

УДК 621.311.016.361

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.И. Готман, А.В. Глазачев

Томский политехнический университет

E-mail: alexg@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью увеличения пропускной способности магистральных электропередач сверхвысокого напряжения по условиям статической устойчивости.

Цель работы: обоснование и разработка методики выбора параметров компенсирующих устройств управляемых электропередач сверхвысокого напряжения с промежуточными системами для повышения пропускной способности по условиям статической устойчивости.

Методы исследования. Промежуточные энергосистемы, подключенные к дальним электропередачам сверхвысокого напряжения, представляются их обобщенными статическими характеристиками реактивной мощности по напряжению. Состояние энергосистемы описывается уравнениями установившегося режима, которые дополнены практическим критерием статической устойчивости.

Результаты: получено аналитическое решение задачи для выбора параметров компенсирующих устройств дальних электропередач с двумя промежуточными системами; приведены числовые примеры с иллюстрациями.

Ключевые слова:

Дальние электропередачи, промежуточные системы, компенсирующие устройства, натуральная мощность, статическая устойчивость, пропускная способность.

Введение и постановка задачи

Пропускной способности электропередач высокого и сверхвысокого напряжения 500...1150 кВ и возможностям её повышения по условиям статической устойчивости всегда уделялось большое внимание на стадии проектирования и эксплуатации электропередач. Решение этой задачи базируется как на использовании технических устройств, так и режимных мероприятий. Масштабное внедрение в энергосистемы технологий и быстродействующих устройств FACTS [1] на основе силовой полупроводниковой электроники существенно изменяет свойства электрических сетей и энергосистем и расширяет возможности их применения для более гибкого управления режимами и повышения пропускной способности указанных электропередач.

Наличие промежуточных систем (ПС), подключенных к дальним линиям электропередачи (ДЛЭП) сверхвысокого напряжения, вносит определенные особенности и ряд дополнительных требований. Прежде всего, необходимо учесть взаимное влияние дальних электропередач и ПС как на нормальные режимы, так и на устойчивость энергообъединения. Промежуточные системы вследствие естественного положительного регулирующего эффекта статических характеристик реактивной мощности оказывают стабилизирующее влияние на напряжение в узле присоединения к электропередаче и тем самым способствуют повышению устойчивости и увеличению пропускной способности энергообъединения. В работах [2, 3] показано, что для анализа установившихся режимов и оценки статической устойчивости электрические подсистемы могут быть представлены обобщенными статическими характеристиками актив-

ной и реактивной мощности по напряжению относительно узла их примыкания i : $P_i=P(U_i)$, $Q_i=Q(U_i)$.

Основная трудность в аналитическом решении задачи повышения пропускной способности ДЛЭП с ПС заключается в формировании условия граничного состояния по статической устойчивости. В [2] получена взаимосвязь между практическим критерием $d\Delta Q/dU$ и коэффициентами крутизны статических характеристик автономных подсистем ($\alpha_i=\partial P_i/\partial U_i$, $\beta_i=\partial Q_i/\partial U_i$), имеющих общую связь в узле i . Для выбора параметров компенсирующих устройств ДЛЭП вполне приемлемо пользоваться уравнениями без потерь. При этом допущении в качестве условия предельных по статической устойчивости режимов можно принять соотношение [4]:

$$d\Delta Q/dU \approx \sum_{i=1}^m \beta_i = 0, \quad (1)$$

где m – число автономных подсистем, примыкающих к узлу i .

Целью настоящей работы является исследование вопросов обеспечения требуемой пропускной способности ДЛЭП сверхвысокого напряжения с двумя промежуточными системами посредством применения управляемых компенсирующих устройств (рис. 1).

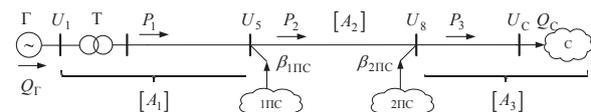


Рис. 1. Учет конечных устройств ДЛЭП

В работе [4] был обоснован учет параметров передающей станции и приемной системы при реше-

нии аналогичной задачи активными эквивалентными четырехполюсниками (рис. 1). В дальнейшем считаем, что реактансы концевых устройств введены со стороны генераторного конца в обобщенные постоянные первого четырехполюсника $[A_1]$ и со стороны приемного конца в четырехполюсник $[A_3]$. Этот подход не связан с какими-либо дополнительными допущениями и позволяет в последующем считать напряжения передающего и приемного концов электропередачи (рис. 1, 2) неизменными $U_1, U_2 = \text{const}$.

Расчет параметров промежуточных систем

Для использования благоприятного влияния ПС на статическую устойчивость энергосистемы необходимо резерв реактивной мощности в промежуточных системах возлагать на ближайшие к узлу замыкания генераторы. С уменьшением сопротивления связи между генераторами ПС и узлом её присоединения увеличивается коэффициент крутизны статических характеристик ($\beta_{ПС}$) и стабилизирующее действие ПС на напряжение в общем узле с ДЛЭП. Коэффициент крутизны является лишь условием реализации реактивной мощности присоединения и его влияние на предельные режимы электропередачи следует рассматривать во взаимосвязи с резервом реактивной мощности. Значительные сопротивления связи между генераторами ПС и узлом её присоединения с одной стороны приводит к существенному снижению $\beta_{ПС}$, с другой, – к «запиранию» реактивной мощности ПС. Эти недостатки позволяют устранить регулируемые источники реактивной мощности (ИРМ), которые могут подключаться как непосредственно в узле замыкания ПС, так и на стороне обмоток среднего или низкого напряжения трансформатора связи. Управляемые ИРМ позволяют статическим характеристикам ПС по реактивной мощности $Q_i = Q(U_i)$ искусственным путем придать желаемый закон; при этом крутизна статических характеристик ($\beta_{ПС}$) практически может быть доведена до требуемой величины. Увеличение параметров $\beta_{ПС}$ в идеале позволяет приблизить пропускную способность электропередачи к пропускной способности её наиболее протяженного участка. Рассмотрим выбор параметров управляемых ИРМ по условиям пропускной способности ДЛЭП с двумя промежуточными системами. Эту задачу можно условно разбить на два этапа, из которых первый сводится к нахождению необходимых значений $\beta_{ПС}$ из условия (1). Эти расчетные значения $\beta_{ПС}$ следует сопоставить с фактическими и обеспечить с помощью ИРМ необходимую коррекцию.

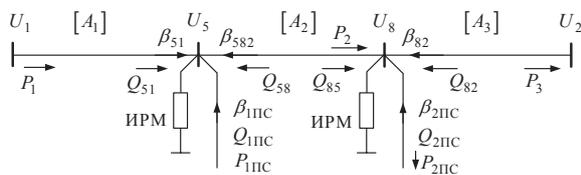


Рис. 2. Схема ДЛЭП с поперечными ИРМ в узле замыкания ПС

Для схемы (рис. 2) условию предельного по статической устойчивости режима соответствует уравнение, представленное относительно узла замыкания первой ПС,

$$\beta'_{51} + \beta'_{582} + \beta_{1ПС} = 0$$

или в развернутой форме:

$$\beta_{1ПС}\beta_{2ПС} + a_1\beta_{1ПС} + a_2\beta_{2ПС} + a_3 = 0. \quad (2)$$

Выражение β'_{51} для четырехполюсника $[A_1]$ находится прямым дифференцированием функционала

$$Q'_{51} = -\frac{U_5^2 A_{1Э}}{B_{1Э}} + \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{1Э}}\right)^2 - P_1'^2}$$

по напряжению U_5 при $U_1 = \text{const}$, т. е. $\beta'_{51} = \partial Q'_{51} / \partial U_5$, где $P_1' = P_1(1 + K_3)$, K_3 – коэффициент запаса передаваемой мощности P_1 по условиям статической устойчивости. Выражение β'_{582} является коэффициентом крутизны обобщенной статической характеристики реактивной мощности относительно узла U_5 для схемы, представленной четырехполюсниками $[A_2]$, $[A_3]$ и второй ПС. Выражение β'_{582} является достаточно громоздким; метод его расчета подробно описан в [2].

Из (2) следует, что предельный режим энергосистемы может быть обеспечен многообразием сочетаний $\beta_{1ПС}$ и $\beta_{2ПС}$. Для однозначности условий необходимо задаться соотношением значений $\beta_{1ПС}$ и $\beta_{2ПС}$, которое примем в форме $\beta_{2ПС} = K_\beta \beta_{1ПС}$. С учетом принятой связи уравнение (2) принимает вид квадратного уравнения относительно искомой переменной $\beta_{1ПС}$:

$$\beta_{1ПС}^2 + \beta_{1ПС}(a_1 + a_2 K_\beta) / K_\beta + a_3 / K_\beta = 0, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= a_4 + a_5 + a_6, \quad a_2 = a_7 + a_8 + a_9, \\ a_3 &= a_1 a_9 + a_5 a_7 + (a_7 + a_8)(a_4 + a_6), \\ a_4 &= -\frac{2U_8 A_2}{B_2}, \quad a_5 = \frac{U_8 U_5^2}{B_2^2} \left[\left(\frac{U_5 U_8}{B_2} \right)^2 - P_2'^2 \right]^{-0.5}, \\ a_6 &= -\frac{2U_8 D_3}{B_3} + \frac{U_8 U_2^2}{B_3^2} \left[\left(\frac{U_8 U_2}{B_3} \right)^2 - P_3'^2 \right]^{-0.5}, \\ a_7 &= -\frac{2U_5 D_2}{B_2}, \quad a_8 = \frac{U_5 U_8^2}{B_2^2} \left[\left(\frac{U_5 U_8}{B_2} \right)^2 - P_2'^2 \right]^{-0.5}, \\ a_9 &= -\frac{2U_5 A_1}{B_1} + \frac{U_5 U_1^2}{B_1^2} \left[\left(\frac{U_1 U_5}{B_1} \right)^2 - P_1'^2 \right]^{-0.5}, \end{aligned}$$

$P_i' = P_i(1 + K_3)$, K_3 – коэффициент запаса передаваемой мощности P_i участков по условиям статической устойчивости; A, B, D – обобщенные постоянные соответствующих четырехполюсников $[A_i]$.

Интересуемый параметр $\beta_{1ПС}$ находится посредством решения уравнения (3), а $\beta_{2ПС} = K_\beta \beta_{1ПС}$. Условие (2) может быть обеспечено воздействием на коэффициент крутизны только одной из ПС ($\beta_{1ПС}$), при этом для другой ПС величина ($\beta_{2ПС}$) остается

неизменной и принимается согласно её схемы и значений режимных параметров.

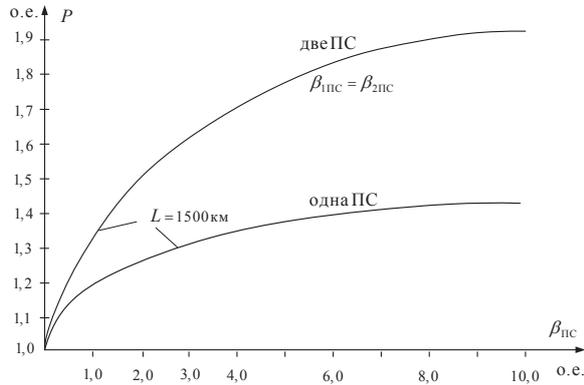


Рис. 3. Зависимость предела передаваемой мощности ДЛЭП от параметров ПС

На рис. 3 приведены результаты расчетов $P_{\text{пр}}=F(\beta_{\text{ПС}})$ согласно уравнению (3) для электропередачи протяженностью 1500 км с двумя промежуточными системами, расположенными с интервалом 500 км. Результаты представлены в относительных единицах на базе натуральной мощности и номинального напряжения ДЛЭП при условиях: $\beta_{2\text{ПС}}=\beta_{1\text{ПС}}$, $U_1=U_5=U_8=U_2=1$ и сбалансированных по активной мощности ПС, т. е. $P=P_1=P_2=P_3$. Для сравнения на рис. 3 представлена аналогичная зависимость для электропередачи 1500 км с одной ПС. Наибольшее возрастание предельных значений передаваемой мощности $P_{\text{пр}}=F(\beta_{\text{пр(расч)}})$ достигается в интервале $\beta_{\text{пр(расч)}}=0...4$; увеличение передаваемой мощности на интервале $\beta_{\text{пр(расч)}}=4...∞$ существенно ниже. Так, при двух ПС приращение мощности P на первом и втором интервалах расчетных значений $\beta_{\text{пр(расч)}}=0...4/4...∞$ находятся в соотношении 70/30 % и для одной ПС – 82/18 %. Естественные значения $\beta_{\text{ПС}}$ могут не обеспечивать требуемой пропускной способности. В этих условиях возможна их коррекция на величину $\Delta\beta_{\text{ПС}}=\beta_{\text{пр(расч)}}-\beta_{\text{ПС}}$, которая может быть обеспечена установкой управляемым ИРМ.

Воздействуя на параметры ПС, пропускную способность электропередачи можно приблизить к пределу наиболее протяженного участка ДЛЭП, что практически достигается для $\beta_{\text{ПС}}=4...7$; эти значения обеспечивают условия, близкие к $U_{\text{ПС}}=\text{const}$. В настоящее время при существующих устройствах FACTS [1] обеспечение условия $U_{\text{ПС}}=\text{const}$ является задачей не столько технического характера, сколько экономического плана.

Расчет параметров установок продольно-поперечной компенсации

Последующее увеличение передаваемой мощности по условиям статической устойчивости можно достичь делением участков электропередачи установками продольной компенсации [4, 5]. Применение этих средств позволяет практически передавать любые мощности на расстояния в несколько тысяч километров, но это связано со значительными затратами.

Задачу компенсации волновой длины и ограничения уровней напряжений необходимо решать одновременно. Режим электропередач является динамичным, что предопределяет наличие регулируемых компенсирующих устройств (КУ), позволяющих обеспечить равномерное распределение напряжения во всех режимах. В электропередачах с установками продольной компенсации (УПК) поперечные КУ выбираются по условиям ограничения напряжения на обкладках конденсаторов УПК в максимальном режиме.

Ниже рассматривается алгоритм выбора параметров УПК для ДЛЭП с двумя промежуточными системами на заданную пропускную способность по условиям статической устойчивости.

Схема 1

Для схемы (рис. 4) КУ установлены на трех участках. Для решения задачи необходимо иметь девять независимых уравнений (каждая УПК в общем случае содержит по три искомым параметра). В целях упрощения задача решается в два этапа.

На первом этапе система уравнений записывается не относительно искомым переменных $[A_{\text{КУ}}]$, а в функции эквивалентных обобщенных постоянных четырехполюсников $[A_{13}]$, $[A_{23}]$ и $[A_{33}]$ участков электропередачи. Для рассматриваемой схемы имеем следующую систему уравнений:

- выражения реактивной мощности для трех участков электропередачи; в частности для первого участка имеем:

$$Q_{15} = \frac{U_1^2 D_{13}}{B_{13}} - \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{13}}\right)^2 - P_1^2},$$

$$Q_{51} = -\frac{U_5^2 A_{13}}{B_{13}} + \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{13}}\right)^2 - P_1^2}, \quad (4)$$

для второго и третьего участков Q_{58} , Q_{85} , Q_{82} , Q_{28} имеют аналогичную структуру;

- условие предельного по статической устойчивости режима, которое запишем относительно узла примыкания к ДЛЭП первой ПС (рис. 2)

$$\beta_{51} + \beta_{582} + \beta_{1\text{ПС}} = 0; \quad (5)$$

- взаимосвязь параметров УПК первого, второго и третьего участков схемы

$$P_1 U_8 B_{13} = P_2 U_1 B_{23}, \quad P_1 U_2 U_8 B_{13} = P_3 U_1 U_5 B_{33}. \quad (6)$$

Выражение β_{51} в (5) находится прямым дифференцированием выше представленного функционала $Q_{51}=F_{51}(U_5)$ по напряжению U_5 при $U_1=\text{const}$, т. е. $\beta_{51}=\partial Q_{51}/\partial U_5$.

Естественным образом можно написать только семь первых уравнений. Задача, как видно, является неопределенной, поскольку условию (5) соответствует многообразие сочетаний параметров первой, второй и третьей УПК. Для однозначности решения необходима взаимосвязь параметров указанных УПК, в качестве которой принято условие равенства сдвига фаз векторов напряжений \vec{U}_1 и \vec{U}_5 ,

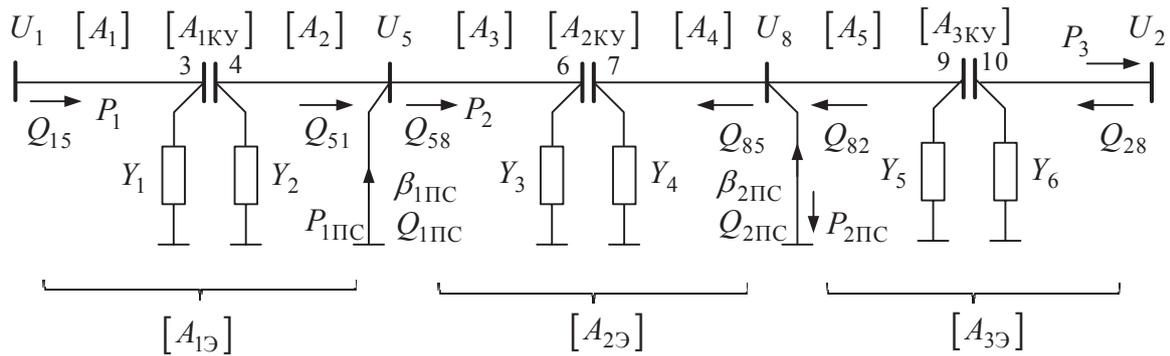


Рис. 4. Схема ДЛЭП с продольно-поперечными компенсирующими устройствами

\dot{U}_5 и \dot{U}_8 , \dot{U}_8 и \dot{U}_2 , т. е. $\delta_{15}=\delta_{58}=\delta_{82}$, представленное в форме (6). Благодаря принятой связи схема с заведомо несимметричными плечами относительно узла подключения ПС после компенсации становится симметричной, при этом учитывается не только схемная, но и режимная несимметрия [4, 6]. Известно, что симметричные схемы имеют значительные преимущества перед несимметричными. Во-первых, имеет место более равномерное распределение напряжения, такие схемы проще в эксплуатации и имеют меньшие потери. Во-вторых, расположение ПС в электрическом центре создает условия, при которых с наибольшей эффективностью проявляется её благоприятное воздействие на режим электропередачи в целом.

Совместное решение ранее сформированной системы уравнений позволяет найти эквивалентные обобщенные постоянные четырехполюсников всех частей электропередачи, в частности для первой части ДЛЭП:

$$B_{1Э} = \frac{U_1 U_5}{\sqrt{2P_1(1+K_3)}} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + 4P_1^2}}}, \quad (7)$$

$$A_{1Э} = \left[\sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{1Э}}\right)^2 - P_1^2 - Q_{51}} \right] \frac{B_{1Э}}{U_5^2},$$

$$D_{1Э} = \left[\sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{1Э}}\right)^2 - P_1^2 + Q_{15}} \right] \frac{B_{1Э}}{U_1^2} \quad (8)$$

при

$$a_0 = -U_5 \beta_{51} + 2Q_{51}, \quad \beta_{51} = -p + \sqrt{p^2 - q}, \quad (9)$$

где

$$p = b_1 [b_2 + b_3 K_{31P} + K_{21P} (b_5 - K_{31P} Q_{51})],$$

$$q = -4b_1 \left[\frac{b_2 Q_{58} + K_{31P} Q_{51} (b_3 + Q_{51})}{-b_4 + K_{21P} Q_{51} (b_5 + Q_{51})} \right] / U_5,$$

$$b_1 = 1 / (K_{21P} + K_{31P} + K_{21P} K_{31P}) U_{51},$$

$$b_2 = Q_{82} - Q_{85} + 0,5 U_8 \beta_{2ПС},$$

$$b_3 = -Q_{58} - Q_{51} + 0,5 U_5 \beta_{1ПС},$$

$$b_4 = 0,5 U_5 \beta_{1ПС} b_2 - P_2^2, \quad b_5 = b_2 + b_3 - K_{31P} Q_{51},$$

$$K_{21P} = P_2 / P_1, \quad K_{31P} = P_3 / P_1.$$

Параметры $B_{2Э}$ и $B_{3Э}$ определяются из (6), коэффициенты четырехполюсников $A_{2Э}$, $D_{2Э}$ и $A_{3Э}$, $D_{3Э}$ по виду аналогичны $A_{1Э}$ и $D_{1Э}$ и находятся из выражений реактивной мощности, записанных для второй и третьей частей ДЛЭП Q_{58} , Q_{85} и Q_{82} , Q_{28} .

Значения реактивных мощностей в уравнениях (4), (8) определяются из условия ограничения напряжений на обкладках конденсаторов УПК балансирующими реактивными мощностями участков 1-3, 4-5, 5-6, 7-8, 8-9, 10-2, в частности для участка 4-5, ограниченного узлами 4 и 5, имеем:

$$Q_{51} = -\frac{U_5^2 A_2}{B_2} + \sqrt{\left(\frac{U_4 U_5}{B_2}\right)^2 - P_1^2}. \quad (10)$$

Наилучшее использование УПК достигается при равных напряжениях на обеих сторонах батареи. Это дает возможность получить от УПК наибольший фазоповоротный эффект ($\delta_{УПК}$). При расчетах по формулам типа (10) напряжения U_3 , U_4 , U_6 , U_7 , U_9 , U_{10} следует принимать равными $(1...1,05)U_{НОМ}$.

Следующий этап состоит в расчете параметров собственно УПК. Для обобщенных постоянных первой части электропередачи справедливо следующее матричное соотношение:

$$[\dot{A}_{1Э}] = [\dot{A}_1][\dot{A}_{1КУ}][\dot{A}_2],$$

из которого после соответствующих преобразований с учетом того, что для линии без потерь и УПК постоянные четырехполюсников являются величинами чисто вещественными или мнимыми, получаем систему трех алгебраических уравнений с вещественными коэффициентами относительно искомых переменных $A_{1КУ}$, $B_{1КУ}$, $D_{1КУ}$ [4]:

$$A_2 A_{1КУ} - C_2 B_{1КУ} = A_{1Э} D_1 + C_{1Э} B_1,$$

$$B_2 A_2 A_{1КУ} + M_0 B_{1КУ} + B_1 D_1 D_{1КУ} = B_{1Э} D_1 A_2 + C_{1Э} B_1 B_2,$$

$$-C_1 B_{1КУ} + D_1 D_{1КУ} = D_{1Э} A_2 + C_{1Э} B_2,$$

где $M_0 = A_1 D_1 - B_2 C_2$, $C_{1Э} = (1 - A_{1Э} D_{1Э}) / B_{1Э}$.

Расчет параметров УПК для второй и третьей частей электропередачи производится по аналогичным уравнениям.

УПК имеют собственный предел передаваемой мощности, который достигается для $\delta_{КУ} = 90^\circ$. При значительной степени компенсации следует осу-

шестнадцать проверку $B_{кв} \leq B_1, B_2$, чтобы значение $B_{кв}$ каждой УПК не превосходило соответствующих параметров участков ДЛЭП.

Схема 2

В этой схеме (рис. 2) УПК установлены в первой и третьей частях электропередачи. Как и раньше, в качестве условия связи параметров УПК принято $\delta_{15} = \delta_{82}$. Полученные для схемы 1 расчетные выражения B_{19}, A_{19}, D_{19} согласно (7), (8) остаются в силе. Основное отличие состоит в расчете коэффициентов p и q выражения (9), которые записываются так:

$$p = \frac{a_{11}K_{31P}U_5 + a_{12}}{2U_5K_{31P}}, \quad q = \frac{a_{11}a_{12} - a_5a_8U_8}{U_5K_{31P}},$$

где

$$a_{10} = 2(Q_{82} - K_{31P}Q_{51}), \quad a_{11} = (a_7 + a_8 + \beta_{1ПС}),$$

$$a_{12} = U_8(a_4 + a_5 + \beta_{2ПС}) + a_{10}, \quad a_4, a_5, a_7, a_8$$

остаются теми же, что и в (3).

Для третьего участка из (6) имеем:

$$B_{3Э} = \frac{U_2U_8B_{19}}{U_1U_5K_{31P}};$$

обобщенные постоянные $A_{3Э}, D_{3Э}$ рассчитываются по тем же выражениям, что и для схемы 1.

Схема 3

В этой схеме УПК установлены только на средней части электропередачи (рис. 2), для которой имеем:

$$B_{2Э} = \frac{U_5U_8}{\sqrt{2P_2(1 + K_3)}} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + 4P_2^2}}},$$

где

$$a_0 = \frac{c_3 + c_4 + 4P_2^2}{c_1 + c_2 - 2(Q_{58} + Q_{85})}, \quad c_1 = U_5\beta_5, \quad c_2 = U_8\beta_8,$$

$$c_3 = 2Q_{58}(c_2 - Q_{85}), \quad c_4 = 2Q_{85}(c_1 - Q_{58}),$$

$$\beta_5 = \beta'_{51} + \beta_{ПС} = a_9 + \beta_{1ПС}, \quad \beta_8 = \beta'_{82} + \beta_{2ПС} = a_6 + \beta_{2ПС}.$$

На рис. 5 приведены результаты расчетов УПК для электропередачи протяженностью 1500 км с двумя промежуточными системами, делящими ДЛЭП на три участка протяженностью 500 км.

За основу принята схема 1 (рис. 4), в которой ПС считается сбалансированной по активной мощности. Определяющими параметрами в расчетах являются продольное емкостное сопротивление $X_{кв}$ и поперечная проводимость Y УПК. В силу симметрии схемы параметры всех УПК одинаковы. Результаты $X_{кв}, Y = F(P_{пр})$ представлены в относительных единицах на базе натуральной мощности и номинального напряжения ДЛЭП при условиях $\beta_{2ПС} = \beta_{1ПС}, U_1 = U_5 = U_8 = U_2 = 1$ для различных значений коэффициентов крутизны $\beta_{ПС}$ промежуточных систем. При увеличении параметра $\beta_{ПС}$,

отражающего «жесткость» поддержания напряжения в узле подключения ПС, естественно, требуется меньшая степень продольной компенсации для обеспечения одного и того же значения $P_{пр}$. Для рассматриваемых условий поперечные элементы на УПК носят емкостный характер на всем интервале возможной пропускной способности ДЛЭП, которая при $\beta_{ПС} \approx 5$ достигает $P_{пр} = 3,86P_{нат}$. Поперечные емкостные установки поднимают напряжение на УПК, доводя его до принятого расчетного уровня $U=1$. Поэтому целесообразно отказаться от поперечных емкостных КУ; при этом для достижения желаемой пропускной способности потребуются некоторое увеличение степени продольной компенсации. Для этого необходимо провести дополнительный расчет параметров продольной компенсации [4].

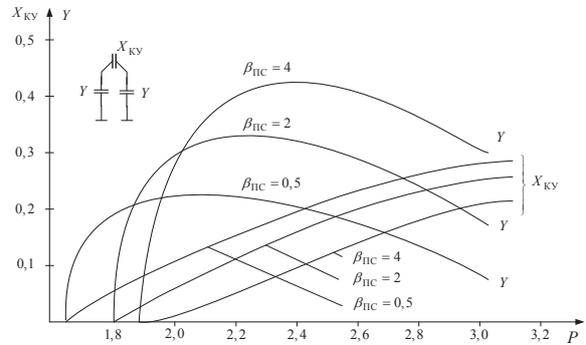


Рис. 5. Зависимости параметров УПК электропередачи 1500 км с двумя ПС

Выводы

Предложена методика расчета параметров компенсирующих устройств высоковольтной электропередачи с двумя промежуточными системами для повышения пропускной способности по условиям статической устойчивости. Благодаря эквивалентному представлению промежуточных систем удалось существенно сократить размерность математической системы уравнений и получить аналитическое решение поставленной задачи.

Промежуточные системы повышают пропускную способность электропередач и обеспечивают устойчивую параллельную работу энергосистем, связанных линиями с волновой длиной более 90° . Две промежуточные системы, расположенные симметрично, могут обеспечить пропускную способность в пределах натуральной мощности при длинах 1800...2400 км.

Наиболее интенсивное возрастание предельной мощности по условиям статической устойчивости имеет место при увеличении коэффициента крутизны промежуточных систем в интервале 0,5...4,0; при $\beta_{ПС} = 4,0$ пропускная способность электропередачи достигает 75...80 % пропускной способности участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройства FACTS в ЕНЭС России // Прил. 1 к распоряжению от 22.01.2009 № 22р. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009. – 31 с.
2. Готман В.И., Маркман Г.З. Обобщенные статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 131–134.
3. Готман В.И., Глазачев А.В. Эквивалентирование энергосистем для оценки статической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 152–155.
4. Готман В.И., Глазачев А.В., Бацева Н.Л. Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 68–75.
5. Готман В.И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчета установившихся режимов энергосистем // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 134–138.
6. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.

Поступила 25.05.2013 г.

UDC 621.311.016.361

CALCULATION OF PARAMETERS OF COMPENSATING DEVICES OF CONTROLLED ULTRAHIGH VOLTAGE POWER LINES WITH INTERMEDIATE SYSTEMS

V.I. Gotman, A.V. Glazachev

Tomsk Polytechnic University

The relevance of the study is caused by the necessity to enlarge transfer capacity of the main ultrahigh voltage power transmission under static stability terms.

The aim of the study: to substantiate and to develop the procedure for selecting the compensating device parameters of controlled ultrahigh voltage power transmissions with the intermediate systems to increase the transfer capacity under static stability terms.

The methods of the study is The intermediate energy systems connected to the distant ultrahigh voltage transmission are represented by their voltage generalized static characteristics of reactive power. The power system condition is described by the steady state equations which are complemented by practical criteria of static stability.

Results: the analytic solution of the problem for selecting the options of the compensating devices of distant electric power with two intermediate systems were obtained; the numerical examples were shown and illustrated.

Key words:

Long-distance power line, intermediate systems, compensating units, line natural load, steady-state stability, transfer capacity.

REFERENCES

1. *Metodika otsenki tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya ustroystva FACTS v ENES Rossii* (The technique for estimating technical-and-economic efficiency of applying FACTS in UNPG of Russia). Application № 1, 22.01.2009, № 22r. Moscow, FSK EES, 2009. 31 p.
2. Gotman V.I., Markman G.Z. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007. 311, 4, pp. 131–134.
3. Gotman V.I., Glazachev A.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010. 316, 4, pp. 152–155.
4. Gotman V.I., Glazachev A.V., Batseva N.L. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011. 319, 4, pp. 68–75.
5. Gotman V.I. *Bulletin of the Tomsk polytechnic University*, 2007. 311, 4, pp. 134–138.
6. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoichivosti elektricheskikh sistem* (The issues of electric system stability). Moscow, Energiya, 1979. 455 p.