)}=0.8$,

$X''_{d(H)}=0.203\text{о.е.}$, $X'_{d(H)}=0.3\text{о.е.}$, $J=2,4\text{ТМ}^2$;

Трансформаторы (Т1) $S_{(H)}=80\text{МВа}$; $U_{кз}=12\%$, $K_T=242/10.5$;

Автотрансформаторы (Т2) $S_{(H)}=100\text{МВа}$; $U_{кзВ-С}=11\%$, $U_{кзВ-Н}=31\%$, $U_{кзС-Н}=19\%$; $K_T=230/121/38.5\text{ кВ}$;

Линия $l=161\text{км}$;

Нагрузка $P_{(H)}=40\text{МВт}$, $\cos\varphi_{(H)}=0.9$, $U_{(H)}=35\text{кВ}$.

Нашины низкого напряжения трансформаторов Т1 поступает мощность от двух генераторов, они войдут в схему сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями. В схему замещения войдут индуктивные сопротивления схем замещения трансформаторов Т1, линии L, а также обмоток высокого и низкого напряжений автотрансформаторов Т2 и нагрузка своими индуктивным сопротивлением ЭДС (рис.2).

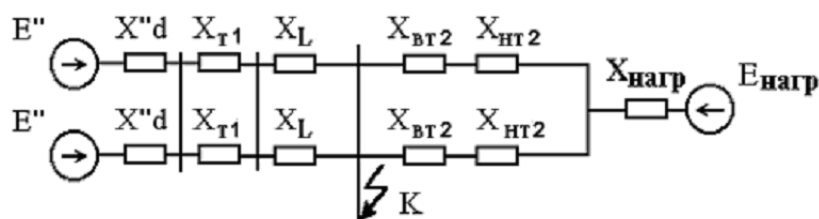


Рис.2

Параметры схемы замещения определим приближенно, без учета реальных коэффициентов трансформации, в относительных базисных единицах при базисной мощности $S_{\delta}=1000\text{ МВА}$ (выбирается произвольно). При точном расчете формулы приведения даны в [2].

Сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора в относительных базисных единицах:

$$X''_{d(\delta)}^* = X''_{d(H)}^* \frac{S_{\delta}}{S_H} = 0,23 \frac{1000}{63/0,8} = 2,58\text{о.е.}$$

Сверхпереходная ЭДС генератора:

$$E''^*_{(\delta)} = E''^*_{(H)} \approx 1 + X''_{d(H)} \cdot \sin \varphi = 1 + 0,203 \cdot 0,6 = 1,120.e.$$

либо

$$\begin{aligned} E''^*_{(\delta)} = E''^*_{(H)} &= \sqrt{(U_{\Gamma(H)}^* + \frac{Q_H^*}{U_{\Gamma(H)}^*} X''_{d(H)})^2 + (\frac{P_{(H)}^*}{U_{H(H)}^*} X''_{d(H)})^2} = \\ &= \sqrt{(1 + \frac{0,6}{1} 0,203)^2 + (\frac{0,8}{1} 0,203)^2} = 1,130.e. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление схемы замещения трансформатора T1

$$X^*_{T1(\delta)} = \frac{U_K \%}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{12\%}{100\%} \frac{1000}{80} = 1,50.e.$$

Сопротивление схемы замещения одной ВЛ

$$X^*_{L(\delta)} = X_0 l \frac{S_{\delta}}{U_H^2} = 0,4 \cdot 161 \cdot 1000 / 230^2 = 1,220.e.$$

Сопротивления схемы замещения автотрансформатора T2

$$X_{BT2(\%)} = 0,5(U_{\kappa B-C} + U_{\kappa B-H} - U_{\kappa C-H}) = 0,5(11 + 31 - 19) = 11,5\%$$

$$X^*_{BT2(\delta)} = \frac{X_{BT2(\%)}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{11,5\%}{100\%} \frac{1000}{100} = 1,150.e.$$

$$X_{HT2(\%)} = 0,5(U_{\kappa B-H} + U_{\kappa C-H} - U_{\kappa B-C}) = 0,5(31 + 19 - 11) = 19,5\%$$

$$X^*_{HT2(\delta)} = \frac{X_{HT2(\%)}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{19,5\%}{100\%} \frac{1000}{100} = 1,950.e.$$

Сопротивление нагрузки

$$X^*_{нагр(\delta)} = X^*_{нагр(H)} \frac{S_{\delta}}{S_{нагр}} = 0,35 \cdot 1000 / 44,4 = 7,880.e.$$

$$где: S_{нагр.} = \sqrt{P_{нагр.}^2 + Q_{нагр.}^2} = \sqrt{40^2 + 19,4^2} = 44,4 MVA.$$

В приближенном расчете ЭДС

нагрузки

в относительных базисных единицах совпадает с ЭДС в относительных номинальных

$$: E^*_{нагр.(\delta)} = 0,850.e.$$

2. Эквивалентирование схемы замещения

После составления схемы замещения и определения ее параметров производится эквивалентирование схемы, приведение ее к максимально простому виду. В преобразовании схемы используют известные приемы: объединение цепочки из последовательных сопротивлений, замена параллельных ветвей одной эквивалентной, эквивалентирование активных двухполюсников, преобразование звезды в треугольник или обратное преобразование. После преобразования схема часто может иметь вид многолучевой звезды (рис.3):

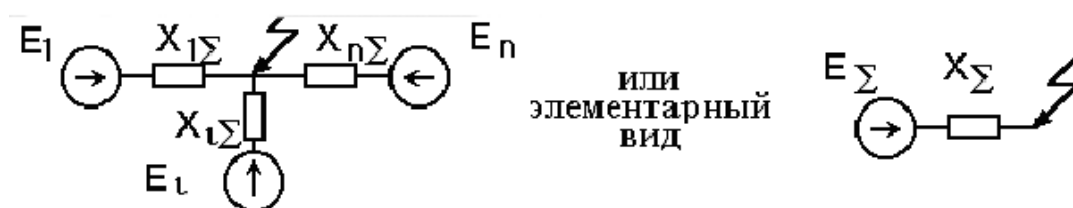


Рис.3

Конечный вид преобразования зависит от целей и методов расчета.

Определим параметры эквивалентной схемы по ранее составленному рис.2.

На первом этапе рассматриваемого примера расчет сводится к параллельному объединению двухполюсников:

Эквивалентные параметры схемы замещения генератора:

$$E_g = \Sigma E_i Y_i / \Sigma Y_i; \quad X_g = 1 / \Sigma Y_i;$$

$$E_{гэ} = (1,12 / 2,58 + 1,12 / 2,58) / (1 / 2,58 + 1 / 2,58) = 1,12 \text{ o.e.}$$

$$X_1 = 1 / (1 / 2,58 + 1 / 2,58) = 1,29 \text{ o.e.}$$

Эквивалентные параметры схемы замещения трансформаторов T1

$$X_g = 1 / \Sigma Y_i; \quad X_2 = 1 / (1 / 1,5 + 1 / 1,5) = 0,75 \text{ o.e.}$$

Эквивалентные параметры схемы замещения ВЛ.

$$X_g = 1 / \Sigma Y_i; \quad X_3 = 1 / (1 / 1,22 + 1 / 1,22) = 0,61 \text{ o.e.}$$

Эквивалентные параметры схемы замещения автотрансформаторов T2

$$X_9 = 1/\Sigma Y_i; \quad X_4 = 1/(1/1,15 + 1/1,15) = 0,575 \text{ o.e.}$$

$$X_5 = 1/(1/1,95 + 1/1,95) = 0,975 \text{ o.e.}$$

Таким образом, получена промежуточная схема с параметрами:

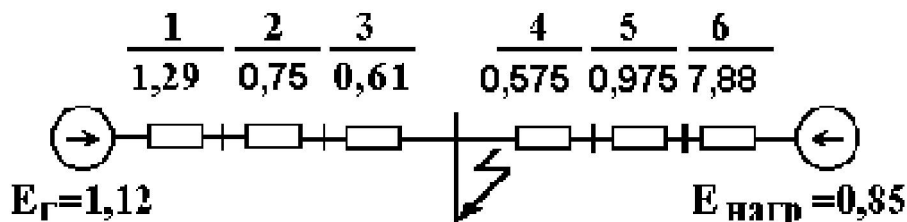


Рис.4

Параметры двухлучевой схемы:

$$X_7 = X_1 + X_2 + X_3 = 1,29 + 0,75 + 0,61 = 2,65 \text{ o.e.}$$

$$X_8 = X_4 + X_5 + X_6 = 0,575 + 0,975 + 7,88 = 9,43 \text{ o.e.}$$

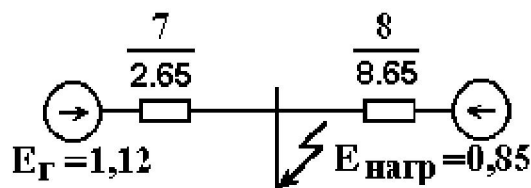


Рис.5

3. Расчет сверхпереходного тока (начальное значение периодической составляющей) при трехфазном кз, ударного тока и его действующего значения

3.1. Расчетные формулы для сверхпереходного тока по преобразованной схеме рис.5 в именованных единицах:

Если схема была преобразована к многолучевой звезде:

$$I_{ki}'' = E_i / X_{\Sigma i} \text{ o.e.}; \quad I_k'' = \Sigma I_{ki}'' \text{ o.e.}; \quad I_{k(и.е.)}'' = I_k'' \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{ср.н.}} \text{ кА.}$$

Если схема была преобразована к элементарному виду:

$$I_{\kappa}'' = E_{\Sigma} / X_{\Sigma} \text{ o.e.}, I_{\kappa(\text{и.е.})}'' = I_{\kappa}'' \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\text{ср.н.}}} \kappa A.$$

Выполним расчет сверхпереходного тока по рис.5 в относительных базисных единицах:

Сверхпереходный ток от генератора

$$I_{\Gamma}'' = E_{\Gamma} / X_{\gamma} = 1,12 / 2,65 = 0,42 \text{ o.e.}$$

Сверхпереходный ток от нагрузки

$$I_{\text{нагр.}}'' = E_{\text{нагр.}} / X_8 = 0,85 / 9,43 = 0,1 \text{ o.e.}$$

Ток в точке КЗ

$$I_{\kappa(\bar{o})}'' = I_{\Gamma}'' + I_{\text{нагр.}}'' = 0,42 + 0,1 = 0,52 \text{ o.e.}$$

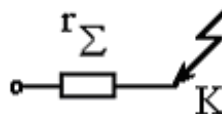
Ток в точке КЗ в именованных единицах

$$I_{\kappa(\text{и.е.})}'' = I_{\kappa(\bar{o})}'' I_{(\bar{o})} = 0,52 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,31 \kappa A.$$

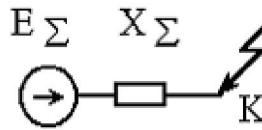
3.2. Расчет ударного тока и его действующего значения.

В ударном токе приближенно учитываются апериодическая составляющая тока статора КЗ и вынужденная составляющая. Для расчета ударного тока следует дополнительно составить схему замещения с активными сопротивлениями и определить ее параметры. ЭДС в этой схеме не указывают, указывают узлы подключения ЭДС. При отсутствии точных сведений об активных сопротивлениях можно пользоваться приближенными данными [2, с 137, табл. 6-2].

Схемас активными сопротивлениями преобразуют к элементарному виду:



Аналогично преобразуют схему с индуктивными сопротивлениями:



Последовательность расчета:

Определяют эквивалентную постоянную времени затухания апериодической составляющей тока статора при КЗ:

$$T_a = X_{\Sigma} / (\omega \cdot r_{\Sigma}).$$

$$\text{где: } \omega = 314 (1 / \text{с}).$$

Определяют ударный коэффициент:

$$k_y = 1 + e^{-0,01/T_a}.$$

Ударный ток:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y I_{\kappa}''.$$

Действующее значение ударного тока:

$$I_y = I_{\kappa}'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

Пример:

Определим ударный ток и его действующее значение.

Дополнительно составим схему замещения активными сопротивлениями.

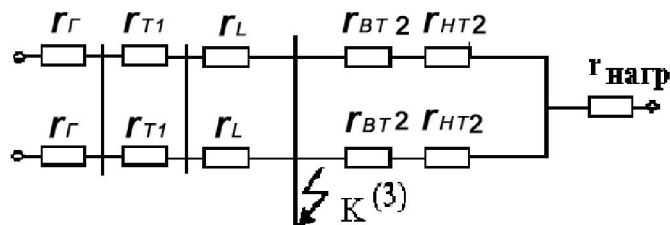


Рис.6

Параметры схемы замещения.

Активные сопротивления в высоковольтных сетях обычно меньше индуктивных. Для определения активных сопротивлений можно воспользоваться рекомендуемыми приближенными значениями [2, с. 137, табл. 6-2].

Определяем:

$$r_{\Gamma(\delta)}^* = X_{\Gamma}^* / 60 = 2,58 / 60 = 0,043 \text{ о.е.}$$

$$r_{\text{нагр}(\delta)}^* = X_{\text{нагр}(\delta)}^* / 2,5 = 7,88 / 2,5 = 3,132 \text{ о.е.}$$

$$r_{L(\delta)}^* = X_{L(\delta)}^* / 3,6 = 1,22 / 3,6 = 0,35 \text{ о.е.}$$

$$r_{T1(\delta)}^* = X_{T1(\delta)}^* / 27 = 1,5 / 27 = 0,055 \text{ о.е.}$$

$$\text{аналогично: } r_{BT2(\delta)}^* = 0,013 \text{ о.е.}; r_{HT2(\delta)}^* = 0,028 \text{ о.е.}$$

Преобразование схемы замещения.

Эквивалентное сопротивление слева от точки КЗ.

$$r_1 = r_{\Gamma} / 2 + r_{T1} / 2 + r_L / 2 = 0,2165 \text{ о.е.}$$

Эквивалентное сопротивление справа от точки КЗ.

$$r_2 = (r_{BT3} + r_{HT3}) / 2 + r_{\text{нагр}} = 3,1525 \text{ о.е.}$$

Суммарное активное сопротивление элементарной схемы.

$$r_{\Sigma} = r_1 r_2 / (r_1 + r_2) = 0,2165 \cdot 3,1525 / (0,2165 + 3,1525) = 0,203 \text{ о.е.}$$

Суммарное индуктивное сопротивление элементарной схемы:

$$X_{\Sigma} = X_7 X_8 / (X_7 + X_8) = 2,65 \cdot 9,43 / (2,65 + 9,43) = 2,07 \text{ о.е.}$$

Расчет ударного тока.

$$T_a = 2,07 / (314 \cdot 0,203) = 0,032 \text{ с}; \quad k_y = 1 + e^{-0,01 / 0,032} = 1,73.$$

$$i_y = 1,31 \cdot 1,73 \cdot \sqrt{2} = 3,2 \text{ кА.}$$

Действующее значение ударного тока.

$$I_y = 1,31 \sqrt{1 + 2(1,73 - 1)^2} = 1,89 \text{ кА.}$$

Более точно ударный ток можно определить, суммировав ударные токи слева и справа от точки КЗ.

4. Построение графиков изменения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания генератора, напряжения на шинах генератора, э.д.с., E_q и E'_q , а также тока возбуждения генератора в функции времени (генератор неявнополюсный)

Определяем параметры исходного режима в качестве которого выбираем номинальный режим генератора.

Тогда:

$$U_0 = U_{\Gamma_{ном}}, U_{0(H)}^* = 1, I_0 = I_{\Gamma_{ном}}, I_{0(H)}^* = 1,$$

$$P_0 = S_0 \cos(\varphi_0) = S_{ном} \cos(\varphi_{ном}), P_{0(H)}^* = 1 \cos(\varphi_{ном}),$$

$$Q_0 = S_0 \sin(\varphi_0) = S_{ном} \sin(\varphi_{ном}), Q_{0(H)}^* = 1 \sin(\varphi_{ном}),$$

$$E_{q0(H)}^* = \sqrt{\left(U_{0(H)}^* + \frac{Q_{0(H)}^*}{U_{0(H)}^*} \cdot X_{d(H)}^* \right)^2 + \left(\frac{P_{0(H)}^*}{U_{0(H)}^*} \cdot X_{d(H)}^* \right)^2},$$

$$E_{q0(H)}^* \approx E_{0(H)}^* = \sqrt{\left(U_{0(H)}^* + \frac{Q_{0(H)}^*}{U_{0(H)}^*} \cdot X_{d(H)}^* \right)^2 + \left(\frac{P_{0(H)}^*}{U_{0(H)}^*} \cdot X_{d(H)}^* \right)^2}.$$

Периодическая слагающая тока статора в начальный момент короткого замыкания в базисных единицах:

$$I_{\Gamma t=0} = \frac{E'_{qt=0}}{X'_{d\Sigma}} = \frac{E'_{q0}}{X'_{d\Sigma}}, \text{ где } X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{вн} = X'_d + X_{TP}$$

Периодическая слагающая тока статора при $t=\infty$:

$$I_{\Gamma t=\infty} = I_{\infty} = \frac{E_{q\infty}}{X_{d\Sigma}}, \text{ где } X_{d\Sigma} = X_d + X_{mp}$$

Если нет форсировки возбуждения, то

$$E_{q\infty} = E_{q0}.$$

При форсировке возбуждения

$$E_{q\infty} = k \cdot E_{q0},$$

где $k = \frac{E_{q\infty}}{E_{q0}}$ – кратность форсировки.

Закон изменения периодической составляющей тока статора генератора при коротком замыкании за трансформатором [2]:

$$I_{\Gamma}(t) = I_{\infty} + (I' - I_{\infty})e^{\frac{-t}{T'_d}},$$

где T'_d – постоянная времени обмотки ротора (обмотки возбуждения) при замкнутом статоре:

$$T'_d = T_{d0} \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}},$$

T_{d0} – постоянная времени обмотки ротора (обмотки возбуждения) при разомкнутом статоре:

$$T_{d0} = \frac{L_{\text{ротора}}}{r_{\text{ротора}}}.$$

Э.Д.С. и напряжения на основании закона Ома и 2-ого закона Кирхгофа определяются следующим образом:

$$U_{\Gamma} = I_{\Gamma}(t)X_{mp},$$

$$E'_q = I_{\Gamma}(t)(X'_d + X_{mp}),$$

$$E_q = I_{\Gamma}(t)(X_d + X_{mp}),$$

$$i_f(t) = kE_q(t),$$

где k – коэффициент пропорциональности; при не учете насыщения железа генератора $k = \text{const}$.

Закон изменения $E_q(t)$ при форсировке возбуждения имеет вид (при $T_e = 0$):

а) в случае замкнутого статора генератора

$$E_q(t) = E_{q\infty} + (E_{q0} - E_{q\infty})e^{\frac{-t}{T'_d}},$$

б) в случае разомкнутого статора генератора

$$E_q(t) = E_{q\infty} + (E_{q0} - E_{q\infty})e^{\frac{-t}{T_{d0}}},$$

где $E_{q\infty} = k \cdot E_{q0}$.

Закон изменения тока возбуждения i_f и всех других исследуемых величин (U_G, I_G, E_Q, E'_Q) в процессе гашения поля ротора генератора записывается в виде:

$$i_f(t) = i_{f0} e^{\frac{-t}{T_{\text{зам}}}},$$

где $T_{\text{зам}} = T'_d \frac{1}{1+K}$ – постоянная времени гашения поля при замкнутом статоре,

$T_{\text{раз}} = T_{d0} \frac{1}{1+K}$ – постоянная времени гашения поля при разомкнутом статоре,

$$K = \frac{r_{\text{зам}}}{r_f} = 3 \div 5,$$

i_{f0} – ток возбуждения в момент начала гашения поля.

Следует отметить, что скорость протекания электромагнитных процессов в роторе генератора на порядок меньше скорости протекания электромагнитных процессов в статоре. Для данной задачи это позволяет считать процессы в статоре безынерционными. Отсюда следует, что при коммутациях в цепях статора (короткое замыкание, отключение, АПВ) имеют место скачкообразные изменения всех величин кроме переходной э.д.с. по продольной оси (E'_q), так как она пропорциональна результирующему потокоцеплению обмотки возбуждения, которое скачком не изменяется.

При коммутациях в цепи ротора (форсировка, гашение поля) все величины изменяются без скачков.

Еще одна полезная закономерность. На любом временном участке переходного процесса параметры начала процесса определяются по переходной э.д.с. (E'_q), а установившийся режим для $t=\infty$ по току возбуждения и пропорциональной ему э.д.с. (E_q).

5. Расчет сверхпереходного тока при несимметричном КЗ

Приняты условные обозначения: (1) - однофазное КЗ; (1,1) - двухфазное КЗ на землю; (2) - двухфазное КЗ.

Практически расчеты несимметричных режимов при однократной поперечной несимметрии обычно выполняются применением метода симметричных составляющих [2].

Порядок расчета.

Расчет начинается с составления трех схем замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Схема прямой последовательности составляют также, как для расчета тока трехфазного КЗ. Нагрузки замещают сопротивлениями 0,35 и ЭДС, равными 0,85 от относительных номинальных единиц. Напряжение в точке КЗ в этом случае не ноль, как при трехфазном КЗ, а $\underline{U}_{\kappa A1}$ - напряжение прямой последовательности.

Схема обратной последовательности отличается от схемы прямой сопротивлениями генераторов (X_2), а также от отсутствием ЭДС (ЭДС закорочены, равны нулю). Нагрузки замещают сопротивлениями 0,35 от относительных номинальных единиц. В точке КЗ приложено напряжение обратной последовательности $\underline{U}_{\kappa A2}$.

Схема нулевой последовательности существенно отличается от схемы прямой. Ее структура определяется способом соединения обмоток трансформаторов и режимом заземления их нейтралей, в этой схеме нет ЭДС. В точке КЗ приложено напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_{\kappa 0}$.

Составленные схемы эквивалентизируют, преобразуют к элементарному виду.



Для определения тока в поврежденной фазе I_{KA} необходимо определить величины $\Delta X^{(n)}$ и $m^{(n)}$.

Дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$ вычисляют для каждого вида КЗ по формулам:

$$\Delta X^{(1)} = X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}; \quad \Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{\Sigma 2} \cdot X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}; \quad \Delta X^{(2)} = X_{\Sigma 2}.$$

Ток прямой последовательности для заданного вида КЗ в относительных единицах.

$$\underline{I}_{KA1}^{(n)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + \Delta X^{(n)})};$$

где n – условное обозначение вида замыкания.

Остальные симметричные составляющие для каждого вида КЗ.

Однофазное замыкание ($n=1$)

$$\underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0} = \underline{I}_{KA1}.$$

$$\underline{U}_{KA1} = j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{U}_{KA2} = -jX_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{U}_{K0} = -jX_{\Sigma 0}\underline{I}_{KA1}.$$

Двухфазное на землю ($n=1,1$)

$$\underline{I}_{KA2} = \frac{-jX_{\Sigma 0}\underline{I}_{KA1}}{j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})} = \frac{-X_{\Sigma 0}\underline{I}_{KA1}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}; \quad \underline{I}_{K0} = \frac{-jX_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}}{j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})} = \frac{-X_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}};$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K0} = \frac{-X_{\Sigma 2}X_{\Sigma 0}\underline{I}_{KA1}}{j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})}.$$

Двухфазное ($n=2$)

$$\underline{I}_{KA2} = -\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = jX_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}.$$

Ток поврежденной фазы в месте КЗ:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{kA1}^{(n)};$$

$$\text{где: } m^{(1)} = 3; \quad m^{(2)} = \sqrt{3}; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})^2}}.$$

Для примера определим ток поврежденной фазы и симметричные составляющие напряжений при двухфазном КЗ в точке К.

Схема замещения прямой последовательности по конфигурации полностью совпадает со схемой замещения для расчета тока трехфазного КЗ (с учетом нагрузок) и приведена в п. 1 (рис. 2).

Схема замещения обратной последовательности не содержит ЭДС, генераторы замещаются сопротивлением обратной последовательности X_2

, структура схемы полностью повторяет схему прямой последовательности. Сопротивление генератора X_2 в относительных базисных единицах:

$$X_{2(\sigma)}^* = \frac{X_{2\%}}{100\%} \frac{S_{(\sigma)}}{S_{(H)}} = \frac{24,8}{100} \frac{1000}{63/0,8} = 3,15 \text{ о.е.}$$

Схема замещения нулевой последовательности. (При расчете тока двухфазного КЗ схему не составляют, так как токи нулевой последовательности равны нулю; она здесь приводится для общности). Составляют схему от точки КЗ по заданной схеме электрической сети (рис. 1); условно принимают, что в точке КЗ приложено напряжение \underline{U}_{K0} . Токи нулевой последовательности, растекаясь от точки КЗ, будут циркулировать по заземленным нейтральям оборудования. В примере есть заземленные нейтраль справа и слева от точки КЗ, вид схемы приведен на рис. 7.

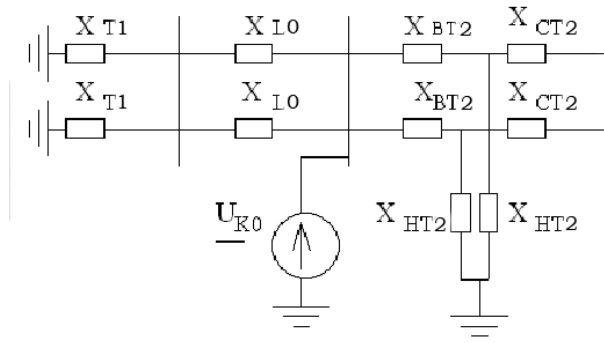


Рис.7.

Сопротивления линий $X_{L10}, X_{L20}, X_{L30}$ в соответствии с рекомендациями [2, с. 301] возьмем большие сопротивления прямой последовательности, например, вдвараза.

Преобразование схемы прямой последовательности:

К элементарному виду схема приводится эквивалентированием источников.

$$E_{\Sigma 1} = \frac{1,12 \cdot \frac{1}{2,65} + 0,85 \cdot \frac{1}{9,43}}{\frac{1}{2,65} + \frac{1}{9,43}} = 1,056 \text{ o.e.} \quad X_{\Sigma 1} = \frac{1}{\frac{1}{2,65} + \frac{1}{9,43}} = 2,031 \text{ o.e.}$$

Преобразование схемы обратной последовательности:

Эквивалентное сопротивление генераторов, линий и трансформаторов

$$X_2 = 1/(1/3,15 + 1/3,15) = 1,575 \text{ o.e.} \quad X_{\Sigma 2} = (1,575 + 0,75 + 0,61) // 9,43 = 2,19 \text{ o.e.}$$

Величина тока прямой последовательности двухфазного КЗ.

$$I_{\kappa A1}^{(2)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}} = \frac{1,056}{2,031 + 2,19} = 0,25 \text{ o.e.}$$

Симметричные составляющие при двухфазном КЗ.

$$I_{\kappa A2} = -0,25 \text{ o.e.}; \quad U_{\kappa A1} = U_{\kappa A2} = x_{\Sigma 2} I_{\kappa A1}^{(2)} = 2,19 \cdot 0,25 = 0,548 \text{ o.e.}$$

Ток поврежденной фазы в месте КЗ.

$$I_{\kappa}^{(2)} = m^{(2)} I_{\kappa A1} = \sqrt{3} \cdot 0,25 = 0,435 \text{ o.e.}$$

В именованных единицах.

$$I_{k(u.e.)}^{(2)} = I_{K(\phi)}^{(2)*} \cdot I_{\phi} = 0,435 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1,093 \text{ kA.}$$

Сравним полученное значение с осевым переходным током трехфазного КЗ

$$(I_k'' = 1,31 \text{ кА}) \quad I_k^{(2)} < I_k''.$$

6. Построение векторной диаграммы напряжений в точке кз и на шинах высокого напряжения трансформаторов Т1

Вид векторной диаграммы в точке КЗ приведен в [2, глава 14]. Диаграмма строится с учетом уже найденных в п. 5 симметричных составляющих.

Вид диаграммы на шинах высокого напряжения трансформаторов Т1 несколько отличен: выраженные в относительных базисных единицах в схеме прямой последовательности напряжения увеличиваются на величину падения напряжения оттока прямой последовательности в сопротивлении линии L ; в схеме обратной последовательности напряжение уменьшается на величину падения напряжения оттока обратной последовательности в эквивалентной линии L ; в схеме нулевой последовательности напряжения уменьшаются на величину падения напряжения оттока нулевой последовательности в линии L (см. [2, 14.2]). Направление векторов напряжений прямой, обратной, нулевой последовательностей остается таким же, как в точке КЗ.

Определим симметричные составляющие напряжений на шинах высокого напряжения трансформаторов Т1.

Определим падение напряжения на эквивалентном сопротивлении линии L в схеме прямой последовательности (схема та же, что на рис. 2 п. 1, но в точке кз приложено остаточное напряжение U_{KAI}).

По эквивалентному сопротивлению 7 (схема та же, что на рис.5 п.2, но в точке кз приложено остаточное напряжение U_{KA1}) протекает ток под действием разности напряжений $E_{\Gamma} - U_{KA1}$:

$$I_{\Gamma 1} = \frac{E_{\Gamma} - U_{KA1}}{X_7} = \frac{1,12 - 0,548}{2,65} = 0,245 \text{ о.е.}$$

Падение напряжения на сопротивлении X_3 :

$$\Delta U_{L1} = X_3 I_{\Gamma 1} = 0,61 \cdot 0,245 = 0,146 \text{ о.е.}$$

Напряжение прямой последовательности на шинах высокого напряжения трансформатора Т1:

$$U_{BT1} = U_{KA1} + \Delta U_{L1} = 0,548 + 0,146 = 0,694 \text{ о.е.}$$

$$\text{или: } U_{BT1(u.e.)} = 0,694 \cdot 230 / \sqrt{3} = 92,3 \text{ кВ.}$$

Определим величину падения напряжения на эквивалентном сопротивлении линии L в схеме обратной последовательности.

С учетом того, что ЭДС в этой схеме равны нулю, а генераторы замещаются сопротивлениями X_2 , ток по эквивалентному сопротивлению 7:

$$I_{\Gamma 2} = U_{KA2} / X_7 = 0,548 / 2,945 = 0,186 \text{ о.е.}$$

Падение напряжения на сопротивлении X_3 :

$$\Delta U_L = X_3 I_{\Gamma 2} = 0,61 \cdot 0,186 = 0,111 \text{ о.е.}$$

Напряжение обратной последовательности на шинах высокого напряжения трансформатора Т1:

$$U_{BT1} = U_{KA2} - \Delta U_L = 0,548 - 0,111 = 0,437 \text{ о.е.}$$

$$\text{или: } U_{BT1(u.e.)} = 0,437 \cdot 230 / \sqrt{3} = 58,1 \text{ кВ.}$$

По этим данным строится векторная диаграмма напряжений.

Список литературы

1. Электротехнический справочник. ТЗ.
Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / (под общей редакцией профессоров МЭИ: И. Н. Орлова и др.) - 7-е изд., - М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970.
3. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. Под ред. Б. Н. Неклепаева. - М.: Энергия, 1976.
4. Веников В. А. Переходные электро механические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1978, 1985.

Контрольные вопросы

1. Что называется сверхпереходным и ударным током короткого замыкания? Как они определяются?
2. Как определяются оси d , q ротора синхронной машины по ее параметрам и данным режима работы?
3. Какие составляющие можно выделить в токах статора и ротора синхронного генератора в переходном процессе при трехфазном коротком замыкании на шинах статора?
4. Какими схемами целесообразно замещать синхронный генератор (двигатель) в установившемся и переходном режимах?
5. Как обосновать законы изменения режимных параметров синхронного генератора в процессе короткого замыкания и его отключения?
6. Что называется форсировкой возбуждения, для чего и как она осуществляется?
7. Что такое «гашение поля»? Для каких целей и как оно осуществляется?

8. В чем заключается алгоритм практического метода расчета токов несимметричного короткого замыкания? Как он обосновывается?
9. Как построить векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричном коротком замыкании для точки К.З и для любой другой ветви или точки схемы?
10. Что называется собственной и взаимной мощностью генератора?
11. Когда идентичны условия наступления предела по активной мощности и предела статической устойчивости?
12. Что понимают под неустойчивостью узла нагрузки электрической системы? Какие вам известны критерии устойчивости?
13. Назовите критерии динамической устойчивости электрической станции (системы).
14. Перечислите основные способы повышения статической и динамической устойчивости электрической системы.
15. Поясните, что такое самовозбуждение синхронного генератора (двигателя) и обоснуйте характерные точки области синхронного самовозбуждения.
16. Почему не во всех случаях возможна успешная ресинхронизация генератора (двигателя), выпавшего из синхронизма?
17. Запишите и обоснуйте дифференциальное уравнение относительного движения ротора синхронного генератора (двигателя, компенсатора).
18. Может ли синхронный генератор тормозиться в период короткого замыкания? Приведите примеры.
19. Обоснуйте метод площадей как критерий динамической устойчивости.
20. Когда синхронная ЭДС E_q может быть меньше переходной ЭДС и почему?
21. Как активная мощность генератора (двигателя) связана с его вращающим моментом?
22. Что надо предпринять, чтобы увеличить активную мощность, выдаваемую синхронным генератором в электрическую систему?

23. Поясните, почему в системе относительных единиц $x_{(н)нагр}^* \approx 0.35$?

24. Как можно увеличить реактивную мощность, выдаваемую генератором в систему, воздействуя на режимный параметр генератора?

Приложение 1.

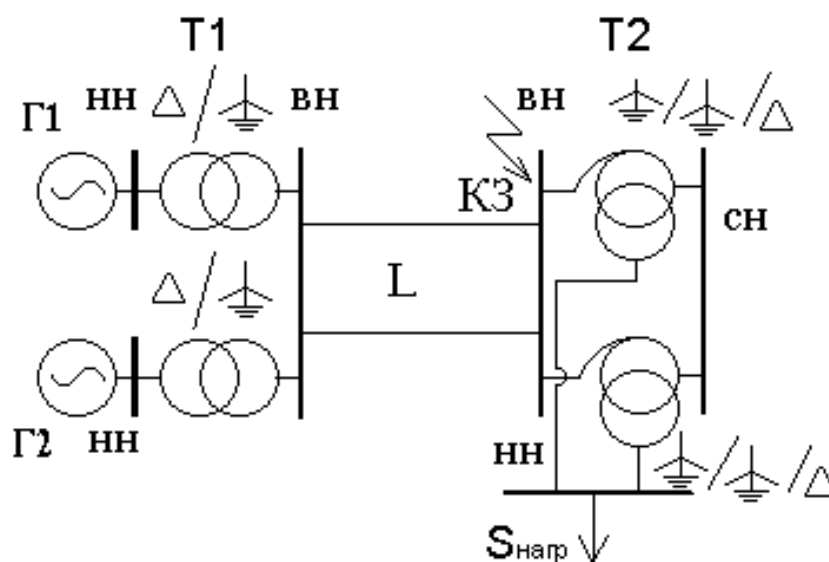


Схема ЭЭС

Варианты ККР

Вариант	Элемент ЭЭС	Параметры элемента ЭЭС				
1	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		60	0,85	0,21	0,33	3,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		70	11		220/10,5	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		90	10,5	32	18	230/110/36
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1	
		150	0,4		2,5	
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		50	0,85		35	
2	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		70	0,75	0,25	0,31	2,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		90	12		230/11	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		100	11,5	33	19,5	240/115/34
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1	
		200	0,4		3	

	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		80	0,75		36	
3	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		100	0,85	0,21	0,33	5,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		120	13		120/18,5	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		120	12,5	34	19	130/35/11
	Линия Л	l , км	$X_{удЛ}$, Ом/км		X_0/X_1	
		90	0,4		2,5	
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		85	0,8		10,5	
4	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		80	0,75	0,25	0,31	2,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		90	10		130/18	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		110	11	31	17	110/35/14
	Линия Л	l , км	$X_{удЛ}$, Ом/км		X_0/X_1	
		70	0,4		3	
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		80	0,9		11	
5	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		60	0,85	0,21	0,33	3,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		70	11		240/14,5	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		90	10,5	32	18	220/115/37
	Линия Л	l , км	$X_{удЛ}$, Ом/км		X_0/X_1	
		120	0,4		2,5	
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		50	0,85		36	
6	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		70	0,75	0,25	0,31	2,5
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кз}$, %		K_T	
		100	11		210/13	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T
		120	11,5	33	19,5	235/120/37
	Линия Л	l , км	$X_{удЛ}$, Ом/км		X_0/X_1	
		130	0,4		3	
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ	
		90	0,75		36	
	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²
		60	0,85	0,21	0,33	5,5

7	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа		$U_{кз}$, %		K_T	
		80		13		220/18,5	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T	
		100	12,5	34	19	230/120/37	
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1		
		130	0,4		2,5		
Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ			
	70	0,8		36			
8	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²	
		90	0,75	0,25	0,31	2,5	
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа		$U_{кз}$, %		K_T	
		110		10		110/18	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T	
		130	11	31	17	120/34/10	
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1		
		80	0,4		3		
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ		
		50	0,9		10,5		
9	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²	
		100	0,85	0,21	0,33	5,5	
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа		$U_{кз}$, %		K_T	
		120		13		120/18,5	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T	
		120	12,5	34	19	130/35/11	
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1		
		90	0,4		2,5		
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ		
		85	0,8		10,5		
10	Генераторы Г1, Г2	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$	$X''_{d(H)}$, о.е.	$X'_{d(H)}$, о.е.	J , ТМ ²	
		80	0,75	0,25	0,31	2,5	
	Трансформатор Т1	$S_{(H)}$, МВа		$U_{кз}$, %		K_T	
		90		10		130/18	
	Автотрансформатор Т2	$S_{(H)}$, МВа	$U_{кзВ-С}$, %	$U_{кзВ-Н}$, %	$U_{кзС-Н}$, %	K_T	
		110	11	31	17	110/35/14	
	Линия Л	l , км	Худ _Л , Ом/км		X_0/X_1		
		70	0,4		3		
	Нагрузка	$P_{(H)}$, МВт	$\cos \varphi_{(H)}$		$U_{(H)}$, кВ		
		80	0,9		11		