

Практическое занятие №1 Составление схемы замещения воздушной линии электропередачи и определение ее параметров

Линия электропередачи теоретически рассматривается как состоящая из бесконечно большого числа равномерно распределенных вдоль нее активных и реактивных сопротивлений и проводимостей, точный учет влияния которых сложен и необходим лишь при расчетах длинных линий.

Для расчета рабочих режимов ЛЭП пользуются уравнениями, характеризующими режим электрической сети. Эти уравнения позволяют составить *схему замещения линии*, содержащую ограниченное число элементов с сосредоточенными параметрами и представляющую собой некоторую расчетную модель, состоящую из активного R и реактивного X сопротивлений, а также из активной G и реактивной B проводимостей.

В практических расчетах ВЛ длиной до 300 км и КЛ представляются полными П-образными схемами замещения с сосредоточенными параметрами. Рекомендации по выбору схемы замещения в зависимости от типа ЛЭП и ее номинального напряжения, численные выражения для расчета значений параметров схемы замещения представлены в лекции «Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов».

Примеры решения задач

Задание 1

Определить удельные параметры воздушной и кабельной линий электропередачи напряжением 10 кВ, а также параметры схемы замещения этих линий при их длине 4 км. Воздушная линия выполнена проводами АС-50/8 при среднегеометрическом расстоянии между ними 2,5 м, кабельная линия – кабелем ААБ 3×50 при среднегеометрическом расстоянии между жилами кабеля 1,5 см. Максимальная мощность, передаваемая по воздушной линии, составляет 1000 кВА, по кабельной – 1600 кВА.

Решение:

Для провода марки АС 50/8 $r_{0в} = 0,603$ Ом/км; диаметр провода 9,6 мм.
Для кабеля марки ААБ 3×16 $r_{0к} = 0,62$ Ом/км; диаметр жилы кабеля $2r_k = 8,0$ мм.

Найдем значения индуктивного сопротивления используя D_{cp} и r_{np} :

$$x_{0в} = 0,144 \lg \frac{250}{0,48} + 0,0157 = 0,407 \text{ Ом/км};$$

$$x_{0к} = 0,144 \lg \frac{1,5}{0,4} + 0,0157 = 0,099 \text{ Ом/км};$$

Покажем, что для линии 10 кВ можно не учитывать реактивную проводимость и емкостную мощность. Определим $b_{0в}$ и $b_{0к}$ – удельные емкостные проводимости воздушной и кабельной линий:

$$b_{0в} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{250}{0,99}} = 3,155 \cdot 10^{-6} \text{ См/см};$$

$$b_{0к} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{1,5}{0,23}} = 9,215 \cdot 10^{-6} \text{ См/см};$$

Половины реактивных мощностей, генерируемых воздушной и кабельной линиями равны

$$Q_{Cв} = \frac{1}{2} 10^2 2,790 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,558 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар};$$

$$Q_{Cк} = \frac{1}{2} 10^2 13,178 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 2,636 \cdot 10^{-3} \text{ Мвар}.$$

Так как емкостные мощности линий 10 кВ практически очень малы в сравнении с передаваемыми максимальными мощностями 1000 кВА и 1600 кВА, то их можно не учитывать в расчетах и схеме замещения.

Отношение удельного индуктивного к удельному активному сопротивлению воздушной линии составляет

$$\frac{x_{0в}}{r_{0в}} = \frac{0,407}{0,603} = 0,675.$$

В случае кабельной линии это соотношение меньше:

$$\frac{x_{0к}}{r_{0к}} = \frac{0,099}{0,62} = 0,159.$$

Активная проводимость линий напряжением 10 кВ очень мала и не учитывается в схеме замещения.

Следовательно, схема замещения воздушной линии состоит из активного сопротивления $r_{л.в}$ и реактивного сопротивления $x_{л.в}$. Найдём их:

$$r_{л.в} = 0,603 \cdot 4 = 2,412 \text{ Ом}; \quad x_{л.в} = 0,407 \cdot 4 = 1,628 \text{ Ом}.$$

Поскольку индуктивное сопротивление кабеля намного меньше активного, им можно пренебречь и схема замещения кабельной линии будет состоять только из активного сопротивления $r_{л.к}$, которое равно

$$r_{л.к} = 0,62 \cdot 4 = 2,480 \text{ Ом}.$$

Задание 2

Определить удельные параметры одноцепной воздушной линии 110 кВ с проводами марки АС 95/16, расположенными на П-образных деревянных опорах с расстоянием между проводами $D_{ab} = D_{bc} = D = 4,3$ м, и вычислить параметры схемы замещения двухцепной линии длиной 100 км.

Решение

Для провода марки АС 95/16 $r_0 = 0,299$ Ом/км; диаметр провода $2r_{np} = 13,5$ мм.

Расстояние между фазами a и c $D_{ac} = 2D = 8,6$ м. Определим

среднегеометрическое расстояние между проводами линий :

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} = \sqrt[3]{DD2D} = \sqrt[3]{2D} = 1,26 \cdot 4,3 = 5,418 \text{ м.}$$

Найдем значения x_0 и b_0 :

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg(5418/13,5 \cdot 2) + 0,0157 = 0,434 \text{ Ом/км};$$

$$b_0 = 7,58 \cdot 10 / \lg(5418 \cdot 2 / 13,5) = 2,610 \cdot 10 \text{ См/км.}$$

По справочным данным можно непосредственно найти для провода АС 95/16 искомые удельные параметры: $x_0 = 0,434 \text{ Ом/км}$; $b_0 = 2,61 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$.

Отношение удельных активного и индуктивного сопротивлений в рассматриваемом случае равно

$$\frac{r_0}{x_0} = \frac{0,299}{0,434} = 0,688,$$

т. е. $r_0 < x_0$, что характерно для воздушных линий с $U_{ном} \geq 110 \text{ кВ}$.

Определение x_0, b_0 по справочным данным проще, чем их расчет по формулам. В дальнейшем будем использовать значения x_0, b_0 , определенные по таблице справочным данным.

Найдем параметры схемы замещения для двухцепной линии длиной 100 км:

$$r_l = 0,5 \cdot 0,299 \cdot 100 = 14,95 \text{ Ом}; \quad x_l = 0,5 \cdot 0,434 \cdot 100 = 21,697 \text{ Ом};$$

$$b_l = 2 \cdot 2,61 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 521,947 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Определим половину зарядной мощности линии:

$$Q_c = \frac{1}{2} U_{ном}^2 b_l = \frac{1}{2} 110^2 \cdot 521,947 \cdot 10^{-6} = 3,158 \text{ Мвар.}$$

По справочным данным для двухцепной линии можно найти $2Q_c = 2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 7,0 \text{ Мвар}$. Такая мощность должна быть учтена в расчете режима линии, т.е. зарядная мощность воздушных линий 110 кВ должна учитываться в балансе реактивной мощности. Это заключение тем более справедливо для линий более высоких напряжений. Поэтому схема замещения рассматриваемой линии должна включать кроме активного и индуктивного сопротивления емкостную проводимость или емкостную мощность.

Задание 3

Линия электропередачи напряжением 110 кВ протяженностью 80 км выполнена проводом АС 150/19. Определить как будет изменяться активное сопротивление этой линии, если минимальная температура воздуха $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, а максимальная $+35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

По справочным данным находим погонное активное сопротивление линии при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ $r_0 = 0,195 \text{ Ом/км}$. Активное сопротивление линии при этой температуре:

$$R = r_0 \cdot l = 0,195 \cdot 80 = 15,6 \text{ Ом.}$$

При температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ активное сопротивление линии будет:

$$R_{-25} = R \cdot [1 + 0,004 \cdot (t - 20^{\circ})] = 15,6 \cdot [1 + 0,004 \cdot (-25 - 20)] = 12,8 \text{ Ом},$$

а при температуре $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$R_{+35} = 15,6 \cdot [1 + 0,004 \cdot (35 - 20)] = 16,5.$$

Следовательно, при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ активное сопротивление линии уменьшается на 18%, а при $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается на 6% по сравнению с сопротивлением при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 4.

Определить потерю мощности на корону при хорошей и плохой погоде, а также реактивную мощность, генерируемую линией, если в ЛЭП напряжением 220 кВ протяженностью 130 км подвешены провода АС – 150/34 со среднегеометрическим расстоянием между ними 7 м.

Решение

Диаметр провода АС-150/34 $d_{np} = 17,5$ мм.

При хорошей погоде $\delta = 1$, $m_n = 1$, а критическое фазное напряжение:

$$U_{кр.ф} = 48,9 \cdot m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot r_{\text{э}} \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_{\text{э}}} = 48,9 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,875 \cdot \lg \frac{7000}{8,75} = 105,6 \text{ кВ}.$$

При плохой погоде $\delta = 0,9$, $m_n = 0,8$.

$$U_{кр.ф} = 48,9 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,875 \cdot \lg \frac{7000}{8,75} = 76,02 \text{ кВ}.$$

Погонная потеря мощности на корону при хорошей погоде:

$$\Delta P_{кор} = \frac{0,18}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{э}}}{D_{cp}}} \cdot (U_{\phi} - U_{кр.ф})^2 = \frac{0,18}{1} \cdot \sqrt{\frac{8,75}{7000}} \cdot \left(\frac{220}{\sqrt{3}} - 105,6\right)^2 = 2,96 \text{ кВт/км};$$

При плохой погоде:

$$\Delta P_{кор} = \frac{0,18}{0,9} \cdot \sqrt{\frac{8,75}{7000}} \cdot \left(\frac{220}{\sqrt{3}} - 76,02\right)^2 = 18,5 \text{ кВт/км}.$$

Потеря мощности в линии при хорошей погоде:

$$\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{кор} \cdot l = 2,96 \cdot 130 = 384,8 \text{ кВт}.$$

Из расчета видно, что применение провода АС-150/34 ($d_{np} = 17,5$ мм) при напряжении 220 кВ недопустимо из-за большой потери мощности, которая должна отсутствовать при хорошей погоде.

Погонная емкостная проводимость линии

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{cp}}{r_{\text{э}}}} 10^{-6} = \frac{7,58}{\lg \frac{7000}{8,75}} 10^{-6} = 2,61 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Реактивная мощность, генерируемая линией:

$$Q_c = U^2 \cdot b_0 \cdot l = 220^2 \cdot 2,61 \cdot 10^{-6} \cdot 130 = 16,422 \text{ Мвар}.$$

Задание 5

Определить как изменится полное сопротивление воздушной ЛЭП напряжением 220 кВ, выполненной проводом АСК-240/56, при горизонтальном расположении проводов с расстоянием 8 м, если: а) провода расположить в вершинах равностороннего треугольника; б) линию заменить ЛЭП постоянного тока.

Решение

а) Погонное сопротивление линии $r_0 = 0,122 \text{ Ом/км}$. Чтобы рассчитать ее погонное индуктивное сопротивление, по формуле (1.6) определим среднегеометрическое расстояние между проводами линии, расположенным горизонтально:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} = \sqrt[3]{DD2D} = \sqrt[3]{2D} = 1,26 \cdot 8 = 10 \text{ м.}$$

Диаметр провода АСК- 240/39 $d_{np} = 22,4 \text{ мм}$.

Тогда

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_0} + 0,0157 = 0,144 \cdot \lg \frac{10000}{11,2} + 0,0157 = 0,441 \text{ Ом/км.}$$

Полное погонное сопротивление линии:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2} = \sqrt{0,122^2 + 0,441^2} = 0,457 \text{ Ом/км.}$$

При расположении проводов в вершинах равностороннего треугольника $D_{cp} = D = 8000 \text{ мм}$, так что

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{8000}{11,2} + 0,0157 = 0,427 \text{ Ом/км,}$$

И полное погонное сопротивление линии:

$$z_0 = \sqrt{0,122^2 + 0,427^2} = 0,443 \text{ Ом/км.}$$

Следовательно, полное сопротивление линии при горизонтальном расположении проводов, в которой осуществлена транспозиция, по сравнению с линией, провода которой расположены в вершинах равностороннего треугольника, будет:

$$\frac{0,457 - 0,443}{0,443} = 3,16 \%,$$

т.е. увеличится на 3,16 %.

б) При питании линии постоянным током ее полное погонное сопротивление будет равно погонному активному сопротивлению:

$$r_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{28,9}{240} = 0,12 \text{ Ом/км.}$$

Таким образом, погонное активное сопротивление линии постоянного тока будет меньше полного погонного сопротивления линии переменного тока в 3.8 раз.

Задача для самостоятельного решения

Каждая фаза ЛЭП напряжением $U_{ном}$ длиной L выполнена n проводами указанными в таблице 1.1 (в случае если количество проводов в фазе больше 1 – приведена длина дистанционной распорки a). Провода линии подвешены горизонтально на расстоянии D один от другого. Составить схему замещения этой линии и определить ее параметры. В качестве исходных данных использовать погонное активное сопротивление, радиус провода.

Таблица 1.1 – Исходные данные к практическому занятию №1

Номер варианта	$U_{ном}$, кВ	Длина провода, км	Марка провода	Количество проводов в фазе* n	Длина дистанционной распорки a , см	Расстояние между фазами D , м
1	110	42	АС 95/16	1	0	5
2	220	51	АС 240/59	1	0	11
3	110	43	АС 95/14	1	0	5
4	220	50	АС 300/39	3	40	10
5	110	30	АС 120/19	1	0	5.5
6	220	69	АС 300/27	3	50	11
7	110	32	АС 150/19	1	0	5.5
8	110	37	АС 240/32	1	0	5
9	220	51	АС 330/43	1	0	10
10	110	44	АС 185/29	1	0	6
11	110	34	АС 240/39	1	0	5.5
12	220	70	АС 400/22	1	0	11
13	110	34	АС 150/34	1	0	5.5
14	220	67	АС 500/64	2	45	12
15	110	41	АС 185/24	1	0	6
16	220	65	АС 500/27	1	0	12
17	110	35	АС 95/16	1	0	6
18	220	59	АС 240/59	3	50	12
19	110	43	АС 95/14	1	0	6
20	220	59	АС 300/39	2	50	10
21	110	42	АС 120/19	1	0	5
22	220	66	АС 300/27	2	45	10
23	110	39	АС 150/19	1	0	5.5
24	110	44	АС 240/32	1	0	5.5
25	220	59	АС 330/43	2	50	12
26	110	36	АС 185/29	1	0	6
27	110	40	АС 240/39	1	0	5.5
28	220	63	АС 400/22	2	45	11
29	110	42	АС 150/34	1	0	5.5
30	220	63	АС 500/64	1	0	10
31	110	31	АС 185/24	1	0	5.5
32	220	50	АС 500/27	1	0	12
33	110	34	АС 95/16	1	0	5
34	220	60	АС 240/59	2	45	11
35	110	42	АС 95/14	1	0	5

36	220	54	AC 300/39	3	40	10
37	110	45	AC 120/19	1	0	5.5
38	220	55	AC 300/27	2	40	11
39	110	40	AC 150/19	1	0	5
40	110	42	AC 240/32	1	0	6
41	220	66	AC 330/43	3	45	11
42	110	33	AC 185/29	1	0	5
43	110	41	AC 240/39	1	0	5.5
44	220	65	AC 400/22	2	45	11
45	110	34	AC 150/34	1	0	5.5
46	220	59	AC 500/64	3	50	12
47	110	33	AC 185/24	1	0	5
48	220	54	AC 500/27	2	45	11
49	220	57	AC 330/43	3	45	12
50	110	36	AC 185/29	1	0	5

** в случае если фаза выполнена тремя проводами, то провода располагаются в вершинах равностороннего треугольника*

Справочные данные

Таблица 1 – Расчетные данные сталеалюминиевых проводов марок АС, АСКО*, АСКП ** и АСК *** по ГОСТ 839-80

Номинальные сечения, мм ² (алюминий/сталь)	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км не более	Сечение проводов, мм ²		Диаметр провода, мм	Номинальные сечения, мм ² (алюминий/сталь)	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км не более	Сечение проводов, мм ²		Диаметр провода, мм
		алюминиевых	стальных				алюминиевых	стальных	
35/6,2	0,773	36,9	6,15	8,4	300/39	0,096	301	38,6	24,0
50/8	0,592	48,2	8,04	9,6	300/48	0,098	295	47,8	24,1
70/11	0,420	68,0	11,30	11,4	300/66	0,100	288	65,8	24,5
95/16	0,299	95,4	15,90	13,5	300/27	0,089	325	26,6	24,4
95/15	0,314	91,7	15,00	13,5	330/43	0,087	332	43,1	25,2
95/14	0,316	91,2	141,0	19,8	400/22	0,073	394	22,0	26,6
120/19	0,245	118	18,8	15,2	400/51	0,073	394	51,1	27,5
150/19	0,195	148	18,8	16,8	400/93	0,071	406	93,2	29,1
150/24	0,194	149	24,2	17,1	450/50	0,067	434	56,3	28,8
150/34	0,196	147	34,3	17,5	500/27	0,060	481	26,6	29,4
185/24	0,154	187	24,2	18,9	500/64	0,059	490	63,5	30,6
185/29	0,159	181	29,0	18,8	500/36	0,059	490	336,0	37,5
185/43	0,156	185	43,1	19,6	550/71	0,053	549	71,2	32,4
185/28	0,155	187	128,0	23,1	600/72	0,050	580	72,2	33,2
205/27	0,140	205	26,6	19,8	650/79	0,046	634	78,9	34,7
240/32	0,118	244	31,7	21,6	700/86	0,042	687	85,9	36,2
240/39	0,122	236	38,6	21,6	750/93	0,039	748	93,2	37,7
240/56	0,120	241	56,3	22,4	800/105	0,035	821	105,0	39,7

Таблица 2 – Расчетные данные на 100 км воздушных ЛЭП напряжением 35-150 кВ со сталеалюминиевыми проводами

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление жил, r (Ом) при +20 °С	Индуктивное сопротивление x (Ом), проводимость b (См·10 ⁻⁴) и реактивная мощность q (Мвар) при напряжении, кВ							
		35		110			150		
		x	b	x	b	q	x	b	q
35	77,3	44,5	2,59	-	-	-	-	-	-
50	59,2	43,3	2,65	-	-	-	-	-	-
70	42,0	42,0	2,73	-	-	-	-	-	-
95	31,4	41,1	2,81	42,9	2,65	3,50	-	-	-
120	24,9	40,3	2,85	42,3	2,69	3,60	43,9	2,61	6,5
150	19,5	39,8	2,90	41,6	2,74	3,65	43,2	2,67	6,7
185	15,6	38,4	2,96	40,9	2,82	3,70	42,4	2,71	6,8
240	12,0	-	-	40,1	2,85	3,75	41,6	2,75	6,9