

# КОНЦЕПЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЧУПРИКОВ В.С., к.т.н., технический директор ЗАО «Нидек АСИ ВЭИ», Россия

Применение статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТК) на подстанциях линий высоковольтных электропередач позволяет стабилизировать напряжение, снизить потери на транспорт электроэнергии и повысить пропускную способность передачи за счет повышения ее статической устойчивости. Еще больший эффект от использования СТК имеет место при его подключении непосредственно на конец линии электропередачи СВН вместо линейных шунтирующих реакторов. Такой быстродействующий СТК может обеспечить снижение перенапряжений при включении холостой линии, создать условия гашения дуги в паузу ОАПВ и в целом повысить динамическую устойчивость электропередачи.

В любом случае действует правило – чем выше точка подключения СТК и больше его мощность, тем больший эффект от его применения. Для подключения СТК к высокому напряжению используется повышающий трансформатор. Если объединить в один аппарат этот трансформатор и реакторы ТРГ, то существенно снизятся потери в СТК, площадь установки, стоимость обслуживания и повысится надежность СТК в целом.

Идея создания такого типа СТК, называемого управляемый шунтирующий реактор-трансформатор (УШРТ), существовала давно, однако первый опыт ее реализации в 1979 г. был неудачным, в первую очередь из-за высокого уровня потерь. Эта неудача на многие годы затормозила применение УШРТ в электроэнергетике.

В 90-е годы прошлого века проф. Г.Н. Александров показал возможность снижения потерь в электромагнитной части УШРТ путем применения специальных магнитных шунтов. Под его руководством были изготовлены и успешно эксплуатируются в Индии и Анголе УШРТ усовершенствованной конструкции с номинальным напряжением 230 и 420 кВ. За последние

3 года в Российской сетевой компании ОАО «ФСК ЕЭС» установлены 6 УШРТ с номинальным напряжением 121 и 242 кВ. Изготовлен и успешно испытан пилотный образец УШРТ на напряжение 500 кВ мощностью 60 МВА (однофазный).

## СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СТК И ТРЕБОВАНИЯ К ЕГО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ

Основные функции СТК в сетях СВН:

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

Первые две функции обеспечивают повышение статической устойчивости электропередачи, остальные – динамическую устойчивость.

При выборе стратегии управления СТК следует иметь в виду, что одновременно СТК может выполнять только одну функцию регулирования. В уста-

новившихся режимах СТК может в принципе иметь две или более функций, а выбор активной функции может быть автоматическим (по внешним параметрам или условиям работы энергосистемы) или по командам оператора подстанции. В переходных и аварийных режимах СТК может переключаться на решение локальных задач, регламентированных системой приоритетов. Перечень основных функций, реализуемых системой управления СТК, приведен ниже.

В установившихся режимах (с использованием замкнутого контура регулирования):

- трехфазное регулирование (стабилизация) среднего значения напряжения;
- трехфазное регулирование (компенсация) реактивной мощности в подходящей линии.

Кроме этого, при необходимости, СТК может выполнять симметрирование напряжения по фазам линии одновременно с функцией стабилизации напряжения – для этого контур регулирования напряжения выполняется пофазно независимым.

В переходных и аварийных режимах (без использования замкнутого контура регулирования):

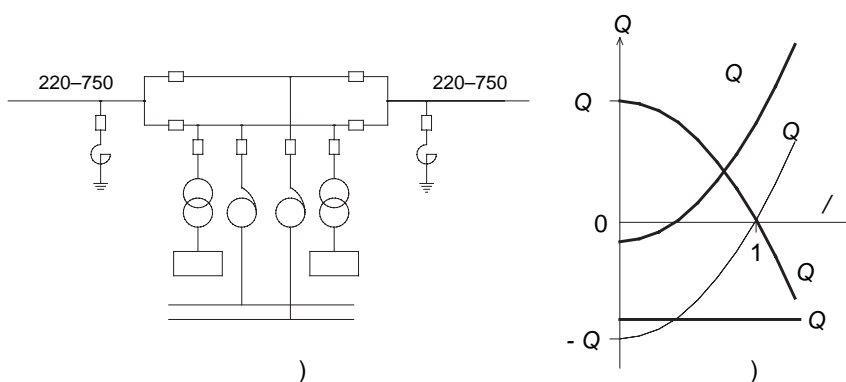


Рис. 1. Схема подстанции СВН (а) и зависимость реактивной мощности от передаваемой по линии активной мощности (б)

- ограничение напряжения сверху и снизу при превышении заданных уставок (за счет быстрого перехода в режим полного потребления или полной выдачи реактивной мощности);
- работа во время однофазного КЗ на линии (в паузе ОАПВ и после включения линии) по специальному алгоритму;
- демпфирование колебаний активной мощности в линии электропередачи.

Для достижения максимальной эффективности СТК система управления может реализовывать более сложные алгоритмы, например:

- использовать параллельно быстрый контур по реактивной мощности и медленный замкнутый по напряжению для улучшения процесса стабилизации напряжения при наличии резкопеременной нагрузки;
- адаптивно изменять параметры замкнутого контура регулирования (уставки, статизм) в соответствии с изменениями параметров энергосистемы для оптимизации регулировочной характеристики СТК;
- использовать внешние команды на коммутацию отдельного силового оборудования подстанции (линии, трансформаторы, шунтирующие реакторы, конденсаторные батареи) для обеспечения упреждающего воздействия СТК и снижения возмущений в энергосистеме.

Важно отметить, что в установившихся режимах работы электропередачи от СТК не требуется высокое быстродействие. В зависимости от параметров энергосистемы оптимальное время реакции СТК на изменение контролируемого параметра составляет 30–100 мс. В то же время в переходных и, особенно, аварийных режимах время реакции СТК не должно превышать 5–10 мс.

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТК В СЕТЯХ СВН

Известно, что реактивная мощность  $Q_{л}$ , генерируемая линией электропередачи, зависит от передаваемой активной мощности и определяется следующим соотношением:

$$Q_{л} = Q_{с} \cdot [(P/P_{с})^2 - 1],$$

где  $Q_{с}$  – зарядная мощность участка линии;

$P$  – активная мощность, передаваемая по этому участку;

$P_{с}$  – натуральная мощность линии.

Традиционный способ регулирования реактивной мощности в электропередачах СВН – совместное использование линейных шунтирующих реакторов (ШР) и синхронных (в прошлом) или статических компенсаторов, устанавливаемых на шинах ВН или СН подстанции или подключенных к третичной обмотке сетевых автотрансформаторов. Типовая схема подстанции СВН приведена на рис. 1-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, при этом установленная мощность ШР составляет 60–80 % от зарядной мощности линии.

По мере увеличения передаваемой по линии активной мощности требуется компенсировать часть реактивной мощности, потребляемой ШР, что обеспечивается путем выдачи реактивной мощности СТК. На рис. 1-б приведены графики реактивной мощности линии  $Q_{л}$ , ШР  $Q_{ШР}$  и требуемой мощности СТК  $Q_{СТК}$  в зависимости от передаваемой по линии активной мощности. В данном случае диапазон регу-

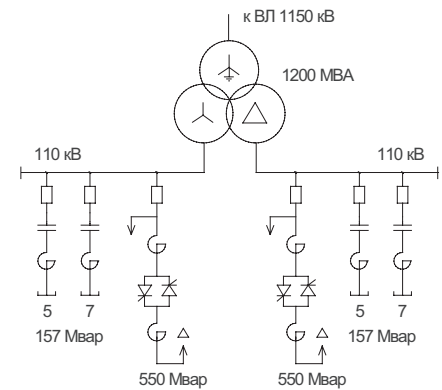


Рис. 2. Схема СТК для ВЛ 1150 кВ

лирования реактивной мощности СТК смещен в сторону ее выдачи.

При приближении передаваемой по линии активной мощности к натуральной значительно возрастают потери электроэнергии в средствах компенсации. Другое дело, когда точка подключения СТК переносится непосредственно на линию. В этом случае он может выполнять и функции шунтирующего реактора – компенсации зарядной мощности участка линии и снижения внутренних перенапряжений, и функции традиционного СТК – регулирования напряжения [1]. Зависимость реактивной мощности такого СТК  $Q_{СТК}$  СВН от передаваемой по линии активной мощности на рис. 1-б показана пунктиром. Диапазон регулирования СТК при этом смещен в сторону потребления реактивной мощности, т.е. фактически такой СТК представляет собой быстродействующий управляемый реактор, а потери в оборудовании СТК будут снижаться по мере роста передаваемой по линии мощности. При таком подходе к компенсации реактивной мощности линии объем и стоимость оборудования компенсирующих устройств, а также площадь установки и уровень потерь будут существенно ниже по сравнению с традиционной схемой.

Проект именно такого СТК был разработан в ВЭИ в 80-е годы прошлого столетия в рамках сооружения электропередачи «Экибастуз-Урал» напряжением 1150 кВ [2]. СТК, схема которого приведена на рис. 2, должен был подключаться непосредственно к линии электропередачи через специальный трансформатор и выполнять следующие функции (в приоритетном порядке):

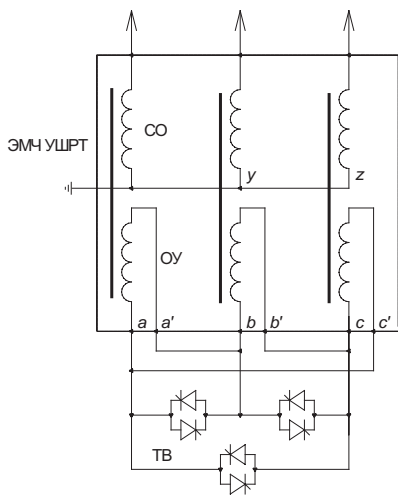


Рис.3. Схема УШРТ

- снижение внутренних перенапряжений;
- обеспечение условий гашения дуги в паузу ОАПВ;
- регулирование напряжения для повышения пропускной способности и уменьшения потерь;
- симметрирование напряжения по фазам в неполнофазных режимах ВЛ.

Установка СТК на каждой подстанции электропередачи позволила бы сократить количество линейных шунтирующих реакторов и существенно повысить пропускную способность передачи. По расчетам института «Энергосетьпроект» без установки СТК пропускная способность передачи была ограничена величиной 2,5 ГВА, а с СТК она увеличивалась до 6 ГВА. К сожалению, развал СССР не позволил реализовать этот проект и обеспечить работу построенной электропередачи с номинальными параметрами.

### УПРАВЛЯЕМЫЙ ШУНТИРУЮЩИЙ РЕАКТОР-ТРАНСФОРМАТОР

Очевидно, что необходимость использования специального понижающего трансформатора для применения СТК в сетях СВН приводит к дополнительным потерям и увеличению площади установки. Идея создания аппарата, объединяющего в себе этот трансформатор и реакторы ТРГ, так называемого управляемого шунтирующего реактора-трансформатора (УШРТ), существовала давно. На рис. 3 показана схема такого УШРТ. Его электромагнитная часть (ЭМЧ) имеет замкнутый магнитопровод и две обмотки. Обмотка высокого напряже-

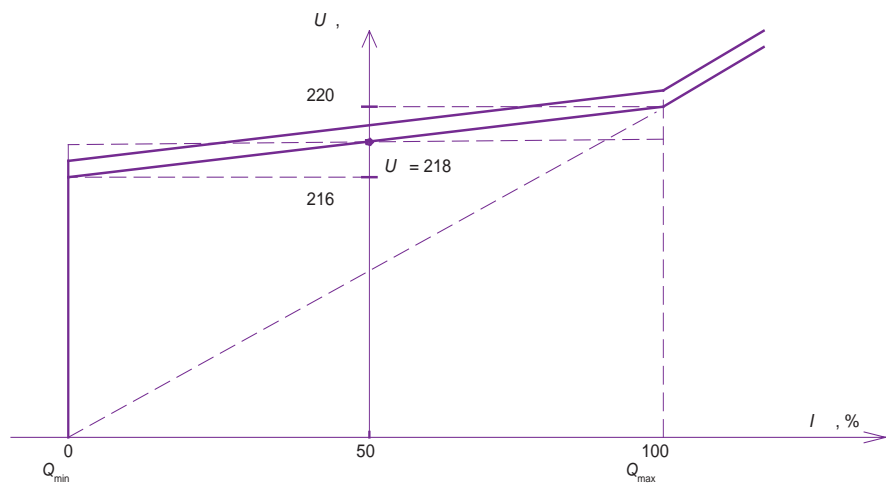


Рис. 4. Регулировочная характеристика систем управления УШРТ на ПС Viana и Самата

ния (сетевая – СО) подключается к точке подстанции, оптимальной с точки зрения регулирования реактивной мощности/напряжения или непосредственно к концу линии электропередачи и имеет соответствующий класс напряжения. Обмотка управления (ОУ) служит для подключения тиристорных вентилях (ТВ) и ее номинальное напряжение выбирается из учета оптимальных параметров ТВ. Отличительной особенностью УШРТ является 100%-я магнитная связь между СО и ОУ. Изменяя угол зажигания тиристоров можно регулировать ток в ОУ и, соответственно, в СО, от нуля до номинального значения, когда тиристоры полностью открыты.

УШРТ имеет следующие преимущества перед СТК с трансформаторным подключением:

- возможность выполнения на любой требуемый любой класс напряжения;
- снижение габаритов, стоимости и потерь в СТК в целом;
- высокая надежность схемы, так как режим КЗ для УШРТ является номинальным.

Первый в мире УШРТ мощностью 450 МВА (три отдельные фазы по 150 МВА каждая) напряжением 750 кВ был создан компанией ВВС и установлен в энергосистеме Гидро-Квебек (Канада) в 1979 г. Конструкция ЭМЧ этого УШРТ повторяла конструкцию обычного трансформатора без учета специфики его работы. В результате измеренный уровень потерь в ЭМЧ в несколько раз превысил расчетное значение [3], что заставило компанию

ВВС прекратить все работы в этом направлении.

В 90-е годы прошлого века проф. Г.Н. Александров разработал методику расчета конструкции ЭМЧ УШРТ и показал возможность снижения потерь в ней путем применения специальных магнитных шунтов, обеспечивающих локализацию магнитного поля [4]. Под его руководством компанией ВНЕРЛ был разработан УШРТ новой конструкции на напряжение 420 кВ и мощность 50 МВА, который был установлен на подстанции Itarsi (Индия) и успешно введен в эксплуатацию в 2001 г. [5].

Следующий проект проф. Александра – установка двух УШРТ 220 кВ 60 МВА в энергосистеме Norte de Angola, в котором автор принимал непосредственное участие [6]. Во время приемо-сдаточных испытаний была подтверждена устойчивая совместная работа обоих УШРТ в режиме поддержания напряжения. На рис. 4 приведены регулировочные характеристики систем управления обоих УШРТ (уставки по напряжению 218 и 219 кВ, статизм 2 %). На рис. 5 приведены графики изменения выходных сигналов регуляторов УШРТ (задание реактивного тока) и напряжений на шинах 220 кВ ПС Viana (зеленый цвет) и Самата (красный цвет) в течение суток. Как видно из графика, напряжение практически не выходит из диапазона 216–220 кВ, т.е. оба УШРТ все время находятся в зоне плавного регулирования, работают синхронно и обеспечивают стабилизацию напряжения

220 кВ на обеих подстанциях. Была проверена работа УШРТ при изменении постоянной времени замкнутого контура регулирования напряжения от 20 до 100 мс, оптимальное значение составило 33 мс.

Внедрение этих УШРТ обеспечило, при сохранении передаваемой по линиям активной мощности:

- повышение напряжения на шинах 220 кВ подстанций на 11 %
- снижение тока в линии на 15 %
- снижение активных потерь в трех линиях электропередач на 25 %
- повышение предела статической и динамической устойчивости на 92 МВт
- увеличение пропускной способности трех линиям электропередачи из-за улучшения устойчивости, повышения напряжения и разгрузки линий от реактивной мощности на 50–60 МВт.

Высокие динамические свойства УШРТ были проявлены во время аварии, когда произошел одновременный сброс около 200 МВт активной мощности по линиям 220 кВ. Обычно в подобных случаях имело место отключение всех ВЛ-220 кВ вплоть до ГЭС Saranda и Cambambe из-за срабатывания защит по перенапряжению. Здесь же регуляторы обоих УШРТ мгновенно переключились в режим максимальной мощности ( $Q_{max}$ ) и ограничили перенапряжение до уровня 232 кВ, что ниже уставки защиты, поэтому все линии 220 кВ остались в работе (см. рис. 6).

Рассмотренный случай доказал, что помимо компенсации зарядной мощности линий электропередачи и стабилизации напряжения эти УШРТ также успешно снижают коммутационные перенапряжения и предотвращают развал системы при аварийных сбросах нагрузки.

После смерти Александрова в 2009 г. работы в области УШРТ в России продолжились. За последние три года в ОАО «ФСК ЕЭС» были установлены шесть УШРТ с номинальным напряжением 121 и 242 кВ. Изготовлен и успешно испытан пилотный образец УШРТ на напряжение 500 кВ мощностью 60 МВА (однофазный) – рис. 7. На ООО «Тольяттинский трансформатор» создана база для производства ЭМЧ УШРТ на напряжение от 110 до 500 кВ.

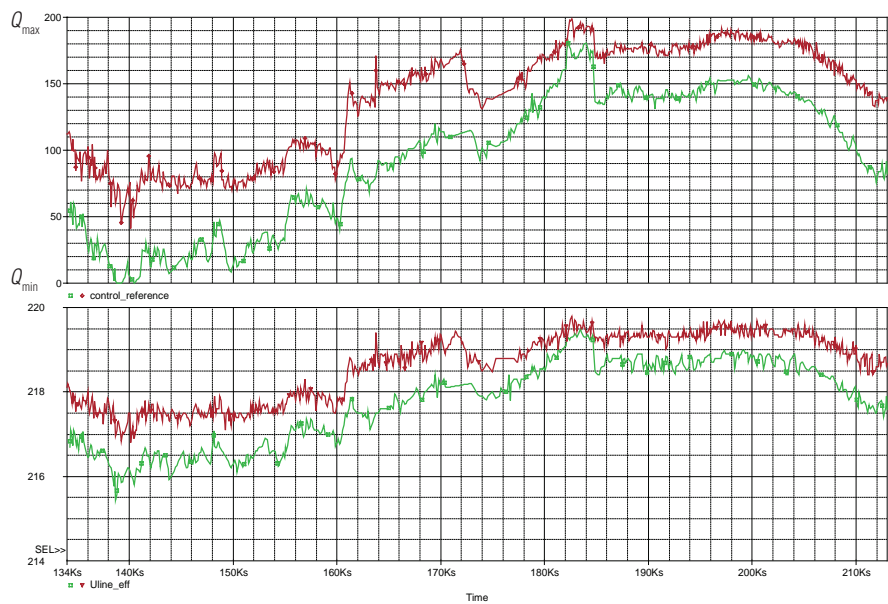


Рис. 5. Графики изменения выходных сигналов регуляторов УШРТ и напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana и Camapa в течение суток

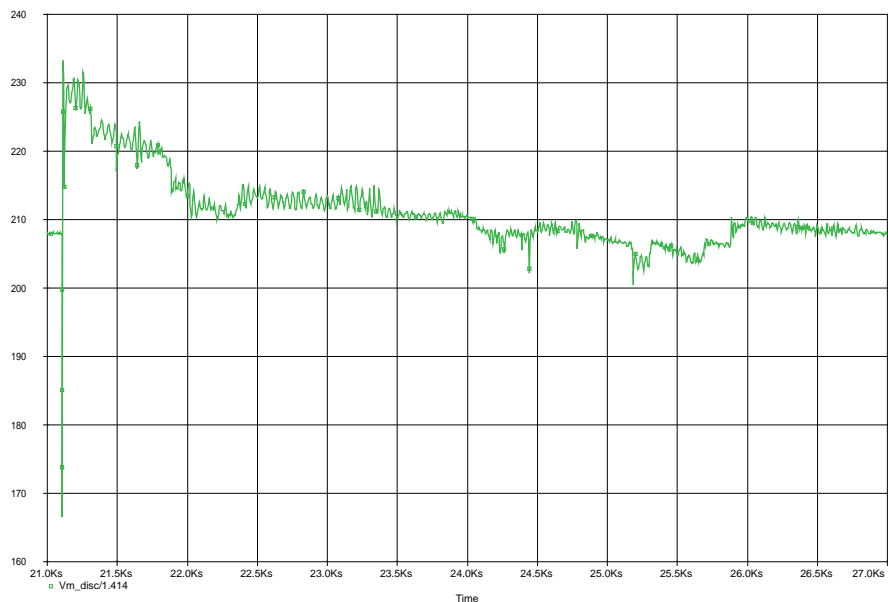


Рис. 6. Тренд напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana до и после аварии

### СРАВНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

В российской электроэнергетике широкое применение получил другой тип управляемых шунтирующих реакторов – реакторов с подмагничиванием (УШРП). Эти реакторы имеют принципиально другой принцип управления, основанный на изменении индуктивности сетевой обмотки за счет изменения тока намагничивания [7]. Фактически УШРП это высоковольтный магнитный усилитель с

присущими ему достоинствами и недостатками.

Главное преимущество УШРП по сравнению с УШРТ – небольшая (0,2...1,0 % от номинальной мощности реактора) мощность тиристорного преобразователя и, соответственно, меньшая (примерно на 20 %) стоимость.

Основные недостатки – низкое быстродействие (время перехода от минимальной к максимальной мощности составляет 1–3 сек, а при использовании форсировки – 0,2–0,3 сек) и не-





Рис. 7. Фаза ЭМЧ УШРТ 500 кВ 60 МВА



Рис. 8. Установка УШРТ 220 кВ 60 МВА на ПС Viana (Ангола)

линейность характеристики, которая может быть причиной возникновения резонансных явлений в примыкающей энергосистеме. Именно по этим причинам ведущие компании в области СТК – АВВ и Сименс отказались от использования УШРП [8].

По массо-габаритным показателям оборудование УШРТ не уступает УШРП – габариты и масса его электромагнитной части на 10–15 % меньше за счет использования трех, а не шести стержневой конструкции магнитного сердечника, а регулятор УШРТ, размещенный в контейнере и содержащий тиристорные вентили и систему управления, по занимаемой площади меньше, чем два/три трехфазных трансформатора с тиристорным преобразователем (ТМП). Установка УШРТ напряжением 220 кВ и мощностью 60 МВА занимает площадь 22×16 м (рис. 8).

Кроме того, электромагнитная часть УШРП имеет существенно больший,

чем у УШРТ, уровень шума и вибраций, что обусловлено наличием зазоров в стержнях его магнитопровода.

Содержание высших гармоник в токе сетевой обмотки УШРП без применения фильтров составляет 3,5 % [7]. В двухобмоточном УШРТ это значение достигает 8 % (рис. 9) и для достижения допустимого значения 3 % необходима установка фильтра 5-й гармоники. Но есть и другое техническое решение, традиционное для преобразовательной техники – использование 12-пульсной схемы преобразования, в которой гармоники ряда  $6\pm 1$  компенсируются внутри сердечника трансформатора и не выходят в сеть. ЭМЧ УШРТ с двумя обмотками управления, сдвинутыми на 30° относительно друг друга, обеспечивает снижение содержания высших гармоник в токе сетевой обмотки до 1,8 % (рис. 10). Форма токов в сетевой обмотке и обмотках управления при угле управления  $45^\circ$  приведены на рис. 11.

Первые два УШРТ мощностью 50 Мвар, реализованные по 12-пульсной схеме, установлены на ПС 220 кВ Светлая и успешно сданы в эксплуатацию.

Многочисленные публикации разработчиков УШРП (например, [9]) утверждают об отсутствии необходимости высокого быстродействия даже в переходных и аварийных режимах работы электропередачи. Несомненно, существует ряд подстанций, где высокое быстродействие не требуется и применение УШРП на которых вполне оправдано. Использование режима предварительного намагничивания позволяет обеспечить снижение перенапряжения при включении линии и в циклах АПВ, но только в случае наличия на подстанции внешнего источника напряжения 6/10 кВ для питания резервного ТМП, что не всегда имеет место. Кроме того, на поведение реакторов влияет остаточное намагничивание полустержней его магнитного сердечника после отключения линии [10].

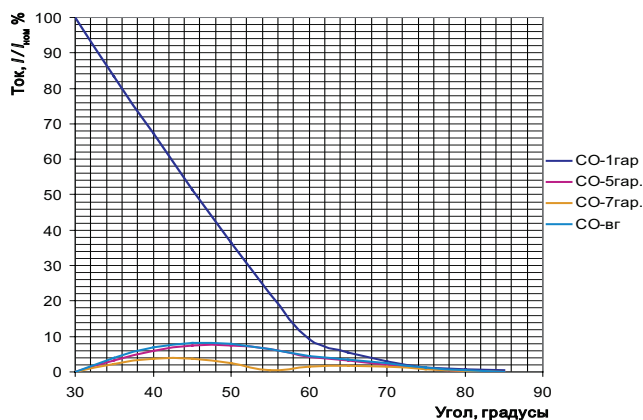


Рис. 9. Регулировочная характеристика тока СО и зависимость токов высших гармоник от угла управления для схемы Y0-D

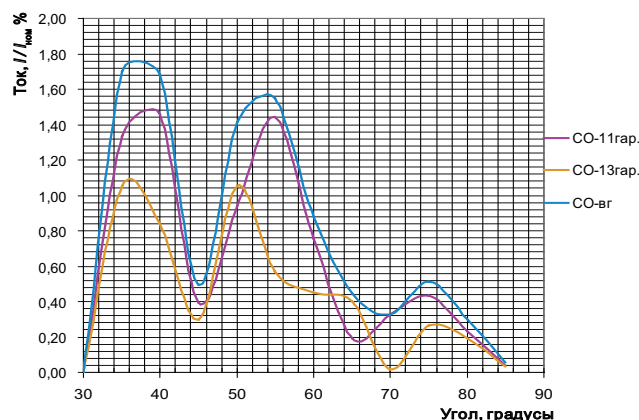


Рис. 10. Зависимость токов высших гармоник от угла управления для схемы Y0-D-Y

Принцип работы УШРТ и полное отсутствие в нем «магнитной памяти» позволяют изменять его мощность от нуля до номинального значения и наоборот в течение 10 мс. Специальная конструкция тиристорного вентиля обеспечивает включение УШРТ с номинальной мощностью на первой полуволне нарастающего напряжения при включении линии независимо от предыдущего режима и при отсутствии дополнительных источников энергии. Именно это дает возможность использования УШРТ в качестве линейного шунтирующего реактора и единственного средства регулирования напряжения на подстанции, обеспечивающего одновременное выполнение всех функций, перечисленных в разделе 2 настоящей статьи.

Сравнительные характеристики СТК, УШРТ и УШРП приведены в таблице 1. Секция «Технологии и оборудование подстанций» Научно-технического совета ОАО «Россети» в своем решении от 29 октября 2014 г. рекомендовала профильным департаментам ОАО «Россети» ускорить внедрение УШРТ, обладающего вполне определенными технико-экономическими преимуществами, на объектах электросетевого комплекса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управляемый шунтирующий реактор-трансформатор (УШРТ) – российский инновационный продукт, являющийся эффективным средством компенсации зарядной мощности линии и регулирования напряжения.

УШРТ, по сравнению с СТК подключением к шинам ВН подстанции через понижающий трансформатор, при том же быстродействии имеет меньшие потери, стоимость и площадь установок и повышенную надежность.

Применение УШРТ целесообразно на подстанциях длинных магистральных линий электропередачи напряжением 220...750 кВ с целью повышения как статической, так и динамической устойчивости. При этом обеспечивается стабилизация напряжения, снижение потерь на передачу электроэнергии и повышение пропускной способности электропередачи.

Наибольший эффект имеет место при подключении УШРТ непосредственно на конец линии СВН с функцией ограничения коммутационных перенапряжений. В этом случае он заменя-

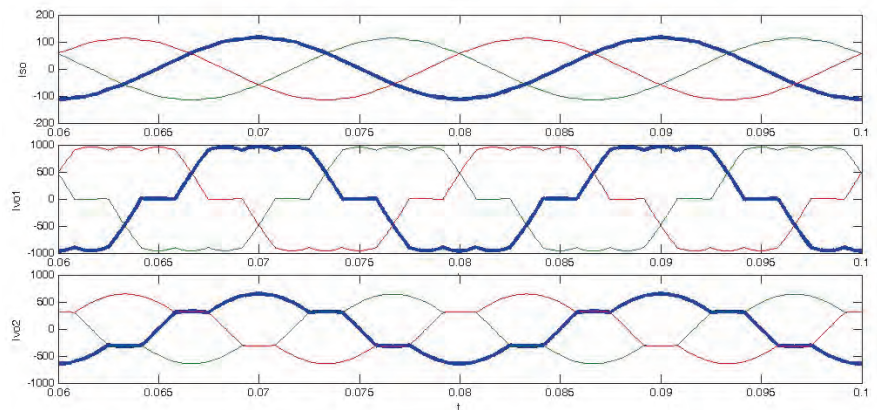


Рис. 11. Токи CO, OY1 и OY2 при угле управления 45° для схемы Y0-D-Y

ет линейный шунтирующий реактор и другие средства регулирования напряжения, что обеспечивает существенное снижение объема компенсирующего оборудования подстанции и активных потерь в нем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чуприков В.С. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи. // «Электричество», № 4, 1990 г.
2. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения). // «Электро», №5, 2003 г.
3. Srinivasan K., Desrochers G.E., Desrosiers C. Static compensator loss estimation from digital measurement of voltage and current. IEEE Trans. On PAS-102, 1983, №3.
4. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы Учебное пособие. – Санкт-Петербург. Третье издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005 г.

5. G.N.Alexandrov, C.D.Kloday etc. Design, Testing and Commissioning of First 420 kV, 50 MVAR Controlled Shunt Reactor In India. CIGRE Session 2002, 14–120.

6. Мологин Д.С., Чуприков В.С. Реализация пилотного проекта CSRT в энергосистеме Norte de Angola. // «Энергоэксперт», № 1, 2010 г.

7. Долгополов А.Г. Этапы развития управляемых шунтирующих реакторов для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения. // «Энергетик», № 6, 2013 г.

8. Озорнин С., Кунев С. Современные Устройства FACTS. // «Энергоэксперт», № 5, 2013 г.

9. Беляев А.Н., Смоловик С.В., Чобан В.Б. Обоснование требований к быстродействию управляемых шунтирующих реакторов. // «Энергоэксперт», № 5, 2013 г.

10. Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В. Управляемые шунтирующие реакторы. Воздействия на тиристорные преобразователи при коммутации УШР. // «Новости ЭлектроТехники», № 6, 2011 г.

Таблица 1. Сравнительные характеристики СТК, УШРТ и УШРП

| Устройство   | СТК                          | УШРТ                        | УШРП                           |
|--|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Время реакции в статических режимах, мс  | 30–100                       | 30–100                      | 1000–3000                      |
| Время реакции в переходных режимах, мс   | 5–10                         | 5–10                        | 200–300 при наличии форсировки |
| Суточное регулирование напряжения  | да                           | да                          | да                             |
| Демпфирование колебаний активной мощности                                      | да                           | да                          | ограничено                     |
| Возможность пофазного регулирования  | да                           | ограничено                  | нет                            |
| Снижение коммутационных перенапряжений (включение линии, ОАПВ, сброс нагрузки) | да                           | да                          | ограничено                     |
| Конструкция ЭМЧ  |                              | простая                     | сложная                        |
| Уровень шума и вибраций ЭМЧ  |                              | низкий                      | высокий                        |
| Уровень высших гармоник в токе сетевой обмотки, % от номинального тока         | Требуется установка фильтров | 1,8 (для 12-пульсной схемы) | 3,5                            |
| Активные потери, % от $S_{ном}$  | 1,0                          | 0,4...0,6+0,2 (ТВ)          | 0,4...0,6                      |