

Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока на основе распределенного управления устройствами FACTS

БЕЛЯЕВ А.Н., ПЕРЕСЛЫЦКИХ О.О.
СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена исследованию установившихся режимов работы и устойчивости дальней линии электропередачи сверхвысокого напряжения с устройствами FACTS. Показаны возможности увеличения пределов передаваемой мощности, более чем на 30% превышающей натуральную мощность линии. Проанализировано влияние координированного управления устройствами FACTS на статическую устойчивость линии. Внедрение обратных связей по полному углу на передаче в системы управления устройств FACTS позволяет обеспечить высокие показатели статической устойчивости во всем диапазоне режимов работы электропередачи. Установлено, что высокое быстродействие при измерении, передаче и преобразовании подобного рода сигналов не требуется. Рассчитана динамическая устойчивость дальней линии электропередачи переменного тока сверхвысокого напряжения при двухфазном коротком замыкании на шинах электростанции и показана необходимость применения дополнительных противоаварийных мероприятий для ее сохранения.

Ключевые слова: сверхдальние линии электропередачи, статическая устойчивость, метод сдвига собственных значений, динамическая устойчивость, управляемая поперечная компенсация, устройства FACTS

В соответствии с тенденциями дальнейшего освоения природных ресурсов России территориями опережающего развития страны в долгосрочной перспективе будут районы Сибири и Дальнего Востока (рис. 1,а). Их развитие потребует перехода от создания локальных изолированных энергосистем к расширению ЕЭС России за счет строительства новых электростанций и сооружения протяженных линий высокого и сверхвысокого напряжения переменного и постоянного тока в составе национальной электрической сети [1]. Актуальной проблемой становится расширение производства электрической энергии в местах с большой концентрацией возобновляемых энергоресурсов, удаленных от потребителя на значительные расстояния (до нескольких тысяч километров), что характерно для энергосистемы Китая [2]. Все эти проекты требуют совершенной, экономически обоснованной и экологически безопасной технологии передачи электрической энергии на дальние расстояния. При этом в равной степени рассматриваются варианты линий постоянного (± 800 и 1100 кВ) и переменного (1000 и 1200 кВ) тока.

Предложения о постепенном формировании мирового электроэнергетического объединения были впервые озвучены около 30–40 лет назад, однако в настоящее время обрели новое качество в связи с принятой в Китае программой «Один пояс – один путь». Созданная для продвижения этого

проекта глобальная организация по развитию и сотрудничеству в области энергетических объединений *GEIDCO (Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization)* предложила свое видение (рис. 1,б), основанное на создании сверхдальних межсистемных линий электропередачи переменного и постоянного тока [3].

Как известно, на передачах постоянного тока не требуется установки устройств компенсации реактивной мощности. Однако для преобразования переменного тока в постоянный ток и обратно необходимо подключение регулируемых источников реактивной мощности с обоих концов линии. Кроме того, затраты на установку и обслуживание преобразовательных устройств оказываются соизмеримыми с затратами на сооружение линий [4].

Различие стоимости концевых устройств линий постоянного и переменного тока особенно существенно, если принять во внимание, что для обеспечения промежуточных присоединений с отбором мощности вновь требуется установка преобразовательных устройств на каждом из таких пунктов с соответствующим значительным увеличением затрат. Например, постепенное развитие промышленности в Китае предполагает появление крупных кластеров потребителей не только вдоль побережья Восточно-Китайского моря, но и внутри страны. В этом случае появится необходимость и в значительном отборе мощности вдоль линий.

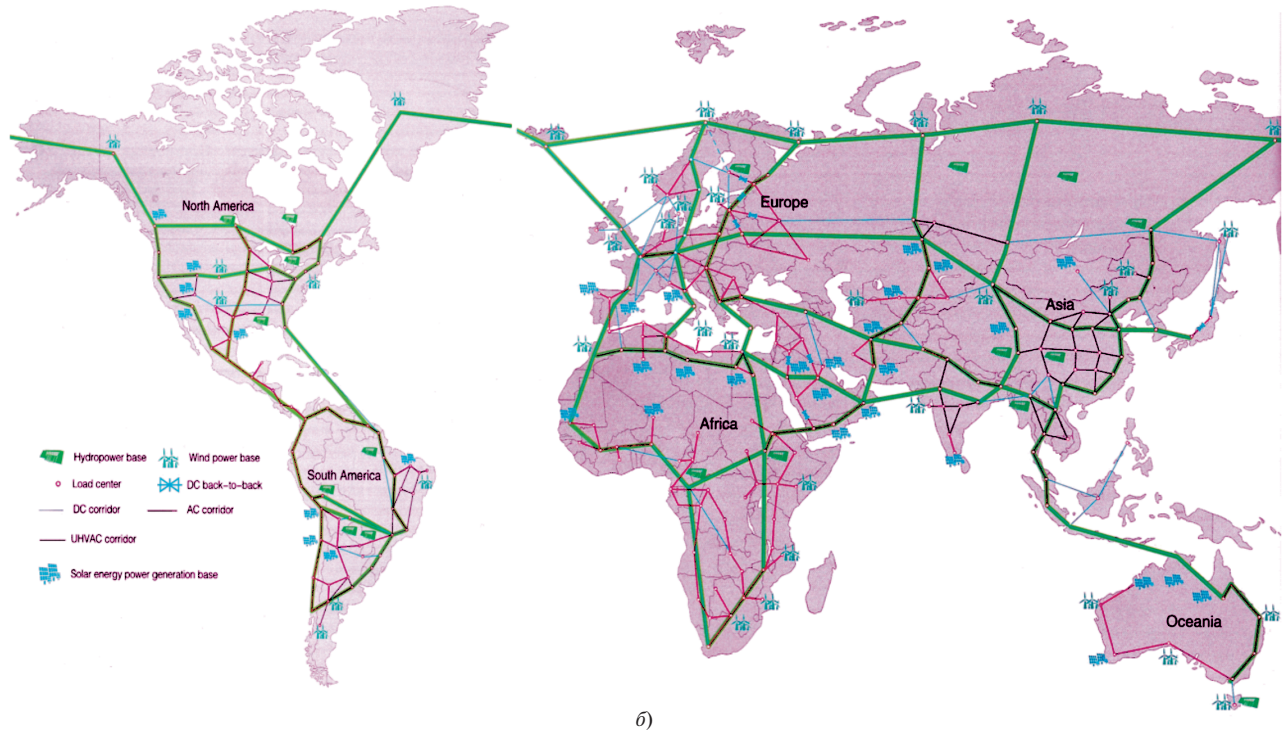


Рис. 1. Возможный сценарий развития ЕНЭС России на долгосрочную перспективу (а) и проект создания мирового электроэнергетического объединения, предложенный ассоциацией GEIDCO (б)

Для увеличения предельной передаваемой мощности и улучшения условий статической устойчивости линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока было предложено использовать синхронные компенсаторы (СК) небольшой мощности в дополнение к управляемым шунтирующим реакторам (УШР) или статическим тиристорным компенсаторам (СТК). Синхронный компенсатор, установленный на линии, в нормальном режиме не потребляет

и не выдает реактивную мощность. Поэтому значение его номинальной мощности может составлять около 3–5% мощности отправной станции. Комбинированное применение СК ограниченной мощности и мощных УШР или СТК позволяет снять какие-либо ограничения на длину линии переменного тока [5].

Вместе с тем, полученные ранее результаты не позволяли в полной мере использовать пропускную

способность таких линий по условиям статической устойчивости, а с точки зрения динамической устойчивости подобные проверки не проводились во все ввиду достаточной сложности объекта моделирования. Например, было установлено, что для ЛЭП длиной 4000 км предельная по статической устойчивости передаваемая мощность равна $0,92P_{\text{нат}}$.

Регулирование различных силовых устройств по местным параметрам за последние 60 лет уже доказало свою высокую эффективность [5, 8, 11]. В то же время введение большого количества различных локальных систем управления в современных энергосистемах, которые могут конфликтовать друг с другом в нестандартных ситуациях, приводит к необходимости изучения вопросов согласования их настроек в различных схемно-режимных условиях, а также введения обратной связи по взаимным параметрам в законы управления.

Невозможность применения в регуляторах возбуждения сигнала по отклонению взаимного угла между роторами синхронных машин оправдывалась в 60-х годах прошлого столетия отсутствием необходимых технических средств передачи и обработки информации. В современных условиях развитие технологической базы позволяет совершенствовать традиционные регуляторы за счет введения обратных связей по данным системы мониторинга переходных режимов *WAMS/СМПП*. Например, в 2018 г. дополнительная обратная связь с использованием данных систем векторных измерений была внедрена для демпфирования колебаний на тихоокеанской передаче постоянного тока *PDCI* [9], причем ее быстродействие оценивается величиной 0,082 с с учетом измерения, передачи, обработки (то есть, синхронизации данных из разных частей энергообъединения) и выдачи управляющих воздействий.

Целью исследований является разработка координированной системы управления дальней ЛЭП с устройствами *FACTS* на основе использования данных систем *WAMS/СМПП* для повышения пределов передаваемой мощности, а также статической и динамической устойчивости. При этом решаются следующие основные задачи:

анализ предельных установившихся режимов дальней ЛЭП переменного тока при различных объемах и вариантах подключения устройств *FACTS*;

на основе исследования статической устойчивости протяженной ЛЭП в широком диапазоне режимов её работы определение совместных требований к структуре и работе регуляторов управляемых устройств, обеспечивающих максимальное демпфирование колебаний;

выбор минимально необходимого объема противоаварийных мероприятий для повышения уровня динамической устойчивости дальней ЛЭП.

Повышение пределов передаваемых мощностей дальней ЛЭП. Рассмотрим линию длиной 4000 км, разбитую на восемь участков по 500 км каждый (рис. 2). Расчетная схема состоит из эквивалентной электростанции, работающей параллельно с приемной системой бесконечной мощности (узел 9) через дальнюю ЛЭП переменного тока напряжением 1150 кВ. Натуральная мощность линии компактной конструкции равна 7340 МВ·А [4, 5]. Каждый участок ЛЭП моделируется стандартной П-схемой замещения. В узлах 1–8 расположены управляемые устройства компенсации реактивной мощности (УШР+БСК или СТК; $R1–R8$), способные как потреблять, так и выдавать реактивную мощность в сеть. В узле 5 также установлен СК небольшой мощности ($SC5$), предназначенный для демпфирования колебаний. В нормальном режиме работы его реактивная мощность равна нулю. В качестве базисных были выбраны упомянутые выше величины $S_{\text{баз}} = 7340 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, $U_{\text{баз}} = 1150 \text{ кВ}$. Динамическая модель электропередачи реализована на языке *Modelica*, а также в программном комплексе объектно-ориентированного моделирования *Rand Model Designer*, разработанном в СПбПУ Петра Великого [6].

Проанализируем некоторые условия, при которых можно увеличить мощность, передаваемую по линии выше натуральной. В частности, установка дополнительных синхронных компенсаторов в различных точках ЛЭП увеличивает, пусть и незначительно, предел передаваемой мощности. Рассмотрим изменение предела передаваемой мощности для

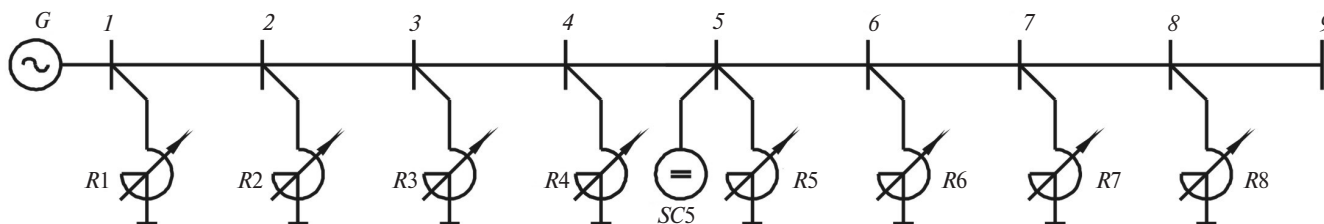


Рис. 2. Упрощенная схема линии электропередачи переменного тока длиной 4000 км

трех случаев (один—три СК вдоль линии) при увеличении установленной мощности компенсатора вдвое.

Результаты расчета режимов при поддержании номинального напряжения на всех промежуточных подстанциях электропередачи представлены в табл. 1. Видно, что при увеличении мощности СК в два раза предельная мощность ЛЭП с одним устройством возрастает примерно на 4%. При этом установка трех СК в точках 3, 5 и 7 дает увеличение лишь на 6%. Тем не менее, это почти на 25% превосходит результаты, полученные ранее в [4]. Увеличение мощности СК в два раза для случая установки трех устройств позволяет добиться передаваемой мощности $1,21P_{\text{нат}}$. Таким образом, при данной конфигурации схемы созданный запас по статической устойчивости позволяет работать в диапазоне режимов передачи от холостого хода до натуральной мощности.

Таблица 1

Предельные режимы электропередачи при различных условиях

Узлы установки СК	Мощность СК в узле, МВ·А	
	360	720
Предельная мощность, отн. ед.		
5	1,02	1,06
4 и 7	1,04	1,11
3, 5 и 7	1,08	1,21

При варьировании уровней напряжения на промежуточных подстанциях в пределах 1,0–1,05 отн. ед. и мощности одного СК ($S_{\text{СК}}$), установленного только в середине линии, в диапазоне 360–1000 МВ·А (рис. 3) предел по статической устойчивости возрастает уже до $1,25P_{\text{нат}}$. Выберем в качестве основного расчетного случая режим при $S_{\text{СК}} = 720$ МВ·А, $U = 1,05$ отн. ед. При этом предельная передаваемая

мощность равна 1,22 отн. ед., что фактически гарантирует обеспечение полного диапазона режимов от холостого хода до натуральной мощности линии с 20% запасом по статической устойчивости.

Реактивная мощность СТК, потребляемая на холостом ходу, равна зарядной мощности линии (2600 МВар/участок), она принята за его номинальную мощность. В режиме передачи активной мощности больше натуральной *выдаваемая* СТК реактивная мощность не будет превышать номинальной мощности.

Вопросы обеспечения статической устойчивости и совместной координации устройств FACTS. Реализация полученных выше режимов работы электропередачи была бы невозможной без совместной координации управляющих воздействий (регуляторов эквивалентной станции, СТК и СК). Координация выполнена с помощью *метода сдвига собственных значений* матрицы переменных состояния [7] при желаемой степени затухания α_0 , варьирующейся в диапазоне 1–4 1/с. При этом количество параметров регуляторов, подлежащих оптимизации, колеблется в диапазоне от 50 до 100.

Традиционно системы управления устройств FACTS представляются аналогом АРВ сильного действия, содержащим обратные связи по местным параметрам, таким как напряжение, частота и их производные, а также ток возбуждения (в синхронной машине) или ток отходящей линии (в УШР/СТК) [5, 8, 11]. Однако этого может оказаться недостаточно для обеспечения всей совокупности режимов работы передачи от холостого хода до натуральной мощности и выше.

При попытке обеспечения максимального демпфирования режим передачи натуральной мощности (1 отн. ед.) имеет значительный запас по колебательной устойчивости, но в остальных случаях он существенно снижается (табл. 2). В частности,

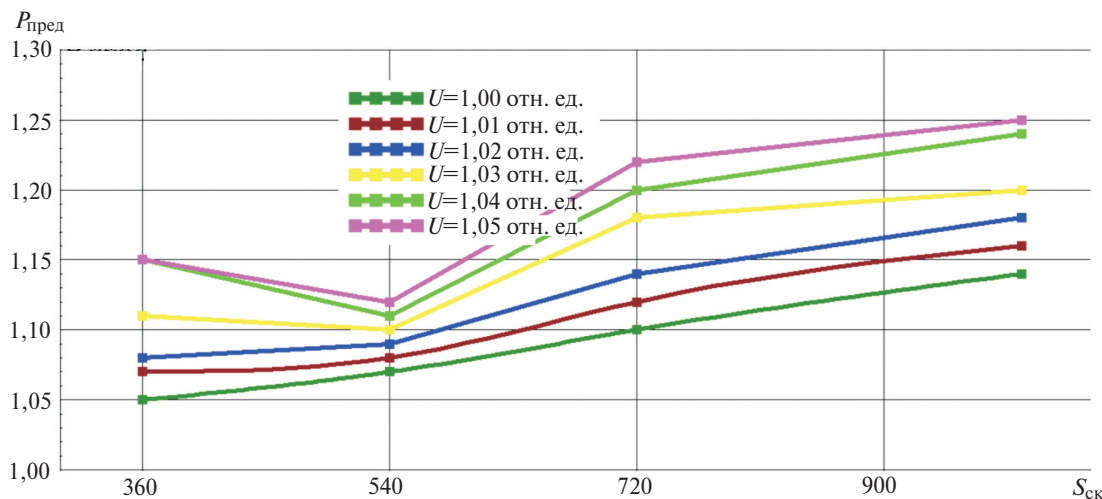


Рис. 3. Пределы передаваемой мощности при различных значениях $S_{\text{СК}}$ и уровня напряжений на промежуточных подстанциях

может быть показано, что при совместной оптимизации коэффициентов регулирования СТК и их постоянных времени уровень колебательной статической устойчивости в режиме передачи натуральной мощности возрастает до 4 1/с. Однако при переходе в режим малой нагрузки эта величина снижается до 0,05 1/с при тех же настройках регуляторов.

Таким образом, целесообразнее выбрать такие параметры систем регулирования, которые обеспечивали бы достаточное демпфирование в максимально широком диапазоне схемно-режимных ситуаций, чем получить максимальную производительность только в одной из них и ее окружении (робастная система).

Таблица 2

Изменение доминирующих собственных значений при регулировании по локальным параметрам

$S_{СК} = 720 \text{ МВА}, U = 1,05 \text{ отн. ед.}, \alpha_0 = -3,0 \text{ 1/с}$			
$P=0,1$	$P=1,0$	$P=12$	$P_{\text{пред}} = 1,22$
$-3,92 \pm j19,58$	$-3,82 \pm j18,92$	$-3,36 \pm j18,41$	$-3,29 \pm j18,35$
-3,59	-3,37	$-3,06 \pm j0,09$	$-3,08 \pm j0,05$
-1	$-2,77 \pm j3,69$	-2,86	-2,8631
-0,84	-1	-1	-1
$-0,73 \pm j0,23$	-0,37	$-1,81 \pm j0,7$	$-1,72 \pm j0,78$
$-0,07 \pm j3,12$		-0,39	-0,01

На основании вышеизложенного предложены следующие структуры регуляторов устройств FACTS. В эквивалентном генераторе станции используется традиционная структура регулирования

АРВ сильного действия. Модель АРВ СК представляет собой аналогичную структуру, дополненную каналами по производной тока статора и суммарного угла на передаче. При этом оптимизируемыми параметрами являются все коэффициенты регулирования и постоянная времени канала по углу. Регулятор СТК содержит обратные связи по напряжению, частоте и их производным, а также дополнительные каналы по току линии и суммарному углу на передаче (рис. 4). При этом оптимизируемыми параметрами являются шесть коэффициентов и две постоянные времени: собственная постоянная времени системы регулирования СТК ($T_{окр}$) и постоянная времени канала по полному углу на передаче (T_{δ}).

В табл. 3 представлены доминирующие собственные значения для различных схемно-режимных условий. При оптимизации по нескольким режимам (малой, средней нагрузки и близкой к предельной) видно, что система имеет большой запас колебательной статической устойчивости в широком диапазоне передаваемой по линии мощности. Ее предел с имеющимися обратными связями существенно увеличивается и составляет $1,34P_{\text{нат}}$ или 10 ГВт в именованных единицах.

В табл. 4 представлены оптимальные значения настроек регуляторов (как коэффициентов регулирования, так и постоянных времени), позволяющих обеспечить столь существенные показатели статической устойчивости во всем диапазоне режимов работы электропередачи. Очевидно, что высокое быстродействие от УШР или СТК не требуется

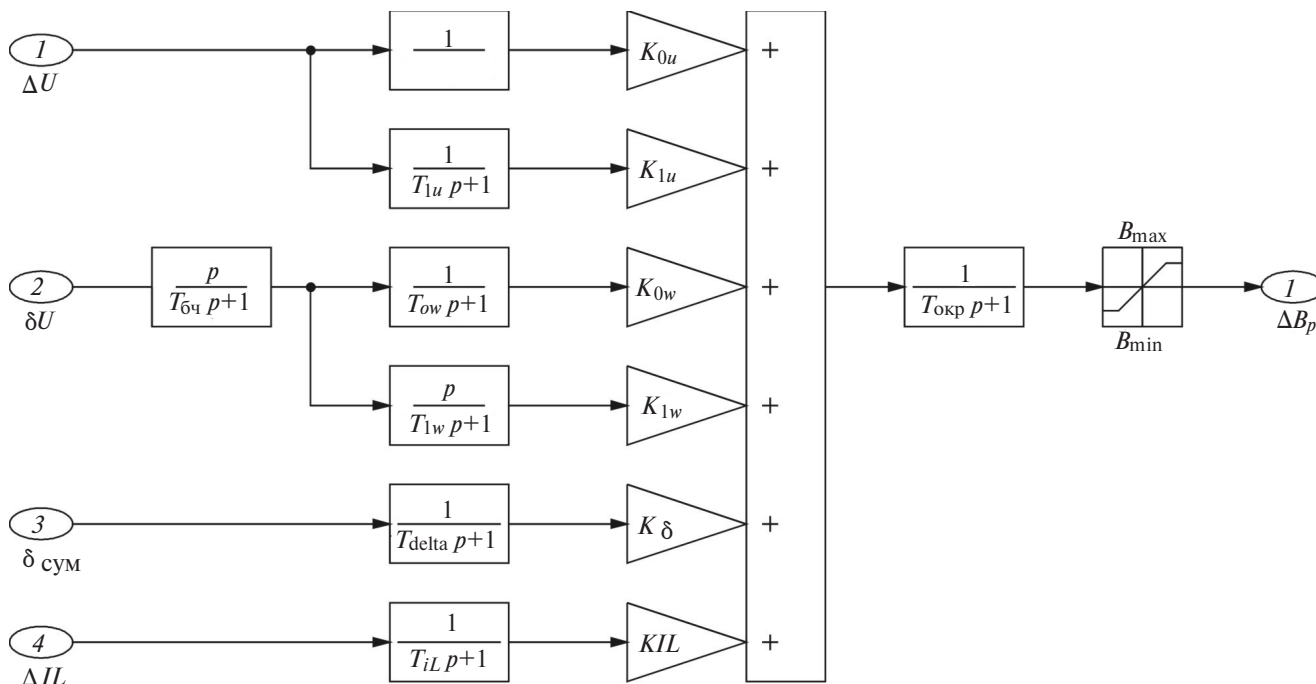


Рис. 4. Предлагаемая структура системы управления СТК

Таблица 3

Доминирующие собственные значения при оптимизации в широком диапазоне передаваемой по линии мощности

$S_{СК}=720$ МВА, $U=1,05$ отн. ед., $\alpha_0 = -1,5$ 1/c					
$P=0,1$	$P=0,4$	$P=0,6$	$P=1,0$	$P=0,18$	$P_{пред} = 1,34$
$-3,15 \pm j18,05$	$-2,98 \pm j18,11$	$-2,89 \pm j18,11$	$-2,69 \pm j18,06$	$-2,56 \pm j18,02$	$-2,42 \pm j17,95$
$-1,69 \pm j0,08$	-1,66	$-1,76 \pm j4,74$	$-2,35 \pm j4,56$	-1,62	-1,62
$-1,02 \pm j0,53$	$-1,4 \pm j4,72$	-1,65	-1,84	$-1,02 \pm j0,8$	-1
-1	$-1,13 \pm j0,45$	$-1,14 \pm j0,57$	$-1,07 \pm j0,74$	-1	$-0,97 \pm j0,84$
$-0,94 \pm j3,84$	-1	-1	-1	-0,1	-0,01
	-0,38	-0,3	-0,28		

Таблица 4

Результаты совместной координации настроек систем управления

№ узла	U_i , отн. ед.	$V_{пр}$, отн. ед.	Токр. СТК, с	T, с	Каналы регулирования генератора (K_G), СТК (K_R) и СК ($K_{СК}$)							
					по отклонению напряжения	по производной напряжения	по отклонению частоты	по производной частоты	по отклонению тока линии	по току возбуждения (i_f) и току статора (i_s)	по полному углу на передаче	
1	1,051	0,05	0,32	0,54	$K_{G0u} = -48,9$ $K_{R10u} = -25,1$	$K_{G1u} = -6,1$ $K_{R11u} = -11,5$	$K_{G0\omega} = -0,1$ $K_{R10\omega} = -0,2$	$K_{G1\omega} = -0,2$ $K_{R11\omega} = -2,3$	$K_{R11L} = 0,21$	$K_{Gif} = -1,22$	$K_{R1\delta} = 0,001$	
2	1,051	0,19	2,19	0,26	$K_{R20u} = -34,7$	$K_{R21u} = -8,5$	$K_{R20\omega} = 1,8$	$K_{R21\omega} = 0,8$	$K_{R21L} = 2,8$	-	$K_{R2\delta} = 0,1$	
3	1,051	0,17	1,29	0,61	$K_{R30u} = -34,1$	$K_{R31u} = -7,9$	$K_{R30\omega} = 2,1$	$K_{R31\omega} = 1,5$	$K_{R31L} = 2,7$	-	$K_{R3\delta} = 1,6$	
4	1,051	0,15	0,72	0,56	$K_{R40u} = -33,9$	$K_{R41u} = -7,4$	$K_{R40\omega} = 3,6$	$K_{R41\omega} = 1,2$	$K_{R41L} = 2,4$	-	$K_{R4\delta} = 2,1$	
5	1,051	0,13	0,37	0,55	$K_{R50u} = -33,8$ $K_{RC0u} = -34,6$	$K_{R51u} = -7,9$ $K_{SC1u} = -6,1$	$K_{R50\omega} = 2,3$ $K_{SC0\omega} = -0,4$	$K_{R51\omega} = 2,5$ $K_{SC1\omega} = 1,3$	$K_{R51L} = 2,5$	$K_{SCif} = 4,8$ $K_{SCis} = -0,5$	$K_{R5\delta} = 1,9$ $K_{S\delta} = 2,8$	
6	1,051	0,12	0,71	0,75	$K_{R60u} = -34,1$	$K_{R61u} = -8,2$	$K_{R60\omega} = 3,1$	$K_{R61\omega} = 0,8$	$K_{R61L} = 2,4$	-	$K_{R6\delta} = 2,1$	
7	1,049	0,11	0,84	0,42	$K_{R70u} = -34,2$	$K_{R71u} = -8,3$	$K_{R70\omega} = 2,5$	$K_{R71\omega} = 0,5$	$K_{R71L} = 2,3$	-	$K_{R7\delta} = 2,5$	
8	1,051	0,08	2,05	0,34	$K_{R80u} = -34,0$	$K_{R81u} = -7,9$	$K_{R80\omega} = 2,1$	$K_{R81\omega} = -1,1$	$K_{R81L} = 2,8$	-	$K_{R8\delta} = 1,9$	

(четвертый столбец) и их основной задачей является обеспечение баланса реактивной мощности на промежуточных подстанциях. Обратная связь по производной тока возбуждения у СК (предпоследний столбец) оказывает значительное влияние на увеличение запаса устойчивости, в отличие от канала по производной тока статора, который в дальнейшем может быть исключен из рассмотрения. Высокое быстродействие в обратной связи по полному углу на передаче (пятый столбец) также не требуется. При этом необходимо подчеркнуть, что применяемая методика оптимизации позволяет ограничивать диапазоны изменения всех представленных в таблице величин параметров (в общей сложности более 80).

Ранее было показано, что передача мощности больше натуральной по длинным ЛЭП с использованием только статических устройств (например, УШР или СТК) при углах, больших 180° , невозможно [5, 10]. Использование в них простейших систем управления по локальным параметрам (напряжению на шинах устройства и току линии и, в редких случаях, их производным) при отсутствии СК с собственной внутренней ЭДС приводило к тому, что предел передаваемой мощности по условиям статической устойчивости составлял не более $0,87P_{\text{нат}}$ для линии длиной 4000 км.

Введение обратной связи по полному углу на передаче позволило преодолеть указанное «особое» свойство линии. При отключении установленного в середине линии СК предел передаваемой мощности составил $1,25P_{\text{нат}}$. На графиках переходных процессов можно показать, что при малом возмущении, связанном с набросом мощности на турбину эквивалентного генератора, устойчивая работа системы сохраняется с использованием только СТК в промежуточных точках электропередачи при величине суммарного угла, равного 252° .

Динамическая устойчивость сверхдальней электропередачи и пути её повышения. В большинстве проведенных ранее исследований дальних электропередач освещались вопросы оценки допустимости установившихся режимов и статической устойчивости [5, 8, 10, 11]. Например, в [11] в качестве конечного возмущения в энергосистеме использовался наброс мощности на турбину эквивалентного генератора, равный 1000 МВт. Однако реальных исследований динамической устойчивости дальних ЛЭП на основе опытов короткого замыкания, как наиболее тяжелого возмущения, до сих пор выполнено не было из-за значительных трудностей, связанных с работоспособностью численных методов.

При отсутствии дополнительных корректировок кривые напряжений в промежуточных точках и

электромагнитного момента эквивалентного генератора при конечных возмущениях сопровождаются существенными бросками (до 5–8 отн. ед.) из-за наличия значительных емкостей участков линии, что в конечном итоге может привести к расхождению численных методов и прекращению расчета переходного процесса. Для их снижения были внедрены модели устройств ограничения перенапряжений (ОПН), выполненные в виде замкнутого на землю нелинейного сопротивления и установленные в каждой точке исследуемой схемы. Зависимость тока от напряжения представлена следующим образом:

$$U = AI^{0,08},$$

$$\text{где } A = \frac{U_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}^{0,08}} = 1,041, \quad I_{\text{ref}} = 2, \quad U_{\text{ref}} = 1,1.$$

С точки зрения динамической устойчивости рассматриваемый объект управления является крайне слабым, и без применения дополнительных мероприятий сохранение устойчивости не представляется возможным. Одним из средств, позволяющих повысить работоспособность системы при конечных возмущениях, является продольное электрическое торможение [12].

На рис. 5 представлены кривые переходных процессов (напряжения в начале линии и баланс моментов на валу генератора) при двухфазном ко-

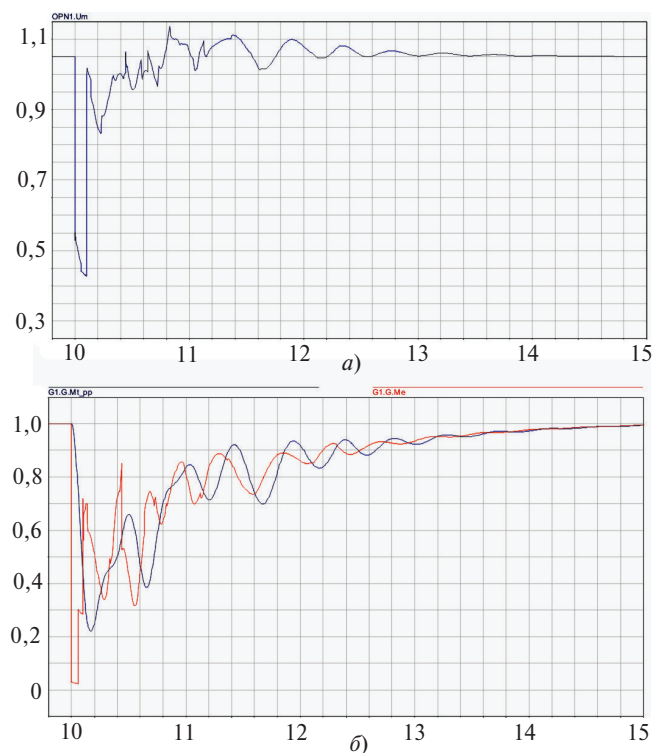


Рис. 5. Напряжение на шинах станции (а) и баланс моментов на валу эквивалентного генератора (б) при двухфазном коротком замыкании

ротком замыкании на шинах станции длительностью 0,1 с. При этом возникла потребность в применении следующих противоаварийных мероприятий:

последовательного электрического торможения с моментом включения устройства $t_{\text{вкл}} = 0,055$ с, длительностью включения $\Delta t_{\text{вкл}} = 0,58$ с, величиной активного сопротивления $R_{\text{ЭТ}} = 0,25$ отн. ед.

быстродействующего регулирования мощности турбины эквивалентного генератора с постоянной времени регулятора $\tau_c = 0,1$ с и статизмом регулирования $\sigma = 0,5\%$.

В этом случае система сохраняет динамическую устойчивость, а броски напряжений и электромагнитного момента эффективно ограничиваются с помощью устройств ОПН.

Выводы. Выполнено исследование установившихся режимов и устойчивости дальней ЛЭП сверхвысокого напряжения с устройствами FACTS.

Определены пределы передаваемой мощности при различных схемно-режимных условиях. Например, при увеличении напряжения на промежуточных подстанциях и мощности СК, установленного в середине линии, увеличивается и предел передаваемой мощности, который в конечном итоге достигает величины $1,22P_{\text{нат}}$, что фактически гарантирует обеспечение полного диапазона режимов от холостого хода до натуральной мощности линии с 20% запасом.

Анализ статической устойчивости показывает, что введение обратных связей по полному углу на передаче в системы управления СТК и СК приводит к увеличению предела передаваемой мощности до $1,34P_{\text{нат}}$. В именованных единицах эта величина составляет около 10 ГВт. При этом высокое быстродействие от СТК не требуется, и их основной задачей является обеспечение баланса реактивной мощности на промежуточных подстанциях. С другой стороны, обратная связь по производной тока возбуждения у СК оказывает значительное влияние на увеличение запаса устойчивости. Высокое быстродействие в обратной связи по полному углу на передаче также не требуется.

Выявлено, что передача мощности больше натуральной по длинным ЛЭП с использованием только статических устройств (например, УШР+БСК или СТК) при углах, больших 180° , становится возможной за счет введения в их системы управления дополнительных обратных связей по полному углу линии. При отключении СК, установленного в середине ЛЭП, предел передаваемой мощности составил $1,25P_{\text{нат}}$ (чуть более 9 ГВт), а величина суммарного угла достигла 252° .

Впервые выполнен расчет динамической устойчивости дальней ЛЭП переменного тока сверхвысокого напряжения при двухфазном коротком замыкании на шинах электростанции, исходя из режима передачи натуральной мощности. Показана необходимость применения дополнительных противоаварийных мероприятий для сохранения устойчивости, таких как последовательное электрическое торможение и быстродействующее регулирование мощности турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баринов В.А., Исаев В.А., Лисицын Н.В., Маневич А.С., Усачев Ю.В.** Развитие электроэнергетики и единой национальной электрической сети России (долгосрочная перспектива). — Энергия единой сети, 2017, № 2 (31), с. 50–60.
2. **Junzheng Cao, Jim Y. Cai.** HVDC in China. — Presented in EPRI 2013 HVDC & FACTS Conference August 28–29, Palo Alto, CA, USA [Электрон. ресурс] http://www.dsius.com/cet/HVDCinChina_EPRI2013_HVDC.pdf (Дата обращения 20.10.2020).
3. **Global Energy Interconnection Technology and Equipment.** Innovation Outline 2018–2025. China, Beijing: GEIDCO, 2017.
4. **Александров Г.Н.** Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 411 с.
5. **Кашин И.В., Смоловик С.В.** Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемыми устройствами поперечной компенсации. — Электричество, 2001, № 2, с. 10–15.
6. **Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer. — Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. Междисциплинарные секции и пленарные заседания институтов, 2015, с. 18–25.
7. **Устинов С.М.** Метод численного поиска настроек регуляторов для обеспечения устойчивости больших энергообъединений. — Известия Российской Академии Наук. Энергетика, 2015, № 2, с. 49–6.
8. **Переслыцких О.О., Беляев А.Н.** Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией. — Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, 2019, т. 25, № 1, с. 60–70.
9. **David A. Copp.** Distributed Control for Improving Power System Stability. — IEEE Smart Grid Resource Center, April 12, 2018 [Электрон. ресурс] <https://resourcecenter.smartgrid.ieee.org/education/webinars/SGWEB0080.html> (Дата обращения 20.10.2020).
10. **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, pp. 572–576.
11. **Рагозин А.А.** Условия статической устойчивости дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами и их физическая интерпретация. — Электричество, 1997, №5, с. 11–14.
12. **Зеленохат Н.И.** Повышение динамической устойчивости энергосистемы с помощью электрического торможения генераторов. — Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2004, № 4, с. 11–14.



Авторы: **Беляев Андрей Николаевич** – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого (СПбПУ).



Переслыцких Олег Олегович – аспирант кафедры «Электрические системы и сети» СПбПУ.

Electrichestvo, 2021, No. 1, pp. 4–12

DOI:10.24160/0013-5380-2021-1-4-12

Increasing Stability of Ultra-Long Power Transmissions by FACTS Device Distributed Control

BELYAEV Andrey N. (*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbSTU), St. Petersburg, Russia*) – Professor of the Electrical Systems and Networks Dept., Dr. Sci. (Eng.)

PERESLYTSKIKH Oleg O. (*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*) – Postgraduate student of the Electrical Systems and Networks Dept., (Eng.)

Steady-state operation modes and stability of a long-distance extra-high voltage transmission line equipped with FACTS devices are studied. The capabilities of increasing the transmitted power limits to a level of more than 30% above the power line surge impedance loading are shown. The effect the coordinated control of FACTS devices has on the power line small-signal stability is analyzed. By incorporating the power transmission full phasor difference feedbacks into the FACTS device control systems it becomes possible to obtain good small-signal stability indices in the entire range of power transmission operation. It has been found that a quite moderate response speed is required in measuring, transmitting, and converting such signals. The transient stability of a long-distance extra-high voltage AC transmission line under two-phase short-circuit on the power plant buses is calculated, and the need of using additional emergency controls to maintain its stable operation is shown.

Key words: *ultra-long distance power transmission lines, small-signal stability, eigenvalue shift approach, transient stability, controlled shunt reactive power compensation, FACTS devices*

REFERENCES

1. Barinov V.A., Isaev V.A., Lisicyn N.V., Manevich A.S., Usachev Yu.V. *Energiya edinoj seti – in Russ. (Energy of Unified Network)*, 2017, No. 2 (31), pp. 50–60.
2. Junzheng Cao, Jim Y. Cai. HVDC in China. – Presented in EPRI 2013 HVDC & FACTS Conference August 28-29, Palo Alto, CA, USA [Electron. Resource] http://www.dsius.com/cet/HVDCinChina_EPRI2013_HVDC.pdf (Date of appeal 20.10.2020).
3. Global Energy Interconnection Technology and Equipment. Innovation Outline 2018–2025. China, Beijing: GEIDCO, 2017.
4. Aleksandrov G.N. *Peredacha elektricheskoy energii* (Electric Power Transmission). SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 411 p.
5. Kashin I.V., Smolovik S.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 2, pp. 10–15.
6. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Nedelya nauki SPbPU: Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem. Mezhdisciplinarnye sekcii i plenarnye zasedaniya institutov – in Russ. (SPbGPU Science Week: Materials of the Scientific Forum with International Participation. Interdisciplinary Sections and Plenary Sessions of Institutes)*, 2015, pp. 18–25.
7. Ustinov S.M. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika – in Russ. (Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetika)*, 2015, No. 2, pp. 49–56.
8. Pereslytskikh O.O., Belyaev A.N. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki – in Russ. (Scientific and Technical Statements of SPbGPU. Natural and Engineering Sciences)*, 2019, v. 25. No. 1, pp. 60–70.
9. David A. Copp. Distributed Control for Improving Power System Stability. – IEEE Smart Grid Resource Center, April 12, 2018 [Electron. Resource] <https://resourcecenter.smartgrid.ieee.org/education/webinars/SGWEB0080.html> (Date of appeal 20.10.2020)
10. 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, pp. 572–576.
11. Ragozin A.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1997, No. 5, pp. 11–14.
12. Zelenohat N.I. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – in Russ. (Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry)*, 2004, No. 4, pp. 11–14.

[19.10.2020]

