

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ДАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

Р. И. БОРИСОВ, И. А. БЕЗЛЕР, В. И. ГОТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

В данной работе приведены результаты исследований о влиянии основных параметров промежуточных систем (ПС) и установок поперечной компенсации (УПпК), их места подключения и расположения по трассе дальней электропередачи, вида УПпК, исходного режима и ряда других факторов на предельные режимы компенсированных дальних электропередач (КДЛЭП), а также предельных значений относительных углов между станциями, соответствующих пределу аperiodической устойчивости.

При определении предельных значений относительных углов роторов синхронных машин ПС и УПпК необходимо представить в виде обобщенных постоянных четырехполюсников с эквивалентными значениями э. д. с. источников питания (рис. 1). Параметры обобщенных четырехпо-

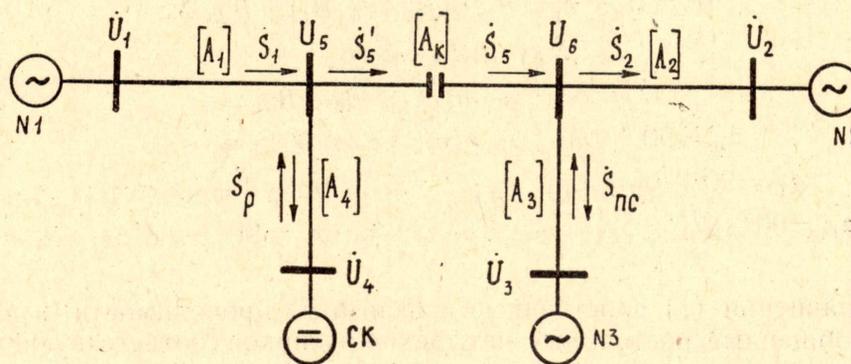


Рис. 1. Принципиальная схема дальней электропередачи с промежуточной системой и установками продольной и поперечной компенсации.

люсников определяются методом цепочечных соединений. В рассматриваемой системе нагрузки и источники реактивной мощности представляются проводимостями. Генераторы ПС и синхронные компенсаторы УПпК замещаются постоянными значениями э. д. с., приложенными за соответствующим сопротивлением [1]. При сравнении результатов для дальней электропередачи с ПС и различными видами УПпК при прочих равных условиях способ учета синхронных машин приемной

№ 2 и передающей №1 систем не является первостепенным и не оказывает влияния на качественную картину полученных результатов.

После замещения КДЛЭП, ПС и УПК четырехполюсниками (рис. 1) уравнение электромагнитной мощности для каждой эквивалентной станции является функционально зависимой от относительных углов между их роторами, при постоянстве э. д. с. синхронных машин и принимает вид

$$P_i = P_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n P_{ij} \cdot \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (1)$$

где

$$P_{ii} = \frac{E_i^2 \cdot F_i}{B_i \cdot M_0} \sin \alpha_{ii}; \quad \alpha_{ii} = 90^\circ + \varphi_i - \psi_{B_i} - \mu_0;$$

$$P_{12} = \frac{B_3 \cdot B_4}{H_1} E_1 E_2; \quad P_{14} = \frac{B_2 \cdot B_3}{H_1} \cdot \frac{B_4 \cdot N_1}{H_0} E_1 E_4;$$

$$P_{13} = \frac{B_2 \cdot B_4}{H_1} E_1 E_3; \quad P_{23} = \frac{H_0}{H_1} E_2 E_3;$$

$$P_{24} = \frac{B_3 \cdot N_1}{H_1} E_2 E_4; \quad P_{34} = \frac{B_2 N_1}{H_1} E_3 E_4;$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j;$$

$$\dot{F}_1 = F_1 \perp \varphi_1 = \dot{D}_1 \dot{M}_0 - \dot{B}_4 \dot{N}_0; \quad \dot{F}_2 = F_2 \perp \varphi_2 = \dot{A}_2 \dot{M}_0 - \dot{B}_3 \dot{H}_0;$$

$$\dot{F}_3 = F_3 \perp \varphi_3 = \dot{A}_3 \dot{M}_0 - \dot{B}_2 \dot{H}_0; \quad \dot{F}_4 = F_4 \perp \varphi_4 = \dot{A}_4 \dot{M}_0 - \dot{B}_1 \dot{N}_0;$$

$$\dot{M}_0 = M_0 \perp \mu_0 = (\dot{B}_4 \dot{A}_1 + \dot{B}_1) \dot{N}_0 + \dot{B}_1 \cdot \dot{B}_4 \cdot \dot{B}_{23};$$

$$\dot{H}_0 = H_0 \perp \eta_0 = \dot{B}_k (\dot{B}_4 \dot{A}_1 + \dot{B}_1) + \dot{B}_1 \dot{B}_4;$$

$$\dot{H}_1 = H_1 \perp \eta_1 = \dot{B}_2 \dot{B}_3 (\dot{B}_4 \dot{A}_1 + \dot{B}_1) + \dot{B}_{23} \dot{H}_0;$$

$$\dot{N}_0 = \dot{B}_2 \dot{B}_3 + \dot{B}_k \dot{B}_{23};$$

$$\dot{N}_1 = N_1 \perp \varepsilon_1 = \dot{B}_4 \dot{A}_1 + \dot{B}_1 - \dot{B}_4;$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ + \psi_{B3} + \psi_{B4} - \eta_1; \quad \alpha_{23} = 90^\circ + \eta_0 - \eta_1;$$

$$\alpha_{13} = 90^\circ + \psi_{B2} + \psi_{B4} - \eta_1; \quad \alpha_{24} = 90^\circ + \psi_{B3} + \varepsilon_1 - \eta_1;$$

$$\alpha_{14} = 90^\circ + \psi_{B2} + \psi_{B3} + \psi_{B4} + \varepsilon_1 - \eta_0 - \eta_1; \quad \alpha_{34} = 90^\circ + \psi_{B2} + \varepsilon_1 - \eta_1.$$

В уравнении (1) собственные и взаимные проводимости выражены через обобщенные постоянные четырехполюсников соответствующих частей элементов системы.

Из шести взаимных углов, входящих в уравнения вида (1), только три являются независимыми переменными и связанные соотношением

$$\delta_{12} + \delta_{23} + \delta_{34} + \delta_{41} = 0. \quad (2)$$

Предельный режим системы находится последовательным утяжелением исходного установившегося нормального режима путем перераспределения активных мощностей между генераторными станциями. Тогда максимальное значение активной мощности, которое может быть передано от удаленной станции № 1 в приемную № 2, промежуточную № 3 системы и синхронный компенсатор, выполняющий функции УПК,

на основании уравнения (1) будет иметь место при  $\delta_{12} = 90^\circ + \alpha_{12}$ ;  $\delta_{13} = 90^\circ + \alpha_{13}$ ;  $\delta_{14} = 90^\circ + \alpha_{14}$  и составит

$$P_1 = P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14}.$$

Для определения  $P_{1\text{пр}}$  в общем случае необходимо установить взаимосвязь между  $P_1$  и тремя независимыми взаимными углами, т. е. по предельным значениям углов могут быть определены соответствующие им предельные перетоки активной мощности. Тогда для получения требуемой зависимости необходимо воспользоваться практическим критерием предельного режима следующего вида:

$$\frac{dP_1}{d\delta_{12}} = \frac{\partial P_1}{\partial P_{12}} + \frac{\partial P_1}{\partial P_{13}} \frac{\partial \delta_{13}}{\partial \delta_{12}} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{14}} \frac{\partial \delta_{15}}{\partial \delta_{12}} = 0. \quad (3)$$

Развернутое уравнение (3) по виду и сути аналогично выражению, полученному в [2], но с большим числом слагаемых.

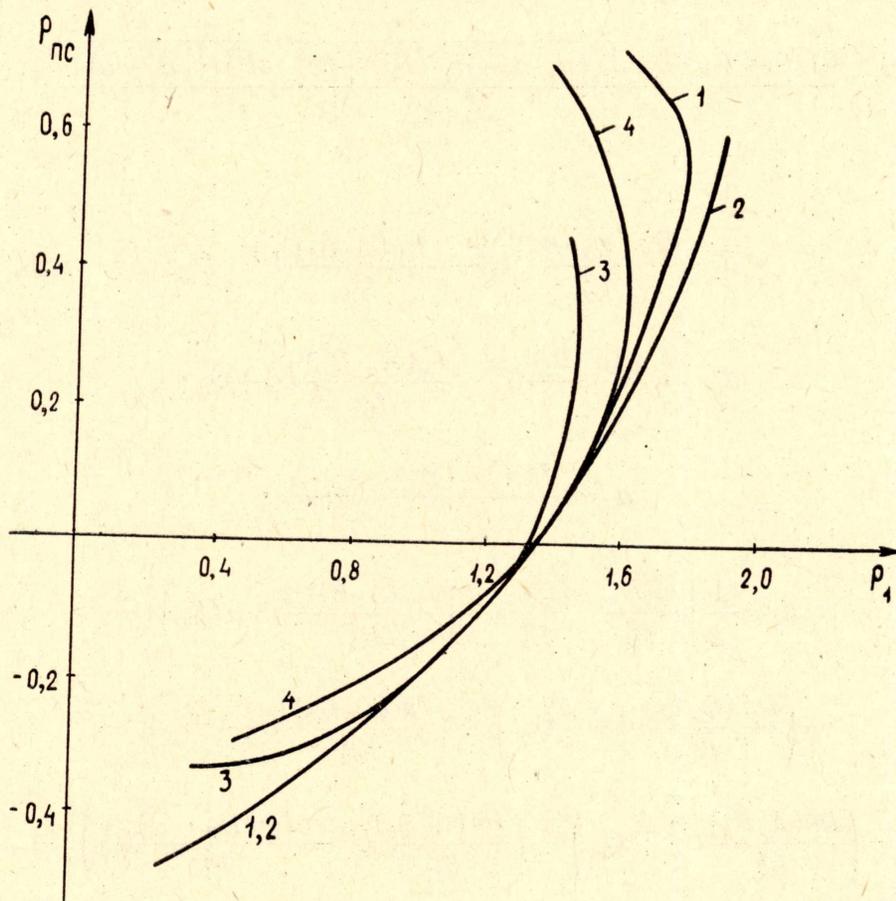


Рис. 2. Зависимость предельной мощности ДЛЭП от места положения ПС и вида УПК: 1 — к вводу УПК присоединен синхронный компенсатор, а ПС — к выводу; 2 — ПС замещена статическими характеристиками; 3 — к вводу УПК присоединен шунтирующий реактор; 4 — ПС присоединен к вводу УПК, а синхронный компенсатор — к выводу.

Уравнение (3) с учетом (2) позволяет получить зависимость между взаимными углами синхронных машин системы, при которых передающая система № 1 выдает максимальную мощность.

На рис. 2 по уравнениям (1) ÷ (3) построена область предельных значений передаваемой активной мощности по передающей станции № 1

в зависимости от режима ПС и вида УПпК, при этом УПк расположено в середине дальней ЛЭП длиной 1000 км и степень компенсации индуктивного сопротивления линии принята  $K_c = 50\%$ .

При исследовании режимов ДЛЭП и уменьшения времени счета возможно применение статических характеристик ПС и УПпК в зависимости от напряжения в точке их присоединения [3]. Регулирующие свойства статических характеристик характеризуются коэффициентами крутизны, и величина их зависит от многих факторов: активной и реактивной мощностей нагрузок, сопротивлений связи между ПС и УПпК и узлом присоединения к ДЛЭП, а также от принятых законов регулирования.

Для того, чтобы выявить влияние основных параметров статических характеристик ПС и УПпК на предельные режимы КДЛЭП, получено уравнение передаваемой мощности  $P_1$  в конце первого участка КДЛЭП (рис. 1) в функции от напряжения узла присоединения ПС и УПпК и их статических характеристик:

$$P_1 = \frac{a_1 \cdot a_2 + d_1 \cdot d_2 + \sqrt{(a_1 \cdot a_2 + d_1 \cdot d_2)^2 + (a_2^2 + d_2^2)(c_1 d_2^2 - a_1^2)}}{a_2^2 + d_2^2}, \quad (4)$$

где

$$d_1 = \frac{\operatorname{Re}(\hat{D}_2 \cdot \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 - \frac{\operatorname{Re}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} U_5^2 + P_{\text{пс}};$$

$$d_2 = \frac{\operatorname{Im}(\hat{D}_2 \cdot \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 - \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_k \hat{B}_k)}{B_k^2} U_6^2 + Q_{\text{пс}};$$

$$a_2 = \frac{\operatorname{Re}(\hat{D}_2 \cdot \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 + P_{\text{пс}};$$

$$\begin{aligned} a_1 = & \frac{1}{2} \left[ \frac{U_2^2 U_6^2}{B_2^2} - \frac{U_5^2 U_6^2}{B_k^2} + \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} U_5^2 + Q_{\text{пс}} \right)^2 + \right. \\ & + \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{D}_2 \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 + Q_{\text{пс}} \right)^2 + \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{D}_2 \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 + Q_p \right)^2 - \\ & - \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_k \hat{B}_k)}{B_k^2} U_6^2 + Q_p \right)^2 - \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} U_5^2 - \frac{\operatorname{Im}(\hat{D}_2 \cdot \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 \right)^2 - \\ & \left. - 2 \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} \cdot \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_k \hat{B}_k)}{B_k^2} U_5^2 U_6^2 + 2 Q_{\text{пс}} Q_p - Q_{\text{пс}}^2 - 2 d_2^2 + a_2^2 \right]; \\ c_1 = & \frac{U_1^2 U_5^2}{B_1^2} - \frac{U_5^2 U_6^2}{B_k^2} + \frac{U_2^2 U_6^2}{B_2^2} - \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} U_5^2 + Q_{\text{пс}} \right)^2 - \\ & - \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{D}_2 \hat{B}_2)}{B_2^2} U_6^2 + Q_{\text{пс}} \right)^2 + \left( \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2} U_5^2 + \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}_k \hat{B}_k)}{B_k^2} U_6^2 \right)^2 - \end{aligned}$$

$$-2 \frac{\text{Im}(\hat{A}_1 \hat{B}_1) \text{Im}(\hat{D}_2 \hat{B}_2)}{B_1^2 B_2^2} U_5^2 U_6^2 - \left( \frac{\text{Re}(\hat{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1} \right)^2 U_5^4 + \\ + 2 Q_p d_2 + Q_{\text{пс}}^2 - d_2^2 - a_2^2.$$

При изменении напряжений в узлах присоединения ПС и УПпК с помощью (4) возможно непосредственное определение  $P_1$  и предельному режиму передающей системы № 1 соответствует равенство  $\frac{dP_1}{dU_6} = 0$ .

При неучете активных потерь выражение (4) может быть упрощено.

Из анализа рис. 2 следует, что предельная величина передаваемой мощности от передающей системы в значительной степени зависит от вида УПпК, места присоединения ПС и УПпК, а также от статических характеристик ПС и УПпК.

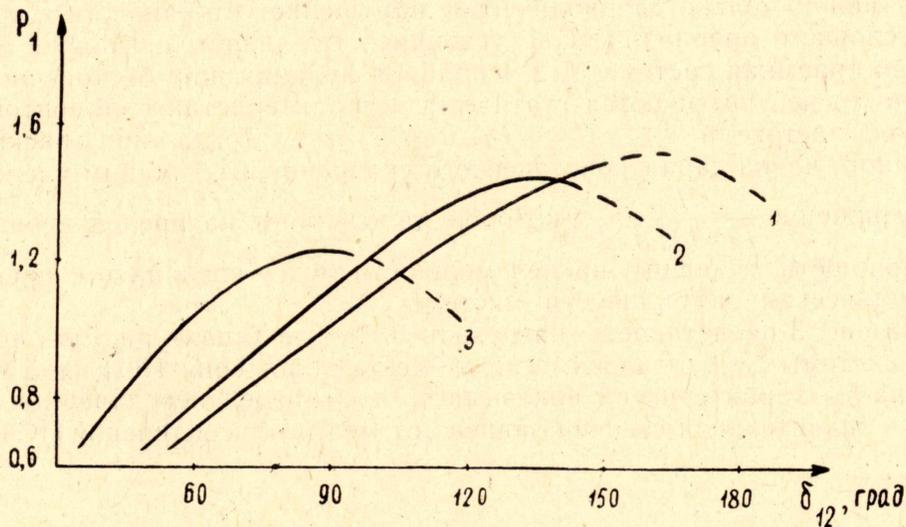


Рис. 3. Нагрузочно-угловые характеристики КДЛЭП с ПС: 1 — ПС присоединено к выводу УПк, а к вводу присоединен синхронный компенсатор; 2 — ПС присоединен к вводу УПк, а к выводу присоединен синхронный компенсатор; 3 — ПС присоединено к выводу УПк, а к вводу присоединен шунтирующий реактор (статический компенсатор).

Для рассматриваемой КДЛЭП с ПС и УПпК (синхронный компенсатор) характеристическое уравнение имеет вид [3]

$$p^6 + A_2 p^4 + A_4 p^2 + A_6 = 0, \quad (6)$$

где

$$A_2 = a_{21}^{12} + a_{31}^{13} + a_{41}^{14}; \\ A_4 = a_{21}^{12} \cdot a_{31}^{13} - a_{21}^{13} \cdot a_{31}^{12} + a_{21}^{12} \cdot a_{41}^{14} - a_{21}^{14} \cdot a_{41}^{12} + \\ + a_{31}^{13} \cdot a_{41}^{14} - a_{31}^{14} \cdot a_{41}^{13}; \\ A_6 = a_{21}^{12} \cdot a_{31}^{13} \cdot a_{41}^{14} - a_{21}^{12} \cdot a_{31}^{14} \cdot a_{41}^{13} + a_{31}^{13} \cdot a_{41}^{14} \cdot a_{21}^{12} - \\ - a_{31}^{14} \cdot a_{41}^{13} \cdot a_{21}^{12} + a_{41}^{14} \cdot a_{21}^{12} \cdot a_{31}^{13} - a_{41}^{13} \cdot a_{21}^{12} \cdot a_{31}^{14}; \\ a_{21}^{12} = \frac{1}{T_{11}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{12}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}}; \quad a_{21}^{13} = \frac{1}{T_{11}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{12}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{13}};$$

$$\begin{aligned}
a_{31}^{13} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{I3}} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{13}}; & a_{21}^{14} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{14}} - \frac{1}{T_{I2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{14}}; \\
a_{41}^{14} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{14}} - \frac{1}{T_{I4}} \frac{\partial P_4}{\partial \delta_{14}}; & a_{31}^{12} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{I3}} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{12}}; \\
a_{41}^{12} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{I4}} \frac{\partial P_4}{\partial \delta_{12}}; & a_{31}^{14} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{14}} - \frac{1}{T_{I3}} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{14}}; \\
a_{41}^{13} &= \frac{1}{T_{I1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{I4}} \frac{\partial P_4}{\partial \delta_{13}}.
\end{aligned}$$

$T_{Ii}$  — постоянные инерции синхронных машин.

Определение предельных значений относительных углов по условиям статической устойчивости системы сводится к анализу корней характеристического уравнения (5), в которой, согласно принятым допущениям, возможно только аperiodическое нарушение устойчивости и граничным условием аperiodической устойчивости является условие:  $A_6 = 0$ . Так как приемная система № 2 исполняет функции шин бесконечной мощности, то не учитываются статические характеристики элементов системы по частоте и  $T_{I2} \gg \gg T_{I1}, T_{I3}, T_{I4}$ . Тогда при раскрытии свободного члена характеристического уравнения ( $A_6$ ) общим членом будет выражение  $\frac{I}{T_{I1} \cdot T_{I3} \cdot T_{I4}}$ , которое мало влияет на предел передаваемой мощности, а значит, предел мощности будет совпадать с пределом аperiodической устойчивости системы.

На рис. 3 представлены нагрузочно-угловые характеристики передающей системы № 1 в зависимости от места положения ПС и вида УПК.

Анализ характеристик показывает, что предел передаваемой мощности в значительной степени зависит от места присоединения ПС и вида УПК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Веников и др. Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых систем. «Электричество», 1967, № 11.
2. Р. И. Борисов, В. И. Готман. Предельные режимы дальних электропередач переменного тока с промежуточными системами по условиям статической устойчивости. Известия вузов СССР, «Энергетика», 1971, № 8.
3. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. М., Госэнергоиздат, 1948.