

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ  
С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ  
НА ЗАДАННУЮ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ  
ПО УСЛОВИЯМ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

В. И. ГОТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических систем и сетей)

Электропередачи напряжением 500—1000 кВ предназначены для передачи значительного количества электроэнергии на расстояния десятков сотен километров. Однако предельная величина передаваемой мощности и дальность передачи ограничиваются необходимостью соблюдения определенных требований. В первую очередь эти требования заключаются в обеспечении статической и динамической устойчивости, а также в ограничении всевозможного рода перенапряжений по условиям нормальной работы оборудования.

Пропускная способность электропередачи является технико-экономической категорией, так как обеспечение заданной величины передаваемой мощности на заданное расстояние с соблюдением вышеперечисленных условий требует определенных технических мероприятий, которые непосредственно связаны с затратами. Таким образом, проблема обеспечения заданной пропускной способности является совокупностью ряда технических и экономических задач, которые на некоторых стадиях своего исследования могут решаться независимо.

Одним из технически приемлемых и экономически эффективных средств повышения пропускной способности дальних электропередач является продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линии [1].

К проблеме выбора параметров компенсирующих устройств и исследования влияния их места положения на пропускную способность и распределение напряжения для дальних электропередач (ДЛЭП) без промежуточных систем (ПС) в разное время обращались: О. Б. Толпыго [2, 3, 4], Т. Б. Заславская [5], Р. И. Борисов [6, 7], И. П. Сиуда [8], Г. Е. Пospelов [1] и др.

При выборе параметров установки продольной компенсации (УПК) для электропередач без ПС принимают, что напряжения начала и конца электропередачи являются неизменными, мощность приемной системы бесконечна; при этих условиях критерием аперiodической устойчивости передающей станции является уравнение

$$\delta_{12пр} = 90^\circ \quad (R=0)$$

и при учете активных сопротивлений проводов  $\delta_{12пр} = \Psi_B$ , где  $\delta_{12пр}$  — предельный угол расхождения векторов напряжений начала и конца передачи. Запас устойчивости по мощности учитывается соответствующим запасом по углу.



Вопрос выбора параметров УПК на заданную пропускную способность по условиям обеспечения статической устойчивости и распределения напряжения для ЛЭП без ПС следует считать решенным [9].

Развитие энергетических систем предопределяет постепенное «обращение» электропередач промежуточными присоединениями. В этих условиях значимость ДЛЭП возрастает, поскольку наряду со своими традиционными функциями по передачи транзита мощности они будут исполнять функции межсистемных связей, являясь, таким образом, костяком крупных энергообъединений. Промежуточные системы представляют собой сложное структурное звено, основное напряжение которого может быть равно или на одну-две ступени ниже напряжения ДЛЭП. По своей мощности ПС будут соизмеримы с мощностью передающей станции или приемной системы. В самом общем случае следует считать, что ПС несбалансированы по активной мощности и, следовательно, могут работать как в режиме потребления активной мощности, так и выдачи.

Задача расчета параметров компенсирующих устройств для ДЛЭП с ПС по условиям статической устойчивости представляет значительные трудности.

С учетом общеизвестных допущений предельные режимы сколь угодно сложных систем при заданных исходных положениях могут оцениваться по практическим критериям. В литературе выражения практических критериев для сложных систем можно встретить только в матричном виде, которые для аналитического решения поставленной задачи практически неприемлемы вследствие высокого порядка матричного выражения. Так, для ДЛЭП с одной ПС, состоящей из одного нагрузочного узла и генераторной станции порядок матрицы равен  $10!$  Указанное затруднение удалось преодолеть следующим образом.

1. ДЛЭП в совокупности с ПС могут быть представлены цепочечными схемами. При расчете предельных режимов (а также в ряде случаев при расчете нормальных режимов) таких схем ПС наиболее просто и вместе с тем строго могут быть учтены обобщенными статическими характеристиками активной и реактивной мощностей по напряжению в узле их подключения к ДЛЭП. Статические характеристики позволяют на определенном этапе решения поставленной задачи отвлечься от конкретного характера эквивалентруемой системы и в обобщенной форме учесть реакцию ПС на изменение режима ДЛЭП. Статические характеристики характеризуются коэффициентами крутизны  $dQ/dU$ ,  $dP/dU$ , которые определяются по расчетным или заданным параметрам режима. Методика расчета коэффициентов крутизны для систем разработана.

2. Из матричного выражения практического критерия, составленного с учетом статических характеристик элементов энергосистем, нами получено уравнение

$$\sum_{i=1}^n \beta_i - \eta_j \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0, \quad (1)$$

где

$$\beta_i = \frac{dQ_i}{dU_j}, \quad \alpha_i = \frac{\partial P_i}{\partial U_j}, \quad \eta_j = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \Big|_{U_j = \text{const.}}$$

Уравнение (1) является алгебраической формой практического критерия, написанного через коэффициенты крутизны статических характеристик частей системы примыкающих к узлу  $j$  (произвольный узел системы). Направления потоков активных и реактивных мощностей участков приняты к узлу  $j$ . При таком направлении устойчивому состоянию системы соответствует условие

$$\sum \beta_i - \eta_j \sum \alpha_i < 0.$$



Производная  $\eta_1$  определяется для той части системы, в которой находится балансирующая станция или узел. Вследствие естественного положительного регулирующего эффекта статических характеристик реактивной мощности ПС, стабилизируя напряжение в узле примыкания, способствует увеличению предельной величины передаваемой мощности по ДЛЭП. Естественным статическим характеристикам реактивной мощности ПС искусственным образом может быть придан любой закон за счет подключения регулируемых источников реактивной мощности. При этом крутизна статических характеристик может быть доведена до любой желаемой величины.

Исходя из этих предпосылок, увеличивать пропускную способность ДЛЭП можно двумя путями: 1) либо увеличивать коэффициенты крутизны статических характеристик ПС подключением реактивных источников в узле примыкания ПС; 2) либо воздействовать на коэффициенты крутизны статических характеристик участков ДЛЭП введением продольной емкостной компенсации; 3) либо сочетание обоих способов,

Эффективность того или иного способа для конкретной схемы может быть выяснена только путем экономического сопоставления вариантов. Задача увеличения пропускной способности первым способом сводится к нахождению необходимых значений коэффициентов крутизны ПС ( $\beta_n$ ) из условия (1). Затем эти значения  $\beta_n$  необходимо сравнить с естественными и предусмотреть необходимую коррекцию величин  $\beta_n$ . Величины реактивных мощностей дополнительных источников определяются из условия баланса для соответствующих узлов.

Остановимся более подробно на втором способе повышения пропускной способности. Коэффициенты крутизны  $\alpha_1$  обусловлены регулирующими эффектами статических характеристик активной мощности нагрузочных узлов и активными сопротивлениями участков ЛЭП. Их значения в 10—15 раз меньше соответствующих величин  $\beta_1$ . Для выбора параметров компенсирующих устройств вполне приемлемо пользоваться уравнениями без потерь [9]. Принимая  $\alpha_1 = 0$ , уравнение (1) запишется как

$$\sum \beta_1 = 0.$$

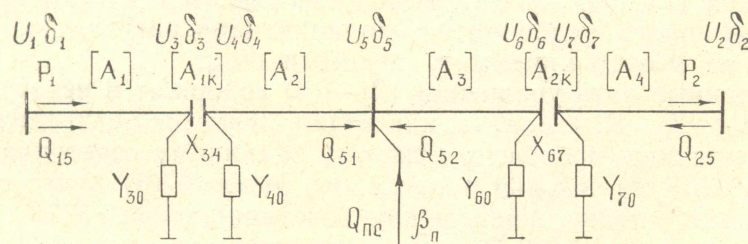


Рис. 1. Компенсированная ДЛЭП с промежуточной системой

Методику расчета параметров компенсирующих устройств рассмотрим применительно к схеме рис. 1, где изображена ДЛЭП с одной ПС. Для общности примем, что длины участков ДЛЭП неодинаковы, компенсирующие устройства установлены на обоих участках и несимметрично, активные мощности участков заданы и  $P_1 \neq P_2$ . Кроме того, должны быть заданы режимные параметры, соответствующие предельному режиму системы, т. е.  $U_1—U_7$ . В зависимости от степени совершенства регуляторов напряжения, установленных на генераторах передающей станции, на неизменном уровне могут поддерживаться либо напряжение на высшей стороне повышающих трансформаторов, либо  $U_T$  или  $E'_q$ . В последних случаях постоянные первого четырехполюсника должны учитывать реактансы концевых устройств. В дальнейшем примем, что  $U_1, U_2 = \text{const}$ ,



первое в силу регуляторов «сильного действия», второе — считая, что приемная система бесконечной мощности. Значение  $\beta_n$  определяется для конкретной схемы ПС и, следовательно, считаем величиной известной (для принятого направления  $\beta_n$  величина отрицательная).

Для принятой схемы необходимо иметь 6 независимых уравнений (каждое УПК содержит по три неизвестных). Естественным образом можно написать только пять:

$$Q_{51} = -\frac{U_5^2 A_{19}}{B_{19}} + \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - P_1^2} \quad (2) \quad Q_{15} = \frac{U_1^2 D_{19}}{B_{19}} - \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - P_1^2}, \quad (3)$$

$$Q_{52} = -\frac{U_5^2 D_{29}}{B_{29}} + \sqrt{\left(\frac{U_5 U_2}{B_{29}}\right)^2 - P_2^2} \quad (9) \quad Q_{25} = \frac{U_2^2 A_{29}}{B_{29}} - \sqrt{\left(\frac{U_5 U_2}{B_{29}}\right)^2 - P_2^2}, \quad (5)$$

$$\beta_{51} + \beta_{52} + \beta_n = 0. \quad (6)$$

Матричные и аналитические выражения  $\beta_{51}$  и  $\beta_{52}$  приведены в приложении.

Из условия ограничения напряжений на обкладках конденсаторов УПК определяем балансирующие реактивные мощности по концам участков из выражений:

$$Q_{51} = -\frac{U_5^2 A_2}{B_2} + \sqrt{\left(\frac{U_4 U_5}{B_2}\right)^2 - P_1^2}, \quad (7) \quad Q_{15} = \frac{U_1^2 D_1}{B_1} - \sqrt{\left(\frac{U_1 U_3}{B_1}\right)^2 - P_1^2}, \quad (8)$$

$$Q_{52} = -\frac{U_5^2 D_3}{B_3} + \sqrt{\left(\frac{U_5 U_6}{B_3}\right)^2 - P_2^2} \quad (9) \quad Q_{25} = \frac{U_2^2 A_4}{B_4} - \sqrt{\left(\frac{U_7 U_2}{B_4}\right)^2 - P_2^2}, \quad (10)$$

где

$$[A]_i = \begin{bmatrix} \cos \lambda_i & j \sin \lambda_i \\ j \sin \lambda_i & \cos \lambda_i \end{bmatrix} \quad \text{— для линии без потерь в относительных единицах;} \\ \lambda_i = \alpha_0 l_i \quad \text{— волновая длина участков.}$$

Наилучшее использование УПК достигается при одинаковых напряжениях на обеих сторонах батареи. Это дает возможность получить от УПК наибольший фазоповоротный эффект ( $\delta_{пк}$ ), при этом напряжения на обкладках ( $U_3, U_4, U_6, U_7$ ) не должны превышать некоторого значения, ограниченного условием их изоляции. При расчетах по формулам (7)—(10) их можно принимать равными  $U_{ном}$ .

Приведенные пять уравнений (2)—(6) содержат 6 неизвестных ( $A_{19}, D_{19}, B_{19}, A_{29}, D_{29}, B_{29}$ ). Задача, как видно, является неопределенной, что вполне естественно, поскольку каждому заданному сочетанию параметров первой УПК из условий предельного режима (6) будет однозначно соответствовать вполне определенное сочетание второй УПК, т. е. имеет место множество решений. Задача становится однозначной после введения уравнения связи между параметрами первой и второй УПК. В качестве такого уравнения нами принято  $\delta_{15} = \delta_{52}$ , которое может быть представлено в следующем виде

$$\frac{P_1 B_{19}}{U_1} = \frac{P_2 B_{29}}{U_2}. \quad (11)$$

Благодаря принятой связи, схема с заведомо несимметричными плечами относительно места присоединения ПС после компенсации становится симметричной, при этом учитывается не только схемная несимметрия, но также и режимная, которая учитывается через активные мощности участков и напряжение  $U_1$  и  $U_2$ .

Как известно [1, 9], симметричные схемы имеют значительные преимущества перед несимметричными, которые проявляются в том, что в первых имеет место лучшее распределение напряжения, для обеспечения



одной и той же пропускной способности требуется меньший расход компенсирующих устройств, такие схемы проще в эксплуатации и имеют меньшие потери. Во-вторых, как было нами выяснено ранее, расположение ПС в электрическом центре создает для нее условия, при которых с наибольшей эффективностью проявляется ее благоприятное воздействие на режим электропередачи в целом.

Совместное решение уравнений (2)–(6), (11) позволяет найти эквивалентные постоянные обоих участков:

$$B_{19} = \frac{U_1 U_5}{\sqrt{2} P_1} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + 2P_1^2}}}, \quad B_{29} = \frac{U_2}{K_p U_1} B_{19},$$

$$A_{19} = \left[ \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - P_1^2} - Q_{51} \right] \frac{B_{19}}{U_5^2}, \quad A_{29} = \left[ \sqrt{\left(\frac{U_2 U_5}{B_{29}}\right)^2 - P_2^2} + Q_{25} \right] \frac{B_{29}}{U_2^2},$$

$$D_{19} = \left[ \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - P_1^2} + Q_{15} \right] \frac{B_{19}}{U_1^2}, \quad D_{29} = \left[ \sqrt{\left(\frac{U_2 U_5}{B_{29}}\right)^2 - P_2^2} - Q_{52} \right] \frac{B_{29}}{U_5^2},$$

$$C_{19} = \frac{1 - A_{19} D_{19}}{B_{19}}, \quad C_{29} = \frac{1 - A_{29} D_{29}}{B_{29}},$$

где

$$a_0 = \frac{\beta_{\Pi} U_5 + 2(Q_{52} + Q_{51})}{1 + K_p}, \quad K_p = \frac{P_2}{P_1}.$$

Следующий этап состоит в нахождении постоянных компенсирующих устройств. Для первого участка справедливо следующее матричное соотношение

$$[\dot{A}_{19}] = [\dot{A}_1] [\dot{A}_{1K}] [\dot{A}_2]$$

или в развернутом виде

$$\dot{A}_{19} = (\dot{A}_1 \dot{A}_{1K} + \dot{B}_1 \dot{C}_{1K}) \dot{A}_2 + (\dot{A}_1 \dot{B}_{1K} + \dot{B}_1 \dot{D}_{1K}) \dot{C}_2, \quad (12)$$

$$\dot{B}_{19} = (\dot{A}_1 \dot{A}_{1K} + \dot{B}_1 \dot{C}_{1K}) \dot{B}_2 + (\dot{A}_1 \dot{B}_{1K} + \dot{B}_1 \dot{D}_{1K}) \dot{D}_2. \quad (13)$$

$$C_{19} = (\dot{C}_1 \dot{A}_{1K} + \dot{D}_1 \dot{C}_{1K}) \dot{A}_2 + (\dot{C}_1 \dot{B}_{1K} + \dot{D}_1 \dot{D}_{1K}) \dot{C}_2, \quad (14)$$

$$\dot{D}_{19} = (\dot{C}_1 \dot{A}_{1K} + \dot{D}_1 \dot{C}_{1K}) \dot{B}_2 + (\dot{C}_1 \dot{B}_{1K} + \dot{D}_1 \dot{D}_{1K}) \dot{D}_2. \quad (15)$$

Эти уравнения представляют линейную систему с четырьмя неизвестными ( $\dot{A}_{1K}$ ,  $\dot{B}_{1K}$ ,  $\dot{C}_{1K}$ ,  $\dot{D}_{1K}$ ), из которых только три являются независимыми. Систему (12)–(15) целесообразно свести к системе трех линейных уравнений с тремя неизвестными. Для этого достаточно уравнение (14) решить относительно  $C_{1K}$  и полученное соотношение поочередно подставить в (12), (13), (15). После незначительных преобразований с учетом того, что для линии без потерь и УПК постоянные являются величинами чисто вещественными и мнимыми, получаем систему трех алгебраических уравнений с вещественными коэффициентами.

$$\begin{aligned} \cos \lambda_2 A_{1K} - \sin \lambda_2 \cdot B_{1K} + 0 \cdot D_{1K} &= \cos \lambda_1 A_{19} + \sin \lambda_1 C_{19}, \\ \sin \lambda_2 \cos \lambda_2 A_{1K} + (\cos^2 \lambda_1 - \sin^2 \lambda_2) B_{1K} + \sin \lambda_1 \cos \lambda_1 D_{1K} &= \\ &= \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 B_{19} + \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 C_{19}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$0 \cdot A_{1K} - \sin \lambda_1 B_{1K} + \cos \lambda_1 D_{1K} = \cos \lambda_2 D_{19} + \sin \lambda_2 C_{19}.$$



По известным постоянным  $A_{1k}$ ,  $B_{1k}$ ,  $D_{1k}$  нетрудно подсчитать продольное емкостное сопротивление и поперечные проводимости

$$x_{34} = B_{1k}, \quad Y_{30} = \frac{1 - D_{1k}}{B_{1k}}, \quad Y_{40} = \frac{1 - A_{1k}}{B_{1k}}. \quad (17)$$

Расчет параметров УПК для второго участка производится по уравнениям аналогичным (16), (17).

Отметим, что положительной проводимости УПК соответствует емкость, отрицательной — индуктивность. Эта задача решена также для ДЛЭП с двумя ПС при компенсации произвольного числа участков.

## Приложение

### Расчет коэффициентов крутизны статических характеристик реактивной мощности по напряжению

Коэффициенты крутизны рассчитываются для конкретной схемы по известным параметрам режима.

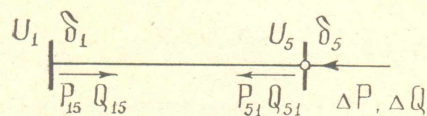


Рис. 2. К определению коэффициента  $\beta_{51}$

Для первого участка (рис. 1), изображенного на рис. 2 имеем следующие условия:  $U_1 = \text{const}$ ,  $U_5 = \text{var}$ . Фазу напряжения закрепляем в узле 5 ( $\delta_5 = \text{const}$ ), этот же узел принимается за балансирующий по активной мощности. Вследствие  $U_1 = \text{const}$  первый узел автоматически является балансирующим по реактивной мощности. Согласно принятым условиям, для этого участка справедливо матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial P_{15}}{\partial U_5} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \delta_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_{51}}{\partial U_5} & \frac{\partial P_{51}}{\partial \delta_1} & -1 \\ -1 & \frac{\partial Q_{15}}{\partial U_5} & \frac{\partial Q_{15}}{\partial \delta_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q_{51}}{\partial U_5} & \frac{\partial Q_{51}}{\partial \delta_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{15} \\ \Delta U_5 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta P_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta Q_{51} \end{bmatrix} \quad (\text{П-1})$$

Откуда

$$\beta_{51} = \frac{dQ_{51}}{dU_5} = \frac{-\partial P_{15}/\partial U_5 \cdot \partial Q_{51}/\partial \delta_1 + \partial P_{15}/\partial \delta_1 \cdot \partial Q_{51}/\partial U_5}{\partial P_{51}/\partial \delta_1}. \quad (\text{П-2})$$

Выражения активных и реактивных мощностей концов участка согласно принятым направлениям записываются

$$P_{15} = \frac{U_1 U_5}{B} \sin(\delta_1 - \delta_5), \quad Q_{51} = \frac{U_5^2 A}{B} - \frac{U_1 U_5}{B} \cos(\delta_5 - \delta_1). \quad (\text{П-3})$$



Дифференцируя выражения (П-3) по независимым переменным после незначительных преобразований получим:

$$\frac{\partial P_{15}}{\partial U_5} = \frac{P_{15}}{U_5}, \quad \frac{\partial P_{15}}{\partial \delta_1} = \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B}\right)^2 - P_{15}^2}, \quad (\text{П} - 4)$$

$$\frac{\partial Q_{51}}{\partial U_5} = \frac{2U_5 A}{B} - \frac{1}{U_5} \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B}\right)^2 - P_{15}^2}, \quad \frac{\partial Q_{51}}{\partial \delta_1} = P_{15}. \quad (\text{П} - 5)$$

Подставляя значения частных производных из (П-4), (П-5) в выражение (П-2) получаем коэффициент крутизны в следующем виде

$$\beta_{51} = -\frac{2U_5 A}{B} + \frac{U_1^2 U_5}{B^2} \left[ \left(\frac{U_1 U_5}{B}\right)^2 - P_{15}^2 \right]^{-1/2} \quad (\text{П} - 6)$$

В выражении (П-6) по сравнению с (П-2) взят обратный знак. Это соответствует направлению реактивной мощности  $Q_{51}$  в узел № 5, которое принято при изложении материала [см. рис. 1 и уравнение (6)]. Аналогичный вид имеет коэффициент крутизны второго участка.

$$\beta_{52} = -\frac{2U_5 D}{B} + \frac{U_2^2 U_5}{B^2} \left[ \left(\frac{U_2 U_5}{B}\right)^2 - P_{52}^2 \right]^{-1/2} \quad (\text{П} - 7)$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Е. Поспелов. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. Изд. «Высшая школа», Минск, 1967.
2. О. Б. Толыго. Определение волнового сопротивления и волновой длины компенсированных линий. «Изв. ТПИ», т. 82, Томск, 1956.
3. О. Б. Толыго. Степень компенсации параметров длинной линии. «Изв. ТПИ», т. 82, Томск, 1956.
4. О. Б. Толыго. О натуральном режиме компенсированных линий. «Изв. ТПИ», т. 82, Томск, 1956.
5. Т. Б. Заславская. О техническом пределе пропускной способности компенсированной линии электропередачи. Изв. Восточных филиалов АН СССР, № 3, 1957.
6. Р. И. Борисов. О возможности применения последовательной компенсации и пофазного управления на линиях межсистемной связи длиной до 1500 км. Изв. СО АН СССР, № 6, 1958.
7. Р. И. Борисов. Выбор оптимальных параметров компенсирующих устройств для длинной линии, связанной с промежуточными системами. Труды Т-Э института СО АН СССР, вып. № 14, 1962.
8. И. П. Сиуда. Параметры и расчет электрических режимов работы дальних передач переменного тока. Автореф. докт. дисс. Киев, 1966.
9. В. А. Веников, И. П. Сиуда. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. Изд. «Высшая школа», М., 1966.