

DOI: 10.18721/JEST.25106
УДК 621.313.322

О.О. Переслыцких, А.Н. Беляев

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

УСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХДАЛЬНИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Работа посвящена исследованию сверхдальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения с установкой управляемых шунтирующих реакторов для компенсации параметров линии и синхронных компенсаторов небольшой мощности для повышения статической устойчивости. Рассмотрены режимы работы линии длиной 4000 км. Проанализировано влияние мест установки и мощности синхронных компенсаторов на предел передаваемой мощности. Показано, что координированное управление средствами поперечной компенсации на сверхдальних линиях электропередачи позволяет существенно увеличить предел передаваемой мощности и уровень их статической устойчивости.

Ключевые слова: сверхдальние линии электропередачи, статическая устойчивость, установившиеся режимы, устройство поперечной компенсации, управляемый шунтирующий реактор, синхронный компенсатор.

Ссылка при цитировании:

О.О. Переслыцких, А.Н. Беляев. Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 60–70. DOI: 10.18721/JEST.25106.

O.O. Pereslytskikh, A.N. Belyaev

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

STABILITY OF ULTRA-LONG TRANSMISSION LINES WITH CONTROLLED SHUNT COMPENSATION

The paper is dedicated to investigation of ultra-high voltage long-distance transmission lines with controlled shunt reactors installed to compensate for line parameters and with synchronous condensers to increase small signal stability. The operating conditions of a 4000 km line are considered. The effect of installation sites and capacity of synchronous condensers on transmission limits is analyzed. It is shown that using coordinated control of means of shunt compensation on ultra-long transmission lines allows to significantly increase not only the limit of transmission power, but also the level of small signal stability for these lines.

Keywords: ultra-long distance AC transmission system, shunt compensation, operating conditions, small signal stability, controlled shunt reactor, static var compensator, synchronous condenser.

Citation:

O.O. Pereslytskikh, A.N. Belyaev, Stability of ultra-long transmission lines with controlled shunt compensation, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 60–70, DOI: 10.18721/JEST.25106.

Введение

По мере увеличения длины линий электропередачи и объединения энергетических систем возникают проблемы с реализацией режимов передачи мощностей как по условию устойчивой работы, так и из-за недопустимого повышения напряжения в промежуточных точках линии [1, 2].

В Китае остро встал вопрос о расширении генерации электрической энергии. К 2020 году планируется увеличить установленную мощность с 1000 до 1900 ГВт, из которых 160 ГВт будут вырабатываться ветряными и 30 ГВт солнечными электростанциями. Однако вклад угольных станций останется высоким [3]. При этом две трети угольных запасов расположены на севере и северо-западе Китая, тогда как основная часть потребителей электроэнергии находится вдоль побережья (рис. 1). Поэтому в равной степени рассматриваются варианты строительства линий постоянного (± 800 и 1100 кВ) и переменного (1000 и 1200 кВ) тока [4].

Как известно, на передачах постоянного тока не требуется установка устройств компенсации реактивной мощности на линиях. Однако для обеспечения преобразования переменного тока в постоянный и обратно с обеих сторон необходимы регулируемые источники реактивной мощности [5]. Кроме того, затраты на установку и обслуживание преобразовательных устройств оказываются сравнимыми с затратами на сооружение линий. Постепенное развитие промышленности в Китае предполагает появление крупных кластеров потребителей не только вдоль побережья, но и внутри страны. В этом случае появится необходимость и в значительном отборе мощности вдоль линий, поэтому вариант строительства линий переменного тока становится более предпочтительным.

Для увеличения предельной передаваемой мощности и улучшения условий статической устойчивости было предложено использовать синхронные компенсаторы (СК) небольшой мощности в дополнение к управляемым шунтирующим реакторам (УШР). Синхронный

компенсатор, установленный на линии, в нормальном режиме не потребляет и не выдает реактивную мощность. Поэтому значение его номинальной мощности составляет порядка 3–5 % от мощности генератора [6].

Совместное применение синхронных компенсаторов ограниченной мощности и мощных управляемых шунтирующих реакторов позволяет снять какие-либо ограничения на длину линии переменного тока. Стоит отметить, что выполнение схемы с параллельной работой двух управляемых компенсирующих устройств – СК и УШР – имеет ряд преимуществ. Во-первых, оба устройства являются стандартными при сравнительно малой стоимости установки и небольшой номинальной мощности СК, а их совместная работа позволяет не только сохранить достоинства каждого элемента в отдельности, но и частично устранить их недостатки. Во-вторых, подобное решение позволяет существенно расширить диапазон возможных режимов дальних электропередач переменного тока и сделать управление этими режимами гибким [7, 8].

Основной целью нашей работы является исследование применения управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности для улучшения характеристик установившихся режимов и повышения уровня статической устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока длиной до 4000 км.

При этом решаются следующие задачи:

1) анализ установившихся режимов линии электропередачи переменного тока; определение предельных передаваемых мощностей; выбор и оптимизация мест установки и минимально необходимых объемов устройств управляемой поперечной компенсации;

2) исследование статической устойчивости линии электропередачи в широком диапазоне режимов: от холостого хода до режима передачи натуральной мощности; анализ совместной работы статических тиристорных и синхронных компенсаторов (СТК/СК) в составе различных схем компенсации параметров линий;

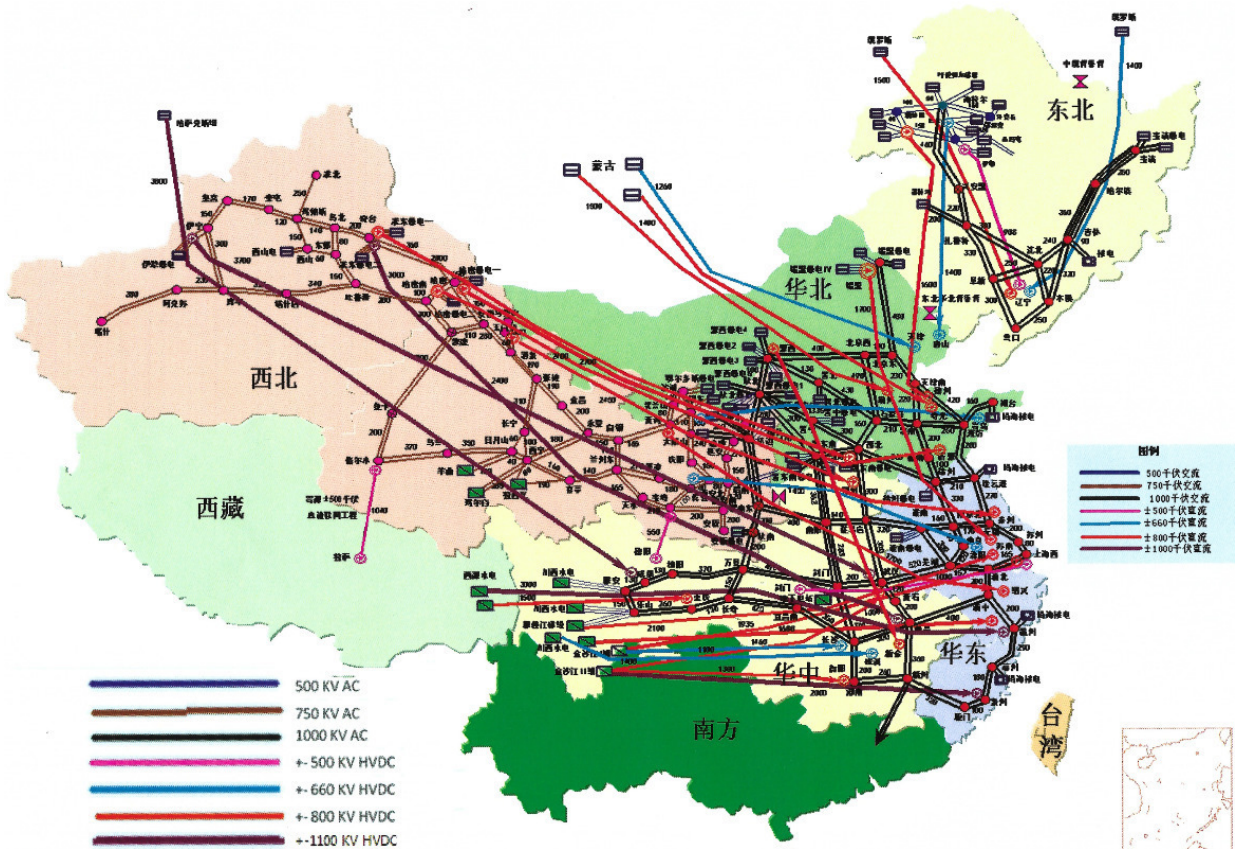


Рис. 1. План развития сетей сверхвысокого напряжения в Китае на 2020 год
 Fig. 1. Development of ultra-high voltage networks in China to 2020

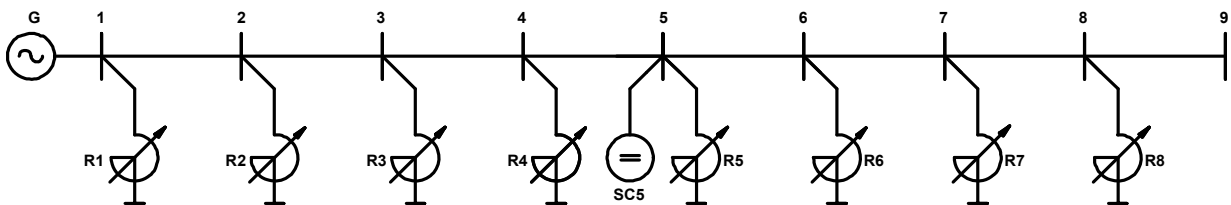


Рис. 2. Упрощенная схема электропередачи с одним синхронным компенсатором
 Fig. 2. Simplified diagram of transmission system with one synchronous condenser

3) определение требований к структуре автоматических регуляторов устройств поперечной компенсации, установленных в промежуточных точках электропередачи, совместная координация настроек регуляторов в рассматриваемой системе для обеспечения максимального демпфирования колебаний.

Анализ режимов и устойчивости линии электропередачи длиной 4000 км с одним синхронным компенсатором

Рассмотрим линию длиной 4000 км, разбитую на восемь участков по 500 км каждый (рис. 2). Расчетная схема представляет собой эквивалентный генератор, работающий параллельно с приемной системой неограниченной

мощности через дальнюю линию электропередачи переменного тока класса 1150 кВ, моделируемую цепочной схемой. Натуральная мощность такой линии при использовании компактной конструкции составляет 7340 МВА. Каждый участок цепочной схемы эквивалентруется стандартной П-схемой замещения. В узлах 1–8 расположены управляемые устройства компенсации реактивной мощности (УШР или СТК; R1–R8), способные как потреблять, так и выдавать реактивную мощность в сеть. В узле 5 также находится синхронный компенсатор небольшой мощности (SC5), предназначенный для демпфирования колебаний. В нормальном режиме работы его реактивная мощность равна нулю.

Синхронные машины моделируются полными уравнениями Парка–Горева без учета быстропереходных процессов в статорных контурах. Статические устройства компенсации реактивной мощности задаются переменными проводимостями без учета процессов в стали. Генератор и синхронный компенсатор оснащены системой АРВ сильного действия с каналами по отклонению напряжения и частоты, а также их производным. В статических устройствах компенсации принята система регулирования с обратными связями по напряжению, частоте и ее производной. В общей сложности количество настраиваемых параметров равно 32 (по четыре в генераторе отправной станции и синхронном компенсаторе и по три в каждом из восьми СТК [9]).

Порядок анализа устойчивости следующий. Задается активная мощность генератора, по которой с помощью угловых характеристик определяются потоки реактивной мощности вдоль линии; из баланса по реактивной мощности находятся проводимости СТК в узлах 1–8 схемы. Далее задаются границы изменения напряжения в узлах схемы, по которым определяются новые значения проводимостей,

обеспечивающие требуемые напряжения. Найденные проводимости подставляются в полную динамическую модель электропередачи, с помощью которой рассчитываются переходные процессы и определяются собственные значения матрицы переменных состояния. Далее с помощью *метода сдвига собственных значений* [6, 10] проводится оптимизация настроек систем регулирования всех элементов электропередачи (генератор, восемь СТК и синхронный компенсатор) при желаемой степени затухания α_0 , которая по умолчанию принята равной -3 с^{-1} .

С помощью рассматриваемого метода оптимизации находили такое максимальное значение передаваемой мощности, при котором система все еще является статически устойчивой. В табл. 1 представлены результаты: i – номер узла (см. рис. 1); U_i – напряжения в узлах 1–9; B_i – проводимости СТК в узлах 1–8. В режиме передачи мощности $P = 1,02$ о.е. суммарный угол на передаче равен $231,69^\circ$. Доминирующие корни характеристического полинома в этом режиме:

$$\begin{aligned} & -4,4953 \pm j19,898; \quad -3,3387; \quad -3,0775 \pm j1,902; \\ & \quad -3,0456 \pm j0,0469; \quad -2,9805 \pm j0,1936; \\ & \quad -1; \quad -0,8397; \quad -0,1198. \end{aligned}$$

Основная часть корней, определяющих колебательную устойчивость, имеет степень затухания $\alpha_0 = -3 \text{ с}^{-1}$, что означает затухание переходного процесса примерно за 1 секунду.

Реактивная мощность, потребляемая на холостом ходу, равна зарядной мощности линии (2600 МВар/участок); выберем ее за номинальную мощность СТК. В режиме передачи мощности выше натуральной выдаваемая СТК реактивная мощность не должна быть больше номинальной. Также в рабочих режимах должен соблюдаться запас по статической устойчивости не меньше 20 %. Во всех представленных опытах напряжения на промежуточных подстанциях приняты равными номинальному.

Таблица 1

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,02$ о.е.

Table 1

Optimal settings of control systems for power transmission limit $P = 1.02$ p.u.

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Настройки коэффициентов регулирования СТК $_i$ (K_{Ri}), генератора (K_G) и синхронного компрессора (K_{Sc})			
			по каналу отклонения напряжения	по каналу производной напряжения	по каналу отклонения частоты	по каналу производной от частоты
1	1,001	-0,0194	$K_{G_0u} = -6,658$ $K_{R1_0u} = -99,766$	$K_{G_1u} = -9,281$ —	$K_{G_0\omega} = 0,019$ $K_{R1_0\omega} = 4,05$	$K_{G_1\omega} = -0,131$ $K_{R1_1\omega} = -1,379$
2	1	0,0236	$K_{R2_0u} = -99,701$	—	$K_{R2_0\omega} = 3,267$	$K_{R2_1\omega} = 1,816$
3	1,001	0,0223	$K_{R3_0u} = -99,811$	—	$K_{R3_0\omega} = 3,365$	$K_{R3_1\omega} = 1,883$
4	1	0,0012	$K_{R4_0u} = -72,344$	—	$K_{R4_0\omega} = 3,174$	$K_{R4_1\omega} = 0,999$
5	1,001	-0,0018	$K_{R5_0u} = -10,199$ $K_{Sc_0u} = -5,314$	$K_{Sc_1u} = -0,1$	$K_{R5_0\omega} = 2,074$ $K_{Sc_0\omega} = -0,019$	$K_{R5_1\omega} = 0,328$ $K_{Sc_1\omega} = 1,408$
6	1,001	-0,0018	$K_{R6_0u} = -46,925$	—	$K_{R6_0\omega} = 2,212$	$K_{R6_1\omega} = -1,353$
7	1	-0,0258	$K_{R7_0u} = -84,797$	—	$K_{R7_0\omega} = 3,042$	$K_{R7_1\omega} = -1,246$
8	1	-0,032	$K_{R6_0u} = -46,034$	—	$K_{R6_0\omega} = 2,214$	$K_{R6_1\omega} = -1,643$
9	1	—	—	—	—	—

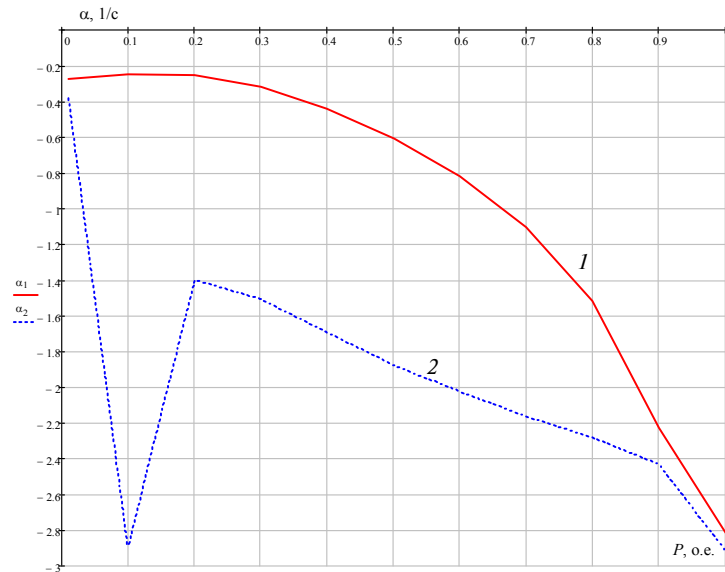


Рис. 3. Изменение степени затухания доминирующего корня при настройке на передачу по линии мощности $P = 1.02$ о.е. (α_1) и настройке на два режима 0,1 и 1,0 о.е. (α_2)

Fig. 3. Change in damping degree for dominant eigenvalue when tuning for power transmission of $P = 1.02$ p.u. (α_1) and for two operations of 0.1 and 1.0 p.u. (α_2)

Покажем, что данная настройка является унифицированной во всех режимах передачи мощности ниже максимальной. Изменение степени затухания доминирующего корня показано на рис. 3 (кривая 1).

Применение функции оптимизации `fmincon` в MATLAB предполагает задание ограничений

на величину искомых параметров. В частности, коэффициенты по отклонению напряжения СТК K_{R_0u} в предыдущих расчетах варьировались в диапазоне от -100 до -5 . Из табл. 1 видно, что на нескольких СТК величины этих коэффициентов приближаются к своим предельным значениям.

С учетом расширения диапазона изменения настроечных параметров проведем оптимизацию по двум режимам – малой нагрузки (0,1 о.е.) и натуральной мощности (1 о.е.). Результаты представлены на рис. 3 (кривая 2). Корни характеристического полинома для трех режимов электропередачи в зависимости от передаваемой мощности P следующие:

при $P = 0$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,2436 \pm j19,804; -4,0551; \\ & -2,9528 \pm j0,0672; -2,8616; -1; \\ & -0,84043; -0,6084; -0,381 \pm j2,8152; \end{aligned}$$

при $P = 0,1$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,2082 \pm j19,808; -3,4521; \\ & -2,9613 \pm j2,2418; -2,927 \pm j0,7448; \\ & -2,9044 \pm j1,6285; -2,8619; \\ & -1; -0,8405; -0,4932; \end{aligned}$$

при $P = 1,0$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,4663; -3,0185 \pm j20,798; \\ & -3,0131 \pm j1,4325; -2,9786 \pm j1,094; \\ & -2,8631; -1; -0,84063; -0,17988. \end{aligned}$$

Корни 1–3 на рис. 4 отвечают за колебательную устойчивость, корень 4 – за апериодическую. Как видно (см. рис. 3), устойчивость во всех режимах улучшилась, но при этом степень затухания в режиме холостого

хода все равно осталась низкой. Вместе с тем некоторое перераспределение управляющих воздействий между АРВ СГ/СК и систем регулирования СТК привело к тому, что все коэффициенты регулирования находятся в приемлемом диапазоне значений.

Повышение предела передаваемой мощности за счет увеличения числа и мощности синхронных компенсаторов

Увеличим количество синхронных компенсаторов до трех, установив их в точках 3, 5 и 7 (см. рис. 2). Проведем оптимизацию параметров регуляторов (общее их число в данном случае равно 40) и найдем предельный режим. Результаты представлены в табл. 2. Предел передаваемой мощности повысился до 1,08 о.е., т. е. прирост составил чуть более 5%. На рис. 5 представлен переходный процесс при малом набросе мощности (0,005 о.е.), при котором устойчивость сохраняется.

В режиме передачи мощности $P = 1,08$ о.е. угол по электропередаче равен $\delta = 243,3^\circ$, а доминирующие корни характеристического полинома следующие:

$$\begin{aligned} & -3,8037 \pm j18,782; -3,3619; -3,015 \pm j0,4241; \\ & -2,9933 \pm j0,9625; -2,9919 \pm j0,7659; -2,8624; \\ & -1; -0,8432; -0,2299. \end{aligned}$$

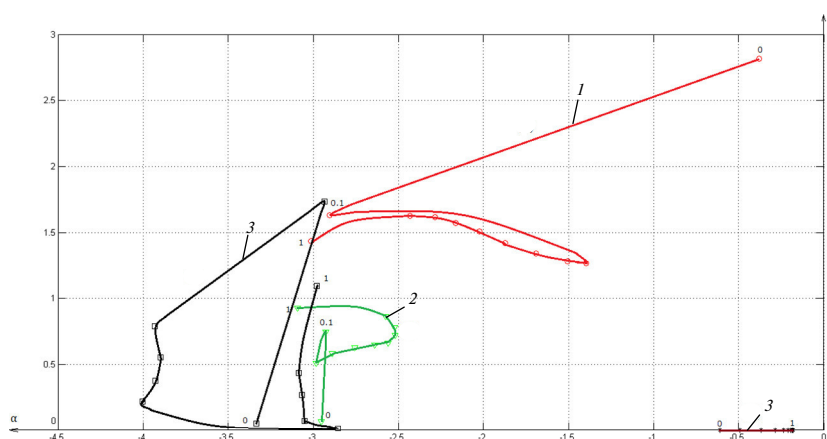


Рис. 4. Изменение доминирующих корней при настройке на два режима по передаваемой мощности

Fig. 4. Change of dominant eigenvalues when tuning for two operations

Таблица 2

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,08$ о.е. с тремя синхронными компенсаторами

Table 2

Optimal settings of control systems to power transmission limit $P=1.08$ p.u. with three synchronous condensers

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Настройки регуляторов трех синхронных компенсаторов			
			по каналу отклонения напряжения	по каналу производной напряжения	по каналу отклонения частоты	по каналу производной от частоты
1	1,001	0	—	—	—	—
2	1,001	0,075	—	—	—	—
3	1,001	0,062	$K_{SC3_{0u}} = -6,439$	$K_{SC3_{1u}} = -8,727$	$K_{SC3_{0\omega}} = 1,695$	$K_{SC3_{1\omega}} = -1,661$
4	1,001	0,0488	—	—	—	—
5	1,001	0,0364	$K_{SC5_{0u}} = -14,556$	$K_{SC5_{1u}} = -0,636$	$K_{SC5_{0\omega}} = 4,709$	$K_{SC5_{1\omega}} = 1,545$
6	1,001	0,0247	—	—	—	—
7	1,001	0,0152	$K_{SC7_{0u}} = -6,877$	$K_{SC7_{1u}} = -4,125$	$K_{SC7_{0\omega}} = 4,167$	$K_{SC7_{1\omega}} = -0,418$
8	1	0	—	—	—	—
9	1,001	0	—	—	—	—

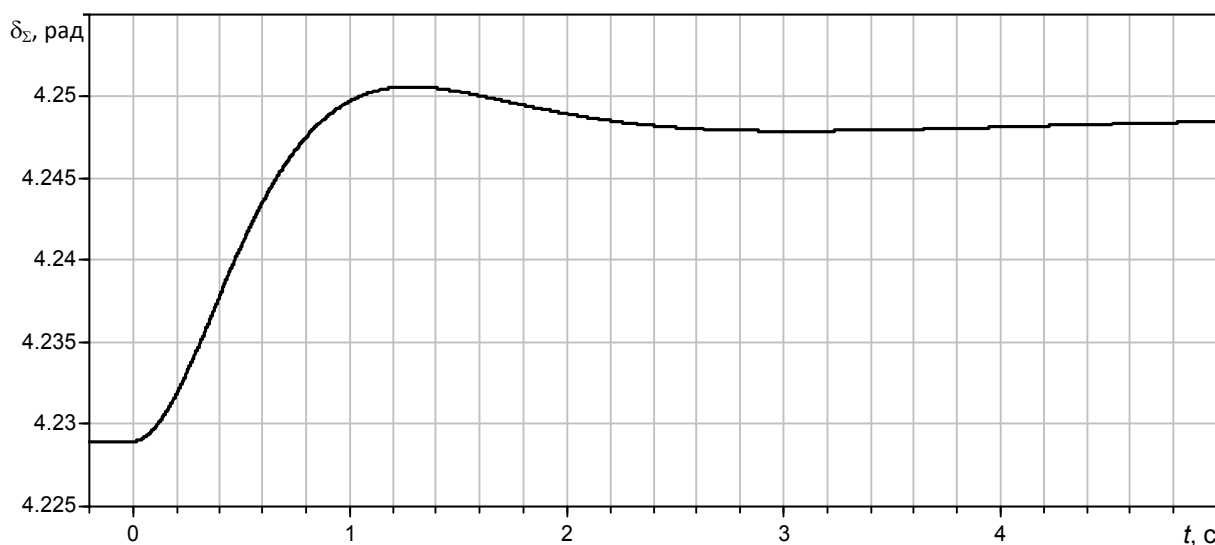


Рис. 5. Переходный процесс при набросе мощности 0,005 о.е. из режима передачи 1,08 о.е.

Fig. 5. Angle fluctuations under small disturbance (power step 0,005 p.u.) on maximum power transmission 1,08 p.u.

На рис. 5 представлен переходный процесс при малом набросе мощности (0,005 о.е.), при котором устойчивость сохраняется.

Полученные результаты показывают, что установка дополнительных синхронных компенсаторов в различных точках линии увеличивает, пусть и незначительно, предел пере-

даваемой мощности. Проанализируем изменение предела передаваемой мощности для всех трех рассмотренных случаев при увеличении установленной мощности СК вдвое.

Результаты представлены в табл. 3. Из нее видно, что предел по статической устойчивости с одним СК при увеличении его мощности

в два раза увеличивается до 1,06 о.е. В то время как установка двух СК исходной мощности в точках 4 и 7 дает увеличение лишь до 1,04 о.е., а установка трех СК – до 1,08 о.е. Увеличение мощности СК в два раза для случая установки трех СК позволяет добиться передаваемой мощности 1,21 о.е. Таким образом, при данной конфигурации схемы созданный запас по статической устойчивости позволяет работать в диапазоне режимов передачи от холостого хода до натуральной мощности.

Таблица 3

Предельная мощность линии при различных местах и мощностях установки СК

Table 3

Power transmission limits at various locations and capacities of SC installation

Узлы установки СК	Предельная передаваемая мощность P , о.е., при разных мощностях СК	
	$S_{СК} = 360$ МВА	$S_{СК} = 720$ МВА
5	1,02	1,06
4 и 7	1,04	1,11
3, 5 и 7	1,08	1,21

Влияние постоянных времени СТК на статическую устойчивость дальней электротрансформации

Во всех предыдущих случаях оптимизация проводилась при неизменной постоянной времени СТК, равной 1 секунде. Рассмотрим теперь влияние этой постоянной времени на статическую устойчивость [11, 12]. Анализ будем проводить для случая линии, представленной на рис. 2, с тремя СК мощностью 360 МВА каждый и настроенной на передаваемую мощность 1,08 о.е. (см. табл. 3). Установим новую желаемую степень устойчивости α_0 , равную -4 с⁻¹. Границы изменения постоянной времени – от 0,3 до 3 с. Максимальный наброс мощности на турбину эквивалентного генератора, при котором система сохраняет устойчивость, равен 0,005 о.е.

Результаты оптимизации только постоянных времени СТК показывают, что в точках установки синхронных машин (генератора и компенсаторов) быстродействие статических устройств может быть сравнительно низким. На этих подстанциях СТК будут отвечать только за поддержание требуемых параметров установившихся режимов при медленном изменении передаваемой по линии мощности.

Оптимизация постоянных времени СТК позволила улучшить степень затухания доминирующих корней, однако увеличения предела передаваемой мощности достигнуть не удалось. Проведем совместную оптимизацию коэффициентов систем регулирования и постоянных времени СТК (48 параметров). Результаты представлены в табл. 4, зависимости реактивных мощностей трех СК от времени в переходных процессах – на рис. 6.

Таблица 4

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,1$ о.е. при различных постоянных времени СТК

Table 4

Optimal settings of control systems to power transmission limit $P = 1,1$ p.u. with different SVC time response

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Постоянные времени СТК $T_{окр i}$
1	1,001	0,0074	0,818
2	1,001	0,0918	0,499
3	1,001	0,0774	0,604
4	1,001	0,0637	0,357
5	1,001	0,0506	0,429
6	1,001	0,0382	0,303
7	1,001	0,0292	1,353
8	1	0,0107	0,523
9	1,001	–	–

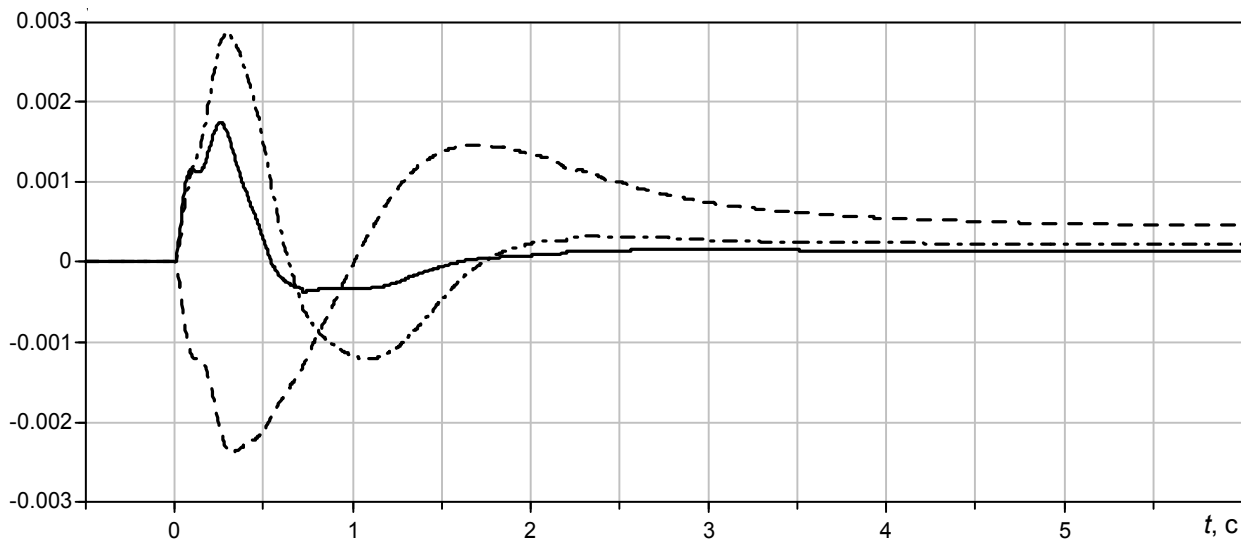


Рис. 6. Изменение реактивной мощности синхронных компенсаторов при малом возмущении на электропередаче (----- SC3; - · - · - SC5; ——— SC7)

Fig. 6. Fluctuations of synchronous condenser reactive power under small disturbance on power transmission (----- SC3; - · - · - SC5; ——— SC7)

Как видно из таблицы, передаваемая мощность увеличилась на 0.02 о.е., однако степень затухания доминирующих корней по сравнению с приведенными в табл. 3 значительно улучшилась. По данной настройке регуляторов угол передачи при $P = 1,1$ о.е. составляет $\delta = 245,9^\circ$, а доминирующие корни характеристического полинома следующие:

$$\begin{aligned}
 & -4,5361 \pm j20,731; -3,9746 \pm j20,584; \\
 & -3,9675 \pm j2,5001; -3,9581 \pm j7,9451; \\
 & -3,9157 \pm j2,1186; -3,9116; -3,8882 \pm j1,0876; \\
 & -3,8311 \pm j0,5267; -3,769; -2,8975; -1; \\
 & -0,8608; -0,3199
 \end{aligned}$$

Также можно отметить, что значительно уменьшились по модулю коэффициенты регулирования по отклонению напряжения. На рис. 6 показаны реактивные мощности трех СК, которые не возвращаются в нулевое значение после возмущения. С этим связана необходимость дальнейшего совершенствования систем регулирования устройств компенсации.

Выводы по работе

Проведено исследование режимов и устойчивости дальней линии электропереда-

чи переменного тока максимальной длиной 4000 км с управляемой поперечной компенсацией.

Показано, что параллельная работа СТК/УШР и СК малой мощности в качестве компенсирующих устройств в одном из узлов позволяет реализовывать режимы передачи мощностей больше натуральной на 10–20 %.

С использованием метода сдвига собственных значений матрицы переменных состояния выполнена совместная координация настроек регуляторов УШР/СТК, АРВ СГ и СК.

Выявлено, что использование одинаковых коэффициентов систем регулирования на всех СТК ведет к значительному ухудшению статической устойчивости и является неэффективным.

Показано, что одновременная оптимизация коэффициентов систем управления и постоянных времени СТК позволяет увеличить предел передаваемой мощности до 1,1 о.е. и добиться улучшения уровня статической устойчивости. Увеличением мощности СК в узле в два раза достигнуто повышение предельной передаваемой мощности до 1,21 о.е.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кашин И.В., Смоловик С.В.** Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемым устройствами поперечной компенсации // *Электричество*. 2001. № 2. С. 10–15.
2. **Рагозин А.А.** Условия статической устойчивости дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами и их физическая интерпретация // *Электричество*. 1997. № 5. С. 11–14.
3. **Belyaev A.N., Izotova K.A., Kashin I.V.** Stability of ultra long distance AC power transmission lines with controlled shunt compensation devices // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 572–576.
4. **Yan Xie and Baichao Chen.** Applied research on controllable shunt reactor in Ultra-High Voltage ac transmission system // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, 2008. P. 4258–4262.
5. **Александров Г.Н., Лунин В.П.** Управляемые реакторы. СПб: Северо-западный филиал АО «ГВЦ Энергетики», 2001. 158 с.
6. **Пересльцких О.О., Рыбаченко И.В., Беляев А.Н.** Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока с управляемой поперечной компенсацией // *Материалы IX международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи»*. Казань. 2018. С. 215–219.
7. **Eremia M.** *Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS and Artificial Intelligence* // IEEE Press, Wiley, 2016. 1063 p.
8. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.
9. **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.
10. **Устинов С.М.** Метод численного поиска настроек регуляторов для обеспечения устойчивости больших энергообъединений // *Известия академии наук. Энергетика*, 2015, № 2. С. 49–56.
11. **Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е.** Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35–500 кВ // *Электротехника*. 2003. № 1. С. 5–15.
12. **Belyaev A.N., Smolovik S.V.** The Speed of Response of Controlled Shunt Reactors // *Power Technology and Engineering*. July 2014. Vol. 48. No 2. P. 153–156.
13. **Zeng P.P., Qin X., Zhang Y., Liang C.** A design methodology for installing reactive compensation equipment in ultra high voltage AC transmission system based on a modified particle swarm optimisation method // 2014 Power Systems Computation Conference. Wroclaw, 2014. P. 1–6.
14. **Zheng Bin, Ban Lian-Geng, Qin Xiao-Hui, Xiang Zu-Tao.** Study on system operation voltage characteristics of UHV transmission lines with series capacitors // 2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, 2010. P. 1–7.
15. **Ma S., Yi J., Guo J., Zhang J., Ma S., Sun H.** Study for voltage regulation and reactive power compensation for UHV AC transmission with IEEE P1860 draft standard // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, 2014. P. 921–927.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕРЕСЛЬЦКИХ Олег Олегович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: operesl@yandex.ru

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

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 15.10.2018

REFERENCES

- [1] **Kashin I.V., Smolovik S.V.** Ustoychivost raboty protyazhennykh elektroperedach peremennogo toka s reguliruyemyimi ustroystvami poperechnoy kompensatsii. *Elektrichestvo*. 2001. № 2. S. 10–15. (rus.)
- [2] **Ragozin A.A.** Usloviya staticheskoy ustoychivosti dalnikh liniy elektroperedachi s upravlyayemyimi shuntiruyushchimi reaktorami i ikh fizicheskaya interpretatsiya. *Elektrichestvo*. 1997. № 5. S. 11–14. (rus.)
- [3] **Belyaev A.N., Izotova K.A., Kashin I.V.** Stability of ultra long distance AC power transmission lines with controlled shunt compensation devices. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow and St. Petersburg, Russia. 2018. P. 572–576.
- [4] **Yan Xie, Baichao Chen.** Applied research on controllable shunt reactor in Ultra-High Voltage ac transmission system. *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Wuhan, 2008. P. 4258–4262.
- [5] **Aleksandrov G.N., Lunin V.P.** Upravlyayemye reaktory. SPb: Severo-zapadnyy filial AO «GVTs Energetiki», 2001. 158 s. (rus.)
- [6] **Pereslytskikh O.O., Rybachenko I.V., Belyaev A.N.** Povysheniye ustoychivosti sverkhdalnikh liniy elektroperedachi peremennogo toka s upravlyayemoy poperechnoy kompensatsiyey. *Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»*. Kazan, 2018. S. 215–219. (rus.)
- [7] **Eremia M.** Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS and Artificial Intelligence, *IEEE Press*, Wiley, 2016. 1063 p.
- [8] **Ryzhov Yu.P.** Dalniye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya. M.: Izdatelskiy dom MEI, 2007. 488 s. (rus.)
- [9] **Khazov M.A., Chernyayev P.V., Belyaev A.N.** Issledovaniye rezhimov i ustoychivosti mezhsystemnoy svyazi na osnove gibkoy linii elektroperedachi peremennogo toka s upravlyayemoy prodolnoy i poperechnoy kompensatsiyey. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2017. T. 23. № 4. S. 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407. (rus.)
- [10] **Ustinov S.M.** Metod chislennogo poiska nastroyek regulyatorov dlya obespecheniya ustoychivosti bolshikh energoobyedineniy. *Izvestiya akademii nauk. Energetika*, 2015, № 2. S. 49–56. (rus.)
- [11] **Bryantsev A.M., Dolgoplov A.G., Yevdokumin G.A., Lipatov Yu.A., Lurye A.I., Makletsova Ye.Ye.** Upravlyayemye podmagnichivaniyem shuntiruyushchiye reaktory dlya seti 35–500 kV. *Elektrotehnika*. 2003. № 1. S. 5–15. (rus.)
- [12] **Belyaev A.N., Smolovik S.V.** The Speed of Response of Controlled Shunt Reactors. *Power Technology and Engineering*. July 2014. Vol. 48, No 2. P. 153–156.
- [13] **Zeng P.P., Qin X., Zhang Y., Liang C.** A design methodology for installing reactive compensation equipment in ultra high voltage AC transmission system based on a modified particle swarm optimisation method. *2014 Power Systems Computation Conference*. Wroclaw, 2014. P. 1–6.
- [14] **Zheng Bin, Ban Lian-Geng, Qin Xiao-Hui, Xiang Zu-Tao.** Study on system operation voltage characteristics of UHV transmission lines with series capacitors. *2010 International Conference on Power System Technology*. Hangzhou, 2010. P. 1–7.
- [15] **Ma S., Yi J., Guo J., Zhang J., Ma S., Sun H.** Study for voltage regulation and reactive power compensation for UHV AC transmission with IEEE P1860 draft standard. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Shenzhen, 2014. P. 921–927.

THE AUTHORS

PERESLYTSKIKH Oleg O. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: operesl@yandex.ru

BELYAEV Andrei N. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Received: 15.10.2018