

**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-

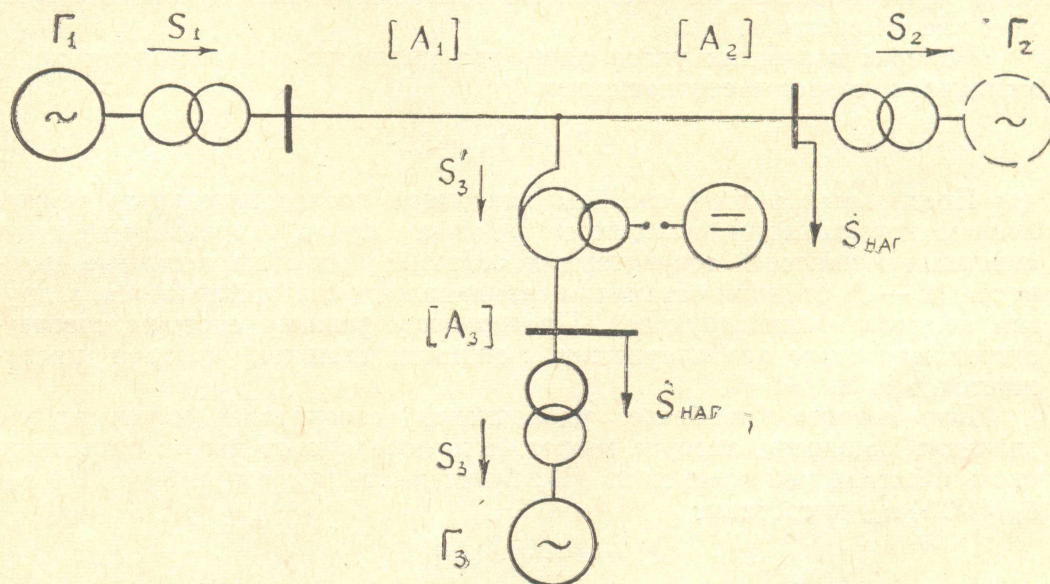


Рис. 1. Принципиальная схема дальней ЛЭП с промежуточной системой

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 (κ_{qu} , κ_{pu}) и диапазоном изменения ее переменных.

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

Коэффициент κ_{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 δ_{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, λ — 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 κ_{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 апериодическое 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 $T_{j2}, T_{j1} \gg T_j^e$. 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 δ_{12} и δ_{13} построена область, соответствующая предельным режимам системы (3) и пределу устойчивости (7). Расчет проведен для того же случая, что и на рис. 3.

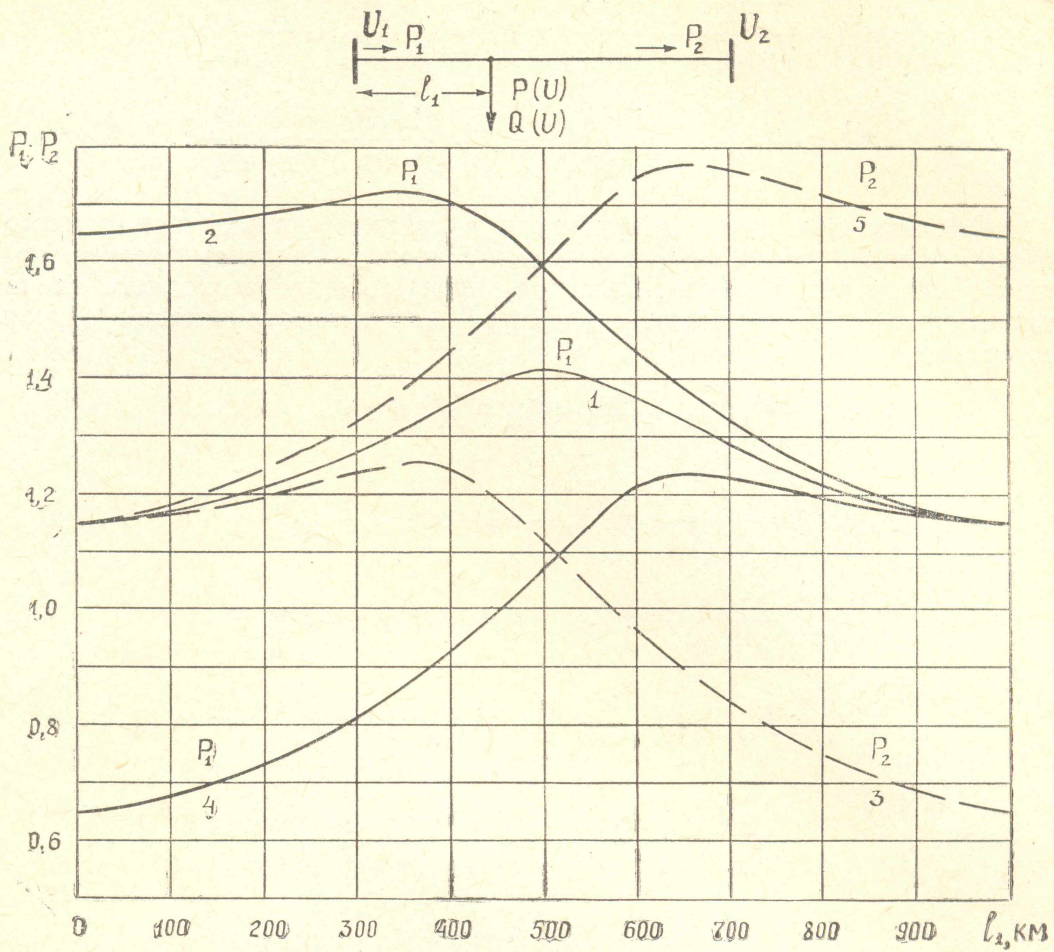


Рис. 2. Зависимость предела мощности ДЛЭП от места положения ПС: $\kappa_{pU} = 0,2$; $\kappa_{qU} = 4$; в исходном режиме: 1 — $P_0 = 0$, $Q_0 = 0$, 2, 3 — $P_0 = 0,5$, $Q_0 = 0$; 4, 5 — $P_0 = -0,5$; $Q_0 = 0$

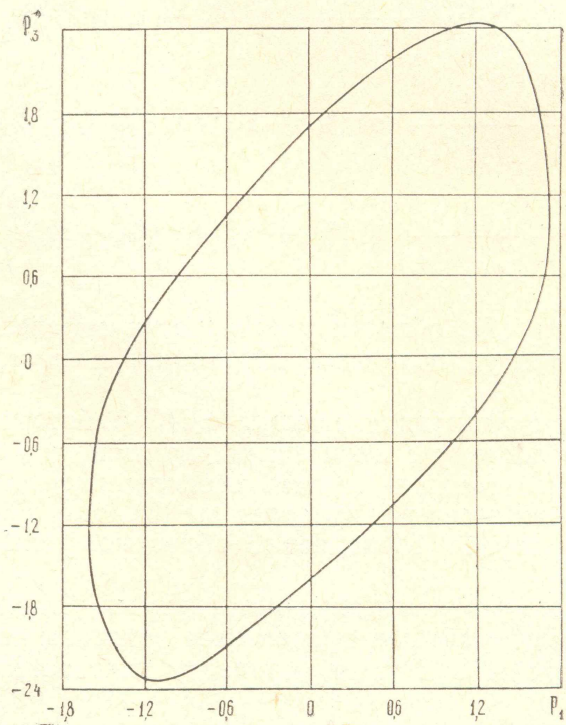


Рис. 3

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

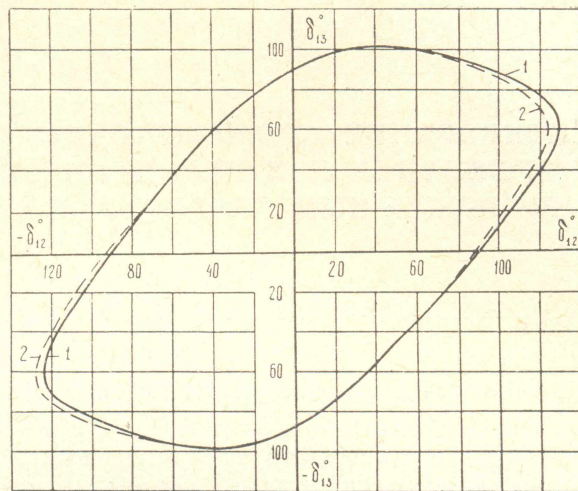


Рис. 4. 1 — область предельных режимов; 2 — область устойчивости при $T_{j1} = T_{j2} = 2T_{j3}$

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.