

Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы

Известны следующие параметры генератора и сети для электропередачи, представленной на рис. 1: x_d, x'_d, x_2, T_j (табл. 1), $x_{тр}, x_{вл}$ (табл. 2).

Дано напряжение на трансформаторе (на стороне обмотки высокого напряжения) $U_1 = 1$ о.е. и напряжение на шинах системы бесконечной мощности $U_c = 1$ о.е. (рис. 1).

Необходимо:

а) Рассчитать режим работы генератора (определить переходную ЭДС E' и внутренний угол электростанции δ^*) при мощности, выдаваемой генератором $S_{г} = P_{г} + j \cdot Q_{г} = 0,85 + j \cdot 0,527$ о.е. ($P_0 = P_{г} = 0,85$ о.е.).

б) Построить характеристики мощности для нормального (НР), аварийного (АР) и послеаварийного (ПАР) режимов для варианта: АР – двухфазное короткое замыкание без земли в начале линии электропередачи, ПАР = НР. Определить предельный угол отключения короткого замыкания методом площадей, предельное время отключения короткого замыкания $t_{пред}$.

в) Выполнить расчет изменения угла ротора генератора методом последовательных интервалов.

Интервал взять кратным $t_{пред}$, для получения значений P использовать аналитические выражения для электромагнитных мощностей.

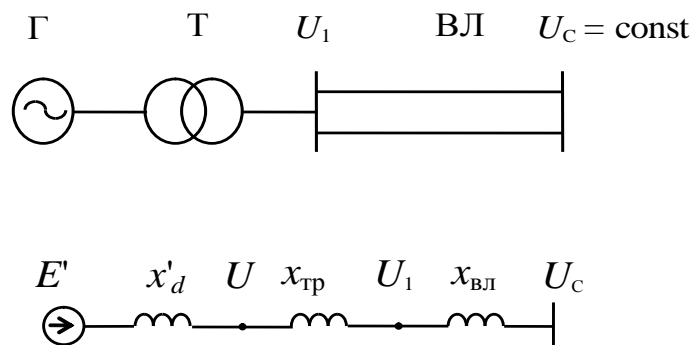


Рис. 1. Расчетная схема и схема замещения электропередачи

Таблица 1. Параметры генераторов

№ в-та	Тип	P , МВт	$\cos\varphi$	$U_{\text{ном}}$, кВ	x_d	x'_d	x_2	T_j , с
1	ТЗВ-60-2	60	0,8	6,3	2,03	0,263	0,201	5,00
2	ТВФ-60-2	60	0,8	6,3	1,61	0,28	0,238	12,33
3	ТВ-60-2	60	0,8	10,5	2,2	0,242	0,13	7,09
4	ТВ-60-2МФ	60	0,8	10,5	2,08	0,24	0,167	8,29
5	ТВФ-63-2	63	0,8	6,3	1,92	0,275	0,17	6,80
6	ТВФ-63-2	63	0,8	10,5	2,2	0,224	0,22	4,54
7	ТВФ-100-2	100	0,85	10,5	1,92	0,278	0,234	6,61
8	ТВФ-110-2	110	0,85	10,5	2,037	0,271	0,189	7,20
9	ТВФ-120-2	100	0,8	10,5	1,83	0,278	0,234	6,60
10	ТВФ-120/2-УЗ	100	0,8	10,5	1,907	0,278	0,192	6,48
11	ТФГ-160-2УЗ	160	0,8	15,75	2,46	0,185	0,135	15,0
12	ТФП-160-2УЗ	160	0,8	15,75	2,53	0,223	0,184	7,02
13	ТВВ-160-2	160	0,85	18	2,3	0,329	0,269	7,80
14	ТГВ-200М	200	0,85	15,75	1,862	0,31	0,249	7,45
15	ТВВ-200-2а	200	0,85	15,75	2,106	0,272	0,22	7,50
16	ТГВ-200-2МУЗ	220	0,85	15,75	2,06	0,354	0,233	6,00
17	ТЗВ-220-2	220	0,85	15,75	2,18	0,25	0,17	5,41
18	ТВВ-220-2	220	0,85	15,75	1,97	0,29	0,24	10,37
19	ТГВ-300	300	0,85	20	2,195	0,3	0,238	7,60
20	ТВВ-320-2	320	0,85	20	1,698	0,258	0,211	5,85
21	ТГВ-500	500	0,85	20	2,413	0,373	0,296	6,20
22	ТГВ-500-4	500	0,85	20	2,158	0,398	0,327	11,80
23	ТВМ-500	500	0,85	36,75	2,43	0,38	0,33	6,60
24	ТВВ-500-2Е	500	0,85	20	2,31	0,318	0,274	13,00
25	ТВВ-800-2	800	0,9	24	2,33	0,307	0,267	6,20
26	ТВВ-1000-2	1000	0,9	24	2,82	0,382	0,328	6,50
27	ТВВ-1000-4	1000	0,9	24	2,35	0,452	0,388	12,50
28	ТВВ-1200-2	1200	0,9	24	2,42	0,358	0,302	6,20
29	СВ-640/170-24	67	0,85	13,8	1,0737	0,266	0,2185	9,56
30	СВ-800/230-32	130	0,9	10,5	1,156	0,352	0,223	10,27

Примечание. P – номинальная мощность генератора; $\cos\varphi$ – номинальный коэффициент мощности; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение генератора; x_d – продольное синхронное реактивное сопротивление; x'_d – продольное переходное реактивное сопротивление; x_2 – реактивное сопротивление обратной последовательности; T_j – механическая инерционная постоянная генератора.

Таблица 2. Параметры электрической сети

№ варианта	$x_{вЛ}$	$x_{тр}$
1-10	0,4	0,1
11-20	0,5	
21-30	0,6	

$x_{вЛ}$ – реактивное сопротивление воздушной линии, $x_{тр}$ – реактивное сопротивление трансформатора.

Методические указания

Анализ динамической устойчивости в электроэнергетической системе рассматривается на примере электропередачи, приведенной на рис. 1.

Расчет режима работы генератора при заданных параметрах электроэнергетической системы проводится по следующим формулам:

$$E' = U_1 + j \cdot x' \cdot \frac{P - j \cdot Q}{U_1} = U_1 + \frac{Q \cdot x'}{U_1} + j \cdot \frac{P \cdot x'}{U_1}, \quad \text{где } x' = x'_d + x_{тр}$$

$$A' = U_1 + \frac{Q \cdot x'}{U_1}, \quad B' = \frac{P \cdot x'}{U_1}, \quad E' = \sqrt{A'^2 + B'^2}, \quad \delta^* = \arctg\left(\frac{B'}{A'}\right).$$

В нормальном режиме мощность генератора выражается формулой

$$P_{НР} = \frac{E' \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta, \quad (1)$$

где $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{тр} + x_{вЛ}$, δ – полный угол электропередачи (в отличие от внутреннего угла электростанции δ^*).

В послеаварийном режиме мощность генератора $P_{ПАР} = P_{НР}$ (условие задания).

В аварийном режиме ($AP=K^{(2)}$) выражение для мощности записывается в виде:

$$P_{АР} = \frac{E' \cdot U_{сэ}}{x'_{dэ}} \cdot \sin \delta. \quad (2)$$

Любое несимметричное короткое замыкание эквивалентруется включением так называемого шунта короткого замыкания в точку короткого

замыкания (величина шунта определяется по виду короткого замыкания на основании соединения схем замещения для токов обратной и нулевой последовательностей). После определения величины шунта короткого замыкания можно воспользоваться правилами определения эквивалентной ЭДС и эквивалентного индуктивного сопротивления.

В рассматриваемом случае двухфазного короткого замыкания в начале линии электропередачи величина шунта короткого замыкания определяется последующей формуле

$$x_{\text{ш}} = \frac{(x_2 + x_{\text{тр}}) \cdot x_{\text{вл}}}{x_2 + x_{\text{тр}} + x_{\text{вл}}}.$$

Эквивалентное напряжение $U_{\text{сэ}}$ и эквивалентное индуктивное сопротивление x_3 с учетом шунта короткого замыкания принимают вид:

$$U_{\text{сэ}} = \frac{U_c \cdot \frac{1}{x_{\text{вл}}}}{\frac{1}{x_{\text{вл}}} + \frac{1}{x_{\text{ш}}}}, \quad x_3 = \frac{x_{\text{ш}} \cdot x_{\text{вл}}}{x_{\text{ш}} + x_{\text{вл}}}.$$

Суммарное индуктивное сопротивление в аварийном режиме равно

$$x'_{d3} = x'_d + x_{\text{тр}} + x_3.$$

Для нормального, аварийного и послеаварийного режимов по (1) и (2) строятся характеристики мощности (рис. 2) и выполняется анализ динамической устойчивости на основе правила площадей (то есть определяются углы δ_0 , $\delta_{\text{кр.}}$, $\delta_{\text{откл.пред.}}$) по следующим формулам.

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0 \cdot x'_{d\Sigma}}{E' \cdot U_c}, \quad \delta_{\text{кр.}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_{\text{maxПАР}}},$$

$$\cos \delta_{\text{откл.пред.}} = \frac{P_0 \cdot (\delta_{\text{кр.}} - \delta_0) + P_{\text{maxПАР}} \cdot \cos \delta_{\text{кр.}} - P_{\text{maxAP}} \cdot \cos \delta_0}{P_{\text{maxПАР}} - P_{\text{maxAP}}} \quad (\text{в эту формулу}$$

все углы подставляются в радианах),

при этом $P_{\max \text{ПАР}} = P_{\max \text{НР}} = \frac{E' \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}}$ и $P_{\max \text{АР}} = \frac{E' \cdot U_{c3}}{x'_{d3}}$,

где δ_0 – угол между ЭДС E' и напряжением U_c в нормальном режиме работы, $\delta_{\text{кр.}}$ – критическое значение угла между ЭДС E' и напряжением U_c на электропередаче, $\delta_{\text{откл.пред.}}$ – предельный угол отключения короткого замыкания.

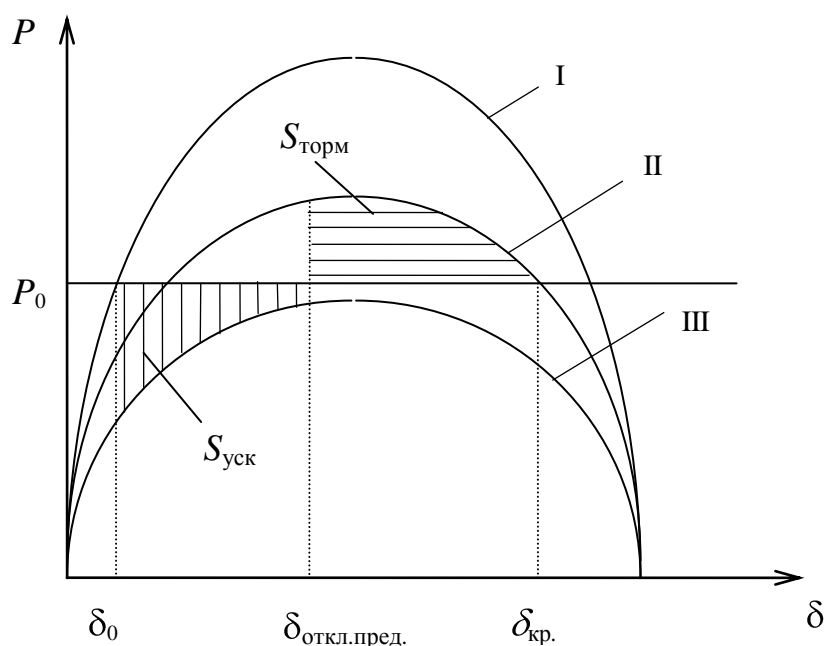


Рис. 2. Определение предельного угла отключения короткого замыкания методом площадей: I - нормальный режим, II - послеаварийный режим, III - аварийный режим.

Кроме аналитического определения $\delta_{\text{откл.пред.}}$ также графически методом площадей (из равенства площадей ускорения и торможения $S_{\text{уск}} = S_{\text{торм}}$) определяется предельный угол отключения короткого замыкания $\delta_{\text{откл.пред.}}$ (рис. 2).

Выражение для приближенного расчета предельного времени отключения короткого замыкания выглядит следующим образом:

$$t_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{2 \cdot T_j \cdot \Delta\delta_{\text{к.з.}}}{\omega_c \cdot \Delta P_{\text{ср}}}},$$

где $\Delta\delta_{\text{к.з.}} = \delta_{\text{откл.пред}} - \delta_0$, $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f$ ($f=50$ Гц), $\Delta P_{\text{ср}}$ – «средняя ускоряющая мощность», которая определяется как

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_{\text{I}} + \Delta P_{\text{II}}}{2},$$

$$(\Delta P_{\text{I}} = P_0 - P_{\text{AP}}(\delta_0), \Delta P_{\text{II}} = P_0 - P_{\text{AP}}(\delta_{\text{откл.пред}})).$$

Далее после определения предельного времени отключения короткого замыкания $t_{\text{пред}}$ производится расчет изменения угла ротора во времени методом последовательных интервалов по следующим формулам:

$$K = \frac{\omega_c \cdot \Delta t^2}{T_j} = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_j},$$

$$\Delta P(\delta_n) = P_0 - P_{\text{AP}}(\delta_n),$$

$$\Delta\delta_1 = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \Delta P(\delta_0) \quad \text{для } n=1$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + K \cdot \Delta P(\delta_{n-1}) \quad \text{для } n>1,$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n,$$

где Δt – интервал времени, кратный $t_{\text{пред}}$, n – номер интервала.

Рекомендуется взять $\Delta t = t_{\text{пред}}/4$, расчет провести для $n = 5$.

При переходе от аварийного режима к послеаварийному (расчет для интервала $n = 5$ и времени $t = 5\Delta t$)

$$\Delta P = \Delta P^* = \frac{\Delta P' + \Delta P''}{2},$$

где $\Delta P' = P_0 - P_{\text{AP}}(\delta_{\text{откл.пред}})$, $\Delta P'' = P_0 - P_{\text{ПАР}}(\delta_{\text{откл.пред}})$.

Таким образом, по методу последовательных интервалов последовательно определяются K , $P_{AP}(\delta_0)$, $\Delta P(\delta_0)$, $\Delta\delta_1$, δ_1 , $P_{AP}(\delta_1)$, $\Delta P(\delta_1)$, $\Delta\delta_2$, δ_2 и т. д., и строится зависимость $\delta(t)$ (рис. 3). Результаты расчета оформляются в виде таблицы (табл. 3) и графика (рис. 3), который строится по данным таблицы 3.

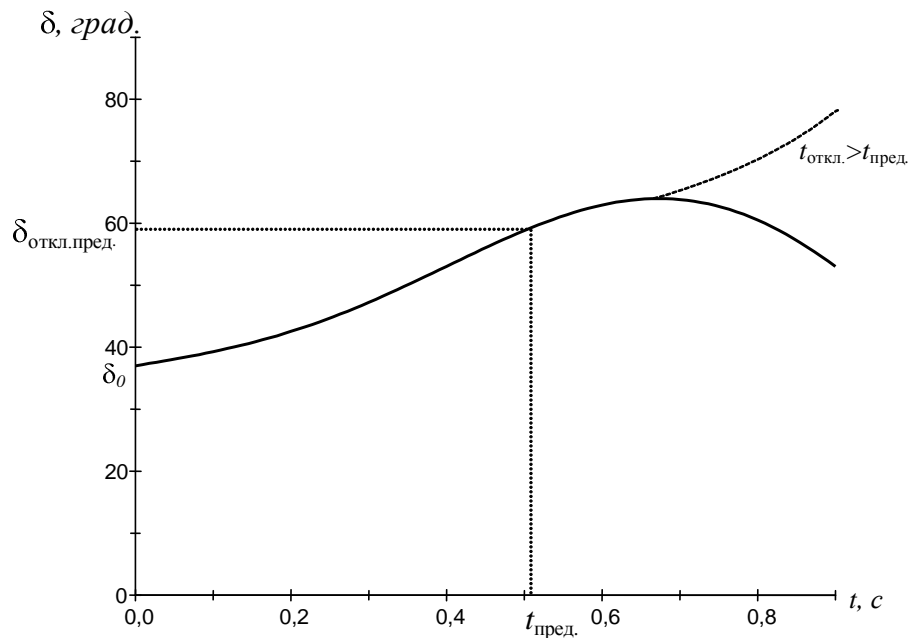


Рис. 3. Изменение угла δ во времени, рассчитанное методом последовательных интервалов

Таблица 3. Результаты расчета изменения угла во времени $\delta(t)$ методом последовательных интервалов

n	t	P_{AP}	ΔP	$\Delta\delta$	$\delta(t)$
0	0	-	-	-	δ_0
1	Δt	$P_{AP}(\delta_0)$	$\Delta P(\delta_0)$	$\Delta\delta_1$	δ_1
2	$2\Delta t$	$P_{AP}(\delta_1)$	$\Delta P(\delta_1)$	$\Delta\delta_2$	δ_2
3	$3\Delta t$	$P_{AP}(\delta_2)$	$\Delta P(\delta_2)$	$\Delta\delta_3$	δ_3
4	$4\Delta t = t_{пред}$	$P_{AP}(\delta_3)$	$\Delta P(\delta_3)$	$\Delta\delta_4$	δ_4
5	$5\Delta t$	-	ΔP^*	$\Delta\delta_5$	δ_5

Внимание. При проведении расчетов по методу последовательных интервалов и заполнении таблицы 3 следует тщательно следить за нумерацией индексов элементов таблицы (обратите внимание, они изменяются внутри строки таблицы 3).

В курсовом проекте должны в обязательном порядке присутствовать результаты расчета изменения угла во времени $\delta(t)$ методом последовательных интервалов, то есть таблица 3 и рис. 3.

