

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики и технологии металлов

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к практическим занятиям
по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Курган 2012

Кафедра: «Энергетики и технология металлов»

Дисциплина: «Переходные процессы в электроэнергетических системах»
(специальность 140211)

Составил: доцент, канд. техн. наук В.И. Мошкин

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний «Конспект практических занятий» по дисциплине ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Ч.2 / Сост. В.Н. СЕРЕБРЯКОВ – Саратов: Изд-во СГТУ, 2005. - 25с.

Утверждены на заседании кафедры 3 декабря 2011 г.

Рекомендованы методическим советом университета
«19» октября 2012 г.

Практическое занятие № 1

Тема: «Угловые характеристики одномашинной системы, работающей на шины бесконечной мощности. Статическая устойчивость нерегулируемой системы при нагрузке, заданной постоянным сопротивлением или статическими характеристиками»

Задача 1-1.

На рис. 1-1 приведена схема электрической системы, содержащая две генераторные станции, питающие комплексную нагрузку. Требуется:

1) определить коэффициент запаса статической устойчивости по идеальному пределу мощности; 2) построить угловую характеристику активной мощности передающей станции и определить коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку постоянным комплексным сопротивлением; 3) определить коэффициент запаса статической устойчивости по действительному пределу мощности, представив нагрузку статическими характеристиками.

Параметры схемы и параметры исходного режима:

$$G_1 : P_H = 50 \text{ МВт}; X_{*d} = 1,2; \cos \varphi = 0,8; X'_{*d} = 0,3;$$

$$T_1 : S_H = 63 \text{ МВА}; U_K = 10,5 \%; T_2 : S_H = 160 \text{ МВА}; U_K = 12\%;$$

$$G_2 : P_H = 130 \text{ МВт}; X_{*d} = 1,5; \cos \varphi = 0,85.$$

Передаваемая мощность станции 1 : $P_{H1} = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi_{H1} = 0,8.$

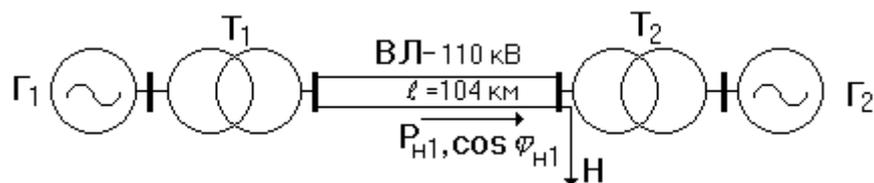


Рис.1-1. Схема электропередачи

Решение. Для определения коэффициента запаса по идеальному пределу мощности принимают, что генератор G_1 отдает мощность в приемную систему несоизмеримо большой мощности. При этих условиях напряжение на шинах нагрузки неизменно по величине и фазе при любых режимах работы электропередачи. На рис. 1-2 приведена схема замещения для расчета идеального предела мощности.

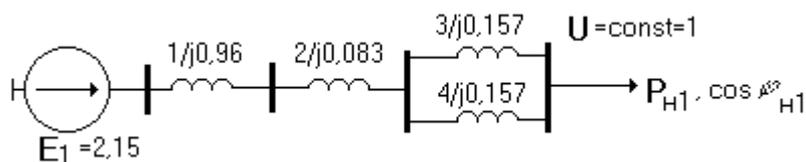


Рис.1-2.Схема замещения для расчета идеального предела мощности

Расчет выполним в относительных единицах при базисных условиях:

$$S_o = 50 \text{ МВА}; U_o = 115 \text{ кВ}.$$

Параметры схемы замещения и исходного режима при принятых базисных условиях будут:

$$X_1 = X_{*d} \frac{S_\delta}{S_H} = 1,2 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,96; \quad X_2 = \frac{U_K \% S_\delta}{100 S_H} = \frac{10,5 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,083;$$

$$X_3 = X_4 = X_0 \cdot \ell \frac{S_\delta}{U_{CP.CT}^2} = 0,4 \cdot 104 \frac{50}{115^2} = 0,157; \quad U_* = \frac{U}{U_{CP.CT}} = 115/115 = 1;$$

$$P_{*H1} = P_{H1} / S_\delta = 50/50 = 1; \quad Q_{*H1} = P_{*H1} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1 \cdot 0,75 = 0,75.$$

Сопротивление электропередачи со стороны Γ_1 до шин нагрузки

$$X_{C1} = X_1 + X_2 + X_3 // X_4 = 0,96 + 0,083 + 0,5 \cdot 0,157 = 1,12.$$

ЭДС генераторов передающей станции (Γ_1) будет:

$$|E_{10}| = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{*H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{*H1} \cdot X_{C1}}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,75 \cdot 1,12}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,12}{1}\right)^2} = 2,15.$$

Активная мощность, выдаваемая генератором Γ_1 ,

$$P = \frac{E_{10} \cdot U}{X_{C1}} \sin \delta = \frac{2,15 \cdot 1}{1,12} \sin \delta = 1,92 \sin \delta.$$

Максимум мощности, равный 1,92, может быть назван идеальным пределом активной мощности для станции 1.

Коэффициент запаса статической устойчивости по идеальному пределу активной мощности найдем по выражению:

$$K_{3(P)} = \frac{P_{MAX} - P_{PH1}}{P_{PH1}} \cdot 100 = \frac{1,92 - 1}{1} \cdot 1 = 92\%.$$

Для расчета $K_{3(P)}$ по действительному пределу мощности составим схемы замещения (рис. 1-б).

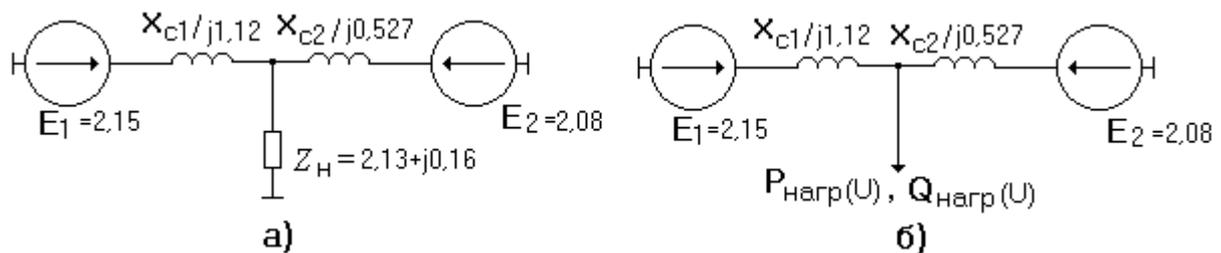


Рис. 1-б. Схемы замещения электропередачи

для расчета действительного предела мощности:

а- при нагрузке, заданной постоянным сопротивлением;

б- при нагрузке, заданной статическими характеристиками.

Сопротивление электропередачи со стороны Γ_2 до шин нагрузки

$$jX_{C2} = jX_{T2} + jX_{\Gamma 2} = j\left(\frac{12 \cdot 50}{100 \cdot 160} + 1,5 \cdot \frac{50 \cdot 0,85}{130}\right) = j0,527.$$

Сопротивление комплексной нагрузки согласно будет:

$$Z_H = U^2 (\cos \varphi_{НАГР} + j \sin \varphi_{НАГР}) / S_{НАГР} = 1^2 (0,8 + j0,6) / 3,75 = 0,213 + j0,16, \quad \text{где}$$

$$S_{НАГР} = P_H / (\cos \varphi \cdot S_\delta) = 150 / (0,8 \cdot 50) = 3,75.$$

Мощность, поступающая в нагрузку от местной станции Γ_2 ,

$$S_{H2} = P_H + jQ_H - P_{H1} - jQ_{H1} = 3 + j2,25 - 1 - j0,75 = 2 + j1,5 .$$

Здесь $P_{*H} = P_H / S_{\sigma} = 150/3 = 3$; $Q_{*H} = P_{*H} \cdot \operatorname{tg}\varphi = 3 \cdot 0,75 = 2,25$.

ЭДС генератора местной станции будет:

$$E_{20} = \sqrt{\left(1 + \frac{1,5 \cdot 0,527}{1}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 0,527}{1}\right)^2} = 2,08.$$

Собственное и взаимное сопротивления для станции 1 определим как:

$$Z_{11} = jX_{C1} + jX_{C2} \cdot Z_H / (jX_{C2} + Z_H) = j1,12 + j0,527 // (0,213 + j0,16) = 1,28 e^{j84,9^{\circ}} ;$$

$$Z_{12} = j(X_{C1} + X_{C2}) + jX_{C1} \cdot jX_{C2} / Z_H = j1,12 + j0,527 + j1,12 \cdot j0,527 / (0,213 + j0,16) =$$

$$= 3,46 e^{j120,74^{\circ}} .$$

Фазные углы собственного и взаимного сопротивлений будут:

$$\varphi_{11} = 84,9^{\circ} ; \quad \varphi_{12} = 120,74^{\circ} .$$

Углы потерь собственного и взаимного сопротивлений будут:

$$\alpha_{11} = 90^{\circ} - \varphi_{11} = 90 - 84,9 = 5,1^{\circ} ; \quad \alpha_{12} = 90 - 120,74 = -30,74^{\circ} .$$

Угловая характеристика мощности генератора G_1 будет:

$$P_1 = E_1^2 \sin \alpha_{11} / Z_{11} + E_1 E_2 \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) / Z_{12} = .$$

$$= \frac{2,15^2}{1,28} \sin 5,1^{\circ} + \frac{2,15 \cdot 2,08}{3,46} \sin(\delta_{12} + 30,74^{\circ}) = 0,32 + 1,29 \sin(\delta_{12} + 30,74^{\circ}) .$$

Далее вычисляем значения P_1 при других значениях угла δ_{12} (табл. 1) и строим угловую характеристику (рис. 7).

$\delta_{12}, \text{град}$	-30,74	0	30	60	90	120	150
$P_1, \text{о.е.}$	0,32	0,98	1,44	1,6	1,43	0,95	0,3



Рис.1-7. Угловая характеристика мощности генератора

Максимум этой характеристики дает значение действительного предела активной мощности станции 1:

$$P_{1MAX} = 0,32 + 1,29 = 1,61.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости системы по действительному пределу мощности будет равен:

$$K_{3(P)} = \frac{P_{MAX} - P_{PH1}}{P_{H1}} \cdot 100 = \frac{1,61 - 1}{1} 100 = 61\%.$$

Сравнивая значения коэффициентов запаса статической устойчивости по идеальному и действительному пределам мощности, видим, что снижение напряжения на шинах нагрузки за счет представления нагрузки комплексным сопротивлением уменьшает запас статической устойчивости станции 1.

Определим действительный предел статической устойчивости станции 1 для случая, когда нагрузка задана статическими характеристиками.

Найдем параметры исходного режима (при напряжении на шинах нагрузки $U = 1$) для характерных мест системы (см. рис. 1 в):

$$\Delta Q_{C2} = \frac{P_{H2}^2 + Q_{H2}^2}{U^2} X_{C2} = \frac{(2^2 + 1,5^2)}{1^2} 0,527 = 3,29;$$

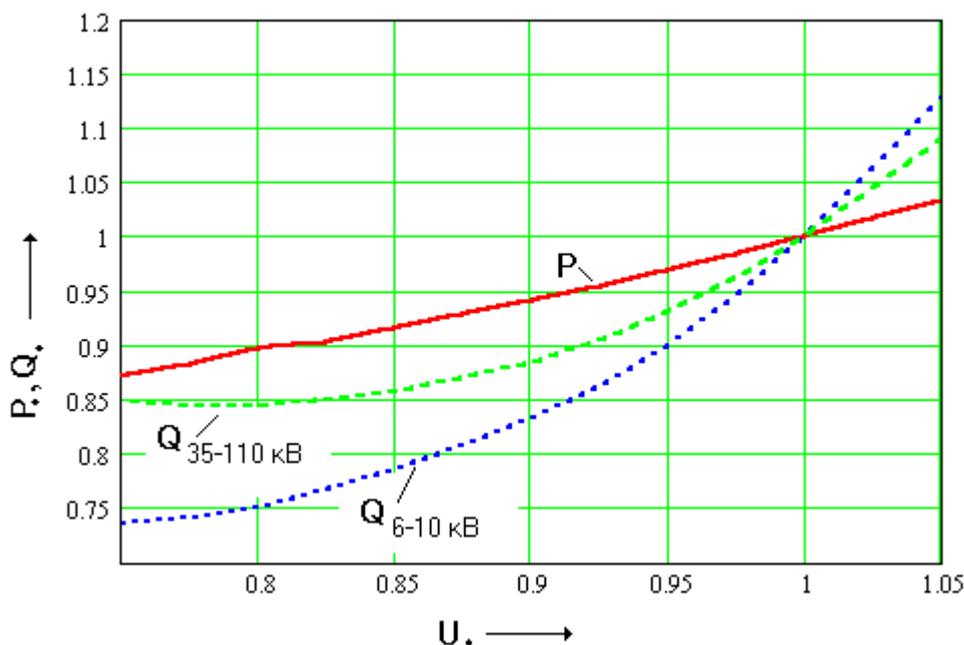
$$Q_{20} = Q_{H2} + \Delta Q_{C2} = 1,5 + 3,29 = 4,79; \quad P_{20} = P_{2H} = 2,0.$$

В дальнейшем поступаем в соответствии с алгоритмом расчета, приведенным ниже :

Задаемся новыми, меньшими значениями $P_{20} = 1,8; Q_{20} = 4,7$ и по (6), (7)

рассчитываем: $\Delta Q_{C2} = \Delta Q_{C2} = (P_{20}^2 + Q_{20}^2) X_{C2} / E_{20}^2 = \frac{1,8^2 + 4,7^2}{2,08^2} \cdot 0,527 = 3,08;$

$$U = \sqrt{\left(E_{20} - \frac{Q_{20} X_{C2}}{E_{20}}\right)^2 + \left(\frac{P_{20} X_{C2}}{E_{20}}\right)^2} = \sqrt{\left(2,08 - \frac{4,7 \cdot 0,527}{2,08}\right)^2 + \left(\frac{1,8 \cdot 0,527}{2,08}\right)^2} = 0,999.$$



По статическим характеристикам (рис. 2) для $U = 0,999$ находим:

Рис. 1-8. Статические характеристики комплексной нагрузки

$$P_{\text{НАГР}(U)} = 3; Q_{\text{НАГР}(U)} = 2,25 .$$

Из условия баланса мощностей в узле нагрузки имеем:

$$P_{H1} = P_{\text{НАГР}(U)} - P_{H2} = 3 - 1,8 = 1,2;$$

$$Q_{H1} = Q_{\text{НАГР}(U)} - (Q_{20} - \Delta Q_{C2}) = 2,25 - (4,7 - 3,08) = 0,63 .$$

Определяем ЭДС E_1 :

$$E_{1(1)} = \sqrt{\left(0,999 + \frac{0,63 \cdot 1,12}{0,999}\right)^2 + (1,2 \cdot 1,12 / 0,999)^2} = 2,18 .$$

Замечаем, что $E_{1(1)} > E_{10}$. Поэтому при прежнем значении $P_{20} = 1,8$ задаемся новым, несколько увеличенным значением $Q_{20} = 4,8$ по сравнению с его величиной в исходном режиме (с целью увеличения потери напряжения в сопротивлении между шинами нагрузки и неизменной ЭДС E_{20}). Повторив расчет, найдем соответствующее значение $E_{1(2)} = 2,1$. Как видно, заданное значение $E_{10} = 2,15$ находится между найденными величинами $E_{1(1)}$ и $E_{1(2)}$, определяя тем самым искомую величину напряжения на шинах нагрузки $U = 0,985$ (определяется, как точка пересечения прямой, проходящей через найденные значения $E_{1(1)}$ и $E_{1(2)}$, со значением E_{10}). При этом характер пересечения зависимости $|E_{1(i)}| = f(U)$ с прямой E_{10} соответствует устойчивой области.

По статической характеристике (рис.1-8) находим $P_{\text{НАГР}(U)} = 2,97$ при $U = 0,985$, следовательно, $P_{H1} = P_{\text{НАГР}(U)} - P_{20} = 2,97 - 1,8 = 1,17$.

Таким образом, нами была определена вторая точка искомой характеристики $P_{H1} = f(U)$. Для других (задаваемых) значений P_{20} и Q_{20} расчет аналогичен, и его результаты (о.е.) для условий рассматриваемого примера представлены в таблице.

$\frac{P_{20}}{Q_{20}}$	$\frac{\Delta Q_{C2}}{Q_{H2}}$	U	$\frac{P_{НАГР(U)}}{Q_{НАГР(U)}}$	$\frac{P_{H1}}{Q_{H1}}$	E_1	U	$\frac{P_{НАГР(U)}}{P_{H1}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{2,0}{4,79}$	$\frac{3,29}{1,5}$	1	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1}{0,75}$	2,15	1	$\frac{3,0}{1}$
$\frac{1,8}{4,7}$	$\frac{3,08}{1,62}$	0,999	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,2}{0,63}$	2,18	0,985	$\frac{2,97}{1,17}$
$\frac{1,8}{4,8}$	$\frac{3,2}{1,6}$	0,977	$\frac{2,94}{2,18}$	$\frac{1,14}{0,58}$	2,1		
$\frac{1,6}{4,5}$	$\frac{2,78}{1,72}$	1,02	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,4}{0,53}$	2,22	0,975	$\frac{2,95}{1,35}$
$\frac{1,6}{5}$	$\frac{3,36}{1,64}$	0,909	$\frac{2,84}{1,98}$	$\frac{1,24}{0,34}$	2,03		
$\frac{1,4}{4,6}$	$\frac{2,82}{1,78}$	0,98	$\frac{2,96}{2,18}$	$\frac{1,56}{0,4}$	2,33	0,9	$\frac{2,81}{1,41}$
$\frac{1,4}{5}$	$\frac{3,28}{1,72}$	0,889	$\frac{2,8}{1,97}$	$\frac{1,4}{0,25}$	2,13		
$\frac{1,3}{4,5}$	$\frac{2,67}{1,83}$	0,996	$\frac{2,98}{2,23}$	$\frac{1,68}{0,4}$	2,38	Режим не существует	
$\frac{1,3}{5}$	$\frac{3,25}{1,75}$	0,877	$\frac{2,8}{1,97}$	$\frac{1,5}{0,22}$	2,22		
$\frac{1,35}{4,5}$	$\frac{2,69}{1,81}$	1,00	$\frac{3,0}{2,25}$	$\frac{1,65}{0,44}$	2,37	Режим не существует	
$\frac{1,35}{5}$	$\frac{3,27}{1,73}$	0,882	$\frac{2,79}{1,97}$	$\frac{1,44}{0,24}$	2,18		

Замечаем, что действительный предел статической устойчивости станции 1 в случае нагрузки, заданной статическими характеристиками, находится в интервале 1,41 - 1,44. Принимая среднее значение $P_{H1,max} = 1,425$, определим коэффициент запаса:

$$K_{3(P)} = \frac{1,425 - 1}{1} 100 = 42,5\%.$$

Сопоставляя значения всех найденных пределов статической устойчивости станции 1, заметим, что учет нагрузки по статическим характеристикам дает самое меньшее значение действительного предела, которое наиболее близко к истине.

Практическое занятие № 2

Тема: «Расчет статической устойчивости узла нагрузки, в том числе заданной эквивалентным асинхронным двигателем»

Задача 2-1.

Основная часть расчетной схемы (рис.2-1), исходный режим и параметры элементов электропередачи повторяют данные задачи 1. Отличием является то, что вместо станции Γ_2 введена приемная система, которая представлена как система неограниченной мощности. При этом нагрузка задана статическими характеристиками.

Параметры нагрузки H : $P_{НАГР} = 50$ МВт; $\cos \varphi_{НАГР} = 0,8$.

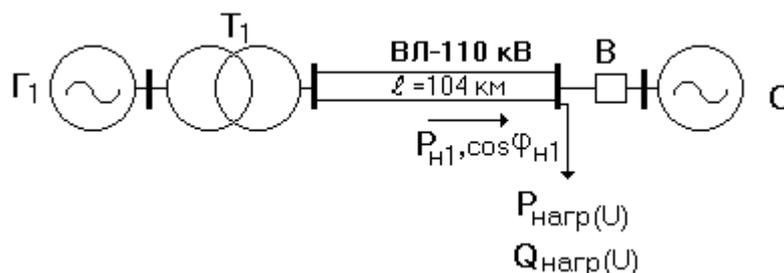


Рис. 2-1. Схема электропередачи

Т р е б у е т с я: проверить устойчивость нагрузки, построив зависимости $E_3 = f(U)$; $Q_3 = f(E_3)$ после отключения выключателя В при условии:

- на генераторе отсутствует АРВ;
- на генераторе установлено АРВ пропорционального действия.

Решение. Принимая базисные условия прежними, получим схему замещения для случая отсутствия АРВ (рис. 2-2).

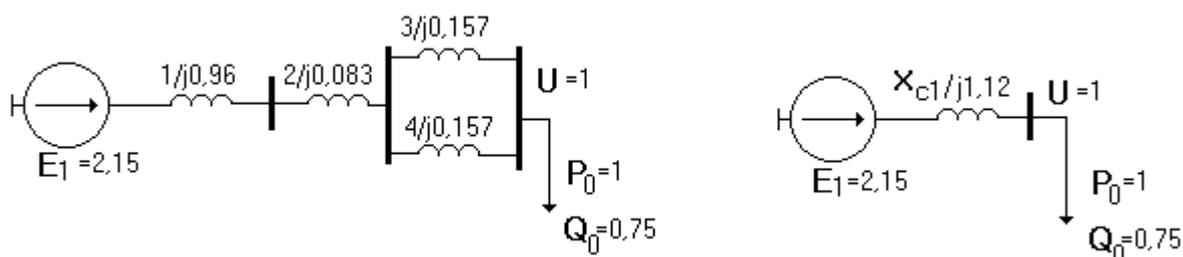


Рис. 2-2. Схема замещения исходного режима (АРВ отсутствует)

Для схемы рис. 2-2 воспользуемся параметрами схемы замещения передающей станции, определенными в задаче 1 практического занятия №1 (для исходного режима при $U = 1$ $E_3 = E_{10} = 2,15$).

Задаваясь другим значением напряжения на нагрузке, например, $U = 0,95$, определим по статическим характеристикам нагрузки (рис. 1-8) соответствующие значения активной и реактивной мощностей нагрузки:

$$P_{НАГР} = 1 \cdot 0,969 = 0,969; Q_{НАГР} = 0,75 \cdot 0,93 = 0,697.$$

ЭДС генераторов передающей станции будет:

$$E_{\ominus} = \sqrt{\left(0,95 + \frac{0,697 \cdot 1,12}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{0,969 \cdot 1,12}{0,95}\right)^2} = 2,108.$$

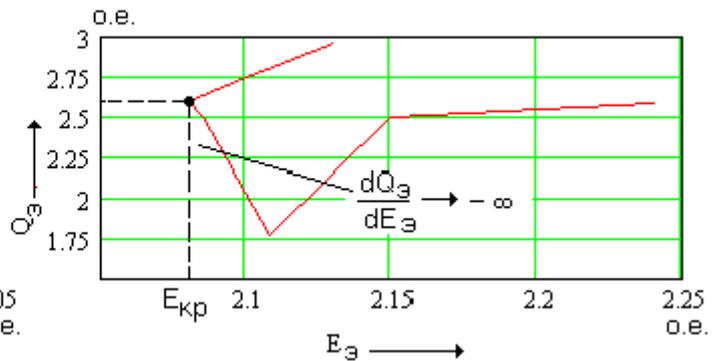
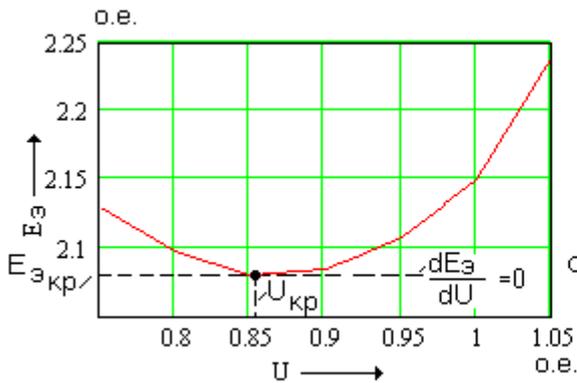
Выполняя аналогичные расчеты для других значений напряжения U (см. таблицу), построим искомую зависимость $E_{\ominus} = f(U)$ (рис.2-3).

U	1,05	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
E_{\ominus}	2,24	2,15	2,108	2,085	2,08	2,098	2,13
Q_{\ominus}	2,576	2,5	1,77	2,49	2,59	2,73	2,96

Реактивная мощность генератора Γ_1 в исходном режиме согласно (10) будет: $Q_{\ominus} = Q_{НАГР} + \Delta Q = Q_{НАГР} + (P_{НАГР}^2 + Q_{НАГР}^2) \cdot X_{C1} / U^2 =$

$$= 0,75 + \frac{1^2 + 0,75^2}{1^2} \cdot 1,12 = 2,5.$$

Значения Q_{\ominus} при других значениях напряжения представлены в табли-



це, а зависимость $Q_{\ominus} = f(E_{\ominus})$ приведена на рис. 2-4.

Рис.2-3. Определение $K_{3(U)}$

при отсутствии АРВ

Рис.2-4. Определение $K_{3(E)}$

при отсутствии АРВ

Коэффициенты запаса статической устойчивости нагрузки при отсутствии АРВ на генераторах станции 1 будут:

$$K_{3(U)} = \frac{1 - 0,86}{1} \cdot 100 = 14\%; \quad K_{3(E)} = \frac{2,15 - 2,08}{2,15} \cdot 100 = 3,25\%.$$

В случае наличия АРВ пропорционального действия на генераторах станции 1 в схеме замещения суммарное сопротивление электропередачи до шин нагрузки будет:

$$X'_C = X'_1 + X_2 + X_3 // X_4 = 0,24 + 0,083 + 0,5 \cdot 0,157 = 0,4, \text{ где}$$

$$X'_1 = X'_{*d} \cdot S_{\sigma} \cdot \cos \varphi / P_H = 0,3 \cdot 50 \cdot 0,8 / 50 = 0,24.$$

Расчет значений E'_3 и Q'_3 при различных величинах напряжения на шинах нагрузки аналогичен предыдущему расчету. Результаты расчета представлены в таблице, а зависимости $E'_3 = f(U)$ и $Q'_3 = f(E'_3)$ - на рис.2-5,2-6.

U	1,00	0,90	0,80	0,75	0,70
E_3	1,36	1,265	1,229	1,2	1,184
Q_3	1,375	1,251	1,232	1,231	1,257

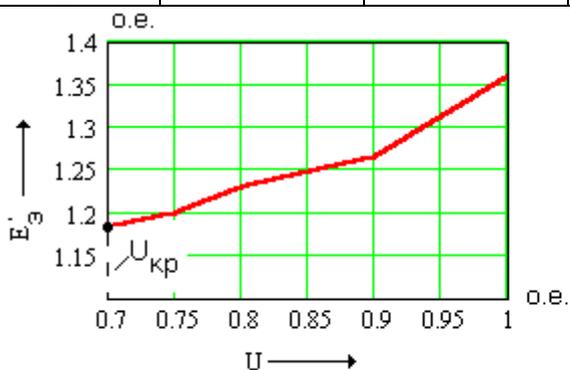


Рис.2-5. Определение $K_{3(U)}$ при наличии АРВ

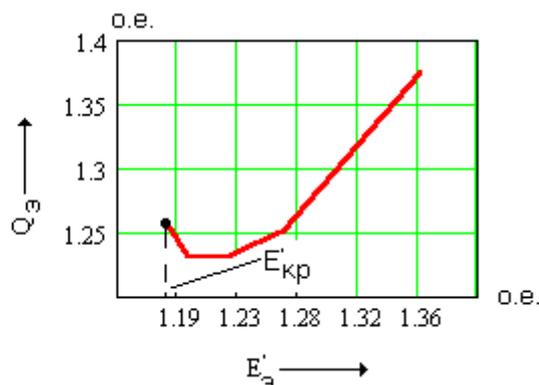


Рис.2-6. Определение $K_{3(E)}$ при наличии АРВ

Коэффициенты запаса статической устойчивости нагрузки при наличии АРВ пропорционального действия на генераторах станции 1 будут:

$$K_{3(U)} = \frac{1 - 0,7}{1} \cdot 100 = 30\%; \quad K_{3(E')} = \frac{1,36 - 1,184}{1,36} \cdot 100 = 12,9\%.$$

Напомним, что в случае установки на генераторах АРВ сильного действия в расчетах статической устойчивости узла нагрузки следует принимать сопротивление генераторов, равным нулю.

Задача 2-2.

Схема системы аналогична схеме задачи 2-1. Исходный режим и параметры элементов системы полностью повторяют данные задачи 2-1. Исключение составляет нагрузка, которая представлена в виде эквивалентного асинхронного двигателя АД (рис. 2-7).

Параметры новых элементов расчетной схемы:

$$T_3: S_H = 63 \text{ MVA}; U_k = 12,6\%;$$

$$\text{АД}: P_H = 50 \text{ MW}; \cos\varphi = 0,8; X_{*\sigma} = 0,25; R_{*2} = 0,0375; X_{*\mu} = 2,25.$$

Т р е б у е т с я :

- найти критическое напряжение на шинах подстанции, при котором произойдет опрокидывание эквивалентного АД; определить запас устойчивости по мощности и скольжению. Принять, что выключатель B включен;
- определить, будет ли устойчиво работать эквивалентный АД после разделения системы (выключатель B отключен), проверив устойчивость по критерию $dQ_3 / dE_3 > -\infty$.

В расчетах принять, что механическая нагрузка на валу эквивалентного АД равна P_H и не зависит от скольжения.

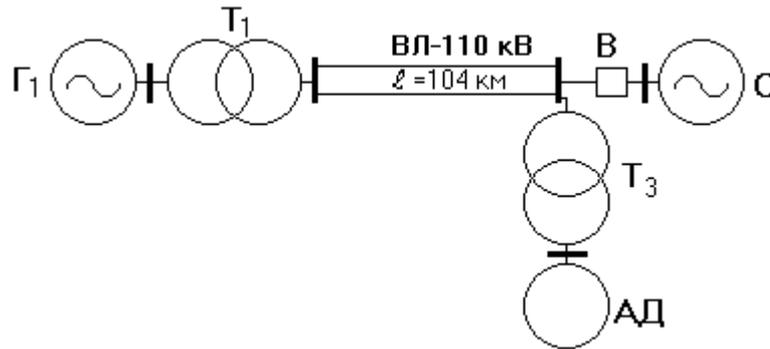


Рис.2-7. Исходная схема исследуемой системы

Решение.

а) Упрощенная схема замещения узла нагрузки приведена на рис. 2-8. Упрощение состоит в переносе сопротивления X_μ в точку системы, где величина напряжения не зависит от режима работы эквивалентного АД.

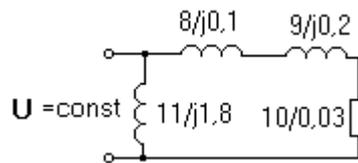


Рис.2-8. Схема замещения узла нагрузки

Параметры схемы замещения при ранее принятых базисных условиях:

$$X_8 = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_\sigma}{S_H} = \frac{12,6 \cdot 50}{100 \cdot 63} = 0,1; \quad X_9 = X_{*\sigma} \frac{S_\sigma}{S_H} = 0,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,2;$$

$$R_{10} = R'_{*2} \frac{S_\sigma}{S_H} = 0,0375 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 0,03; \quad X_{11} = X_{*\mu} \frac{S_\sigma}{S_H} = 2,25 \frac{50 \cdot 0,8}{50} = 1,8.$$

Критическое напряжение, при котором опрокидывающий момент равен рабочей нагрузке, определяется по выражению:

$$U_{KP} = \sqrt{2 \cdot K_3 \cdot X_\Sigma},$$

где K_3 - коэффициент нагрузки двигателя;

X_Σ - сумма следующих реактивных сопротивлений: эквивалентного АД и внешнего до сопротивления точки системы (в примере - сопротивление T_3), где принимается неизменным напряжение, о.е.

Таким образом, получим

$$U_{KP} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot (0,2 + 0,1)} = 0,775.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению будет:

$$K_{3(U)} = (1 - 0,775)100/1 = 22,5\%.$$

Критическое скольжение эквивалентного двигателя АД будет:

$$s_K = 0,03/0,3 = 0,1.$$

Запишем уравнение $P = U^2 R'_2 s / [R'_2{}^2 + (X_{\sigma} s)^2]$ относительно скольжения (заменяя X_{σ} на X_{Σ}), получим квадратное уравнение:

$$s^2 - \frac{U^2 \cdot R'_2}{P \cdot X_{\Sigma}^2} \cdot s + \frac{R'_2{}^2}{X_{\Sigma}^2} = 0; \quad s^2 - \frac{1^2 \cdot 0,03}{1 \cdot 0,3^2} \cdot s + \frac{0,03^2}{0,3^2} = 0;$$

и найдем его корни: $s_{01} = 0,033$ – соответствует рабочему режиму эквивалентного АД; $s_{02} = 0,298$ соответствует неустойчивой области зависимости $P = f(s)$.

Коэффициент запаса по скольжению будет:

$$K_{3(s)} = \frac{s_k - s_0}{s_0} 100 = (0,1 - 0,033) \cdot 100 / 0,033 = 203\%.$$

Максимальная величина активной мощности при нормальном режиме ($U = 1$) будет:

$$P_{MAX} = U^2 / (2 \cdot X_{\sigma}) = 1^2 / (2 \cdot 0,3) = 1,67.$$

Коэффициент запаса по активной мощности будет:

$$K_{3(P)} = \frac{P - P_0}{P_0} 100 = (1,67 - 1) \cdot 100 / 1 = 67\%.$$

Значения мощности при других значениях напряжения на шинах узла нагрузки и одинаковых скольжениях s получим пересчетом по выражению:

$$P_{U(s)} = P_{0(s)} \cdot U^2,$$

где $P_{0(s)}$ – значение активной мощности при $U = 1$ и скольжении s .

Полученные результаты вычислений представлены в таблице и на рис.2-9.

s	P при $U = 1$	P при $U = 0,775$
0	0	0
0,033	1,0	0,6
0,1	1,67	1,0
0,29	1,0	0,6

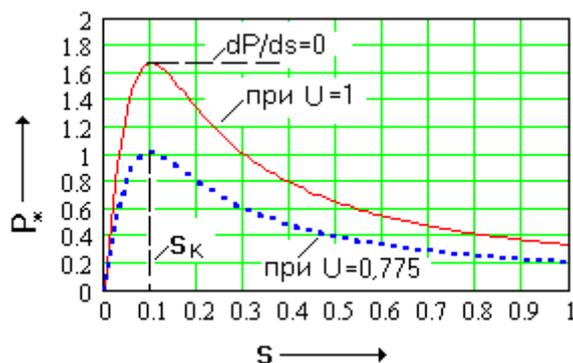


Рис.2-9. Определение параметров критического режима эквивалентного АД (выключатель В- включен)

б) При отключении выключателя *B* напряжение на шинах узла нагрузки в исходном режиме не изменится, но будет теперь зависеть от режима работы эквивалентного АД, став функцией его скольжения.

Схема замещения рассматриваемой электропередачи имеет следующий вид (рис.2-10).

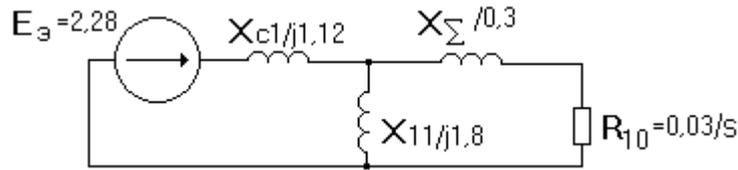


Рис.2-10. Схема замещения электропередачи (выключатель *B* отключен)

Пусть в исходном режиме $U = 1$; $s_{01} = 0,033$ (см. предыдущий расчет). Реактивная мощность, потребляемая эквивалентным АД из сети, будет:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\mu} + Q_s = U^2 / X_{\mu} + P \cdot s / s = 1^2 / 1,8 + 1 \cdot 0,033 / 0,1 = 0,885.$$

Тогда эквивалентная ЭДС будет равна:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{H(i)} \cdot X_{c_i}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{H(i)} \cdot X_{c_i}}{U}\right)^2} = \sqrt{(1 + 0,885 \cdot 1,12 / 1)^2 + (1 \cdot 1,12 / 1)^2} = 2,28.$$

Реактивная мощность, выдаваемая станцией (Γ_1) при напряжении $U = 1$:

$$Q_{\Sigma} = 0,885 + (1^2 + 0,885^2) \cdot 1,12 / 1^2 = 2,668.$$

Задаваясь другими значениями напряжения на шинах подстанции (в интервале $1 \dots 0,775$) при условии постоянства потребляемой активной мощности ($P = 1$), определим соответствующие величины E_{Σ} и Q_{Σ} .

Результаты расчетов представлены в таблице и на рис. 2-11.

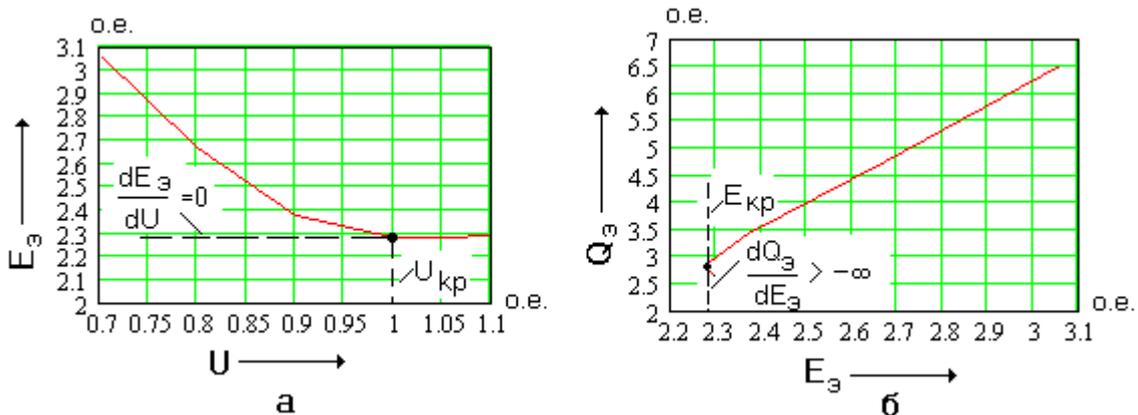


Рис.2-11. Определение параметров критического режима:
а) критического напряжения; б) критической ЭДС.

U	1,10	1,05	1,00	0,90	0,80	0,775
s_1	0,027	0,0297	0,033	0,045	0,07	0,1
Q	0,94	0,909	0,885	0,9	1,055	1,333
E_{Σ}	2,29	2,283	2,28	2,37	2,67	3,06
Q_{Σ}	2,68	2,76	2,88	3,4	4,75	6,51

Если отбросить сопротивление цепи намагничивания, то можно приближенно оценить критическое скольжение эквивалентного АД по выражению:

$$s_k = R_{10} / (X_{C1} + X_{\Sigma}) = 0,03 / (1,12 + 0,3) = 0,021.$$

Таким образом, эквивалентный АД потеряет устойчивость при $U > U_{kp}$ (если выключатель B отключен), так как его критическое скольжение оказывается меньше рабочего.

Практическое занятие № 3

Тема: «Расчет динамической устойчивости электропередачи с одним генератором, работающей на шины бесконечной мощности»

Задача 3-1.

В электропередаче, показанной на рис.3-1, на одной из цепей в начале воздушной линии происходит двухфазное к.з. на землю. Электропередача передает в приемную систему неограниченной мощности мощность 225 MВт , $\cos \varphi_c = 0,882$. Напряжение на шинах системы $U_c = 118 \text{ кВ}$. Нейтрали трансформаторов глухо заземлены.

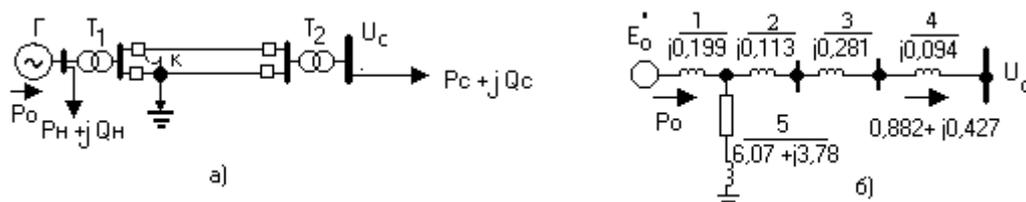


Рис.3-1. Исследуемая система:
а – расчетная схема; б – схема замещения исходного режима

Т р е б у е т с я : определить предельное время отключения к.з., проводя расчет приближенно, без учета активных сопротивлений и зарядной мощности линий.

Параметры элементов электропередачи:

$$G : S_H = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_H = 10,5 \text{ кВ}; \cos \varphi = 0,85; x'_{*d} = 0,235; x_{*2} = 0,164; T_J = 7 \text{ с};$$

$$T1 : S_H = 360 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_K = 12\%; k_1 = 248/10,5;$$

$$T2 : S_H = 340 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_K = 12\%; k_2 = 220/121;$$

$$\text{ВЛ} : \ell = 225 \text{ км}; x_1 = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; x_0 = 3x_1 = 1,2 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

$$H : P_H = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi_H = 0,85.$$

Решение. Расчет проведем в относительных единицах с точным приведением параметров элементов электропередачи к основной ступени напряжения (220 кВ). За базисную мощность и основную ступень напряжения примем :

$$S_{\sigma} = S_c = 255 \text{ МВА}; U_{\sigma 1} = 215 \text{ кВ}.$$

$$\text{Тогда } U_{\sigma 2} = U_{\sigma 1} / k_2 = 118 \text{ кВ}; U_{\sigma 3} = U_{\sigma 1} / k_1 = 9,1 \text{ кВ}.$$

При этом напряжение на шинах системы составит:

$$U_{*C} = U_c / U_{\sigma 2} = 118 / 118 = 1.$$

Активная и реактивная мощности, передаваемые в приемную систему:

$$P_{*C} = P_c / S_{\sigma} = 225 / 255,1 = 0,882; Q_{*C} = P_c \cdot \text{tg} \varphi_c = 0,882 \cdot 0,534 = 0,471.$$

Мощности, потребляемые нагрузкой:

$$P_{*H} = 50 / 255 = 0,196; Q_{*H} = 0,196 \cdot 0,62 = 0,121.$$

На рис.3-1 б приведена схема замещения для нормального режима.

Приведем параметры всех элементов схемы замещения к базисным условиям (звездочки у символов для краткости опускаем):

$$x_1 = x'_d \frac{S_{\delta}}{S_H} \left(\frac{U_H}{U_{\delta 3}} \right)^2 = 0,225 \frac{255}{400} \left(\frac{10,5}{9,1} \right)^2 = 0,191;$$

$$x_2 = \frac{U_k}{100} \frac{S_{\delta}}{S_H} \left(\frac{U_{H.B}}{U_{\delta 1}} \right)^2 = \frac{12}{100} \frac{255}{360} \left(\frac{248}{215} \right)^2 = 0,113; x_4 = 0,094;$$

$$x_3 = \frac{1}{2} x_1 \ell \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 225 \cdot \frac{255}{215^2} = 0,248;$$

$$T_J^{\circ} = T_J \frac{S_H}{S_{\delta}} = 7 \frac{400}{255} = 10,98 \text{ с.}$$

Суммарное индуктивное сопротивление между шинами нагрузки и шинами приемной системы

$$x_C = x_2 + x_3 + x_4 = 0,456.$$

Модуль напряжения на шинах нагрузки

$$U_{Г(0)} = \sqrt{\left(U_C + \frac{Q_C x_C}{U_C} \right)^2 + \left(\frac{P_C x_C}{U_C} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,471 \times 0,456}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,882 \times 0,456}{1} \right)^2} = 1,28;$$

Угол сдвига между вектором напряжения на шинах нагрузки и вектором напряжения приемной системы

$$\delta_C = \arctg \frac{P_C x_C}{U_C^2 + Q_C x_C} = \arctg \frac{0,402}{1,215} = 18,31^{\circ}.$$

Комплексное сопротивление нагрузки, о.е.,

$$\underline{Z}_H = \frac{U_H^2}{S_H^2} (P_H + jQ_H) = \frac{1,284^2}{0,196^2 + 0,121^2} (0,196 + j0,121) = 6,035 + j3,74.$$

Потери реактивной мощности в сети до шин напряжения нагрузки U_H

$$\Delta Q_C = \frac{P_C^2 + Q_C^2}{U_C^2} x_C = \frac{0,882^2 + 0,471^2}{1^2} 0,456 = 0,456.$$

Мощность, отдаваемая генераторной станцией в систему, равна

$$\dot{S}_0 = \dot{S}_H + \dot{S}_C + j\Delta Q_C = 0,196 + j0,121 + 0,882 + j0,471 + j0,456 = 1,078 + j1,048.$$

Модуль ЭДС за переходным реактивным сопротивлением генератора

$$E'_0 = \sqrt{\left(1,28 + \frac{1,048 \cdot 0,199}{1,28} \right)^2 + \left(\frac{1,078 \cdot 0,199}{1,28} \right)^2} = \sqrt{1,443^2 + 0,168^2} = 1,445;$$

Угол сдвига между вектором ЭДС генератора и вектором напряжения на шинах нагрузки

$$\text{tg}(\delta'_0 - \delta_C) = 0,168/1,443 = 0,116; \delta'_0 - \delta_C = 6,39^{\circ}.$$

Угол между вектором ЭДС E'_0 и вектором напряжения U_C

$$\delta'_0 = 18,31 + 6,39 = 24,7^{\circ}.$$

Определяем собственную и взаимную проводимости схемы замещения для нормального режима (рис.3-1 б):

$$\underline{Z}_{11}^I = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_c // \underline{Z}_5 = j0,199 + j0,456 // (6,035 + j3,74) = 0,631e^{j87,89^\circ}; Y_{11}^I = 1,49e^{-j87,89^\circ}; \alpha_{11}^I = 2,11^0;$$

$$\underline{Z}_{12}^I = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_c + \underline{Z}_1 \underline{Z}_c / \underline{Z}_5 = j0,199 + j0,456 + j0,199 \cdot j0,456 / (6,035 + j3,74) = 0,653e^{j90,91^\circ}$$

$$Y_{12}^I = 1,44e^{-j90,91^\circ}; \alpha_{12}^I = -0,914^0.$$

Схема замещения электропередачи для прямой последовательности при режиме двухфазного к.з. на землю отличается от схемы замещения нормального режима включением в точку к.з. аварийного шунта, сопротивление которого равно сложным параллельно результирующим сопротивлениям (относительно точки к.з.) схем обратной и нулевой последовательностей. Сопротивления элементов электропередачи для токов обратной последовательности приведены на рис.3-2 а (сопротивление нагрузки принято равным 0,35 о.е. сопротивления прямой последовательности), а для токов нулевой последовательности – на рис. 3-2 б.

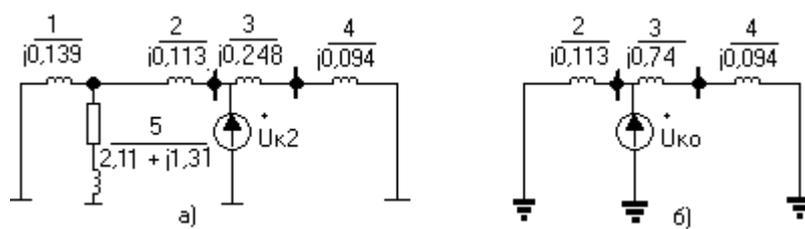


Рис.3-2.Схемы замещения последовательностей:
а - обратной; б – нулевой

Результирующее сопротивление схемы для токов обратной последовательности относительно точки к.з. будет:

$$\underline{Z}_{2\Sigma} = (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 // \underline{Z}_5) // (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) = (j0,113 + j0,139 // (2,11 + j1,31)) // (j0,248 + j0,094);$$

$$\underline{Z}_{2\Sigma} = 0,003 + j0,144.$$

Результирующее сопротивление схемы для токов обратной последовательности относительно точки к.з.

$$\underline{Z}_{0\Sigma} = \underline{Z}_2 // (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) = j0,113 // (j0,843 + j0,094) = j0,101.$$

Результирующее сопротивление аварийного шунта в точке к.з.

$$\underline{Z}_K = \underline{Z}_6 = \underline{Z}_{2\Sigma} // \underline{Z}_{0\Sigma} = (0,003 + j0,144) // j0,1 \approx j0,059.$$

Эквивалентная схема замещения электрической системы для двухфазного к.з. на землю приведена на рис.3-3.

Определим для нее методом единичных токов собственные и взаимные проводимости.

Пусть ток в сопротивлении \underline{Z}_4 равен единице:

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 = 1 + j0.$$

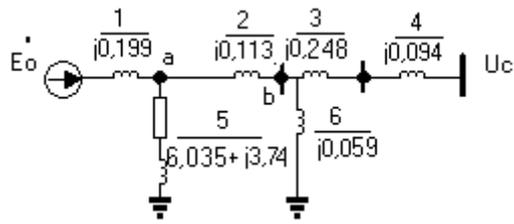


Рис.3-3. Схема замещения аварийного режима

Тогда напряжение в точке b

$$\dot{U}_b = \dot{I}_4 (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) = 1 \cdot (j0,248 + j0,094) = j0,342.$$

Ток, протекающий по аварийному шунту, равен

$$\dot{I}_6 = \dot{U}_b / \underline{Z}_6 = j0,342 / j0,059 = 5,797.$$

Ток в ветви 2

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_4 + \dot{I}_6 = 1 + 5,797 = 6,797.$$

Падение напряжения на сопротивлении ветви 2

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = 6,797 \cdot j0,113 = j0,768.$$

Напряжение в точке a

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \Delta \dot{U}_2 = j0,342 + j0,768 = j1,11.$$

Ток в ветви 5

$$\dot{I}_5 = \dot{U}_a / \underline{Z}_5 = j1,11 / (6,035 + j3,74) = 0,082 + j0,133.$$

Ток в ветви 1

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_5 = 6,797 + 0,082 + j0,133 = 6,879 + j0,133.$$

Падение напряжения на сопротивлении ветви 1

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = (6,879 + j0,133) \cdot j0,199 = -0,0265 + j1,369.$$

ЭДС в ветви 1, создающая найденное токораспределение по ветвям схемы аварийного режима,

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_a + \Delta \dot{U}_1 = j1,11 + (-0,0265 + j1,369) = -0,0265 + j2,479.$$

Собственная проводимость схемы аварийного режима относительно передающей станции

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11}^{\text{II}} &= \dot{I}_1 / \dot{E}_1 = (6,879 + j0,133) / (-0,0265 + j2,479) = \\ &= -0,024 - j2,775 = 2,775 \cdot e^{j89,5^\circ}; \alpha_{11}^{\text{II}} = 0,5^\circ. \end{aligned}$$

Взаимная проводимость между ветвями 1 и 4 в схеме аварийного режима

$$\underline{Y}_{14}^{\text{II}} = \dot{I}_4 / \dot{E}_1 = 1 / (-0,0265 + j2,479) = 0,403 \cdot e^{j90,61^\circ}; \alpha_{14}^{\text{II}} = -0,61^\circ.$$

В схеме замещения послеаварийного режима аварийный шунт отключен, а сопротивление воздушной линии увеличилось вдвое (рис.3-4).

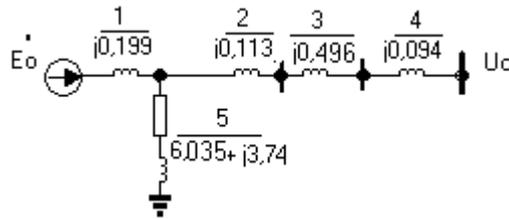


Рис.3-4. Схема замещения послеаварийного режима

Собственные и взаимные проводимости для нее определены так же, как и для схемы нормального режима:

$$Y_{11}^{III} = 1,148e^{-j87,641^\circ}; \alpha_{11}^{III} = 3,59^0; Y_{14}^{III} = 1,105e^{-j91,02^\circ}; \alpha_{14}^{III} = -1,02^0.$$

Характеристики активной мощности генераторов передающей станции для различных режимов найдем из выражения (15):

Нормальный режим

$$P^I = 1,445^2 \cdot 1,585 \sin 2,107^0 + 1,445 \cdot 1,531 \sin(\delta' + 0,914^0) = 0,122 + 2,212 \sin(\delta' + 0,914^0); P_{MAX}^I = 2,334.$$

Аварийный режим

$$P^{II} = 1,445^2 \cdot 2,775 \cdot \sin 0,5^0 + 1,445 \cdot 0,403 \sin(\delta' + 0,61^0) = 0,051 + 0,582 \sin(\delta' + 0,61^0); P_{MAX}^{II} = 0,633.$$

Послеаварийный режим

$$P^{III} = 1,445^2 \cdot 1,148 \sin 2,359^0 + 1,445 \cdot 1,105 \sin(\delta' + 1,02^0) = 0,099 + 1,597 \sin(\delta' + 1,02^0); P_{MAX}^{III} = 1,695.$$

Определим из условия равенства площадок ускорения и торможения (рис.3-5) предельный угол отключения к.з.

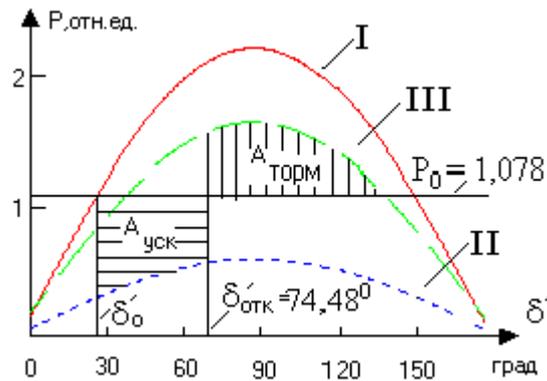


Рис.3-5. Угловые характеристики и площадки ускорения ($A_{уск}$) и торможения ($A_{торм}$)

Так как в примере характеристики мощности всех трех режимов близки по форме к синусоиде, найдем искомый угол по выражению:

$$\frac{P_o(\delta_{кр} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{кр} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}}, \text{ где}$$

$$\delta'_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_o}{P_{MAX}^{III}} = 180 - \arcsin \frac{1,078}{1,695} = 140,51^0.$$

При этом получим:

$$\cos \delta'_{отк} = \frac{1,078(140,51-24,7) \frac{\pi}{180} + 1,695 \cos 140,51^{\circ} - 0,633 \cos 24,7^{\circ}}{1,695 - 0,633} = 0,329; \delta'_{отк} = 70,792^{\circ}.$$

Для определения предельного времени отключения к.з. построим зависимость $\delta' = f(t)$, которую найдем из уравнения движения ротора:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta.$$

Решим это уравнение методом последовательных интервалов.

Длительность расчетных интервалов Δt примем равной 0,05 с. При этом коэффициент k в уравнении $\Delta \delta_{(1)} = k \cdot \Delta P_{(0)} / 2$ будет:

$$k = 360 f \cdot \Delta t^2 / T_J = 360 \cdot 50 \cdot 0,05^2 / 10,98 = 4,1.$$

Первый интервал времени (0-0,05 с):

Активная мощность, отдаваемая генераторами в первый момент возникновения к.з., будет

$$P_{(0)} = 0,051 + 0,582 \sin(24,7^{\circ} + 0,61^{\circ}) = 0,3.$$

Избыток мощности в начале первого интервала времени

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)} = 1,078 - 0,3 = 0,778.$$

Приращение угла за первый интервал времени

$$\Delta \delta'_1 = k \Delta P_{(0)} / 2 = 4,1 \cdot 0,778 / 2 = 1,595^{\circ}.$$

Угол к концу первого интервала времени

$$\delta'_{(1)} = \delta'_0 + \Delta \delta'_1 = 24,7 + 1,595 = 26,295^{\circ}.$$

Второй интервал времени (0,05-0,1 с):

$$P_{(1)} = 0,051 + 0,582 \sin(26,295^{\circ} + 0,61^{\circ}) = 0,314;$$

$$\Delta P_{(1)} = 1,078 - 0,314 = 0,764;$$

$$\Delta \delta'_{(2)} = \Delta \delta'_{(1)} + k \Delta P_{(1)} = 1,595 + 4,1 \cdot 0,764 = 4,727^{\circ};$$

$$\delta'_{(2)} = 26,295 + 4,727 = 31,022^{\circ}.$$

Переходим к расчету третьего и последующих интервалов времени.

По результатам расчета, приведенным в таблице, строим кривую $\delta' = f(t)$ (рис.3-6).

t, с	δ' , град	P, о.е.	ΔP , о.е.	$\Delta \delta'$, град
0	24,7	0,3	0,778	1,595
0,05	26,295	0,314	0,764	4,727
0,10	30,914	0,37	0,708	7,549
0,15	38,463	0,433	0,645	10,193
0,20	48,657	0,509	0,569	12,527
0,25	61,184	0,582	0,496	14,563

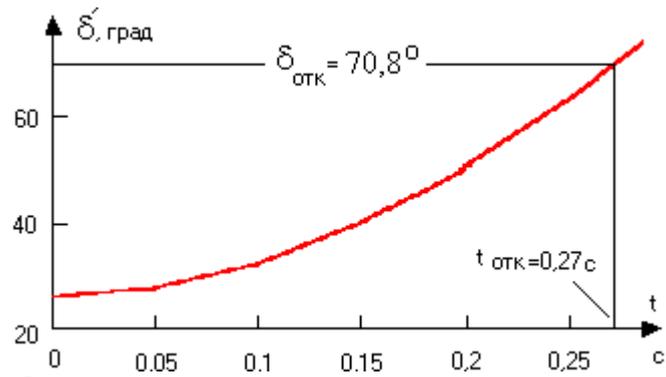


Рис.3-6. Определение предельного времени отключения

Практическое занятие № 4

Тема: «Расчет динамической устойчивости системы, содержащей две станции, работающих параллельно на общую нагрузку с одним генератором, работающей на шины бесконечной мощности»

Задача 4-1.

Электропередача (см. рис.4-1 а), содержащая две генераторные станции, работает на общую нагрузку S_H , параметры которой $P_H = 275 \text{ MВт}$, $\cos \varphi_H = 0,85$; коэффициент трансформации трансформатора $T_2 : k_{T2} = 220/10,5$. На обеих станциях установлены одинаковые генераторы. Генератор станции 1 передает в нагрузку активную мощность $P_{H1} = 50 \text{ MВт}$; $\cos \varphi_{H1} = 0,85$. Все остальные параметры электропередачи совпадают с параметрами, приведенными в задаче 3-1 практического занятия № 3 (параметры элементов, место и вид к.з.).

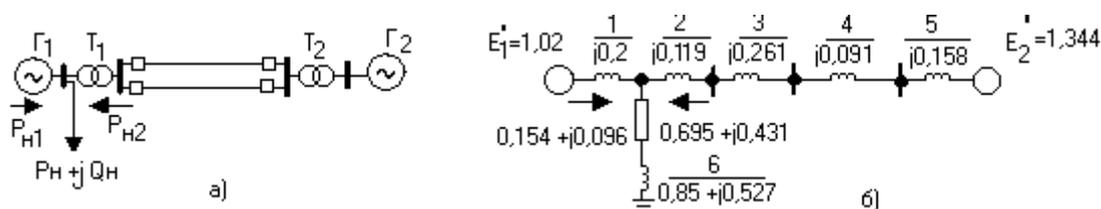


Рис.4-1. Исследуемая система:
а – расчетная схема; б – схема замещения нормального режима.

Т р е б у е т с я: определить предельное время отключения к.з., проведя расчет приближенно, без учета активных сопротивлений и зарядной мощности линий.

Решение. Расчет проведем в относительных единицах с точным приведением. Примем в исходном режиме напряжение на шинах нагрузки равным 10 кВ :

$$S_{\sigma} = S_H = 275 / 0,85 = 323,53 \text{ МВА}; U_{\sigma 1} = 10 \text{ кВ};$$

$$U_{\sigma 2} = U_{\sigma 1} \frac{248}{10,5} = 236,2 \text{ кВ}; U_{\sigma 3} = 236,2 \frac{10,5}{220} = 11,27 \text{ кВ}.$$

Составим схему замещения для нормального режима и найдем параметры ее элементов (рис.4-1 б). В обозначении относительных величин для упрощения записи индексы опускаем.

Активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой со стороны станции 1,

$$P_{H1} = 50 / 323,53 = 0,1545; Q_{H1} = P_{H1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{H1} = 0,1545 \cdot 0,6197 = 0,096.$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой со стороны станции 2,

$$P_{H2} = (275 - 50) / 323,53 = 0,6954; Q_{H2} = Q_H - Q_{H1} = 0,527 - 0,096 = 0,431.$$

Реактивные сопротивления элементов электропередачи и постоянные инерции генераторов станций 1 и 2:

$$X_1 = 0,225 \frac{323,53}{400} \left(\frac{10,5}{10}\right)^2 = 0,2; X_2 = \frac{12}{100} \frac{323,53}{360} \left(\frac{248}{236,2}\right)^2 = 0,119;$$

$$X_3 = \frac{0,4 \cdot 225}{2} \frac{323,53}{236,2^2} = 0,261; X_4 = \frac{12}{100} \frac{323,53}{340} \left(\frac{220}{236,2}\right)^2 = 0,091;$$

$$X_5 = 0,225 \frac{323,53}{40011,27} \left(\frac{10,5}{11,27}\right)^2 = 0,158.$$

$$T_{J1} = T_{J2} = 7 \frac{400}{323,53} = 8,65 \text{ с.}$$

Сопротивление нагрузки

$$\underline{Z}_6 = \left(\frac{U_H}{S_H}\right)^2 (P_H + jQ_H) = \left(\frac{1}{1}\right)^2 (0,85 + j0,527) = 0,85 + j0,527.$$

Суммарное сопротивление между шинами нагрузки и ЭДС генератора станции 2

$$X_C = 0,119 + 0,261 + 0,091 + 0,158 = 0,629.$$

Модули ЭДС генераторов станций

$$E'_1 = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_{H1} X_1}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{P_H X_1}{U_H}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,096 \cdot 0,2}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,1545 \cdot 0,2}{1}\right)^2} = 1,02;$$

$$E'_2 = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_{H2} X_C}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{P_H X_C}{U_H}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,431 \cdot 0,629}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,6955 \cdot 0,629}{1}\right)^2} = 1,349.$$

Углы сдвига E'_1 и E'_2 относительно U_H

$$\delta'_{01} = \arctg \frac{0,1545 \cdot 0,2}{1 + 0,096 \cdot 0,2} = 1,743^\circ; \delta'_{02} = \arctg \frac{0,6955 \cdot 0,629}{1 + 0,431 \cdot 0,629} = 19,163^\circ.$$

Угол сдвига между векторами E'_1 и E'_2

$$\delta'_{12} = \delta'_{01} - \delta'_{02} = 1,743 - 19,163 = -17,42^\circ.$$

Собственные и взаимная проводимости схемы нормального режима будут:

$$\underline{Y}_{11}^I = 1,581e^{-j74,78^\circ}; \alpha_{11}^I = 15,22^\circ; \underline{Y}_{12}^I = 1,097e^{-j96,85^\circ}; \alpha_{12}^I = -6,85^\circ;$$

$$\underline{Y}_{22}^I = 1 / \left(\underline{Z}_c + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_6}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_6} \right) = 1 / \left[j0,629 + \frac{j0,2(0,85 + j0,527)}{0,85 + j(0,2 + 0,527)} \right] = 1,228e^{-j88,1^\circ}; \alpha_{22}^I = 1,9^\circ.$$

Так как алгоритм расчета параметров схемы замещения в аварийном и послеаварийном режимах был детально рассмотрен в задаче 3-1 практического занятия № 3, здесь приведем только конечные результаты:

$$\underline{Y}_{11}^{II} = 3,047e^{-j82,44^\circ}; \alpha_{11}^{II} = 7,56^\circ; \underline{Y}_{12}^{II} = 0,255e^{-102,62^\circ}; \alpha_{12}^{II} = -12,62^\circ;$$

$$\underline{Y}_{22}^{II} = 1,754e^{-j89,66^\circ}; \alpha_{22}^{II} = 0,34^\circ; \underline{Y}_{11}^{III} = 1,88e^{-j65,22^\circ}; \alpha_{11}^{III} = 24,78^\circ;$$

$$\underline{Y}_{12}^{III} = 0,696e^{-j107,72^\circ}; \alpha_{12}^{III} = -17,72^\circ; \underline{Y}_{22}^{III} = 1,581e^{-74,78^\circ}; \alpha_{22}^{III} = 15,22^\circ.$$

По выражениям

$$P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$P_2 = E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} - E_1 E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}),$$

найдем характеристики мощности станций 1 и 2 в исходном, аварийном и послеаварийном режимах:

$$P_1^I = E_1'^2 y_{11}^I \sin \alpha_{11}^I + E_1' E_2' y_{12}^I \sin(\delta_{12}' - \alpha_{12}^I) = 1,02^2 \cdot 1,581 \sin 15,22^\circ + \\ + 1,02 \cdot 1,349 \cdot 1,097 \sin(\delta_{12}' + 6,85^\circ) = 0,432 + 1,51 \sin(\delta_{12}' + 6,85^\circ);$$

$$P_2^I = E_2'^2 y_{22}^I \sin \alpha_{22}^I - E_1' E_2' y_{12}^I \sin(\delta_{12}' + \alpha_{12}^I) = 1,349^2 \cdot 1,228 \sin 1,9^\circ - \\ - 1,02 \cdot 1,349 \cdot 1,097 \sin(\delta_{12}' - 6,85^\circ) = 0,0741 - 1,51 \sin(\delta_{12}' - 6,85^\circ)$$

$$P_1^{II} = 1,02^2 \cdot 3,047 \sin 7,56^\circ + 1,02 \cdot 1,349 \cdot 0,255 \sin(\delta_{12}' + 12,62^\circ) = \\ = 0,417 + 0,351 \sin(\delta_{12}' + 12,62^\circ);$$

$$P_2^{II} = 1,349^2 \cdot 1,754 \sin 0,34^\circ - 1,02 \cdot 1,349 \cdot 0,255 \sin(\delta_{12}' - 12,62^\circ) = \\ = 0,019 - 0,351 \sin(\delta_{12}' - 12,62^\circ);$$

$$P_1^{III} = 0,82 + 0,958 \sin(\delta_{12}' + 17,72^\circ); P_2^{III} = 0,755 - 0,958 \sin(\delta_{12}' - 17,72^\circ).$$

Затем найдем относительные ускорения α_{12} между генераторами станций в исходном, аварийном и послеаварийном режимах, задаваясь значениями независимой переменной – углом δ_{12}' , по формуле:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2 = 360 f(\Delta P_1 / T_{J1} - \Delta P_2 / T_{J2}).$$

В качестве примера рассчитаем аварийный режим при $\delta_{12}' = \delta_{120}' = -17,42^\circ$, то есть в начальный момент возникновения к.з. При этом имеем:

$$\Delta P_1^{II} = P_{1H} - P_1^{II} = 0,1545 - 0,417 - 0,351 \sin(-17,42^\circ + 12,62^\circ) = -0,233;$$

$$\Delta P_2^{II} = P_{2H} - P_2^{II} = 0,6955 - 0,019 + 0,351 \sin(-17,42^\circ - 12,62^\circ) = 0,501.$$

$$\alpha_{12}^{II} = 360 \cdot f \left(\frac{\Delta P_1^{II}}{T_{J1}} - \frac{\Delta P_2^{II}}{T_{J2}} \right) = 360 \cdot 50 \left(\frac{-0,233}{8,65} - \frac{0,501}{8,65} \right) = -1,528 \cdot 10^3 \text{ град} / \text{с}^2.$$

Замечаем, что $\alpha_{12}^{II} < 0$, следовательно, переходный процесс изменения угла $\delta_{12}' = f(t)$ в аварийном режиме будет направлен в сторону увеличения его отрицательных значений.

Задаваясь другими значениями угла δ_{12}' , рассчитаем ускорения α_{12} для нормального, аварийного и послеаварийного режимов. Результаты расчетов представлены в таблице и на рис.4-2.

$\delta_{12}', \text{град}$	-17,42	-30	-60	-90	-120	-150	-180
$\alpha_{12}', \text{град} / \text{с}^2$	-6,291	1251	3533	4369	3533	1251	-1867
$\alpha_{12}^{II}, \text{град} / \text{с}^2$	-1528	-1242	-722,1	-531,6	-722	-1242	-953
$\alpha_{12}^{III}, \text{град} / \text{с}^2$	-122	638,7	2027	2535	2027	638,7	-1257

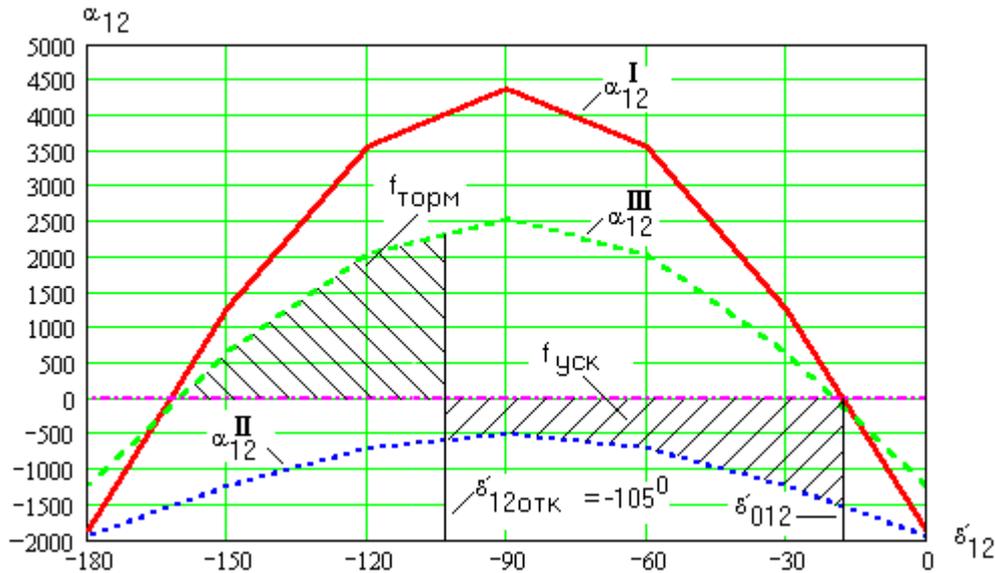


Рис.4-2. Применение правила площадей к анализу отключения к.з., в системе, содержащей две электростанции

Как видно из рис.4-2, при к.з. в рассматриваемой точке сети генераторы выпадают из синхронизма (так как ускорение $\alpha_{12}'' < 0$ в диапазоне изменения δ'_{12} от $-17,42^\circ$ до -180°). Локализация места к.з. за счет отключения аварийной цепи при угле δ'_{12} от $-17,42^\circ$ до -105° обеспечит устойчивую работу генераторов обеих станций.

Методом последовательных интервалов определим время достижения угла отключения $\delta'_{12\text{отк}} = -105^\circ$.

Принимая величину временных интервалов, равной 0,05 с, определим приращение δ'_{12} в первом интервале времени:

$$\Delta\delta'_{12(1)} = 0,5 \cdot \alpha_{12(0)}''' \cdot \Delta t^2 = 0,5 \cdot (-1528) \cdot 0,05^2 = -1,91^\circ.$$

Тогда величина δ_{12} в конце первого интервала времени:

$$\delta'_{12(1)} = \delta'_{12(0)} + \Delta\delta'_{12(1)} = -17,42^\circ + (-1,91^\circ) = -19,33^\circ.$$

Для второго интервала времени получим:

$$\Delta\delta'_{12(2)} = \Delta\delta'_{12(1)} + \alpha_{12(1)}'' \cdot \Delta t^2 = -1,91^\circ - 1483 \cdot 0,05^2 = -5,565^\circ; \delta'_{12(2)} = -19,33^\circ - 3,707^\circ = -23,04^\circ.$$

Так как дальнейший расчет выполняется аналогично, представим его результаты в таблице.

t, с	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
α_{12} , град/с ²	-1528	-1483	-1354	-1159	-933,13	-721	-573,1	-534,26	-299
$\Delta\delta_{12}$, град	0	-1,91	-5,618	-9,003	-11,901	-14,234	-16,04	-17,47	-18,81
δ_{12} , град	-17,42	-19,33	-24,948	-33,951	-45,852	-60,086	-76,12	-93,49	-112,3

Таким образом, в рассматриваемом случае время нарушения нормальной работы обеих электростанций не должно превышать 0,35 с.

Следует иметь в виду, что не всегда переход на послеаварийный режим спасает положение. Так, в качестве примера, на рис.4-4 показаны угловые характеристики режимов, когда отключение аварийной цепи лишь усугубляет ситуацию.

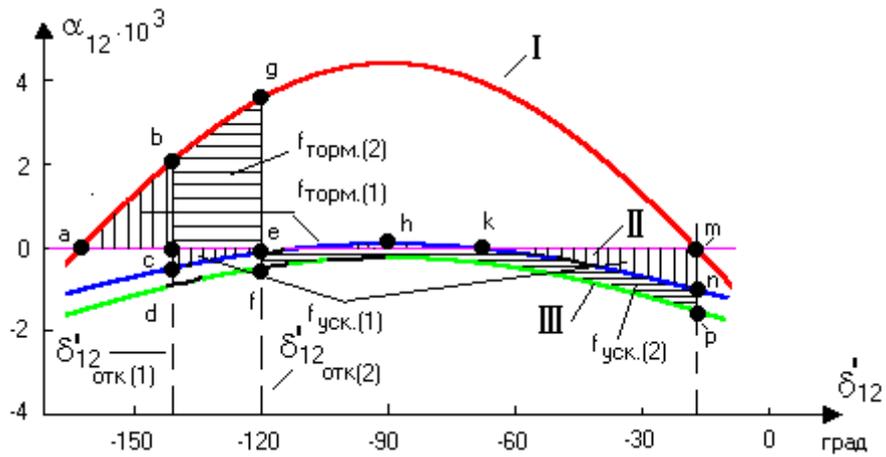


Рис. 4-4. Пример использования АПВ на поврежденной цепи ВЛ для обеспечения устойчивой работы двух электростанций на общую нагрузку

Как видно из рис.4-4, при к.з. в рассматриваемой точке сети генераторы выпадают из синхронизма (так как $f_{cde} + f_{kmn} > f_{chke}$). Локализация места к.з. за счет отключения аварийной цепи лишь усугубляет ситуацию, так как кривая III (послеаварийный режим) идет ниже, чем кривая II (аварийный режим). Выходом из данной ситуации может служить применение автоматического повторного включения (АПВ) цепи, на которой произошло к.з., полагая возможным самоустранение к.з. на воздушной линии.

Учитывая, что при АПВ всегда какое-то время существует режим III, примем его за основу при определении угла отключения ($\delta_{12 \text{ откл.}}$). При таком подходе по правилу площадей получим заниженное значение угла отключения ($\delta_{12 \text{ откл.}(2)} = 120^\circ$), так как при этом не был учтен более легкий режим II. Если же принять, что режим III отсутствует (интервал времени равен нулю, когда в работе остается только одна цепь ЛЭП), то получим по правилу площадей угол отключения ($\delta_{12 \text{ откл.}(1)} = 141^\circ$).

Таким образом, в зависимости от продолжительности времени действия релейной защиты и коммутационных аппаратов угол отключения может находиться в интервале 120-141°.

Практическое занятие № 5

Тема: «Расчет динамической устойчивости узла нагрузки, заданной эквивалентным асинхронным двигателем»

Задача 5-1.

Для асинхронного двигателя АД заданы следующие параметры:

$P_H = 1 \text{ МВт}$; $m_{MAX} = 2 \text{ о.е.}$; $s_H = 0,025$; $GD^2 = 1 \text{ т} \cdot \text{м}^2$; $K_3 = 0,9$; $n_0 = 600 \text{ об/мин}$; $m_{П.МХ} = 0,15 \text{ о.е.}$; $\gamma = 2$; $GD_{ПРИВ.МХ}^2 = 4 \text{ тм}^2$; $n_{0.МХ} = 200 \text{ об/мин}$; $U_{ОСТ} = 0,5 \text{ о.е.}$

Т р е б у е т с я :

а) рассчитать время пуска АД при номинальном напряжении на его зажимах; б) определить допустимую продолжительность посадки напряжения $U_{ОСТ}$; в) определить допустимую продолжительность посадки напряжения при его полном исчезновении; г) рассчитать время выбега АД для случаев (б) и (в).

Решение.

а) Расчет времени пуска АД.

Определяем механическую характеристику $m_{\varnothing} = f(s)$ по формуле Клосса при номинальном напряжении на зажимах АД:

$$m_{\varnothing} = \frac{2 \cdot m_{max}}{s/s_K + s_K/s} \cdot \left(\frac{U}{U_H}\right)^2 = \frac{2 \cdot 2}{s/0,093 + 0,093/s} = \frac{0,372 \cdot s}{s^2 + 0,0086},$$

где критическое скольжение:

$$s_K = s_H (m_{MAX} + \sqrt{m_{MAX}^2 - 1}) = 0,025(2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,093.$$

Определяем характеристику статического момента сопротивления производственного механизма ($m_{MX} = f(s)$):

$$m_{MX} = m_{П.МХ} + (K_3 - m_{П.МХ}) \left(\frac{1-s}{1-s_H}\right) = 0,15 + (0,9 - 0,15) \frac{(1-s)}{(1-0,025)}.$$

Так как двигатель работает при коэффициенте нагрузки $K_3 = 0,9$, то его рабочее скольжение будет меньше номинального значения. Используя выражение для электромагнитного момента m_{\varnothing} , определим величину рабочего скольжения s_p из уравнения:

$$0,9 = 0,372 \cdot s_p / (s_p^2 + 0,0086^2),$$

откуда
$$s_p = \frac{0,372 - \sqrt{0,372^2 - 4 \cdot 0,9 \cdot 0,00774}}{2 \cdot 0,9} = 0,022.$$

Определяем постоянную времени агрегата «двигатель-производственный механизм»:

$$T_J = \frac{(GD^2 + GD_{ПРИВ.МХ}^2) n_0^2}{364 P_H} = \frac{(1 + 0,444) \cdot 600^2}{364 \cdot 1000} = 1,43 \text{ с},$$

где $GD_{ПРИВ.МХ}^2 = GD_{MX}^2 (n_{0.МХ} / n_0)^2 = 4 \cdot (200 / 600)^2 = 0,444 \text{ т} \cdot \text{м}^2$.

Разбиваем далее весь интервал изменения скольжения двигателя от $s = 1$

до $s = s_p$ на отдельные участки Δs_i , начиная со значения скольжения $s = 1$. При этом на каждом участке определяем величину избыточного момента Δm_i , среднего избыточного момента $\Delta m_{i(cp)}$ и находим время достижения соответствующего скольжения, используя выражение:

$$t = -T_J \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta m_{i(cp)}}$$

Расчет ведем от значения $s = 1$ до $s_p = 0,022$. Результаты расчета $m_{\text{э}} = f(s)$, $m_{MX} = f(s)$, $\Delta m = f(s)$, времени пуска $t_{\text{ПУСК}}$ приведены в таблице и на рис.5-1.

Если в процессе разгона АД окажется, что его электромагнитный момент при номинальном напряжении на его зажимах будет меньше или равен моменту нагрузки на валу при скольжении $s > s_{kp}$, то пуск АД неосуществим. В этом случае **студент должен самостоятельно скорректировать** параметры двигателя таким образом, чтобы пуск был обеспечен.

Параметр	Скольжение							
	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,093	0,022	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расчет режима пуска при $U = 1$								
$m_{\text{э}}$	0,37	0,46	0,61	0,88	1,53	2	0,9	0
m_{MX}	0,15	0,182	0,276	0,434	0,655	0,799	0,9	0,939
Δm	0,22	0,278	0,334	0,446	0,875	1,201	0	-
$\Delta m_{i(cp)}$	-	0,249	0,306	0,39	0,661	1,038	0,6	
$t_{\text{ПУСК}}, \text{с}$	-	1,149	2,084	2,817	3,25	3,4	3,57	-
Расчет режима посадки напряжения при $U_{\text{ост}} = 0,5$								
$m_{\text{э}}$	0,092	0,115	0,152	0,22	0,382	0,5	0,225	0
Δm	-0,058	-0,067	-0,124	-0,214	-0,273	-0,299	-0,675	-
$\Delta m_{i(cp)}$	-0,062	-0,095	-0,169	-0,206	-0,285	-0,487	-	
$t_{\text{ВЫБ}}, \text{с}$	11,45	6,836	3,825	2,133	0,745	0,208	-	-
Расчет режима посадки напряжения при $U_{\text{ост}} = 0$								
Δm	-0,15	-0,182	-0,276	-0,434	-0,655	-0,799	0,9	0,939
$\Delta m_{i(cp)}$	-0,166	-0,229	-0,355	-0,544	-0,727	-0,849	-	-
$t_{\text{ВЫБ}}, \text{с}$	4,634	2,911	1,662	0,856	0,33	0,12	-	-

б) Определение допустимой продолжительности посадки напряжения $U_{\text{ост}}$

При длительной посадке напряжения от номинального значения до $U_{\text{ост}} = 0,5$ работающий АД будет тормозиться и остановится, так как его электромагнитный момент становится меньше момента механизма на всем диапазоне изменения скольжения от s_p до 1. Время допустимой посадки

напряжения в рассматриваемом случае не ограничено с точки зрения устойчивости АД, так как при номинальном напряжении на зажимах АД его электромагнитный момент превышает момент сопротивления приводимого рабочего механизма при скольжениях $s > s_k$ (таким образом, при восстановлении номинального значения напряжения при любом скольжении выбега двигатель АД вновь развернется до рабочего скольжения s_p).

Заметим, если характеристики электромагнитного момента и момента нагрузки на валу АД пересекаются в области его неустойчивой работы ($s_H > s_k$) при номинальном напряжении на зажимах АД, то время допустимой посадки напряжения будет определяться интервалом времени, за который АД достигнет скольжения s_n в процессе выбега.

в) Время допустимой посадки напряжения до значения $U_{ост} = 0$ также не ограничено с точки зрения устойчивости АД в силу сохранения условий, рассмотренных в предыдущем пункте.

г) Очевидно, что при полном отключении питания выбег АД происходит более интенсивно по сравнению с предыдущим случаем, так как $m_\varphi(s) = 0$.

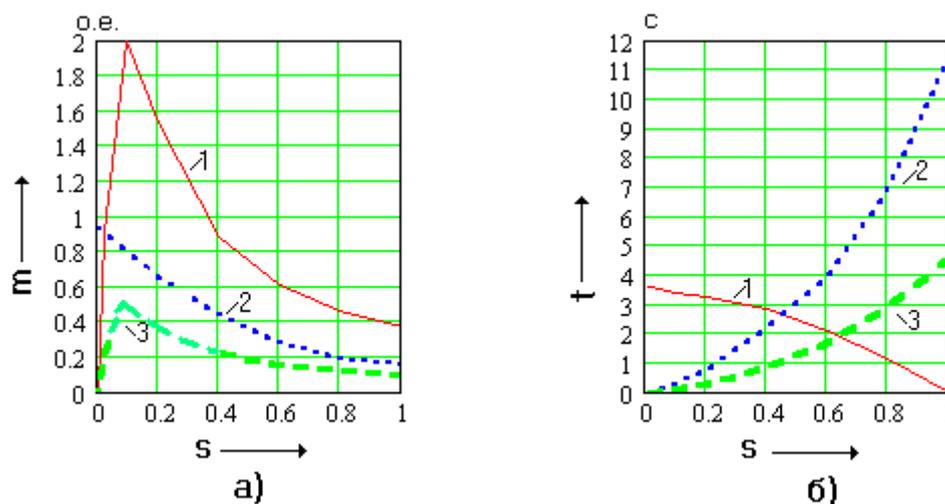


Рис.5-1.К определению динамических характеристик АД:

а) характеристики моментов: 1- статический электромагнитный момент при $U = 1$; 2- статический момент сопротивления производственного механизма; 3- статический электромагнитный момент при $U_{ост} = 0,5$;

б) временные характеристики: 1- пусковая характеристика; 2- характеристика выбега при $U_{ост} = 0,5$; 3- характеристика выбега $U_{ост} = 0$.

Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 283 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамикоянца. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

Владимир Иванович Мошкин

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания к практическим занятиям
по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Редактор Н.М. Быкова

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 2,0	Уч.-изд. л. 2,0
Заказ	Тираж 50	Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.