

### Практическое занятие №3.1 Расчет параметров установившихся режимов и потерь электроэнергии в элементах электрических сетей

Расчет установившихся режимов состоит в определении напряжений в узловых точках, токов и мощностей в отдельных элементах сети. Рассмотрим расчет установившегося режима на примере нескольких задач.

#### Задача 1.

По двухцепной линии напряжением 110 кВ и длиной 40 км выполненной проводом АС-120/19, необходимо доставить потребителям мощность  $\underline{S} = 50 + j20$  МВА при напряжении  $U = 110$  кВ.

Найти мощность и напряжение, которые нужно подвести к линии для случаев одновременной работы двух цепей и одной из них.

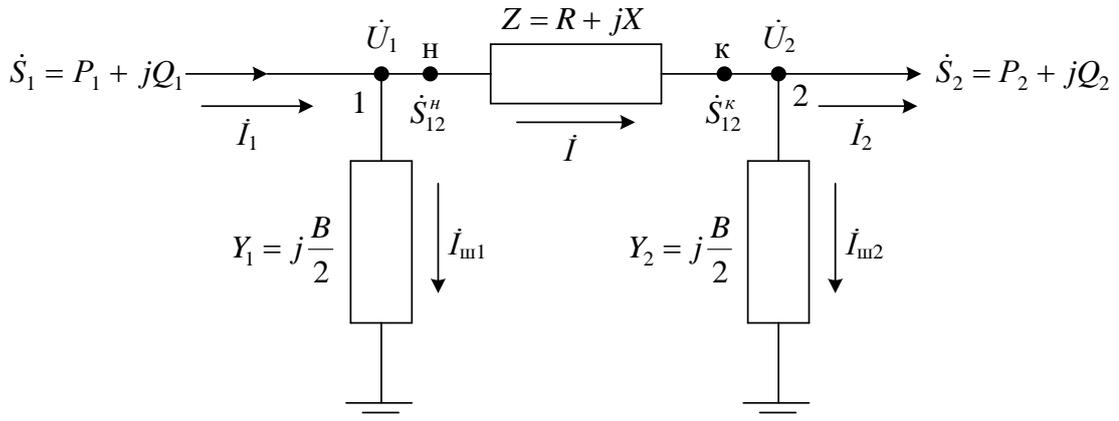


Рисунок 2.1 – Схема замещения воздушной линии напряжением 110 кВ

Решение. По таблицам найдем удельные параметры линии

$$r_0 = 0,244 \text{ Ом/км}; \quad x_0 = 0,427 \text{ Ом/км}; \quad b_0 = 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Найдем параметры схемы замещения линии при работе одной и двух цепей

$$R_{\text{Л}} = 0,244 \cdot 40 = 9,76 \text{ Ом}; \quad X_{\text{Л}} = 0,427 \cdot 40 = 17,08 \text{ Ом};$$

$$Q_C/2 = 110^2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 40/2 = 0,64 \text{ Мвар};$$

$$R_{\text{Л}}/2 = 4,88 \text{ Ом}; \quad X_{\text{Л}}/2 = 8,54 \text{ Ом}; \quad Q_C = 1,28 \text{ Мвар}.$$

Рассматриваемый случай представляет расчет режима по данным конца и его удобно вести, имея расчетную схему в виде рисунка 2.1. Заданные мощность и напряжение соответствуют значениям  $\underline{S}_2$  и  $U_2$ , искомыми параметрами являются  $\underline{S}_1$  и  $U_1$ .

Проведем расчет для случая работы одной цепи линии

$$\underline{S}_{12}^K = P_2 + j(Q_2 - Q_C/2) = 50 + j(20 - 0,64) = 50 + j19,36 \text{ МВА};$$

$$\Delta \underline{S}_{\text{Л}} = \frac{(\underline{S}_{12}^K)^2}{U_2^2} \cdot (R_{\text{Л}} + jX_{\text{Л}}) = \frac{50^2 + 19,36^2}{110^2} \cdot (9,76 + j17,08) = 2,32 + j4,06$$

МВА;

$$\underline{S}_{12}^H = \underline{S}_{12}^K + \Delta \underline{S}_{\text{Л}} = 50 + 2,32 + j(19,36 + 4,06) = 52,32 + j23,42 \text{ МВА};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12}^H + jQ_C^H/2 = 52,32 + j(23,42 - 0,64) = 52,32 + j22,78 \text{ МВА};$$

$$\underline{U}_1 = 110 + \frac{50 \cdot 9,76 + 19,36 \cdot 17,08}{110} + j \frac{50 \cdot 17,08 - 19,36 \cdot 9,76}{110} = 117,44 + j6,04$$

кВ;

$$U_1 = \sqrt{117,44^2 + 6,04^2} = 117,6 \text{ кВ}$$

Здесь нетрудно видеть, что неучет поперечной составляющей падения напряжения дал бы результат  $U_1 = 117,44$  кВ. Погрешность этого составила бы

$$\frac{117,6 - 117,44}{117,6} \cdot 100\% = 0,14 \%$$

Значит при расчете, линий напряжением 110 кВ и ниже поперечную составляющую падения напряжения можно не учитывать.

Сделаем такой же расчет для случая одновременной работы двух цепей линии

$$\underline{S}_{12}^K = 50 + j(20 - 1,28) = 50 + j18,72 \text{ МВА};$$

$$\Delta \underline{S}_{Л} = \frac{50^2 + 18,72^2}{110^2} \cdot (4,88 + j8,54) = 1,15 + j2,01 \text{ МВА};$$

$$\underline{S}_{12}^H = 50 + 1,15 + j(18,72 + 2,01) = 51,15 + j20,73 \text{ МВА};$$

$$\underline{S}_1 = 51,15 + j(20,73 - 1,28) = 51,15 + j19,45 \text{ МВА};$$

$$\underline{U}_1 = 110 + \frac{50 \cdot 4,88 + 19,36 \cdot 8,54}{110} + j \frac{50 \cdot 8,54 - 19,36 \cdot 4,88}{110} = 113,72 + j3,02$$

кВ;

$$U_1 = \sqrt{113,72^2 + 3,02^2} = 113,76 \text{ кВ}$$

Из анализа следует, что во втором случае для удовлетворения потребностей потребителя необходимо подвести к линии меньшую мощность при более низком уровне напряжения. При этом величина необходимой реактивной мощности источника оказывается меньше, чем требуется потребителю ( $19,45 < 20$ ). Это объясняется тем, что в данном режиме потери реактивной мощности в линии  $\Delta Q_{Л} = 2,01$  Мвар меньше зарядной мощности линии  $\Delta Q_{С} = 2,56$  Мвар.

## Задача 2.

От шин районной подстанции с уровнем напряжения 230 кВ по линии длиной 120 км, выполненной проводом АС-300/39, питается потребитель мощностью  $\underline{S} = 80 + j30$  МВ А.

Найти мощность, выдаваемую подстанцией в линию, и напряжение в конце линии в данном режиме, а также при отключенной нагрузке.

Решение. Удельные параметры заданной линии и параметры ее схемы замещения равны

$$r_0 = 0,096 \text{ Ом/км}; \quad x_0 = 0,429 \text{ Ом/км}; \quad b_0 = 2,64 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

$$R_{Л} = 0,096 \cdot 120 = 11,52 \text{ Ом}; \quad X_{Л} = 0,429 \cdot 120 = 51,48 \text{ Ом};$$

$$Q_C/2 = 220^2 \cdot 2,64 \cdot 10^{-6} \cdot 120/2 = 7,67 \text{ Мвар.}$$

Рассматриваемый случай представляет расчет режима по данным начала и ведется в два этапа.

В соответствии с расчетной схемой (рисунок 2.1) в начале осуществим расчет мощностей

$$\underline{S}_{12}^K = 80 + j(30 - 7,67) = 80 + j22,33 \text{ МВА;}$$

$$\Delta \underline{S}_{12} = \frac{80^2 + 22,33^2}{220^2} \cdot (11,52 + j51,48) = 1,64 + j7,34 \text{ МВА;}$$

$$\underline{S}_{12}^H = 80 + 1,64 + j(22,33 + 7,34) = 81,64 + j29,67 \text{ МВА;}$$

$$\underline{S}_1 = 81,64 + j(29,67 - 7,67) = 81,64 + j22,00 \text{ МВА;}$$

Теперь по формулам (2.7) найдем напряжение в конце линии

$$\underline{U}_2 = 230 - \frac{81,64 \cdot 11,52 + 29,67 \cdot 51,48}{230} -$$

$$- j \frac{81,64 \cdot 51,48 - 29,67 \cdot 11,52}{230} = 219,27 - j16,79 \text{ кВ;}$$

$$U_2 = \sqrt{219,27^2 + 16,79^2} = 219,91 \text{ кВ.}$$

При отключении нагрузки линии часть зарядной мощности линии, показанная на расчетной схеме (рисунок 2.1) у точки 2, будет передаваться к началу линии. Если пренебречь потерями мощности в линии от передачи зарядной мощности, то

$$\underline{S}_{12}^H = -jQ_C/2 = -7,67 \text{ Мвар.}$$

И значит, без учета поперечной составляющей падения напряжения

$$U_2 = 230 - \frac{-7,67 \cdot 51,48}{230} = 231,72 \text{ кВ.}$$

Отключение нагрузки линии приводит к повышению напряжения в конце линии, что может привести к перенапряжениям в линиях сверхвысокого напряжения большой протяженности.

### Задача 3.

Кабельная линия напряжением 10 кВ протяженностью 0,8 км, выполненная кабелем ААБ-3×120, питает цех, мощность нагрузки которого 1500 кВт, а коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,9$ . Определить потери мощности в линии и напряжение в конце линии, если в начале линии  $U_1 = 10,3$  кВ.

Решение. Из параметров схемы замещения следует учитывать только активное и реактивное сопротивления, удельные значения которых найдем по таблице

$$r_0 = 0,258 \text{ Ом/км; } x_0 = 0,081 \text{ Ом/км;}$$

$$R_{л} = 0,258 \cdot 0,8 = 0,206 \text{ Ом; } X_{л} = 0,081 \cdot 0,8 = 0,065 \text{ Ом.}$$

Найдем потери мощности (для расчета будем использовать

номинальное значение напряжение):

$$\Delta P = \frac{P^2}{U_H^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R_{Л} = \frac{1500^2}{10^2 \cdot 0,9^2} \cdot 0,206 \cdot 10^3 = 5,7 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q = \frac{P^2}{U_H^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot X_{Л} = \frac{1500^2}{10^2 \cdot 0,9^2} \cdot 0,065 \cdot 10^3 = 1,8 \text{ квар.}$$

Напряжение в конце линии определяем через потерю напряжения, используя также допущение расчета распределительных сетей о равенстве мощностей в начале и конце линии

$$U_2 = U_1 - \frac{P \cdot R_{Л} + Q \cdot X_{Л}}{U_H} = 10,3 - \frac{1500 \cdot 0,206 + 726,5 \cdot 0,065}{10} = 10,264 \text{ кВ.}$$

$$\text{Здесь } Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1500 \cdot 0,484 = 726,5 \text{ квар.}$$

#### Задача 4.

По двум линиям напряжением 10 кВ и длиной 1 км от одного источника получает электроэнергию потребитель мощностью  $P = 3,5$  МВт при  $\cos \varphi = 1$ . При этом одна линия выполнена кабелем ААБ-3×95, а вторая – проводом АС-95/16.

Определить мощность, передаваемую по каждой линии и потери активной мощности в них и в электропередаче в целом.

Решение. В схему замещения линий 10 кВ достаточно ввести только их активное и реактивное сопротивления. Их значения возьмем из таблиц

$$R_{ВЛ} = 0,311 \text{ Ом}; R_{КЛ} = 0,356 \text{ Ом}; X_{КЛ} = 0,083 \text{ Ом.}$$

Найдем общее сопротивление двух параллельно работающих линий

$$\underline{Z}_{\Sigma} = \frac{\underline{Z}_{ВЛ} \cdot \underline{Z}_{КЛ}}{\underline{Z}_{ВЛ} + \underline{Z}_{КЛ}} = \frac{(0,311 + j0,356) \cdot (0,326 + j0,083)}{(0,311 + j0,356) + (0,326 + j0,083)} = 0,180 + j0,098$$

Ом.

Определяем мощность, передаваемую по кабельной и воздушно линиям

$$\underline{S}_{КЛ} = P \cdot \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_{КЛ}} = 3,5 \cdot \frac{0,180 + j0,098}{0,326 + j0,083} = 2,08 + j0,53 \text{ МВА};$$

$$\underline{S}_{ВЛ} = P - \underline{S}_{КЛ} = 1,42 - j0,53 \text{ МВА.}$$

Из расчетов видно, что при равных сечениях проводников по линиям передается различная по величине мощность. Кроме того, несмотря на отсутствие реактивной составляющей мощности у нагрузки, по линиям циркулирует реактивная мощность.

Находим потери активной мощности в каждой линии

$$\Delta P_{ВЛ} = \frac{P_{ВЛ}^2 + Q_{ВЛ}^2}{U_H^2} \cdot R_{ВЛ} = \frac{1,42^2 + 0,53^2}{10^2} \cdot 0,311 \cdot 10^3 = 7,1 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{KL} = \frac{2,08^2 + 0,53^2}{10^2} \cdot 0,326 \cdot 10^3 = 15,0 \text{ кВт.}$$

Общие потери составляют величину

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{BL} + \Delta P_{KL} = 7,1 + 15,0 = 22,1 \text{ кВт.}$$

Нетрудно показать, что при выполнении обеих линий воздушными или кабельными одного сечения реактивные мощности по линиям циркулировать не будут.

Действительно, если обе линии воздушные

$$\underline{Z}_{\Sigma} = \underline{Z}_{BL}/2 = (0,311 + j0,356)/2 = 0,156 + j0,178 \text{ Ом;}$$

$$\underline{S}_{BL-1} = \underline{S}_{BL-2} = P \cdot \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_{BL}} = 3,5 \cdot \frac{0,156 + j0,178}{0,311 + j0,356} = 1,7 + j0 \text{ МВА.}$$

Потери активной мощности в каждой линии и общие будут равны

$$\Delta P_{BL-1} = \Delta P_{BL-2} = \frac{1,75^2}{10^2} \cdot 0,311 \cdot 10^3 = 9,52 \text{ кВт; } \Delta P_{\Sigma} = 19,04 \text{ кВт.}$$

Это меньше, чем в случае применения воздушной и кабельной линий того же сечения.

### Задачи для самостоятельного решения

1. По двухцепной линии (параметры одной цепи линии ( $r$ ,  $x$ ,  $b$ )) принять равными параметрам линии посчитанной в практическом занятии № 1) потребителям необходимо доставить мощность  $\underline{S} = P_2 + jQ_2$  (исходные данные согласно таблице 2.1). Напряжение на шинах потребителя равно  $U_2$ . Найти мощность и напряжение, которые нужно подвести к линии для случаев одновременной работы двух цепей и одной из них.

2. От шин районной подстанции с напряжением  $U_1$  по линии (параметры линии ( $r$ ,  $x$ ,  $b$ )) принять равными параметрам линии посчитанной в практическом занятии № 1) питается потребитель мощностью  $\underline{S} = P_2 + jQ_2$ . Найти мощность, выдаваемую подстанцией в линию, и напряжение в конце линии в данном режиме, а также при отключенной нагрузке (работа воздушной линии на холостом ходу).

Таблица 2.1 – Исходные данные к практическому занятию № 2

Номер варианта	Активная мощность нагрузки $P_2$ , МВт	Реактивная мощность нагрузки $Q_2$ , Мвар	Напряжение на шинах потребителя $U_2$ , кВ (для задачи № 1)	Напряжение на шинах районной подстанции $U_1$ , кВ (для задачи № 2)
1	20	9	112.2	113.2
2	81	44	228.8	230.5
3	21	11	110	111.1
4	88	32	224.4	225
5	30	15	110	111.2
6	85	36	222.2	223.3
7	35	15	112.2	113.5

8	36	13	112.2	113.3
9	85	34	224.4	224.9
10	33	15	108.9	110.5
11	36	16	112.2	113.3
12	91	33	224.4	225.3
13	30	15	108.9	110.4
14	106	48	217.8	219.2
15	35	17	114.4	115
16	112	54	226.6	228.2
17	21	9	113.3	114.4
18	85	31	222.2	223
19	20	7	113.3	114
20	85	41	228.8	230.1
21	30	15	112.2	113.5
22	93	50	220	221.4
23	33	14	110	111.4
24	40	16	113.3	114.2
25	90	33	226.6	228.4
26	35	14	112.2	113.3
27	37	12	112.2	113.1
28	88	43	217.8	219
29	28	10	108.9	110.5
30	109	36	220	221
31	30	13	108.9	109.9
32	114	45	224.4	225.1
33	20	10	110	110.9
34	77	33	224.4	225.1
35	22	11	108.9	109.9
36	89	46	217.8	218.9
37	28	15	113.3	114.1
38	93	42	217.8	219.2
39	31	14	111.1	112.3
40	39	18	111.1	112.2
41	88	47	224.4	225.5
42	34	14	108.9	110.3
43	36	14	114.4	115.4
44	93	45	228.8	229.9
45	27	15	110	111.4
46	107	58	220	221.3
47	35	19	112.2	113.5
48	107	42	226.6	228.4
49	94	40	222.2	223.5
50	30	12	113.3	114.2