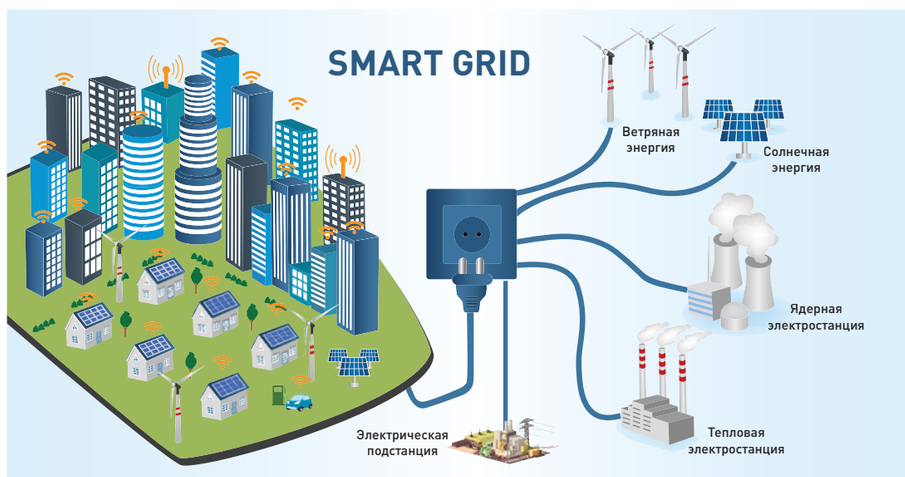
АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И МИРОВОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

АВТОР:

А.С. ЛУКОВЕНКО,
К.Т.Н.,
ФИЛИАЛ
ПАО «ФСК ЕЭС»
КРАСНОЯРСКОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ МЭС
СИБИРИ,
СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ
И ТЕХНОЛОГИЙ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА
М.Ф. РЕШЕТНЕВА (СИБГУ
ИМ. М.Ф. РЕШЕТНЕВА)

Суть интеллектуальной энергосистемы — это способность автоматизированной системы самостоятельно отслеживать и распределять потоки электричества с целью достижения максимальной эффективности использования энергии. Это возможно только на основе использования современных технических средств, обладающих способностью придавать сети свойство активного устройства передачи электрической энергии с регулируемыми параметрами.

Ключевые слова: интеллектуальные сети; управляемые (гибкие) системы электропередачи переменного тока (FACTS); энергетические системы; потоки мощности.



Объединение электрических сетей в единую автоматизированную систему Smart Grid

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие вектор экономического развития в мире и в России переместился с Запада на Восток, а для России — в Восточную Сибирь и на Дальний Восток. Именно в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, куда входит и Россия, в настоящее время активно развиваются промышленность, инфраструктура, высокотехнологичные производства, социальная сфера. Российская Федерация не является исключением в этой тенденции.

Одним из ключевых направлений, в котором требуется выполнение крупных инвестиционных проектов, является энергетика. Так, в 2013 г. была утверждена стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации, разработанная на период до 2030 г. во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 22.11.2012 № 1567 [1]. Стратегия охватывает основную деятельность электросетевых комплексов — передачу и распределение электрической энергии и непосредственно связанные с ней аспекты смежных видов деятельности (генерацию и сбыт электрической энергии) на территории Российской Федерации.

Основной целью (миссией) деятельности электросетевого комплекса является долгосрочное обеспечение надежного, качественного и доступного энергоснабжения потребителей Российской Федерации путем организации максимально эффективной и соответствующей мировым стандартам сетевой инфраструктуры по тарифам на передачу электрической энергии, обеспечивающим приемлемый уровень затрат на электрическую энергию для российской экономики и инвестиционную привлекательность отрасли через адекватный возврат вложенных средств.

Несмотря на не самые быстрые темпы развития экономики страны, доля потребления электроэнергии в России линейно возрастает. Согласно данным статистики, спрос на электроэнергию увеличивается на 0,7 % в год. В результате потребление электроэнергии к 2021 г. увеличится на 5 % и сохранит тенденции к росту.

Статистические данные потребления электроэнергии и прогнозные значения представлены на рис. 1 [18].

Увеличение спроса на электроэнергию обоусловлено реализацией ряда проектов по увеличению производства металлургических заводов, добычей нефти и газа, их транспортировкой, реконструкцией БАМа. Немаловажной задачей является также подключение к ОЭС изолированных районов (Западный и Центральный энергорайоны, Республика Саха, Крым и Севастополь).

Все это дает предпосылки для развития новой, так называемой интеллектуальной сети (ИС).

СТАТИСТИКА ДАННЫХ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПРОГНОЗНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРИ ТАКОМ ТЕМПЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ

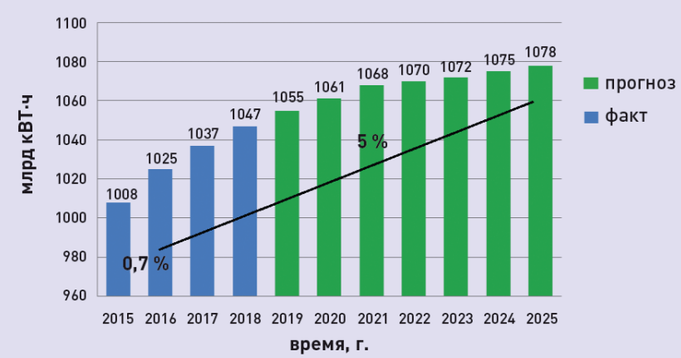


Рис. 1

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (ИЭС)

Мировое развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) направлено на применение так называемых интеллектуальных электрических сетей (ИЭС) и системы Smart Grid.

Рынок Smart Grid формируется с середины 2000-х годов, наблюдается интенсивное развитие данных технологий. Лидерами являются страны Западной и Северной Европы, США, Китай [18].

В перспективе до 2020–2025 гг. во всем мире будет происходить постепенный переход к новому типу организации электрической сети — интеллектуальным сетям (Smart Grid) [3, 10-11].

ПРОГНОЗ ГЛОБАЛЬНОГО РЫНКА SMART GRID

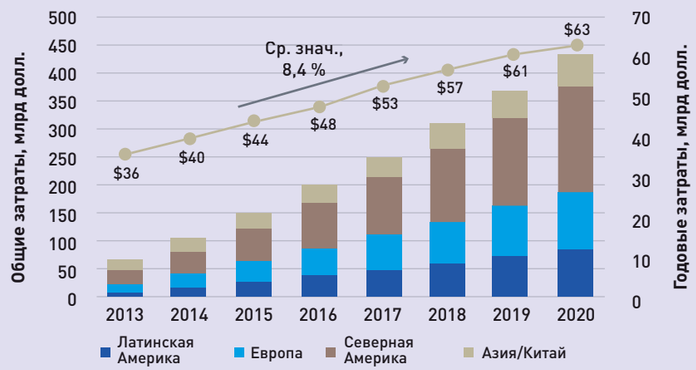


Рис. 2

По данным компании GTM RESEARCH, общая емкость глобального рынка Smart Grid достигнет 400 млрд долл. к 2020 г. при среднем CAGR (Compound Annnual Growth Rate — среднегодовой темп роста) 8,4 %. При этом наиболее крупным видится рынок Китая (24 %). Далее США (23,9 %), страны Азиатско-Тихоокеанского региона (21,2 %) и Европа (20,6 %). Рынки Латинской Америки прогнозируются на уровне доли 10,2 % (рис. 2) [9].

Целями развития интеллектуальных сетей для стран Запада в первую очередь являются стремление к упорядоченной взаимосвязанности функционирования и взаимодействие компактно расположенных генерирующих объектов, электросетей и потребителей за счет интеллектуальных возможностей и отказоустойчивости. Наибольший интерес представляют возможность подключения небольших генерирующих источников электроэнергии, адаптация к динамике потребления и обеспечение экономии энергии. На рынках западных стран в настоящее время большим спросом пользуются локальные умные сети, их развитием эти страны и занимаются, а управленческие же задачи на межрегиональном, национальном и международном уровнях функционирования энергетических систем их заботят меньше [4].

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАДИЦИОННЫХ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Системы управления и мониторинга	Традиционная сеть	Интеллектуальная электрическая сеть
Магистральные системообразующие транспортные сети		
Системы оценки текущего состояния (режима) ЛЭП	Пассивная	Активная
Система автоматического контроля загрузки ЛЭП с выдачей управляющих воздействий для ее разгрузки	Ручное управление	Автоматическое управление
Система автоматического контроля напряжений в контрольных точках ЛЭП и управления режимом по напряжению	Ручное управление	Автоматическое управление
Распределительные сети общего пользования		
Система автоматического контроля поузлового баланса активной и реактивной мощности	Незначительно	Повсеместно
Система контроля и управления качеством электрической энергии в узлах сети	Нет	Есть
Система централизованного автоматического управления нагрузкой потребителей	Нет	Есть
Система оценки текущего состояния (режима) сети	Нет	Есть
Наличие управляемых сетевых элементов, изменяющих параметры сети	Нет	Есть
Сети потребителей		
Автоматизированная система учета электропотребления	Крайне недостаточно	В необходимом объеме
Система регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности	Крайне недостаточно	В необходимом объеме
Местные (резервные) источники генерации	Практически отсутствуют	Широкое применение малой генерации + накопители электроэнергии
Наличие интерфейса связи с единым центром управления	Нет	Есть
Интеллектуальные энергосберегающие технологии в системах электроснабжения («умный дом»; «умный город»)	Нет	Есть

Таблица 1

Для России энергообеспечение потребителей происходит в сложных условиях экономического, технического, природно-климатического характера, ориентированного на крупные генерирующие объекты. В российской электроэнергетике иной уровень интегрированности больших систем со значительно более высоким уровнем сложности системных взаимосвязей. Соответственно, требуется перестройка всей глобальной электроэнергетической сети на принципах многофункциональной автоматизации, в том числе с учетом перспективной задачи поэтапного восстановления координационного управления функционированием энергетических систем стран СНГ на двухсторонних и многосторонних началах. В России отличается и подход к задаче присоединения к имеющимся сетям объектов малой и альтернативной энергетики и связанных с ними локальных энергосетей [4].

Интеллектуальная сеть — это качественно новое состояние электрической сети, которое предполагает объединение на технологическом уровне электрических сетей, потребителей и производителей электроэнергии в единую автоматизированную систему. Она будет в реальном времени самостоятельно отслеживать режимы работы всех участников процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии. Получая обратную связь через разветвленную систему датчиков в режиме online, интеллектуальная сеть должна автоматически реагировать на все изменения, происходящие в сети, принимая оптимальные решения для предотвращения аварий и осуществления энергоснабжения с максимальной надежностью и экономической эффективностью [5-6].

Применение ИЭС в сочетании с современными цифровыми информационно-управляющими системами (ИУС — цифровая система контроля или управления некоторым реальным объектом) [7] на основе синхрофазоров, регистрирующих изменение токов и напряжения в их узлах с частотой 1–60 раз в секунду (контроллер линейного регулятора напряжения SEL-2431, платформа SEL-2240 Axion — модульный PMU), позволит существенно изменить технико-экономические характеристики будущих энергетических систем в положительную сторону (табл. 1) и обеспечить высокую социальную эффективность их эксплуатации (социальная эффективность производства показывает, насколько его развитие отвечает достижению своей главной цели — служить потребителю, удовлетворять личные нужды каждого человека) [3].

Развитие ИС в России во многом определяется Положением ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», утвержденным Советом директоров ПАО «Россети» 22.02.2017, протокол № 252 [12]. Данный документ акцентирует внимание на наиболее прогрессивных технических решениях, задает перечень и границы применения тех или иных технических решений, оборудования и техноло-

ОБЪЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ЕДИНУЮ АВТОМАТИЗИРОВАННУЮ СИСТЕМУ SMART GRID

Рис. 3

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ (ГИБКИХ) СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (FACTS)

Проект	Страна	Описание
Проект Cape Corridor	Южная Африка	Конденсаторы продольной компенсации установлены для повышения пропускной способности линии электропередачи 765 кВ Западно-Капской провинции. Номинальные мощности конденсаторов продольной компенсации варьируются в диапазоне от 450 до 1300 МВАр. Конденсаторы продольной компенсации способны значительно повысить пропускную способность уже существующих энергосистем. Благодаря этому снижается потребность в строительстве новых линий в случаях, когда необходимо передавать больше мощности.
Система SVC Light	г. Чжанцзяган, Восточный Китай	Система SVC Light (0–164 МВАр) 35 кВ была установлена на новом сталелитейном производстве компании Zhangjiagang Pohang Stainless Steel Co. в Восточном Китае, на котором используется очень мощная электродуговая печь (ЭДП) для производства нержавеющей стали на основе скрапа (стальной лом). ЭДП генерирует несколько видов возмущений, которые в случае неустранения провоцируют достаточно существенное понижение качества электропитания, что приводит к возникновению несимметричной нагрузки, небалансу тока и напряжения в сети как следствие ухудшения качества электроэнергии, передаваемой другим потребителям, подключенным к той же сети. И последний, но не менее важный фактор: ЭДП генерирует высшие гармоники, четные и нечетные, а также интергармоники. Основная задача системы SVC Light — повышение качества электроэнергии до приемлемого уровня. Основные функции устройства: получение высокого и постоянного коэффициента мощности, а также ограничение гармонических искажений и составляющих обратной последовательности фаз, генерируемых ЭДП.
Проект Asmunti	Финляндия	Два конденсатора продольной компенсации производства компании ABB установлены в электросети 400 кВ компании Fingrid с целью увеличения пропускной способности сети в северной части Финляндии, а также обеспечения безопасности энергосистемы. Эксплуатация конденсаторов началась в 2009 г. Конденсаторы продольной компенсации позволяют повысить пропускную способность существующих линий электропередачи и поддерживать стабильность электросети в энергосистеме Финляндии.
Проект Des Hêtres	Канада	Конденсатор продольной компенсации установлен для повышения объемов передачи электроэнергии ГЭС по электросети 230 кВ. Конденсатор продольной компенсации номинальной мощностью 108 МВАр применяется в сети передачи электроэнергии 230 кВ компании Hydro-Québec на подстанции Des Hêtres 230/120/69 кВ в Квебеке, Канада. Продольная компенсация предназначена для увеличения пропускной способности существующей соединительной линии электропередачи, транспортирующей электроэнергию от нескольких гидроэлектростанций до районов потребления.
Проект Chénier, Terna, Shiprock	Германия, Италия, США	Для регулирования трансграничных потоков в 2003 и 2011 г. были установлены фазоповоротные трансформаторы (ФПТ) в Германии (ПС 230 кВ Amprion, мощность ФПТ 600 МВА), Италии (ПС 400 кВ Terna, мощность ФПТ 1630 МВА), США (ПС 230 кВ Shiprock, мощностью 2×200 МВА, ПС 230 кВ Watterflot 2×300 МВА).
Проект London Underground	Великобритания	Чтобы получать электроэнергию от сети общего пользования, Лондонский метрополитен закрыл свою старую электростанцию на жидком топливе 180 МВт на Лотс-роуд. В 2009 г. статический компенсатор реактивной мощности (SVC) был введен в эксплуатацию. Устройство было включено в сеть электропитания 11 кВ для совместной работы с другими аналогичными компенсаторами, пуск которых состоялся в середине 2000 г. В результате последней установки число устройств SVC увеличилось до шести единиц. Помимо этого, используется несколько автономных фильтров гармоник, в настоящий момент работающих в критических точках энергосети 22 кВ и 11 кВ Лондонского метрополитена.
Проект Golden Valley Electric Association	Аляска	SVC для поддержания напряжения на приводах трубопроводной арматуры. В своей электрической сети 138 кВ компания Golden Valley Electric Association (GVEA), расположенная в г. Фэрбенкс, Аляска, использует статический компенсатор реактивной мощности (SVC), построенный в 2005 г. Компенсатор SVC, установленный на подстанции Jarvis Creek в районе г. Делта-Джанкшен в центральной части Аляски, имеет номинальную мощность 8 МВАр (индуктивных) до 36 МВАр (емкостных) при напряжении 138 кВ. Кроме того, он способен поддерживать номинальную повышенную емкостную мощность 45 МВАр в течение двух минут.

Проект	Страна	Описание
Проект Rourkela-Raipur	Индия	Устройства продольной компенсации TCSC установлены для обеспечения стабильной передачи избыточной мощности из Восточной в Западную Индию. Компания Power Grid Corporation of India Ltd. (PGCIL) приобрела два конденсатора продольной компенсации с тиристорным управлением (TCSC). Батареи были установлены на двухцепной межсистемной линии электропередачи 400 кВ Руркела — Райпур, объединяющей восточные и западные регионы сети. Протяженность соединительной линии составляет 412 км. Основное назначение этой крупной соединительной линии переменного тока — экспорт излишков энергии из восточных регионов в западную часть Индии при нормальном режиме работы, а также во время аварийных ситуаций. Устройства TCSC установлены на конце линий электропередачи со стороны Райпура. Они осуществляют демпфирование межсистем-ного качания мощности между регионами, которое в противном случае могло бы представлять собой ограничение на передачу электроэнергии по данной межсистемной линии.
Проект Cerro Navia	Чили	Система FACTS установлена для стабилизации напряжения сети и увеличения пропускной способности линий электропередачи Чили. В 2011 г. система FACTS, включающая СТАТКОМ (статический синхронный компенсатор) и SVC (статический компенсатор реактивной мощности), была поставлена и введена в эксплуатацию компанией ABB в энергосети компании Transelec, расположенной в Чили.
Система динамического накопления энергии DynaPeaQ, UK Power Networks	Великобритания	Британская энергораспределительная компания UK Power Networks в сотрудничестве с ABB и Даремским университетом установила систему динамического накопления энергии DynaPeaQ на одном из своих объектов в Норфолке в Англии. Система спроектирована на основе технологии ABB SVC Light в сочетании с накапливающей энергию литий-ионной батарей. Устройство включено в сеть 11 кВ со значительным проникновением ветровой энергии. Система динамического накопления энергии, развернутая UK Power Networks, был спроектирована и построена под ключ компанией ABB. Она дополняет признанную во всем мире технологию ABB SVC Light — транзистора IGBT высокого быстродействия на основе преобразователя с управлением методом ШИМ (широтно-импульсная модуляция), используемого для таких задач, как регулирование напряжения, подавление фликера и активная фильтрация.

Таблица 2

гий, направленных на повышение технического уровня процессов передачи, преобразования и распределения электроэнергии, процессов управления, эксплуатации и развития электросетевого комплекса России.

На среднесрочную перспективу, согласно Положению, в качестве основных направлений развития установлены следующие [13]:

1. переход к цифровым подстанциям различного класса напряжения 35–110 (220) кВ и др.;
2. переход к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления;
3. переход к комплексной эффективности бизнес-процессов и автоматизации систем управления;
4. применение новых технологий и материалов в электроэнергетике.

На дальнюю перспективу в качестве основных направлений развития установлены следующие технологические приоритеты ПАО «Россети»:

1. Применение «необслуживаемого» энергоэффективного оборудования.
2. Сокращение совокупной стоимости владения применяемого оборудования и технологий.
3. Построение интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (Smart Grid).
4. Внедрение «цифровых» элементов электрической сети.
5. Развитие мультиагентных технологий управления.
6. Применение «активных» элементов сети (FACTS, СНЭ и т.д.).

КЛАССИФИКАЦИЯ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЯЕМЫХ (ГИБКИХ) СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (FACTS)

Термин «управляемые (гибкие) системы электропередачи переменного тока» (Flexible Alternative Current Transmission System, FACTS) введен в обращение Институтом электроэнергетики EPRI (США) [16].

ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ УСТРОЙСТВ FACTS ПО ПРИНЦИПУ РЕГУЛИРОВАНИЯ

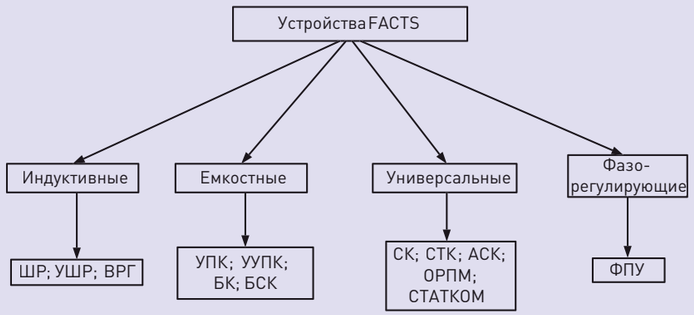


Рис. 4

FACTS является одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

Устройства FACTS сети подразделяются на группы, показанные на рис. на с. 30.

Также устройства FACTS можно разделить по степени регулирования (рис. 4) [17]: индуктивные; емкостные; универсальные; фазорегулирующие.

Согласно СТО 56947007-29.240.019-2009 [10], устройства FACTS делятся на устройства 1 и 2 поколения.

К устройствам FACTS первого поколения (FACTS-1) относят те, что обеспечивают регулирование напряжения (реактивной мощности) и требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях (статический компенсатор реактивной мощности (СТК), реактор с тиристорным управлением, стационарный последовательный конденсатор с тиристорным управлением, фазосдвигающий трансформатор и др.).

К новейшим FACTS второго поколения (FACTS-2) относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой электроники (GTO — Gate Turn-Off' Thyristor, а затем IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistors, IGCT — Integrated Gate-Commutated Thyristor).

Биполярный силовой транзистор IGBT сочетает в себе свойства биполярного и полевого транзистора. Он управляется путем подачи напряжения на затвор, изолированный от цепи. Характерным свойством этого транзистора является низкая величина мощности управления, которая применяется для переключений мощных силовых цепей.

FACTS-2 обладают новым качеством регулирования — векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети (статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ), объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ), фазоповоротные устройства (ФПУ), асинхронизированный синхронный компенсатор, в том числе с маховиком (АСК), и др).

Основные реализованные проекты применения управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока (FACTS) в зарубежных странах осуществляющие реализацию платформы Smart Grid приведены в табл. 2 на с. 34–35 [12–15].

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ (ГИБКИХ) СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (FACTS) В РОССИИ

В последнее десятилетие в России наблюдается возрастающий интерес к интенсивно развивающемуся во всем мире направлению научно-технологического инновационного преобразования электроэнергетики на базе новой концепции Smart Grid (интеллектуальные сети) [16–17].

В качестве примера в табл. 3 приведены основные реализованные проекты применения управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (FACTS) в РФ [9, 10, 18].

Согласно данным табл. 2 и 3, можно говорить о положительной динамике реализации проектов интеллектуальных сетей совместно с устройствами FACTS как в зарубежных странах, так и на территории России. В определенных случаях устройства FACTS являются альтернативой сооружению дополнительных линий электропередачи, что затрагивает экономическую заинтересованность применения ИЭС.

Безусловно, проекты ИЭС и системы Smart Grid, реализованные в странах Зарубежья, являются более глобальными, но и объемы инвестиций значительно больше (Китай — 70 млрд долл. в год; США — 19 млрд долл. в год; Индия — 10 млрд долл. в год; Европейский союз — 7 млрд долл. в год [2]).

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ (ГИБКИХ) СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (FACTS) В РОССИИ

Проект	Страна, объект	Описание
Асинхронизированный компенсатор реактивной мощности типа АСК-100-4 мощностью 100 МВА	Россия, ПС 500 кВ «Бескудниково»	Асинхронизированный компенсатор АСК-100-4УХЛ4 мощностью 100 Мвар выполнен по типу турбогенератора с горизонтальным расположением оси ротора и синхронной частотой вращения 1500 об./мин. Такие компенсаторы применяются в электрических сетях для ликвидации дефицита реактивной мощности и регулирования напряжения в сети. Они способны генерировать и потреблять реактивную мощность в широком диапазоне, а также обладают высокой перегрузочной способностью, позволяющей обеспечить устойчивость прилегающей энергосистемы при авариях. Пилотный образец устройства установлен на ПС 500 кВ «Бескудниково».
СТАТКОМ	Россия, ПС 220 кВ «Могоча»	СТАТКОМ на ПС 220 кВ «Могоча» (Забайкальский край) позволяет поддерживать требуемый уровень и качество напряжения, повысить пропускную способность линий электропередачи. Пилотный образец устройства мощностью 50 Мвар, разработанный ОАО «НТЦ электроэнергетики», является базовым элементом для создания ряда инновационных систем компенсации реактивной мощности и управления потоками электроэнергии, включая современные электропередачи и вставки постоянного тока.
Вставка постоянного тока (ВПТ) на базе СТАТКОМ	Россия, ПС 220 кВ «Мо-гоча»	Существующая связь на напряжении 220 кВ между энергосистемами Сибири и Востока разомкнута из-за невозможности обеспечить ее устойчивую работу. Эксплуатация вставки несинхронной связи мощностью 200 МВт на подстанции 220 кВ «Могоча» позволит нормализовать уровни напряжения в сети 220 кВ, производить оперативный обмен аварийным резервом мощности между двумя энергосистемами, обеспечить бесперебойное электроснабжение Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей. На данный момент ВПТ в эксплуатацию не передана, проводятся испытания по настройке.
Статический тиристорный компенсатор (СТК)	Россия, ПС 550 кВ «Ново-Анжерская»	В 2003 г. проведено пробное включение в работу комплекса оборудования СТК мощностью 100 МВА на ПС 500 кВ «Ново-Анжерская» МЭС Сибири. Плавное управление реактивной мощностью в СТК осуществляется путем изменения угла открытия тиристоров реактора (α).
Вставка постоянного тока (ВПТ)	Россия, ПС 330/400 кВ «Выборгская»	Крупнейшая в мире ВПТ, введенная в 1980 г., позволяет осуществлять связь двух несинхронно работающих энергосистем России и Финляндии. При этом в каждой из энергосистем сохраняется независимое регулирование частоты и напряжения в сетях переменного тока. ВПТ содержит четыре комплексных высоковольтных преобразовательных устройства мощностью 350 МВт каждое (суммарная мощность составляет 1400 МВт).
Управляемый шунтирующий реактор (УШР)	Россия, ПС 550 кВ «Заря»	Воздушная линия (ВЛ) 500 кВ «Заря — Барабинск — Таврическая» объединяет Омскую и Новосибирскую энергосистемы на территории Сибири с Единой национальной (общероссийской) электрической сетью (ЕНЭС) территории России. При строительстве ВЛ впервые в России на подстанции 500 кВ «Таврическая» была введена в работу группа шинного управляемого реактора 500 кВ (УШР) мощностью 180 Мвар.
Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ)	Россия, ПС 220 кВ «Светлая»	На ПС 220 кВ «Светлая» введен в эксплуатацию современный комплекс средств компенсации реактивной мощности в Алтайском крае. Благодаря новому оборудованию удалось повысить качество и надежность энергоснабжения северных районов края, в том числе г. Камень-на-Оби, а также участка Транссибирской железнодорожной магистрали между Омском и Барнаулом. Электроснабжение потребителей на севере Алтайского края осуществляется по линиям электропередачи большой протяженности, что ранее приводило к скачкам напряжения. Для решения этой проблемы установлен УШРТ мощностью 50 Мвар на напряжение 220 кВ. Реактор такого класса напряжения и мощности с тиристорным регулированием в России применен впервые. Установка двух УШРТ в комплексе с двумя батареями статических конденсаторов по 78 Мвар позволит плавно регулировать уровни напряжения в автоматическом режиме, обеспечивать высокую надежность работы энергосистемы, высокое качество электроэнергии, а также снижать потери при передаче электроэнергии.

Таблица 3

ИНФОРМАЦИЯ

Впервые термин Smart Grid появился в 2003 г. в ноябрьском номере американского журнала «Коммунальные услуги» в статье главного редактора этого журнала Майкла Барра «Спрос надежности будет управлять инвестициями» (Michael T. Burr. "Reliability demands will drive automation investments", Public Utilities Fortnightly, Nov. 1, 2003).

На начальном этапе этот термин имел в основном рекламный характер, не подразумевая особых технических решений. В его нынешнем значении термин был использован в статье Массуда Амина и Брюса Волленберга в их публикации «Об интеллектуальной сети» (Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid., IEEE P&E Magazine, September/October, 2005).

На государственном уровне Smart Grid в качестве официального термина впервые был использован в Законе США «Об энергетической независимости и безопасности», который был одобрен Конгрессом США в январе 2007 г., а в декабре этого же года подписан президентом Джорджем Бушем.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ мировых тенденций развития интеллектуальных электрических сетей, который показал, что лидерами по развитию и применению ИЭС являются страны Западной и Северной Европы, США, Китай с большим объемом инвестиций со стороны государства.
2. Классифицированы основные группы устройств управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока и они разделены по принципу регулирования мощности. Эффективность и целесообразность применения этих устройств доказана положительными примерами мировой практики.
3. Интерес и стремление к переходу на использование интеллектуальных сетей в электроэнергетических сетях России подтвержден успешным применением устройств FACTS в магистральных электрических сетях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие энергосистемы Красноярского края с перспективой до 2025 года. Международный форум «Территория инициативной молодежи Бирюса 2017». Инженерный кейс. С. 1–35.
2. Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 № 511-р (ред. от 18.07.2015) «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации».
3. Волкова И.О. Концепция интеллектуальных энергосистем и возможности ее реализации в российской электроэнергетики / И.О. Волкова, В.Р. Окороков, Р.В. Окороков, Б.Б. Кобец // Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса». Сто пятнадцатое заседание от 30 ноября 2010 года., Москва 2011. С. 64.
4. «Умные сети — Умная энергетика — Умная экономика» — Интервью академика В.Е.Фортова по поводу круглого стола, проходившего в рамках IV Петербургского международного экономического Форума. http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=e81f6ef4-fd62-494c-818d-6fa75cd7154c.
5. Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15–19, 2001, p. 134–138.
6. Hatziargyriou N.D., Donnelly M., Papathanassiou S.A., Pecas Lopes J.A. e.a. Modeling New Forms of Generation and Storage // Electra, 2001, № 195, p. 55–63.
7. Степанова А.С. Анализ развития информационно-управляющих систем с использованием научнотехнологического форсайта / А.С. Степанова, Д.Ю. Муромцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009, т. 11, №5 (2). — С. 354–357.
8. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» / Официальный сайт ПАО «Россети». — URL: http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/tehpolitika.pdf.
9. Концепция цифровой подстанции РСК и этапы ее реализации. Е.А. Борисов. ООО «ЭМА. Новосибирск 2011. 109 с.
10. СТО 56947007-29.240.019-2009 Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России.
11. Постолатий В.М. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ 220 кВ / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимошева, С.Н. Карева // Проблемы региональной энергетики. — 2010. — №2. С. 1-18.
12. ABB: https://new.abb.com/facts/ru.
13. Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks / Wiley — 2004. pp. 403 — ISBN: 0-470-85271-2.
14. Siemens AG — Discover the World of FACTS Technology: Technical compendium. 2011: Siemens AG, 24 pages. — https://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS_Technology_.pdf.
15. GE Grid Solutions. Flexible AC Transmission Systems. imagination at work. Increasing Demands on Transmission Grids. — http://www.gegridsolutions.com/products/brochures/Services/FACTS_GEA32010-LR.pdf.
16. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года / Официальный сайт ПАО «Россети». — URL: http://www.rosseti.ru/investment/policy innovation development/ doc/innovation program.
17. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. — 2012. — http:// foresight.ifmo.ru /ict/shared /files/ 201310/1_104.pdf.
18. Сайт ПАО «ФСК ЕЭС» — http://www.fsk-ees.ru/ innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines.