

РЕАЛИЗАЦИЯ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА CSRT (УШРТ) В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ NORTE DE ANGOLA

ЧУПРИКОВ В.С., заместитель генерального директора АО «Ансальдо-ВЭИ», к.т.н.

МОЛОГИН Д.С., заместитель начальника отдела систем управления АО «Ансальдо-ВЭИ»

Пилотный проект CSRT, включающий два статических тиристорных компенсатора (СТК), выполненных по схеме управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШРТ или CSRT) мощностью 60 Мвар каждый, установленные на шинах 220 кВ подстанций (ПС) Viana и Camama, и 15 конденсаторных батарей (КБ) общей мощностью 150 Мвар, установленных на шинах 60 кВ ПС Viana, Camama и Cazenga, завершён 11 декабря 2009 г. вводом в эксплуатацию всего комплекса силового оборудования, устройств автоматического управления и релейных защит, настройкой регуляторов УШРТ и оптимизацией режимов работы всей энергосистемы Norte de Angola.

Это первое в мире системное использование УШРТ и второе его применение после установки на подстанции Itarsi в Индии в 2001 г. [1], где УШРТ работал в ключевом режиме.

Основные технические эффекты от реализации проекта, подтвержден-

ные протоколами приемо-сдаточных испытаний:

- повышение напряжения на шинах 220 кВ подстанций в среднем с 195 до 217 кВ, т.е. на 11 %;
- разгрузка линий 220 кВ Capanda-Cambambe, Cambambe-Viana, Viana-

Cazenga, Cambambe-Camama и Camama-Cazenga от реактивной мощности суммарно на 130 Мвар и снижение полной мощности в среднем по линии на 5 %;

- стабилизация напряжения на шинах 220 кВ и 60 кВ подстанций в пределах $\pm 1\%$ вместо имевших ранее отклонений $\pm 3...5\%$;
- снижение внутренних перенапряжений при резком сбросе нагрузки.

ИСТОРИЯ ПРОЕКТА

История проекта CSRT началась в 2006 г., когда профессор Г.Н. Александров посетил Анголу и, в частности, государственную энергетическую компанию EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDADE, Empresa Pública, сокращенно ENE-E.P., и узнал о проблемах в энергосистеме Norte de Angola. Энергосистема, схема которой приведена на рис. 1, осуществляет электроснабжение столицы Анголы г. Луанда от гидроэлектростанций Capanda и Cambambe по трем ВЛ-220 кВ LI-LIII длиной около 180 км через ПС 220/60 кВ Cazenga. Мощность, потребляемая Луандой, составляет около 200 МВт. Две промежуточные ПС 220/60 кВ Viana и Camama, рас-

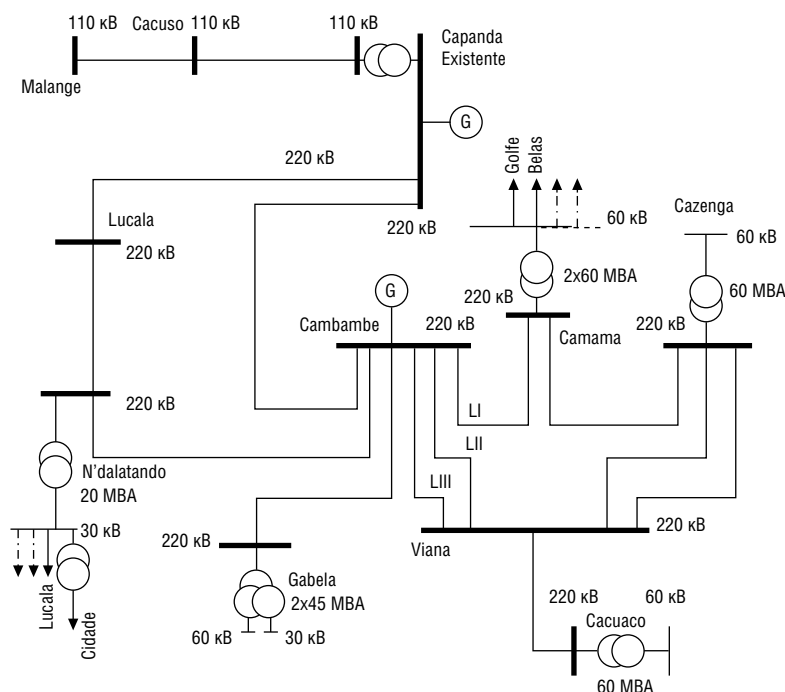


Рис. 1. Схема энергосистемы Norte de Angola

положенные в 30 км от Cazenga, отбирают около 180 МВт мощности для питания пригородов столицы. Состояние энергосистемы характеризовалось перегрузкой линий реактивной мощностью, пониженным и нестабильным уровнем напряжения в сети и частыми, практически ежедневными, отключениями потребителей.

Г.Н. Александров предложил для нормализации режимов работы линий 220 кВ и повышения их пропускной способности установить на шинах 60 кВ всех трех подстанций конденсаторные батареи (3x10 Мвар на ПС Самата и по 6x10 Мвар на ПС Viana и Cazenga), а также на шинах 220 кВ двух первых подстанций – управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа. Руководство компании ENE-E.P. приняло эти предложения и решило финансировать проект, получивший название CSRT (Controlled Shunt Reactor of Transformer type). Для его реализации был образован международный консорциум, включающий три компании со следующим распределением работ: ОАО «Запорожтрансформатор» (Украина) – изготовление и поставка электромагнитной части (ЭМЧ) УШРТ, АО Ансальдо-ВЭИ (Россия) – изготовление и поставка регулятора УШРТ, проведение комплексных приемодаточных испытаний всего оборудо-

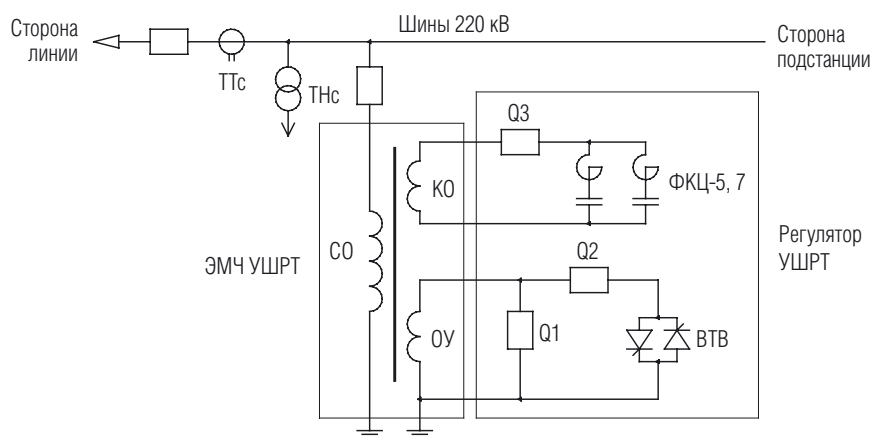


Рис. 2. Однолинейная схема УШРТ

вания и оптимизация режимов работы энергосистемы, Odebrecht (Бразилия) – поставка конденсаторных батарей, рабочее проектирование и монтаж всего комплекса оборудования. В декабре 2007 г. были подписаны соответствующие контракты с ENE-E.P. и проект стартовал.

УШРТ – СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа УШРТ [1, 2], объединяет в себе понижающий трансформатор и управляемый тиристорами реактор обычного СТК. УШРТ имеет следующие преимущества перед традиционными сетевыми СТК:

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

Схема УШРТ для рассматриваемого проекта приведена на рис. 2. Она состоит из ЭМЧ и регулятора УШРТ. Обмотка высокого напряжения ЭМЧ (сетевая – СО) подключается к шинам 220 кВ подстанции. Вторичная обмотка управления (ОУ) имеет 100 % магнитную связь с СО и ток в ней, а значит и в обмотке СО, регулируется путем изменения угла зажигания тиристорного венти-



Рис. 3. Отсеки контейнера: управление, вентиль, КРУ



Рис. 4. Общий вид регулятора УШРТ на ПС Самара



Рис. 5. УШРТ на ПС Самара

ля (ВТВ), включенного параллельно ОУ.

Для компенсации токов высших гармоник, генерируемых в ОУ при регулировании, в УШРТ предусмотрена третья, компенсационная обмотка (КО), к которой подключаются ФКЦ малой мощности. При отказе тиристорного вентиля обмотка ОУ может быть шунтирована специальным выключателем Q1, реализуя ступенчатое управление реактивной мощностью УШРТ.

УШРТ имеет следующие основные параметры:

- номинальная мощность сетевой обмотки при номинальном напряжении и полностью открытых тиристорах – 60 Мвар;
- номинальное напряжение обмотки СО (линейное) – 230 кВ;
- наибольшее длительное напряжение СО (линейное) – 245 кВ;

- наибольшее длительное напряжение обмоток ОУ (фазное) и КО (линейное) – 12 кВ;
- номинальный ток тиристорного вентиля – 1900 А;
- генерируемая реактивная мощность ФКЦ – 2,5 Мвар;
- активные потери при номинальной мощности, не более – 560 кВт.

РЕГУЛЯТОР УШРТ

Оборудование регулятора УШРТ, изготовленного АО Ансальдо-ВЭИ в сотрудничестве с Ansaldo Sistemi Industriali, в основном, размещено в контейнере размером 12 x 2,3 x 3,6 м. В отсеках контейнера смонтированы две ячейки КРУ-18 кВ Q1 и Q2, трехфазный тиристорный вентиль с системой жидкостного охлаждения и система управления УШРТ (рис. 3).

На рис. 4 приведена фотография общего вида регулятора УШРТ. Агре-

гат воздушного охлаждения и вводы напряжения 12 кВ от ОУ размещены на крыше контейнера. Маломощные фильтры установлены на открытой площадке рядом с контейнером, выключатель Q3 с двумя разъединителями размещен в отдельном небольшом контейнере.

Наибольшие изменения по сравнению со стандартными СТК производства АО Ансальдо-ВЭИ претерпел тиристорный вентиль. В данном проекте были использованы фототиристоры типа T1503N производства компании Еурес с параметрами: напряжение – 8 кВ, ток – 2500 А. Управляемые непосредственно световым сигналом фототиристоры не требуют никакого питания на высоком потенциале и могут быть включены в любой требуемый момент независимо от величины приложенного напряжения. Тем самым обеспечивается возможность включения вентиля в «диодном» режиме (т.е. реализации максимальной индуктивности реактора) на первой полуволне восстанавливающегося напряжения при включении линии на холостой ход и, соответственно, выполнение СТК функций обычного шунтирующего реактора, что было теоретически обосновано и промоделировано 20 лет назад [3, 4] и подтверждено в [5]. Помимо светового управления фототиристоры имеют встроенную VOD защиту от перенапряжений и, по сравнению с обычными тиристорами, большую стойкость к du/dt и di/dt , что определяет более высокую надежность такого тиристорного вентиля в целом.

Рассматриваемый тиристорный вентиль состоит из трех установленных друг над другом тиристорных модулей, каждый из которых содержит 8 последовательно соединенных тиристорных ячеек (рис. 3). Использование фототиристоров потребовало разработки специального шкафа светового управления, содержащего 48 импульсных полупроводниковых лазеров, выходы которых соединены с управляющими фотоэлементами тиристоров посредством стеклянных световодов с малым декрементом затухания света. Также вентиль оборудован устройствами индивидуального контроля работы тиристоров.

Система управления (СУ) регулятора УШРТ реализована на основе

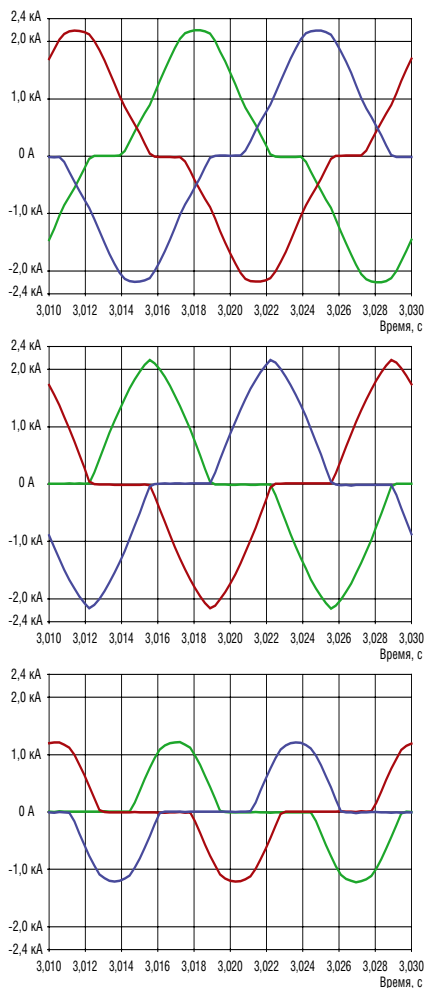


Рис. 6. Осциллограммы токов трех фаз обмотки управления при углах 15, 30 и 45 градусов

СУ СТК производства Ансальдо-ВЭИ стандартной конфигурации [6], но имеет и некоторые специфические отличия. Так, в ней реализована связь по волоконно-оптическим световодам со шкафом лазеров, а также она снабжена системой удаленного доступа через Интернет в целях обеспечения контроля за работой УШРТ из Москвы.

ПОСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ

Основное оборудование УШРТ было изготовлено и испытано в 2008 г. и в декабре отправлено в Анголу морским транспортом. Подстанция Самата начала строиться в феврале 2009 г. и уже июле была включена в эксплуатацию. Монтаж оборудования двух УШРТ, 15 КБ и соответствующих вводных ячеек ОРУ 220 кВ и 60 кВ начался в июле и был закончен в октябре 2009 г.

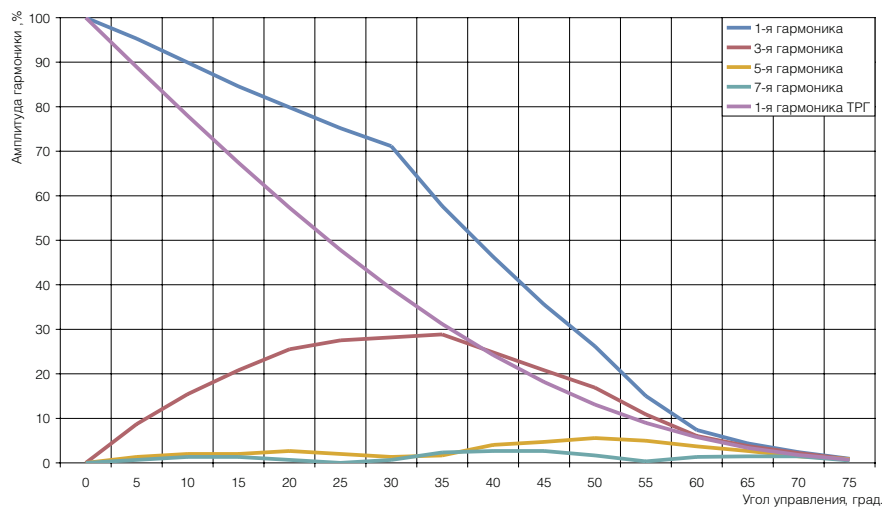


Рис. 7. Содержание первой и высших гармоник в токе обмотки управления УШРТ (в процентах от номинального тока при полном открытии тиристоров) и регулировочная характеристика ТРГ

ПУСКО-НАЛАДКА И ПРИЕМО-СДАТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В ноябре начались пуско-наладочные работы по релейным защитам и автоматике РУ 220 кВ обоих УШРТ и всех 15 КБ на 3 подстанциях. В силу ограниченности ресурсов наладочной организации все работы велись последовательно – сначала ПС Viana, затем Самата и Cazenga. Также были проблемы с обеспечением требуемых параметров масла в ЭМЧ. В результате разрешение на подключение ЭМЧ к шинам 220 кВ было получено только 3 декабря при сроке сдачи всего проекта 15 декабря.

4 декабря было подано высокое напряжение на УШРТ, установленный на ПС Viana, и начались его приемосдаточные испытания.

Три включения ЭМЧ в режиме холостого хода показали, что амплитуда тока включения не превышает 100 А, что составляет менее 50 % от номинального тока обмотки СО.

Регулировочная характеристика УШРТ

Были проведены измерения токов обмоток СО и ОУ при изменении угла управления тиристоров от 90 до 0 градусов. В результате было обнаружено, что характеристики УШРТ существенно отличаются от ТРГ, в то время как в [2] предполагалась их полная аналогия, что и было заложено в проект. В частности:

- форма токов фаз ОУ не является срезанной частью синусоиды, а меняется в зависимости от угла управле-

ния тиристоров от колоколообразной до треугольной (рис. 6);

- регулировочная характеристика УШРТ (зависимость тока первой гармоники от угла управления тиристоров) имеет совершенно другой вид и состоит практически из трех линейных отрезков различного наклона (рис. 7);
- содержание токов высших гармоник в токе ОУ также отличается от ТРГ, особенно это касается 3 гармоники, которая в 2,5 раза больше (рис. 7).

Вероятная причина выявленных отличий – влияние трех фаз обмотки управления друг на друга за счет их магнитной взаимосвязи. Из регулировочной характеристики видно, что ее изломы имеют место при углах управления 60 и 30 градусов, т.е. когда происходит переходы из режима одновременного горения тиристоров только в одной фазе ВТВ в горение в двух фазах и из двух фаз в три. Тем не менее, спектр тока сетевой обмотки является вполне удовлетворительным, так как компенсационная обмотка, соединенная в треугольник, обеспечивает компенсацию значительной доли гармоник, кратных 3. На рис. 8 приведены спектры токов трех фаз обмотки управления и сетевой обмотки при угле управления 25 градусов – уровень третьей гармоники снижается с 36 % в ОУ до 2 % в СО.

Для обеспечения линейности характеристики регулятора УШРТ во всем диапазоне изменения углов управления была произведена корректировка программного обе-

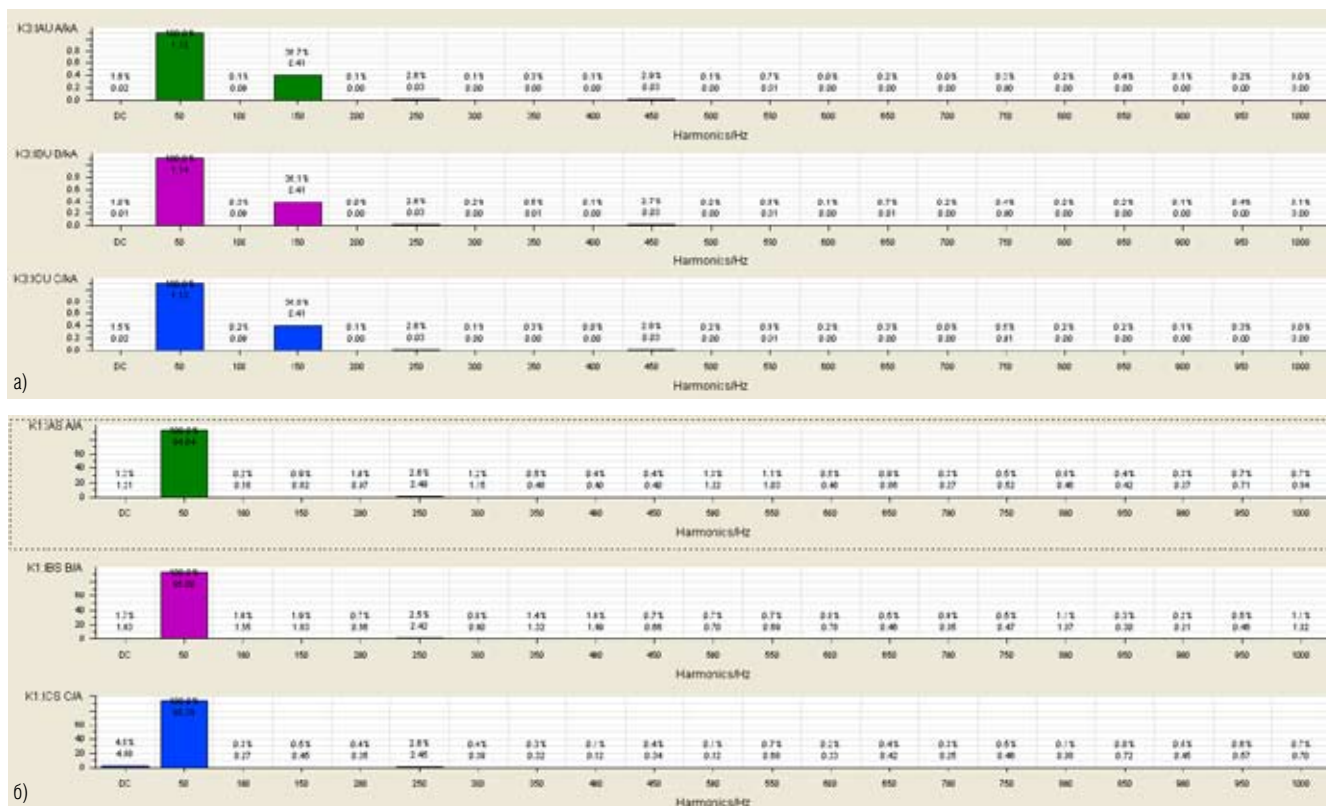


Рис. 8. Спектры токов трех фаз обмотки управления (а) и сетевой обмотки (б) при угле управления 25 градусов

спечения блока фазо-импульсного преобразования в системе управления УШРТ.

Вечером 4 декабря УШРТ был включен в режим полного тока и оставлен в таком состоянии для проверки температуры масла и обмоток ЭМЧ в установившемся номинальном режиме. Утром 5 декабря после 14 часов работы температура деионизованной воды в системе охлаждения тиристоров составила 32 °С, температура масла в ЭМЧ 65 °С, температура обмоток 78 °С при температуре воздуха 27 °С.

Обработка режимов регулирования

Исходное состояние энергосистемы перед подключением КБ и УШРТ: напряжение на шинах 220 кВ подстанций изменялось от 190 до 202 кВ, линии LI...L3 работали с мощностью выше натурального значения, полная мощность превышала 130 МВА, а реактивная мощность доходила до 40–45 Мвар.

На стадии разработки проекта в качестве основного алгоритма работы регулятора УШРТ проф. Г.Н. Александровым был выбран режим полной компенсации реактивной мощности в линиях 220 кВ LI...L3 с целью разгрузки линий от реактивной мощности. Перед переходом УШРТ в режим автоматической компенсации реактивной мощности были включены все КБ на ПС Viana, что вызвало подъем напряжения на шинах 220 кВ до 200 кВ. Однако, натурные испытания этого режима показали, что реактивная мощность, генерируемая КБ, растекается по всем направлениям и обеспечения ее полной компенсации в подходящих линиях 220 кВ добиться невозможно. К тому же, напряжение на шинах 220 кВ было нестабильным и зависело от нагрузки.

Поскольку подобный результат нами ожидался заранее, было подготовлено альтернативное программное обеспечение СУ УШРТ, реализующее стандартный для СТК режим регулирования напряжения, который и был включен в работу 6 декабря. Результаты испытаний подтвердили хорошее качество поддержания напряжения при изменении нагрузки и напряжения генераторов ГЭС. Были проведены опыты по определению зависимости быстродействия УШРТ от параметров замкнутого контура регулирования напряжения. На рис. 9 приведены осциллограммы реакции выходного сигнала регулятора на изменение уставки напряжения в режиме малого сигнала (в линейной зоне регулирования) для двух значений постоянной времени интегрального канала: 67 мс и 20 мс.

Результаты измерений реакции регулятора для разных значений постоянной времени интегрального канала приведены в таблице 1. При времени отклика выше 80 мс процесс отработки приращения носит аperiodический характер, при увеличении скорости реакции имеет место некоторое перерегулирование, уровень которого достигает величины

Таблица 1.

Постоянная времени интегратора, мс	Время отклика (отработка 90% приращения), мс	Коэффициент перерегулирования
100	162	апериодический процесс
67	111	апериодический процесс
50	84	апериодический процесс
33	54	1,05
25	41	1,18
20	32	1,28
17	27	1,35

1,35 при времени реакции 27 мс. Следует отметить, что и в этом случае регулятор работал устойчиво без каких-либо автоколебаний. По результатам испытаний было принято решение оставить постоянную времени интегрального канала равной 33 мс, что обеспечило требуемое согласно технической спецификации на УШРТ время реакции 60 мс.

6 декабря был подписан акт о сдаче УШРТ на ПС Viana в эксплуатацию, а 7 декабря к аналогичным испытаниям приступили на ПС Самата. Снятая регулировочная характеристика второго УШРТ была полностью идентичной первой, что позволило сразу перейти к настройке режимов регулирования. Поскольку две подстанции оказались жестко связанными по напряжению 220 кВ, для оптимизации режимов и обеспечения устойчивой параллельной работы двух регуляторов был проведен ряд дополнительных опытов. В результате были выбраны уставки по напряжению 220 кВ с разницей 2 кВ, что вызвано отличием длины линии LI от длины линий LII и LIII. Введение статизма регулировочной характеристики УШРТ величиной 2 % обеспечило практически симметричную, но независимую работу обоих регуляторов при изменении режима энергосистемы. На рис. 10 приведен график изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana в течение 30 часов при работе регулятора УШРТ с уставкой 210 кВ и статизмом 2 % (с работающим УШРТ на ПС Самата с уставкой 212 кВ). Как видно из графика, напряжение практически не выходило из диапазона 208...212 кВ, т.е. УШРТ все время находился в зоне плавного регулирования.

В течение 2 дней были проведены все необходимые испытания и 9 декабря был подписан акт о сдаче в эксплуатацию УШРТ на ПС Самата.

Ограничение перенапряжений с помощью УШРТ

Помимо контура регулирования напряжения СУ регулятора УШРТ содержит канал ограничения больших отклонений напряжения в точке подключения УШРТ, имеющий высший приоритет. Т.е. при увеличении напряжения выше порогового значения U_{max} СУ мгновенно переключает УШРТ в режим максимального тока (т.н. диодный режим), а при снижении

напряжения ниже значения U_{min} мгновенно блокирует импульсы управления тиристорами и УШРТ переходит в режим холостого хода. При этом, как было отмечено выше, по эффективности в части снижения коммутационных перенапряжений УШРТ не уступает обычному шунтирующему реактору.

Подтвердить это достоинство УШРТ удалось 11 декабря, когда в 16:27 из-за аварии выключателя на ПС Cazenga полностью отключились все линии 60 кВ, питающие г. Луанду, т.е. произошел мгновенный 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 (рис.1) из-за срабатывания защит по перенапряжению, после чего система собиралась в ручном режиме в течение около 2 часов. В данном случае развитии аварии пошло по другому сценарию. Регулятор УШРТ мгновенно переключился в диодный режим (Q_{max}), а все КБ, установленные на шинах 60 кВ трех подстанций, отключились по защите в течение 2–3 сек. Напряжение на шинах 220 кВ выросло, но только до 232 кВ, что ниже уставок защит, поэтому все линии 220 кВ остались в работе.

На осциллограмме на рис. 11 (стр. 20) представлен процесс изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Самата от момента начала аварии до полного восстановления нормального режима.

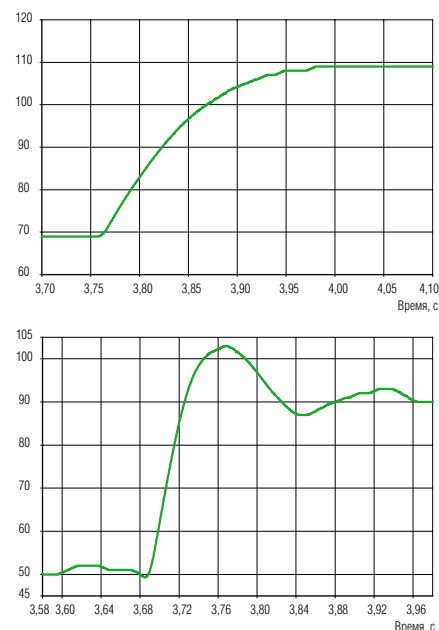


Рис. 9. Форма выходного сигнала регулятора при изменении уставки напряжения

Через 12 минут напряжение снизилось до 215 кВ за счет подключения нагрузок на стороне 60 кВ, регулятор УШРТ оставался в положении Q_{max} . После снижения напряжения до 208 кВ и перехода УШРТ в зону регулирования были поочередно включены все КБ и исходный режим работы был восстановлен.

Таким образом, наличие двух работающих УШРТ обеспечило ограничение напряжения на шинах 220 кВ после сброса нагрузок на ПС Cazenga и предотвратило отключение линий

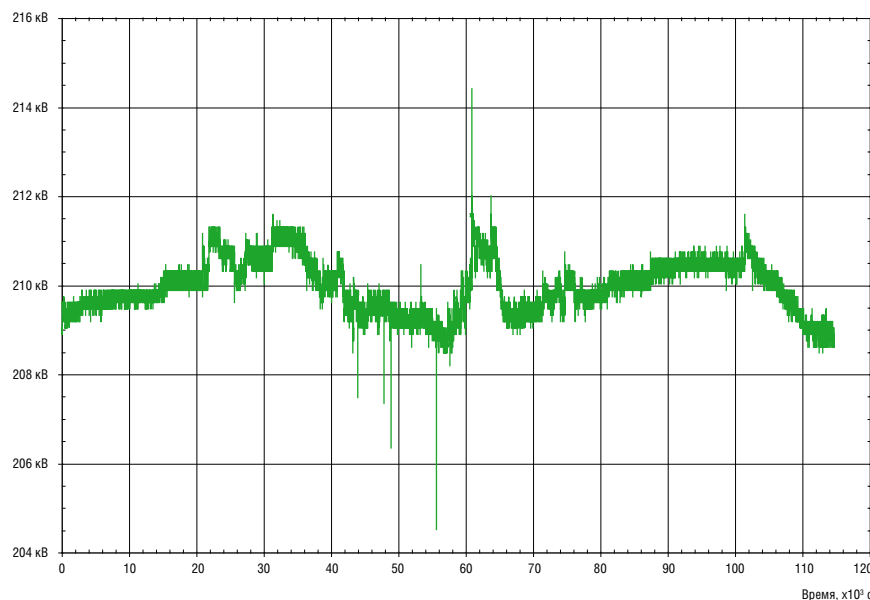


Рис. 10. График изменения напряжения на шинах 220 кВ ПС Viana в течение 30 часов

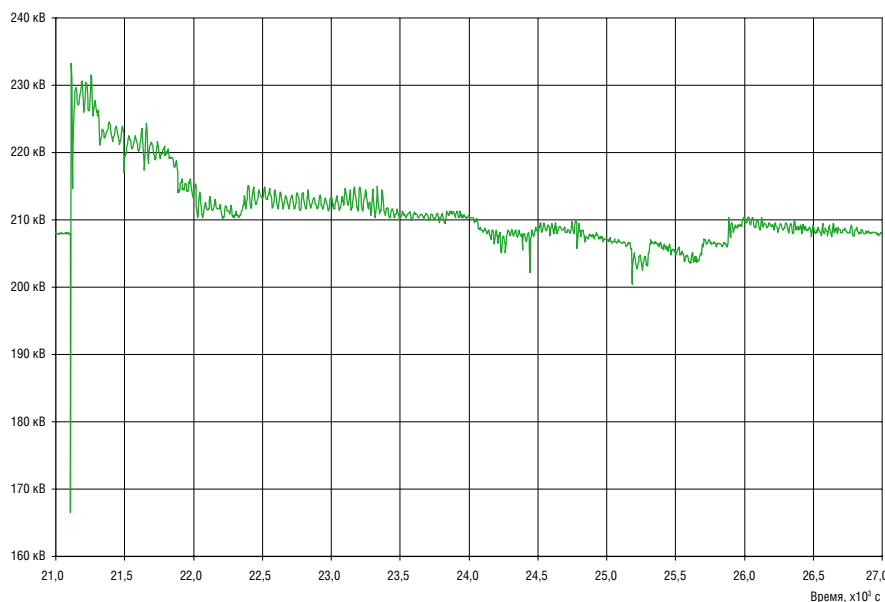


Рис. 11. Тренд напряжения на шинах 220 кВ ПС Самата до и после аварии 11.12.09 г.

220 кВ и полный развал энергосистемы, что всегда имело место раньше в аналогичных случаях.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Со стороны Ансальдо-ВЭИ было предложено провести оптимизацию режимов энергосистемы путем повышения напряжения на стороне 220 кВ ГЭС Saranda и Cambambe. В течение двух часов пошаговым подъемом напряжения на Saranda с 230 до 236 кВ и Cambambe с 218 до 224 кВ, параллельным повышением уставок регуляторов напряжения обоих УШРТ и переключением РПН трансформаторов 220/60 кВ ПС Самата, Viana и Cazenga был повышен уровень напряжения на этих подстанциях до 216–218 кВ.

В таблице 2 приведены средние рабочие параметры линий 220 кВ: передаваемые по линии активная *P* и реактивная *Q* мощности, напряжение на шинах 220 кВ приемной подстанции *U* и полный ток в линии *I* для трех режимов – в исходном режиме до включения КБ и УШРТ (режим 1), после их подключения (режим 2) и после проведенной оптимизации (режим 3).

Как следует из таблицы 2, внедрение КБ с УШРТ обеспечило в итоге, при сохранении передаваемой по линиям активной мощности, повышение напряжения на шинах 220 кВ подстанций на 11 % и снижение тока в линиях на 15 % с соответствующим уменьшением в них активных потерь.

ВЫВОДЫ

1. Приемно-сдаточные испытания комплекса оборудования проекта CSRT были проведены в короткие сроки (6 дней) и за время их проведения не было зарегистрировано ни одного случая срабатывания защит или отказов оборудования, что говорит о высоком уровне приемочных испытаний оборудования на заводах-изготовителях и профессионализме компаний – участников проекта.

2. Реализация проекта CSRT обеспечила:

- повышение напряжения на шинах 220 кВ подстанций на 11 % и стабилизацию напряжения в пределах ±2 %;
- снижение активных потерь в трех линиях электропередачи на 25 %;
- увеличение передаточной способности трех линий электропередачи на

50–60 МВт (согласно расчетам) из-за улучшения устойчивости, повышения напряжения и разгрузки линий от реактивной мощности.

Таким образом, доказана высокая эффективность реализованного проекта CSRT, по ряду показателей превосходящая расчетные показатели.

3. Было подтверждено высокое быстродействие УШРТ и возможность выполнения им функций шунтирующего реактора.

4. Функционирование УШРТ при непосредственном подключении к шинам высокого напряжения подстанций носит системный характер и намного эффективнее СТК с ограниченными функциями, подключаемых к третичным обмоткам подстанционных автотрансформаторов вместо синхронных компенсаторов, что широко применяется в ФСК ЕЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 МВАр пущен в эксплуатацию. – Электричество, 2002, № 3.
2. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. // Издание Центра подготовки кадров энергетики. Санкт-Петербург, 2005 г.
3. Чуприков В.С. Применение статических тиристорных компенсаторов для ограничения коммутационных перенапряжений на линиях переменного тока. // Тезисы докладов Всесоюзной н/т конференции «Создание комплексов электро-технического оборудования высоковольтной, преобразовательной, сильноточной и полупроводниковой техники», ч. I. М., 1989 г.
4. Чуприков В.С. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи. // «Электричество», N4, 1990 г.
5. Кадомская К.П., Михайловский Г.Г. Математическое моделирование и эффективность управляемых шунтирующих реакторов высокого напряжения. // «Энергоэксперт», № 6, 2009 г.
6. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения). // «Электро», № 5, 2003 г.

Таблица 2

Режим	1				2				3			
Линия	<i>P</i> , МВт	<i>Q</i> , Мвар	<i>U</i> , кВ	<i>I</i> , А	<i>P</i> , МВт	<i>Q</i> , Мвар	<i>U</i> , кВ	<i>I</i> , А	<i>P</i> , МВт	<i>Q</i> , Мвар	<i>U</i> , кВ	<i>I</i> , А
LI	107	35	194	335	111	-3	209	306	111	5	218	286
LII, LIII	117	38	196	362	118	12	207	332	116	7	216	312