

**ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ  
ПО УСЛОВИЯМ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

Р. И. БОРИСОВ, В. И. ГОТМАН

(Представлена кафедрой электрических систем и сетей)

Влияние промежуточных систем (ПС) на режимы работы, пропускную способность и устойчивость дальних электропередач продолжает оставаться недостаточно изученным вопросом, но весьма важным, с точки зрения использования внутренних резервов схем для улучшения технико-экономических показателей упомянутых электропередач.

В данной работе производится определение предельных значений транзитов активной мощности по ДЛЭП с учетом влияния местоположения, параметров, режима ПС, а также предельных значений отно-

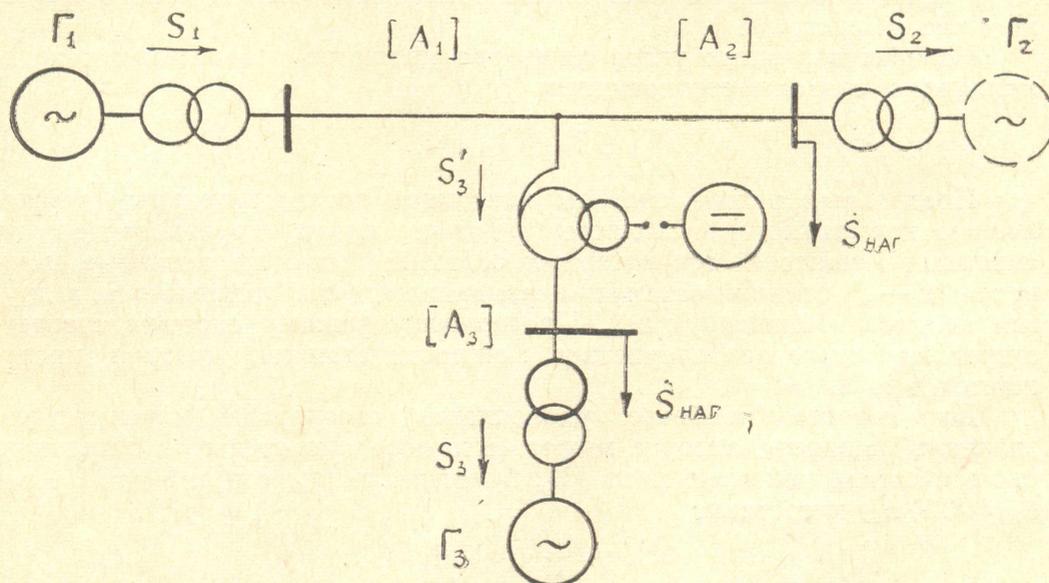


Рис. 1. Принципиальная схема дальней ЛЭП с промежуточной системой

сительных углов между станциями, соответствующих пределу устойчивости.

Исследования ведутся применительно к схеме рис. 1, где передающая станция через дальнюю ЛЭП с одной ПС работает на приемную систему.

## Исходные положения и принятые допущения

Предполагается, что все электрические и механические регуляторы системы настроены так, что самораскачивание исключено, в силу этого все генераторы замещаются эквивалентными электродвижущими силами  $k_E E_g$ , приложенными за сопротивлением  $\Delta x = k_x x_d$ , где  $k_E, k_x$  — коэффициенты, зависящие от типа генератора, вида регулятора и его настройки.

С достаточной степенью точности принимают [3] для блока генератор-трансформатор  $\Delta x = k_x x_d = x'_d + x_T$  и  $E'$  при регуляторах пропорционального типа и  $\Delta x = x_T$  и  $U_r$  для регуляторов сильного действия.

Электрическая система, каждая из станций которой представляется одним эквивалентным генератором, рассматривается как позиционная [4]. Схема замещения системы, нагрузки в которой представлены постоянными сопротивлениями, характеризуется комплексными величинами собственных и взаимных проводимостей.

Схемы замещения синхронных машин в соответствии с изложенным выше принимаются с учетом имеющихся на них АРВ.

В этих условиях, при постоянстве эдс синхронных машин, мощности каждой станции являются функциями относительных углов между их роторами [2].

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

где

$$P_{ii} = U_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii}, \quad P_{ij} = U_i U_j y_{ij}.$$

Собственные и взаимные проводимости в уравнениях (1) выражаются через обобщенные постоянные четырехполюсников соответствующих частей системы.

Из трех взаимных углов лишь два являются независимыми переменными и связаны соотношением

$$\delta_{12} + \delta_{23} + \delta_{31} = 0. \quad (2)$$

Предельный режим системы находится последовательным утяжелением нормального исходного режима путем перераспределения активных мощностей генераторных станций; при этом активные мощности  $(n - 2)$  станций остаются неизменными, одна нагружается, а другая является балансирующей. Предельному режиму системы соответствует максимум характеристики мощности станции, которая нагружается, или  $dP/d\delta = 0$ .

Для первого (наиболее удаленного) генератора максимальное значение мощности, которое может быть передано от него в остальную часть системы, как следует из (1), будет иметь место при  $\delta_{12} = 90^\circ + \alpha_{12}$ ,  $\delta_{13} = 90^\circ + \alpha_{13}$  и составит

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

Для определения  $P_{1пр}$  в общем случае необходимо установить взаимосвязь между  $P_1$  и двумя указанными независимыми взаимными углами. Требуемую зависимость можно получить из уравнения

$$\frac{dP_1}{d\delta_{12}} = 0,$$

которое после преобразований имеет вид

$$P_{12}P_{13} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \cos(\delta_{13} + \alpha_{13}) + P_{12}P_{23} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \cos(\delta_{23} + \alpha_{23}) + \\ + P_{13}P_{23} \cos(\delta_{13} - \alpha_{13}) \cos(\delta_{23} + \alpha_{23}) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) с учетом соотношения (2) позволяет получить зависимость между взаимными углами трех станций, при которых имеет место максимум мощности первой станции  $P_{1 \text{ пр}}$ .

Представление ПС некоторой эдс за эквивалентным четырех-полюсником является не единственным и не всегда наиболее удобным.

В ряде случаев, когда в ПС имеются несколько генераторных станций, а также источники реактивной мощности, влияние ПС на режим дальней ЛЭП и предельные значения перетоков мощности может быть учтено при представлении ПС обобщенными статическими характеристиками реакции по напряжению в точке их примыкания [2, 5]

$$P=P(U), \quad Q=Q(U).$$

Представление ПС статическими характеристиками активной и реактивной мощностей существенно упрощает решение поставленной задачи, так как исследование статических характеристик местных систем и предельные режимы ДЛЭП могут проводиться отдельно, что способствует быстрому выяснению факторов, определяющих предельную мощность ДЛЭП по условиям аperiodической устойчивости.

Регулирующие свойства каждой статической характеристики определяются коэффициентами крутизны ( $\kappa_{qu}$ ,  $\kappa_{pu}$ ) и диапазоном изменения ее переменных.

Коэффициент крутизны  $\kappa_{pu}$  определяется величиной активной мощности узлов нагрузок, их регулирующими эффектами и электрической удаленностью нагрузок от узла подключения ПС.

Коэффициент  $\kappa_{qu}$  статических характеристик реактивной мощности в значительной степени зависит от сопротивлений связи узла подключения ПС с источниками активной и реактивной мощностей и их коэффициентов усиления по напряжению.

Получено уравнение (4) передаваемой мощности в конце первого участка ДЛЭП (рис. 1) в функции от напряжения точки примыкания ПС и ее статических характеристик

$$P' = (0,5dc - \alpha_1 U^2) + a \sqrt{b - 0,25d^2}, \quad (4)$$

где

$$a = [U^2(\gamma_1 + \gamma_2) + Q(U)]; \quad \gamma_1 = -\frac{\text{Im}(\dot{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2}; \quad \gamma_2 = -\frac{\text{Im}(\dot{D}_2 \hat{B}_2)}{B_2^2};$$

$$c = [U^2(\alpha_1 + \alpha_2) + P(U)]; \quad \alpha_1 = \frac{\text{Re}(\dot{A}_1 \hat{B}_1)}{B_1^2}; \quad \alpha_2 = \frac{\text{Re}(\dot{D}_2 \hat{B}_2)}{B_2^2};$$

$$b = \frac{U_1^2}{B_1^2} \cdot \frac{U^2}{(a^2 + c^2)}; \quad d = 1 + \left[ \frac{U_1^2}{B_1^2} - \frac{U_2^2}{B_2^2} \right] \frac{U^2}{(a^2 + c^2)}.$$

Проведенные исследования показывают, что для заданного исходного режима крутизна статических характеристик является стабильной и с достаточной степенью точности в рабочем диапазоне изменения напряжения статические характеристики могут быть линеаризованы.

$$P(U) = \pm P_0 + (U - U_0) \kappa_{pU}, \quad (5)$$

$$Q(U) = \pm Q_0 + (U - U_0) \kappa_{qU},$$

где  $U_0$  и  $U$  — соответственно напряжение в исходном режиме и текущее в точке примыкания ПС;

$P_0$  и  $Q_0$  — обменные перетоки мощности в исходном режиме, знаку (+) соответствует отбор в ПС.

Предельный режим удаленной станции № 1 можно найти по (4) последовательным снижением напряжения  $U$  в точке примыкания ПС, которому будет соответствовать  $dP_1/dU=0$ .

Запас статической устойчивости рассматриваемой электропередачи следует характеризовать коэффициентом запаса по каждому участку

$$\kappa_{3i} = \frac{P_i - P_{i0}}{P_{i0}},$$

где  $P_1 = P_{1пр}$  — предельное значение мощности первого участка, определенное с учетом влияния ПС;

$P_2$  — мощность второго участка, соответствующая  $P_{1пр}$ ;

$P_{i0}$  — мощность участков в исходном режиме.

Регулирующий эффект активной мощности ПС несколько снижает предельное значение мощности первого участка, а второго — увеличивает. При этом максимумы угловых характеристик участков имеют место при разных углах  $\delta_{12}$  ( $\delta_{12}/P_{1пр} < \delta_{12}/P_{2пр}$ ).

На рис. 2 приведены результаты расчетов предельных режимов по (4), (5) для дальней ЛЭП без потерь длиной 1000 км в зависимости от места положения и параметров режима ПС\*.

В исходном режиме напряжение в точке подключения ПС принималось  $U_0=1$ .

ПС, обладая естественным положительным регулирующим эффектом, увеличивает предельные значения мощности по ДЛЭП.

Если ПС сбалансирована по активной мощности, то наибольший эффект имеет место при ее расположении в середине линии (в случае  $U_1=U_2$ ). Для рассмотренного примера (рис. 2, 1) увеличение составляет 22,5%. При наличии перепада напряжений ( $U_1 \neq U_2$ ) место положения максимума можно определить из выражения (4).

$$\frac{dP_1}{d\lambda_1} = 0, \quad l_1 = \frac{1}{\alpha_0} \operatorname{arctg} \frac{U_1 \sin \lambda}{U_2 + U_1 \cos \lambda} \quad (\text{км}),$$

где  $\alpha_0 = 0,06$  град/км,  $\lambda$  — волновая длина линии, которая при  $U_1 = U_2$  дает  $l_1 = l/2$ .

Отбор активной мощности в ПС сдвигает максимум предельных значений передаваемой мощности к передающему концу и тем значительнее, чем больше отбор при неизменной величине  $\kappa_{qu}$ .

На рис. 3 по уравнению (1)—(3) построена область предельных режимов станции № 1 в зависимости от исходного режима ПС ( $P'_3$ ), подключенной в середине ДЛЭП длиной 1000 км.

Из рассмотренного следует, что предельная величина передаваемой мощности от станции № 1 (или части системы) существенно зависит от места присоединения, значения сопротивлений связи, величины и направления потоков промежуточной системы, т. е. параметров исходного режима.

Определение предельных значений относительных углов по условиям статической устойчивости сводится к анализу корней характеристического уравнения, составленного для 3-машинной схемы [2]

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

где

$$A_2 = a_{21}^{12} + a_{31}^{13}; \quad A_4 = a_{21}^{12} a_{31}^{13} - a_{21}^{13} a_{31}^{12};$$

\* Расчеты производились в относительных единицах при  $U=500$  кВ,  $S=P_{нат} \approx 900$  мвт

$$a_{21}^{12} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}}; \quad a_{21}^{13} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{13}};$$

$$a_{31}^{12} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J3}} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{12}}; \quad a_{31}^{13} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{J3}} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{13}}.$$

Согласно принятым допущениям в системе может иметь место только аperiodическое нарушение устойчивости. Условием, определяющим границу устойчивости, является равенство нулю свободного члена характеристического уравнения, который для рассматриваемого случая имеет вид

$$A_4 = P_{12}P_{23} \left[ \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \cos(\delta_{23} - \alpha_{23}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J1} T_{J3}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \cos(\delta_{23} + \alpha_{23}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J2} T_{J3}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}) \cos(\delta_{23} + \alpha_{23}) \right] + \\ + P_{12}P_{13} \left[ \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}) \cos(\delta_{13} - \alpha_{13}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J1} T_{J3}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) \cos(\delta_{13} + \alpha_{13}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J2} T_{J3}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}) \cos(\delta_{13} + \alpha_{13}) \right] + \\ + P_{13}P_{23} \left[ \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \cos(\delta_{13} - \alpha_{13}) \cos(\delta_{23} - \alpha_{23}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J1} T_{J3}} \cos(\delta_{13} - \alpha_{13}) \cos(\delta_{23} + \alpha_{23}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{T_{J2} T_{J3}} \cos(\delta_{13} + \alpha_{13}) \cos(\delta_{23} - \alpha_{23}) \right]. \quad (7)$$

Как видно из (7), области устойчивости определяются только соотношением амплитуд взаимных мощностей и постоянными инерций генераторов.

Положим, что удаленная станция с ПС работает на мощную концентрированную систему с неизменной частотой, что позволяет считать  $T_{J2}, T_{J1} \gg T_j^{\text{с}}$ . Это снижает степень свободы системы, выражение (7) упрощается и принимает вид уравнения (3), т. е. область предельных режимов в этом случае совпадает с областью устойчивого состояния системы.

На рис 4 в координатах двух независимых углов  $\delta_{12}$  и  $\delta_{13}$  построена область, соответствующая предельным режимам системы (3) и пределу устойчивости (7). Расчет проведен для того же случая, что и на рис. 3.

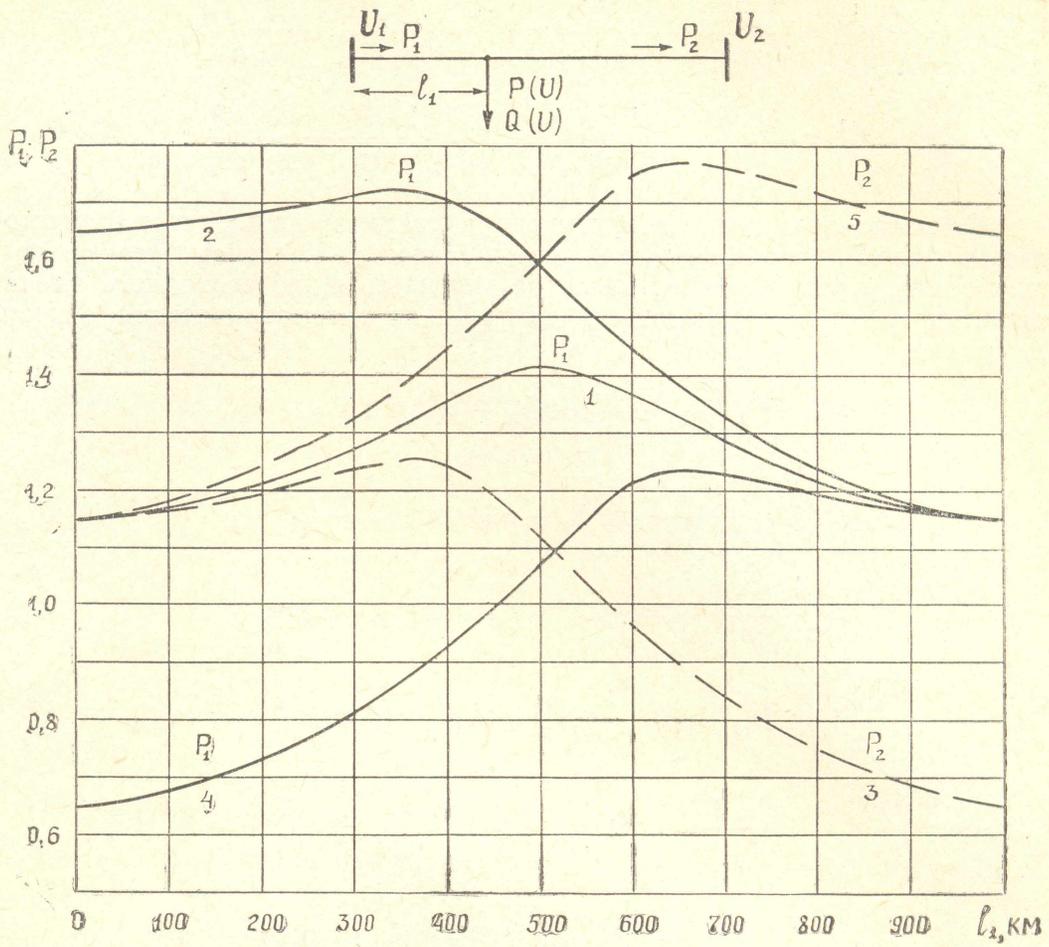


Рис. 2. Зависимость предела мощности ДЛЭП от места положения ПС:  
 $\kappa_{pU} = 0,2$ ;  $\kappa_{qU} = 4$ ; в исходном режиме: 1 —  $P_0 = 0$ ,  $Q_0 = 0$ , 2, 3 —  $P_0 = 0,5$ ,  $Q_0 = 0$ ; 4, 5 —  $P_0 = -0,5$ ;  $Q_0 = 0$

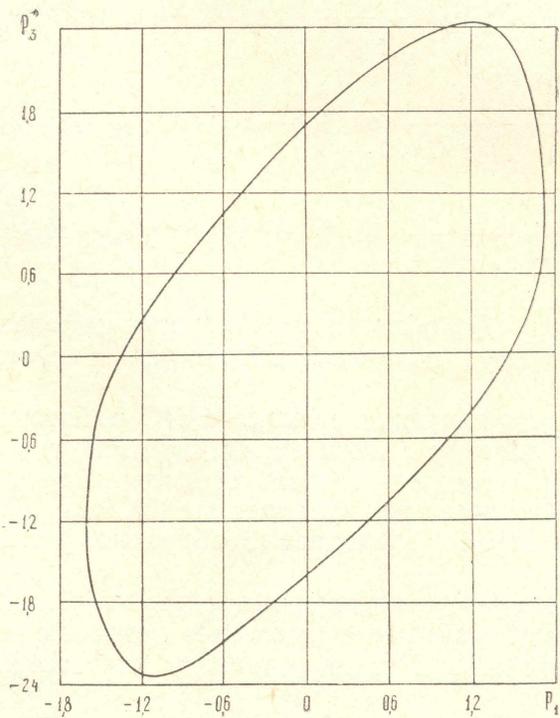


Рис. 3

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что устойчивая работа системы может иметь место при взаимных углах, значительно превышающих  $90^\circ$ .

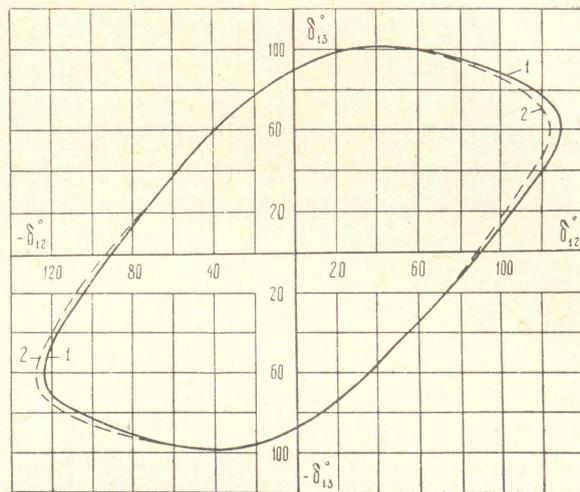


Рис. 4. 1 — область предельных режимов; 2 — область устойчивости при  $T_{j1} = T_{j2} = 2T_{j3}$

#### Выводы

Промежуточная система стабилизирует напряжение в точке подключения к ДЛЭП и повышает предельную передаваемую мощность по условиям статической устойчивости (до 20% для рассмотренных расчетных условий).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Маркович. Режимы энергетических систем. «Энергия», М., 1969.
2. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, М., 1948.
3. В. А. Веников, Н. Д. Анисимова и др. Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматических регулируемых электрических систем. «Электричество», 11, 1967.
4. В. А. Веников. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. «Энергия», М., 1964.
5. М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев. Методика расчета статической устойчивости сложных электрических систем с помощью эквивалентных регулирующих эффектов станций и нагрузок. Изв. вузов СССР, «Энергетика», 8, 1962.