

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЭ В СОСТАВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р.Н. ШУЛЬГА, к.т.н., ведущий научный сотрудник

ФГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина» (ФГУП ВЭИ), 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 12

Аннотация. Отмечены недостатки ЭЭС сравнительно с СПТ в части устойчивости, управляемости, надежности и резервирования, выявлена необходимость перехода от цифровизации в виде АСУ ТП к умным сетям, а в последующем к мультиагентным сетям постоянного тока с повышенной степенью резервируемости. Рассмотрено применение распределенной генерации в составе традиционных источников и ВИЭ, а также накопителей и статических преобразователей. Приведены характеристики вышеуказанных элементов для моделирования режимов с целью выбора структуры и алгоритмов управления, обеспечивающих повышенную степень надежности энергоснабжения.

Ключевые слова: электроэнергетическая сеть, мультиагентная сеть постоянного тока, распределенная генерация, ВИЭ, резервируемость.

Список обозначений: АБ - аккумуляторная батарея, АГ - асинхронный генератор; ВЛ - воздушная линия; ВПТ - вставка постоянного тока; ВТ - выключатель тока (постоянного); ВЭС - ветроэлектростанция; ВЭУ - ветроэлектроустановка; ГЭП (FACTS) - гибкая электропередача; ДЭС - дизельная электростанция; ИТ - источник тока; КЛ - кабельная линия; КИУМ - коэффициент использования установленной мощности; КНЭ - кинетический накопитель электроэнергии; МГЭС - микрогазотурбинная электростанция; ММС - модульный многоуровневый конвертор; МСПТ - мультиагентная сеть постоянного тока; МЭК - мультиагентный энергетический комплекс; НЭЭ - накопитель электроэнергии; ПН - преобразователь напряжения; ППТ - передача постоянного тока; РГ - распределенная генерация; СВИ - система векторных измерений; СГ - синхронный генератор; СК - синхронный компенсатор; СПТ - сеть постоянного тока; СПИНЭ - сверхпроводящий индуктивный накопитель электроэнергии; ССИ - система скалярных измерений; СТАТКОМ - статический компенсатор на приборах IGBT; СТК - статический тиристорный компенсатор; СУ - система управления; ТК - телеканал; ТУПК - тиристорная управляемая продольная компенсация; ТЭ - топливный элемент; УШР - управляемый шунтирующий реактор; ФПТ - фазоповоротный трансформатор; ФЭУ - фотоэлектрическая установка; ФЭ - фотоэлемент; ЭЭС - электроэнергетическая система (переменного тока).

Существующие электроэнергетические системы и сети переменного тока (ЭЭС) разных классов напряжения имеют иерархическую централизованную структуру управления и обладают существенными недостатками в виде плохой управляемости и устойчивости, недостаточной надежности и резервируемости, необходимости синхронизации и синфазирования, необходимости наличия «горячего» резерва и дополнительного расхода топлива на его поддержание, недостаточная автоматизация, мониторинг и диагностика, низкая экологичность из-за использования масла, элегаза, невозможность аккумулирования электроэнергии и др.

Для устранения вышеперечисленных недостатков в мире за последние десятилетия в ЭЭС, образованными воздушными и кабельными линиями (ВЛ и КЛ соответственно) были введены многочисленные устройства продольной и поперечной компенсации на основе силовой электроники, которые

образовали целую совокупность устройств гибких электропередач ГЭП (в зарубежной терминологии FACTS).

Известно, что передаваемая мощность по линиям ЭЭС P_1 определяется выражением:

$$P_1 = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{1,2X}, \quad (1)$$

где U_1, U_2 - соответственно напряжения в начале и в конце линии;

δ - угол сдвига фаз указанных напряжений;
1,2 - коэффициент запаса по статической устойчивости;

X - реактивное сопротивление линии.

Повышение устойчивости, управляемости и пропускной способности как следует из (1) может быть достигнуто: либо стабилизацией напряжений U_1, U_2 , что достигается применением СТК или УШР, либо снижением сопротивления линии X , что достигается применением ТУПК, либо снижением угла δ , что достигается использованием ФПТ. Более дорогостоящими, но более эф-

фективными способами является применение продольных или поперечных преобразователей напряжения в виде СТАТКОМ или ММС на полностью управляемых вентилях IGBT или IGCT.

Другой разновидностью устройств FACTS являются управляемые токоограничители ТО на основе либо индуктивных, либо полупроводниковых, либо сверхпроводящих устройств, которые снижают токи КЗ до приемлемого уровня, допустимого для их отключения с помощью установленных выключателей. Указанная проблема особенно актуальна для мегаполисов, например, Московского региона, мощностью 17-19 ГВт, где в кольцевых схемах 110, 220, 500 кВ токи КЗ приблизились к предельной способности выключателей равной 63 кА и в то же время не решена проблема распределения рабочих токов до номинального уровня.

Использование вышеупомянутых устройств, однако, недостаточно для полной ликвидации недостатков ЭЭС, что подтверждается возникновением многочисленных цепных аварий (США, 2003 г.; Москва, 2005, 2010 гг. и др.), приводящих к многомиллиардным ущербам и снижению энергобезопасности страны.

Альтернативой является перевод ЭЭС или магистральных связей на постоянный ток в виде передач и вставок (ППТ и ВПТ), которые обладают абсолютной устойчивостью, управляемостью, резервированием, отсутствием необходимости синхронизации и синфазирования при вводе источников, более низкими потерями, возможностью аккумуляции электроэнергии, снижением расхода топлива для поддержания «горячего» резерва за счет применения НЭЭ, полной автоматизацией и мониторингом, присутствием «умных сетям», высокой экологичностью и сочетаемостью с ВИЭ [1].

Мощность, передаваемая по ППТ, P_1 определяется выражением

$$P_1 = \frac{U_1^2}{r_0 l}, \quad (2)$$

где U_1 - напряжение в начале ППТ,
 r_0 - удельное сопротивление линии,

l - длина линии.

Сравнивая выражения (1) и (2) видно, что для обеспечения полной управляемости и устойчивости ЭЭС необходимо измерять и согласовывать 8 параметров установившегося режима (частота, фаза, активные и реактивные составляющие тока, напряжения, мощности, что используется в СВИ [2,3]). За последние годы в мире резко возрос интерес и практическое применение сетей постоянного тока СПТ, что подтверждается проведением двух последних сессий СИГРЭ по указанной проблеме [4,5]. СПТ на основе биполярной ППТ обладают более высокой надежностью энергоснабжения сравнительно с ЭЭС, т.к. отключение одного из полюсов компенсируется кратковременной перегрузкой другого полюса, в то время как отключение одной из фаз ЭЭС при однофазном КЗ приводит к полному прекращению энергоснабжения. Реализованная первоначально в нашей стране ППТ 1500 кВ Экибастуз-Центр послужила прототипом аналогичных передач напряжением до 1600 кВ в Китае и Индии с последующим образованием СПТ. В США предполагается к 2030 году создание кольцевой СПТ по периметру страны на основе сверхпроводящих КЛ [6].

Целью статьи является оценка возможности создания мультиагентных систем постоянного тока МСПТ с использованием распределенной генерации в виде традиционных источников, ВИЭ, накопителей электроэнергии НЭЭ и статических преобразователей напряжения ПН.

ЭЭС и СПТ благодаря прогрессу технологий энергоинформационных систем проходят три стадии автоматизации: цифровизация в виде АСУ ТП; умные (активно-адаптивные) сети в виде цифровых подстанций, СВИ и др. технологий и, наконец, мультиагентные (нейронные) сети на основе самообучения взамен программирования [7,8].

На первой стадии автоматизации АСУ ТП не справились с проблемой размерности из-за обилия обслуживания многочисленных датчиков и проблем интеллектуализации. Умная сеть смогла решить проблему раз-

мерности путем организации локальных сетей на шине «процесса», пакетной передачи информации между элементами сети, а задачи интеллектуализации и диспетчирования через шину «подстанции» реализовать в иерархической структуре ЭЭС. Недостаточная проработка вопросов резервирования и степени надежности энергоснабжения на переменном токе в условиях распределенной генерации и резкопеременного потребления ограничивает применение умных сетей. Мультиагентные сети на постоянном токе позволяют реализовать любую степень надежности и резервирования, выполнить оценку и управление рисками в условиях распределенной генерации и резкопеременного потребления в условиях возрастания доли ВИЭ.

Сети будущего должны обладать свойствами: сетевая архитектура, интеллектуализация, мультиагентное управление, активная адаптация (самоорганизация), отраслевая интеграция, масштабируемость, связанность с глобальным информационным пространством, удобством для конечного потребителя. Для этих сетей характерны следующие особенности: переход от централизованной к распределенной генерации РГ с возрастанием доли ВИЭ и улучшением экологии. Повышение энергоэффективности будет достигаться приближением источников к потребителям за счет использования микро- и малой генерации на газе, ВИЭ с использованием НЭЭ. Существующие ЭЭС не рассчитаны на применение РГ, т.к. отключение источника, либо реверс мощности в одном из узлов приводит к потере устойчивости в системе, не говоря о проблемах учета потребления и оплаты электроэнергии.

В результате надо изменять алгоритмы управления распределительных систем, повышать их пропускную способность, изменять системы измерения, управления, защиты и в конечном итоге применять СПТ. В этих условиях резко возрастает необходимость разработки и применения моделей, работающих в реальном масштабе времени и с учетом распределенности и децентрализации

РГ, чему и посвящен материал настоящей статьи.

На рис.1 показана структура биполярной ППТ, имеющей двойное резервирование, т. к. при аварии в одной ветви одного полюса эта ветвь отключается выключателем постоянного тока ВТ в каждом из элементов схемы, другая ветвь форсируется, а остальные узлы СПТ остаются в работе, не меняя исходного режима.

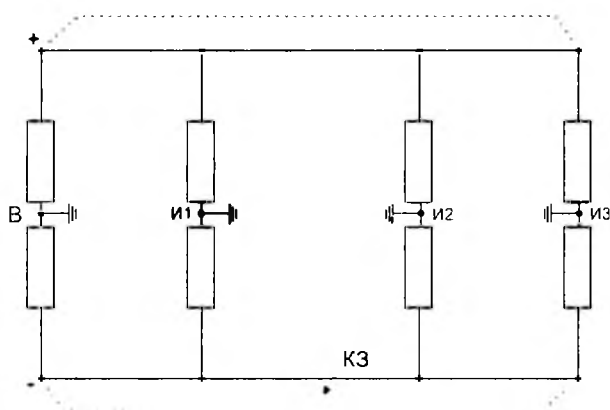


Рис.1. Упрощенная электрическая схема двухполюсной ППТ и ее преобразование в сеть постоянного тока СПТ.

Каждый из элементов рис.1 содержит мультиагентный энергетический комплекс МЭК, показанный на рис.2 и содержащий ВЭУ, ФЭУ, АБ, ТЭ и нагрузки постоянного тока и переменного тока, причем последние присоединены через ПН. Источники переменного тока (ВЭУ, ДЭС и МГТС) также присоединяются через ПН, причем номинальная мощность каждого из узлов МЭК варьируется в диапазоне 0,05-1 МВт [9].

Имея в виду усреднённый коэффициент использования мощности (КИУМ) для ВЭУ, равный 30%, получим усреднённую за год мощность каждого узла на рис. 2 равную 50 кВт. Для ФЭУ можно применить КИУМ 50%, и выдаваемая мощность составит 10 кВт. Более реалистичные оценки обычно делаются с учётом карт ветровых нагрузок и инсоляции для определённых режимов.

В качестве ВЭУ наиболее перспективны установки роторного типа, которые относительно дешевы, бесшумны, модульные, менее заметны и экологичны. Они запускаются при минимальном ветре любого направле-

ния при скорости от 1-3 м/с (лопастные ВЭУ дорогие, шумят и запускаются при скорости от 5 м/с). Указанные ВЭУ апробированы в северных широтах и южных регионах, могут быть модифицированы под условия Арктики.

В качестве ФЭУ наиболее распространены и дешевы установки планарного типа, обладающие низким КПД примерно 10-12%. ФЭУ с использованием гетеропереходов более дорогие, но обладают повышенным КПД до 20-30%. ФЭУ снижают КПД при нагреве и поэтому перспективны и для северных широт, имея в виду, что и там норма солнечной радиации составляет 3,5-4 кВтч/м², что сопоставимо с Якутией и Сочи. В условиях полярной ночи ФЭУ не работают, поэтому они наряду с ВЭУ должны зарядить ТЭ энергией с длительным сроком хранения примерно три месяца.

ВЭУ и ФЭУ выдают электроэнергию стохастически, и поэтому их применение возможно лишь при ее аккумулировании, причем ТЭ выполняет функцию долговременного хранения в течение месяцев за счет использования наряду с баллонной металлгидритную системы накопления водорода, а аккумуляторы в виде гелиевых или кислотных АБ и суперконденсаторов СК обеспечивают кратковременное хранение и используются для покрытия пиков нагрузки.

Ядром автономной системы энергоснабжения является система управления, регулирования, защиты, автоматики, мониторинга (СУ), которая через спутник или телеканал ТК связана с удаленным диспетчерским и сервисным пунктом.

Указанная система энергоснабжения работает следующим образом. При получении команды от диспетчера СУ подключает через соответствующие выключатели накопители электроэнергии ТЭ и АБП, затем подключается один или несколько источников Е1-Е6 для обеспечения заряда накопителей. После достижения на шинах нагрузки напряжения на уровне, близком к номинальному значению, СУ подключает через соответствующий выключатель нагрузку, уставка мощности которой задается диспетчером или автономно на пульте СУ.

Получая данные от метеодатчиков и с учетом поправки на мощность собственных нужд (для управления, защиты, сигнализации, вентиляции, нагрева и др.), СУ корректирует уставку мощности и дополнительно подключает необходимое число источников генерации, обеспечивая номинальный уровень напряжения на шинах нагрузки. При изменении метеоусловий или получении в СУ сигналов аварий уставки мощности источников корректируются. При аварийных ситуациях СУ определяет место повреждения и отключает соответствующий источник или нагрузку [10].

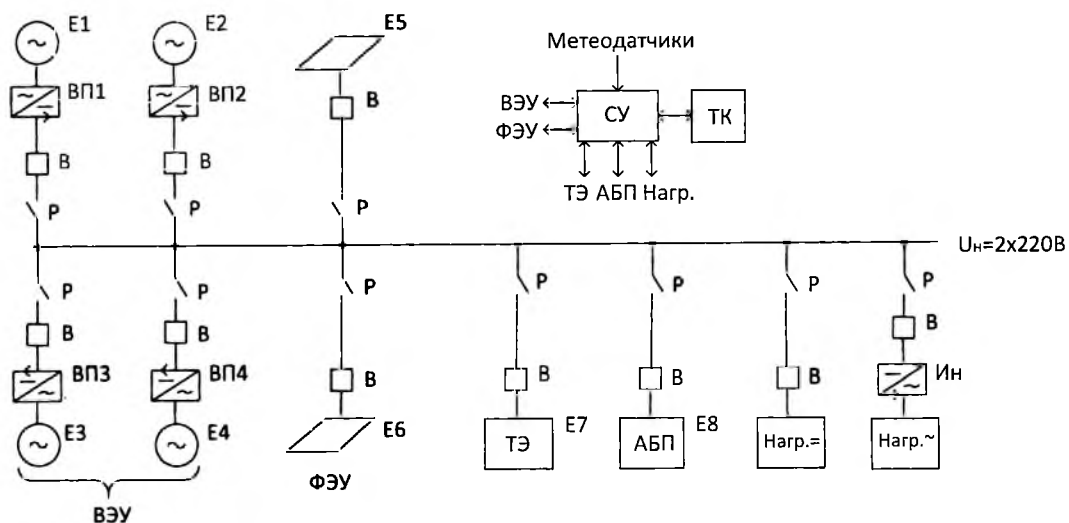


Рис.2. Схема МЭК на постоянном токе.

Выбор источников энергии и типов накопителей электроэнергии.

В качестве базисного источника энергии МЭК принимается синхронный генератор СГ, вращаемый дизелем. Альтернативным ему является асинхронный генератор АГ, входящий в состав ВЭУ или МГЭС. Дополнительным источником могут являться фотоэлектрические панели ФЭ, которые используются либо для покрытия собственных нужд МЭК, либо для зарядки НЭЭ.

В качестве НЭЭ рассматриваются топливные элементы ТЭ, аккумуляторные батареи АБ, суперконденсаторы СК. Выпускаемые промышленностью СГ и/или АГ в зависимости от мощности нагрузки и НЭЭ выбираются от 1 до 6 МВт на напряжение 0,4-6 кВ. Трансформаторное оборудование также выбирается стандартным в виде трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 1 МВА. Специальное оборудование в виде реакторов, фильтров, вентилях и др. элементов преобразо-

вателей разрабатывается по отдельным техническим заданиям. В качестве источников энергии рассматриваются: фотоэлектрические элементы (ФЭ или ФЭУ); топливные элементы (ТЭ), традиционные источники в виде синхронных генераторов (ДЭС, МГЭС) и возобновляемых (ВЭУ), которые присоединяются к шинам МЭК через ПН [11].

Моделирование ФЭ. На рис.3 показана схема замещения ФЭ с регулятором максимальной мощности (MPPT) [10], который соответствует мощности панели ФЭ выходной емкостью $C=4,4$ мФ, фильтрующей индуктивностью $L=1$ мГ, номинальным напряжением на выходе $U=230$ В.

Пример ВАХ панели ФЭ в функции интенсивности солнечного излучения [Вт/м²] приведен на рис.4. Контроль напряжения панели ФЭ U_{pv} осуществляется с помощью чоппера, который извлекает наибольшую мощность ФЭ.

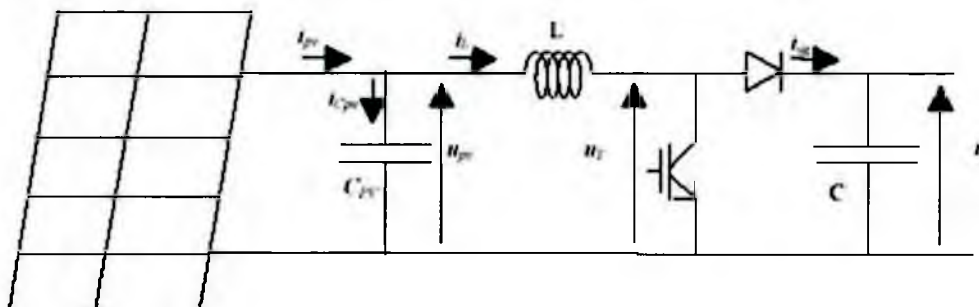


Рис.3. Схема замещения ФЭ с регулятором максимальной мощности.

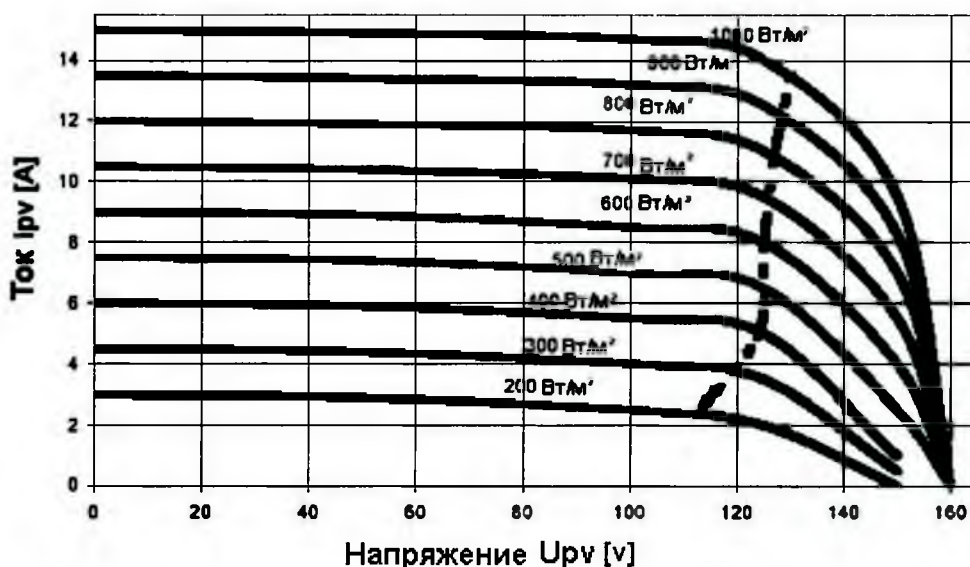


Рис.4. ВАХ панели ФЭ в функции интенсивности солнечного излучения (Вт/м²).

Модель чоппера в соответствии с рис.3 описывается уравнениями:

$$dU_{pv}/dt=(1/C_{pv}) \cdot (i_{pv}-i_L),$$

$$di_L/dt=(1/L) \cdot (U_{pv}-U_T).$$

Вентиль IGBT сравнивает уставку заданного напряжения в диапазоне от 0 до 1 с модулирующей триангуляционной функцией ξ , что показано на рис.5.

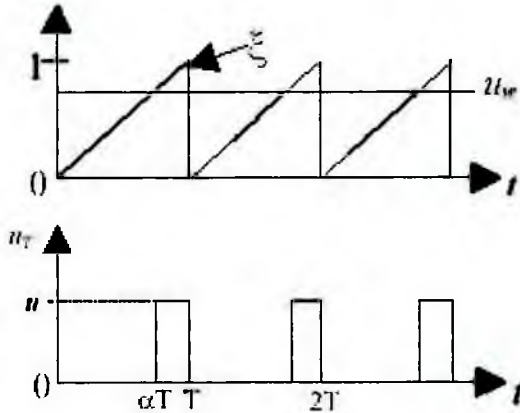


Рис.5. Сравнение уставки заданного напряжения U_w с триангуляционной функцией ξ .

Рабочая компонента напряжения U_T в зависимости от угла α определяется соотношением $U_T=(1-\alpha)U$.

Ток i_{sg} на выходе МРРТ может быть легко рассчитан, если пренебречь потерями в чоппере. В этом случае сохраняется баланс энергий на входе и выходе преобразователя: $i_L \cdot U_T=U \cdot i_{sg}$.

При подстановке двух вышеприведенных формул получим $i_{sg}=i_L \cdot (1-\alpha)$.

На рис.6 показана блок-схема модели ФЭ с МРРТ в виде передаточных функций, где S – оператор Лапласа.

В результате модель ФЭ с МРРТ воспроизводится двумя параметрами: напряжением U_{pv} и током i_{sg} .

Моделирование ТЭ. В настоящее время наиболее перспективным НЭЭ является основанный на применении ТЭ. Существует целый ряд разновидностей ТЭ, в основу классификации которых положен тип электролита (жидкий, газообразный, твердый) с характеристиками, приведенными в табл.1 [12].

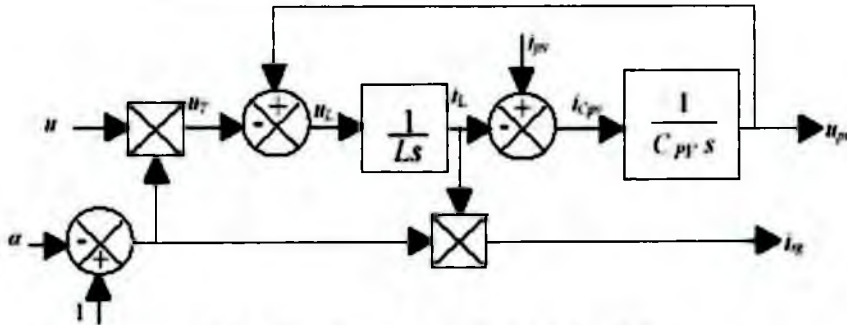


Рис.6. Блок-схема модели ФЭ с МРРТ.

Таблица 1

Характеристики ТЭ

Тип ТЭ (электролит)	Рабочая температура, °С	Мощность на выходе, кВт	КПД, %	Особенности	Область применения
Алкалин (АFC)	90-100	10-100	60-70 электр.		Военная, космос
Полимерная или протообменная мембрана (PEM)	50-100	<250	50-60 электр.	Быстрый старт	Портативные устройства, транспорт, распред. генерация
Фосфорная кислота (PAFC)	150-200	50-1000 (250-модуль)	80-85 комбин. 36-42 электр.	Пластины больш. размера, чистый водород	Распред. генерация
Литой углерод (MCFC)	600-700	<1000 (250-модуль)	85 комбинир. 60 электр.	Гибкость, разные катализ.	Электроэнергетика, большая распред. генерация
Твердые окислы (SOFC)	650-1000	5-3000	85 комбинир. 60 электр.	Гибкость, разные катализ., низкая коррозия	Вспомогательное питание, электроэнергетика, большая распред генерация

Вид электролита определяет тип химической реакции, рабочую температуру, мощность и КПД ТЭ. Наиболее распространенным ТЭ является РЕМ на основе протообменной мембраны толщиной примерно 0,2 мм, которая заключена между двумя электродами (анодом и катодом), с которых снимаются соответственно электроны и ионы, поступающие во внешнюю цепь (в нагрузку).

По закону Фарадея электрохимический потенциал Н – 1,48 В. В ТЭ происходит синтез Н и О при температуре 25 °С, которые превращаются в воду Н₂О, создавая потенциал U=1,23 В. Разница потенциалов между электродами РЕМ – 0,95-1В (из-за потерь на поляризацию). Конструктивное напряжение на ТЭ составляет 0,75 В (в пределах 0,6-0,8В). Таким образом, средняя эффективность (КПД) ТЭ – 0,75В/1,48В=50%. Вольт-амперная характеристика ВАХ ТЭ на основе РЕМ приведена на рис.7, из которой видно, что напряжение хх. равно U_{хх}=1,16В при температуре 80 °С и давление 1 атм. Рабочее напряжение составляет U_{раб}=0,7 В (при электрическом КПД 60%). Рабочее напряжение при комбинированном использовании ТЭ составляет U_{раб}=0,9В (КПД 77%), причем КПД по теплу примерно 23%.

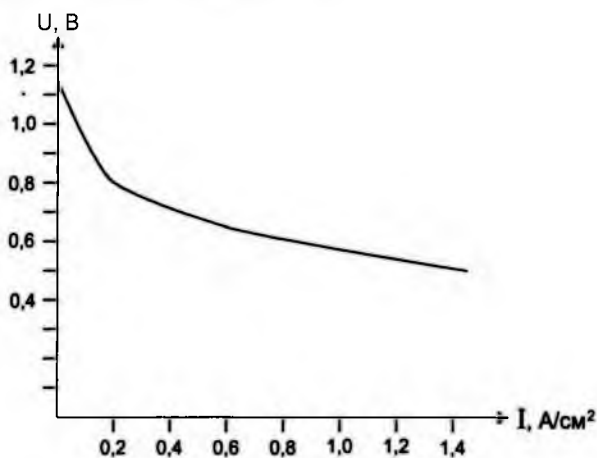


Рис.7. ВАХ ТЭ.

В виде примера характеристика ТЭ с площадью пластин S=100 см², давлении P=1 атм, температуре 80 °С составляет U_{хх}=1,16В.

Из ВАХ рис.7 при номинальном напряжении U_н=0,7В полный ток ТЭ составляет 0,6·100=60 А. По выделению тепла P_{тепл}=(1,16-0,7) В·60 А=0,46 В·60 кул/с·60 с/мин =1650 Дж/мин. Таким образом ТЭ вырабатывает 1,7 кДж/мин тепла и 2,5 кДж/мин электричества.

На сегодня известен НЭЭ на ТЭ мощностью 250 кВт, выдающий энергию в течение 8 часов, причем указанный ТЭ использует два бака с жидким электролитом емкостью 140 т. Площадь НЭЭ составляет 200 м², рабочая температура 5-40 °С, быстроедействие менее 5 мс. НЭЭ используется для стабилизации напряжения в энергосистеме 25 кВ при напряжении на выходе ТЭ – 480 В, длительности провала напряжения – 30 минут.

Моделирование АБ.

Основными параметрами режима АБ являются напряжение на зажимах U_в и ток i_в. Для рассмотрения свойств АБ рассматривается схема замещения рис.8.

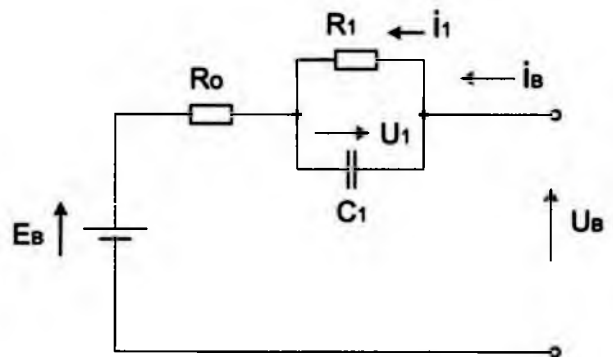


Рис.8. Схема замещения АБ.

Уравнения, которые описывают работу АБ в соответствии с рис.8, имеют вид U_в=E_в+U₁+R₀i_в;

$$U_1 = U_1(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^t [i_b(t) - i_1(t)] dt ;$$

$$i_1 = U_1/R_1,$$

где E_в – эдс АБ, U₁ – напряжение на конденсаторе C₁, R₀ – внутреннее сопротивление АБ, R₁ – сопротивление в цепи R₁, C₁, i₁ – ток в сопротивлении R₁, U₁(0) – начальное напряжение на C₁.

Значение эдс E_b для одного элемента АБ равно
 $E_b = 1,96 + 0,193W + 6,7(W - 0,55)^7$ В,
 где W – относительный уровень заряда, причем $W = W_b / C_{10}$ (W_b – уровень заряда, А·г, C_{10} – энергоемкость элемента АБ при 10 час разряда).

АБ не может разряжаться до нуля. Значение W может быть снижено до уровня $W_{min} = 0,35 - 0,4$, а рабочий диапазон находится в пределах 1-0,35. С учетом этого значение W , необходимое для расчета E_b определяется интегралом

$$W = W_0 + \frac{0,65}{C_{10}} \int_0^t i_b(t) dt.$$

Реальная энергоемкость АБ $C(i_b)$ падает при увеличении тока разряда и определяется формулой

$$C(i_b) = C_{10} \cdot F(i_b^*),$$

где $F(i_b^*)$ – функция, которая строится по разрядным характеристикам АБ, $i_b^* = i_b / I_{10}$ – относительный ток АБ (I_{10} – ток 10-ти часового разряда). Поделив последнее значение на $F(i_b^*)$, получим

$$W_* = W_0 + \frac{1}{C_{10}} \int_0^t \frac{i_b}{F(i_b^*)} dt.$$

Указанная величина W_* , называемая приведенным зарядом, удобна для расчетов АБ, поскольку не зависит от вида графика разряда $i_b(t)$, и при разряде изменяется от 1 до 0, позволяя оценить остаточную энергию АБ.

Таблица 2

Характеристики источников тока

Источники тока (ИТ)	Энергетическая мощность, Вт.ч/кг	Срок службы (число циклов заряд-разряд)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30	300
Никель-кадмиевые	40-60	1500
Никель-металлгидридные	75	500
Ионно-литиевые	100	500
Полимерно-литиевые	175	150

Сопротивления R_0, R_1 , входящие в исходные уравнения, являются сложными функциями заряда и режима АБ. Выполненные ранее исследования на коротком интервале времени разряда единицы-десятки сек позволяют существенно упростить схему рис.8. учитывая в ней лишь внутреннее сопротивление R_0 , которое принимается на уровне 0,3 мОм для одной секции АБ (кислотного типа), а изменение емкости АБ в процессе разряда учитывается изменением значения E_b .

Сравнительные характеристики источников тока ИТ в виде АБ приведены в табл.2.

Моделирование СК.

Суперконденсаторы (СК) или ионисторы накапливают энергию в двойном электрическом слое на поверхности высокопористой структуры. Приборы СК имеют емкости от 10 до 12000 Ф рабочим напряжением 1-15 В. Удельная энергия приборов 10 кДж/литр, удельная мощность – 3 кВА/л. Эквивалентная схема СК представлена на рис.9.

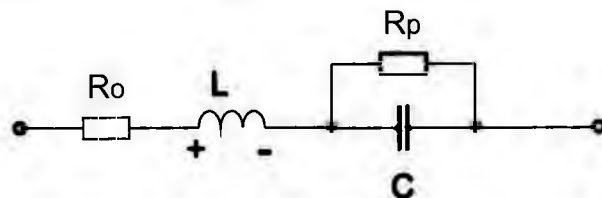


Рис.9. Эквивалентная схема СК.

C – емкость СК, R_s – последовательное сопротивление (ESR), R_p – параллельное сопротивление утечки, L – индуктивность (определяется конструкцией СК).

Индуктивность L надо учитывать на ВЧ или работе в импульсных режимах. Сопротивление R_p намного больше R_s , так что R_p можно не учитывать для режимов больших мощностей.

По типу электролита СК подразделяются на: жидкостные; твердотельные; полимерные (наиболее распространенные); на основе биологических объектов. Запасаемая энергия и мощность СК определяются соответственно формулами: $E = CU^2/2$, $W = U^2/4R$,

где C - емкость СК, U - напряжение на электродах СК, R - эффективное последовательное сопротивление.

Типичные характеристики СК (например, для модельного ряда GSI компании CAP-XX) имеют значения: максимальное и номинальное напряжения - 2,5 и 2,3В; максимальный импульсный ток - 30 А; рабочие температуры - (-30 °С)÷(+75 °С); диапазон емкостей 0,47÷48 Ф; диапазон емкостей ±20% (при 20 °С); размеры корпусов, мм (диаметр, высота) 6,3/11-18/40; ESR при 1 кГц, 20 °С - 0,1÷7,0 Ом.

СК MC 2600 компании Maxwell Technologies (емкость 2600 Ф, рабочее напряжение 2,7 В) имеют размеры 138x57,7 мм и массу 470 г. Батарея СК из 6 ячеек MC2600 имеет массу 5 кг и размеры 420x160x70 мм.

Стоимость MC 2600 составляет 27 долл при объеме продаж 1 млн. шт. Стоимость 1 Ф равна 1 центу (планируется за 5 лет снизить стоимость в 2 раза). СК в отличие от ИТ (табл.2) имеют удельную мощность, которая может на 4 порядка превышать значения АБ в виде свинцово-кислотных аккумуляторов.

Сравнение удельных показателей различных накопителей НЭЭ приведено на рис.10, где по оси ординат отложены удельная мощность [Вт/кг], а по оси абсцисс - удельная энергия [Вт·ч/кг], причем СК - суперконденсаторы, С - электролитические конденсаторы, АБ - аккумуляторы, ТЭ - топливные элементы, (СПИНЭ-сверхпроводящий индуктивный накопитель, КНЭ-кинетический накопитель электроэнергии) [13,14].

Из анализа графика рис.10 следует, что СК имеют наибольшую удельную мощность и выполняют цикл заряд-разряд за 5-60 с, АБ - за время единицы-десятки минут, ТЭ - за время единицы-десятки часов.

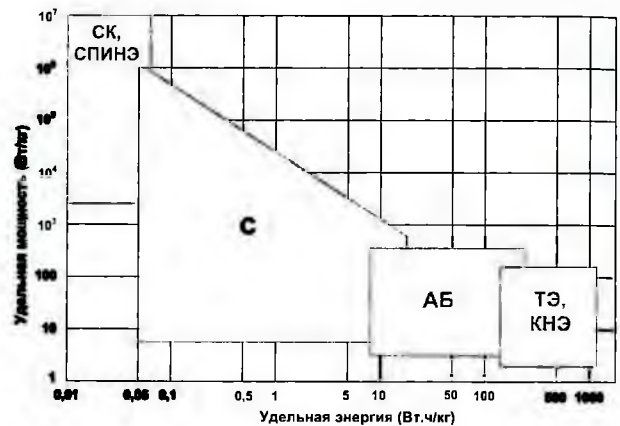


Рис.10. Удельные показатели различных накопителей (НЭЭ).

Моделирование традиционных источников (ДЭС, МГТЭС) и нагрузок с учетом ПН. Моделирование традиционных источников и нагрузок на рис.2 может быть осуществлено с использованием внешних характеристик статических преобразователей напряжения ПН, что вполне допустимо для установившихся режимов работы с учетом влияния регуляторов тока и напряжения [10]. На рис.11 приведена ВАХ традиционных источников, которая соответствует верхней ломаной линии выпрямителя с минимальным углом управления, а ВАХ нагрузок соответствует нижней ломаной линии инвертора. Вертикальный наклон характеристики выпрямителя проявляется под действием регулятора тока блока источник-преобразователь РТБ. ВАХ нагрузки определяется регулятором угла отключения инвертора РУО с вертикальным участком под действием регулятора минимального тока РМТ с последующим переходом на минимальную характеристику углов инвертора. Пересечение характеристик определяет рабочую точку Р для МЭК. Уставки регуляторов выпрямителя и инвертора различаются на 10% для обеспечения устойчивой работы системы. Выбор алгоритмов управления МЭК осуществляется с помощью системы управления СУ, показанной на рис.2, воздей-

ствующей на ВТ с целью обеспечения повышенной степени надежности энергоснабжения и моделируемой с помощью [15].

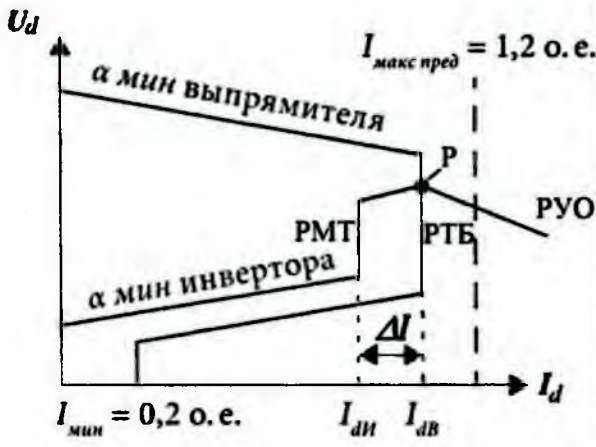


Рис.11. ВАХ традиционных источников и нагрузок с учетом ПН.

Выводы.

1. Отмечены недостатки ЭЭС сравнительно с СПТ в части устойчивости, управляемости, надежности и резервирования. Выявлена необходимость перехода от цифровизации в виде АСУ ТП к умным сетям, а в последующем к мультиагентным сетям постоянного тока МСПТ с повышенной степенью резервируемости.

2. Рассмотрено применение распределенной генерации в составе традиционных источников и ВИЭ, а также накопителей и статических преобразователей в МСПТ.

3. Приведены характеристики вышеуказанных элементов для моделирования режимов МСПТ с целью выбора структуры и алгоритмов управления, обеспечивающих повышенную степень надежности и неустойчивости энергоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ивакин В.И., Сысоева Н.Г., Худяков В.В. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы. - М.: Энергоатомиздат, 1993. 336 с.

2. Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н. Новые подходы к созданию энергоинформационных распределительных систем // Электротехника. 2014. №2. С.39-43.

3. Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н. Реализация облачной информационной технологии для контроля, мониторинга и управления распределительными энергосистемами // Электротехника. 2013. №12. С.52-57.

4. Гетманова Н.Ю., Местергази В.А., Шульга Р.Н. Облик цифровой системы управления, регулирования и защиты перспективной вставки постоянного тока // Доклад на научно-практической конференции «Опыт и перспективы применения СПП и ППТ», 08.12.2016.

5. «Сеть 2030». Национальный взгляд (видение) на второе столетие электроэнергетики. - Вашингтон, 2-3 апреля 2003. 31 с.

6. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭЭС с накоплением электроэнергии // Новое в Российской электроэнергетике. 2015. №12. С.22.

7. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю. Анализ средств управления режимами работы кабельных и воздушных линий переменного тока // Новое в Российской электроэнергетике. 2017. №5.

8. Каменев А.С., Королев С.Ю., Сокотущенко В.Н. Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных систем. - М.: ИЦ Энергия, 2012. 124 с.

9. Шульга Р.Н. Автономное энергоснабжение с использованием разнородной генерации // Электро. 2015. №3. С.12-18.

10. Суд В.К. HVDC and FACTS Controllers, Применение статических преобразователей в энергетических системах / Пер. с англ. - НП НИИА, 2009. 344 с.

11. Лисицын Л.Г., Местергази В.А., Шульга Р.Н. Комплексное решение проблем автоматизации перспективных вставок постоянного тока // Электро. 2017. №4.

12. Шульга Р.Н. Характеристики накопителей и статических преобразователей // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. №1(99). С.68-76.

13. Путилов В.Я., Шульга Р.Н., Некоторые технические и экологические аспекты применения накопителей электроэнергии в энергетике // Электро. 2016. №1. С.6-12.

14. Шульга Р.Н. и др. Облик накопителя электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности // Электро. 2017. №6.

15. ATP Rule Book, 2002.

THE DISTRIBUTED GENERATION WITH USE OF RES AS A PART OF THE MULTIAGENCY DC SYSTEMS

R.N. ShUL'GA, Ph.D. (Tech.)

Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Electrotechnical Institute named after V. I. Lenin" (FGUP VEI), 12, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

Abstract. Disadvantages of electrical power systems compared with DC power systems regarding stability, controllability, reliability and reservation are noted. Need of transition from digitalization in the form of industrial control system to clever networks, and in the subsequent to multiagency networks of a direct current with the raised reserve, degree is revealed. Application of the distributed generation as a part of traditional sources and RES, and also stores and static converters is considered. Characteristics of the above-stated elements for modeling of the modes for the purpose of the choice of structure and control algorithms providing the raised degree of reliability of power supply are provided.

Key words: electrical power network, multiagency DC network, the distributed generation, RES, reserve.

REFERENCES.

1. Ivakin V.I., Sysoeva N.G., Khudyakov V.V. Elektroperedachi i vstavki postoyannogo toka i staticheskie tiristornye kompensatory. – Moscow, Energoatomizdat, 1993, 336 p.
2. Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N. Novye podkhody k sozdaniyu energoinformatsionnykh raspredelitel'nykh sistem // Elektrotehnika, 2014, No.2, P.39-43.
3. Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N. Realizatsiya oblachnoi informatsionnoi tekhnologii dlya kontrolya, monitoringa i upravleniya raspredelitel'nymi energosistemami // Elektrotehnika, 2013, No.12, P.52-57.
4. Getmanova N.Yu., Mestergazi V.A., Shul'ga R.N. Oblik tsifrovoi sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity perspektivnoi vstavki postoyannogo toka // Doklad na nauchno-prakticheskoi konferentsii «Opyt i perspektivy primeneniya SPP i PPT», 08.12.2016.
5. «Set' 2030». Natsional'nyi vzglyad (videnie) na vtoroe stoletie elektroenergetiki. - Vashington, 2-3 aprelya 2003. 31 p.
6. Shul'ga R.N., Druzhinin M.Yu. K voprosu o vozmozhnosti sozdaniya gibridnoi energoraspredelitel'noi seti GERS s nakopleniem elektroenergii // Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike, 2015, No.12, P.22.
7. Shul'ga R.N., Druzhinin M.Yu. Analiz sredstv upravleniya rezhimami raboty kabel'nykh i vozdushnykh liniy peremennogo toka // Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike, 2017, No.5.
8. Kamenev A.S., Korolev S.Yu., Sokotushchenko V.N. Neiromodelirovanie kak instrument intellektualizatsii energoinformatsionnykh sistem. – Moscow, ITs Energiya, 2012, 124 p.
9. Shul'ga R.N. Avtonomnoe energosnabzhenie s ispol'zovaniem raznorodnoi generatsii // Elektro, 2015, No.3, P.12-18.
10. Sud V.K. HVDC and FACTS Controllers, Primenenie staticheskikh preobrazovatelei v energeticheskikh sistemakh / Per. s angl. - NP NIIA, 2009, 344 p.
11. Lisitsyn L.G., Mestergazi V.A., Shul'ga R.N. Kompleksnoe reshenie problem avtomatizatsii perspektivnykh vstavok postoyannogo toka // Elektro, 2017, No.4.
12. Shul'ga R.N. Kharakteristiki nakopitelei i staticheskikh preobrazovatelei // Energoberezhenie i vodopodgotovka, 2016, No.1(99), P.68-76.
13. Putilov V.Ya., Shul'ga R.N., Nekotorye tekhnicheskie i ekologicheskie aspekty primeneniya nakopitelei elektroenergii v energetike // Elektro, 2016, No.1, P.6-12.
14. Shul'ga R.N. and others. Oblik nakopiteleya elektroenergii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov megavattного класса moshchnosti // Elektro, 2017, No.6.
15. ATP Rule Book, 2002.