

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Волгоградский государственный аграрный университет

Кафедра «Теоретические основы электротехники и
электропитание»

Методические указания к выполнению расчетно-графической работы
по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» **Ч.2**
РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Волгоградский ГАУ 2019

1. Содержание расчетно-графической работы

На примере электроэнергетической системы, приведенной на рисунке 1 и данных варианта, необходимо:

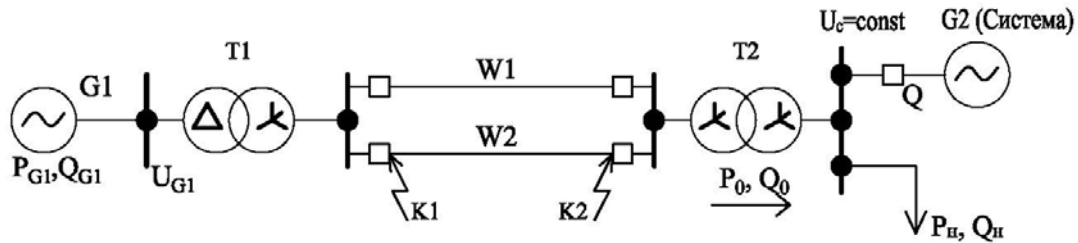


Рисунок 1

1. Составить схему замещения заданной электроэнергетической системы и определить её параметры.

2. Для заданной электроэнергетической системы с генераторами без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД:

- построить угловые характеристики мощности;
- графически определить пределы передаваемой мощности;
- определить коэффициенты запаса статической устойчивости;
- построить векторную диаграмму заданной электроэнергетической системы.

3. Для заданной электроэнергетической системы, при возникновении заданного несимметричного КЗ на линии W2 в точках 1 или 2 и последующем его отключении, необходимо:

а) определить параметры схемы замещения в аварийном и послеаварийном режимах;

б) построить динамические характеристики мощности системы;

в) определить максимальный угол и время отключения заданного вида КЗ в заданной точке;

г) определить максимальный угол и время отключения трехфазного КЗ на шинах ВН трансформаторов связи T1;

д) определить, сохранится ли устойчивость при возникновении двухфазного КЗ в заданной точке, с переходом двухфазного КЗ в трехфазное через время t_1 , соответствующее углу нагрузки δ_1 и последующее отключение КЗ через время t_2 , соответствующее углу нагрузки δ_2 .

4. При отключении выключателя Q в электрической системе (рисунок 1) требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению при условиях:

1. Две линии находятся в работе, генераторы оснащены АРВ ПД.
2. Одна линия отключена, генераторы оснащены АРВ ПД.
3. Одна линия отключена, генераторы не имеют АРВ.

Варианты для выполнения расчетно-графической работы приведены в приложении 1, удельные сопротивления проводов ЛЭП приведены в приложении 2.

2. Составление схемы замещения заданной электроэнергетической системы и определение её параметров

В нормальном режиме работы схема замещения системы, указанной на рисунке 1, может быть представлена в виде:

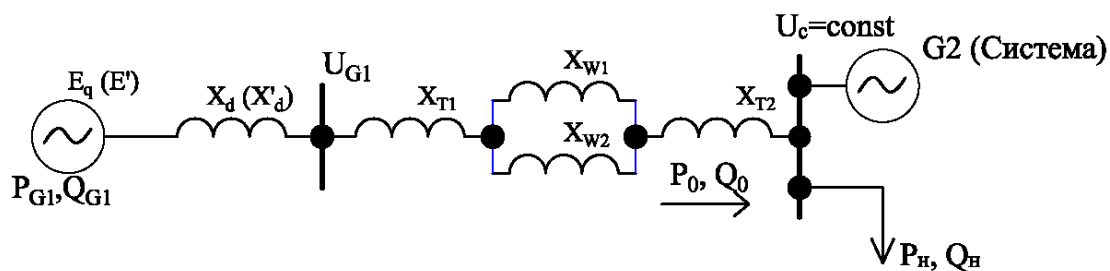


Рисунок 2

Расчет устойчивости можно проводить как в именованных, так и в относительных единицах, но все-таки наиболее удобно проводить данные расчеты в относительных единицах. Для рассматриваемой системы за базисные величины можно принять: активную мощность (P_0), которая передается генераторами электростанции в энергосистему, в данном случае равную

мощности нагрузки (P_H) $S_6 = P_0 = P_H$, и значение напряжения на шинах системы $U_6 = U_c$.

Так как в электроэнергетической системе, как правило, имеются несколько ступеней напряжения, то все сопротивления элементов схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения, принятой за базисную

$$X_* = X \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 \cdot \dots \cdot K_n^2, \quad (1)$$

где X – сопротивление элемента схемы замещения в именованных единицах на своей ступени напряжения;

K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициенты трансформации, через которые данное сопротивление связано со ступенью базисного напряжения (принимаются в направлении от ступени с базисным напряжением к ступени с искомым сопротивлением).

Для схемы замещения системы, приведенной на рисунке 2 и принятого базисного напряжения, относительные индуктивные сопротивления генераторов электростанции определяются по формулам

$$X_{d*} = \frac{X_{dG1} \cdot U_{G1}^2}{S_{G1}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2, \quad (2)$$

$$X'_{d*} = \frac{X'_{dG1} \cdot U_{G1}^2}{S_{G1}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2, \quad (3)$$

$$X_{(2)G1*} = \frac{X_{(2)G1} \cdot U_{G1}^2}{S_{G1}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2, \quad (4)$$

где $X_{d*}, X'_{d*}, X_{(2)*}$ – синхронное, переходное сопротивления и сопротивление обратной последовательности генераторов электростанции.

Индуктивные сопротивления трансформаторов и определяются из уравнений

$$X_{T1*} = \frac{U_{KT1} \%}{100} \cdot \frac{U_{2(T1)}^2}{S_{HT1}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T2}^2, \quad (5)$$

$$X_{T2*} = \frac{U_{кТ2} \%}{100} \cdot \frac{U_{2(Т2)}^2}{S_{HT2}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2}. \quad (6)$$

Индуктивное сопротивление одной линии

$$X_{W1*} = X_{W2*} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T2}^2. \quad (7)$$

Индуктивное сопротивление двух параллельных линий

$$X_{W*} = \frac{X_{W1*}}{2}. \quad (8)$$

Сопротивление нулевой последовательности

$$X_{(0)W*} \approx 4X_{W*}. \quad (9)$$

Постоянная механической инерции генераторов станции

$$T_{j*} = \frac{T_{jG1} \cdot S_{G1}}{S_6}. \quad (10)$$

Сопротивление внешней сети системы в нормальном режиме

$$X_{c*} = X_{T1*} + X_{W*} + X_{T2*}. \quad (11)$$

Сопротивление внешней сети системы при отключении одной линии

$$X_{c1*} = X_{T1*} + X_{W1*} + X_{T2*}. \quad (12)$$

Мощности, которые выдаются в приемную систему и потребляются нагрузкой

$$P_{0*} = P_{H*} = \frac{P_0}{S_6}, \quad (13)$$

$$Q_{0*} = Q_{H*} = \frac{Q_0}{S_6}. \quad (14)$$

Напряжение на шинах системы

$$U_* = \frac{U_c}{U_6}. \quad (15)$$

В дальнейших примерах знак «*» в относительных единицах величин опускается.

Пример №1. Для электрической системы (рисунок 1) требуется найти параметры схемы замещения (рисунок 2), если известны:

Параметры элементов системы:

Генератор G1: $P_{G1} = 150$ МВт, $\cos\varphi_{G1} = 0,85$, $U_{G1} = 18$ кВ,
 $X_{dG1} = 1,487$, $X'_{dG1} = 0,18$, $X_{(2)G1} = 0,145$, $T_{jG1} = 8,0$ с.

Трансформатор T1: $S_{T1} = 200$ МВ·А, $U_{2(T1)} = 242$ кВ,
 $K_{T1} = 242/18$, $U_k = 11\%$.

Линии W1, W2: $l = 120$ км, $X_0 = 0,43$ Ом/км.

Трансформатор T2: $S_{T2} = 240$ МВ·А, $U_{2(T2)} = 347$ кВ,
 $K_{T2} = 347/242$, $U_k = 7,6\%$.

Нагрузка: $P_0 = 140$ МВт, $Q_0 = 70$ Мвар.

Решение. Расчет параметров элементов системы выполним в относительных единицах. Примем в качестве базисных величин номинальное напряжение ОЭС $U_6 = 330$ кВ и активную номинальную мощность нагрузки $S_6 = 140$ МВ·А.

С учетом действительных коэффициентов трансформации получаем следующие значения реактивных сопротивлений генератора

$$X_d = \frac{1,487 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 1,3;$$

$$X'_d = \frac{0,18 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,16;$$

$$X_{(2)G1} = \frac{0,145 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,13.$$

Индуктивные сопротивления трансформаторов

$$X_{T1} = \frac{11 \cdot 242^2 \cdot 140}{100 \cdot 200 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,09,$$

$$X_{T2} = \frac{7,6 \cdot 347^2 \cdot 140}{100 \cdot 240 \cdot 330^2} = 0,05.$$

Индуктивное сопротивление одной линии

$$X_{W1} = X_{W2} = 0,43 \cdot 120 \cdot \frac{140}{330^2} \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,14,$$

двух линий

$$X_W = \frac{X_{W1}}{2} = 0,07.$$

Сопротивление передающей сети системы в нормальном режиме

$$X_c = 0,09 + 0,07 + 0,05 = 0,21.$$

Мощность нагрузки

$$P_H = \frac{140}{140} = 1;$$

$$Q_H = \frac{70}{140} = 0,5.$$

Постоянная механической инерции генератора

$$T_j = \frac{8,0 \cdot 150}{0,85 \cdot 140} = 10,08 \text{ с.}$$

3. Статическая устойчивость и характеристики мощности электроэнергетических систем

Для электрической системы (рисунок 1) с генераторами без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД требуется:

1. Построить угловые характеристики мощности.
2. Графически определить пределы передаваемой мощности.
3. Рассчитать коэффициенты запаса статической устойчивости.

Параметры элементов системы взять из примера №1.

Общие сведения

При проведении упрощенных расчетов статической устойчивости синхронные машины представляются по-разному в зависимости от типа автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Общий подход к представлению генератора можно сформулировать следующим образом: в расчетах статической

устойчивости генератор представляется такими ЭДС (напряжениями), которые АРВ генератора способны поддержать неизменными при изменении режима, и сопротивлениями, которые соответствуют им.

Рассмотрим три наиболее характерных типа регулирования возбуждения синхронных машин.

*Синхронные машины без автоматического
регулятора возбуждения*

В этом случае регулирование тока возбуждения возможно только вручную, а синхронный генератор в расчетах устойчивости представляется неизменной ЭДС E_q , приложенной за синхронным сопротивлением X_d . При этом угловую характеристику мощности можно рассчитать по формуле

$$P = \frac{E_q \cdot U_c}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta, \quad (16)$$

где δ – угол сдвига вектора ЭДС E_q относительно вектора напряжения системы U ;

$X_{d\Sigma} = X_{dG1} + X_c$ - результирующее индуктивное переходное сопротивление системы.

Электродвижущая сила находится из выражения

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U_c}\right)^2}. \quad (17)$$

Таким образом, подставляя постоянные значения E_q , U , $X_{d\Sigma}$ в формулу (16) и изменяя угол δ от 0° до 180° , можно построить угловую характеристику мощности системы с генераторами без АРВ (рисунок 3, зависимость 1).

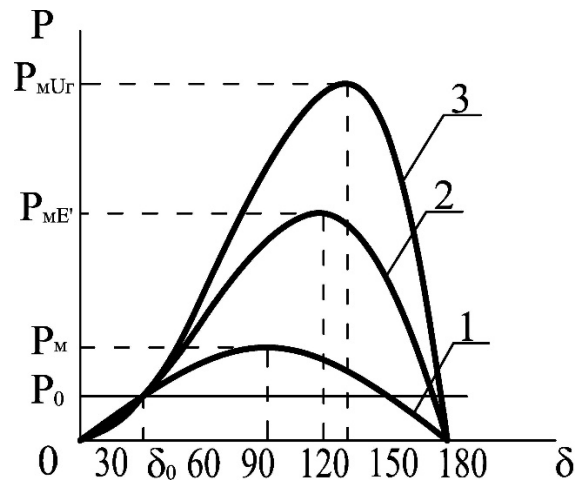


Рисунок 3 – Угловые характеристики мощности системы

- 1 – с генераторами без АРВ;
- 2 – с генераторами с АРВ ПД;
- 3 – с генераторами с АРВ СД.

Установившийся режим системы наступает при равенстве

$$P_T = P, \quad (18)$$

где P_T – мощность турбины;

P – активная мощность генератора.

Если $P_T = P = P_0$, наступает установившийся режим, который характеризуется углом

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U_c^2 + Q_0 \cdot X_{d\Sigma}}. \quad (19)$$

Предел мощности системы имеет место при $\delta = 90^\circ$ и находится по формуле

$$P_M = \frac{E_q \cdot U_c}{X_{d\Sigma}}. \quad (20)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{P_M - P_0}{P_0} \cdot 100\%. \quad (21)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости системы по активной мощности должен быть больше нормативного, значение которого составляет величину 20 % в нормальном режиме, а в аварийном допускается его снижение до 8 %.

*Синхронная машина с автоматическим регулятором возбуждения
пропорционального действия*

Автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия (АРВ ПД) изменяет ток возбуждения в зависимости от отклонения каких-либо параметров режима (например, U_r, I_r), что позволяет обеспечить неизменность ЭДС E' . В этом случае активную мощность генератора можно вычислить из выражения

$$P_{E'q} = \frac{E'_q \cdot U_c}{X'_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{X_{dG1} - X'_{dG1}}{X_{d\Sigma} \cdot X'_{d\Sigma}} \cdot \sin 2\delta, \quad (22)$$

где E'_q – поперечная составляющая переходной ЭДС E ;

$X'_{d\Sigma} = X'_{dG1} + X_c$ - результирующее индуктивное переходное сопротивление системы.

Переходная электродвижущая сила находится из выражения

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X'_{d\Sigma}}{U_c} \right)^2}. \quad (23)$$

Значение угла сдвига ЭДС E' относительно вектора напряжения системы U можно определить из уравнения

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_0 \cdot X'_{d\Sigma}}{U_c^2 + Q_0 \cdot X'_{d\Sigma}}. \quad (24)$$

Величина поперечной составляющей переходной ЭДС рассчитывается по формуле

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0). \quad (25)$$

Подставляя постоянные значения $E'_q, U_c, X_{dG1}, X'_{dG1}, X_{d\Sigma}, X'_{d\Sigma}$ в формулу (22) и изменяя угол δ от 0° до 180° , можно построить угловую характеристику мощности системы с генераторами, оснащенными АРВ ПД (рисунок 3, зависимость 2).

Предел мощности системы в этом случае можно найти графически либо по формуле

$$P_{ME'} = \frac{E' \cdot U_c}{X'_{d\Sigma}}. \quad (26)$$

Необходимо отметить, что предел мощности системы с генераторами с АРВ ПД наступает, как правило, при углах $\delta > 90^\circ$. Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (21), где $P_M = P_{ME'}$.

*Синхронная машина с автоматическим регулятором возбуждения
сильного действия*

Автоматический регулятор возбуждения сильного действия (АРВ СД) способен обеспечить постоянное напряжение на шинах генератора U_Γ , поскольку регулирует ток возбуждения не только по отклонению параметров режима, но и по скорости и ускорению их изменения. В этом случае активная мощность генератора определяется по формуле

$$P_{U_{\Gamma q}} = \frac{U_{\Gamma q} \cdot U_c}{X_c} \cdot \sin\delta - \frac{U_c^2 \cdot X_d}{2X_{d\Sigma} \cdot X_c} \cdot \sin 2\delta, \quad (27)$$

где $U_{\Gamma q}$ – поперечная составляющая напряжения U_Γ .

Напряжение на шинах генератора можно найти из выражения

$$U_\Gamma = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X_c}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_c}{U_c}\right)^2}. \quad (28)$$

Угол сдвига вектора напряжения генератора U_Γ относительно напряжения системы и находится по формуле

$$\delta_c = \arctg \frac{P_0 \cdot X_c}{U_c^2 + Q_0 \cdot X_c}. \quad (29)$$

Значение поперечной составляющей напряжения системы рассчитывается по уравнению

$$U_{\Gamma q} = U_{G1} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_c). \quad (30)$$

Подставляя постоянные значения $U_{Гq}, U_c, X_{dG1}, X_c, X_{d\Sigma}$ в формулу (27) и изменяя угол δ от 0° до 180° , можно построить угловую характеристику активной мощности системы с генераторами, которые имеют АРВ СД (рисунок 3, зависимость 3).

Предел мощности системы с генераторами с АРВ СД находится графически (рисунок 3) или по формуле

$$P_{MUГ} = \frac{U_{Г} \cdot U_c}{X_c}. \quad (31)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости находится по формуле (21), где $P_m = P_{MUГ}$ и сравнивается с нормативным значением.

Векторная диаграмма системы строится на основе ранее определенных параметров: ЭДС E_q, E' , напряжений U_c, U_{G1} и углов δ_0, δ'_0 и δ_{c0} (рисунок 4).

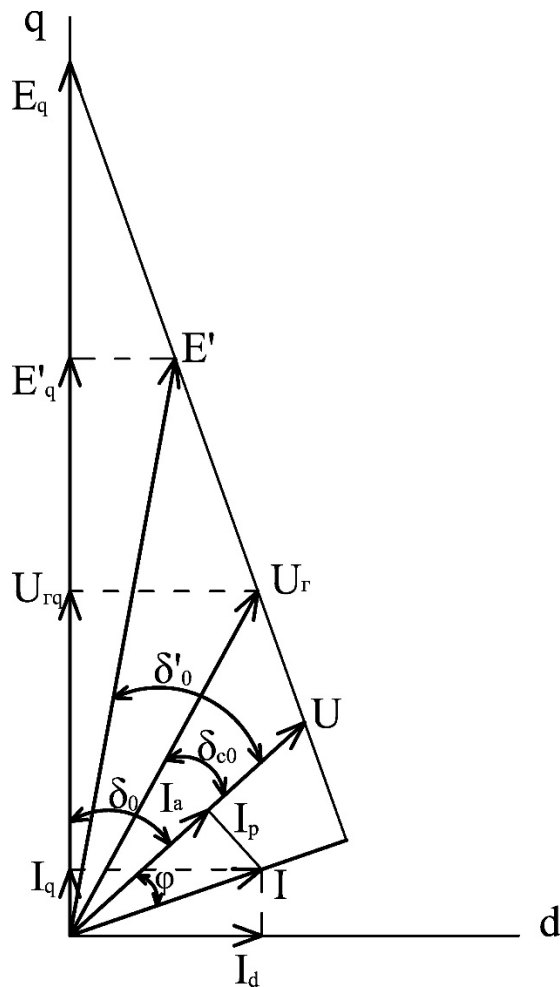


Рисунок 4 – Векторная диаграмма простейшей электрической системы

Величина тока I и его угол φ находятся из уравнений

$$\varphi = \arctg \frac{Q_0}{P_0}, \quad (32)$$

$$I = \frac{S_0}{\sqrt{3}U}. \quad (33)$$

Пример №2. Для электрической системы (рисунок 1) с генератором без автоматического регулятора возбуждения, с АРВ ПД и АРВ СД требуется:

1. Построить угловые характеристики мощности.
2. Определить пределы передаваемой мощности.
3. Рассчитать коэффициенты запаса статической устойчивости.
4. По полученным значениям параметров построить векторную диаграмму рассматриваемой системы.

Передаваемую мощность в ОЭС принять равной мощности нагрузки, т. е. $P_0 = P_n, Q_0 = Q_n$, а напряжение на шинах приемной системы $U_c = 330$ кВ. Остальные параметры системы взять из примера №1.

Решение. Общее индуктивное сопротивление системы с генераторами без АРВ

$$X_{d\Sigma} = 1,3 + 0,21 = 1,51.$$

Напряжение на шинах приемной системы в относительных единицах

$$U = \frac{U_c}{U_6} = \frac{330}{330} = 1,0.$$

Электродвижущая сила

$$E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 1,51}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,51}{1}\right)^2} = 2,31.$$

Угол сдвига вектора ЭДС E_q относительно вектора напряжения системы и в установившемся режиме

$$\delta_0 = \arctg \frac{1 \cdot 1,51}{1^2 + 0,5 \cdot 1,51} = 40,6^\circ.$$

Угловая характеристика мощности без АРВ

$$P_{Eq} = \frac{2,31 \cdot 1}{1,51} \cdot \sin\delta = 1,53 \cdot \sin\delta.$$

По данному выражению, при изменении угла δ от 0 до 180° построена угловая характеристика мощности системы с генератором без АРВ (рисунок 5, зависимость 1). Предел мощности достигается при угле $\delta_{M1} = 90^\circ$ и равен $P_{M1} = 1,53$.

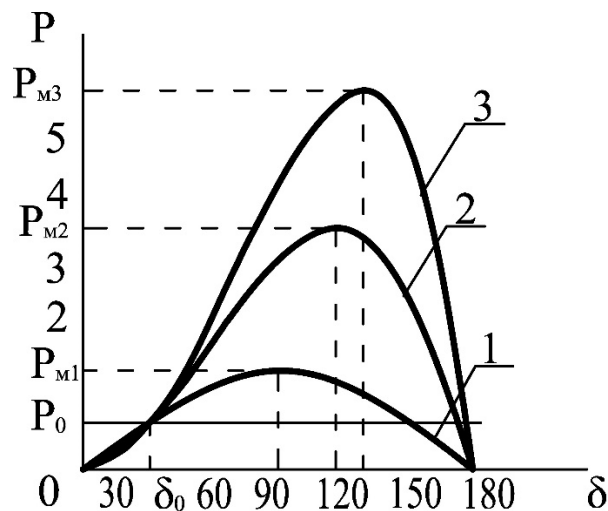


Рисунок 5 – Угловые характеристики мощности системы

- 1 – генератор без АРВ;
- 2 – генератор с АРВ ПД;
- 3 – генератор с АРВ СД.

Общее индуктивное переходное сопротивление системы с генераторами, оснащенными АРВ ПД

$$X'_{d\Sigma} = 0,16 + 0,21 = 0,37.$$

Переходная ЭДС:

$$E' = \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,37}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,37}{1}\right)^2} = 1,24.$$

Угол сдвига вектора ЭДС E' относительно вектора напряжения системы в установившемся режиме

$$\delta'_0 = \arctg \frac{1 \cdot 0,37}{1^2 + 0,5 \cdot 0,37} = 17,3^\circ.$$

Поперечная составляющая переходной ЭДС

$$E'_q = 1,24 \cdot \cos(40,6^\circ - 17,3^\circ) = 1,14.$$

Активная мощность генератора с АРВ ПД

$$\begin{aligned} P_{E'q} &= \frac{1,14 \cdot 1}{0,37} \cdot \sin\delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,3 - 0,16}{1,51 \cdot 0,37} \cdot \sin 2\delta = \\ &= 3,08 \cdot \sin\delta - 1,02 \cdot \sin 2\delta. \end{aligned}$$

По данному выражению, при изменении угла δ от 0 до 180° построена угловая характеристика мощности системы с генератором, оснащенный АРВ ПД (рисунок 5, зависимость 2). Предел мощности достигается при угле $\delta_{M2} = 117^\circ$ и равен $P_{M2} = 3,53$.

Напряжение на шинах генератора

$$U_\Gamma = \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,21}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,21}{1}\right)^2} = 1,13.$$

Угол сдвига вектора напряжения генератора относительно вектора напряжения системы в установившемся режиме

$$\delta_{c0} = \arctg \frac{1 \cdot 0,21}{1^2 + 0,5 \cdot 0,21} = 10,7^\circ.$$

Поперечная составляющая напряжения генератора

$$U_{\Gamma q} = 1,13 \cdot \cos(40,6^\circ - 10,7^\circ) = 0,98.$$

Угловая характеристика активной мощности генератора с АРВ СД

$$\begin{aligned} P_{U_{\Gamma q}} &= \frac{0,98 \cdot 1}{0,21} \cdot \sin\delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,3}{1,51 \cdot 0,21} \cdot \sin 2\delta = \\ &= 4,67 \cdot \sin\delta - 2,05 \cdot \sin 2\delta. \end{aligned}$$

По данному выражению, при изменении угла δ от 0 до 180° построена угловая характеристика мощности системы с генератором, оснащенный АРВ СД (рисунок 5, зависимость 3). Предел мощности достигается при угле $\delta_{M3} = 122^\circ$ и равен $P_{M3} = 5,8$.

Коэффициенты запаса статической устойчивости системы:

$$\text{без АРВ} - K_{p1} = \frac{P_{M1} - P_0}{P_0} = \frac{1,53 - 1}{1} = 0,53;$$

$$\text{с АРВ ПД} - K_{p2} = \frac{P_{M2} - P_0}{P_0} = \frac{3,53 - 1}{1} = 2,53;$$

$$\text{с АРВ СД} - K_{p3} = \frac{P_{M3} - P_0}{P_0} = \frac{5,8 - 1}{1} = 4,8.$$

Таким образом, коэффициенты запаса статической устойчивости по активной мощности удовлетворяют нормативным требованиям статической устойчивости. Расчет показывает, насколько эффективно применение различных типов АРВ. Так, применение АРВ ПД увеличивает коэффициент запаса в 4,7 раза, а АРВ СД - более чем в 9 раз.

По определенным параметрам: ЭДС E_q, E' , напряжений U_c, U_{G1} и углов δ_0, δ'_0 и δ_{c0} построим векторную диаграмму (рисунок 6) для системы приведенной на рисунке 1.

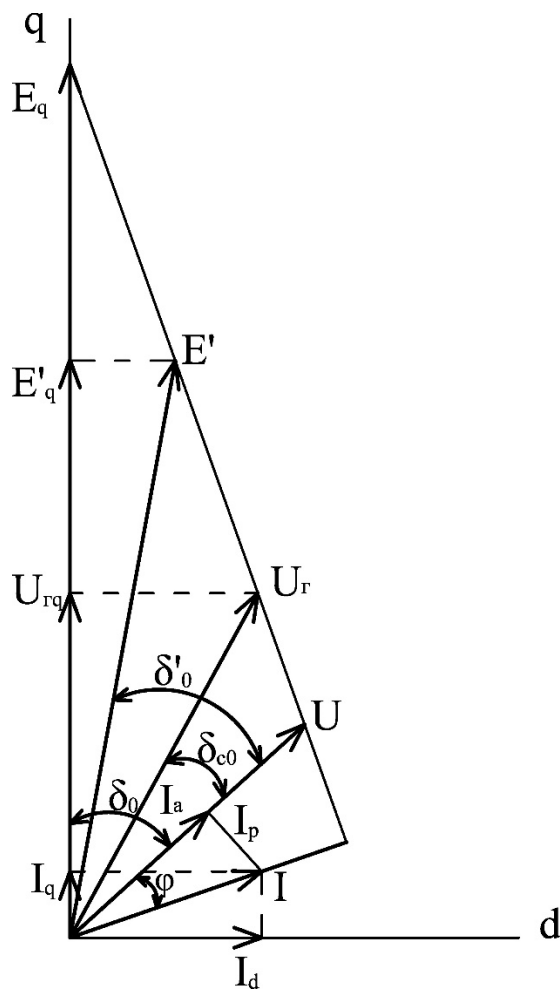


Рисунок 6 – Векторная диаграмма простейшей электрической системы

4. Динамическая устойчивость электроэнергетических систем

Для заданной электроэнергетической системы (рисунок 1), при возникновении заданного несимметричного КЗ на линии W2 в точках 1 или 2 и последующим его отключением, необходимо:

а) определить параметры схемы замещения в аварийном и послеаварийном режимах;

б) построить динамические характеристики мощности системы;

в) определить максимальный угол и время отключения заданного вида КЗ в заданной точке;

г) определить максимальный угол и время отключения трехфазного КЗ на шинах ВН трансформаторов связи Т1;

д) определить сохранится ли устойчивость при возникновении двухфазного КЗ в заданной точке, с переходом двухфазного КЗ в трехфазное через время t_1 , соответствующее углу нагрузки δ_1 , и последующее отключение КЗ через время t_2 , соответствующее углу нагрузки δ_2 .

Исходные данные принять из задачи по исследованию статической устойчивости.

Решение. Упрощенные расчеты динамической устойчивости электрических систем выполняются при представлении синхронных машин переходными ЭДС E' , приложенными за переходными сопротивлениями X'_d . Для определения предельного угла отключения КЗ построим динамические характеристики системы для трех режимов, которые нами рассматриваются:

- исходного;

- аварийного, при КЗ;

- послеаварийного, при отключении поврежденной линии электропередачи.

Для исходного режима схема замещения данной системы имеет вид, представленный на рисунке 7а. Активная мощность в нормальном режиме определяется по формуле

$$P_I = \frac{E' \cdot U}{X'_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta' = P_M^I \cdot \sin\delta', \quad (34)$$

где $P_M^I = E' \cdot U / X'_{d\Sigma}$ – амплитуда характеристики мощности исходного нормального режима.

Угол δ' , как отмечалось ранее, характеризует сдвиг вектора ЭДС E' относительно вектора U , но далее для упрощения знак «'» опускается. Поэтому исходный режим будет характеризоваться углом $\delta_0 = \delta'_0$.

Схема замещения системы в аварийном режиме отличается от схемы в нормальном режиме тем, что в месте КЗ дополнительно подключается сопротивление аварийного шунта X_{III} (рисунок 7б) для случая, когда КЗ возникает в точке 1 системы, которая нами рассматривается. Величина X_{III} в значительной степени зависит от вида КЗ (таблица 1).

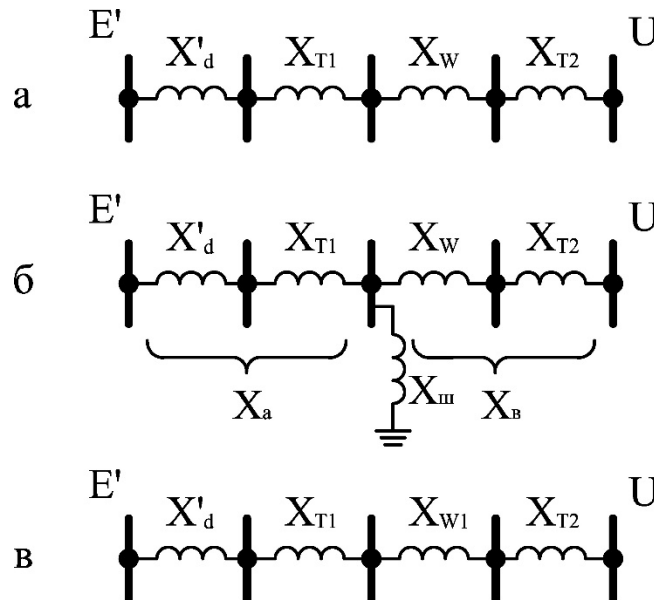
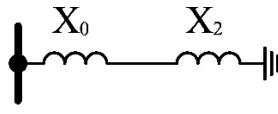
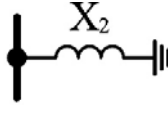
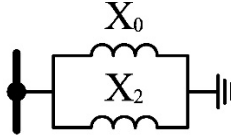
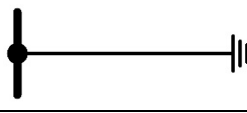


Рисунок 7 – Схемы замещения системы:

а – исходный режим; б – аварийный режим;
в – послеаварийный режим.

Таблица 1 – Зависимость сопротивления шунта от вида КЗ

Вид КЗ	Схема шунта	Сопротивление шунта
Однофазное		$X_{ш} = X_{(0)} + X_{(2)}$
Двухфазное		$X_{ш} = X_{(2)}$
Двухфазное на землю		$X_{ш} = \frac{X_{(2)} \cdot X_{(0)}}{X_{(2)} + X_{(0)}}$
Трёхфазное		$X_{ш} = 0$

Для выявления сопротивления нулевой последовательности $X_{(0)}$ и обратной последовательности $X_{(2)}$ последовательно составляются соответствующие схемы замещения (рисунок 8).

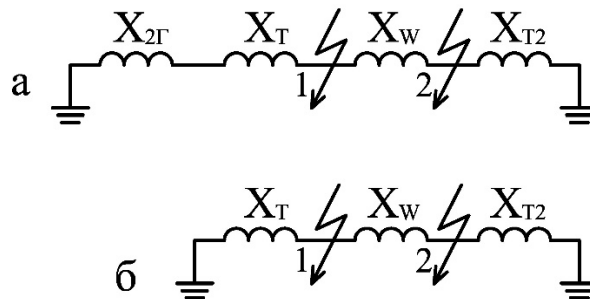


Рисунок 8 – Схемы замещения системы:

а – обратной последовательности; б – нулевой последовательности.

Искомые величины сопротивлений находятся путем свертывания схем относительно точки КЗ. Так, например, при КЗ в точке 1 значения сопротивлений находятся по формулам

$$X_{(2)} = \frac{(X_{(2)G1} + X_{T1})(X_W + X_{T2})}{X_{(2)G1} + X_{T1} + X_W + X_{T2}}, \quad (35)$$

$$X_{(0)} = \frac{X_{T1} \cdot (X_{(0)W} + X_{T2})}{X_{T1} + X_{(0)W} + X_{T2}}. \quad (36)$$

Схему замещения сети в аварийном режиме разделяем на две части: от генераторов электростанции до точки КЗ с результирующим сопротивлением X_A и от точки КЗ до шин системы бесконечной мощности с результирующим сопротивлением X_B . Преобразуем звезду сопротивлений X_A , X_B , X_{III} в эквивалентный треугольник (рисунок 9).

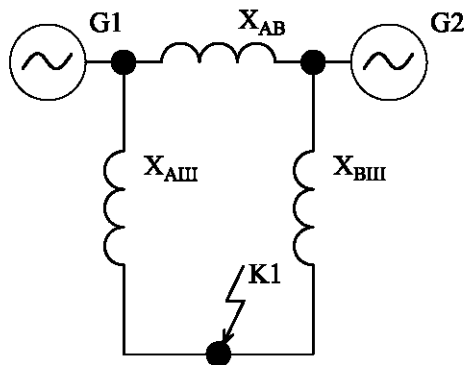


Рисунок 9 – Преобразованная схема замещения системы

Так как вся мощность в аварийном режиме передается через сопротивление X_{AB} , то сопротивления X_{AIII} и X_{BIII} можно отбросить, тогда результирующее сопротивление системы в аварийном режиме можно найти по формуле

$$X_{AB} = X_A + X_B + \frac{X_A \cdot X_B}{X_{III}}. \quad (37)$$

Для случая КЗ в точке 2 системы

$$X_A = X'_d + X_{T1} + X_W; \quad X_B = X_{T2}. \quad (38)$$

Активная мощность в аварийном режиме находится по формуле

$$P_{II} = \frac{E' \cdot U}{X_{AB}} \cdot \sin\delta = P_M^{II} \cdot \sin\delta, \quad (39)$$

где $P_{II} = E' \cdot U / X_{AB}$ – амплитуда характеристики мощности в аварийном режиме при КЗ.

В системе КЗ устраняется путем отключения поврежденного элемента. В данном случае это отключение одной линии W2, где возникло КЗ. Таким образом, схема замещения системы в

послеаварийном режиме имеет вид, приведенный на рисунке 7в. Активную мощность можно найти из уравнения

$$P_{III} = \frac{E' \cdot U}{X_{па}} \cdot \sin\delta = P_M^{III} \cdot \sin\delta, \quad (40)$$

где $P_{III} = E' \cdot U / X_{па}$ – амплитуда характеристики мощности в послеаварийном режиме;

$X_{па} = X'_d + X_{T1} + X_{W1} + X_{T2}$ – результирующее сопротивление системы в послеаварийном режиме при отключении КЗ.

Подставляя неизменные значения амплитуд мощности в формулы (34), (39), (40) и изменяя угол δ от 0° до 180° , можно построить динамические угловые характеристики системы, приведенные на рисунке 10.

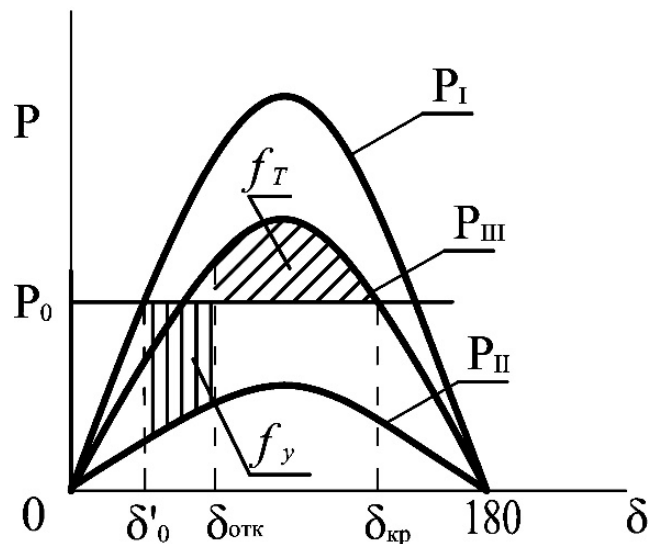


Рисунок 10 – Динамические характеристики системы в различных режимах:

P_I – исходный; P_{II} – аварийный ; P_{III} – послеаварийный.

Из условия равенства площадей ускорения f_y и торможения f_t (рисунок 10) найдем предельный угол отключения КЗ

$$\cos \delta_{отк}^{пр} = \frac{(\pi/180) \cdot P_0 (\delta_{кр} - \delta'_0) - P_M^{II} \cdot \cos \delta'_0 + P_M^{III} \cdot \cos \delta_{кр}}{P_M^{III} - P_M^{II}}. \quad (41)$$

В выражении (41) углы измеряются в градусах.

В ряде случаев может оказаться, что предельный угол отключения не существует (принимает комплексное значение), это означает, что отключение КЗ для сохранения динамической устойчивости не требуется. Тогда, подбирая площадку торможения равной площадке ускорения в аварийном режиме, можно определить максимальное значение угла δ , на который отклонится при КЗ вектор ЭДС генератора вместе с его ротором от синхронно идущего вектора ЭДС приемной системы. Критический угол (рисунок 10) определяется по формуле

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{P_0}{P_M^{III}}\right). \quad (42)$$

Для изображения площадок ускорения и торможения необходимо заштриховать область от механической мощности P_0 до характеристик электрической мощности соответствующего режима при изменении угла δ .

Для обеспечения динамической устойчивости системы средствами автоматики и защиты в большинстве случаев необходимо знать предельное время отключения КЗ ($t_{отк}^{пр}$). Чтобы найти $t_{отк}^{пр}$, необходимо построить зависимости $\delta = f(t)$. Последнюю можно вычислить из уравнения движения ротора синхронного генератора

$$T_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P, \quad (43)$$

где P – электромагнитная мощность, которая отдается генератором в сеть.

Решим это уравнение методом последовательных интервалов (численное интегрирование). Для этого необходимо выбрать длительность расчетного интервала Δt (для ручных вычислений рекомендуется принять $\Delta t = 0,05$ с, для машинных – $\Delta t = 0,01 - 0,02$ с).

Первый интервал (0 - 0,05 с)

Электрическая мощность, которая выдается генераторами в первый момент после возникновения КЗ:

$$P_{(1)} = P_M^{II} \cdot \sin \delta'_0. \quad (44)$$

Избыток мощности в начале первого интервала

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)}. \quad (45)$$

Приращение угла за первый интервал:

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5 \cdot K \cdot \Delta P_{(1)}, \quad (46)$$

$$K = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_j}, \quad (47)$$

где K – постоянный коэффициент; f – частота.

Угол в конце первого интервала

$$\delta_{(1)} = \delta'_0 + \Delta \delta_{(1)}. \quad (48)$$

Второй интервал (0,05 - 0,1 с)

$$P_{(2)} = P_M^{II} \cdot \sin \delta'_1, \quad (49)$$

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)}; \quad (50)$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \cdot \Delta P_{(2)}; \quad (51)$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}. \quad (52)$$

Расчет третьего и последующих интервалов (например, n – го) выполняется аналогично по формулам:

$$P_{(n)} = P_M^{II} \cdot \sin \delta_{(n-1)}; \quad (53)$$

$$\Delta P_{(n)} = P_0 - P_{(n)}; \quad (54)$$

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + K \cdot \Delta P_{(n)}; \quad (55)$$

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta \delta_{(n)}. \quad (56)$$

По результатам расчетов строится кривая $\delta = f(t)$ (рисунок 11). Зная значения $\delta_{отк}^{пр}$, на данной кривой находим $t_{отк}^{пр}$ (рисунок 11). Если $t_{отк}^{пр} > t_{отк}$, динамическая устойчивость системы обеспечивается, в противном случае необходимо принимать дополнительные меры для сохранения устойчивости при данном КЗ.

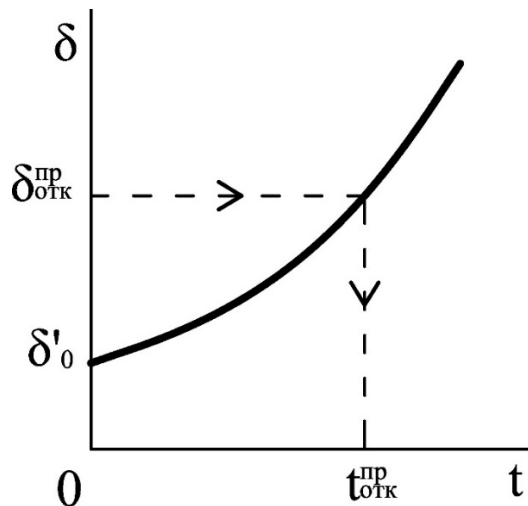


Рисунок 11 – Определение максимально допустимого времени отключения короткого замыкания

При анализе динамической устойчивости пользуются характеристиками мощности в исходном (P_I), аварийном (P_{II}) и послеаварийном (P_{III}) режимах, приведенных в примере №3.

По этим характеристикам, зная мощность турбины генератора $P_T = P_0$ и углы, соответствующие изменению режимов, строят площадки ускорения (f_y) и торможения (f_T). Если $f_T > f_y$, динамическая устойчивость сохраняется.

Пример №3. В электрической системе (рисунок 1) на линии W2 вблизи электростанции возникает двухфазное КЗ на землю. Релейной защитой данная линия отключается.

Требуется:

1. Определить параметры схемы замещения системы в аварийном и послеаварийном режимах.

2. Построить динамические характеристики мощности системы.
3. Рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ в заданной точке.

Параметры элементов системы:

Сопротивление нулевой последовательности линий электропередачи $X_W^{(0)} = 4,0 \cdot X_W$.

Схема соединений обмоток: T1 – Δ/Y_n , T2 – Y_n/Y_n .

Остальные недостающие параметры взять из примеров №1 и №2.

Решение. Схемы замещения системы для токов обратной и нулевой последовательности имеют вид, приведенный на рисунке 8.

Эквивалентные сопротивления схем обратной последовательности

$$X_2 = \frac{(0,13 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,13 + 0,09 + 0,07 + 0,05} = 0,08;$$

нулевой последовательности:

$$X_0 = \frac{0,09 \cdot (4 \cdot 0,07 + 0,05)}{0,09 + 4 \cdot 0,07 + 0,05} = 0,07.$$

Значение сопротивления аварийного шунта

$$X_{ш} = \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 + X_0} = \frac{0,08 \cdot 0,07}{0,08 + 0,07} = 0,037.$$

Результирующее сопротивление системы в аварийном режиме

$$\begin{aligned} X_{ав} &= X'_{d\Sigma} + \frac{(X'_d + X_{T1})(X_W + X_{T2})}{X_{ш}} = \\ &= 0,37 + \frac{(0,16 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,037} = 1,18. \end{aligned}$$

Общее сопротивление системы при отключении одной линии

$$X_{па} = 0,16 + 0,09 + 0,14 + 0,05 = 0,44.$$

Угловая характеристика мощности в исходном режиме

$$P_I = \frac{1,24 \cdot 1}{0,37} \cdot \sin\delta = 3,35 \cdot \sin\delta, \quad P_M^I = 3,35.$$

Угловая характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_{II} = \frac{1,24 \cdot 1}{1,18} \cdot \sin\delta = 1,05 \cdot \sin\delta, \quad P_M^{II} = 1,05.$$

Угловая характеристика мощности в послеаварийном режиме

$$P_{III} = \frac{1,24 \cdot 1}{0,44} \cdot \sin\delta = 2,82 \cdot \sin\delta, \quad P_M^{III} = 2,82.$$

По данным выражениям, изменяя угол δ от 0 до 180° , построим динамические характеристики мощности системы для трех рассматриваемых режимов (рисунок 12).

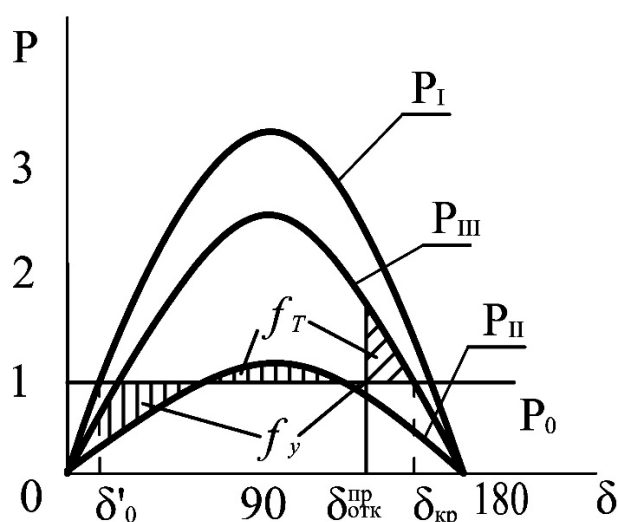


Рисунок 12 – Динамические характеристики мощности системы в режимах:

P_I – исходном; P_{II} – аварийном; P_{III} – послеаварийном

Критический угол

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{1}{2,82} = 159,2^\circ.$$

Предельный угол отключения КЗ

$$\delta_{отк}^{пр} = \arccos \frac{(3,14/180) \cdot 1 \cdot (159,2^\circ - 17,3^\circ) - 1,05 \cdot \cos 17,3^\circ + 2,82 \cdot \cos 159,2^\circ}{2,82 - 1,05}$$

$$= 131,0^\circ$$

По результатам расчетов заштрихуем площадки торможения и ускорения (рисунок 12). Поскольку геометрически $f_y = f_T$, следовательно, расчет $\delta_{отк}^{пр}$ выполнен правильно.

Уравнение движения ротора генератора решим методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала примем $\Delta t = 0,05$ с.

Значение постоянного коэффициента

$$K = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{10,08} = 4,46^\circ.$$

Значение электрической мощности в первый момент возникновения КЗ

$$P_{(1)} = 1,05 \cdot \sin 17,3^\circ = 0,31.$$

Избыток мощности в начале первого интервала

$$\Delta P_{(1)} = 1 - 0,31 = 0,69.$$

Изменение угла за первый интервал

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5 \cdot 4,46 \cdot 0,69 = 1,54^\circ.$$

Угол к концу первого интервала

$$\delta_{(1)} = 17,3 + 1,54 = 18,84^\circ.$$

Второй интервал (0,05... 0,1 с):

$$P_{(2)} = 1,05 \cdot \sin 18,84^\circ = 0,34;$$

$$\Delta P_{(2)} = 1 - 0,34 = 0,66;$$

$$\Delta \delta_{(2)} = 1,54 + 4,46 \cdot 0,66 = 4,48^\circ;$$

$$\delta_{(2)} = 18,84 + 4,48 = 23,32^\circ.$$

По результатам дальнейших расчетов на рисунке 13 построена кривая $\delta = f(t)$. По ней, исходя из значения $\delta_{отк}^{пр} = 131,0^\circ$, определяем $t_{отк}^{пр} = 0,61$ с. Таким образом, если действительное время отключения КЗ меньше 0,61 с, то динамическая устойчивость рассматриваемой системы при данном виде повреждения обеспечивается.

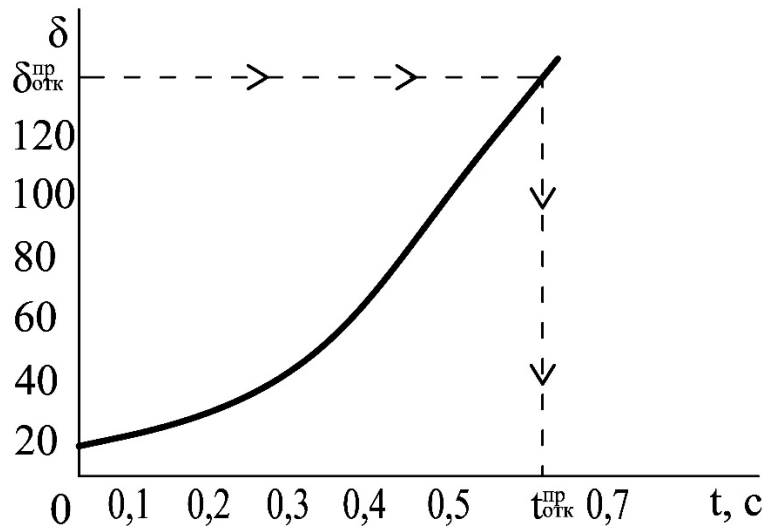


Рисунок 13 – Определение предельного времени отключения КЗ

Пример №4 В схеме, приведенной на рисунке 1, на линии W2 в точке 1 или 2 возникает двухфазное КЗ. В момент времени t_1 оно переходит в трехфазное, а затем, в момент времени t_2 , поврежденная линия отключается.

Требуется определить, сохранится ли динамическая устойчивость, если моменту времени t_1 соответствует угол 50° , t_2 - угол 70° .

Параметры элементов и режимы системы взять из задач 1, 2, 3.

Решение. Схемы замещения системы обратной и нулевой последовательности имеют вид, приведенный на рисунке 8.

Значение сопротивления аварийного шунта $X_{ш} = X_2 = 0,08$.

Общее сопротивление системы при двухфазном КЗ

$$X_{ав} = 0,37 + \frac{(0,16 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,08} = 0,75.$$

Угловая характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_{II} = \frac{1,24 \cdot 1}{0,75} \cdot \sin\delta = 1,65 \cdot \sin\delta, \quad P_M^{II} = 1,65.$$

Угловая характеристика мощности в исходном режиме

$$P_I = 3,35 \cdot \sin\delta, \quad P_M^I = 3,35.$$

Угловая характеристика мощности в послеаварийном режиме

$$P_{III} = 2,82 \cdot \sin\delta, \quad P_M^{III} = 2,82.$$

При трехфазном КЗ передаваемая мощность равна нулю.

По данным выражениям, изменяя угол δ от 0 до 180° , на рисунке 14 построены динамические характеристики мощности системы для рассматриваемых режимов. Определим площадки торможения f_T и ускорения f_y . Так как возможная величина площадки ускорения оказалась меньше, чем площадка торможения, динамическая устойчивость сохраняется.

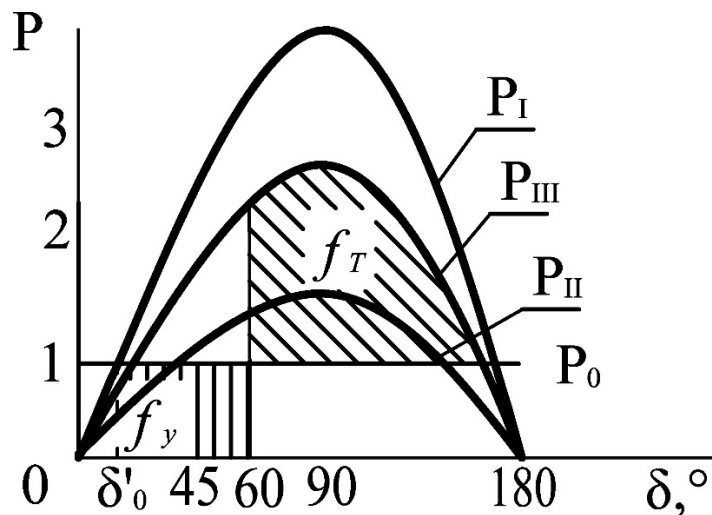


Рисунок 14 – Динамические характеристики мощности системы

5. Устойчивость нагрузки электроэнергетических систем

При отключении выключателя Q в электрической системе (рисунок 1) требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению при условиях:

1. Две линии находятся в работе, генераторы оснащены АРВ ПД.
2. Одна линия отключена, генераторы оснащены АРВ ПД.
3. Одна линия отключена, генераторы не имеют АРВ.

Статические характеристики нагрузки по напряжению принять в следующем виде:

$$P = P_0 \cdot (0,9 - 0,3 \cdot U_* + 0,47 \cdot U_*^2), \quad (57)$$

$$Q = Q_0 \cdot (4,9 - 10,1 \cdot U_* + 6,2 \cdot U_*^2). \quad (58)$$

Решение. Расчет устойчивости данного узла нагрузки при отключении выключателя Q (рисунок 1) наиболее удобно производить по вторичным критериям устойчивости:

1. Критерий устойчивости по напряжению

$$\frac{dE}{dU} > 0, \quad (59)$$

где E – эквивалентная ЭДС системы;

U – напряжение на шинах нагрузки.

2. Критерий устойчивости по приращению реактивной мощности

$$\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0. \quad (60)$$

Проверку устойчивости комплексной нагрузки по данному критерию начинают с составления схемы замещения системы (рисунок 15а) и построения зависимости $E = f(U)$ (рисунок 15б) с использованием известной формулы

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{QX_{\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{PX_{\Sigma}}{U}\right)^2}, \quad (61)$$

где X_{Σ} – эквивалентное сопротивление системы;

P, Q – активная и реактивная мощности нагрузки, значения которых зависят от уровня напряжения U .

Зависимости $P = f(U)$, $Q = f(U)$ называются статическими характеристиками нагрузки по напряжению.

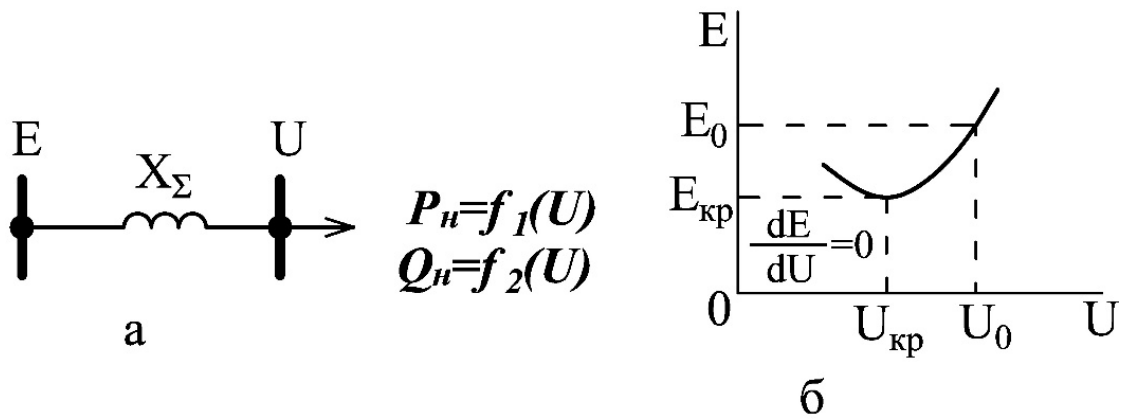


Рисунок 15 – Определение критического напряжения нагрузки с использованием вторичного критерия устойчивости:

а - схема замещения; б - зависимость эквивалентной ЭДС от напряжения на шинах нагрузки

Значение эквивалентного сопротивления системы зависит от конфигурации схемы сетей и типа АРВ на генераторах. Например, для системы, которую мы рассматриваем, имеем:

а) при двух линиях и АРВ ПД

$$X_{\Sigma} = X'_d + X_c. \quad (62)$$

б) при одной линии и АРВ ПД

$$X_{\Sigma} = X'_d + X_{c1}. \quad (63)$$

в) при одной линии и отсутствии АРВ на генераторах

$$X_{\Sigma} = X_d + X_{c1}. \quad (64)$$

Для построения зависимости $E = f(U)$ необходимо задаться рядом значений напряжения U , например, сначала принимая $U = U_0 = 1$. Затем, исходя из этой величины напряжения, по зависимостям $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ определяют значения нагрузки, например P_0, Q_0 . Полученные значения U, P, Q и X_{Σ} выбираются в зависимости от режима, подставляются в формулу (61), по которой рассчитывают E (в данном случае первую величину E_0 , см. рисунок 15б). Затем задаются новым значением U , например, $U_1 < U_0$, по статическим характеристикам опять определяют значения P_1, Q_1 при этом напряжении и рассчитывают E_1 и т. д. Зависимость

$E = f(U)$ строится до тех пор, пока при снижении напряжения U не начнет увеличиваться E . Предельный режим с точки зрения устойчивости достигается там, где производная dE/dU равна нулю, что соответствует минимальному значению E (рисунок 15б).

Запас устойчивости нагрузки по напряжению в исходном режиме можно характеризовать соотношением

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0}, \quad (65)$$

где U_0 – напряжение на нагрузке в исходном режиме;

$U_{кр}$ – критическое напряжение в точке минимума графика $E = f(U)$.

Коэффициент запаса по напряжению в нормальном режиме должен быть не меньше 0,15, а в аварийном – не меньше 0,1.

Пример №5. При отключении выключателя Q в электрической системе (рисунок 1) с генераторами, оснащенными АРВ ПД, требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

Параметры системы взять из примера №1.

Решение. Для определения критического напряжения узла нагрузки используем практический критерий устойчивости в виде неравенства (59). Схемы замещения системы электроснабжения потребителей в рассматриваемом режиме показаны на рисунке 16.

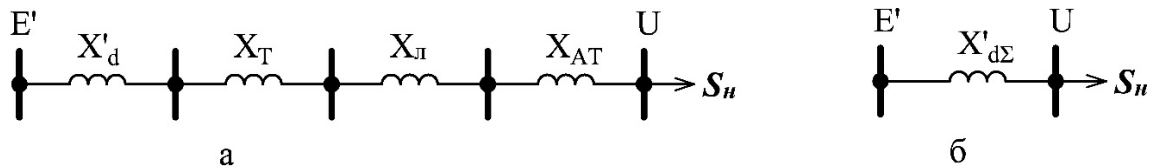


Рисунок 16 – Схемы замещения системы электроснабжения:

а - полная; б - эквивалентная

При напряжении $U_0 = 1,0$:

$$P_0 = 1 \cdot (0,83 - 0,3 \cdot 1 + 0,47 \cdot 1^2) = 1;$$

$$Q_0 = 0,5 \cdot (4,9 - 10,1 \cdot 1 + 6,2 \cdot 1^2) = 0,5;$$

$$\begin{aligned} \text{ЭДС } E'_0 &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,37}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,37}{1}\right)^2} = 1,24. \end{aligned}$$

При снижении напряжения $U_1 = 0,9$:

$$P_1 = 1 \cdot (0,83 - 0,3 \cdot 0,9 + 0,47 \cdot 0,9^2) = 0,94;$$

$$Q_1 = 0,5 \cdot (4,9 - 10,1 \cdot 0,9 + 6,2 \cdot 0,9^2) = 0,42;$$

$$E'_1 = \sqrt{\left(0,9 + \frac{0,42 \cdot 0,37}{0,9}\right)^2 + \left(\frac{0,94 \cdot 0,37}{0,9}\right)^2} = 1,14.$$

Далее на основе расчетов ЭДС E' при $U = 0,8 \dots 0,5$ построена кривая $E = f(U)$, приведенная на рисунке 17. Критическому значению напряжения соответствует точка перегиба кривой, где $U_{кр} = 0,69$.

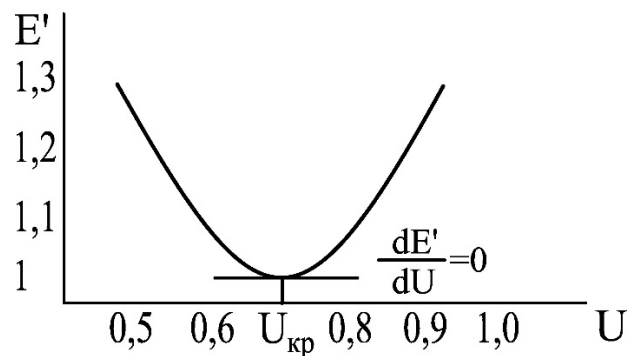


Рисунок 17 – Зависимость переходной ЭДС от напряжения на шинах нагрузки

Запас устойчивости нагрузки по напряжению

$$K_U = \frac{1 - 0,69}{1} = 0,31.$$

Таким образом, запас устойчивости нагрузки больше нормативного, что позволит нагрузке устойчиво работать.

Пример №6. Определить критическое напряжение и запас устойчивости нагрузки по напряжению для схемы, приведенной на рисунке 1, при отключении выключателя Q по критерию

$$\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0. \quad (66)$$

Параметры схемы и режима взять из задач №1, №2.

Расчеты произвести для случаев:

1. Генераторы без АРВ.
2. Генераторы оснащены АРВ ПД.
3. Генераторы оснащены АРВ СД.

Построить зависимости $Q_H = f(U)$, $Q_G = f(U)$, $\Delta Q = f(U)$.

Решение:

1. Определяются суммарные сопротивления электропередачи для генераторов без АРВ ($X_{д\Sigma}$), с АРВ ПД ($X'_{д\Sigma}$), с АРВ СД (X_c) (см. пример №2).

2. Напряжение на шинах потребителя принимается равным единице $U = 1$. При этом определяются: для генераторов без АРВ E_q , для генераторов с АРВ ПД E'_q ; для генераторов с АРВ СД U_G (см. пример №2).

3. Задаваясь рядом значений напряжения на шинах нагрузки $U = 0,1 \dots 1,0$, для каждого из них определяют:

- мощности нагрузок по типовым статическим характеристикам:

$$P_H = P_0 \cdot (0,83 - 0,3U_* + 0,47U_*^2), \quad (67)$$

$$Q_H = Q_0 \cdot (3,7 - 7U_* + 4,3U_*^2). \quad (68)$$

- реактивную мощность, поступающую от генераторов станции к узлу нагрузки, принимая в расчетах $P_G = P_H$, получим

$$Q_G = \sqrt{\left(\frac{EU_*}{X}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U_*^2}{X}. \quad (69)$$

- разность реактивных мощностей генерации и нагрузки

$$\Delta Q = Q_{\Gamma} - Q_{\text{H}}. \quad (70)$$

По результатам расчетов строятся характеристики по типу рисунка 18 для каждого вида АРВ на генераторах и режима без АРВ. По характеристикам определяется напряжение U_* , соответствующее наибольшему значению приращения мощности ΔQ . Это и будет критическое напряжение $U_{\text{кр}}$.

Далее по формуле (65) определяются коэффициенты запаса для каждого вида АРВ на генераторах.

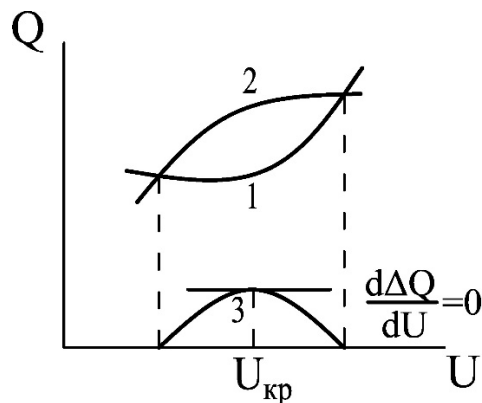


Рисунок 18 – Статические характеристики реактивной мощности: 1 - нагрузки; 2 - генерации; 3 - разность реактивных мощностей генерации и нагрузки

Пример №7. Определить критическое напряжение и запас устойчивости нагрузки по напряжению для схемы, приведенной на рисунке 1, при отключении выключателя Q по критерию (60).

Параметры схемы приведены на рисунке 19. Расчеты произвести для случаев:

1. Генераторы без АРВ.
2. Генераторы с АРВ ПД.
3. Генераторы с АРВ СД.

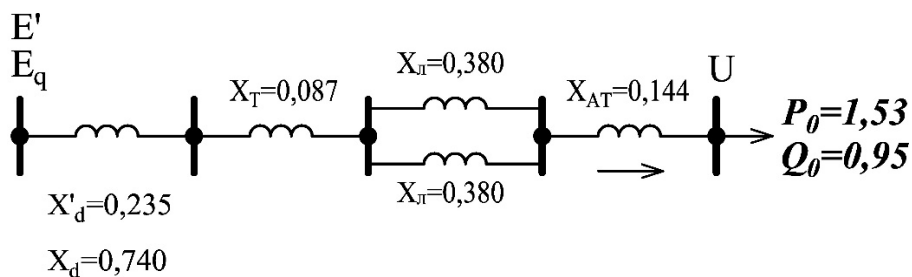


Рисунок 19 – Схема замещения электрической системы

Решение:

1. Определим суммарное сопротивление электропередачи:

а) генераторы без АРВ:

$$\begin{aligned} X_{d\Sigma} &= X_d + X_T + X_{л}/2 + X_{AT} = \\ &= 0,740 + 0,087 + 0,38/2 + 0,144 = 1,161; \end{aligned}$$

б) генераторы с АРВ ПД:

$$\begin{aligned} X'_{d\Sigma} &= X'_d + X_T + X_{л}/2 + X_{AT} = \\ &= 0,232 + 0,087 + 0,38/2 + 0,144 = 0,656; \end{aligned}$$

в) генераторы с ПРВ СД:

$$X_c = X_T + X_{л}/2 + X_{AT} = 0,087 + 0,38/2 + 0,144 = 0,421.$$

2. Принимаем напряжение на шинах потребителя равным единице. При этом:

а) генераторы без АРВ:

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,95 \cdot 1,161}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,53 \cdot 1,161}{1}\right)^2} = 2,753; \end{aligned}$$

б) генераторы с АРВ ПД:

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_c}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,95 \cdot 0,421}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,53 \cdot 0,421}{1}\right)^2} = 1,541. \end{aligned}$$

3. Задаемся рядом значений напряжения на шинах нагрузки $U = 0,1 \dots 1$ и определяем $P_H, Q_H, Q_G, \Delta Q$.

Для $U = 1$: $P_H = P_0, Q_H = Q_0, Q_G = Q_0, \Delta Q = 0$.

Для $U = 0,95$ по типовым статическим характеристикам нагрузки:

$$P_H = 1,53 \cdot (0,83 - 0,3 \cdot 0,95 + 0,47 \cdot 0,95^2) = 1,483;$$

$$Q_H = 0,95 \cdot (3,7 - 7 \cdot 0,95 + 4,3 \cdot 0,95^2) = 0,884.$$

Мощность, поступающая от генераторов станции к узлу нагрузки:

- генераторы без АРВ:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{E_q U}{X_{d\Sigma}}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U^2}{X_{d\Sigma}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2,753 \cdot 0,95}{1,161}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{1,161} = 0,918;$$

- генераторы с АРВ ПД:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{E' U}{X'_{d\Sigma}}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U^2}{X'_{d\Sigma}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,908 \cdot 0,95}{0,656}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{0,656} = 0,957;$$

- генераторы с АРВ СД:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Gamma} U}{X_c}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U^2}{X_c} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1,541 \cdot 0,95}{0,421}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{0,421} = 1,002.$$

Разность мощностей генерации и нагрузки $\Delta Q = Q_{\Gamma} - Q_H$.

- генератор без АРВ $\Delta Q = 0,918 - 0,884 = 0,034$;

- генератор с АРВ ПД $\Delta Q = 0,957 - 0,884 = 0,073$;

- генератор с АРВ СД $\Delta Q = 1,002 - 0,884 = 0,117$.

Аналогичные расчеты проводятся для других значений U .

Сведем результаты расчетов в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета устойчивости узла нагрузки

U		1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
P_H		1,530	1,483	1,439	1,399	1,363	1,330	1,301
Q_H		0,950	0,884	0,839	0,814	0,809	0,825	0,862
Q_G	без АРВ	0,950	0,918	0,878	0,828	0,868	0,696	0,609
	АРВ ПД	0,950	0,957	0,952	0,937	0,911	0,872	0,820
	АРВ СД	0,950	1,002	1,039	1,063	1,072	1,065	1,044
ΔQ	без АРВ	0	0,034	0,039	0,014	-0,041	-0,130	-0,253
	АРВ ПД	0	0,072	0,114	0,124	0,102	0,047	-0,042
	АРВ СД	0	0,117	0,200	0,249	0,262	0,240	0,182

По результатам расчетов строятся характеристики по типу рисунка 19. По ним определяется напряжение U , соответствующее наибольшему значению мощности ΔQ . Это и будет критическое напряжение.

Генераторы без АРВ $U_{кр} = 0,90$, коэффициент запаса

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,90}{1} \cdot 100\% = 10\%.$$

Генераторы с АРВ ПД $U_{кр} = 0,85$, коэффициент запаса

$$K_U = \frac{1 - 0,85}{1} \cdot 100\% = 15\%.$$

Генераторы с АРВ СД $U_{кр} = 0,80$, коэффициент запаса

$$K_U = \frac{1 - 0,80}{1} \cdot 100\% = 20\%.$$

Приложение 1 (начало)

№ варианта	P _{Г1} , МВт	cosφ _{Г1}	U _{Г1} , кВ	X _d	X' _d	X _{d(2)}	T _{Г1} , с	Подстанция 1				ЛЭП			Подстанция 2				P ₀ , МВт	cosφ _{н1}	U _с , кВ	Точка КЗ	Вид КЗ	δ ₁ , град.	δ ₂ , град.
								S _{Г1} , МВА	U _{1(Г1)} , кВ	U _{Δ(Г1)} , кВ	U _{кГ1} , %	U _н , кВ	L, км	Марка провода	S _{Г2} , МВ А	U _{1(Г2)} , кВ	U _{Δ(Г2)} , кВ	U _{кГ2} , %							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	360	0,9	11	1,8	0,2	0,2	4	400	10,5	110	10,5	110	60	АС-120	400	115	35	8	250	0,8	35	К1	К ⁽¹⁾	30	65
2	680	0,85	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	400	3хАС-150	750	230	347	14	500	0,95	330	К2	К ⁽²⁾	50	70
3	800	0,9	35	1,2	0,1	0,1	12	1000	37,5	230	11	220	200	3хАС-185	1000	242	510	20	750	0,9	500	К1	К ⁽¹⁺¹⁾	40	60
4	480	0,85	28	1,6	0,2	0,2	6	500	27,5	115	8	110	120	3хАС-150	420	110	242	12	300	0,75	220	К2	К ⁽²⁾	50	75
5	250	0,9	6,3	2,4	0,4	0,4	3	300	6,3	115	10,5	110	100	АС-120	300	115	510	11	150	0,77	500	К1	К ⁽¹⁾	30	50
6	420	0,85	11	1,7	0,2	0,2	5	560	10,5	240	13	220	400	3хАС-240	560	242	115	10,5	220	0,98	110	К2	К ⁽²⁾	35	65
7	300	0,9	6,3	2,2	0,3	0,3	3	400	6,3	330	12	330	350	3хАС-150	350	330	510	10,5	240	0,87	500	К1	К ⁽¹⁺¹⁾	70	80
8	120	0,85	14	3,1	0,6	0,6	2	150	13,8	115	10,5	110	40	АС-120	200	115	37,5	9	100	0,9	35	К2	К ⁽²⁾	45	60
9	720	0,9	28	1,3	0,1	0,1	12	750	27,5	242	12	220	200	3хАС-240	800	230	515	14	600	0,72	500	К1	К ⁽¹⁾	25	50
10	550	0,85	35	1,4	0,1	0,1	10	600	35	110	10,5	110	60	2хАС-120	600	115	230	10,5	400	0,82	220	К2	К ⁽²⁾	55	70
11	470	0,9	11	1,6	0,2	0,2	8	560	10,5	240	13	220	200	3хАС-185	560	242	510	10,5	350	0,7	500	К1	К ⁽¹⁺¹⁾	30	65
12	660	0,85	28	1,3	0,1	0,1	10	750	27,5	347	10,5	330	250	3хАС-185	750	347	242	16	640	0,97	220	К2	К ⁽¹⁾	50	70
13	360	0,9	11	1,9	0,2	0,2	7	400	10,5	110	10,5	110	100	2хАС-185	400	115	230	10,5	320	0,9	220	К1	К ⁽¹⁾	40	60
14	900	0,85	35	1,2	0,1	0,1	14	1000	35	115	11	110	250	2хАС-150	1000	115	230	11	750	0,9	220	К2	К ⁽²⁾	50	75
15	600	0,9	28	1,5	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	300	3хАС-240	750	242	35	12	600	0,94	35	К1	К ⁽¹⁾	30	50
16	530	0,85	35	1,8	0,2	0,2	7	600	35	110	10,5	110	100	3хАС-150	560	115	242	10,5	430	0,8	220	К2	К ⁽²⁾	35	65
17	320	0,9	11	2,2	0,2	0,2	6	400	10,5	110	10,5	110	150	2хАС-150	400	115	230	12	300	0,84	220	К1	К ⁽¹⁺¹⁾	70	80
18	680	0,85	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	120	3хАС-240	800	242	347	13	600	0,98	330	К2	К ⁽²⁾	45	60
19	340	0,9	14	1,7	0,2	0,2	5	400	13,8	110	10,5	110	120	2хАС-185	400	115	37,5	11	280	0,8	35	К1	К ⁽¹⁾	25	50
20	250	0,85	6,3	2,4	0,4	0,4	3	300	6,3	115	10,5	110	100	АС-120	300	115	510	11	150	0,77	500	К2	К ⁽¹⁺¹⁾	55	70
21	420	0,9	11	1,7	0,2	0,2	5	560	10,5	240	13	220	400	3хАС-240	560	242	115	10,5	220	0,98	110	К1	К ⁽¹⁾	30	65
22	300	0,85	6,3	2,2	0,3	0,3	3	400	6,3	330	12	330	350	3хАС-150	350	330	510	10,5	240	0,87	500	К2	К ⁽²⁾	50	70
23	120	0,9	14	3,1	0,6	0,6	2	150	13,8	115	10,5	110	40	АС-120	200	115	37,5	9	100	0,9	35	К1	К ⁽¹⁾	40	60
24	720	0,85	28	1,3	0,1	0,1	12	750	27,5	242	12	220	200	3хАС-240	800	230	515	14	600	0,72	500	К2	К ⁽²⁾	50	75
25	550	0,9	35	1,4	0,1	0,1	10	600	35	110	10,5	110	60	2хАС-120	600	115	230	10,5	400	0,82	220	К1	К ⁽¹⁺¹⁾	30	50
26	360	0,85	11	1,8	0,2	0,2	4	400	10,5	110	10,5	110	60	АС-120	400	115	35	8	250	0,8	35	К2	К ⁽¹⁾	35	65
27	680	0,9	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	400	3хАС-150	750	230	347	14	500	0,95	330	К1	К ⁽²⁾	70	80
28	800	0,85	35	1,2	0,1	0,1	12	1000	37,5	230	11	220	200	3хАС-185	1000	242	510	20	750	0,9	500	К2	К ⁽¹⁾	45	60

Приложение 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
29	480	0,9	28	1,6	0,2	0,2	6	500	27,5	115	8	110	120	3xAC-150	420	110	242	12	300	0,75	220	K1	K ^(1,1)	55	70
30	600	0,85	14	1,5	0,1	0,1	8	750	13,8	242	12	220	300	3xAC-240	750	242	35	12	600	0,94	35	K2	K ⁽¹⁾	30	65
31	530	0,9	35	1,8	0,2	0,2	7	600	35	110	10,5	110	100	3xAC-150	560	115	242	10,5	430	0,8	220	K1	K ⁽²⁾	50	70
32	320	0,85	11	2,2	0,2	0,2	6	400	10,5	110	10,5	110	150	2xAC-150	400	115	230	12	300	0,84	220	K2	K ^(1,1)	40	60
33	680	0,9	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	120	3xAC-240	800	242	347	13	600	0,98	330	K1	K ⁽¹⁾	50	75
34	340	0,85	14	1,7	0,2	0,2	5	400	13,8	110	10,5	110	120	2xAC-185	400	115	37,5	11	280	0,8	35	K2	K ⁽²⁾	30	50
35	250	0,9	6,3	2,4	0,4	0,4	3	300	6,3	115	10,5	110	100	AC-120	300	115	510	11	150	0,77	500	K1	K ^(1,1)	35	65
36	550	0,85	35	1,4	0,1	0,1	10	600	35	110	10,5	110	60	2xAC-120	600	115	230	10,5	400	0,82	220	K2	K ⁽²⁾	70	80
37	470	0,9	11	1,6	0,2	0,2	8	560	10,5	240	13	220	200	3xAC-185	560	242	510	10,5	350	0,7	500	K1	K ⁽¹⁾	45	60
38	660	0,85	28	1,3	0,1	0,1	10	750	27,5	347	10,5	330	250	3xAC-185	750	347	242	16	640	0,97	220	K2	K ^(1,1)	25	50
39	360	0,9	11	1,9	0,2	0,2	7	400	10,5	110	10,5	110	100	2xAC-185	400	115	230	10,5	320	0,9	220	K1	K ⁽²⁾	55	70
40	900	0,85	35	1,2	0,1	0,1	14	1000	35	115	11	110	250	2xAC-150	1000	115	230	11	750	0,9	220	K2	K ⁽¹⁾	30	65
41	600	0,9	28	1,5	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	300	3xAC-240	750	242	35	12	600	0,94	35	K1	K ^(1,1)	50	70
42	360	0,85	11	1,8	0,2	0,2	4	400	10,5	110	10,5	110	60	AC-120	400	115	35	8	250	0,8	35	K2	K ⁽¹⁾	40	60
43	680	0,9	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	400	3xAC-150	750	230	347	14	500	0,95	330	K1	K ⁽²⁾	50	75
44	800	0,85	35	1,2	0,1	0,1	12	1000	37,5	230	11	220	200	3xAC-185	1000	242	510	20	750	0,9	500	K2	K ⁽¹⁾	30	50
45	480	0,9	28	1,6	0,2	0,2	6	500	27,5	115	8	110	120	3xAC-150	420	110	242	12	300	0,75	220	K1	K ^(1,1)	35	65
46	250	0,85	6,3	2,4	0,4	0,4	3	300	6,3	115	10,5	110	100	AC-120	300	115	510	11	150	0,77	500	K2	K ⁽¹⁾	70	80
47	420	0,9	11	1,7	0,2	0,2	5	560	10,5	240	13	220	400	3xAC-240	560	242	115	10,5	220	0,98	110	K1	K ⁽²⁾	45	60
48	300	0,85	6,3	2,2	0,3	0,3	3	400	6,3	330	12	330	350	3xAC-150	350	340	510	10,5	240	0,87	500	K2	K ⁽¹⁾	25	50
49	120	0,9	14	3,1	0,6	0,6	2	150	13,8	115	10,5	110	40	AC-120	200	115	37,5	9	100	0,9	35	K1	K ^(1,1)	55	70
50	720	0,85	28	1,3	0,1	0,1	12	750	27,5	242	12	220	200	3xAC-240	800	230	515	14	600	0,72	500	K2	K ⁽¹⁾	30	65
51	420	0,9	11	1,7	0,2	0,2	5	560	10,5	240	13	220	400	3xAC-240	560	242	115	10,5	220	0,98	110	K1	K ^(1,1)	50	70
52	300	0,85	6,3	2,2	0,3	0,3	3	400	6,3	330	12	330	350	3xAC-150	350	330	510	10,5	240	0,87	500	K2	K ⁽²⁾	40	60
53	120	0,9	14	3,1	0,6	0,6	2	150	13,8	115	10,5	110	40	AC-120	200	115	37,5	9	100	0,9	35	K1	K ⁽¹⁾	50	75
54	720	0,85	28	1,3	0,1	0,1	12	750	27,5	242	12	220	200	3xAC-240	800	230	515	14	600	0,72	500	K2	K ⁽²⁾	30	50
55	550	0,9	35	1,4	0,1	0,1	10	600	35	110	10,5	110	60	2xAC-120	600	115	230	10,5	400	0,82	220	K1	K ^(1,1)	35	65
56	360	0,85	11	1,8	0,2	0,2	4	400	10,5	110	10,5	110	60	AC-120	400	115	35	8	250	0,8	35	K2	K ⁽¹⁾	70	80
57	680	0,9	28	1,4	0,1	0,1	8	750	27,5	242	12	220	400	3xAC-150	750	230	347	14	500	0,95	330	K1	K ^(1,1)	45	60
58	800	0,85	35	1,2	0,1	0,1	12	1000	37,5	230	11	220	200	3xAC-185	1000	242	510	20	750	0,9	500	K2	K ⁽¹⁾	25	50
59	480	0,9	28	1,6	0,2	0,2	6	500	27,5	115	8	110	120	3xAC-150	420	110	242	12	300	0,75	220	K1	K ⁽²⁾	55	70
60	600	0,85	14	1,5	0,1	0,1	8	750	13,8	242	12	220	300	3xAC-240	750	242	35	12	600	0,94	35	K2	K ⁽¹⁾	30	65
61	530	0,9	35	1,8	0,2	0,2	7	600	35	110	10,5	110	100	3xAC-150	560	115	242	10,5	430	0,8	220	K1	K ^(1,1)	50	70

Приложение 2 – Удельные сопротивления проводов марки АС

Индуктивное сопротивление, Ом/км, при проводах марок								
U _н , кВ	АС35	АС50	АС70	АС95	АС120	АС150	АС185	АС240
ВЛ-35кВ	0,438	0,427	0,417	0,406	0,4	0,398	0,386	0,378
ВЛ-110кВ	—	—	0,44	0,429	0,423	0,416	0,409	0,401
ВЛ-220кВ	—	—	—	—	0,44	0,422	0,415	0,407
ВЛ-330кВ	—	—	—	—	—	0,42	0,414	0,413