

## ВЛИЯНИЕ ЛЭП НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Засл. деят. науки и техники РБ, докт. техн. наук,  
проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

*Белорусский национальный технический университет*

Ранее [1] было охарактеризовано взаимодействие генераторов электрических станций с линиями электропередачи и приемниками электрической энергии. В данной статье поставлена задача рассмотрения влияния линии электропередачи на режимы работы и статическую устойчивость генераторов электрических станций.

В учебниках по устойчивости электрических систем [2–4] при рассмотрении характеристик мощности системы передачи обычно не учитываются емкости линии, а статически устойчиво передаваемая мощность для системы передачи (рис. 1) представляется формулой

$$P = \frac{EU_2}{x_c} \sin \Theta, \quad (1)$$

где  $x_c$  – реактивное сопротивление всей системы передачи, получается путем суммирования индуктивных сопротивлений ее элементов;  $\Theta$  – угол сдвига вектора ЭДС  $E$  относительно напряжения  $U_2$ .

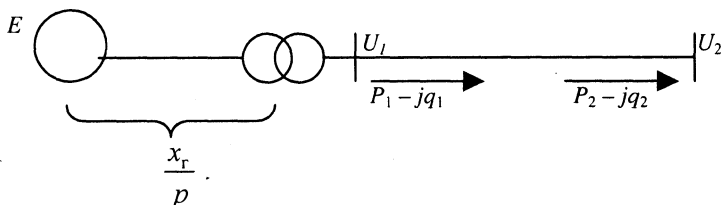


Рис. 1. Система передачи

В условиях, когда появились линии передачи напряжением 330, 500, 750 и 1150 кВ, вследствие существенного влияния емкости линии на работу систем электропередачи указанный подход может привести к искажению действительной картины.

Для учета емкостного эффекта линии необходимо воспользоваться уравнениями линии без потерь:

$$\underline{U}_1 = U_2 \cos \alpha l + jI_2 z_b \sin \alpha l;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \alpha l + j \frac{U_2}{z_b} \sin \alpha l,$$

и соответственно для системы передачи

$$\underline{E} = \underline{U}_1 + jI_1x_r$$

или

$$\underline{E} = \underline{U}_2 \left( \cos \alpha l - \frac{x_r}{z_b} \sin \alpha l \right) + jI_2 (x_r \cos \alpha l + z_b \sin \alpha l). \quad (2)$$

Отсюда, согласно [5], следует выражение

$$P = \frac{EU_2}{x_r \cos \alpha l + z_b \sin \alpha l} \sin \Theta. \quad (3)$$

При малых расстояниях (3) трансформируется в (1).

Для системы передачи, работающей на линию, волновая длина которой составляет четверть длины волны ( $\alpha l = 90^\circ$ ), получим

$$P = \frac{EU_2}{z_b} \sin \Theta, \quad (4)$$

и ЭДС  $E$  будет

$$\underline{E} = -\underline{U}_2 \frac{x_r}{z_b} + jI_2 z_b = U_2 \left( -\frac{x_r}{z_b} + j \right). \quad (5)$$

При  $\frac{x_r}{z_b} = 1$ , что соответствует синхронному сопротивлению и постоянству возбуждения генераторов, найдем

$$\underline{E} = \underline{U}_2 (-1 + j) = \sqrt{2}U_2 \angle 90^\circ + 45^\circ \quad (6)$$

и модуль  $E = \sqrt{2}U$ , угол  $\Theta = 135^\circ$ . Вместо формулы (2) запишем

$$P = \frac{\sqrt{2}U_2^2}{z_b} \sin 135^\circ = \frac{U_2^2}{z_b} = P_{\text{нат}}. \quad (7)$$

Аналогичный результат получим и при других сопротивлениях конечных устройств.

Из выражений (3) и (7) следует, что при работе на линию протяженностью четверть волны параметры конечных устройств не оказывают влияния на пропускную способность системы передачи. При этом, согласно (7), передаваемая мощность равна натуральной мощности.

Перейдем к детальному рассмотрению режимов системы передачи (рис. 1) с линией любой протяженности. Полагаем, что суммарное эквивалентное сопротивление генераторов и трансформаторов  $x_r$  дано в относи-

тельных единицах на базе номинальных параметров генераторов. Тогда частное  $\frac{x_r}{p}$ , где  $p$  – удельная передаваемая мощность, выражает такое же сопротивление в относительных единицах на базе натуральной мощности [5]. Для общности соотношений полагаем, что в начале линии (рис. 2) включен шунтирующий компенсатор. Тогда ЭДС генераторов в относительных единицах на базе натуральной мощности и напряжения линии можно представить в виде

$$\underline{E} = 1 + (p - jq_r) j \frac{x_r}{p}, \quad (8)$$

или

$$\underline{E} = 1 + x_r \operatorname{tg} \varphi_r + jx_r, \quad (8')$$

где

$$q_r = p \operatorname{tg} \varphi_r = q_1 + q_k. \quad (9)$$

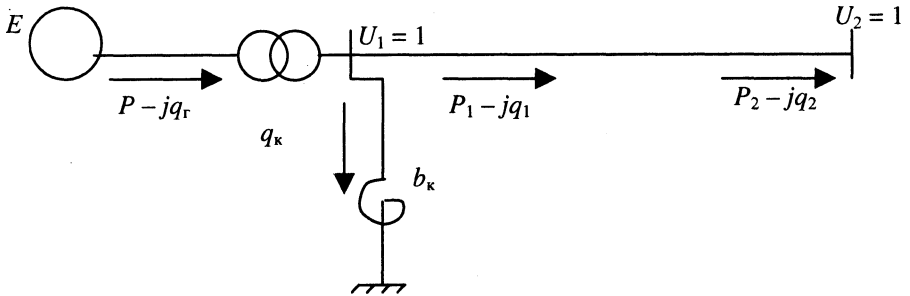


Рис. 2. Система передачи с шунтирующим компенсатором в начале ЛЭП

Из выражения (9) видно, что фактором, ограничивающим параметры шунтирующего компенсатора, принят номинальный коэффициент мощности генераторов  $q_k$  и определяется следующими соотношениями:

$$q_1 = \frac{\cos \alpha l - \frac{U_2}{U_1} \cos \Theta_{12}}{\sin \alpha l};$$

$$q_k = b_k = p \operatorname{tg} \varphi_r - \frac{\cos \alpha l - \frac{U_2}{U_1} \cos \Theta_{12}}{\sin \alpha l};$$

$$p \sin \alpha l = \frac{U_2}{U_1} \sin \Theta_{12}; \quad \cos \Theta_{12} = \sqrt{1 - \frac{U_1^2}{U_2^2} p^2 \sin^2 \Theta_{12}};$$

$$q_k = b_k = p \operatorname{tg} \varphi_r + \frac{\sqrt{\frac{U_2^2}{U_1^2} - p^2 \sin^2 \alpha l}}{\sin \alpha l}, \quad (10)$$

где  $b_k$  – проводимость шунтирующего реактора (компенсатора), в относительных единицах равна его мощности;  $\Theta_{12}$  – угол между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

При работе линии без перепада напряжений ( $U_1 = U_2 = 1$ )

$$q_k = b_k = p \operatorname{tg} \varphi_r + \frac{\sqrt{1 - p^2 \sin^2 \alpha l}}{\sin \alpha l}. \quad (11)$$

Если компенсатор выбирается не по ограничению коэффициента мощности генератора, то ЭДС будет

$$\underline{E} = 1 + \frac{x_r}{p}(q_k + q_1) + jx_r, \quad (12)$$

соответственно модуль и угол:

$$E = \sqrt{1 + \frac{x_r}{p}(q_k + q_1)^2 + x_r^2} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \Theta = \frac{x_r}{1 + \frac{x_r}{p}(q_k + q_1)}. \quad (13)$$

Рассмотрим передачу натуральной мощности:  $p = 1$ ;  $q_1 = q_2 = 0$ . При отсутствии шунтирующего реактора в начале линии  $q_k = 0$  ЭДС, согласно выражению (12):

$$\underline{E} = 1 + jx_r,$$

т. е. не зависит от дальности; при учете генератора синхронным сопротивлением  $x_r = 1$ , что соответствует постоянству возбуждения генераторов, получим

$$\underline{E} = 1 + j1 = \sqrt{2} \angle 45^\circ = 1,41 \angle 45^\circ,$$

а при переходном  $x_r = 0,42$  (соответствует постоянству потокосцепления ротора)

$$\underline{E} = 1 + j0,42 = 1,0846 \angle 228^\circ.$$

Однако устойчивость системы передачи и в этом случае будет зависеть от дальности. Например, при дальности  $l = 1000$  км угол  $\Theta_{12} = \lambda = \alpha l = 60^\circ$  и соответственно для рассматриваемых случаев передачи натуральной мощности получим:

при  $x_r = 1$ ,  $\Theta = 45^\circ + 60^\circ = 105^\circ$  – система неустойчива;

при  $x_r = 0,42$ ,  $\Theta = 22,8^\circ + 60^\circ = 82,8^\circ$  – коэффициент запаса статической устойчивости  $z_c = 0,8 \%$ ;

при  $x_r = 0$  (АРВ сильного действия)  $z_c = 15,6 \%$ .

Эти результаты расчетов, а также аналогичных расчетов запаса статической устойчивости для системы передачи с шунтирующим компенсатором в начале линии (рис. 2) при различных параметрах помещены в табл. 1. Дальность передачи была принята  $l = 1000$  км.

Таблица 1

№	$p$	$x_r$	$\sin\Theta_{12} = p \sin\alpha$	$\Theta_{12}^\circ$	$q_1$	$q_k$	$\underline{E} = U_1 + x_r \operatorname{tg}\varphi_r + jx_r$	$\Theta^\circ$	$z_c \%$
1	1	1	0,866	60	0	0	$1,41 \angle 45^\circ$	105	неуст.
2	1	0,42	0,866	60	0	0	$1,0846 \angle 22,8^\circ$	82,8	0,8
3	1,1	0,42	0,958	74,1	0,261	0,32	$1,274 \angle 19,2^\circ$	93,3	неуст.
4	1,1	0,42	0,958	74,1	0,261	0,577	$1,36 \angle 18^\circ$	92,1	неуст.
5	1	1	0,866	60	0	0,483	$1,789 \angle 34^\circ$	94,0	неуст.
6	1	0,42	0,866	60	0	0,483	$1,274 \angle 19,3^\circ$	79,3	1,73
7	1	0	0,866	60	0	0,483	$U_1 = 1 \angle 0^\circ$	60	15,6
8	0,7	1	0,606	37,3	-0,342	0,68	$1,79 \angle 34^\circ$	76,3	5,6
9	0,7	0,42	0,606	37,3	-0,342	0,68	$1,274 \angle 19,2^\circ$	56,4	19,9

Во всех случаях, кроме № 4, мощность компенсирующего устройства выбиралась по  $\cos\varphi_r = 0,9$ . Для № 4 проводимость шунтирующего компенсатора принималась равной емкостной проводимости в П-образной схеме замещения линии  $b_k = q_k = \operatorname{tg}\lambda/2$ .

Если шунтирующий компенсатор выбирается по  $\cos\varphi_r$ , то расчет ведется по (8) и (9), в противном случае – по (12).

Обзор результатов расчета (табл. 1) показывает, что только при передаче  $p = 0,7$  на заданное расстояние  $l = 1000$  км при автоматическом регуляторе возбуждения генераторов принципиального действия имеется достаточный запас статической устойчивости  $z_c = 19,9 \%$ .

В табл. 2 даны результаты расчетов коэффициентов запаса статической устойчивости для системы передачи дальностью  $l = 500$  км и для значений передаваемой мощности  $p = 0,8; 1; 1,5$ .

Таблица 2

№	$p$	$x_r$	$\sin\Theta_{12} = p \sin\alpha$	$\Theta_{12}^\circ$	$q_1$	$q_k$	$\underline{E} = U_1 + x_r \operatorname{tg}\varphi_r + jx_r$	$\Theta^\circ$	$z_c \%$
1	0,8	1	0,4	23,6	-0,1	0,583	$1,79 \angle 34^\circ$	57,6	18,5
2	0,8	0,42	0,4	23,6	-0,1	0,583	$1,274 \angle 19,2^\circ$	42,8	47,2
3	1	1	0,5	30,0	0	0,483	$1,79 \angle 34^\circ$	64,0	11,26
4	1	0,42	0,5	30,0	0	0,483	$1,274 \angle 19,2^\circ$	49,3	32,2
5	1,5	1	0,75	48,6	0,41	0,073	$1,79 \angle 34^\circ$	82,6	0,83
6	1,5	0,42	0,75	48,6	0,41	0,073	$1,274 \angle 19,2^\circ$	67,8	8,0

Из табл. 2 видно, что трудности передачи возникают при передаваемой мощности более натуральной. В этих случаях шунтирующего компенсатора в начале линии недостаточно, а необходимы еще продольная компенсация или регулируемые источники реактивной мощности (синхронные компенсаторы или тиристорные статические компенсаторы) в промежуточных точках линии. Возможен другой путь – увеличение натуральной мощности линии передачи. Натуральная мощность линии любого класса может быть повышена произвольно сверх некоторой минимальной, определяемой минимальным числом проводов в фазе [6].

Рассмотрим параллельно два варианта системы передачи протяженностью  $l = 500$  км с линией 500 кВ:

А – в обычном исполнении с натуральной мощностью  $P_{\text{нат}} = 900$  МВт;

Б – в компактном исполнении с натуральной мощностью  $P_{\text{нат}} = 2000$  МВт.

Передаваемая мощность в обоих вариантах равна 1000 МВт.

#### Вариант А

#### Вариант Б

1. Удельная передаваемая мощность:

$$P_A = \frac{1000}{900} = 1,11;$$

$$P_B = \frac{1000}{2000} = 0,5.$$

2. Угол между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ :

$$\sin \Theta_{12} = p_A \sin \alpha = 1,11 \cdot 0,5 = 0,555;$$

$$\sin \Theta_{12} = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25;$$

$$\Theta_{12} = 33,4^\circ;$$

$$\Theta_{12} = 14,5^\circ.$$

3. Реактивная мощность в начале линии при  $U_1 = U_2$ :

$$q_1 = \frac{\cos \alpha - \cos \Theta_{12}}{\sin 1} = \frac{0,866 - 0,835}{0,5} = 0,062;$$

$$q_1 = \frac{0,866 - 0,968}{0,5} = -0,204.$$

4. ЭДС генераторов:

$$\underline{E} = U_1 + (p - jq_1)j \frac{x_r}{p} = 1 + x_r \text{tg} \phi_r + jx_r - \text{не зависит от } p - \text{удельной передаваемой мощности, равной, примерно, номинальной мощности генератора.}$$

При  $x_r = 0,42$ , что соответствует АРВ пропорционального действия

$$\underline{E} = 1,274 \angle 19,3^\circ.$$

При  $x_r = 1$ , что соответствует АРВ с зоной нечувствительности

$$\underline{E} = 1,79 \angle 34^\circ.$$

5. Параметры шунтирующего компенсатора:

$$q_k = b_k = p \text{tg} \phi_r - q_1 = 1,11 \cdot 0,486 - 0,062 = 0,477;$$

$$q_k = b_k = 0,5 \cdot 0,483 + 0,204 = 0,446;$$

$$Q_k = 0,477 \cdot 900 = 429,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

$$Q_k = 0,446 \cdot 2000 = 892 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

6. Угол между  $E$  и  $U_2$ :

при  $x_r = 0,42$

$$\Theta = \Theta_{12} + \Theta_1 = 33,4^\circ + 19,3^\circ = 52,7^\circ; \quad \Theta = 14,5^\circ + 19,3^\circ = 33,8^\circ;$$

при  $x_r = 1$

$$\Theta = 33,4^\circ + 34^\circ = 67,4^\circ; \quad \Theta = 14,5^\circ + 34^\circ = 48,5^\circ.$$

7. Коэффициенты запаса статической устойчивости:

при  $x_r = 0,42$

$$z_c = \frac{1}{\sin 52,7^\circ} - 1 = 0,26;$$

$$z_c \% = 26 \%;$$

$$z_c = \frac{1}{\sin 33,8^\circ} - 1 = 0,798;$$

$$z_c \% = 79,8 \%;$$

при  $x_r = 1$

$$z_c = \frac{1}{\sin 67,4^\circ} - 1 = 0,08;$$

$$z_c \% = 8 \%;$$

$$z_c = \frac{1}{\sin 48,5^\circ} - 1 = 0,335;$$

$$z_c \% = 33,5 \%.$$

Углы  $\Theta_1$ , как видно из (8'), не зависят от удельной передаваемой мощности  $p$ ; одинаковы для любой ЛЭП; углы  $\Theta_{12}$  – разные.

Мощность компенсирующих устройств поперечной компенсации для компактной ЛЭП получилась примерно в два раза больше, чем для обычной.

Далее рассмотрим другие режимы, отличные от максимального; пусть  $p_n = kp$ .

Тогда

$$\underline{E} = 1 + (kp - jq_r)j \frac{x_r}{p} = 1 + x_r \operatorname{tg} \varphi_r + j k x_r$$

при  $k = 0,4$ ;  $p_n = 0,4$ ,

$$\sin \Theta_{12} = p_n \sin \alpha l = 0,2; \quad \Theta_{12} = 11,5^\circ;$$

$$q_1 = \frac{\cos \alpha l - \cos \Theta_{12}}{\sin \alpha l} = \frac{0,866 - 0,98}{0,5} = -0,228;$$

$$q_k = b_k = p \operatorname{tg} \varphi_r - q_1 = 0,4 \cdot 0,486 + 0,228 = 0,422.$$

Для варианта А:  $Q_k = 379,8 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ; для Б –  $Q_k = 844 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ .

Для режима холостого хода ( $k = 0$ ) получим:

$$q_1 = \frac{\cos \alpha l - \cos \Theta_{12}}{\sin \alpha l} = \frac{0,866 - 1}{0,5} = -0,268;$$

$$q_k = b_k = -q_1 = 0,268;$$

для варианта А

$$Q_k = 241,2 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

для варианта Б

$$Q_k = 536 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

В конце ЛЭП:

$$q_2 = -q_1 = 0,268;$$

$$q_k = b_k = 0,268;$$

для варианта А

$$Q_k = 241,2 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

для варианта Б

$$Q_k = 536 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Реактивные мощности в конце ЛЭП в максимальном режиме:

для варианта А:

$$q_2 = -q_1 = -0,062;$$

для варианта Б:

$$q_2 = -q_1 = 0,204;$$

$$\text{tg} \varphi_2 = \frac{q_2}{p} = \frac{-0,062}{1,11} = -0,056;$$

$$q_k = b_k = 0,204;$$

$$\varphi_2 = -2,1^\circ; \quad \cos \varphi_2 = -0,999;$$

$$\text{tg} \varphi_2 = \frac{q_2}{p} = \frac{-0,204}{0,5} = 0,408;$$

$$Q_{k2} = -50,4 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\varphi_2 = 22,2^\circ; \quad \cos \varphi_2 = 0,926;$$

$$Q_{k2} = 408 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Сравнение результатов расчетов для обычных и компактных линий электропередачи показывает, что системы передачи с компактными линиями в сочетании с шунтирующими компенсаторами обладают более высокой степенью устойчивости и могут обеспечить передачу необходимой мощности.

Однако при этом требуется значительная мощность компенсирующих устройств и желательно, чтобы это были регулируемые компенсаторы. В рассматриваемых примерах для компактных ЛЭП требуется мощность компенсирующих устройств, примерно, в два раза больше, чем для обычных ЛЭП.

Для системы электропередачи с шунтирующим реактором в начале линии передаваемая мощность представилась формулой [5]

$$P = \frac{U_2^2 \left[ (1 + x_r b_k) \cos \alpha l - \frac{x_r}{z_b} \sin \alpha l \right] \cos \varphi_2}{\left[ x_r \cos \alpha l + z_b (1 + x_r b_k) \sin \alpha l \right] \cos(\Theta + \varphi_2)} \sin \Theta, \quad (14)$$

или в долях натуральной мощности

$$p = \frac{\left[ (1 + x_r b_k) \cos \alpha l - \frac{x_r}{z_b} \sin \alpha l \right] \cos \varphi_2}{\frac{1}{z_b} \left[ x_r \cos \alpha l + z_b (1 + x_r b_k) \sin \alpha l \right] \cos(\Theta + \varphi_2)} \sin \Theta, \quad (15)$$



где входящие в эти формулы величины указаны на рис. 3, послужившем основой для вывода этих формул. Рисунок представляет собой векторную диаграмму системы передачи (рис. 2).

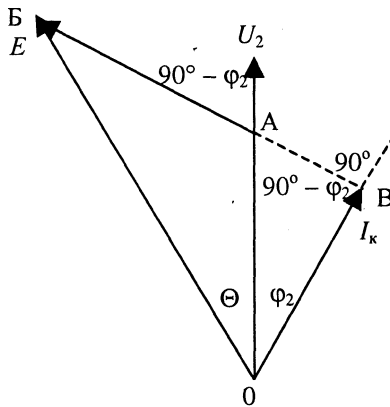


Рис. 3. Векторная диаграмма системы электропередачи

Значение  $\cos\varphi_2$  определяется принятым перепадом напряжений в линии электропередачи.

Уравнениями (14) и (15) вполне определяется передаваемая мощность с шунтирующим реактором (компенсатором). С точки зрения увеличения дальности передачи, желательно иметь достаточно большую мощность шунтирующего реактора. Фактором, ограничивающим его мощность, следует признать в рассматриваемом случае значение коэффициента мощности генераторов удаленной электростанции.

Для двух рассматриваемых случаев АРВ генераторов: при постоянстве возбуждения и постоянстве потокосцепления роторов ( $x_r = 0,42$ ) значения дальностей передачи натуральной мощности соответственно получились 450 и 650 км.

Сопоставляя эти дальности с результатами расчетов табл. 2, для компактной линии можно сделать очень важный вывод о возможностях систем электропередачи переменного тока. А именно: любую мощность можно передать на любое расстояние по системе с компактной линией передачи, у которой через каждые 500...600 км присоединены управляемые шунтирующие реакторы. Проводимость реактора на каждом конце участка должна компенсировать емкостную проводимость половины длины участка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в Г. Е. Взаимодействие генераторов электрических станций с линиями электропередачи и приемниками электрической энергии // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 1. – 11–17 с.
2. Ж д а н о в П. С. Устойчивость электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948.
3. Л е б е д е в С. А., Ж д а н о в П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1934.
4. В у л ь ф А. А. Устойчивость параллельной работы электрических станций. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1938.
5. П о с п е л о в Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. – Мн.: Выш. шк., 1967.
6. А л е к с а н д р о в Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 5.11.2001