ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 244 1972

УСЛОВИЯ МАКСИМАЛЬНОГО К. П. Д. ДАЛЬНИХ ЛЭП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

В. И. ГОТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Наиболее общими для ДЛЭП с промежуточными системами (ПС) следует считать режимы, при которых значения потоков активной мощности на участках линии неодинаковы. При этом закономерности изменения этих значений в общем случае могут быть самыми произвольными. Правильное в экономическом отношении регулирование реактивных мощностей и напряжений участков при несбалансированных ПС может мыслиться лишь как связанное регулирование всех участков линии по условию минимума суммарных потерь по передаче.

За основу при исследовании возьмем электропередачу, рассмотренную в [1] при тех же обозначениях. В качестве независимых переменных примем P_{21}, P_{23}, Q_{21}, Q_{23}, U_2, $\operatorname{tg}\varphi_1$, $\operatorname{tg}\varphi_2$. Суммируя потери в отдельных элементах после незначительных преобразований, получаем выражение

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{1р} + \Delta P_{л12} + \Delta P_{2р} + \Delta P_{л23} + P_{3р} =$$
$$= \frac{1}{\gamma_1}\operatorname{Re}G_1 - \frac{K_п}{\gamma^1} J_m G_1 + \frac{1}{\gamma_2}\operatorname{Re}G_2 - \frac{K_п}{\gamma_2} J_m G_2 + P_{23} - P_{21} + K_п(Q_{21} - Q_{23}), \quad (1)$$

где

$$G_1 = \dot{A}_1\hat{C}_1U_2^2 + \dot{B}_1\hat{D}_1\frac{P_{21}^2+Q_{21}^2}{U_2^2} + (\dot{A}_1\hat{D}_1 + \dot{B}_1\hat{C}_1)P_{21} + j(\dot{A}_1\hat{D}_1 - \dot{B}_1\hat{C}_1)Q_{21},$$

$$G_2 = \dot{D}_2\hat{C}_2U_2^2 + \dot{B}_2\hat{A}_2\frac{P_{23}^2+Q_{23}^2}{U_2^2} - (\hat{A}_2\dot{D}_2 + \dot{B}_2\hat{C}_2)P_{22} - j(\dot{D}_2\hat{A}_2 - \dot{B}_2\hat{C}_2)Q_{23},$$

$\gamma_1 = 1 - K_п\operatorname{tg}\varphi_1$, $\gamma_2 = 1 - K_п\operatorname{tg}\varphi_2$, $K_п = \operatorname{tg}\psi_{ky}$ — тангенс угла потерь компенсирующих устройств.

Значения реактивных мощностей Q_{21m} и Q_{23m}, обеспечивающие оптимальные перепады соответственно на участках 1—2, 2—3 при заданных величинах P_{21}, P_{23}, $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$ и фиксированном напряжении U_2 определятся из условий:

$$\frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial Q_{21}} = 0, \qquad \frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial Q_{23}} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (2) независимы и имеют решения

$$Q_{21m} = -U_2^2 в_{21m}, \quad Q_{23m} = U_2^2 в_{23m}, \quad (3)$$

где

$$в_{21m} = \frac{J_m(\dot{B}_1\hat{C}_1) + K_п Re(\dot{B}_1\hat{C}_1) - K_п \hat{A}_1^2 + K_п\gamma_1}{2[Re(\dot{B}_1\hat{D}_1) - K_п J_m(\dot{B}_1\hat{D}_1)]}, \tag{4}$$

$$в_{23m} = \frac{J_m(\dot{B}_2\hat{C}_2) + K_п Re(\dot{B}_2\hat{C}_2) - K_п \hat{A}_2^2 + K_п\gamma_2}{2[Re(\dot{B}_2\hat{A}_2) - K_п J_m(\dot{B}_2\hat{A}_2)]}. \tag{5}$$

Подставляя найденные закономерности Q_{21m} и Q_{23m} в выражение суммарных потерь и дифференцируя его по U_2, получим уравнение $d\Delta P_\Sigma / dU_2 = 0$, которому удовлетворяет решение

$$U_2\eta = \sqrt[4]{\frac{P_{21}^2 g_{23э}^2 + P_{23}^2 g_{21э}^2}{2g_{21э}^2\, g_{23э}^2}}, \tag{6}$$

где

$$g_{21э} = \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2M_1} - 0{,}5\left(в_{21m}^2 + \frac{M_2}{M_1}в_{23m}^2\right)},$$

$$g_{23э} = \sqrt{\frac{H_1 + H_2}{2M_2} - 0{,}5\left(\frac{M_1}{M_2}в_{21m}^2 + в_{23m}^2\right)}, \tag{7}$$

$$H_1 = Re(\dot{A}_1\hat{C}_1) - K_п J_m(\dot{A}_1\hat{C}_1),\ H_2 = Re(\dot{D}_2\hat{C}_2) - K_п J_m(\dot{D}_2\hat{C}_2),$$

$$M_1 = Re(\dot{B}_1\hat{D}_1) - K_п J_m(\dot{B}_1\hat{D}_1),\ M_2 = Re(\dot{B}_2\hat{A}_2) - K_п J_m(\dot{B}_2\hat{A}_2).$$

При заданных значениях $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$, P_{21}, P_{23} закономерности Q_{21m} Q_{23m} и $U_{2\eta}$ соответствуют условиям максимального к. п. д. всей электропередачи ($\eta_{\Sigma max}$); при этом в общем случае максимальные значения к. п. д. участков (η_{1max}, η_{2max}) наступают неодновременно и для каждой пары сочетаний P_{21} и P_{23} различны.

Если полагать, что значения φ_1 и φ_2 не ограничены условиями режима и имеют степень свободы, то за счет рационального выбора законов регулирования φ_1 и φ_2 можно добиться дополнительного снижения потерь. Для нахождения законов оптимального регулирования углов сдвига фаз не требуется громоздких исследований на минимум суммарных потерь, а вытекает непосредственно из условий равенства нулю потерь в первом и третьем реакторах, т. е.

$$\Delta P_{1р} = 0, \quad \Delta P_{3р} = 0 \tag{8}$$

и следовательно,

$$\varphi_{1опт} = \mathrm{arctg}\,\frac{Q_{12}}{P_{12}}. \qquad \varphi_{2опт} = \mathrm{arctg}\,\frac{Q_{32}}{P_{32}}. \tag{9}$$

Смысл этих закономерностей прост: реактивная мощность генераторов по величине и направлению должна регулироваться так, чтобы полностью соответствовала реактивной мощности передающего конца первого участка, т. е. $Q_{01} = Q_{12}$; первый реактор в этом случае находится в режиме х. х. и может быть отключен. Условие $\varphi_{2опт}$ будет выполняться в том случае, когда реактивная мощность Q_{32} будет полностью поглощаться приемной системой. Для нагрузок меньше натуральной в режиме максимального к. п. д. $\cos\varphi_{2опт}$ — отстающий, и в приемную систему вместе с активной мощностью поступает и реактивная. Реактивная мощность Q_{12} в этих режимах является емкостной и для обеспечения $\varphi_{1опт}$, генераторы передающей станции должны работать в режиме недовозбуждения. Осуществление таких режимов позволяет в ряде случаев не только снизить потери, но и уменьшить установленную мощность КУ в электропередаче. Ограничения режима недовозбуждения для синхронных генераторов могут возникнуть по условиям самовозбуждения, а при значительных нагрузках дополнительно по условию обеспечения статической устойчивости. В настоящее время в стадии исследования и разработок находятся так называемые синхронно-асинхронные генераторы [2], для которых режимы с опережающим $\cos\varphi$ наряду с отстающим являются рабочими. Применение подобных генераторов для работы в сочетании с высоковольтными линиями позволит в полной мере реализовать преимущества оптимального регулирования угла сдвига фаз на передающем конце.

Анализируя функцию суммарных потерь (1) для случая, когда осуществляется оптимальное регулирование углов сдвига фаз на отправном и приемном концах электропередачи согласно уравнению (9), получаем закономерности изменения Q_{21m}, Q_{23m} и $U_{2\eta}$ совершенно аналогичные прежним (3), (6), в которых реактивные и эквивалентные активные проводимости участков имеют следующий вид:

$$b_{21m} = \frac{J_m(\dot{B}_1\hat{C}_1) + K_п}{2\,\mathrm{Re}(\dot{B}_1\hat{D}_1)}, \qquad b_{23m} = \frac{J_m(\dot{B}_2\hat{C}_2) + K_п}{2\,\mathrm{Re}(\dot{B}_2\hat{A}_2)}, \tag{10}$$

$$g_{21э} = \sqrt{\frac{\mathrm{Re}(\dot{A}_1\hat{C}_1) + \mathrm{Re}(\dot{D}_2\hat{C}_2)}{2\mathrm{Re}(\dot{B}_1\hat{D}_1)} - 0{,}5\left(b_{21m}^2 + \frac{\mathrm{Re}(\dot{B}_2\hat{A}_2)}{\mathrm{Re}(\dot{B}_1\hat{D}_1)}\,b_{23m}^2\right)}, \tag{11}$$

$$g_{23э} = \sqrt{\frac{\mathrm{Re}(\dot{A}_1\hat{C}_1) + \mathrm{Re}(\dot{D}_2\hat{C}_2)}{2\mathrm{Re}(\dot{B}_2\hat{A}_2)} - 0{,}5\left(\frac{\mathrm{Re}(\dot{B}_1\hat{D}_1)}{\mathrm{Re}(\dot{B}_2\hat{A}_2)}\,b_{21m}^2 + b_{23m}^2\right)}. \tag{12}$$

Поскольку общий вид выражений (3), (6) не зависит от условий работы реакторов 1 и 3, то полученные ниже уравнения в равной мере справедливы как при оптимальном регулировании углов φ_1, φ_2, так и при условии их ограничения.

Перепады напряжений на первом и втором участках в режиме согласованного регулирования определяются выражениями:

$$K_{\eta U_{12}} = \frac{U_{1\eta}}{U_{2\eta}} = B_1\sqrt{\left[b_{21m} + \frac{J_m(\dot{A}_1\hat{B}_1)}{B_1^2}\right]^2 + \left[\frac{\sqrt{2}g_{21э}g_{23э}}{g_{23э}^2 + K_P^2 g_{21э}^2} + \frac{\mathrm{Re}(\dot{A}_1\hat{B}_1)}{B_1^2}\right]^2}, \tag{13}$$

$$K_{\eta U_{23}} = \frac{U_{2\eta}}{U_{3\eta}} = \frac{1}{B_2\sqrt{\left[b_{23m} + \frac{J_m(\dot{D}_2\hat{B}_2)}{B_2^2}\right]^2 + \left[\frac{\sqrt{2}g_{21э}g_{23э}K_P}{g_{23э}^2 + K_P^2 g_{21э}^2} - \frac{\mathrm{Re}(\dot{D}_2\hat{B}_2)}{B_2^2}\right]^2}}, \tag{14}$$

где

$$K_P = P_{23}/P_{21}. \tag{15}$$

Перепады напряжений на участках в зоне согласованного регулирования зависят от соотношения активных мощностей участков (K_P) и, следовательно, в общем случае являются переменными. В отличие от случая сбалансированной ПС, когда оптимальные перепады были всегда положительны, здесь наряду с положительными перепадами при $P_{21} \geqslant P_{23}$ возможны и отрицательные ($K_U < 1$) при условии $P_{21} < P_{23}$, т. е. только в том случае, если ПС работает в режиме выдачи активной мощности.

Чтобы в правильной последовательности вводить ограничения напряжений в контролируемых узлах, необходимо знать распределение напряжений на участках. Поскольку при заданных длинах участков и значении $K_п$ оптимальные перепады зависят только от K_P, то в качестве основы для суждения о распределении напряжения на участках могут служить величины K_P, соответствующие равенству напряжений по концам участков. Они определяются из уравнений (13), (14) при условии $K_{\eta U_{12}} = 1$ и $K_{\eta U_{23}} = 1$:

$$K_{12P} = g_{23э}\sqrt{4n_1\left(n_1 - \sqrt{n_1^2 - \frac{1}{m_1}}\right) - \frac{2}{m_1} - \frac{1}{g_{21э}^2}}, \qquad (16)$$

$$K_{23P} = \left[g_{21э}\sqrt{4n_2\left(n_2 + \sqrt{n_2^2 - \frac{1}{m_2}}\right) - \frac{2}{m_2} - \frac{1}{g_{23э}^2}}\right]^{-1}, \qquad (17)$$

где

$$n_1 = \frac{\mathrm{Re}(\dot{A}_1\hat{B}_1)}{B_1^2 m_1}, \quad m_1 = \left[в_{21m} + \frac{\mathrm{Jm}(\dot{A}_1\hat{B}_1)}{B_1^2}\right]^2 + \left[\frac{\mathrm{Re}(\dot{A}_1\hat{B}_1)}{B_1^2}\right]^2 - \frac{1}{B_1^2},$$

$$n_2 = \frac{\mathrm{Re}(\dot{D}_2\hat{B}_2)}{B_2^2 m_2}, m_2 = \left[в_{23m} + \frac{\mathrm{Jm}(\dot{D}_2\hat{B}_2)}{B_2^2}\right]^2 + \left[\frac{\mathrm{Re}(\dot{D}_2\hat{B}_2)}{B_2^2}\right]^2 - \frac{1}{B_2^2}.$$

Сравнивая действительное значение $K_P = P_{23}/P_{21}$ с расчетными K_{12P} и K_{23P} соответственно для первого и второго участков, можно судить о действительной картине распределения напряжений в электропередаче. Значениям $K_P < K_{12P}$, K_{23P} соответствуют положительные перепады напряжений на участках ($K_{U_{12}} > 1$, $K_{U_{23}} > 1$) и в противном случае $K_p > K_{12p}$, K_{23p} — отрицательные ($K_{U_{12}}$, $K_{U_{23}} < 1$).

Величины K_{12P} и K_{23P} изменяются в достаточно широком диапазоне от 1 до ∞. Для реальных длин участков они всегда больше единицы и по мере возрастания длины уменьшаются. Численные значения K_{12P} и K_{23P} в функции длин участков и напряжения электропередачи при $\cos\varphi_1 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0{,}92$ помещены в табл. 1.

Анализируя результаты расчетов, замечаем, что для любого сочетания длин участков всегда имеет место неравенство $K_{23P} > K_{12P}$. По мере возрастания длин участков эта разница сокращается. Для ДЛЭП с несбалансированной ПС могут иметь место три характерных сочетания перепадов напряжения на участках:

1. $K_P < K_{12P}$, K_{23P} — на обоих участках положительный перепад, который возрастает с уменьшением K_P; 2. $K_{12P} < K_P < K_{23P}$ — в этом случае на первом участке отрицательный перепад, на втором — положительный, большую вероятность такого сочетания имеют ЛЭП с относительно короткими равными участками и в случае неравных участков при $l_{12} < l_{23}$; 3. И, наконец, при $K_P > K_{12P}$, K_{23P} на обоих участках отрицательный перепад, возрастающий по мере усиления неравенства. Отрицательный перепад может быть более характерным для ЛЭП с относительно протяженными равными участками и в случае неравных участков при $l_{12} > l_{23}$.

В зависимости от величины K_P, т. е. характера оптимальных перепадов на участках, находится порядок последовательного ограничения напряжений.

При положительных перепадах на обоих участках на верхнем предельном уровне вначале фиксируется напряжение U_1, затем U_2 и в последнюю очередь U_3. Порядок ограничения напряжений на нижнем уровне при тех же условиях обратный: U_3, U_2, U_1. При отрицательных перепадах на участках первым верхнего предела достигает напряжение приемного конца, в последующем этого уровня достигают U_2 и U_1. Оче-

Таблица 1

Значения $\kappa_{12р}$ и $\kappa_{23р}$, соответствующие $\kappa_{\eta U_{12}}$, $\kappa_{\eta U_{23}}=1$ в режиме $\eta_{\Sigma max}$

$U_{н}$, кв	500								1000							
$\kappa_{П}$, от. ед.	0,01								0,005							
$l_{ЛЭП}$, км	400		1500		1050		1050		400		1500		1050		1050	
$l_{уч.}$ км	200	200	750	750	750	300	300	750	200	200	750	750	750	300	300	750
$N_{уч.}$	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3	1—2	2—3
$\kappa_{р}$	2,85	∞	1,44	1,47	1,42	1,81	2,71	∞	1,33	1,47	1,09	1,10	1,09	1,10	1,22	1,28

редность фиксации напряжений по концам участков на нижнем уровне обратная: U_1, U_2, U_3. При одинаковом характере перепадов на всех участках очередность ограничения напряжений находится в строгом соответствии с порядком следования узлов ДЛЭП, т. е. либо от начала электропередачи к ее концу, либо от конца к началу независимо от количества участков. Эта строгая последовательность нарушается для случая, когда на первом участке отрицательный перепад на втором — положительный. Первым верхнего предела достигает напряжение U_2, в последующем до этого уровня поднимаются напряжения U_1 и U_3. На нижнем уровне в первую очередь фиксируются U_1 и U_3 и в последнюю — U_2.

Выше выявлены условия, обеспечивающие максимальный к. п. д. всей электропередачи при произвольных закономерностях P_{21} и P_{23}, считая, что их значения для любого момента являются величинами известными и заданными. При этом максимальный к. п. д. не зависит от абсолютных значений потоков мощностей участков, а определяется только их соотношением, постоянными участков и коэффициентом потерь КУ.

Оптимальное соотношение, при котором максимальный к. п. д. достигает своего наибольшего значения определяется уравнением

$$\frac{d\eta_{\Sigma\max}}{dK_P}=0, \tag{18}$$

которое имеет решение

$$K_{P\,опт.}=\frac{g_{23э}}{g_{21э}g_{21\eta}}\sqrt{2g^2_{21э}-g^2_{21\eta}}\,. \tag{19}$$

Учитывая уравнение связи между проводимостями участков

$$g^2_{21\eta}g^2_{23э}+g^2_{23\eta}g^2_{21э}=2g^2_{21э}g^2_{21э}\,, \tag{20}$$

оптимальная величина K_P может быть представлена в ином виде

$$K_{P\,опт.}=\frac{g_{23э}g_{23\eta}}{g_{21э}\sqrt{2g^2_{23э}-g^2_{23\eta}}}\,, \tag{21}$$

где

$$g_{21\eta}=\sqrt{\frac{H_1}{M_1}-в^2_{21m}}\,,\quad g_{23\eta}=\sqrt{\frac{H_1}{M_1}-в^2_{23m}}. \tag{22}$$

Уравнение (6) с учетом соотношения (15) может быть представлено в следующих видах

$$U_{2\eta}=\sqrt[4]{\frac{P^2_{21}(g^2_{23э}+K^2_P g^2_{21э})}{2g^2_{21э}g^2_{23э}}}\quad\text{или}\quad U_{2\eta}=\sqrt[4]{\frac{P^2_{23}(g^2_{23э}+K^2_P g^2_{21э})}{2g^2_{21э}g^2_{23э}K^2_P}}. \tag{23}$$

Подставляя $K_{P\,опт}$ из (19) в первую форму записи $U_{2\eta}$, а $K_{P\,опт}$ из (21) во вторую форму записи $U_{2\eta}$, согласно (23) имеем

$$U_{2\eta}=\sqrt{\frac{P_{21}}{g_{21\eta}}}\,,\quad U_{2\eta}=\sqrt{\frac{P_{23}}{g_{23\eta}}}\,. \tag{24}$$

Откуда получаем наиболее простую и наглядную форму записи оптимального соотношения мощностей участков

$$K_{P\,опт}=\frac{g_{23\eta}}{g_{21\eta}}=\frac{P_{23}}{P_{21}}\,. \tag{25}$$

Для электропередачи с несколькими ПС наибольшее значение суммарного максимального к. п. д. имеет место при условии

$$\frac{P_{1к}}{P_{2н}}=\frac{g_{1\eta}}{g_{2\eta}}\,,\ \frac{P_{2к}}{P_{3н}}=\frac{g_{2\eta}}{g_{3\eta}}\,,\ \ldots\ldots\ \frac{P_{(n-1)к}}{P_{пн}}=\frac{g_{(n-1)\eta}}{g_{n\eta}}\,. \tag{26}$$

К. п. д. участков при этих условиях также достигает своих максимальных значений. Из соотношений (26) следует, что потоки мощности участков должны быть пропорциональны их проводимостям, т. е. протяженные участки должны быть более нагруженными, нежели короткие.

Таким образом, наименьшие потери при наличии неравных участков имеют место при несбалансированных ПС, и, следовательно, при равных участках — для случая самосбалансированных ПС.

Отметим, что при соблюдении условий (26) независимо от соотношения длин участков в режиме согласованного регулирования напряжений всегда имеют место только положительные перепады.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. И. Готман, И. А. Безлер.* Регулирование напряжения и реактивных мощностей компенсированных ДЛЭП с промежуточными системами в режиме их самобаланса. «Изв. ТПИ». Настоящий сборник.

2. *В. А. Веников.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. «Высшая школа», М., 1970.