

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ДЛЭП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ В РЕЖИМЕ ИХ САМОБАЛАНСА

В. И. ГОТМАН, И. А. БЕЗЛЕР.

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Суммарные потери в высоковольтных элементах дальних линий электропередач (ДЛЭП) могут достигать порядка 8—12% от передаваемой мощности, что составляет большую абсолютную величину. В связи с этим одной из важных эксплуатационных задач является оптимальное регулирование режимных параметров, обеспечивающих минимальные или по возможности близкие к минимальным потери активной мощности. Снижение потерь активной мощности может мыслиться только в том случае, когда электропередача снабжена регулируемыми элементами, позволяющими изменять режимные параметры в нужном направлении,

Режим электропередачи полностью характеризуется тремя величинами  $P$ ,  $U$ ,  $Q$ . Учитывая, что в реальных условиях величина активной мощности носит вынужденный характер, свободу регулирования имеют  $U$  и  $Q$ .

Регулирование параметров  $U$  и  $Q$  может вестись изменением тока возбуждения генераторов, переключением отпаек трансформаторов и регулированием мощности компенсирующих устройств.

Для анализа закономерностей изменения реактивных мощностей участков, проводимостей (мощностей) КУ и напряжений, обеспечивающих минимальные потери активной мощности, обратимся к схеме рис. 1, где изображена электропередача с одной промежуточной системой (ПС).

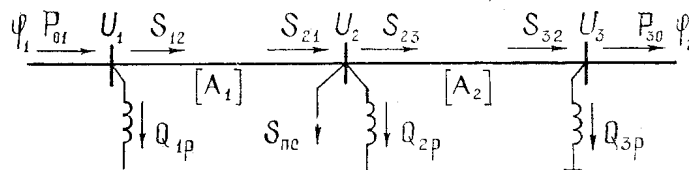


Рис. 1. Схема электропередачи

Функция суммарных потерь применительно к схеме (рис. 1) после незначительных преобразований может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{1p} + \Delta P_{12} + \Delta P_{2p} + \Delta P_{23} + \Delta P_{3p} = \\ &= \frac{1}{\gamma_1} \operatorname{Re} \left[ \dot{A}_1 \dot{C}_1^A U_1^2 + \dot{B}_1 \dot{D}_1^A \frac{P_{21}^2 + Q_{21}^2}{U_2^2} + (\dot{A}_1 \dot{D}_1^A + \dot{B}_1 \dot{C}_1^A) P_{21} + j(\dot{A}_1 \dot{D}_1^A - \dot{B}_1 \dot{C}_1^A) Q_{21} \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{K_n}{\gamma_1} \operatorname{Im} \left[ \dot{A}_1 \dot{C}_1 U_2^2 + \dot{B}_1 \dot{D}_1 \frac{P_{21}^2 + Q_{21}^2}{U_2^2} + (\dot{A}_1 \dot{D}_1 + \dot{B}_1 \dot{C}_1) P_{21} + j(\dot{A}_1 \dot{D}_1 - \dot{B}_1 \dot{C}_1) Q_{21} \right] + \\
& + \frac{1}{\gamma_2} \operatorname{Re} \left[ \dot{D}_2 \dot{C}_2 U_2^2 + \dot{B}_2 \dot{A}_2 \frac{[P_{21} - K_n(Q_{21} - Q_{23})]^2 + Q_{23}^2}{U_2^2} - (\dot{D}_2 \dot{A}_2 + \dot{B}_2 \dot{C}_2) \times \right. \\
& \quad \times [P_{21} - K_n(Q_{21} - Q_{23})] - j(\dot{D}_2 \dot{A}_2 - \dot{B}_2 \dot{C}_2) Q_{23} \left. \right] + \frac{K_n}{\gamma_2} \operatorname{Im} \left[ -\dot{D}_2 \dot{C}_2 U_2^2 - \right. \\
& \quad \left. - \dot{B}_2 \dot{A}_2 \frac{[P_{21} - K_n(Q_{21} - Q_{23})]^2 + Q_{23}^2}{U_2^2} + (\dot{D}_2 \dot{A}_2 + \dot{B}_2 \dot{C}_2) [P_{21} - K_n(Q_{21} - Q_{23})] + \right. \\
& \quad \left. + j(\dot{D}_2 \dot{A}_2 - \dot{B}_2 \dot{C}_2) Q_{23} \right], \tag{1}
\end{aligned}$$

где

$$\gamma_1 = 1 - K_n \operatorname{tg} \varphi_1, \quad \gamma_2 = 1 - K_n \operatorname{tg} \varphi_2,$$

$K_n = \operatorname{tg} \psi_{\text{кв}}$  — тангенс угла потерь КУ (0,01—0,005)

Формула (1) действительна для нагрузок меньше натуральной мощности. При этих нагрузках  $Q_{21}$  и  $Q_{32}$  — индуктивные мощности, а  $Q_{12}$  и  $Q_{23}$  — емкостные.

Считая, что  $\operatorname{tg} \varphi_1, \operatorname{tg} \varphi_2$  ( $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ ) заданы по условиям нормальной работы генераторов передающей станции и потребителей приемной системы, частные условия минимума потерь при фиксированном напряжении  $U_2$  вытекают из уравнений

$$\frac{\partial \Delta P \Sigma}{\partial Q_{21}} = 0, \quad \frac{\partial \Delta P \Sigma}{\partial Q_{23}} = 0. \tag{2}$$

Совместное решение этих уравнений позволяет найти величины реактивных мощностей  $Q_{21}$  и  $Q_{23}$ , обеспечивающие оптимальный перепад напряжений на участках

$$Q_{21m} = -U_2^2 b_{21m} + P_{21} \frac{K_n M_2}{L}, \quad Q_{23m} = U_2^2 b_{23m} - P_{21} \frac{K_n M_1}{L}, \tag{3}$$

где

$$b_{21m} = \frac{K_n^2 (F_1 - F_2) + F_1 + N_2}{2L}, \quad b_{23m} = \frac{K_n^2 (F_2 - F_1) + (M_1) M_2 (F_2 + N_2)}{2L}, \tag{4}$$

$$L = M_1 + K_n^2 (M_1 + M_2), \quad F_1 = \operatorname{Im}(\dot{B}_1 \dot{C}_1) + K_n \operatorname{Re}(\dot{B}_1 \dot{C}_1) - K_n A_1^2,$$

$$F_2 = \operatorname{Im}(\dot{B}_2 \dot{C}_2) + K_n \operatorname{Re}(\dot{B}_2 \dot{C}_2) - K_n A_2^2, \quad N_2 = -K_n^2 \operatorname{Im}(\dot{B}_2 \dot{C}_2) + \\ + K_n \operatorname{Re}(\dot{B}_2 \dot{C}_2) + K_n A_2^2,$$

$$M_1 = \operatorname{Re}(\dot{B}_1 \dot{D}_1) - K_n \operatorname{Im}(\dot{B}_1 \dot{D}_1), \quad M_2 = \operatorname{Re}(\dot{B}_2 \dot{A}_2) - K_n \operatorname{Im}(\dot{B}_2 \dot{A}_2).$$

Следует отметить, что в уравнениях (3) вторые слагаемые на два—три порядка меньше первых, так что влияние  $P_{21}$  на величины  $Q_m$  в практических расчетах можно не учитывать. Подставляя найденные закономерности  $Q_{21m}$  и  $Q_{23m}$  в функцию суммарных потерь (1) и дифференцируя ее по  $U_2$ , получаем уравнение

$$\frac{d \Delta P \Sigma}{d U_2} = 0, \tag{5}$$

которому удовлетворяет решение

$$U_{2\eta} = \sqrt{\frac{P_{21}}{g_{2\eta}}}, \tag{6}$$

где

$$g_{2\gamma} = \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{W} + \frac{G}{W}}, \quad (7)$$

$$G = [b_{21m}^2 M_1 + b_{23m}^2 M_2 + K_n(b_{21m} + b_{23m})^2 M_2 - b_{21m}(F_1 + N_2) - b_{23m}(F_2 + N_2)],$$

$$H_1 = \text{Re}(\dot{A}_1 \dot{C}_1) - K_n I_m(\dot{A}_1 \dot{C}_1), \quad H_2 = \text{Re}(\dot{D}_2 \dot{C}_2) - K_n I_m(\dot{D}_2 \dot{C}_2),$$

$$W = \frac{M_1(M_1 + L)}{L}.$$

Суть согласованного регулирования напряжения, обеспечивающего минимальные потери состоит в том, что общий уровень напряжения электропередачи должен регулироваться в строгом соответствии со значением активной мощности графика транзита, в частности, для узла подключения ПС эта связь определяется уравнением (6).

В случае равенства постоянных участков  $[A_1] = [A_2]$  выражения (3), (4), (7) упрощаются:

$$Q_{21m} = -Q_{23m} = -U_2^2 b_{2m} \div P_{21} \frac{K_n}{1 + 2K_n^2}, \quad (8)$$

$$b_{2m} = \frac{I_m(\dot{B}\dot{C}) - K_n I_m(\dot{B}\dot{C}) + 2K_n \text{Re}(\dot{B}\dot{C})}{2[\text{Re}(\dot{B}\dot{D}) - K_n I_m(\dot{B}\dot{D})](1 + 2K_n^2)}, \quad (9)$$

$$g_{2\gamma} = \sqrt{\frac{[\text{Re}(\dot{D}\dot{C}) - K_n I_m(\dot{D}\dot{C})](1 + 2K_n^2)}{[\text{Re}(\dot{B}\dot{D}) - K_n I_m(\dot{B}\dot{D})](1 + K_n^2)}} b_{2m} \frac{(1 + 2K_n^2)^2}{1 + K_n^2}. \quad (10)$$

Активная проводимость  $g_\gamma$  в значительной степени зависит от потерь в КУ и при увеличении коэффициента  $K_n$  возрастает. В режиме согласованного регулирования напряжений  $U_2 = U_{2\gamma}$  согласно (6) и соответствующие этому закону напряжения  $U_{1\gamma}$  и  $U_{3\gamma}$  запишутся как:

$$U_{1\gamma} = B \sqrt{\frac{P_{21}}{g_{2\gamma}} \left\{ \left[ \frac{K_n g_{2\gamma}}{1 + 2K_n^2} - b_{2m} - \frac{I_m(\dot{A}\dot{B})}{B_2} \right]^2 + \left[ g_{2\gamma} + \frac{\text{Re}(\dot{A}\dot{B})}{B^2} \right]^2 \right\}}, \quad (11)$$

$$U_{3\gamma} = B \sqrt{\frac{P_{21}}{g_{2\gamma}} \left\{ \left[ b_{2m} \frac{1 + 2K_n^2}{1 + K_n^2} + T \right]^2 + \left[ \frac{g_{2\gamma}}{1 + 2K_n^2} + \frac{K_n b_{2m}}{1 + K_n^2} - V \right]^2 \right\} (1 + K_n^2)}. \quad (12)$$

И, следовательно, перепады напряжений на участках 1—2 и 2—3 в режиме максимального к. п. д. определяются как

$$K_\gamma U_{12} = \frac{U_{1\gamma}}{U_{2\gamma}} = B \sqrt{\left[ \frac{K_n g_{2\gamma}}{1 + 2K_n^2} - b_{2m} - \frac{j_m(\dot{A}\dot{B})}{B_2} \right]^2 + \left[ g_{2\gamma} + \frac{\text{Re}(\dot{A}\dot{B})}{B^2} \right]^2}, \quad (13)$$

$$K_\gamma U_{23} = \frac{U_{2\gamma}}{U_{3\gamma}} = \frac{1}{B \sqrt{\left\{ \left[ b_{2m} \frac{1 + 2K_n^2}{1 + K_n^2} + T \right]^2 + \left[ \frac{g_{2\gamma}}{1 + 2K_n^2} + \frac{K_n b_{2m}}{1 + K_n^2} - V \right]^2 \right\} (1 + K_n^2)}}, \quad (14)$$

где

$$T = \frac{I_m(\dot{D}\dot{B}) - K_n \text{Re}(\dot{D}\dot{B})}{B^2(1 + K_n^2)}, \quad V = \frac{\text{Re}(\dot{D}\dot{B}) + K_n I_m(\dot{D}\dot{B})}{B^2(1 + K_n^2)}.$$

Перепады напряжений  $K_{\tau U}$  участков в режиме  $\eta_{\max}$  не зависят от режимных параметров, а определяются только постоянными ЛЭП и потерями в КУ и поэтому на всем интервале согласованного регулирования напряжения остаются постоянными. Для ДЛЭП с сбалансированными ПС перепады напряжений участков всегда положительны (больше единицы) и возрастают с увеличением длины участка и потерь в КУ. Численные значения перепадов напряжений для участков различной длины и разного класса напряжений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перепады напряжений в режиме  $\eta_{\max}$  для случая  $[A_1] = [A_2]$

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	500				1000				
$K_{\text{п}} \text{ от. ед.}$	0,01				0,005				
$l_{\text{уч}}, \text{км}$	300	500	750	1000	300	500	750	1000	
	$K_{\tau U}$				$K_{\tau U}$				
$N_{\text{уч.}}$	1—2	1,0107	1,0216	1,0334	1,0373	1,0094	1,0152	1,0209	1,0264
	2—3	1,0075	1,0120	1,0208	1,0346	1,0058	1,0102	1,0157	1,0222

Отметим, что при неизменных значениях  $K_{\tau U}$  в режиме согласованного регулирования разность напряжений концов участков  $\Delta U$  ( $\Delta U_{12} = U_{1\tau} - U_{2\tau}$ ,  $\Delta U_{23} = U_{2\tau} - U_{3\tau}$ ) не остается постоянной и по мере снижения активной мощности возрастает.

Современные мощные трансформаторы выпускаются с диапазоном регулирования  $\pm (10-15)\% \cdot U_{\text{ном}}$ . Применительно к высоковольтным электропередачам ( $U_{\text{ном}} = 500 \div 1000 \text{ кВ}$ ), в которых верхний предел по условиям изоляции ограничен  $1,05U_{\text{ном}}$ , более целесообразно изготавливать трансформаторы с асимметричным диапазоном регулирования:  $(+5-15)\% \cdot U_{\text{ном}}$ ,  $(+5-25)\% \cdot U_{\text{ном}}$ . Благодаря этому, имеются реальные возможности в некотором диапазоне изменения активной мощности транзита вести режим минимальных потерь или близкий к нему режим.

Изоляция концов участков, особенно изоляция оборудования, размещенного на компенсирующих пунктах (КП) и тем более на подстанциях, более точно соответствует номинальному напряжению, чем изоляция линии, и жесткое ограничение напряжения на уровне  $1,05 \times U_{\text{ном}}$  следует применять лишь к КП и подстанциям электропередачи. В промежуточных точках участков можно допускать и некоторое превышение  $U_{\text{ном}}$ . Будем считать, что регулирование напряжения на концах участков ведется в некотором диапазоне: верхний уровень ограничен  $U_{\text{ном}}$ , нижний ( $U_{\text{ниж}}$ ) — возможностями регулирующих аппаратов.

По мере роста перетока активной мощности увеличиваются напряжения концов участков  $U_{1\tau}$ ,  $U_{2\tau}$ ,  $U_{3\tau}$  (равно как и напряжение любой точки системы) согласно уравнениям (11), (6), (12). Первым верхнего предела достигает напряжение передающего конца ( $U_{1\tau}$ ).

Значение активной мощности  $P_{21}^{10}$ , начиная с которой следует переходить к режиму фиксированного напряжения  $U_1$ , найдем из уравнения (11) при условии  $U_{1\tau} = U_{\text{ном}}$ .

$$P_{21}^{10} = \frac{U_{\text{ном}}^2 g_{2\tau}}{B^2 \left\{ \left[ \frac{-K_{\text{п}} g_{2\tau}}{1 + 2K_{\text{п}}^2} - b_{2\text{м}} - \frac{I_{\text{м}}(\dot{A}\dot{B})}{B^2} \right]^2 + \left[ g_{2\tau} + \frac{\text{Re}(\dot{A}\dot{B})}{B^2} \right]^2 \right\}} \quad (15)$$

По мере последующего роста нагрузки при некоторых значениях  $P_{21}$  необходимо фиксировать напряжение  $U_2$  и затем  $U_3$ . Мощность  $P_{21\text{верх}}^{23}$ ,

при которой наступает режим равных напряжений на участке 2—3, а следовательно, заканчивается переход к режиму равных и фиксированных напряжений  $U_{\text{ном}}$  на всей электропередаче, определится из выражения

$$P_{21\text{верх}}^{23} = \frac{U_{\text{ном}}^2(1+K_n^2)(1+2K_n^2)}{(1+2K_n^2)^2 + K_n^2} \left[ (1+2K_n^2)V - K_n(\theta_{2m} + T) + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{(1+2K_n^2)^2 + K_n^2}{B^2(1+K_n^2)} - [(1+2K_n^2)(\theta_{2m} + T) + K_n V]^2} \right]. \quad (16)$$

Аналогичным образом по мере уменьшения передаваемой мощности снижается общий уровень напряжения на участках, при этом, в силу положительности перепадов, первым нижнего предела, ограниченного регулировочными возможностями понижающего трансформатора, достигает напряжение приемного конца электропередачи ( $U_3$ ).

Значение  $P_{21}^{30}$ , соответствующее фиксации напряжения  $U_3$ , определяется из уравнения (12) при условии  $U_{3\eta} = U_{\text{ниж}}$

$$P_{21}^{30} = \frac{U_{\text{ниж}}^2 g_{2\eta}}{B^2 \left\{ \left[ \theta_{2m} \frac{1+2K_n^2}{1+K_n^2} + T \right]^2 + \left[ \frac{g_{2\eta}}{1+2K_n^2} + \frac{K_n \theta_{2m}}{1+K_n^2} - V \right]^2 \right\}}. \quad (17)$$

При последующем снижении  $P_{21}$  нижнего предела достигают напряжения  $U_2$  и  $U_1$ .

Режим равных напряжений в узловых пунктах всей электропередачи наступает при достижении  $U_1 = U_{\text{ниж}}$  (предполагается, что все трансформаторы высоковольтного звена имеют один и тот же регулировочный диапазон), которому соответствует  $P_{21\text{ниж}}^{12}$

$$P_{21\text{ниж}}^{12} = \frac{U_{\text{ниж}}^2(1+2K_n^2)}{(1+2K_n^2)^2 + K_n^2} \left[ 1 + K_n b_{2m} + \sqrt{\frac{(1+2K_n^2)^2 + K_n^2}{B^2} - [R + (1+2K_n^2)\theta_{zm}]^2} \right] \quad (18)$$

где

$$I = \frac{K_n I_m (\dot{A}\dot{B}) - (1+2K_n^2) \text{Re}(\dot{A}\dot{B})}{B^2}, \quad R = \frac{K_n \text{Re}(\dot{A}\dot{B}) + (1+2K_n^2) I_m (\dot{A}\dot{B})}{B^2}.$$

Выражения (15)—(18) представляют собой уравнения, описывающие границы зон перехода закономерностей оптимального регулирования напряжений, потоков реактивных мощностей на участках и проводимостей (мощностей) КУ с учетом режимных ограничений по напряжению. Для любой электропередачи, имеющей средства регулирования, можно выделить пять характерных зон. Протяженность каждой зоны зависит от параметров, длины и количества участков, коэффициента потерь КУ, класса напряжения электропередачи, регулировочного диапазона трансформаторов и уровней ограничения напряжения.

Первая зона при  $P_{21} \leq P_{21\text{ниж}}^{12}$  характеризуется тем, что по концам всех участков держится минимально возможный уровень напряжения. Во второй  $P_{21\text{ниж}}^{12} \leq P_{21} \leq P_{21}^{30}$  и четвертой  $P_{21}^{10} \leq P_{21} \leq P_{21\text{верх}}^{23}$  зонах происходит последовательный переход к режиму фиксированных напряжений на участках; во второй к  $U_{\text{ниж}}$ , в четвертой к  $U_{\text{ном}}$ . Режим пятой зоны  $P_{21} \geq P_{21\text{верх}}^{23}$  аналогичен режиму первой зоны за тем исключением, что напряжения поддерживаются на высшем допустимом уровне. В третьей зоне  $P_{21}^{30} \leq P_{21} \leq P_{21}^{10}$  ведется режим согласованного регулирования напряжения.

В зоне согласованного регулирования напряжения реактивные мощности  $Q_{21m}$  и  $Q_{23m}$  должны регулироваться по следующим законам

$$Q_{21m} = -P_{21} \frac{b_{21m}}{g_{2\eta}}, Q_{23m} = P_{21} \frac{b_{23m}}{g_{2\eta}}, \quad (19)$$

а напряжение  $U_2$  согласно уравнению (6).

Нетрудно показать, что аналогичным закономерностям подчиняются режимные параметры передающего и приемного концов электропередачи:

$$U_{1\eta} = \sqrt{\frac{P_{12}}{g_{1\eta}}}, \quad U_{3\eta} = \sqrt{\frac{P_{32}}{g_{3\eta}}}, \quad (20)$$

$$Q_{12m} = U_{1\eta}^2 b_{12m} = P_{12} \frac{b_{12m}}{g_{1\eta}}, \quad Q_{23m} = -U_{3\eta}^2 b_{32m} = -P_{32} \frac{b_{32m}}{g_{3\eta}}, \quad (21)$$

где

$$b_{12m} = \frac{I_m(\dot{A}_1 \dot{C}_1) + I_m(\dot{B}_1 \dot{D}_1)(g_{2\eta}^2 + b_{21m}^2) + I_m(\dot{B}_1 \dot{C}_1)g_{2\eta} + \text{Re}(\dot{B}_1 \dot{C}_1 - \dot{A}_1 \dot{D}_1)b_{21m}}{K_{\eta}^2 U_{12}}$$

$$b_{32m} = \{I_m(\dot{D}_2 \dot{C}_2) + I_m(\dot{B}_2 \dot{A}_2)[(g_{2\eta} + 2K_n b_{23m})^2 + b_{23m}^2] - I_m(\dot{B}_2 \dot{C}_2)(g_{2\eta} + 2K_n b_{23m}) + \text{Re}(\dot{B}_2 \dot{C}_2 - \dot{D}_2 \dot{A}_2)b_{23m}\} K_{\eta}^2 U_{23}.$$

$$g_{1\eta} = [\text{Re}(\dot{A}_1 \dot{C}_1) + \text{Re}(\dot{B}_1 \dot{D}_1)(g_{2\eta}^2 + b_{21m}^2) - I_m(\dot{B}_1 \dot{C}_1)b_{21m} + \text{Re}(\dot{B}_1 \dot{C}_1 + \dot{A}_1 \dot{D}_1)g_{2\eta}] K_{\eta}^{-2} U_{12},$$

$$g_{3\eta} = \{-\text{Re}(\dot{D}_2 \dot{C}_2 - \text{Re}(\dot{B}_2 \dot{A}_2)[(g_{2\eta} + 2K_n b_{23m})^2 + b_{23m}^2] + I_m(\dot{B}_2 \dot{C}_2)b_{23m} + \text{Re}(\dot{B}_2 \dot{C}_2 + \dot{D}_2 \dot{A}_2)(g_{2\eta} + 2K_n b_{23m})\} K_{\eta}^2 U_{23},$$

Закономерности регулирования мощностей реакторов определяются суммой стоков реактивных мощностей соответствующих концов участков. При неизменных значениях углов сдвига фаз ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) проводимости 1, 2, 3 реакторов в режиме  $\eta_{\max}$  остаются неизменными и их мощность в этом случае регулируется автоматически за счет изменения общего уровня напряжения, прикладываемого к ним.

Характерной особенностью режима согласованного регулирования является то, что закономерности изменения реактивных мощностей концов участков и реакторов являются линейными функциями соответствующих значений активных мощностей (или одной и той же мощности любого конца); активные мощности вдоль всей электропередачи связаны между собой также линейной зависимостью, что предопределяет линейный характер потерь.

На основании формул (6), (20) можно установить простую взаимосвязь между параметрами в режиме максимального к. п. д.

$$\frac{U_{1\eta}}{U_{2\eta}} = \sqrt{\frac{g_{2\eta}}{g_{1\eta} \eta_{12\max}}}, \quad \frac{U_{2\eta}}{U_{3\eta}} = \sqrt{\frac{g_{3\eta}}{g_{2\eta} \eta_{23\max}}}. \quad (22)$$

Для электропередачи с несколькими сбалансированными ПС в режиме согласованного регулирования напряжения процесс передачи энергии состоит из ряда полностью подобных процессов передачи по отдельным участкам, так что при равных условиях на равных участках перепады будут иметь одну и ту же величину:

$$K_{\eta u} = \frac{U_{n1}}{U_{k1}} = \frac{U_{n2}}{U_{k2}} = \dots = \frac{U_{nn}}{U_{kn}} = \sqrt{\frac{g_k}{g_n \eta_{\max}}}. \quad (23)$$

К. п. д. в зоне согласованного регулирования определяется только постоянными участками и коэффициентом потерь КУ и, следовательно, остается неизменным.

Коронирование проводов можно приближенно учитывать при расчетах режимов в виде погонной активной проводимости  $g_{ок}$ , равномерно распределенной вдоль линии или ее отдельного участка и зависящей от условий погоды и среднего напряжения. Для протяженной электропередачи погонную проводимость для различных участков можно учитывать дифференцированно. Порядок расчетов и приведенные выражения при проявлении короны не изменяются. Однако обобщенные постоянные, входящие в расчетные выражения, будут зависеть от величины проводимости короны, а значит и от распределения напряжений. Поэтому расчет приходится вести последовательными приближениями.

Во второй и четвертой зонах с учетом наложенных ограничений на напряжение осуществляются режимы отличные от оптимального, но с минимальными отклонениями от него.

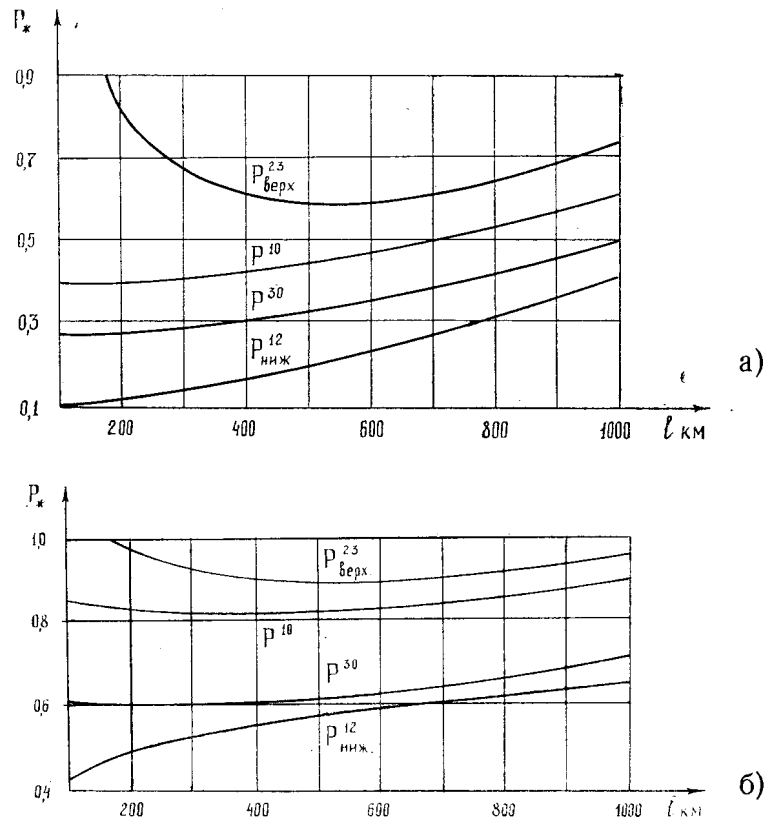


Рис. 2. а) зоны перехода для ЛЭП—500 кВ, б) — для ЛЭП—1000 кВ

По приведенным выше выражениям рассчитывались зоны перехода для разного класса напряжений в функции длины электропередачи при 15% диапазоне регулирования напряжения ( $\Delta U_{рег} = U_{ном} - 0,85 \cdot U_{ном}$ ) применительно к схеме рис. 1 при  $[A_1] = [A_2]$ .

На рис. 2, а приведены результаты расчетов для ЛЭП-500 кВ с проводами 3хАСО — 500 ( $P_{нат} = 900$  мвт) при коэффициенте потерь  $K_{п} = 0,01$ , на рис. 2, б — для ЛЭП-1000 кВ с маркой провода 4хАСО — 1000 ( $P_{нат} = 3920$  мвт) и  $K_{п} = 0,005$  при отсутствии коронирования.

Таблица 2

$U_H$ кв		500				
$l_{уч. км}$	300	500			750	
$P_{21}$ , от. ед.	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$
0,111	$\frac{4,6}{6,4}$	$\frac{1,8}{39\%}$	$\frac{9,8}{12,8}$	$\frac{3,0}{31\%}$	$\frac{19,2}{24,4}$	$\frac{5,2}{27\%}$
0,333	$\frac{9,4}{10,6}$	$\frac{1,2}{12,8\%}$	$\frac{17,5}{19,2}$	$\frac{1,7}{9,7\%}$	$\frac{28,4}{32,4}$	$\frac{4,0}{14\%}$
0,555	$\frac{16,8}{17,4}$	$\frac{0,6}{3,6\%}$	$\frac{30}{30,6}$	$\frac{0,6}{2\%}$	$\frac{47}{48}$	$\frac{1,0}{2,1\%}$
0,777	27,7	—	48,4	—	72,0	—
0,999	42,6	—	74	—	115	—

Примечания: 1.  $\Delta P_{1\Sigma}$  (мвт) — соответствует оптимальным режимам, 2.  $\Delta P_{2\Sigma}$  (мвт) — соответствует  $U_1=U_2=U_3=U_{ном} = const$  3.  $(\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}) \% =$

$$= \frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{1\Sigma}} 100 \%$$

Таблица 3

$U_H$ кв		1000				
$l_{уч. км}$	500	750			1000	
$P_{21}$ , от. ед.	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$	$\frac{\Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{2\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\%}$
0,127	$\frac{51,5}{65,7}$	$\frac{14}{27\%}$	$\frac{94,5}{129,5}$	$\frac{35,0}{37\%}$	$\frac{147,7}{202}$	$\frac{54,3}{36,8\%}$
0,255	$\frac{58}{71,7}$	$\frac{13,7}{23,6\%}$	$\frac{102}{135}$	$\frac{33}{32,4\%}$	$\frac{155}{208}$	$\frac{53}{34,2\%}$
0,382	$\frac{67,7}{80,5}$	$\frac{12,8}{19\%}$	$\frac{115}{144,3}$	$\frac{29,3}{25,6\%}$	$\frac{168}{219}$	$\frac{51}{30,4\%}$
0,510	$\frac{82}{90,6}$	$\frac{8,6}{10,5\%}$	$\frac{134,5}{157,5}$	$\frac{23}{17,1\%}$	$\frac{188,5}{233}$	$\frac{44,5}{23,6\%}$
0,634	$\frac{101}{105}$	$\frac{4}{4\%}$	$\frac{161,5}{174,5}$	$\frac{13,2}{8,2\%}$	$\frac{219}{251}$	$\frac{32}{14,6\%}$
0,765	$\frac{121}{122,4}$	$\frac{1,4}{1,2\%}$	$\frac{194,0}{197}$	$\frac{3}{1,55\%}$	$\frac{260,7}{274}$	$\frac{13,3}{5,1\%}$
0,893	142	—	296,6	—	$\frac{305}{306}$	$\frac{1}{0,33\%}$
1,02	167	—	264	—	356,5	—

Примечания: 1.  $\Delta P_{1\Sigma}$  (мвт) — соответствует оптимальным режимам, 2.  $\Delta P_{2\Sigma}$  (мвт) — соответствует  $U_1=U_2=U_3=U_{ном.} = const$ , 3.  $(\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}) \% =$

$$= \frac{\Delta P_{2\Sigma} - \Delta P_{1\Sigma}}{\Delta P_{1\Sigma}} 100 \%$$



Общий диапазон колебания нагрузки ( $\Delta P_{21} = P_{21\text{верх}}^{23} - P_{21\text{ниж}}^{12}$ , 2—4 зоны), при которой возможно оптимальное или частично оптимальное регулирование напряжения по мере увеличения длины электропередачи, плавно сужается от  $0,78 P_{\text{нат}}$  для ЛЭП-500 кВ и  $0,475 P_{\text{нат}}$  для ЛЭП — 1000 кВ при  $l_{\text{уч}} = 200$  км до  $0,315 P_{\text{нат}}$  для обеих электропередач при  $l_{\text{уч}} = 1000$  км. Хотя суммарный диапазон 2—4 зон по мере увеличения длины участков сужается, общий уровень мощности при этом возрастает. Значительное влияние на уровень расположения зон оказывает коэффициент потерь  $K_{\text{п}}$ , и при его увеличении зоны перемещаются в области больших нагрузок. Так, при  $K_{\text{п}} = 0,01$  предельная нагрузка для ЛЭП — 1000 кВ составляет  $1—1,15 P_{\text{нат}}$ . Наличие потерь на корону значительно сдвигает границы зон в область больших нагрузок.

В таблицах 2, 3 приведены результаты расчета суммарных потерь при различных значениях транзита мощности для двух случаев: 1 — соответствует режиму согласованного регулирования напряжений с учетом ограничений  $1—0,85 U_{\text{ном}}$ ; 2 — когда во всех режимах  $U_1 = U_2 = U_3 = U_{\text{ном}} = \text{const}$ . Параметры схемы приняты теми же, что и в случае расчета зон перехода. Как следует из расчетов, по мере снижения нагрузки разность в потерях для первого и второго случаев возрастает и в общем составляет значительную величину.

### В ы в о д ы

Учитывая, что рабочая нагрузка современных передач 500 кВ составляет порядка  $P_{\text{нат}}$ , согласованное регулирование напряжения для ЛЭП-500 кВ и в особенности 750—1000 кВ вполне реально и имеет практический смысл.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Веников, И. П. Сиуда. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. М., «Высшая школа», 1966.
2. Д. В. Холмский. Регулирование напряжения дальних электропередач с помощью регулируемых трансформаторов. Изв. вузов, «Энергетика», 1959, № 7.