



КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Моделирование режимов совместной работы двух устройств компенсации реактивной мощности на подстанции 220 кВ

Чуприков В. С., канд. техн. наук

ЗАО “Нидек АСИ ВЭИ”, Москва

Ненахов А. И., аспирант, Гамазин С. И., доктор техн. наук

НИУ “МЭИ”, Москва

Исследованы алгоритмы совместного регулирования напряжения 220 кВ с помощью двух устройств компенсации реактивной мощности: управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора и статического тиристорного компенсатора, имеющих различное быстродействие. Особенностью рассматриваемой системы является подключение этих устройств к разным обмоткам автотрансформатора 220/110/10 кВ. Приведены три различных алгоритма управления статическим тиристорным компенсатором, подключенным к обмотке 10 кВ, при работе управляемого шунтирующего реактора, присоединенного к шинам 220 кВ и имеющего неизменный алгоритм регулирования.

Ключевые слова: регулирование напряжения, статический тиристорный компенсатор, управляемый шунтирующий реактор, компенсация реактивной мощности, линии электропередачи.

На подстанциях (ПС) 220 кВ МЭС Востока “Майя” и “Томмот”, входящих в состав строящейся электропередачи “Нижний Кураны — Томмот — Майя”, предусмотрена установка устройств компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения двух различных типов: управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора (УШР) с диапазоном регулирования реактивной мощности $0 \div -100$ Мвар и статического тиристорного компенсатора (СТК) с диапазоном регулирования $+20 \div -20$ Мвар. Параллельная работа двух таких устройств с различным быстродействием (время реакции СТК составляет примерно 30 мс, а УШР — не менее 400 мс даже в режиме форсирования) в мировой практике, как правило, не используется [1]. Особенность их функционирования заключается в том, что эти компенсирующие устройства (КУ) подключаются к разным обмоткам сетевого автотрансформатора: УШР работает на напряжении 220 кВ, а СТК — на напряжении 10 кВ, но оба регулируются по значению напряжения на шинах 220 кВ.

По сравнению с обычными статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности, подключаемыми к шинам высо-

кого напряжения подстанции через понижающий трансформатор, УШР выполняется на любой требуемый класс напряжения, имеет меньшие габариты, потери и стоимость, проще в исполнении и высоконадежен [2]. Но у СТК гораздо лучшее быстродействие, что значительно влияет на его функциональные возможности. При использовании данного КУ обеспечивается максимальная эффективность компенсации в магистральных линиях электропередачи, причем повышается не только статическая, но и динамическая устойчивость.

На крупных предприятиях, граница балансовой принадлежности которых проходит на стороне высокого напряжения, подобные комбинированные системы могут позволить эффективно поддерживать необходимое значение коэффициента мощности, а значит, наиболее полно использовать пропускную способность линий. Кроме того, применение совместного регулирования по напряжению 220 кВ обеспечивает минимальный уровень отклонений и колебаний данного напряжения.

Обеспечение устойчивой совместной работы УШР и СТК не представляет большой сложности, однако стратегии их регулирова-

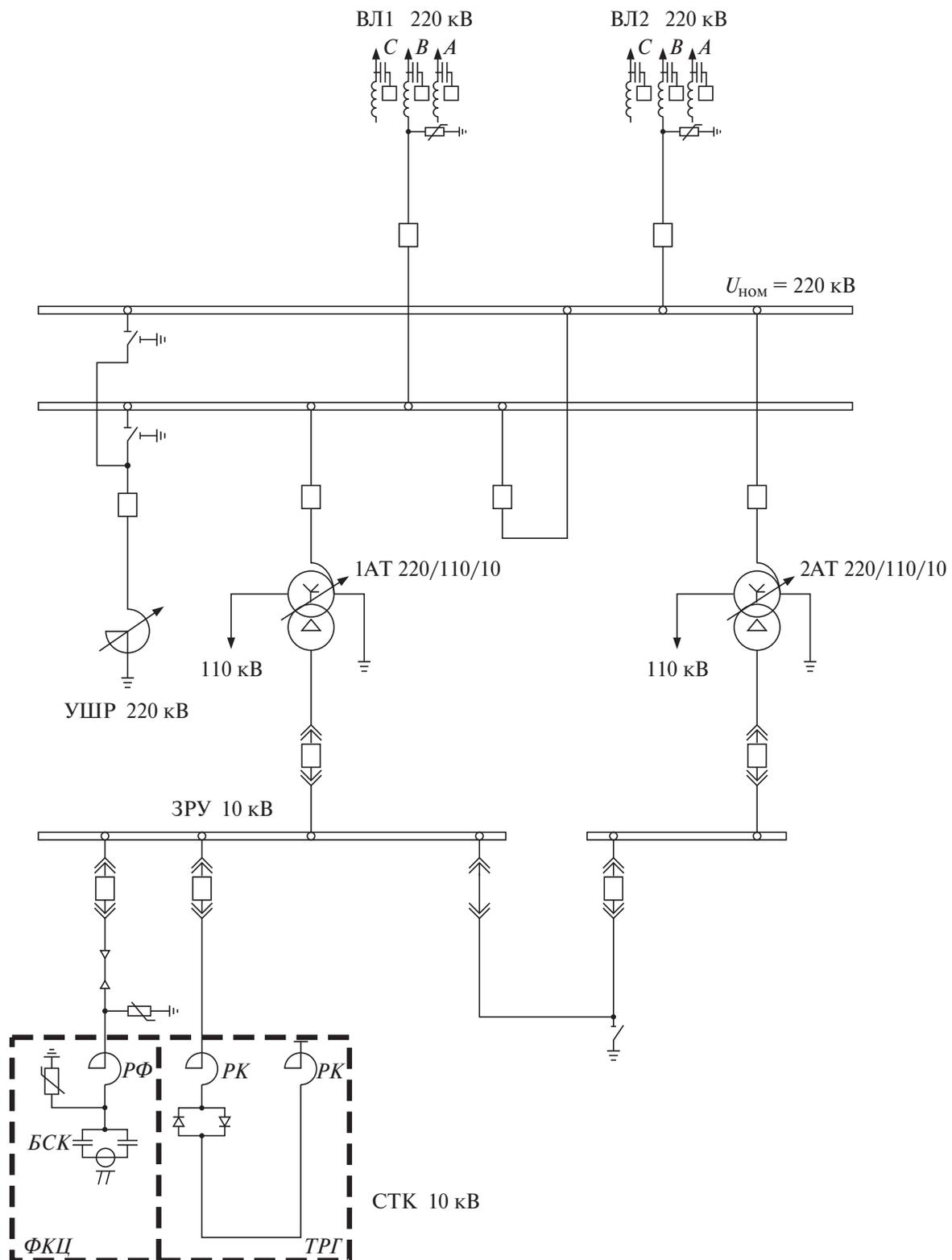


Рис. 1

ния могут быть разными. В статье представлены результаты математического моделирования возможных стратегий совместного регулирования этих устройств с целью выбора оптимальной стратегии с учетом особенностей работы подстанций.

Исходные данные

В качестве исходных данных использованы однолинейная схема подстанции (рис. 1) с подключенными УШР и СТК и основные параметры энергосистемы (в частности, такие, как значения трехфазных мощностей КЗ

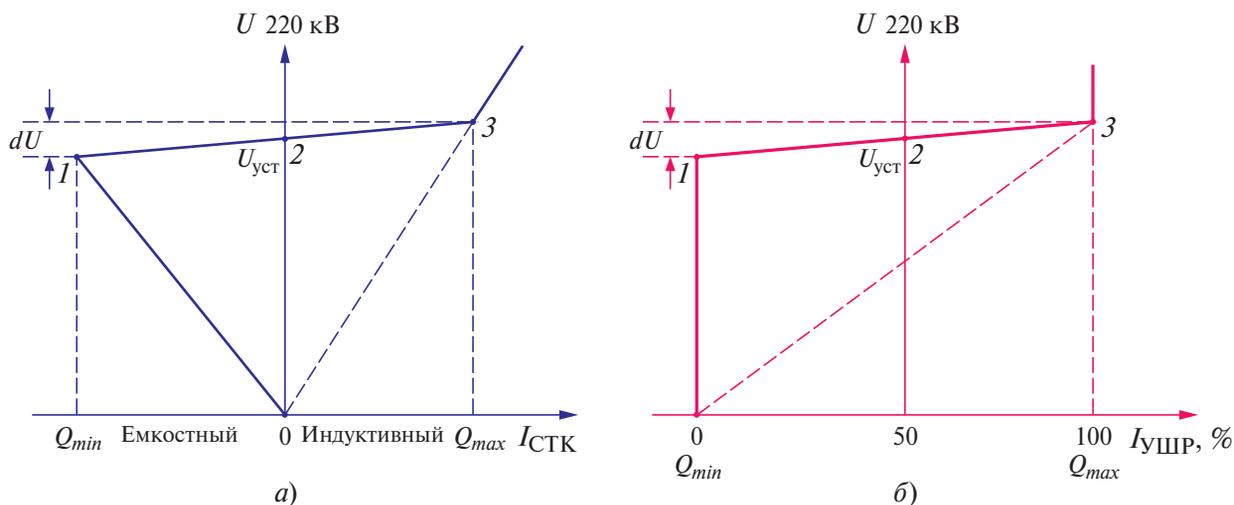


Рис. 2

на шинах ПС), определенные исходя из заданных токов КЗ, а также расчетные изменения напряжения δU , которые происходят при изменении мощности СТК и УШР в полном диапазоне регулирования. Помимо этого заданы параметры автотрансформатора 220/110/10 кВ мощностью 125 МВ · А.

Предварительные расчеты показали, что УШР может обеспечить плавное регулирование напряжения в диапазоне 5,42 %, а СТК способен изменить напряжение на шинах 220 кВ всего на 2,17 %, что следует учитывать при моделировании. Исходные возмущения выбраны так, чтобы оба регулятора работали в линейной зоне, т. е. без насыщения.

Рассмотрим исходные регулировочные характеристики СТК и УШР, на основе которых построены модели регуляторов. На рис. 2, а представлена регулировочная характеристика СТК (зависимость тока СТК от значения контролируемого напряжения). Согласно [3] система управления СТК регулирует напряжение на шинах 220 кВ в соответствии с заданными уставкой и статизмом (наклоном характеристики в зоне плавного регулирования, обеспечивающим возможность устойчивой параллельной работы двух компенсирующих устройств).

На характеристике имеются следующие ключевые точки. В исходном состоянии фильтрокомпенсирующая цепь (ФКЦ) включена, тиристорно-реакторная группа (ТРГ) не потребляет реактивную мощность, и СТК генерирует мощность ФКЦ (участок 0 – 1), при этом в точке 1 мощность СТК равна Q_{min} (+ 20 Мвар). При повышении напряжения импульсы управления ТРГ деблокируются, и ее потребляемая мощность растет с

увеличением напряжения (участок 1 – 2 – 3). В точке 2, когда контролируемое напряжение равно напряжению уставки $U_{уст}$, потребляемая ТРГ мощность сравнивается с мощностью ФКЦ, и мощность СТК становится равной нулю. В точке 3 тиристоры полностью открыты и ток ТРГ равен номинальному значению, соответствующему мощности ТРГ (– 40 Мвар), при этом мощность СТК равна Q_{max} (– 20 Мвар). Таким образом, диапазон плавного регулирования реактивной мощности СТК составляет + 20 ÷ – 20 Мвар. При дальнейшем росте напряжения ток СТК увеличивается пропорционально напряжению.

Статизм (задается в процентах), равный отношению $dU/U_{уст}$, определяет наклон регулировочной характеристики и значение изменения контролируемого напряжения dU в диапазоне плавного регулирования СТК.

Согласно техническим требованиям к рассматриваемому СТК обработка регулятором напряжения скачка уставки напряжения до уровня 0,9 составляет не более 0,03 с. Изменение реактивной мощности СТК обеспечивается путем изменения угла управления тиристоров и не зависит от физических свойств материалов и приборов. При этом переход от минимальной мощности до максимальной и обратно достигается за 10 мс, что используется в ряде специальных алгоритмов управления в нестационарных (переходных) режимах работы энергосистемы.

Типовая регулировочная характеристика УШР [4] отличается от характеристики СТК за пределами области регулирования. При выходе напряжения на шинах 220 кВ за нижнюю границу этой области (на стандартной характеристике эта точка соответствует

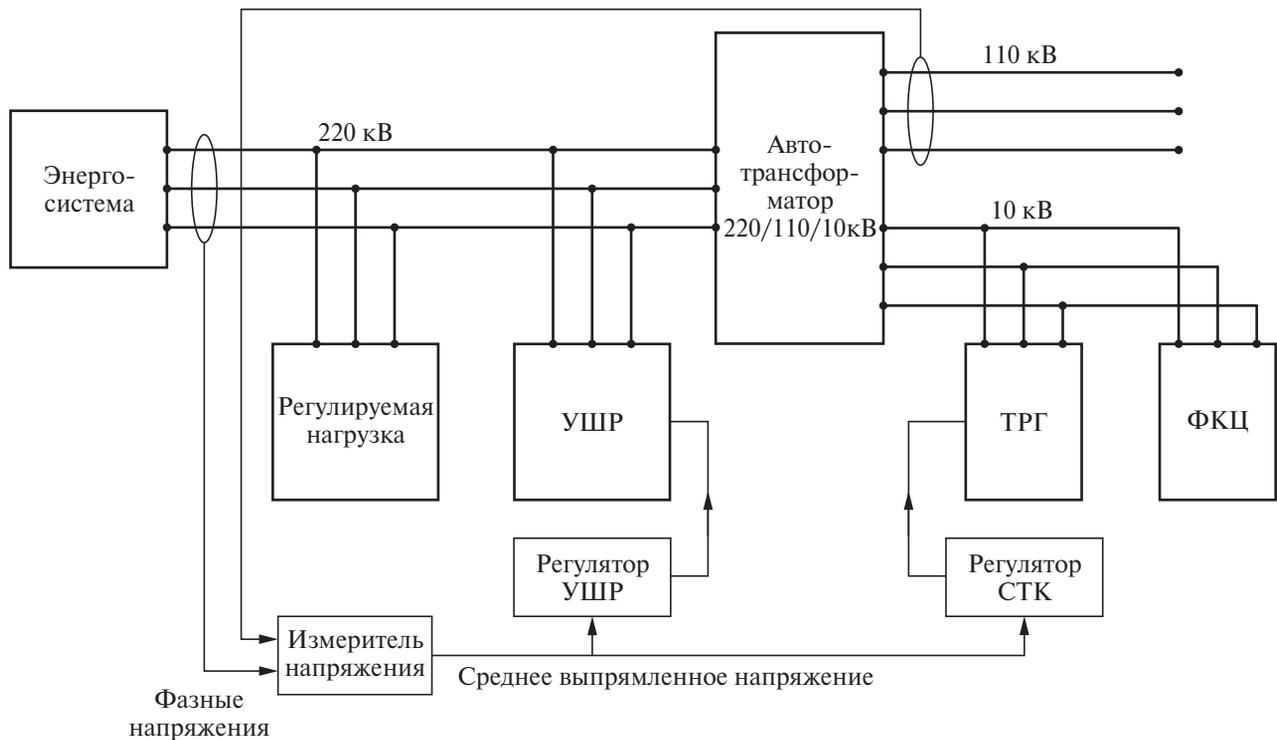


Рис. 3

установке по напряжению) значение мощности УШР минимальное, после же достижения максимальной мощности Q_{max} ток УШР автоматически ограничивается на заданном уровне. Для моделирования совместной работы УШР и СТК использована регулировочная характеристика УШР (рис. 2, б), смещенная влево по оси токов на 50 % мощности, при этом рабочие точки обоих компенсирующих устройств будут перемещаться синхронно. С точки зрения отработки возмущения в виде скачка напряжения на стороне 220 кВ такое смещение регулировочной характеристики УШР вполне допустимо, поскольку в любом из рассматриваемых вариантов регулирования рабочая точка УШР всегда находится в линейной зоне регулирования.

Изменение реактивной мощности УШР (тока сетевой обмотки) осуществляется вследствие изменения индуктивности реактора путем регулирования степени насыщения его магнитной системы (подмагничивания). Скорость ее изменения определяется постоянной времени обмоток УШР, составляющей около 1 с. Соответственно при небольших отклонениях напряжения в пределах зоны статизма весь регулировочный диапазон УШР от холостого хода до номинального значения будет пройден за 4–5 с. Таким образом, скорость нарастания/спада тока сетевой обмотки

УШР в линейной зоне регулирования физически ограничена значением около 60 А/с.

Структура модели

Для анализа совместного регулирования напряжения 220 кВ с помощью УШР 220 кВ и СТК 10 кВ в системе Simulink построена математическая модель, блок-схема которой представлена на рис. 3.

Модель состоит из двух основных подсистем:

модель силовой схемы, включающая в себя модели энергосистемы, УШР, СТК (ТРГ + ФКЦ), автотрансформатора 220/110/10 кВ, а также блок регулируемой нагрузки, используемый для формирования возмущения (скачка напряжения) на шинах 220 кВ;

модель системы управления, состоящая из блока управления током УШР (регулятор напряжения УШР), блока управления током ТРГ (регулятор напряжения СТК), системы вычисления и фильтрации текущего среднего значения напряжений на шинах 110 и 220 кВ.

Кроме этого, модель содержит блоки анализа получаемых результатов.

И СТК, и УШР должны обеспечивать в стационарных режимах симметричное по трем фазам регулирование напряжения сети 220 кВ. Для обеспечения высокой скорости

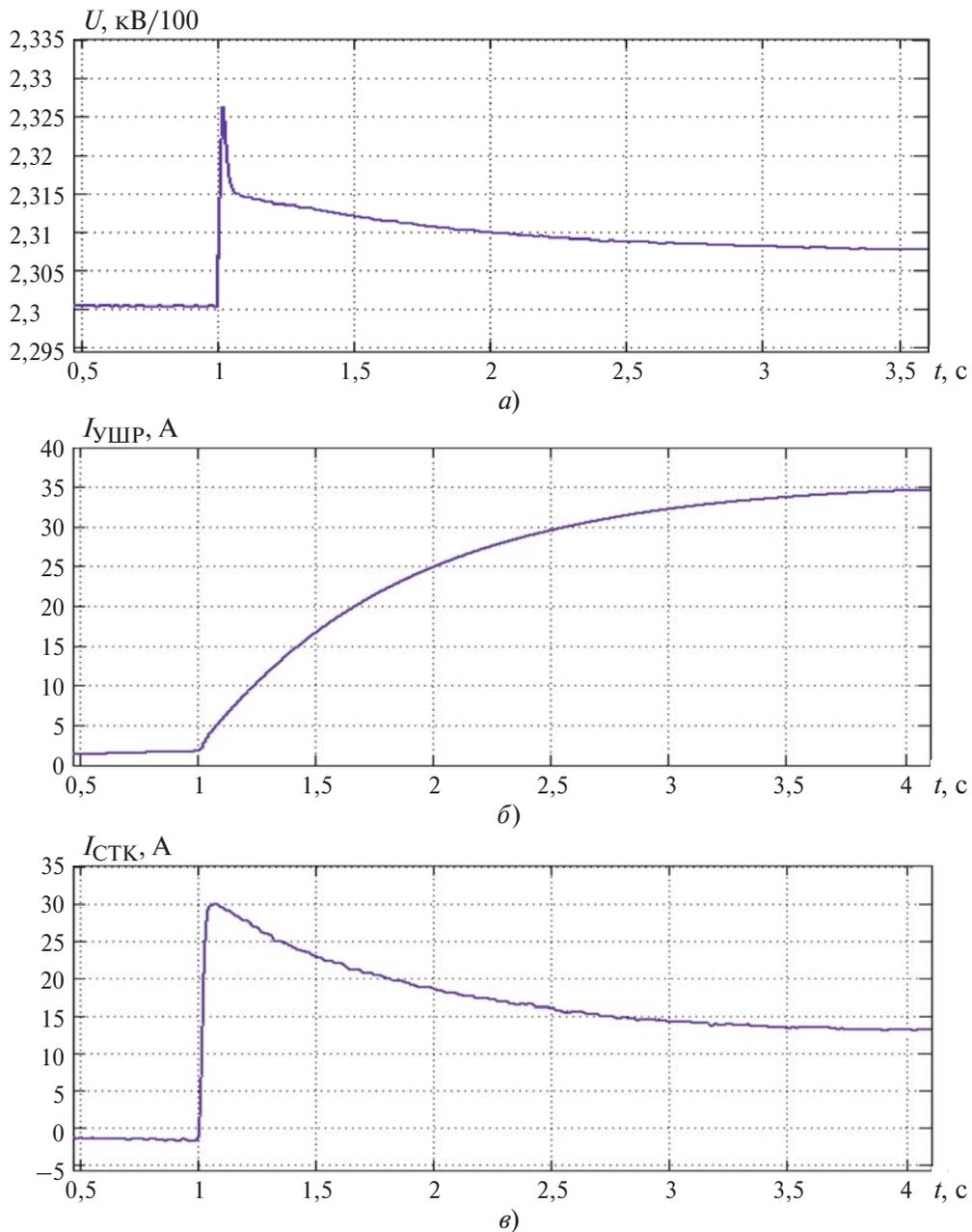


Рис. 5

Рассмотрим процесс перемещения рабочей точки СТК в указанном режиме (см. рис. 6). Процесс отработки скачка напряжения происходит в два этапа — быстром и медленном. Исходная рабочая точка СТК и УШР — 0 (напряжение $U_0 = 230$ кВ на рис. 5, а). Затем происходит скачок напряжения $U_1 - U_0 = 2,5$ кВ (до напряжения $U_1 = 232,5$ кВ). СТК быстро (примерно за 50 мс) обрабатывает возмущение, и его рабочая точка перемещается из точки 1 в точку 2 ($U_2 = 231,5$ кВ), а рабочая точка УШР в этот период медленно движется вправо. Далее рабочая точка УШР продолжает перемещаться вправо, а рабочая точка СТК смеща-

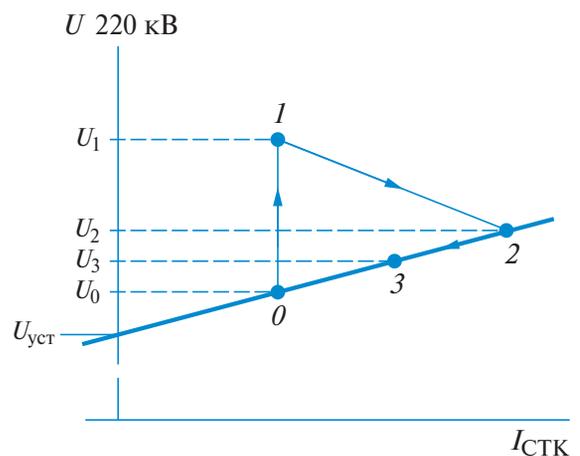


Рис. 6

ется влево и в результате они сходятся в точке 3 примерно через 500 мс после появления возмущения ($U_3 = 230,7$ кВ). На этом процесс отработки возмущения заканчивается, и оба КУ остаются в точке 3.

Как следует из рис. 5, приращение тока УШР в конце процесса отработки возмущения составило 34 А, а тока СТК — 14 А. Отношение приращений токов $34/14 = 2,4$ соответствует отношению мощностей (диапазонов регулирования) УШР и СТК. Таким образом, каждое КУ в итоге вносит свой вклад в отработку возмущения, пропорциональный его мощности, и никаких противоречий в работе двух компенсирующих устройств не наблюдается.

Зависимое регулирование: ведущий регулятор — УШР, ведомый — СТК

При таком варианте УШР обеспечивает регулирование напряжения в статических режимах, а СТК — в динамических. Регулировочные характеристики СТК и УШР остаются прежними, и УШР постоянно осуществляет плавное медленное регулирование напряжения на шинах 220 кВ. Но в медленном регулировании СТК участия не принимает, и в статических режимах его рабочая точка всегда находится в середине регулировочной характеристики, т. е. в точке 2 на рис. 2, а, соответствующей нулевой реактивной мощности СТК. Это достигается тем, что уставка напряжения регулятора СТК формируется как усредненное за некоторый период текущее значение напряжения на шинах 220 кВ. При этом СТК в любой момент готов к быстрой отработке возмущения (как при повышении, так и при понижении напряжения) в пределах своей мощности — соответственно – 20 и + 20 Мвар.

Естественно, что динамика процесса отработки обоими КУ скачка напряжения при такой стратегии регулирования зависит от времени усреднения напряжения на шинах 220 кВ при формировании сигнала уставки регулятора СТК. Поэтому были проведены опыты при различных значениях времени усреднения напряжения в диапазоне от 1 до 10 с. На рис. 7, а приведены кривые среднего напряжения на шинах 220 кВ и сигнала уставки регулятора СТК (тонкая линия) при времени усреднения 1 с.

Очевидно, что до начала скачка ток СТК равнялся нулю. При появлении возмущения СТК быстро обрабатывает его до уровня, определяемого статизмом регулировочной ха-

рактеристики. Далее по мере роста тока УШР ток СТК снижается и в итоге становится равным нулю, в то время как сигнал уставки его регулятора принимает новое значение, соответствующее текущему напряжению на шинах 220 кВ, определенному регулировочной характеристикой УШР. В данном опыте скорость изменения уставки СТК была выше, чем скорость регулятора УШР, что вызвало небольшое перерегулирование тока СТК с его переходом в емкостный режим.

При времени усреднения 5 с (рис. 7, б) такого эффекта не наблюдается. В этом опыте происходит более плавный спад тока СТК без какого-либо перерегулирования.

Для улучшения отработки возмущения значение статизма регулятора СТК было снижено до 1 %, что позволило СТК быстро отработать возмущение до уровня, соответствующего установившемуся значению напряжения, определяемому статизмом регулировочной характеристики УШР, равным 2 %. В результате время переходного процесса сократилось до уровня, определяемого быстродействием СТК. Результаты моделирования представлены на рис. 7, в.

Раздельное независимое регулирование напряжений 220 и 110 кВ

При этом варианте регулирования напряжение 220 кВ поддерживается работой УШР. СТК функционирует независимо и регулирует напряжение 110 кВ. Заданное значение статизма регулировочных характеристик УШР и СТК равно 2 %.

Результаты моделирования отработки скачка напряжения, вызванного подключением емкостной нагрузки к шинам 220 кВ, приведены на рис. 8, где показаны кривые среднего напряжения на шинах 220 кВ (а) и 110 кВ (б) при раздельном независимом регулировании СТК и УШР (в случае возмущения на стороне 220 кВ). Как и следовало ожидать, СТК гораздо быстрее обрабатывает возмущение и восстанавливает напряжение на шинах 110 кВ, чем УШР на шинах 220 кВ.

В отдельном опыте было проанализировано поведение КУ при возмущении со стороны шин 110 кВ. В этом случае отработка скачка напряжения на шинах 110 кВ осталась столь же эффективной, а быстрая реакция СТК к тому же практически нивелировала бросок напряжения на стороне 220 кВ.

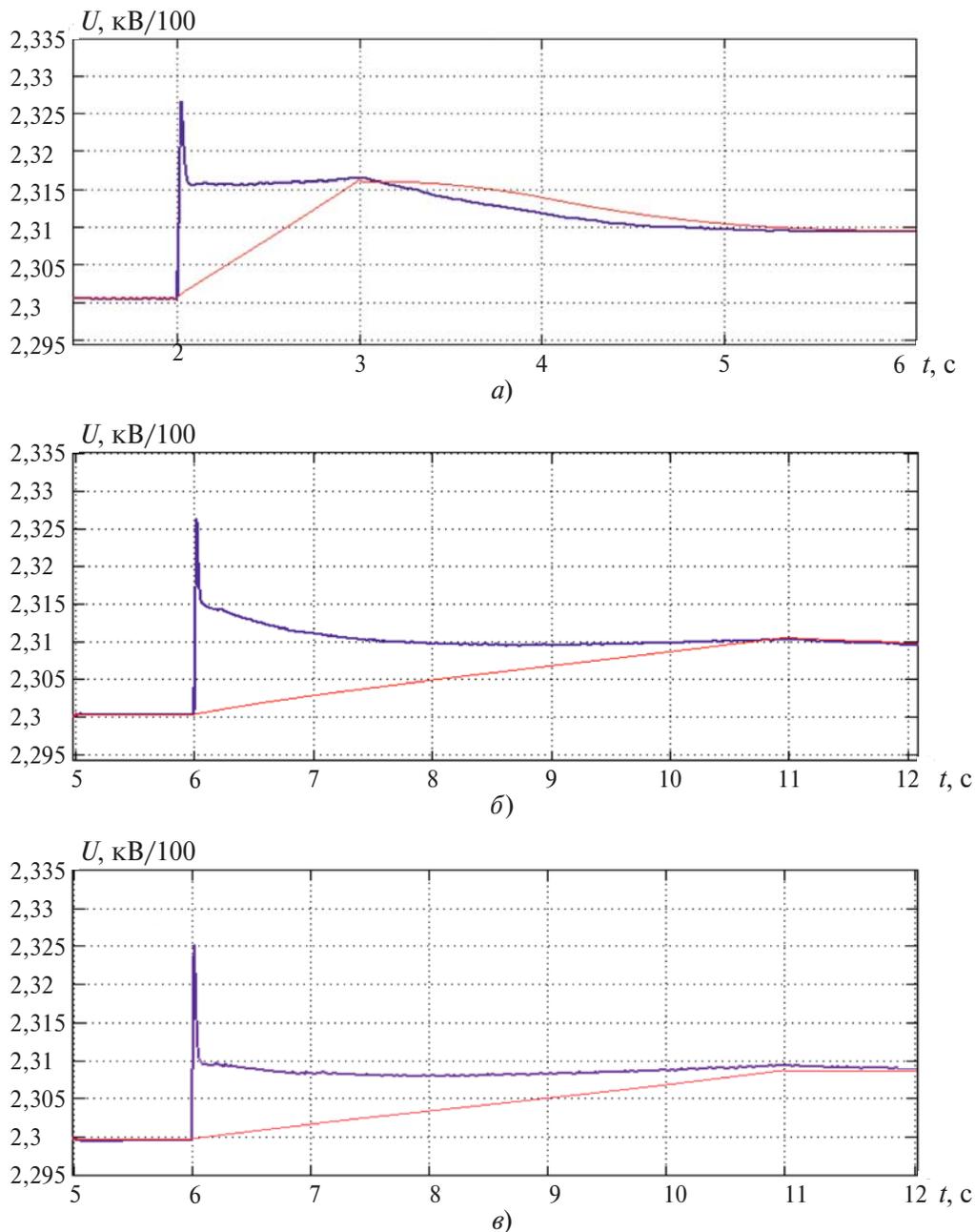


Рис. 7

Подобный режим регулирования целесообразно применять, когда нагрузка, подключенная на стороне 110 кВ подстанции, содержит резко переменные компоненты, такие, как тяговые подстанции РЖД, карьерные экскаваторы, электропечные или электрохимические установки. В этом случае СТК обеспечит быструю компенсацию изменения реактивной мощности нагрузки и не допустит попадания колебаний напряжения в сеть 220 кВ.

В заключение следует отметить, что никаких противоречий в работе двух компенсирующих устройств на одной подстанции не

наблюдается — оба они могут успешно работать с использованием полного диапазона регулирования своей реактивной мощности.

Выводы

1. Наиболее простым вариантом совместной работы двух компенсирующих устройств разного типа с различным быстродействием — СТК и УШР — является их независимое регулирование для поддержания напряжения на шинах 220 кВ подстанции, при котором регулировочные характеристики этих устройств по уставке напряжения и статизму должны быть идентичными. При этом ска-

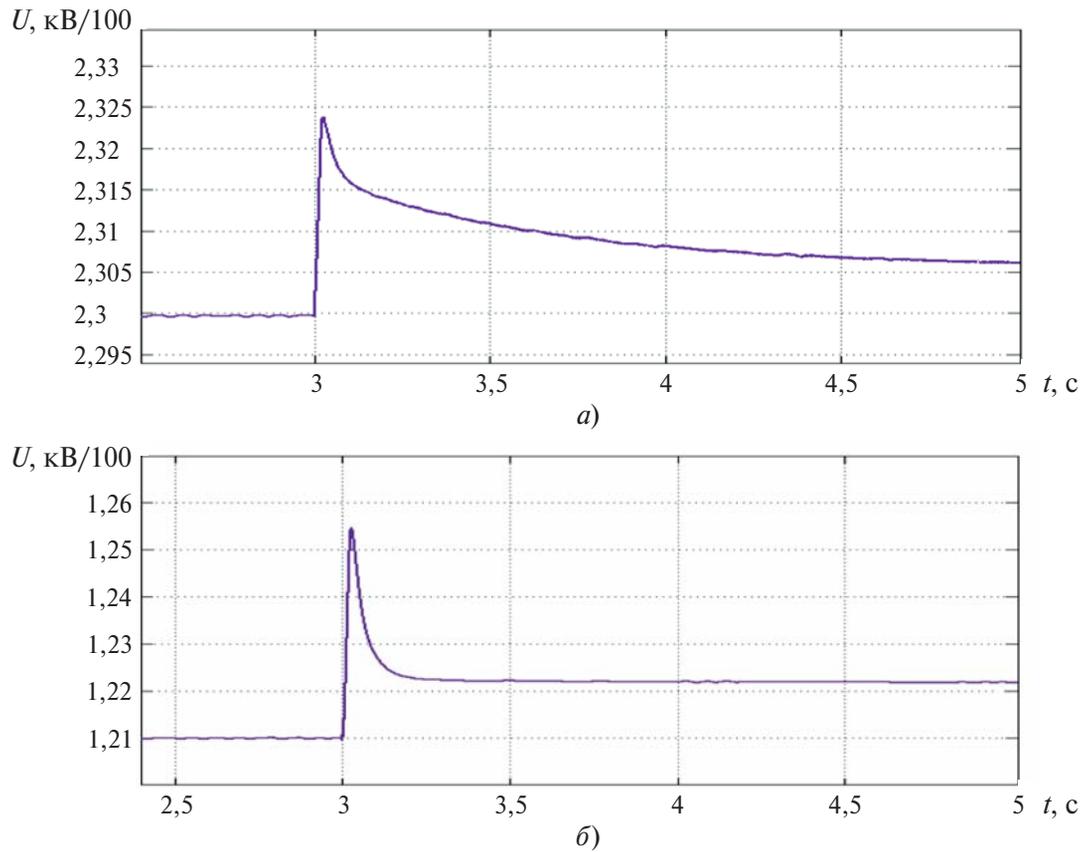


Рис. 8

чок напряжения быстро обрабатывается СТК, после чего происходит плавное перераспределение реактивных мощностей между СТК и УШР.

2. Алгоритм с удержанием СТК в стационарных режимах работы линии электропередачи в середине регулировочной характеристики (при нулевой реактивной мощности) обеспечивает постоянную готовность СТК к быстрой обработке как положительного, так и отрицательного изменения напряжения.

3. При возникновении проблем с наличием колебаний напряжения (реактивной мощности нагрузки) на шинах 110 кВ подстанции СТК может быть переведен в режим стабилизации именно этого напряжения, оставив регулирование напряжения на шинах 220 кВ за УШР.

Список литературы

1. **Чуприков В. С.** Компенсация реактивной мощности — ключ к повышению передаточной способности электрических сетей. — Энергоэксперт, 2008, № 4.
2. **Управляемые** шунтирующие реакторы для энергетических сетей / А. Г. Долгополов, Д. В. Кондатенко, С. В. Уколов, В. М. Постолатий. — Проблемы региональной энергетики, 2011, № 2.
3. **Mathur M. R., Varma R. K.** Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. — Wiley-IEEE Press, 2002.
4. **Управляемые** подмагничиванием шунтирующие реакторы / Под ред. Г. А. Евдокунина. — СПб.: Родная Ладога, 2013.
5. **Кочкин В. И., Нечаев О. П.** Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. — М: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000.

nenakhov@nidec-asi-vei.ru