

DOI: 10.18721/JEST.240106
УДК 621.313.322

*М.А. Люлина¹, Г.А. Першиков¹, А.А. Смирнов²,
А.Н. Беляев¹, С.В. Смоловик³*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – Транснефтьэлектросетьсервис, г. Самара, Россия

3 – Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы»,
Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОТЯЖЕННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УСТРОЙСТВАМИ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В работе проведено аналитическое исследование режимов работы линий электропередачи переменного тока с устройствами продольной компенсации (УПК). Показано, что применение УПК связано с ограничениями, определяемыми отклонениями напряжения в узлах их примыкания. Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации. Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением, поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с такой УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости. В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них. Выполнен анализ режимов работы одной из известных компенсированных электропередач с несколькими УПК. Показано, что возможность регулирования реактивной мощности при изменении загрузки линии и возможность управления уставками УШР по напряжению способствуют существенному увеличению их пропускной способности.

ДАЛЬНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; УСТРОЙСТВО ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ; СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ; УПРАВЛЯЕМЫЙ ШУНТИРУЮЩИЙ РЕАКТОР; СТАТИЧЕСКИЙ ТИРИСТОРНЫЙ КОМПЕНСАТОР.

Ссылка при цитировании:

М.А. Люлина, Г.А. Першиков, А.А. Смирнов, А.Н. Беляев, С.В. Смоловик. Аналитическое исследование режимов работы протяженных линий электропередачи с устройствами продольной емкостной компенсации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 60–74. DOI: 10.18721/JEST.240106.

*М.А. Lyulina¹, G.A. Pershikov¹, A.A. Smirnov²,
A.N. Belyaev¹, S.V. Smolovik³*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Transneftelektroservis, St. Petersburg, Russia

3 – Joint Stock Company «Scientific and Technical Center of Unified Power System»,
St. Petersburg, Russia

ANALYTICAL STUDY OF OPERATING CONDITIONS OF LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION LINES WITH SERIES COMPENSATION DEVICES

We have carried out an analytical study of the operation conditions of AC transmission lines with series compensation devices (SCDs). We have established that the application of capacitive compensation is associated with the limitations determined by voltage deviations at the

intermediate points of the line. Significant reactive power generated by capacitance requires the use of shunt compensation. The obtained results indicate the disadvantages of using SCDs with a large capacitive conductance, since the possibilities for increasing the transmission capacity of such an SCD are limited by the voltage drop across the capacitance. If it is necessary to compensate the inductance of long-distance overhead lines, it is advisable to apply several SCDs with a reduced capacitance in each of them. We have analyzed the operation conditions of one of the well-known compensated power transmissions with several SCDs. It is shown that the ability to control reactive power when changing line loading and the ability to control the voltage settings of the CSR contribute to a significant increase in their transfer capability.

LONG-DISTANCE AC TRANSMISSION SYSTEM; SERIES COMPENSATION; SHUNT COMPENSATION; OPERATING CONDITIONS; SMALL SIGNAL STABILITY; CONTROLLED SHUNT REACTOR; STATIC VAR COMPENSATOR.

Citation:

M.A. Lyulina, G.A. Pershikov, A.A. Smirnov, A.N. Belyaev, S.V. Smolovik. Analytical study of operating conditions of long-distance power transmission lines with series compensation devices, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 60–74, DOI: 10.18721/JEST.240106.

Введение

Наиболее эффективным способом повышения пропускной способности линий электропередачи является повышение номинального напряжения, однако на сегодня, по всей видимости, достигнут предел (1000/1150/1200 кВ). Натуральная мощность линий указанных классов напряжения составляет 4000–5400 МВт, и аварийное отключение такой линии даже для очень мощной энергосистемы – чрезмерное возмущение.

Конкурирующие способы повышения пропускной способности линий электропередачи сверхвысоких и ультравысоких напряжений – компенсация параметров и глубокое расщепление проводов. Продольно-емкостная компенсация, теоретически обоснованная еще в 30-х годах прошлого столетия [1], на практике применена в 40–50-х годах для компенсации части индуктивного сопротивления линий 220–400 кВ и соответствующего увеличения передаваемых мощностей [2].

Установка продольной компенсации (УПК) способна существенно (на 30–50 %) увеличить пропускную способность линии электропередачи, заметно сокращает взаимный угол между напряжениями на шинах отправной и приемной частей системы, повышая уровень устойчивости [3]. Стоимость конденсаторной группы УПК со-

ставляет обычно небольшую часть от стоимости новой ЛЭП, при этом время сооружения УПК намного меньше, чем ЛЭП. Как показывает практика, срок окупаемости капиталовложений для УПК обычно составляет всего лишь несколько лет, в отличие от срока сооружения новых линий.

Однако упрощенное объяснение эффективности УПК только уменьшением продольного индуктивного сопротивления линии электропередачи является недостаточным.

Большая сосредоточенная емкость УПК, генерирующая реактивную мощность пропорционально квадрату тока, приводит к значительному изменению уровней напряжений в узлах, что обуславливает необходимость применения поперечно включенных шунтирующих устройств [4]. До настоящего времени для этой цели использовались неуправляемые шунтирующие реакторы (ШР). Многообразие режимов работы электропередачи поставило вопрос о целесообразности применения в качестве компенсирующих устройств управляемых шунтирующих реакторов (УШР).

Цель нашей работы заключалась в анализе режимов электропередачи с УПК, определении эффективности использования УШР и установлении закона управления уставками напряжения УШР, целесообразного с точки зрения оптимизации режим-

ных параметров при условии обеспечения нормативных величин напряжений в узлах.

При этом решались следующие задачи:

1) аналитически исследовать влияние устройства продольной компенсации на пропускную способность линий электропередачи;

2) численно исследовать установившиеся режимы работы ВЛ 500 кВ длиной 687 км с целью обоснования эффективности установки УПК и законов регулирования УШР.

Аналитическое исследование влияния УПК на пропускную способность линий электропередачи

Основная идея продольной емкостной компенсации заключается в уменьшении полного продольного индуктивного сопротивления электропередачи. Математически этому соответствует уменьшение величины индуктивного сопротивления линии X в выражении $P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$, характеризующем передаваемую по отдельной линии мощность [5]. Рассмотрим простейшую модель линии с продольной емкостной компенсацией.

Эффективное сопротивление линии $X_{эф}$ определяется выражением

$$X_{эф} = X - X_c, \quad (1)$$

или

$$X_{эф} = (1 - \eta_c)X, \quad (2)$$

где η_c называется степенью продольной компенсации;

$$\eta_c = X_c/X, \quad 0 \leq \eta_c < 1. \quad (3)$$

При допущении о равенстве напряжений $U_1 = U_2 = U$ активная и реактивная мощности компенсированной линии могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$P = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \sin \delta; \quad (4)$$

$$Q = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} - \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \cos \delta. \quad (5)$$

Тогда квадрат тока компенсированной линии может быть выражен следующим образом:

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = \left(\frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \sin^2 \delta + \right. \\ &+ \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta + \\ &\left. + \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos^2 \delta \right) / U^2 = \\ &= \left(\frac{2U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta \right) / U^2 = \\ &= 2 \frac{U^2}{(1 - \eta_c)^2 X^2} (1 - \cos \delta). \quad (6) \end{aligned}$$

Тогда выражение, определяющее реактивную мощность, генерируемую продольно включенной емкостью, можно записать так:

$$Q_c = I^2 X_c = \frac{2U^2}{X} \frac{\eta_c}{(1 - \eta_c)^2} (1 - \cos \delta). \quad (7)$$

Взаимосвязь между активной мощностью P , реактивной мощностью продольного конденсатора Q_c и углом δ показана на рис. 1 для различных значений степени продольной компенсации η_c . Как и ожидалось, с увеличением степени продольной компенсации η_c передаваемая по линии мощность быстро увеличивается и, аналогично, также резко увеличивается генерируемая продольным конденсатором реактивная мощность, которая изменяется с углом δ таким же образом, как и реактивная мощность линии.

Полученные простые соотношения, характеризующие продольно-емкостную компенсацию, демонстрируют недостаточность приведенных физических объяснений эффективности УПК тем, что сопротивление продольного компенсирующего конденсатора погашает часть фактического реактивного сопротивления линии и, таким образом, эффективное сопротивление передачи в выражении (1) уменьшается, как в случае физического уменьшения длины линии. Следует учесть, что существенным фактором является значительная реактивная мощность, генерируемая конденсаторной батареей и заметно влияющая на величины напряжений на ее выводах.

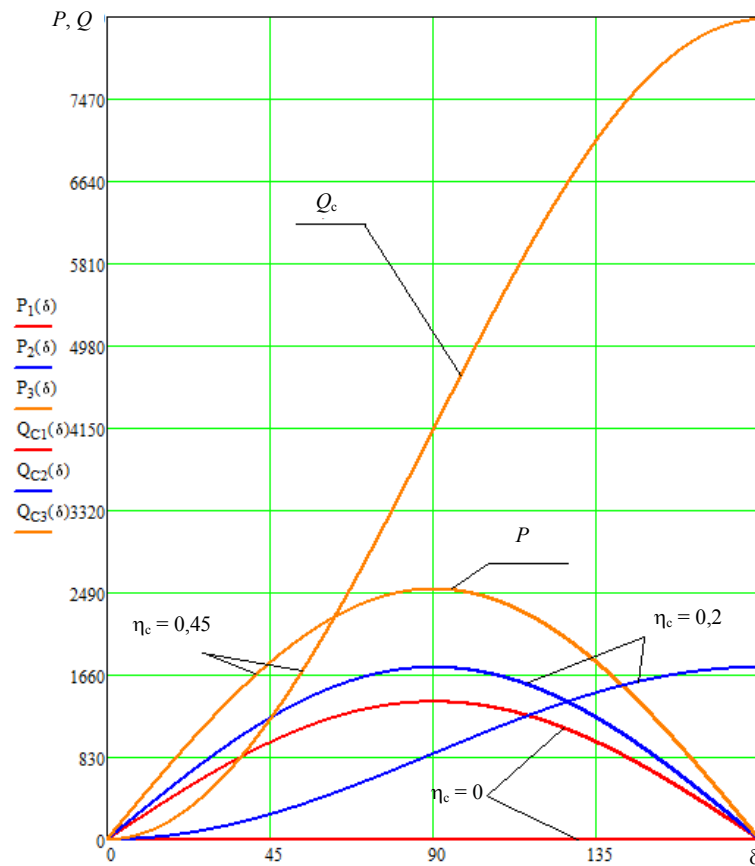


Рис. 1. Характеристики мощности компенсированной линии и реактивная мощность продольного конденсатора в функции угла δ
Fig. 1. Power-angle characteristics of compensated line and reactive power of the series capacitor as functions of the angle δ

На рис. 2 представлена векторная диаграмма токов и напряжений во всех точках электропередачи 500 кВ длиной 687 км при передаче мощности $1,3P_n$ при подключении неуправляемых реакторов в узлах 2 и 4 с проводимостью $-0,2$ о.е.

Напряжения в узлах и проводимости реакторов следующие: $U_1 = 1,008$ о.е.; $U_2 = 1,082$ о.е.; $U_3 = 0,933$ о.е.; $U_4 = 0,811$ о.е.; $U_5 = 1,0$ о.е.; $B_{r1} = -0,2$ о.е.; $B_{r2} = -0,2$ о.е.

Рис. 3, а показывает, как изменяются напряжения на зажимах емкости при изменении передаваемой мощности в случае использования неуправляемых реакторов, компенсирующих зарядную мощность линии. Разница между зеленой и фиолетовой кривыми соответствует падению напряжения на конденсаторной батарее.

Для снижения напряжения на выводах УПК до допустимых значений необходимо компенсировать избыточную зарядную

мощность линии и реактивную мощность, генерируемую батареями (рис. 3, б, в). Для этого на протяженных линиях устанавливаются дополнительные нерегулируемые реакторы на выводах УПК [4, 7, 12]. Одной из целей настоящей работы было выяснить, насколько эффективным окажется применение управляемой поперечной компенсации для обеспечения допустимых значений напряжения на УПК.

Анализ условий работы устройств продольной емкостной компенсации

Анализу применения УПК на протяженных линиях электропередачи было уделено значительное внимание в книге Г.Н. Александрова [8]. Поэтому ниже выполнен анализ некоторых соотношений, полученных в [8] и подвергающих критике идею применения УПК.

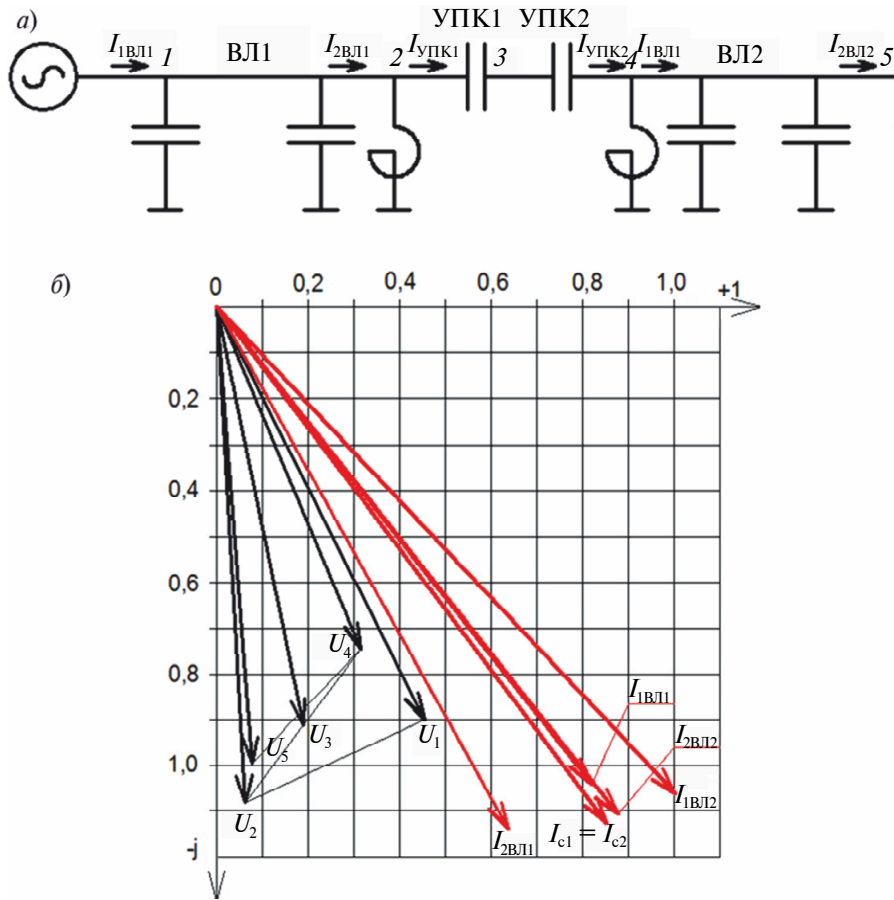


Рис. 2. Схема электропередачи с ШР (а) и векторная диаграмма (б) токов и напряжений при передаче мощности $1,3P_H$
 Fig. 2. Line diagram with conventional shunt reactors (a) and vector diagram (b) of voltages and currents for $1,3P_H$ power transmission

При использовании допущения о равномерном распределении УПК вдоль линии анализ условий ее работы может быть выполнен с помощью волновых уравнений со следующими параметрами:

$$\left. \begin{aligned} \eta_c &= \frac{X_c}{X_L} = \frac{1}{\omega C_{\text{УПК}} \omega L_0 l}; \\ L_{0\text{э}} &= L_0(1 - \eta_c); \\ z_{0\text{э}} &= \sqrt{L_{0\text{э}}/C_0} = \frac{\sqrt{L_0(1 - \eta_c)}}{\sqrt{C_0}} = z\sqrt{1 - \eta_c}; \\ v_{0\text{э}} &= \frac{1}{\sqrt{L_{0\text{э}}C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0C_0(1 - \eta_c)}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \eta_c}}; \\ \lambda_{0\text{э}} &= \frac{\omega l}{v_{0\text{э}}} = \omega l \sqrt{L_0C_0(1 - \eta_c)} = \lambda\sqrt{1 - \eta_c}; \\ P_{H\text{э}} &= \frac{3U_{\text{ф ном}}^2}{z\sqrt{1 - \eta_c}} = \frac{P_H}{\sqrt{1 - \eta_c}}. \end{aligned} \right\} (8)$$

Эквивалентное волновое сопротивление $z_{0\text{э}}$ и эквивалентная волновая длина $\lambda_{0\text{э}}$ линии с распределенными УПК уменьшаются, а натуральная мощность линии $P_{H\text{э}}$ соответственно увеличивается.

Суммарная мощность УПК на линии при степени компенсации η_c равна

$$\begin{aligned} Q_{\text{УПК}} &= 3I^2\eta_c X = 3I_H^2 \left(\frac{P_{2\text{УПК}}}{P_H} \right)^2 \eta_c z \sin \lambda = \\ &= 3U_{\text{ф ном}} I_H \left(\frac{P_{2\text{УПК}}}{P_H} \right)^2 \eta_c \sin \lambda = \\ &= P_H \left(\frac{P_{2\text{УПК}}}{P_H} \right)^2 \eta_c \sin \lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

Все расчеты производились в относительных единицах (за базисные величины приняты номинальное напряжение и волновое сопротивление ВЛ 500 кВ).

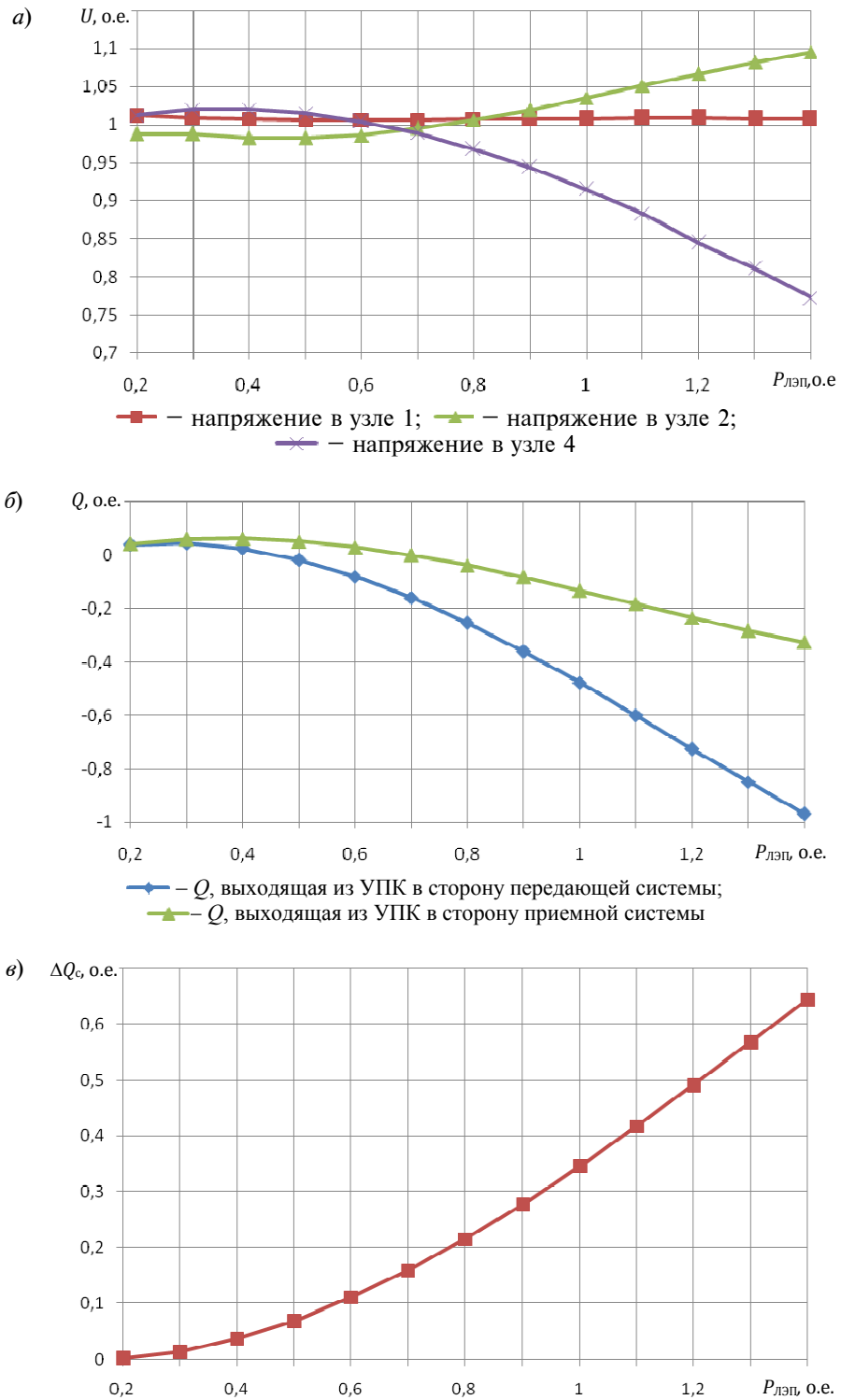


Рис. 3. Напряжения в промежуточных узлах (а), поток реактивной мощности с разных сторон УПК (б) и реактивная мощность, генерируемая УПК (в)
 Fig. 3. Voltage profile at intermediate points (a), reactive power flow at different sides of capacitor (б), reactive power generated by capacitor (в)

Результаты расчетов по формуле (9) для линии 687 км при степени компенсации $\eta_c = 0,45$ следующие:

Q	I
0,19	0,8
0,297	1,0
0,427	1,2
0,581	1,4
0,759	1,6
0,961	1,8
1,186	2,0
1,435	2,2

На рис. 4 приведена суммарная мощность, генерируемая УПК в зависимости от загрузки линии и изменения от 0 до 80 % степени емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии, рассчитанные по формуле (9).

Согласно [8] отношение суммарной мощности УПК к приращению допустимой передаваемой по линии мощности при равенстве напряжений по концам линии и

при пренебрежении активным сопротивлением линии равно

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_2} &= \frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_H} = \eta_c \sin \lambda \frac{P_{2\text{УПК}}^2}{P_H (P_{2\text{УПК}} - P_H)} = \\ &= \eta_c \sin \lambda \frac{P_{2\text{УПК}}}{P_H} \frac{1}{\left(1 - \frac{P_H}{P_{2\text{УПК}}}\right)} = \\ &= \eta_c \sin \lambda \frac{1}{\sqrt{1 - \eta_c}} \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \eta_c}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Однако в [8] сделано допущение, что $\sin(\lambda) \cong \lambda$. Это достаточно грубое для длинных линий допущение дает заметную ошибку в расчетах. Так, например, для линии 1000 км при таком допущении получаются данные, представленные во втором столбце таблицы, а при правильном расчете результаты значительно отличаются от них (третий столбец таблицы). Таким образом, допущение $\sin(\lambda) \cong \lambda$ вносит ошибку в расчеты от 0,372 до 0,512 о.е. (17–20 %).

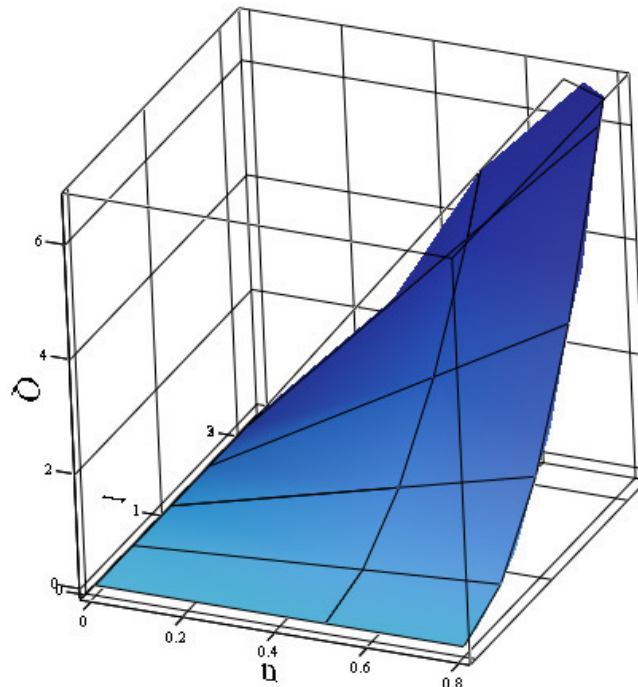


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности УПК от степени компенсации и загрузки линии
 Fig. 4. Reactive power of series device as function of compensation degree and transmitted power

Соотношение реактивной мощности УПК и активной мощности передаваемой по линии

The ratio of compensation device reactive power and the active power transmitted through the line

η_c	$Q_{\text{УПК}} / (P_{2\text{УПК}} - P_2)$	
	упрощен.	точн.
0,1	2,151	1,779
0,2	2,218	1,834
0,3	2,299	1,901
0,4	2,399	1,984
0,5	2,528	2,091
0,6	2,703	2,235
0,7	2,959	2,447

В работе [8] произведен анализ падения напряжения на сосредоточенном емкостном сопротивлении, поскольку при увеличении степени компенсации увеличивается падение напряжения на конденсаторной батарее, что приводит к повышению напряжения на зажимах УПК сверх допустимого. Падение напряжения на батарее УПК равно

$$\Delta U_c = IX_c = I_H \frac{P_2}{P_H} \eta_c X = \tag{11}$$

$$= I_H \frac{P_2}{P_H} \eta_c z \sin \lambda = U_2 \frac{P_2}{P_H} \eta_c \sin \lambda,$$

где U_2 – напряжение с одной стороны УПК (со стороны приемной системы). Для линии 687 км на рис. 5 приведен трехмерный график зависимости падения напряжения на УПК от загрузки линии и степени компенсации, построенный по формуле (11).

Напряжение на другой стороне УПК выражено формулой

$$U_X = U_2 \sqrt{1 + \left(\frac{P_2}{P_H}\right)^2 \eta_c^2 \sin^2 \lambda}. \tag{12}$$

Допустимое отношение передаваемой мощности к натуральной при заданном перепаде напряжений на УПК равно [8]

$$\left(\frac{P_2}{P_H}\right)_{\text{доп}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_X}{U_2}\right)_{\text{доп}}^2 - 1}}{\eta_c \sin \lambda}. \tag{13}$$

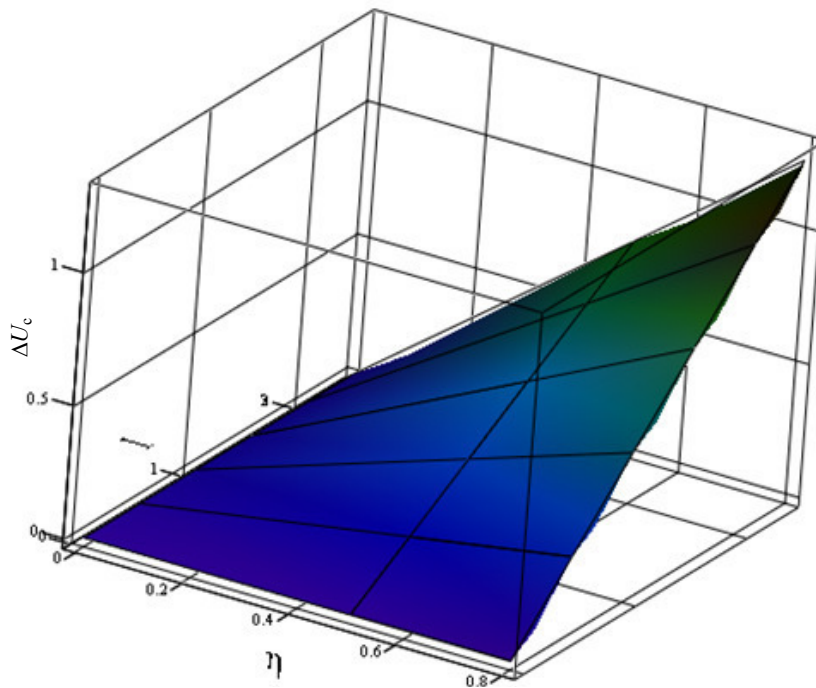


Рис. 5. Зависимость падения напряжения на УПК от степени компенсации и загрузки линии
Fig. 5. Voltage drop on series device as function of compensation degree and transmitted power

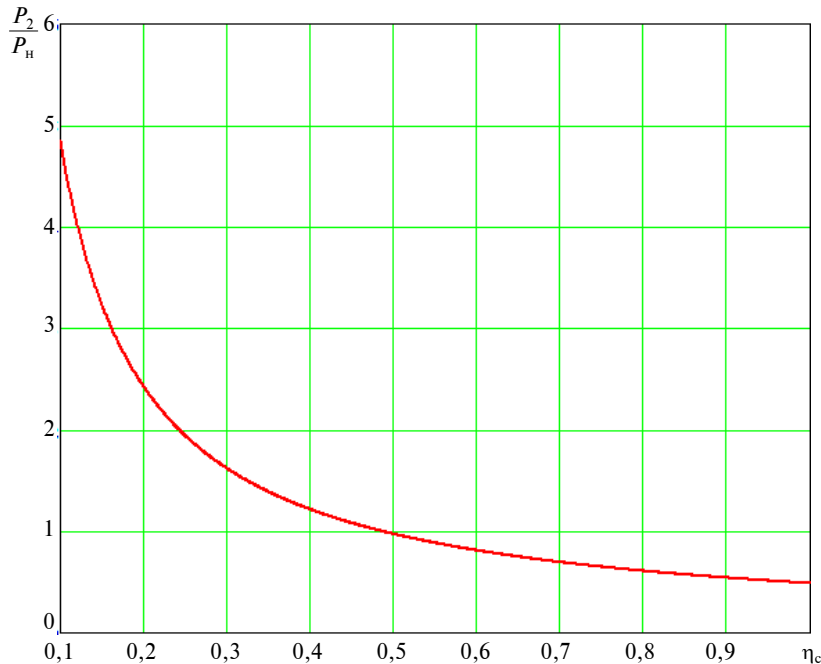


Рис. 6. Зависимость допустимого отношения передаваемой мощности к натуральной от степени продольной емкостной компенсации для линии 687 км
 Fig. 6. Transmission capacity as a function of compensation degree for 687 km line

Принимая допустимый перепад напряжений на батарее УПК равным 1,05 о.е., получаем зависимость (см. рис. 6) допустимого отношения передаваемой мощности к натуральной от степени компенсации индуктивного сопротивления линии длиной 687 км.

Из рис. 6 следует, что при $\eta_c = 0,45$ допустимая передаваемая мощность не может превысить величину $P = 1,1P_n$. Полученная кривая также входит в явное противоречие с кривыми рис. 5.10 в работе [8], согласно которым максимальная степень компенсации для ВЛ длиной 687 км не может превысить 34 %.

При равенстве напряжений по концам линии отношение допустимой передаваемой мощности при наличии УПК и при отсутствии УПК определяется соотношением

$$\frac{P_{2\text{доп УПК}}}{P_{2\text{доп}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}} \times \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho J l}{U_2 \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\eta_c}}{2\lambda \sqrt{1-\eta_c}}\right)}{1 - \frac{\rho J l}{U_2 \sin^2 \lambda} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda}\right)}} \approx \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}}. \quad (14)$$

Согласно этому соотношению получена зависимость (рис. 7) от степени продольной емкостной компенсации отношения допустимой передаваемой по линии мощности к натуральной при наличии и отсутствии УПК.

Как видно, увеличение степени продольной компенсации приводит к значительному возрастанию допустимой передаваемой по линии мощности. Так, например, для линии 687 км при компенсации 45 % индуктивного сопротивления линии можно получить увеличение передаваемой мощности на 40 % выше натуральной.

Допустимая степень продольной емкостной компенсации определяется выражением

$$\eta_c = \sqrt{\left[\left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right] \left[\sin^2 \lambda - \frac{\rho J l}{U_2} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]} + 1 - \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \left\{ \left[\sin^2 \lambda - \frac{\rho J l}{U_2} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]^2 \right\}^1. \quad (15)$$

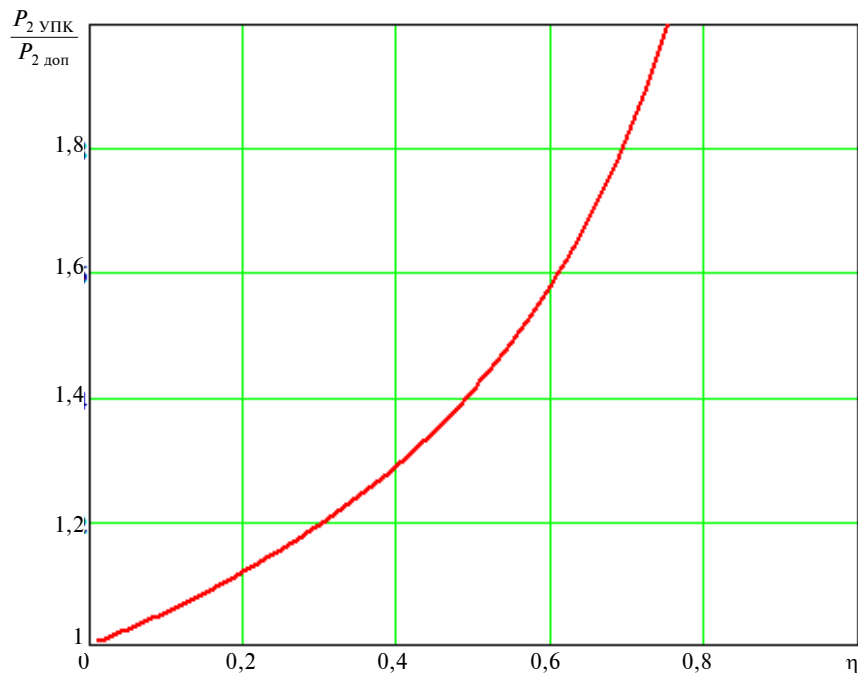


Рис. 7. Зависимость отношения допустимых передаваемых по линии мощностей при наличии и отсутствии УПК от степени продольной емкостной компенсации для линии 687 км

Fig. 7. Dependence of the ratio of permissible power transmission through the line in the presence and absence of compensation device on the degree of series capacitive compensation for the line 687 km

Таким образом, в [8] имеется явное противоречие с зависимостями (13), (14) и (15) нашей работы. Например, для линии длиной 687 км при допустимом перепаде напряжений на батарее УПК 1,05 о.е. и степени компенсации 45 % получаем допустимое отношение передаваемой мощности к натуральной: $\left(\frac{P_2}{P_H}\right)_{\text{доп}} = 1,0792$. А

отношение допустимой передаваемой мощности при наличии и отсутствии УПК для той же линии при равенстве напряжений по концам линии будет равно $\left(\frac{P_{2\text{УПК}}}{P_2}\right)_{\text{доп}} = 1,347$.

Однако согласно (15) нашей работы для данной линии максимальная степень продольной емкостной компенсации равняется 34 %; при указанной степени компенсации может быть достигнуто превышение допустимой передаваемой мощности сверх натуральной на 56 %.

Указанные противоречия заставили выполнить подробный анализ режимов работы протяженных ВЛ с УПК и выявить влияние различных способов поперечной компенсации на режимы напряжений линии и возможное увеличение допустимых передаваемых мощностей.

Критическая волновая длина линии, соответствующая нулевому значению степени компенсации

При 100 % компенсации зарядной мощности линии необходимая степень компенсации η_c в зависимости от отношения P_2/P_H определяется выражением

$$\eta_c = 1 - \frac{P_H}{P_2} \frac{\sqrt{1 - \left[2 \left(\frac{U_{\text{экс}}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho l}{U_2} \right]^2}}{\lambda}, \quad (16)$$

где $U_{\text{экс}}$ – экстремальное значение понижения напряжения в середине линии.

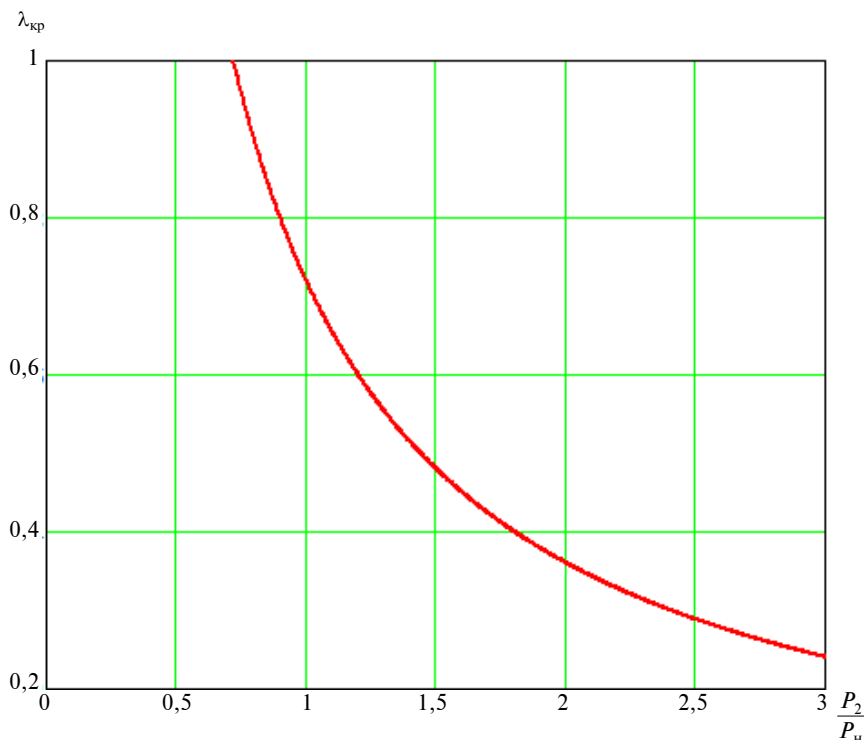


Рис. 8. Зависимость критической волновой длины линии от отношения передаваемой мощности к натуральной
 Fig. 8. Dependence of the critical wave length of the line on the ratio of transmitted power to surge impedance loading

Из этой формулы при малых длинах линий следует отрицательное значение η_c , т. е. продольная компенсация не нужна. Тогда критическая волновая длина линии, соответствующая нулевому значению η_c , определяется выражением

$$\lambda_{кр} = \frac{P_n}{P_2} \sqrt{1 - \left[2 \left(\frac{U_{экс}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho J l}{U_2} \right]^2}. \quad (17)$$

Таким образом, при увеличении отношения P_2/P_n критическая волновая длина линии уменьшается (см. рис. 8). При передаче натуральной мощности критическая волновая длина линии равна 0,722 рад.

Утверждение, что при волновой длине линии 0,722 рад и меньше установка продольной компенсации не нужна, вызывает сомнения и противоречит известной инженерной практике. Данное положение требует проверки. Далее приведены при-

меры расчетов режимов электропередачи 500 кВ длиной 687 км (0,72 рад) с установкой продольной компенсации.

Оценка эффективности применения УШР на воздушной линии 500 кВ с УПК

Возможность изменения потребляемой реактивной мощности – важное свойство управляемых реакторов, так как нерегулируемая поперечная индуктивная компенсация всегда уменьшает эквивалентную натуральную мощность линии. К тому же, регулируемые реакторы решают очень важные задачи дальних электропередач – поддержание статической и повышение уровня динамической устойчивости режимов, близких к режиму передачи натуральной мощности.

Результаты расчетов линии 500 кВ длиной 687 км с установкой УШР по концам УПК схожи с расчетами, представленными

ранее для неуправляемых ШР. Однако при установке УШР генерация реактивной мощности УПК оказывается ниже. Еще одно из преимуществ использования УШР – плавное регулирование мощности, в то время как обычные ШР необходимо коммутировать при изменении передаваемой мощности, что приводит к скачкам напряжения.

Дополнительной иллюстрацией особенностей передачи мощности по линии с УПК является векторная диаграмма токов и напряжений (рис. 9) в разных точках электропередачи 500 кВ длиной 687 км при передаче мощности $1,3P_n$ при подключении управляемых реакторов в узлах 2 и 3.

Напряжения в узлах и проводимости реакторов следующие: $U_1 = 1,044$ о.е.; $U_2 = 1,046$ о.е.; $U_3 = 0,943$ о.е.; $U_4 = 0,89$ о.е.; $U_5 = 1,0$ о.е.; $B_{r1} = -0,42$ о.е.; $B_{r2} = -0,08$ о.е.

Характерной особенностью режима такой линии электропередачи является различие уровней напряжений на участках, примыкающих к передающей и принимающей энергосистемам. Из-за понижения напряжения за УПК величина угла на правом участке ВЛ превышает аналогичную величину на левом участке ($28,82^\circ$ против $22,95^\circ$); соответственно различаются и величины токов (1,46 против 1,28 о.е.).

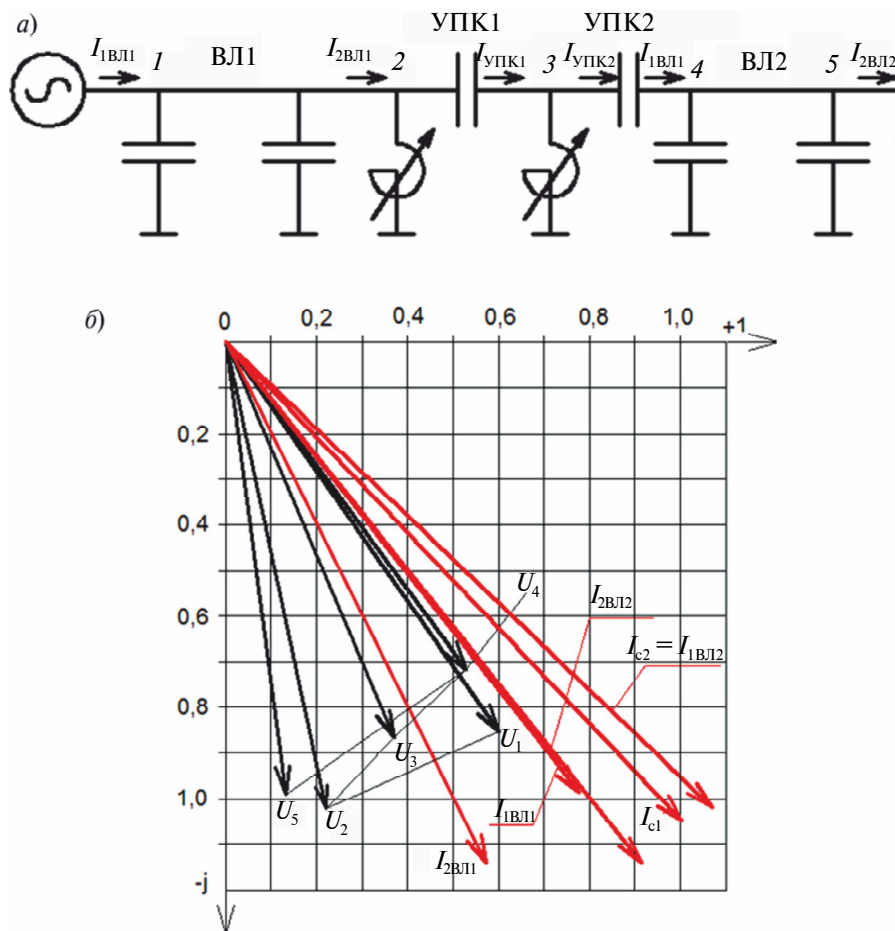


Рис. 9. Схема электропередачи с УШР (а) и векторная диаграмма (б) токов и напряжений при передаче мощности $1,3P_n$
 Fig. 9. Line diagram with controlled shunt reactors (a) and vector diagram (b) of voltages and currents for $1.3P_{sil}$ power transmission

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

для рассматриваемой линии можно отказаться от реактора в точке за УПК, так как его функции берет на себя реактор в средней точке. К тому же при отказе установки реактора в узле 4 общая мощность реакторов становится меньше;

установка УПК повышает пропускную способность линии на 30–40 % и более. Таким образом, расчеты опровергают утверждение работы [8] о том, что для линии 500 кВ длиной 687 км установка УПК не имеет смысла. Реализация режимов передачи больших мощностей ограничивается понижением напряжения за емкостью.

Как было отмечено ранее, в [8] утверждается, что при установке на линии УШР и УПК в режиме передачи натуральной мощности проводимость реакторов становится равной нулю. Полученные результаты расчетов режимов работы электропередачи, изображенной на рис. 2 и 9, доказывают обратное: в режиме передачи натуральной мощности устройства продольной компенсации генерируют значительное количество реактивной мощности. Поток реактивной мощности в данной модели оказывается направленным в сторону передающей системы (электростанции), из-за чего в узле перед УПК наблюдается значительное увеличение напряжения; для его понижения реакторы должны потреблять избыток реактивной мощности. Так, например, для поддержания напряжения в узле 2 необходимо потребить 290 Мвар.

Следует также отметить, что установка реактора в средней точке между емкостями позволяет передать по линии большую мощность ($1,55P_n$). Это достигается тем, что при помощи реактора в средней точке можно добиться некоторого снижения напряжения, что делает возможным обеспечение допустимого значения напряжения на УПК со стороны передающей системы.

В целом необходимо признать, что использование УШР вместо нерегулируемых ШР не приводит к существенному увеличению передаваемых мощностей, но его несомненным преимуществом является

плавное регулирование напряжений в узловых точках электропередачи.

Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением, поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с такой УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости.

Выводы

Проведено аналитическое исследование режимов работы линий электропередачи переменного тока с устройствами продольной емкостной компенсации.

Показано, что применение устройств продольной компенсации имеет ограничения, определяемые отклонениями напряжения в узлах их примыкания.

Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации. Находящиеся в эксплуатации УПК используют для этой цели только неуправляемые шунтирующие реакторы.

Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением ($X_c > 0,4X_n$), поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с таким УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости. В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них.

Выполнен анализ режимов работы одной из известных компенсированных электропередач с несколькими УПК. Показано, что регулирование реактивной мощности при изменении загрузки линии и управление уставками УШР по напряжению может способствовать существенному увеличению их пропускной способности.

При существующей структуре ценообразования на линейное и подстанционное оборудование повышение пропускной способности линии за счет сооружения УПК более выгодно, чем за счет применения глубокого расщепления проводов ВЛ.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марченко Е.А., Розовский Ю.А., Шур С.С. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи. М., Л.: ГЭИ, 1957. 48 с.
2. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE press, 2000. 432 p.
3. Eremia M. Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Wiley: IEEE Press, 2016. 1063 p.
4. Gama C., Tenorio R. Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. Vol. 2. P. 1462–1467.
5. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей // Электротехника. 2017. № 2. С. 60–66.
6. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с устройствами FACTS // Электричество. 2013. № 12. С. 2–13.
7. Хазов М.А., Черняев П.В., Беляев А.Н. Исследование режимов и устойчивости межсистемной связи на основе гибкой линии электропередачи переменного тока с управляемой продольной и поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407.
8. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 411 с.
9. Smolovik S.V., Belyaev A.N., Bryantsev A.M. Magnetically controlled shunt reactor use in 110–500 kV power grids // CIGRE Session 2016, B4-209.
10. Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V. Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015. P. 1–4.
11. Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстродействии управляемых шунтирующих реакторов с точки зрения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем // Электрические станции. 2014. № 1. С. 27–30.
12. Беляев А.Н., Брянецев А.М., Смоловик С.В. Применение управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в электроэнергетических системах // Энергетик. 2016. № 8. С. 9–13.
13. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: ТРУС ПРЕСС, 2011. 312 с.
14. Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N. Real power flow control in transmission system using TCSC // 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). Bangalore, 2016. P. 1–5.
15. Lei B., Fei S., Wu X. Nonlinear coordinated control of generator excitation and SVC in multi-machine power systems using energy-shaping method // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. Sapporo, 2014. P. 200–204.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛЮЛИНА Мария Александровна – старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: lyulinam@mail.ru

ПЕРШИКОВ Георгий Анатольевич – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: georg_p@mail.ru

СМИРНОВ Александр Александрович – кандидат технических наук ведущий специалист «Транснефтьэлектросетьсервис»

E-mail: mulller@list.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

СМОЛОВИК Сергей Владимирович – доктор технических наук заместитель начальника отдела акционерного общества «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

E-mail: smol401@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.02.2018

REFERENCES

- [1] **Marchenko E.A., Rozovskii Iu.A., Shur S.S.** Prodol'naiia emkostnaia kompensatsiia linii elektroperedachi. M., L.: GEI, 1957. 48 s. (rus.)
- [2] **Hingorani N.G., Gyugyi L.** Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE press, 2000. 432 p.
- [3] **Eremia M.** Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Wiley: IEEE Press, 2016. 1063 p.
- [4] **Gama C., Tenorio R.** Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 2000. Vol. 2. P. 1462–1467.
- [5] **Golov V.P., Martirosian A.A., Moskvina I.A., Kormilitsyn D.N.** Ispol'zovanie upravliaemykh elektroperedach s reguliruemoi prodol'noi kompensatsiei dlia realizatsii adaptivnykh setei. *Elektrotehnika*. 2017. № 2. S. 60–66. (rus.)
- [6] **Shakarian Iu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P.** Ustanovivshiesia rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s ustroistvami FACTS. *Elektrichestvo*. 2013. № 12. S. 2–13. (rus.)
- [7] **Khazov M.A., Chernyaev P.V., Belyaev A.N.** Analysis of operating conditions and stability of interconnections based on flexible AC transmission lines with controlled series and shunt compensation devices, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(04)(2017) 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407. (rus.)
- [8] **Aleksandrov G.N.** Peredacha elektricheskoi energii. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 411 s. (rus.)
- [9] **Smolovik S.V., Belyaev A.N., Bryantsev A.M.** Magnetically controlled shunt reactor use in 110-500 kV power grids. *CIGRE Session 2016*, B4-209.
- [10] **Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V.** Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven*, 2015. P. 1–4.
- [11] **Beliaev A.N., Smolovik S.V.** O bystrodeistvii upravliaemykh shuntiruiushchikh reaktorov s tochki zreniia staticheskoi i dinamicheskoi ustoiчивosti elektroenergeticheskikh sistem. *Elektricheskies stantsii*. 2014. № 1. S. 27–30. (rus.)
- [12] **Beliaev A.N., Briantsev A.M., Smolovik S.V.** Primenenie upravliaemykh podmagnichivaniem shuntiruiushchikh reaktorov v elektroenergeticheskikh sistemakh. *Energetik*. 2016. № 8. S. 9–13. (rus.)
- [13] **Kochkin V.I., Shakarian Iu.G.** Primenenie gibkikh (upravliaemykh) sistem elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh. M.: TORUS PRESS, 2011. 312 s. (rus.)
- [14] **Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N.** Real power flow control in transmission system using TCSC. *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*. Bangalore, 2016. P. 1–5.
- [15] **Lei B., Fei S., Wu X.** Nonlinear coordinated control of generator excitation and SVC in multi-machine power systems using energy-shaping method. *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering*. Sapporo, 2014. P. 200–204.

AUTHORS

LYULINA Mariia A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: lyulinam@mail.ru

PERSHIKOV Georgii A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: georg_p@mail.ru

SMIRNOV Aleksandr A. — *Transneftelektroservis*

E-mail: muller@list.ru

BELYAEV Andrei N. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

SMOLOVIK Sergei V. — *Joint Stock Company «Scientific and Technical Center of Unified Power System»*

E-mail: smol401@yandex.ru

Received: 03.02.2018