Сегодня традиционная сфера применения контейнерных подстанций расширяется и не ограничивается строительными объектами, нефтяными и газовыми месторождениями.

Статья московских авторов посвящена возможности расширения состава и соответственно области применения подстанций контейнерного исполнения. В центре внимания – преобразовательно-стабилизирующее распредустройство в контейнерном исполнении, предназначенное для использования совместно с резервной дизельной электростанцией.

КОНТЕЙНЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

для применения в кабельных сетях

Роберт Шульга,
к.т.н., ведущий научный сотрудник
Михаил Дружинин,
инженер-конструктор
Борис Риэр,
начальник отдела
ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Москва
Роман Пестриков,
генеральный директор ООО «АЭС», г. Королев, Московская обл.

В настоящее время в системах передачи и распределения электроэнергии широко применяются контейнерные подстанции (КП) переменного и постоянного тока: мобильные и стационарные; высокого, среднего и низкого напряжения; наземного, подземного и заглубленного исполнения; трансформаторные, распределительные, генераторные и др.

Использование нетрадиционных источников электроэнергии, например ветровых, фотоэлектрических, приливных и других установок малой и средней мощности, требует применения накопителей электроэнергии (НЭЭ) разного типа, которые также входят в состав КП [1].

Применение современных технических решений, обеспечивающих модульное исполнение КРУ, с использованием компаундов, сшитого полиэтилена и других компонентов [2], позволило оптимизировать конструкцию контейнерной подстанции путем снижения ее габаритов, повысить ее надежность благодаря полной заводской готовности и тиражированности, улучшить экологическую безопасность КП.

Судя по двум последним сессиям СИГРЭ, рост числа техногенных и природных аварий в энергосистемах заставил мировую общественность рассмотреть вопросы повышения значимости и расширения кабельных сетей (КС) переменного и особенно постоянного тока. По сравнению с КС постоянного тока, КС переменного тока из-за влияния зарядной мощности, роста потерь и других факторов ограничены длиной 30–50 км, недостаточно устойчивы и управляемы. В этих сетях необходимо применять различные средства компенсации реактивной мощности (КРМ) и стабилизации напряжения, особенно при наличии длинных линий, при резко изменяющихся нагрузках, влиянии нелинейностей и других факторов.

Средства КРМ подразделяются на управляемые и неуправляемые, продольные и поперечные, вращающиеся и статические, дискретные и плавно регулируемые и др. В [3] анализируются наиболее распространенные в кабельных сетях дискретные управляемые устройства поперечной компенсации, которые выпускаются многими организациями под аббревиатурой АУКРМ, т. е. автоматически управляемые КРМ с числом ступеней переключения от четырех и более.

Несмотря на меньшую установленную мощность продольной емкостной компенсации, проблемы ограничения отклонения напряжения от заданного уровня по длине КЛ, значительных перегрузок по току и напряжению на конденсаторах продольной КРМ, меньшей надежности и применяемости ограничивают распространение продольной КРМ.

Сложность и высокая стоимость статических КРМ на основе СТК, УШР или тиристорно-управляемых устройств продольной компенсации (ТУПК), поперечного или продольного СТАТКОМа также ограничивают их применение в кабельных сетях. В то же время на высоковольтных воздушных линиях СТК, УШР или ТУПК достаточно широко применяются не только для стабилизации напряжения, но и в первую очередь для повышения пропускной способности и обеспечения устойчивой работы сети. В ряде случаев (например, на установках ДСП металлургических заводов, на тяговых подстанциях РЖД) устройства СТК или УШР абсолютно необходимы.

Несмотря на распространение АУКРМ в КС промышленных и нефтегазовых компаний благодаря относительной простоте и невысокой стоимости, существует ряд переходных режимов, связанных с возникновением феррорезонансных колебаний, гармоник и субгармоник, особенно при нелинейных нагрузках и неполнофазных режимах.

ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ КП

В ВЭИ накоплен определенный опыт разработки и конструирования мобильных и стационарных КП различного назначения, частично отраженный в статьях и патентах [4–7].

В [8] приведены данные о разработке контейнерных подстанций для НЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности для применения в КЛ и резервных системах электроснабжения.

Использование в кабельных сетях резервных источников в виде дизельных электростанций (РДЭС) или газотурбинных (РГТЭС) в свою очередь определяет ряд особенностей, связанных с переходом от режимов ретрансляции к режиму автономной работы и обратно, с переходом от холостого хода к режимам переменной нагрузки, с необходимостью периодической прокрутки валов источников с использованием нагрузочных устройств (НУ) контейнерного исполнения.

В результате возникает необходимость разработки новых устройств, таких как контейнерное распределительное преобразовательно-стабилизирующее устройство (КРПСУ), которое должно работать совместно с НУ, обеспечивая прокрутку валов источников и возможное демпфирование колебаний в КС при переходных режимах.

Технические характеристики КРПСУ

КРПСУ (табл. 1) выпускается в утепленном блок-контейнере с предельной массой 10 т и габаритами 2,4×12×2,7 м. Устройство можно эксплуатировать при температуре окружающего воздуха от –60 до +40 °С и относительной влажности 75%.

В состав распределительного устройства РУ 6 кВ входят 5 ячеек КСО 6,3 кВ для ввода, присоединения КРМ, НУ, измерительного трансформатора ТН и резерва.

Для питания сети оперативного тока и передачи сигналов управления и сигнализации от РДЭС по протоколу RS 485 служит шкаф собственных нужд (220 В, 5 кВт).

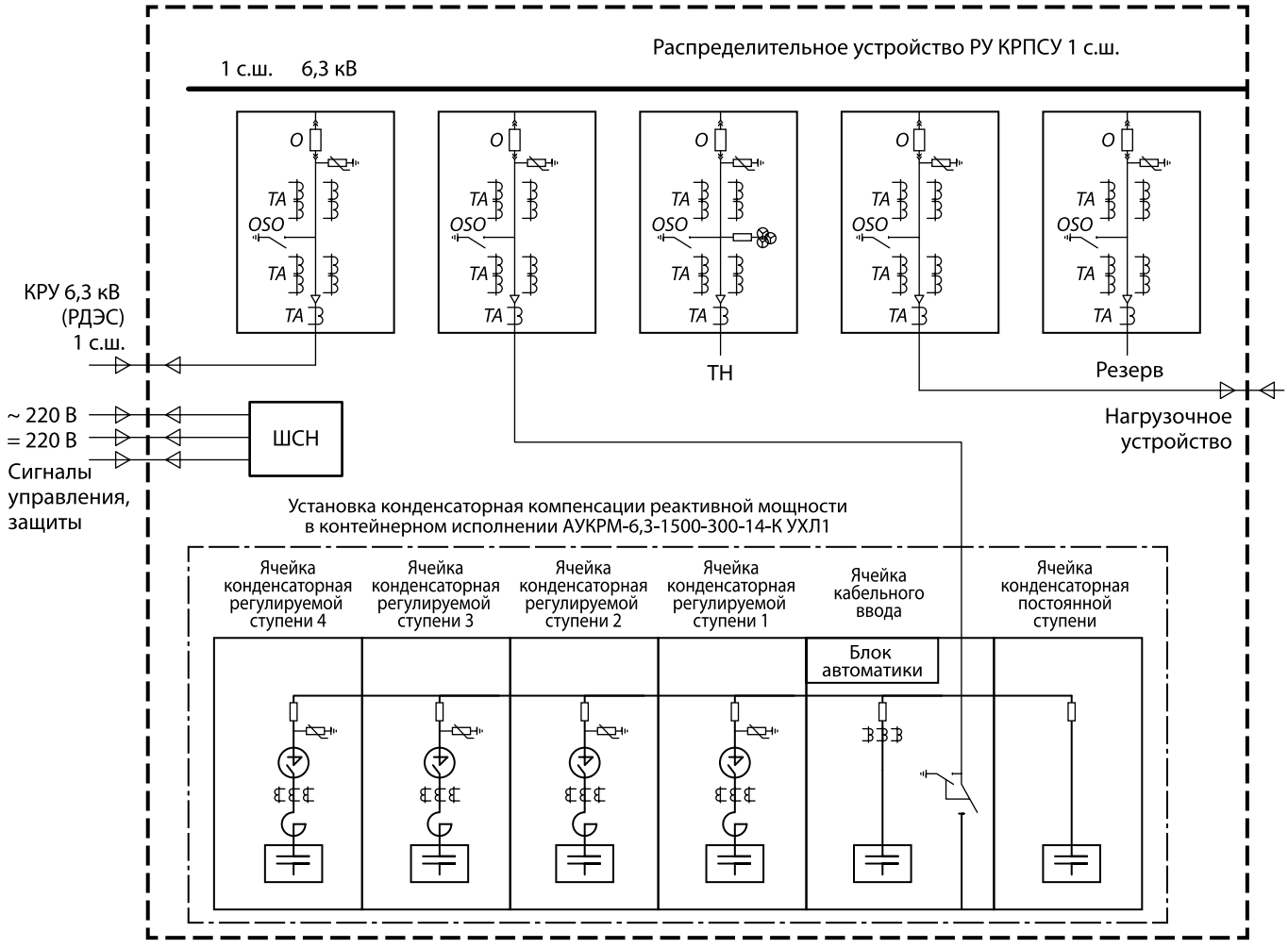
В состав двухсекционной подстанции 6 кВ РДЭС входят два КРПСУ для комплектования каждой секции.

Принципиальная схема каждого КРПСУ представлена на рис. 1. Вверху показан состав и подключение ячеек КСО к одной

Технические характеристики КРПСУ Таблица 1 •

Номинальное входное напряжение, кВ	6,3 (+10/–15%)
Частота входного напряжения, Гц	50 (±1,5 Гц; при наличии сети ± 0,2 Гц)
Ток термической стойкости, кА	12,5
Ток электродинамической стойкости, кА	20
Номинальная мощность, кВАр	1500
Число ступеней	5
Мощность каждой ступени, кВАр	300

Принципиальная схема КРПСУ Рис. 1 •



из секций 6,3 кВ РДЭС, внизу – состав и подключение 5 секций АУКРМ с использованием вакуумных контакторов КВТ 10 кВ, шунтовых конденсаторов КВП мощностью 300 кВАр с токоограничивающими реакторами РТ-6,3-900. Блок автоматики и регулятор РКМ8 входят в состав АУКРМ.

Всё оборудование отечественного производства, и можно допускать изменения по требованию заказчика, в том числе раздельное выполнение КРПСУ в двух контейнерах меньшего размера для удобства компоновки и обслуживания.

КРПСУ может работать в двух режимах: местном и дистанционном. Выбор числа коммутируемых ступеней компенсатора осуществляется автоматически с помощью регулятора РКМ8. Взаимодействие между сетью, РДЭС, НУ и КРПСУ и распределенной нагрузкой осуществляется диспетчером или автоматически через АРМ РДЭС.

Возможные режимы работы кабельной сети:

а) ретрансляция питания от сети через шины РДЭС и КРПСУ к распределенной нагрузке (дизели и НУ отключены);
б) автономный режим с отключением от сети РДЭС, которая работает на распределенную нагрузку (НУ отключено);
в) режим поочередной прокрутки дизелей на НУ.

Режим ретрансляции – основной для КРПСУ, регулятор которого может в свою очередь работать в трех режимах: поддерживая оптимальный cosφ на уровне 0,95, либо tgφ на уровне 1,4, либо стабилизируя установившееся отклонение напряжения на шинах РДЭС в пределах ±5%.

Первый режим позволяет экономить электроэнергию за счет снижения перетока реактивной мощности к распределенной нагрузке, а второй и третий обеспечивают надлежащее качество напряжения на шинах потребителей. КРПСУ дает возможность осуществить местное или дистанционное переключение указанных режимов.

Моделирование и эффективность КРПСУ

Поперечная компенсация реализуется с помощью устройств автоматически управляемого компенсатора реактивной мощности АУКРМ в контейнерном исполнении, который применяется для повышения пропускной способности кабельных линий напряжением до 10 кВ и широко представлен на рынке.

АУКРМ позволяет стабилизировать напряжение даже при значительной нагрузке. Это устройство уступает СТК ▸

Рис. 2. Схема замещения кабельной сети

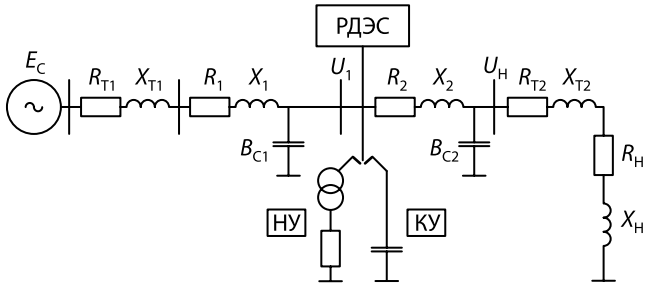
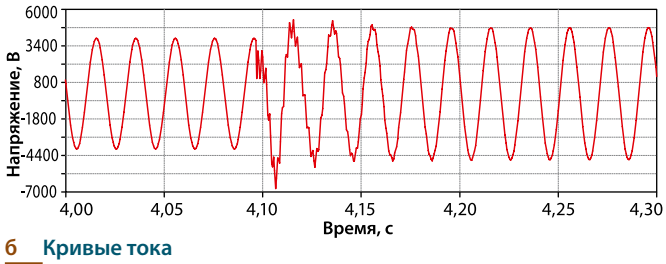
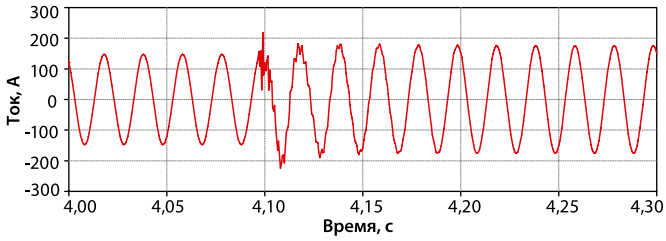


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов при переключении ступеней компенсации КРПСУ

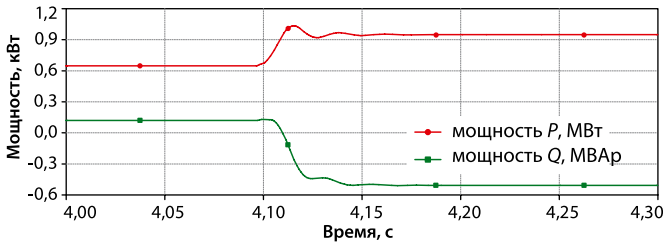
а Кривые напряжения



б Кривые тока



в Кривые активной и реактивной мощности питающей сети



г Кривые активной и реактивной мощности нагрузки

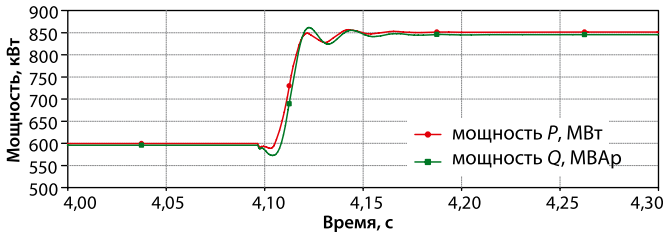
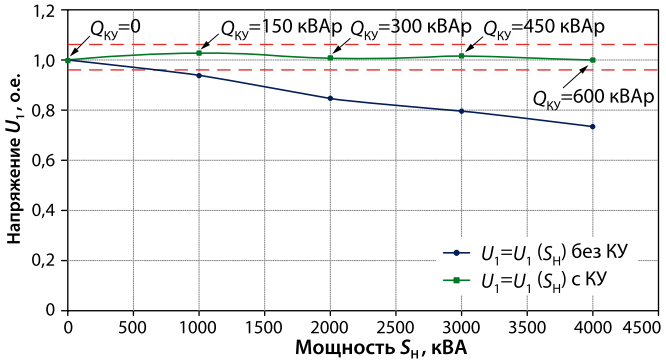


Рис. 4. Зависимость U_1 (о.е.) от мощности нагрузки $S_н$ (кВА) при номинальном входном напряжении сети



и СТАТКОМу по ресурсу и быстродействию, но выигрывает у них по стоимости и отсутствию гармонических искажений.

На рис. 2 приведена однолинейная схема замещения кабельной сети напряжением 6 кВ, длиной до 10 км с КРПСУ (ниже – КУ) мощностью 1500 кВАр с пятью ступенями по 300 кВАр, управляемым регулятором, стабилизирующим напряжение распределенной нагрузки в узле $U_н$ мощностью до 4000 кВА, с переключаемыми ступенями по 1000 кВА. Здесь же показаны НУ и резервная ДЭС с подключением в узле U_1.

На рис. 3 приведены кривые установившегося и переходного режима при переключении ступеней компенсации в виде зависимостей напряжения U (рис. 3а), тока I (рис. 3б), активной (P) и реактивной (Q) мощности в узле U_1 (рис. 3в, г), полученные в программном комплексе АТР [9].

Видно, что применение КРПСУ позволяет обеспечить приемлемое качество установившихся и переходных режимов, не перегружая кабельную линию по току.

В соответствии с [10] реактивная мощность компенсирующего устройства $Q_{ку}$ при схеме соединения «звезда» определяется формулой:

$$Q_{ку} = \frac{1}{3}\omega C_{ку} U_л^2 = \omega C_{ку} U_ф^2, \quad (1)$$

где $U_л$ – действующее значение линейного напряжения, $U_ф$ – действующее значение фазного напряжения, $C_{ку}$ – емкость КУ, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Потери напряжения по длине КЛ без КУ – ΔU_1:

$$\Delta U_1 = \frac{PR + QX}{U_л}, \quad (2)$$

где P и Q – соответственно активная и реактивная мощность нагрузки, R и X – активное и реактивное сопротивление кабельной линии.

Потери напряжения при наличии КУ – ΔU_2:

$$\Delta U_2 = \frac{PR + (Q - Q_{ку})X}{U_л}. \quad (3)$$

Потери мощности в КЛ ΔP определяются выражением:

$$\Delta P = \frac{(P^2 + Q^2)R}{U_л^2}. \quad (4)$$

Мощность компенсирующего устройства $Q_{ку}$ определяется выражением:

$$Q_{ку} = \frac{I_{ку}^2}{\omega C}, \quad (5)$$

т. е. $Q_{ку}$ – переменная величина и зависит от тока нагрузки.

Уменьшение потерь напряжения без КУ – ΔU_1 и с компенсацией ΔU_2 равно:

$$\Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{QX}{U_л}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что уровень напряжения повышается на величину, пропорциональную изменению реактивной нагрузки Q при неизменном значении $X_{ку}$.

Распределенная нагрузка коммутируется ступенями и в соответствии с их переключением автоматически переключаются ступени КРПСУ. Дискретное переключение ступеней КРПСУ и НУ позволяет сократить интервалы переключения ступеней за счет дополнительной разрядки конденсаторов и уменьшить колебания, приведенные на рис. 3.

На рис. 4 показаны графики изменения напряжения на шинах резервной ДЭС при ступенчатом изменении нагрузки в пределах 4000 кВА. Нижняя кривая соответствует отсутствию КРПСУ. В этом случае сниженное до 0,7 о.е. напряжение должно быть отключено защитой от снижения напряжения. Верхняя кривая показывает возможность регулирования и стабилизации напряжения в заданном диапазоне при наличии КРПСУ.

Следует отметить, что полноценное регулирование напряжения при наивысшем входном напряжении сети требует наряду с КРМ использовать шунтирующий реактор. Однако в данном случае может быть использовано как отключение КРМ, так и кратковременное подключение нагрузочного устройства взамен КРМ. Обычно подобные режимы возникают при сбросе распределенной нагрузки при повышенном напряжении на входе сети.

Оборудование КС напряжением 6 кВ допускает длительную работу с перегрузкой по напряжению 20%, и в случае отключения нагрузки проблема стабилизации снимается. В переходных режимах подключение нагрузочного устройства взамен КРПСУ также снимает проблему ограничения напряжения.

Аналогичные проблемы возникают при переходе от режимов ретрансляции и автономной работы или в случае неполнофазных режимов, когда НУ оказывает демпфирующее влияние на колебания, возникшие в кабельной сети. В этом случае диспетчер или АРМ дистанционно подключает НУ и задает необходимое число его ступеней для выбора оптимального режима демпфирования.

Реализация быстродействующей трехфазной цифровой модели в реальном масштабе времени на основе схемы, представленной на рис. 2, с учетом параметров резервной дизель-электростанции позволит диспетчеру или АРМ оптимизировать по быстродействию и качеству переходного режима переключение ступеней нагрузки и КРПСУ в процессе регулирования и стабилизации напряжения.

ВЫВОД

Расширение состава контейнерных трансформаторных подстанций способно улучшить характеристики кабельных сетей. Так, применение контейнерного распределительного преобразовательно-стабилизирующего устройства КРПСУ совместно с РДЭС, нагрузочным устройством и дискретно изменяющейся нагрузкой дает возможность регулировать и стабилизировать напряжение.

Применение на диспетчерском пункте быстродействующей цифровой модели кабельной сети, учитывающей КРПСУ, позволяет оптимизировать в реальном масштабе времени переключение режимов ретрансляции и автономной работы РДЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульга Р.Н. К вопросу о создании гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии // Новое в российской электроэнергетике. 2015. № 12. С. 22.
2. Шульга Р.Н., Шульга А.Р., Ковалев Д.И., Мирзабекян Г.З., Вариводов В.Н. Перспективы применения твердой изоляции в комплектных распределительных устройствах и изоляции из сшитого полиэтилена на постоянном и переменном токе // Электротехника. 2016. № 8. С. 39–43.
3. Шульга Р.Н, Дружинин М.Ю. Сопоставительный анализ средств продольной и поперечной компенсации кабельных и воздушных линий электропередач переменного тока: доклад // XXVI Международная научно-техническая и практическая конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты» (М., 8–9 ноября 2017 г.).
4. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство электроснабжения с регулируемым напряжением и перестройкой частоты. RU 148688 U1, МПК: H02j3/28, опубликован 10.12.2014. Бюл. № 34, патентообладатель ФГУП ВЭИ. Заявка от 01.08.2014 г.
5. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство для испытаний силовых трансформаторов и кабелей: заявка № 2014145791, опубл. 17.11.2014. RU 160203U1, опубл. 10.03.2016. Бюл. № 4. МПК G01R 31/06, патентообладатель ФГУП ВЭИ.
6. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство электроснабжения с регулируемым напряжением и перестройкой частоты // Электро. 2015. № 1. С. 48–51.
7. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Анализ средств управления режимами работы кабельных и воздушных линий электропередач переменного тока // Новое в российской электроэнергетике (НРЭ). 2017. № 6. С. 37–55.
8. Шульга Р.Н., Боровиков П.В., Степичев М.М., Риэр Б.А., Гетманова Н.Ю. Накопитель электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности // Электро. 2017. № 3. С. 38–44.
9. Alternative Transients Program (ATP): Rule Book. 2002.
10. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Изд. ТГУ, 2012. 234 с.