



ЧУПРИКОВ В. С.

Заместитель генерального директора
АО «Ансальдо-ВЭИ», к.т.н.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ – КЛЮЧ К ПОВЫШЕНИЮ ПЕРЕДАТОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Один из ключевых способов повышения уровня передаваемой мощности без строительства новых линий и подстанций – компенсация реактивной мощности на всех уровнях ее генерации, передачи и потребления: от генераторов станций до линий СВН и обратно до сетей 380 В. Устройства компенсации реактивной мощности (КУ) могут быть разных типов и выполнять разные функции: от простейших – нерегулируемых конденсаторных батарей, до наиболее совершенных, называемых FACTS – устройств гибких (регулируемых) линий передач переменного тока. Одним из наиболее распространенных в мире видом устройств FACTS являются статические тиристорные компенсаторы (СТК).

НАЗНАЧЕНИЕ СТК И ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ФУНКЦИИ

Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности широко используются для решения различных проблем передачи и распределения электрической энергии, связанных с большими и быстрыми колебаниями реактивной мощности. Установка СТК на электрической подстанции промышленного предприятия, содержащего мощные резкопеременные нагрузки типа дуговых сталеплавильных печей (ДСП), приводов

прокатных станов и т.п., обеспечивает снижение колебаний напряжения, фильтрацию высших гармоник и стабилизацию напряжения на шинах нагрузки, что повышает производительность оборудования и снижает вредное влияние подобных нагрузок на работу бытовых потребителей электроэнергии: освещения, радио- и телеаппаратуры, электронно-вычислительной техники и других. Компенсация среднего значения реактивной мощности нагрузки уменьшает потери на передачу электроэнергии от центров ее генерирования к потребителям.

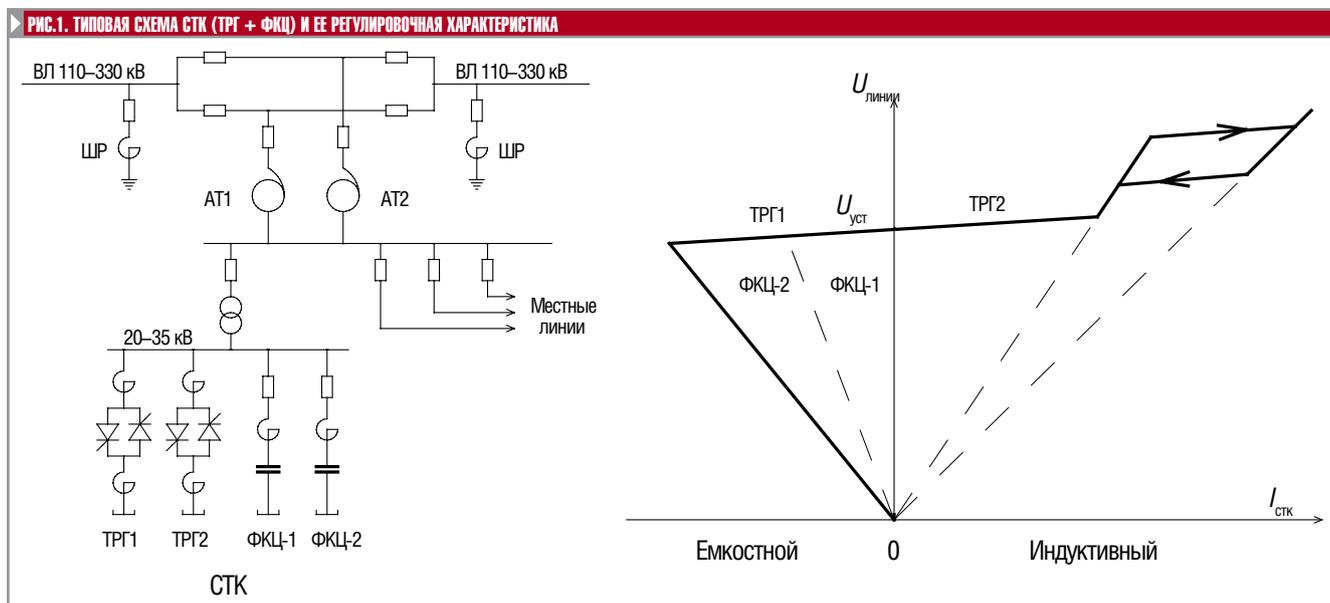
Применение СТК в энергосистемах позволяет повысить устойчивость и пропускную способность линий электропередач, стабилизировать напряжение на шинах подстанции, снизить уровень внутренних перенапряжений, а также уменьшить потери электроэнергии в ЛЭП и оборудовании подстанций.

Выполняемые функции СТК для линий электропередач:

- стабилизация напряжения на шинах подстанции;
- снижение отклонений напряжения при больших возмущениях в системе;
- регулирование реактивной мощности;
- симметрирование нагрузки;
- демпфирование колебаний активной мощности в линии;
- снижение внутренних перенапряжений (при подключении СТК непосредственно к линии электропередачи).

В результате:

- повышается статическая и динамическая устойчивость передачи;
- увеличивается передаточная способность электропередачи из-за улучшения устойчиво-



сти при большой передаваемой мощности и разгрузки линий от реактивной мощности.

Таким образом, по аналогии с охраной окружающей среды, СТК являются своего рода «очистными системами» для энергетической среды, восстанавливая качество электроэнергии, испорченной потребителями, и снижая активные потери на передачу электроэнергии. Бурный рост применения СТК в мире объясняется, в первую очередь, его высокой эффективностью – сроки окупаемости составляют 1–2 года.

КОНФИГУРАЦИЯ И РЕГУЛИРОВОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТК

Основная схемная конфигурация СТК включает в себя конденсаторные батареи, настроенные как фильтры высших гармоник – фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), постоянно подключенные к шинам или коммутируемые выключателями и являющиеся источниками реактивной мощности, и включенные параллельно им в треугольник три фазы управляемых тиристорами реакторов – тиристорно-реакторную группу (ТРГ), являющуюся плавно-регулируемым потребителем реактивной мощности. Угол зажигания тиристоров может быстро изменяться таким образом, чтобы ток в реакторе отслеживал реактивный ток нагрузки или реактивную мощность в энергосистеме. Номинальная мощность ФКЦ и ТРГ выбирается для каждого конкретного объекта в зависимости от назначения СТК, параметров и конфигурации энергосистемы и подстанции и требований по диапазону и алгоритмам регулирования реактивной мощности. Для каждого отдельного случая производится расчет требуемой

мощности ТРГ и ФКЦ и определяется их состав.

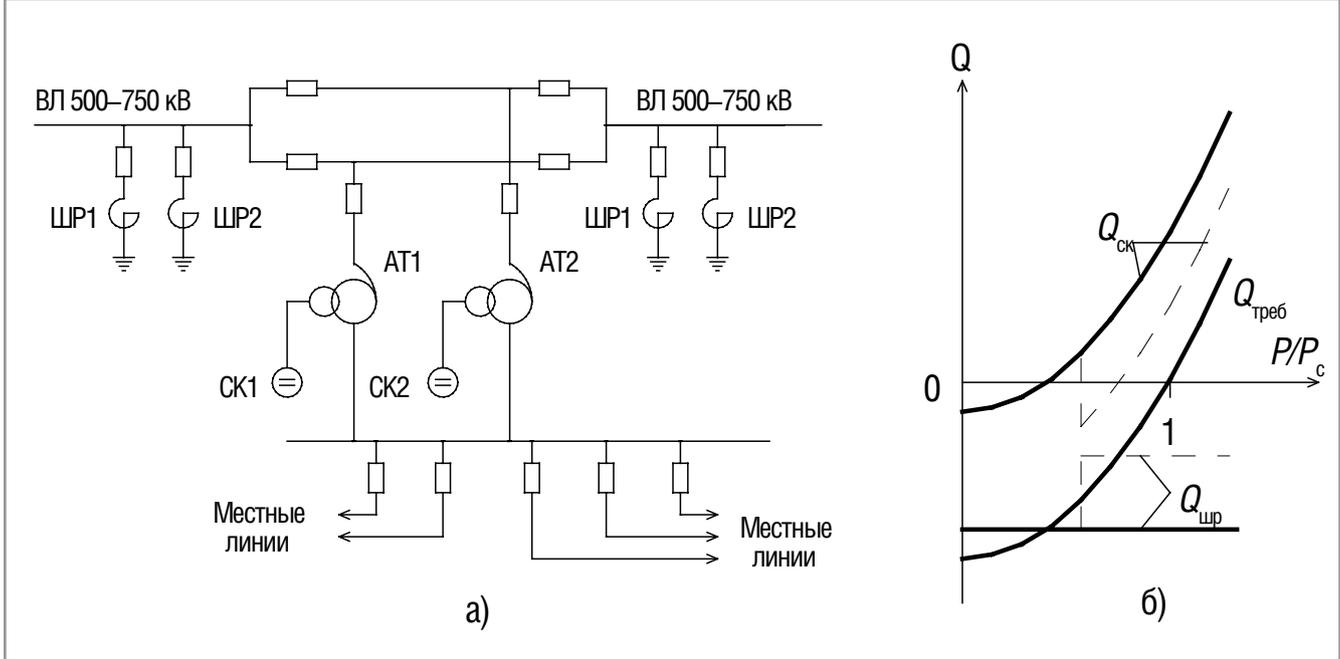
СТК для сетей 110–330 кВ

СТК для сетей 110–330 кВ устанавливаются на крупных районных подстанциях в узлах подключения местных нагрузок и служат, в основном, для регулирования напряжения на шинах подстанции. Использование таких СТК обеспечивает повышение пропускной способности и устойчивости электропередач, в частности, за счет демпфирования колебаний активной мощности в линии. При этом увеличение пропускной способности электропередачи достигает 1–2 МВт на 1 Мвар установленной мощности СТК.

В зависимости от длины линий и типов нагрузки эти компенсаторы имеют различные диапазоны регулирования реактивной мощности, но наиболее характерны случаи, когда мощности СТК в режиме выдачи и потребления реактивной мощности равны между собой. С целью поддержания рабочей точки СТК в середине регулировочной характеристики используются другие средства компенсации реактивной мощности – шунтирующие реакторы и конденсаторные батареи. Типовая схема такого СТК (рис. 1) состоит из постоянно подключенных ФКЦ мощностью Q_m и одной или нескольких ТРГ суммарной мощностью $2Q_m$, диапазон плавного регулирования реактивной мощности СТК от $-Q_m$ до $+Q_m$.

Оборудование СТК обычно выполняется на класс напряжения от 10 до 35 кВ и подключается либо через специальный понижающий трансформатор к шинам подстанции, либо к третичной обмотке подстанционного автотрансформатора. Преимущества такого

РИС. 2. СХЕМА ПОДСТАЦИИ СВН (А) И ЗАВИСИМОСТЬ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОТ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО ЛИНИИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (Б)



подключения СТК по сравнению с выполнением его на класс напряжения 110 или 220 кВ заключаются в снижении затрат на коммутационную аппаратуру и другие аппараты, а также оборудование СТК и его обслуживание. При большой мощности СТК оборудование ТРГ разбивается на несколько одинаковых групп. При этом снижаются потери в оборудовании СТК за счет применения плавно-ступенчатого регулирования, уменьшается уровень токов высших гармоник и повышается его надежность – при аварийном отключении одной группы остальные остаются в работе.

СТК для сетей СВН

Применение СТК на передачах класса напряжения 500-750 кВ носят исключительно системный характер и по ряду особенностей существенно отличаются от рассмотренных выше. Основная функция таких СТК – регулирование реактивной мощности в зависимости от передаваемой по линии активной мощности. Требуемая на конце участка линии реактивная мощность $Q_{\text{треб}}$ определяется известным соотношением:

$$Q_{\text{треб}} = Q_c \cdot [(P/P_c)^2 - 1],$$

где Q_c – зарядная мощность участка линии;

P – активная мощность, передаваемая по этому участку;

P_c – натуральная мощность линии.

На рис. 2-б приведен график этой зависимости. Традиционным способом регулирования реактивной мощности в линии является совместное использование шунтирующих реак-

торов (ШР) и синхронных компенсаторов (СК). Типовая схема подстанции СВН приведена на рис. 2-а. Шунтирующие реакторы выполняются на класс напряжения линии и подключаются непосредственно к ней для обеспечения компенсации зарядной мощности линии и снижения напряжения при включении участка в режиме холостого хода.

СК подключается на третичную обмотку подстанционного автотрансформатора или через специальный трансформатор на шины ВН подстанции. По мере увеличения передаваемой по линии активной мощности требуется компенсировать часть реактивной мощности, потребляемой ШР, что обеспечивается путем выдачи реактивной мощности синхронным компенсатором. Т.е. реакторы потребляют реактивную мощность, а СК ее выдает. При приближении передаваемой по линии мощности к натуральной значительно возрастают потери электроэнергии в средствах компенсации. Если на каждой стороне подстанции установлено 2 и более ШР, мощность СК можно уменьшить и регулирование реактивной мощности будет иметь плавно-ступенчатый характер за счет отключения части ШР (на рис.2-б показано пунктиром), при этом снижаются и потери. Однако в этом случае возникают проблемы с быстрым подключением отключенных ШР при возникновении перенапряжений на линии.

При использовании СТК вместо СК для такого принципа компенсации реактивной мощности линии схема СТК и его функции близки к рассмотренным выше. Диапазон

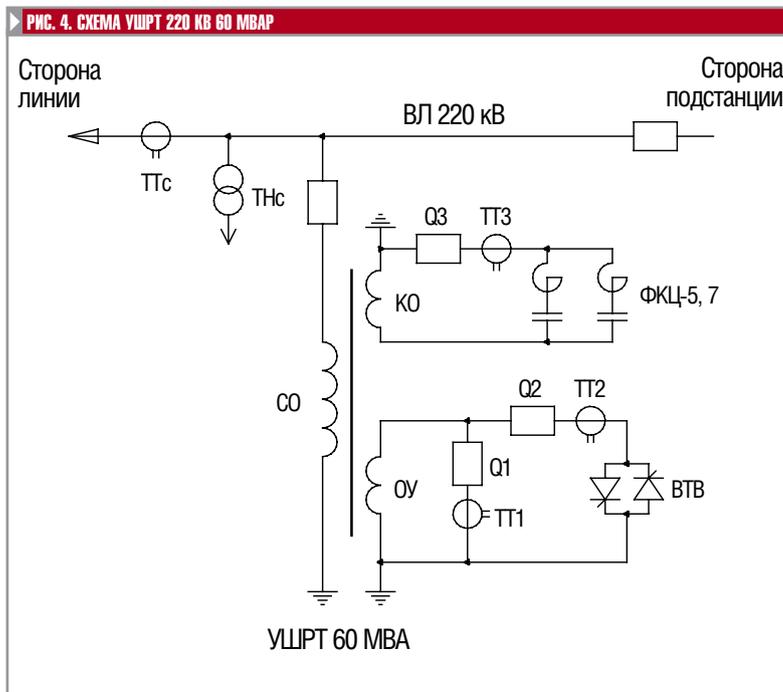
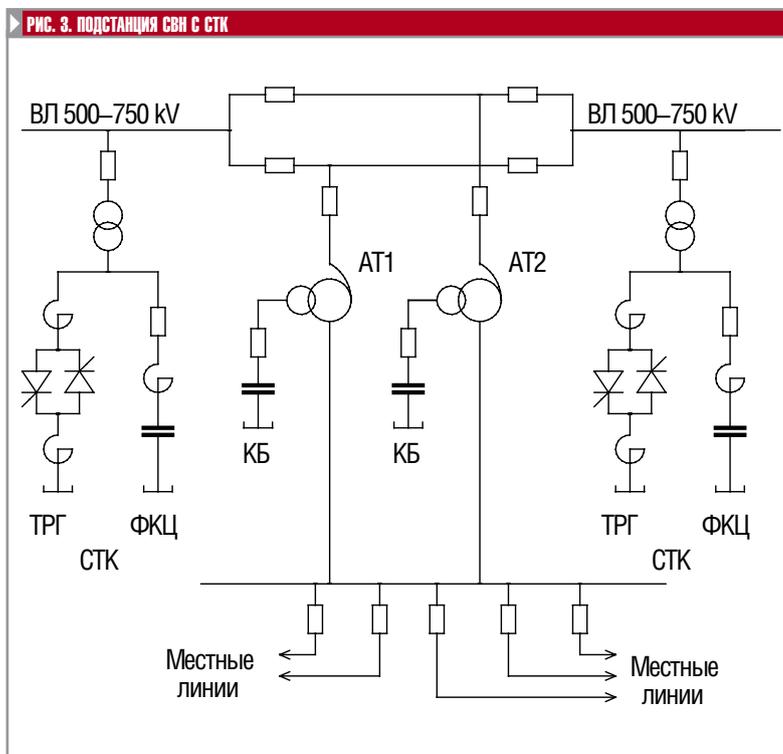
его регулирования, согласно рис. 2, смещен в сторону выдачи реактивной мощности. Например, СТК для линий 765 кВ (Гидро-Квебек, Канада) имеют мощность ТРГ 550 Мвар, а мощность ФКЦ 450 Мвар, т.е. диапазон его регулирования составляет от -100 до +450 Мвар.

Другое дело, когда точка подключения СТК переносится непосредственно на линию (рис. 3). В этом случае он может выполнять функции шунтирующего реактора – компенсации зарядной мощности участка линии и снижения внутренних перенапряжений. Алгоритм работы СТК следующий: перед включением линии ФКЦ отключены, СТК находится в состоянии готовности. При появлении напряжения на приемном конце линии в этот же полупериод частоты сети ТРГ включается в режиме непрерывного тока, т.е. с полной индуктивной проводимостью. После окончания переходного режима включения линии СТК переводится в режим регулирования напряжения на линии, подключая ФКЦ по мере роста передаваемой мощности.

Для подтверждения возможности выполнения СТК функции шунтирующего реактора в ВЭИ проводились специальные исследования на физической модели длинной линии переменного тока и СТК в виде одной ТРГ, подключенной на ее приемном конце [2]. Была разработана специальная система управления, которая обеспечила работу ТРГ в режиме непрерывного тока с момента появления напряжения на приемном конце линии. В работе было экспериментально доказано, что ТРГ может выполнять функции шунтирующего реактора при соответствующем управлении тиристорами.

Недостаток подключения СТК непосредственно к линии заключается в необходимости периодической коммутации ФКЦ. Один из вариантов решения этой проблемы – перенос конденсаторов с шин НН трансформатора СТК на шины подстанции (на рис. 3 показано пунктиром), так как при включении холостой линии конденсаторная мощность не требуется. При этом необходимо принять меры для снижения уровня высших гармоник в токе СТК – применять 12-пульсную схему ТРГ или секционировать ТРГ с использованием принципа плавно-ступенчатого регулирования.

Схема подобного системного СТК может быть оптимизирована за счет применения шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШРТ) с тиристорным управлением [3, 4], представляющего собой трансформатор с сетевой обмоткой (СО), выполненной на класс напряжения сети, и вторичной обмоткой управления (ОУ), имеющей 100 % магнитную связь



с обмоткой СО. В настоящее время компания «АО Ансальдо-ВЭИ» участвует в изготовлении и поставке двух СТК мощностью 60 Мвар для сетей 220 кВ компании ENE-E.P. (Республика Ангола). Эти СТК выполнены на базе УШРТ, подключаемого непосредственно к линии электропередачи 220 кВ (рис. 4), и предназначены для разгрузки линии от реактивной мощности и поддержания напряжения на шинах 220 кВ.

ТАБЛИЦА 1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕТЕВЫХ ЗАДАЧ ПО КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ			
Сеть	Напряжение, кВ	Тип КУ	Функции КУ
Коммунальное хозяйство	0,38	БК, УКРМ	Обеспечение требуемого значения tg
Промышленные предприятия	6 / 10 35	УКРМ СТК (для прокатных станов, ДСП)	Обеспечение требуемого значения tg Снижение колебаний напряжения
Региональные сетевые компании	35 / 110	БСК, УШР, СТК	Компенсация реактивной мощности нагрузок для разгрузки линий и сетевых трансформаторов
Федеральная сетевая компания	220 ... 750	УШР, СТК, УШРТ АСК, УПК, СТАТКОМ	Компенсация реактивной мощности линий Регулирование напряжения Регулирование потоков активной мощности

Применение УШРТ, объединяющего в себе и трансформатор, и компенсирующий реактор, позволило существенно снизить габариты, стоимость и потери в СТК.

Преимущества СТК по сравнению с другими типами КУ (СК, БСК, УШР):

- высокое быстродействие:
 - для ДСП время реакции – не более 5 мс,
 - для ЛЭП время реакции – до 20 мс в стационарных режимах, не более 10 мс в аварийных режимах;
- возможность пофазного регулирования реактивной мощности для симметрирования нагрузки или напряжения;
- минимальные затраты на эксплуатационное обслуживание, обусловленные отсутствием в СТК изнашиваемых и вращающихся частей, узлов с масляным охлаждением;
- низкий уровень потерь – не более 1,3 % при номинальной мощности;
- высокая надежность и большой межремонтный ресурс.

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ВОПРОСОВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Обеспечение полной компенсации реактивной мощности в электрических сетях требует скоординированного подхода в решении общей задачи. Очевидно, что чем выше уровень напряжения, тем более сложные и дорогие КУ с большими функциональными возможностями необходимо использовать.

В сетях 380 В достаточно применения нерегулируемых (БК) или регулируемых (УКРМ) конденсаторных установок для обеспечения требуемого коэффициента реактивной мощности согласно существующим нормативам (приказ Минпромэнерго № 49 от 22.03.2007 г.)

В промышленных сетях в большинстве случаев также достаточно УКРМ, а для предприятий с резкопеременной нагрузкой необходимо использование СТК для обеспечения требований ГОСТ 13109-97 по уровню колебаний напряжения.

Задача региональных сетевых компаний – довести уровень компенсации реактивной мощности нагрузок практически до нуля, обеспечив максимальную разгрузку линий и сетевых трансформаторов питающих подстанций. Здесь возможно использование и блоков статических конденсаторов (БСК), и управляемых шунтирующих реакторов (УШР) и СТК.

Задача ФСК – компенсация зарядной мощности линий электропередач и поддержание (регулирование) напряжения и, поэтапно, обеспечение регулирования потоков активной мощности по линиям путем внедрения всех типов устройств FACTS: УШР, СТК, УШРТ, асинхронизированных компенсаторов (АСК), устройств продольной компенсации (УПК), СТАТКОМов и вставок постоянного тока.

Распределение сетевых задач по компенсации реактивной мощности и требуемые для этого виды КУ сведены в таблицу 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуприков В.С. Применение статических тиристорных компенсаторов для ограничения коммутационных перенапряжений на линиях переменного тока. Тезисы докладов Всесоюзной н/т конференции «Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовоточной и полупроводниковой техники», ч. I., М., 1989 г.
2. Чуприков В.С. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи. «Электричество», № 4, 1990 г.
3. Александров Г.Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа. «Электричество», № 2, 2003 г.
4. G.N. Alexandrov, S.V.N. Jithin Sundar, S.C Bhageria и др. Design, Testing and Commissioning of First 420 kV, 50 Mvar Controlled Shunt Reactor in India. SIGRE, Session 2002, publ.14–120.
5. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения). «Электро», № 5, 2003 г.