

вращения ротора обеспечивают $M_{вр} > M_{тр}$ при скоростях ветрового потока $V_{в} \geq 0,5$ м/с (рис. 3). Получены конструкции роторов, обеспечивающие устойчивое соотношение $M_{вр} > M_{тр}$ при любых (рис. 2) угловых α_k положениях лопастей относительно направления ветрового потока.

Практические результаты исследований представлены на Всероссийских НТК; разработка авто-ров получила аккредитацию в программе Всероссийского научно-инновационного конкурса.

Выводы

1. В регионах с характерными для материковых зон умеренными ветровыми потоками и многолепестковой розой ветров применение гигантских пропеллеров в качестве двигателей ветро-электрических установок нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветроэнергетика // Wikipedia. 2011. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/ветроэнергетика> (дата обращения: 03.04.2011).
2. Солоницын А.Г. Второе пришествие ветроэнергетики // Архив журнала «Наука и жизнь». № 3, 2004. URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/4310> (дата обращения: 3.04.2011).

2. В многоканальных структурах экологических систем электроснабжения наибольшей среднегодовой эффективностью обладают природные электрогенераторы с лучшим показателем *непрерывности* поставки электроэнергии в аккумулятор.
3. Практически *непрерывную* среднегодовую работу в экологических системах электроснабжения обеспечивают ветроэнергетические установки с вертикальным ротором при оптимизации: габаритов; числа и формы лопастей; опор подвеса ветродвигателя.
4. Основным критерием оптимизации ветроэнергетических установок с горизонтальной плоскостью вращения лопастей является максимум отношения момента вращения ротора к моменту его трогания при любых углах направления ветрового потока на лопасти ветродвигателя.

3. Ветроагрегат: пат. 2276284 Рос. Федерация. № 2004124659/06; заявл. 12.08.04; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 14. — 2 с.
4. Устройство ориентирования датчиков в геофизических приборах: авт. свид. 1346772 СССР. № 3986259/22—03; заявл. 09.12.85; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39. — 3 с.

Поступила 26.09.2009 г.

УДК 621.311.016.361

ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.И. Готман, А.В. Глазачев, Н.Л. Бачева

Томский политехнический университет

E-mail: alexg@tpu.ru

Рассматривается методика выбора параметров компенсирующих устройств дальних электропередач сверхвысокого напряжения с промежуточными системами с целью повышения пропускной способности по условиям статической устойчивости. Для решения задачи предложено промежуточную и приемную систему представлять эквивалентными параметрами. Приводится методика эквивалентирования приемной системы. Показано, что для аналитического решения задачи критерий статической апериодической устойчивости целесообразно представлять на основе коэффициентов крутизны обобщенных статических характеристик реактивной мощности энергосистем по напряжению.

Ключевые слова:

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

Key words:

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

Введение и постановка задачи

Несмотря на большое число глубоких и обширных работ по управлению режимами и повышению пропускной способности дальних линий электропередач (ДЛЭП) сверхвысокого напряжения, думается, что особенности, которые накладывают промежуточные системы (ПС), не позволяют считать эти вопросы исчерпанными. Разработанное в последние годы новое поколение управляемых шун-

тирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов и конденсаторных батарей существенно расширяет возможности их применения для более гибкого управления режимами и повышения пропускной способности указанных электропередач.

Пропускная способность электропередач является технико-экономической категорией. Повышение пропускной способности требует дополни-

тельных затрат на специальные компенсирующие устройства, средства автоматического регулирования и управления, дополнительные изменения схем и их параметров. Технические решения этой задачи должны быть направлены на то, чтобы требуемая пропускная способность была обеспечена с минимально возможными затратами. Перечисленные средства повышения пропускной способности весьма различны как по эффективности их действия, так и экономическим показателям. По общим характеристикам их можно отнести к двум основным группам.

К первой группе относятся средства автоматического управления и регулирования. Их применение не требует значительных затрат, но и не обеспечивает решение проблемы для линий электропередачи длиной более 700...800 км [1].

Ко второй группе относятся компенсирующие и настраивающие устройства, дополнительные изменения схем и их параметров. Применение средств этой группы позволяет передавать практически любые мощности на расстояния в несколько тысяч километров, но это связано со значительными затратами.

Исследование вопросов обеспечения требуемой пропускной способности ДЛЭП с промежуточными системами посредством продольной емкостной компенсации является целью настоящей работы.

Промежуточные системы, подключенные к дальним линиям электропередачи сверхвысокого напряжения 500, 750 кВ и выше, в значительной степени усложняют решение поставленной задачи, внося 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. Вследствие естественного положительного регулирующего эффекта статических характеристик реактивной мощности промежуточных систем они стабилизируют напряжение в узле присоединения и тем самым способствуют повышению устойчивости энергообъединения и увеличению передаваемой мощности по дальней электропередаче. Промежуточные системы в силу объективных условий в общем случае делят ДЛЭП на неравные участки и её пропускную способность по условиям статической устойчивости следует оценивать коэффициентами запаса (K_3) по каждому участку.

Основная трудность в решении задачи выбора параметров компенсирующих устройств (КУ) заключается в формировании условия граничного состояния по статической устойчивости. Равенство нулю свободного члена характеристического уравнения (a_n) в матричном виде для прямого аналитического решения задачи неприемлемо вследствие высокого порядка матрицы. Так для ДЛЭП с одной установкой продольной компенсации (УПК) и одной ПС, состоящей из нагрузочного узла и генераторной станции, порядок матрицы a_n равен 14.

В работах [2, 3] показано, что для анализа установившихся режимов электрические подсистемы наиболее просто и вместе с тем строго могут быть представлены обобщенными статическими характеристиками активной и реактивной мощностей по напряжению относительно узла примыкания i : $P_i = P(U_i)$, $Q_i = Q(U_i)$. Представление промежуточных систем обобщенными статическими характеристиками позволяет на определенном этапе решения задачи выбора параметров КУ отвлечься от конкретной структуры и содержания и в обобщенной форме учесть их реакцию на изменение режима ДЛЭП через обменные потоки активной и реактивной мощностей и коэффициенты крутизны статических характеристик $\alpha_i = \partial P_i / \partial U_i$, $\beta_i = \partial Q_i / \partial U_i$.

Предельный режим энергосистемы по устойчивости наряду с условием $a_n = 0$ может быть определен на основе практического критерия $d\Delta Q / dU = 0$ [4]. В [2] получена взаимосвязь между практическим критерием $d\Delta Q / dU$ и коэффициентами крутизны статических характеристик автономных подсистем, имеющих общую связь в узле j . В общем, если к узлу j примыкает m подсистем, то

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

где коэффициент $\eta = \partial Q / \partial P$ рассчитывается для той подсистемы, в которой содержится балансирующий по активной мощности узел.

Коэффициенты крутизны α_i обусловлены регулирующими эффектами статических характеристик активной мощности нагрузочных узлов и активными сопротивлениями элементов системы. Для выбора параметров КУ электропередач вполне приемлемо пользоваться уравнениями без потерь,

что позволяет пренебречь слагаемым $\eta \sum_{i=1}^m \alpha_i$ уравнения (1) и в качестве условия предельных по статической устойчивости режимов принять:

$$\sum_{i=1}^m \beta_i = 0. \quad (2)$$

Учет параметров передающей станции и приемной системы

Уравнение (2) предполагает математическую запись коэффициентов крутизны β для отдельных элементов и частей дальней электропередачи. Наиболее просто выражение β для четырехполюсника может быть записано при условии, что к одному из его концов приложено неизменное напряжение $U = \text{const}$.

Для соблюдения этого условия обратимся к учету параметров передающей станции и приемной системы (рис. 1). Современные автоматические регуляторы возбуждения генераторов обеспечивают постоянство напряжения на его выводах $U_f = \text{const}$. Параметры реактора выбираются из условия баланса реактивной мощности для обеспечения желаемого уровня напряжения U , т. е.

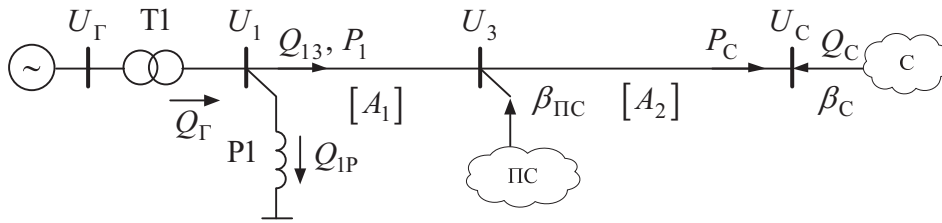


Рис. 1. Учет конечных устройств ДЛЭП

$$Q_{1P} = P_1(\operatorname{tg} \varphi_r - \operatorname{tg} \varphi_{13}),$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varphi_{13} = Q_{13}/P_1, \quad Q_{13} = \frac{U_1^2 D_1}{B_1} - \sqrt{\left(\frac{U_1 U_3}{B_1}\right)^2 - P_1^2}$$

и, следовательно, $y_{1P} = Q_{1P}/U_1^2$. Коэффициенты B_1 и D_1 являются обобщенными постоянными четырехполюсника $[A_1]$. Желаемый уровень U_1 может быть обеспечен регулировочными способностями генераторов; при этом выполняется условие $\operatorname{tg} \varphi_r = \operatorname{tg} \varphi_{13}$ и реактора не требуется.

В соответствии со сказанным выше обобщенные постоянные четырехполюсника, расположенного между узлами U_r и U_3 схемы (рис. 1), должны представлять эквивалент параметров трансформатора (Т1), реактора (Р1) при его наличии и участка ДЛЭП, представленного параметрами четырехполюсника $[A_1]$.

Аналогичные условия могут иметь место со стороны приемного конца электропередачи. Если $U_c \neq \text{const}$, то приемную систему можно характеризовать коэффициентом крутизны β_c её статической характеристики по реактивной мощности $Q_c = Q(U_c)$, обменными потоками активной P_c и реактивной Q_c мощности для интересующего режима. По известным параметрам P_c , U_c , Q_c , β_c приемную систему можно представить эквивалентом в виде продольного реактанса x_c , за которым приложена неизменная ЭДС $E_c = \text{const}$ [5]. Для указанного эквивалента имеем следующие соотношения:

$$Q_c = -\frac{U_c^2}{x_c} + \sqrt{\left(\frac{E_c U_c}{x_c}\right)^2 - P_c^2},$$

$$\beta_c = \frac{dQ_c}{dU_c} = -\frac{2U_c}{x_c} + \frac{U_c E_c}{x_c^2} \left[\left(\frac{E_c U_c}{x_c}\right)^2 - P_c^2 \right]^{-0,5}.$$

Совместное решение этих уравнений позволяет найти интересующие параметры эквивалента:

$$x_c = \frac{U_c^3 \beta_c}{2(P_c^2 + Q_c^2 - Q_c U_c \beta_c)} \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4(P_c^2 + Q_c^2 - Q_c U_c \beta_c)}{(U_c \beta_c)^2}} \right],$$

$$E_c = \frac{1}{U_c} \sqrt{U_c^2 (U_c^2 + 2Q_c x_c) + x_c^2 (P_c^2 + Q_c^2)}.$$

Значение коэффициента β_c в этих выражениях считается известным и определяется для эквивалентированной системы методом численного дифференцирования [5]. Реактанс x_c необходимо ввести в обобщенные постоянные примыкающего четырехполюсника и U_c заменить на E_c .

Проведенные приемы не связаны с какими-либо дополнительными допущениями и позволяют в последующем считать напряжения передающего и приемного концов электропередачи неизменными.

Расчет параметров установок продольной и поперечной компенсации

При заданной длине ДЛЭП и передаваемой мощности P число УПК должно быть минимальным. Расчет параметров УПК и соответствующей поперечной компенсации зависит от схем включения УПК. Значительное число КУ в сочетании с их последовательностью включения и места установки предопределяет многообразие схем с одинаковой пропускной способностью. Окончательный выбор схемы следует осуществлять в соответствии с экономической эффективностью рассматриваемых вариантов.

Задачу компенсации волновой длины и ограничения уровней напряжений необходимо решать одновременно в отличие от ДЛЭП без ПС, где эти условия могут рассматриваться независимо и решаться последовательно. Режим электропередачи является динамичным, что предопределяет наличие регулируемых КУ, позволяющих обеспечить равномерное распределение напряжения во всех режимах. В электропередачах с УПК поперечные реакторы выбираются по условиям ограничения напряжения на обкладках конденсаторов УПК в максимальном режиме.

Ниже рассматривается алгоритм выбора параметров УПК для ДЛЭП с одной промежуточной системой на заданную пропускную способность по условиям статической устойчивости с учетом распределения напряжения.

Схема 1

Для принятой схемы (рис. 2) необходимо иметь шесть 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, а в функции эквивалентных обобщенных постоянных че-

тырехполюсников первого $[\dot{A}_{19}]$ и второго $[\dot{A}_{23}]$ участков электропередачи:

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

$$\begin{aligned} Q_{52} &= -\frac{U_5^2 D_{23}}{B_{23}} + \sqrt{\left(\frac{U_2 U_5}{B_{23}}\right)^2 - P_2^2}, \\ Q_{25} &= \frac{U_2^2 A_{23}}{B_{23}} - \sqrt{\left(\frac{U_2 U_5}{B_{23}}\right)^2 - P_2^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\beta_{51} + \beta_{52} + \beta_{\text{ПС}} = 0, \quad (5)$$

$$P_1 U_2 B_{19} = P_2 U_1 B_{23}. \quad (6)$$

Естественным образом можно написать только пять первых уравнений, из которых пятое (5) является условием предельного по статической устойчивости режима. Выражения β_{51} , β_{52} находятся прямым дифференцированием выше представленных функционалов $Q_{51}=F_{51}(U_5)$, $Q_{52}=F_{52}(U_5)$ по напряжению U_5 при U_1 , $U_2=\text{const}$, т. е.

$$\beta_{51} = \partial Q_{51} / \partial U_5, \quad \beta_{52} = \partial Q_{52} / \partial U_5.$$

Считаем, что реактансы концевых устройств введены со стороны генераторного конца в обобщенные постоянные первого четырехполюсника $[\dot{A}_1]$ и со стороны приемного конца в четырехполюсник $[\dot{A}_4]$.

Задача, как видно, является неопределенной, поскольку условию (5) соответствует многообразие сочетаний параметров первой и второй УПК. Для однозначности решения необходима взаимосвязь параметров первой и второй УПК, в качестве которой принято условие равенства сдвига фаз векторов напряжений $\dot{U}_1$, $\dot{U}_5$ и $\dot{U}_5$, $\dot{U}_2$, т. е. $\delta_{15}=\delta_{52}$, 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 несимметрия, но и режим-

ная посредством параметров U_1 , U_2 , P_1 , P_2 . В частном случае при $P_1=P_2$ и $U_1=U_2$ имеем равные значения эквивалентных параметров $B_{19}=B_{23}$. 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 [1]. Во-вторых, расположение ПС в электрическом центре создает условия, при которых с наибольшей эффективностью проявляется её благоприятное воздействие на режим электропередачи в целом.

В уравнениях (3)–(5) не учтены коэффициенты запаса статической устойчивости, которые будут рассмотрены несколько ниже.

Значения реактивных мощностей в левых частях уравнений (3), (4) определяются из условия ограничения напряжений на обкладках конденсаторов УПК балансирующими реактивными мощностями участков 1–3, 4–5, 5–6, 7–2, в частности,

$$Q_{51} = -\frac{U_5^2 A_2}{B_2} + \sqrt{\left(\frac{U_4 U_5}{B_2}\right)^2 - P_1^2}. \quad (7)$$

Наилучшее использование УПК достигается при равных напряжениях на обеих сторонах батареи. Это дает возможность получить от УПК наибольший фазоповоротный эффект ($\delta_{\text{УПК}}$). При расчетах по формулам типа (7) напряжения U_3 , U_4 , U_6 , U_7 следует принимать равными $(1...1,05) U_{\text{НОМ}}$.

Совместное решение уравнений (3)–(6) позволяет найти эквивалентные обобщенные постоянные четырехполюсников обеих частей электропередачи:

$$B_{19} = \frac{U_1 U_5}{\sqrt{2} P_1} \sqrt{1 + \frac{a_0^2}{a_0^2 + 4 P_1^2}}, \quad (8)$$

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

$$D_{19} = \left[\sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - P_1^2} + Q_{15} \right] \frac{B_{19}}{U_1^2}, \quad B_{23} = \frac{U_2 B_{19}}{U_1 K_p}, \quad (9)$$

где

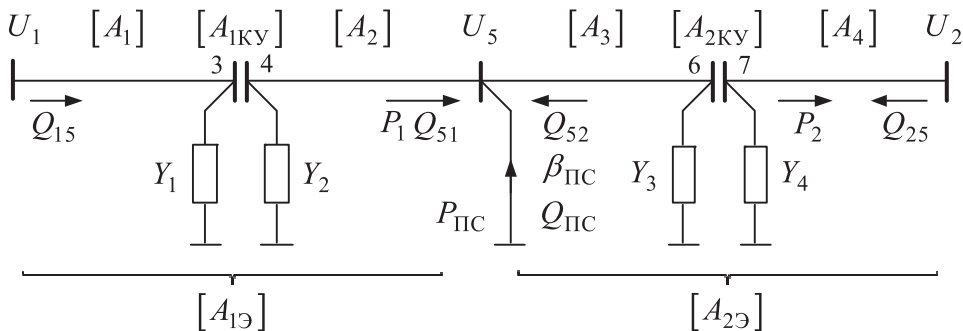


Рис. 2. Схема ДЛЭП с продольно-поперечными компенсирующими устройствами

$$K_p = P_2 / P_1, \quad a_0 = \frac{U_5 \beta_{\text{ПС}} + 2(Q_{52} + Q_{51})}{1 + K_p}. \quad (10)$$

Выражения A_{23} и D_{23} по виду аналогичны A_{13} и D_{13} и находятся из (4).

Уравнение (8), записанное в форме

$$B_{13} = \frac{U_1 U_5}{P_1} K_{\text{ЖЕСТК}} = \frac{U_1 U'_5}{P_1}, \quad (11)$$

где $K_{\text{ЖЕСТК}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + 4P_1^2}}}$, совпадает с об-

щезвестным выражением расчета обобщенной постоянной компенсированной ДЛЭП без промежуточной системы, которое с учетом коэффициента запаса K_3 по статической устойчивости применительно к нашим обозначениям запишется так:

$$B_{13} = \frac{U_1 U_5}{P_1} \sin \delta_{15} = \frac{U_1 U_5}{P_1 (1 + K_3)}. \quad (12)$$

где K_3 — коэффициент запаса по статической устойчивости.

$K_{\text{ЖЕСТК}}$ — выражение, которое по физическому смыслу можно назвать коэффициентом жесткости регулирования напряжения U_5 . Он отражает то обстоятельство, что напряжение U_5 хотя и стабилизируется регулирующим эффектом промежуточной системы, но в силу конечности $\beta_{\text{ПС}}$ значение U_5 не остается постоянным. Если представить, что ПС имеет астатическую характеристику реактивной мощности по напряжению, т. е. $\beta_{\text{ПС}} \rightarrow \infty$, то этому соответствует $K_{\text{ЖЕСТК}} = 1$, и напряжение в узле подключения ПС остается неизменным для любого режима $U_5 = \text{const}$. В этом предельном случае ДЛЭП с промежуточной системой распадается на два независимых участка, а уравнение (8) вырождается в (12).

Из сопоставления выражения (8) или (11) с (12) следует, что параметр B_{13} с учетом коэффициента запаса статической устойчивости запишется так:

$$B_{13} = \frac{U_1 U_5}{\sqrt{2} P_1 (1 + K_3)} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + 4P_1^2}}}. \quad (13)$$

Согласно связи B_{13} и B_{23} по (9) с соответствующим коэффициентом запаса выбираются параметры КУ и второй половины ДЛЭП.

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

$$[\dot{A}_{13}] = [\dot{A}_1][\dot{A}_{1\text{КУ}}][\dot{A}_2],$$

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 $A_{1\text{КУ}}, B_{1\text{КУ}}, D_{1\text{КУ}}$:

$$A_2 A_{1\text{КУ}} - C_2 B_{1\text{КУ}} = A_{13} D_1 + C_{13} B_1,$$

$$B_2 A_2 A_{1\text{КУ}} + M_0 B_{1\text{КУ}} + B_1 D_1 D_{1\text{КУ}} = B_{13} D_1 A_2 + C_{13} B_1 B_2, \quad (14)$$

$$-C_1 B_{1\text{КУ}} + D_1 D_{1\text{КУ}} = D_{13} A_2 + C_{13} B_2,$$

где $M_0 = A_1 D_1 - B_2 C_2$, $C_{13} = (1 - A_{13} D_{13}) / B_{13}$.

Расчет параметров УПК для второй половины электропередачи производится по аналогичным уравнениям.

УПК имеют собственный предел передаваемой мощности, который достигается для $\delta_{\text{КУ}} = 90^\circ$. При значительной степени компенсации следует осуществлять проверку $B_{\text{КУ}} \leq B_1, B_2$, чтобы значение $B_{\text{КУ}}$ каждой УПК не превосходило соответствующих параметров участков ДЛЭП. С другой стороны собственно УПК и участки обладают своим пределом передаваемой мощности, и он должен быть не менее требуемой передаваемой мощности. В противном случае необходимо дробление УПК и распределение их вдоль высоковольтной линии электропередачи. Выражения (8–10), (13) остаются справедливыми для произвольного числа УПК ($n_{\text{КУ}}$) на линии. Однако расчет параметров УПК в этом случае удобнее производить не с помощью уравнений, аналогичных (14), а последовательным расчетом режима электропередачи. Для простоты изложения примем, что напряжения всех узлов в предельном режиме равны единице.

Для расчета $B_{\text{КУ}}$ каждой из установок УПК в пределах половины электропередачи необходимо воспользоваться соотношением:

$$\delta_\Sigma - \sum_1^n \delta_i = \sum_1^{n_{\text{КУ}}} \delta_{j\text{КУ}},$$

в котором фаза сдвига векторов напряжений δ_i на произвольном участке ДЛЭП определяется соотношением $\sin \delta_i = P_i B_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$); фаза сдвига векторов напряжений δ_j между началом (концом) схемы и ПС находится из уравнения $\sin \delta_j = P_j B_j$. Принятое число $n_{\text{КУ}}$ УПК позволяет рассчитать $\delta_{j\text{КУ}}$ и параметр продольной компенсации $B_{j\text{КУ}}$ УПК

$$\delta_{j\text{КУ}} = \sum_1^{n_{\text{КУ}}} \delta_{j\text{КУ}} / n_{\text{КУ}},$$

$$\sin \delta_{j\text{КУ}} = P_j B_{j\text{КУ}} \quad (j = 1, 2, \dots, n_{\text{КУ}}).$$

Мощность реакторов определяется из условия баланса реактивных мощностей на стыке каждого участка с УПК

$$Q_{ip} = (1 / B_{\text{КУ}} - \sqrt{1 / B_{\text{КУ}}^2 - P_i^2}) - (1 / B_i - \sqrt{1 / B_i^2 - P_i^2}).$$

Дроблением УПК можно обеспечить любую пропускную способность электропередачи. Однако большая пропускная способность с экономической точки зрения может не соответствовать уровню напряжения электропередачи и не может быть реализована из-за ограничений на допустимое сечение проводов.

Схема 2

Превышение напряжения на выводах УПК имеет место для протяженных участков ДЛЭП и значительной степени продольной компенсации, которая заранее не известна. Это не позволяет априори ответить на вопрос: будет ли действительно иметь место превышение напряжения на выводах УПК в предельном и близких к нему режимах? Поэтому на первом этапе значение параметров и характер поперечных КУ следует определять из условия обеспечения заданного уровня напряжения на выводах УПК. Лишь после расчета можно однозначно выяснить функцию поперечных КУ: если они имеют индуктивный характер, то действительно ограничивают (снижают) напряжение до заданного уровня, и в случае емкостного – наоборот, повышают его, доводя до принятого значения. Предусматривать поперечные КУ двух типов: реакторы по условиям холостого хода и конденсаторы из условий предельного режима не целесообразно. Более экономичным представляется отказ от поперечных емкостных КУ, увеличивая степени продольной компенсации для достижения желаемой пропускной способности. Для этого необходимо провести дополнительный расчет параметров продольной компенсации.

Для принятой схемы (рис. 3) значения $B_{1КУ}=x_{1КУ}$ и $B_{2КУ}=x_{2КУ}$ находятся из уравнений (5) и (6). Однако прямого аналитического решения эти уравнения не имеют. Наиболее просто искомые параметры могут быть найдены итерационным методом на базе уравнений (9) и (13) при a_0 согласно (10). Первое приближение B_{19} и B_{29} рассчитываются при Q_{51} и Q_{52} согласно (7) и $U_4=U_6=1$, а далее:

1) по известным значениям B_{19} и B_{29} находят

$$x_{1КУ} = (B_{19} - B_{12}) / A_1 D_2, \quad x_{2КУ} = (B_{29} - B_{34}) / A_3 D_4;$$

2) определяют эквивалентные постоянные

$$A_{19} = A_{12} - A_1 C_2 x_{1КУ}, \quad D_{29} = D_{34} - D_4 C_3 x_{2КУ};$$

3) воспользовавшись уравнениями (3) и (4), уточняют значения Q_{51} и Q_{52} повторяют п. п. 1, 2, 3.

Необходимость в проверке напряжения на выводах УПК в рассчитываемом режиме отпадает, поскольку оно всегда будет ниже максимально допустимого уровня. Это следует из того, что отсутствие емкостного КУ на стыке участков с УПК нарушает баланс реактивных мощностей в этих узлах так, что мощность со стороны продольного конденсатора меньше мощности примыкающего участка. Баланс

может наступить при снижении напряжения, считая $P_{пр}=\text{const}$, поскольку при этом реактивная мощность конденсатора возрастает, а примыкающего участка ДЛЭП – уменьшается.

Для электропередачи с несимметричным расположением ПС или $P_1 \neq P_2$ возможно, что реакторы по условиям предельного режима необходимы только для одной из УПК.

В процессе эксплуатации, по мере снижения передаваемой мощности, напряжение на выводах установки продольной емкостной компенсации будет возрастать и при некотором значении $P=P_U$ достигнет предельно допустимого уровня. При последующем снижении передаваемой мощности, вплоть до режима холостого хода, необходимо в целях ограничения напряжения подключать реакторы. В частности, для первой половины электропередачи граничное значение мощности определяется выражением

$$P_U = \sqrt{\left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}}\right)^2 - \frac{C_2^2}{4C_1^2}},$$

где

$$C_1 = U_5^2 \left(\frac{A_2}{B_2} - \frac{A_{19}}{B_{19}} \right), \quad C_2 = \left(\frac{U_4 U_5}{B_2} \right)^2 - \left(\frac{U_1 U_5}{B_{19}} \right)^2 - C_1^2$$

при $U_4 = (1,00 \dots 1,05) U_{ном}$.

Приведенные выше решения в пределах каждой схемы остаются справедливыми для случая компенсации волновой длины одной из половин электропередачи, например, со стороны передающего конца при $a_0 = (\beta'_{52} + \beta_{ПС}) U_5 + 2Q_{51}$, где β'_{52} коэффициент крутизны некомпенсированной части ДЛЭП.

Учитывая, что пропускная способность всей электропередачи ограничена пределом наиболее протяженного участка, компенсация волновой длины одного участка электропередачи представляется целесообразным для повышения его пропускной способности независимо от места подключения ПС, а также в случае увеличения транзита мощности при несимметричном расположении ПС.

На рис. 4 приведены результаты расчетов УПК для электропередачи протяженностью 1500 км с одной промежуточной системой в центре. За основу принята схема 1 (рис. 2), в которой ПС считается сбалансированной по активной мощности. Определяющими параметрами в расчетах являются про-

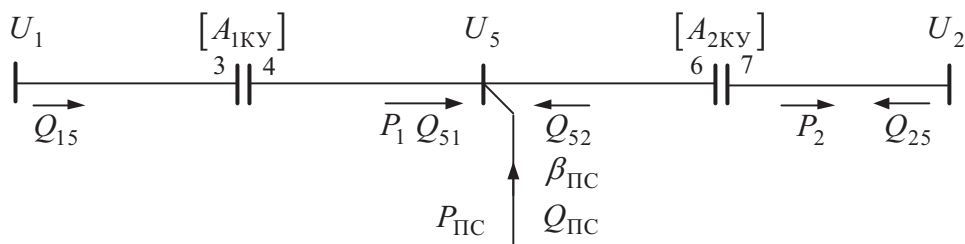


Рис. 3. Схема ДЛЭП с одной ПС с установкой продольной компенсации

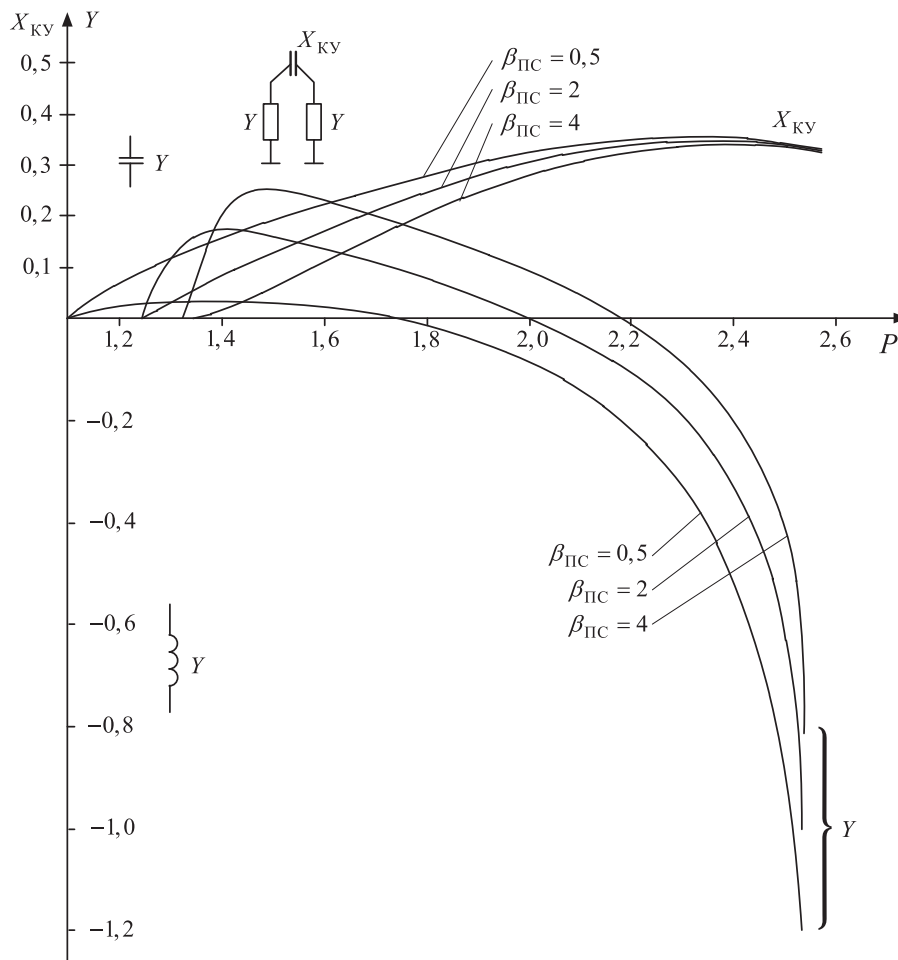


Рис. 4. Зависимости параметров УПК электропередачи 1500 км с одной ПС

дольное емкостное сопротивление x_{ky} и поперечная проводимость Y УПК; в силу симметрии схемы параметры обеих УПК одинаковы. Результаты представлены в относительных единицах на базе натуральной мощности и номинального напряжения в функции $P_{пр}$ для различных значений коэффициентов крутизны $\beta_{ПС}$ ПС. Как видно из расчетов, реакторы на выводах УПК по условиям предельного режима необходимы только при $P_{пр} > 1,80 \dots 2,25$ ($\beta_{ПС} = 0,5 \dots 4,0$); при меньших расчетных нагрузках перенапряжения не возникает и, следовательно, необходимо предусматривать схему 2 (рис. 3). Переход от схемы 1 к схеме 2, т. е. отказ от емкостных КУ в УПК требует для обеспечения одной и той же пропускной способности несколько большую степень продольной компенсации.

При увеличении параметра $\beta_{ПС}$, отражающего «жесткость» поддержания напряжения в узле подключения ПС, естественно, требуется меньшая степени продольной компенсации для обеспечения одного и того же значения $P_{пр}$. Для электропередачи протяженностью 1000 км с одной ПС в центре для обеспечения пропускной способности $P_{пр} > 1$ при $\beta_{ПС} > 0,5$ не требуется установки поперечных реакторов.

Выводы

Предложена методика расчета параметров компенсирующих устройств высоковольтной электропередачи с промежуточной системой для повышения пропускной способности по условиям статической устойчивости. Эквивалентное представление приемной и промежуточной систем позволило существенно сократить размерность энергосистемы 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° . Пропускную способность в пределах натуральной мощности при длинах 1200...1700 км может обеспечить одна, а при 1800...2400 км — две промежуточные системы, расположенных симметрично.

Наиболее интенсивное возрастание предельной мощности по условиям статической устойчивости имеет место при увеличении коэффициента крутизны промежуточной системы в интервале $0,5 \dots 4,0$; при $\beta_{ПС} = 4,0$ пропускная способность электропередачи достигает 92...94 % пропускной способности участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 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. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчета установившихся режимов энергосистем // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 134–138.
4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.
5. Готман В.И., Глазачев А.В. Эквивалентирование энергосистем для оценки статической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 152–155.

Поступила 04.02.2011 г.

УДК 537.1:537.3

РАСШИРЕННЫЙ МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ

Г.В. Носов, Е.О. Кулешова

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@tpu.ru

Приведен расширенный метод эквивалентного генератора при синусоидальных токах, позволяющий определять ток в нагрузке и суммарные активную и реактивную мощности в исходной цепи. Предложена комплексная схема замещения расширенного эквивалентного генератора и даны расчетные формулы определения её параметров при заданном режиме изменения комплексного сопротивления нагрузки и мощностей в исходной цепи.

Ключевые слова:

Метод эквивалентного генератора, активный двухполюсник, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, активная мощность, реактивная мощность, активное сопротивление, реактивное сопротивление.

Key words:

The method of equivalent generator, active dipole, the open circuit voltage, short circuit current, active power, reactive power, resistance, reactance.

При синусоидальных токах и напряжениях для определения в нагрузке линейной исходной цепи комплекса действующего значения тока $\dot{I}_H$ часто применяется метод эквивалентного генератора [1–3], когда вся внешняя к нагрузке цепь как активный двухполюсник заменяется одним эквивалентным генератором с комплексом действующего значения ЭДС $\dot{E}_Г$ и комплексным внутренним сопротивлением $\underline{Z}_Г$ (рис. 1).

В результате ток в нагрузке рассчитывается так

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{E}_Г}{\underline{Z}_Г + \underline{Z}_H}, \quad (1)$$

причем ЭДС $\dot{E}_Г$ равна напряжению холостого хода $\dot{U}_H = \dot{U}_X$ при $\underline{Z}_H = \infty$ и $\dot{I}_H = 0$, а сопротивление $\underline{Z}_Г$ эквивалентного генератора находится с учетом тока короткого замыкания $\dot{I}_H = \dot{I}_K$ при $\underline{Z}_H = 0$ и $\dot{U}_H = 0$:

$$\underline{Z}_Г = \frac{\dot{U}_X}{\dot{I}_K} = R_Г + jX_Г. \quad (2)$$

Однако метод эквивалентного генератора не позволяет определять суммарные с учетом нагрузки значения активной P и реактивной Q мощностей в исходной цепи, которые могут потребоваться, например, для определения оптимального значения сопротивления $\underline{Z}_H$, обеспечивающего

максимальную эффективность передачи η в нагрузку активной энергии:

$$\eta = \frac{P_H}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (3)$$

где $I_H = |\dot{I}_H|$ – действующее значение тока нагрузки; $P_H = I_H^2 R_H$ – активная мощность нагрузки.

Таким образом, актуальность расширения возможностей метода эквивалентного генератора с целью определения мощностей в исходной цепи не вызывает сомнений.

Для этого в схему эквивалентного генератора, рис. 1, введем дополнительное комплексное сопротивление $\underline{Z}_Д = R_Д + jX_Д$, которое совместно с сопротивлениями $\underline{Z}_Г$ и $\underline{Z}_H$ будет задавать мощности P и Q исходной цепи, рис. 2, причем величины $\dot{E}_Г = \dot{U}_X$ и $\underline{Z}_Г = \dot{U}_X / \dot{I}_K$ сохраняют свои значения.

В результате ток будет рассчитываться согласно (1), а сопротивление $\underline{Z}_Д$ найдем из баланса активной P и реактивной мощности Q в схеме рис. 2:

$$\begin{aligned} P &= \frac{U_X^2 \cdot R_Д}{R_Д^2 + X_Д^2} + I_H^2 \cdot (R_Г + R_H); \\ Q &= \frac{U_X^2 \cdot X_Д}{R_Д^2 + X_Д^2} + I_H^2 \cdot (X_Г + X_H), \end{aligned} \quad (4)$$