ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДУЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ЭНЕРГОБЛОКОВ

АВТОРЫ:

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,
ВЭИ-ФИЛИАЛ ФГУП
«РФЯЦ ВНИИТФ»

А.Ю. ПЕТРОВ,
К.Т.Н.,
ВЭИ-ФИЛИАЛ ФГУП
«РФЯЦ ВНИИТФ»

А.Ю. ХРЕННИКОВ,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Современные инновационные системы автономного энергоснабжения должны гарантировать надежность функционирования, иметь высокое быстродействие (от 20 мс и вплоть до 5 мс), осуществлять непрерывный контроль целого ряда функциональных параметров системы (уровень зарядки аккумуляторов, их состояние, количество топлива в генераторе, уровень и давление масла в нем и т.д.).

Ключевые слова: энергетическая платформа; цифровая модульная подстанция; переменный ток; постоянный ток.

Внешний вид контейнера СТК 35 кВ с использованием КРУ и устройств FACTS на основе тиристоров и приборов IGBT

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетика России и мира, хотя и является наиболее консервативной и одной из старейших отраслей промышленности, переживает существенные изменения, связанные с использованием не только новых технологий, но и идеологий построения и развития, объединяя традиционную (ТЭС, ГТЭС, ГПЭС) и нетрадиционную энергетику (ВИЭ, АЭС, АСММ и др.) в составе централизованных и локальных энергосетей [1, 2], переходя от автоматизации в виде АСУТП к цифровизации, а затем к нейронным сетям [3], от стационарных к модульным (контейнерным) подстанциям в виде цифровых подстанций и электростанций [4]. Если нетрадиционная энергетика, несмотря на определенные ограничения по надежности, стоимости, землеотводу, позволяет отчасти ограничить риск потепления на планете, то цифровизация должна облегчить трудозатраты, заменить человека на рабочем месте искусственным интеллектом, повысить надежность, ликвидировав ошибки персонала, недопустимые особенно в энергетике и на других ответственных производствах. Модульность любых объектов, причем и конструктивная, и технологическая, и функциональная, становится приоритетной в части не только снижения затрат, но и создания унифицированных блоков энергосистемы, которые могут придать ей новые качества. Например, прогресс силовой электроники в конце XX в. привел к созданию FACTS — гибких электропередач переменного тока, которые, пусть и немного, но повысили управляемость и устойчивость электросетей [4]. Функциональные модули в виде накопителей электроэнергии (НЭЭ) являются основой применения ВИЭ наряду с традиционными базисными источниками электроэнергии. Конструктивная модульность блоков позволяет существенно удешевить и ускорить строительство и ввод в эксплуатацию энергоблоков (до 20 %) [5], а также унифицировать конструктивно-технические решения на этапах разработки, проектирования и эксплуатации с использованием цифровых двойников любого изделия и комплекса. Например, применение функциональных модулей дает возможность унифицировать и стандартизировать любую разработку путем формирования цифровых двойников, что хорошо согласуется с созданием боевых наземных, воздушных, надводных и других платформ с разного рода функциональными модулями.

Энергетической платформой для автономной и распределенной энергетики является система автономного энергоснабжения (САЭ), а функциональными

СТРУКТУРА САЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ, ЦМП АС И ЦМП DC

Обозначения: АС — переменный ток; ДГУ — дизель-генераторное устройство; ГТУ — газотурбинное устройство; ГПУ — газопоршневое устройство; АСММ — атомная станция малой мощности; DC — постоянный ток; ТР — трансформатор; КРУ — комплектное распределительное устройство; ЦДТН — цифровой датчик тока и напряжения; РЗА — релейная защита и автоматика; СТК — статический тиристорный компенсатор; ВЭУ — ветровая электроустановка; ФЭУ — фотоэлектрическая установка; В, И — выпрямитель, инвертор; НЭЭ — накопители электроэнергии; С, СК — конденсатор, суперконденсатор; АБ — аккумуляторная батарея; ЛИА — литий-ионный аккумулятор; ТЭ — топливный элемент; САУК — система автоматического управления комплекса; ЛО, КО — лазерное и кинетическое оружие.

Рис. 1

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ЦМП АС И ЦМП DC

ПРЕИМУЩЕСТВА ЦМП АС:

1. Освоено технологически
2. Дешевле на 20-30%, чем DC
3. Укомплектованы АС выключателями

ПРЕИМУЩЕСТВА ЦМП DC:

1. Полная управляемость, устойчивость
2. Пониженные потери
3. Повышенная живучесть, помехоустойчивость, мобильность
4. Есть накопители, достаточное резервирование полюсов
5. Повышенный ресурс источников
6. Пониженный расход топлива
7. Не нужны DC выключатели
8. Хорошо стыкуется с ВИЭ и НЭЭ
9. Хорошо стыкуется с ЛО и КО

НЕДОСТАТКИ ЦМП АС:

1. Морально устарела схемотехника
2. Повышенные потери
3. Недостаточная управляемость устойчивость
4. Недостаточная живучесть, помехоустойчивость, мобильность
5. Нет накопителей, недостаточное резервирование фаз
6. Пониженный ресурс источников
7. Повышенный расход топлива
8. Плохо стыкуется с ВИЭ и НЭЭ
9. Не стыкуется с ЛО и КО

НЕДОСТАТКИ ЦМП DC:

1. Недостаточно освоено технологически
2. Недостаточная база IGBT приборов, DC выключателей, DC кабелей
3. Дороже, чем АС оборудование, на 20-30%

Обозначения: см. рис. 1.

Рис. 2

модулями — источники генерации (энергоблоки) и подстанции либо их разновидности в виде отдельных устройств контейнерного (заводского) исполнения, которые предполагают любую степень базирования и связь между собой силовыми воздушными (ВЛ), кабельными (КЛ) линиями, а также сигнальными и/или оптоволоконными линиями для управления, защиты, автоматики, мониторинга и др.

Цель настоящей статьи состоит в формировании облика САЭ в составе цифровых модульных подстанций переменного (ЦМП АС) и постоянного (ЦМП DC) тока, а также энергоблоков с традиционными и возобновляемыми источниками. Структура САЭ и виды оборудования приведены на рис. 1 и касаются в основном мощностей до 10–100 МВт напряжением до 10–100 кВ, т.е. малой и распределенной энергетики. Если традиционные и возобновляемые источники достаточно подробно описаны в литературе, то ЦМП АС и особенно ЦМП DC недостаточно освещены.

Преимущества и недостатки ЦМП АС и ЦМП DC приведены на рис. 2. Они широко освещены в литературе [см., напр., 6] и отражают мировую тенденцию возврата к построению сетей постоянного тока (см. материалы последних сессий CIGRE, статью В.М. Перминова, М.Г. Тягунова [1] и доклад Н.Д. Рогалёва, В.В. Молодюка [2]).

Цели настоящей статьи показаны на рис. 3, причем первый пункт касается наработок ВЭИ в части САЭ, второй пункт — реализации типичного одного присоединения комплектного распределительного устройства (КРУ) к шине процесса по IEC 61850, связанного с измерением, управлением и передачей сигналов на шину станции, последующие пункты отражают реализацию наработок ВЭИ и других организаций относительно ЦМП DC контейнерного исполнения, включая преобразователи тока, напряжения, частоты, НЭЭ

ЗАДАЧИ В ЧАСТИ РАЗРАБОТКИ САЭ (1), ЦМП АС (2), ЦМП DC (3), НЭЭ С ЛИА (4), НЭЭ С ТЭ (5)

1. Разработка САЭ и ЦМП АС и DC контейнерного исполнения на мощности до 10-100 МВт, напряжение до 10-110 кВ
2. Разработка ЦМП АС на базе IEC 61850 с ЦДТН, микропроцессорной РЗА и системой управления (САУ), двумя шинами: процесса и станции
3. Разработка ЦМП DC на базе IEC 61850 с микропроцессорной СУРЗА
4. Разработка и применение НЭЭ 1 МВт 3М Вт·ч на ЛИА контейнерного исполнения
5. Разработка и применение водородного НЭЭ с ТЭ 50 кВт контейнерного исполнения

Обозначения: см. рис. 1.

Рис. 3

водородного и электрохимического типа. Из-за ограниченного объема статьи наработки по выключателям постоянного тока, системам управления и другим элементам САЭ не представлены.

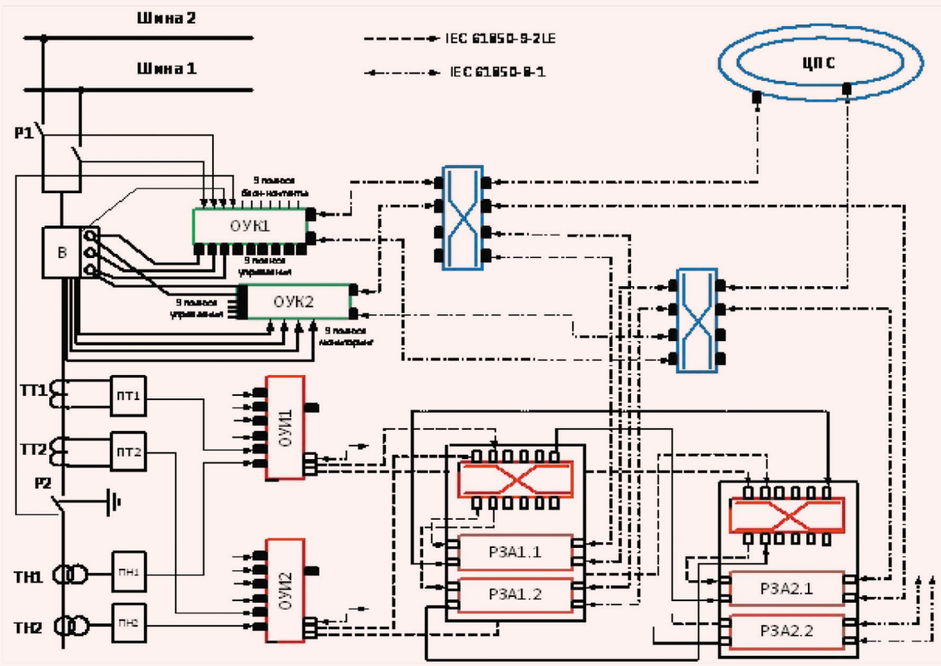
ЦИФРОВЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (ЦМП АС)

ЦМП АС базируются на внедренной в практику ОАО «Россети» концепции «Цифровая подстанция» [7], учитывающей стандарты IEC 61850, smart-технологии, ГОСТы, РД, СТО, приказы и руководящие документы РАО «ЕЭС России» и АО «ФСК ЕЭС». За прошедшее десятилетие указанная концепция внедрена на многих подстанциях и станциях в РФ и за рубежом, претерпела ряд трансформаций [8, 9] и продолжает изменяться в части резервирования, применения устройств FACTS, НЭЭ, интеллектуальных устройств LED и др. Наиболее перспективным направлением цифровизации представляется замена устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на компьютерное программное обеспечение (ПО), например, разрабатываемое в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, однако требования надежности, безопасности, резервирования пока ограничивают реализацию подобного подхода.

На рис. 4 приведена архитектура шин по протоколу IEC 61850 для одного присоединения с применением традиционных датчиков тока и напряжения электромагнитного типа [8], использующих преобразователи тока и напряжения (соответственно ПТ, ПН), объединяющие устройства измерения и команд (соответственно ОУИ и ОУК) для управления работой выключателя (В).

Структурная схема и фотография разработанных и изготовленных в ВЭИ цифровых датчиков тока и напряжения (ЦДТН) на классы напряжения 35–110 кВ приведены на рис. 5 [10]. ЦДТН состоит из трех модулей: измерительного модуля (ИМ) на высоком потенциале, опорного изолятора со встроенным датчиком напряжения

АРХИТЕКТУРА ШИН ПО ПРОТОКОЛУ IEC 61850 ДЛЯ ОДНОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ



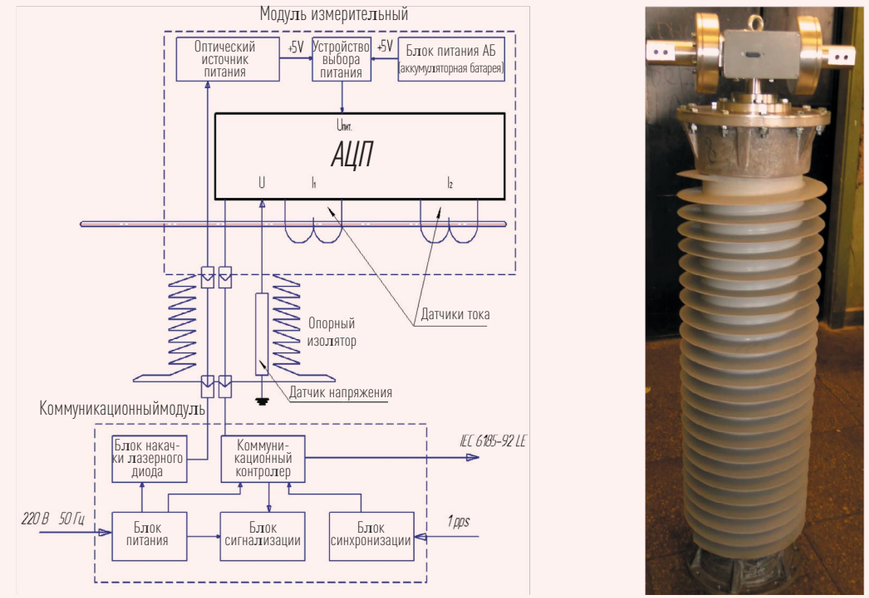
Обозначения: В — выключатель; ЦПС — цифровая подстанция; Р1 — разъединители; Р2 — заземлитель; ТТ1, ТТ2 — трансформаторы тока; ТН1, ТН2 — трансформаторы напряжения; ПТ1, ПТ2 — преобразователи тока; ПН1, ПН2 — преобразователи напряжения; ОУИ1, ОУИ2 — объединяющие устройства измерения; ОУК1, ОУК2 — объединяющие устройства команд; РЗА1.1, РЗА1.2 — терминалы шкафа 1 РЗА; РЗА2.1, РЗА2.2 — терминалы шкафа 2 РЗА.

Рис. 4

(ДН) и коммуникационного устройства (КМ) на потенциале земли. ИМ содержит оптический источник питания (фотодиод), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и блок питания (аккумулятор). Датчиками тока являются катушки Роговского (для цепей измерения и релейной защиты), а датчиком напряжения — RC-делитель напряжения, сигналы которых поступают на входы АЦП. ИМ и КМ связаны оптическим каналом, по которому на ИМ передаются питание АЦП (мощность до 2 Вт) и сигналы управления, а от ИМ на КМ — измеренные значения тока и напряжения. Последние по протоколу IEC 61850–9-2 LE передаются на шину процесса ЦПС (см. рис. 4). КМ содержит лазерный источник питания, коммуникационный контроллер, блок синхронизации и блок питания и является объединяющим устройством для трех фаз одного присоединения.

Основным устройством первичного оборудования ЦМП АС являются КРУ напряжением 10–35 кВ. На рис. 6 показано модульное КРУ 10 кВ типа Premset [11] с использованием твердой экранированной изоляции токопроводов и комплектующих элементов. Главный элемент КРУ — коммутационный аппарат, обычно в виде вакуумного выключателя с пружинным приводом, совмещенного с разъединителем и заземлителем. Датчики тока и напряжения преимущественно электромагнитного или электронного типа присоединяются через адаптеры к коммутационному аппарату. В верхней части КРУ устанавливается

ЦДТН: А) СТРУКТУРНАЯ СХЕМА; Б) ФОТОГРАФИЯ [10]



а) б)

Рис. 5

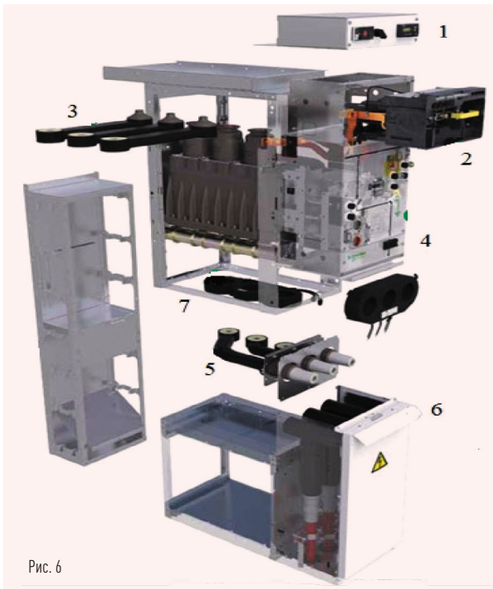
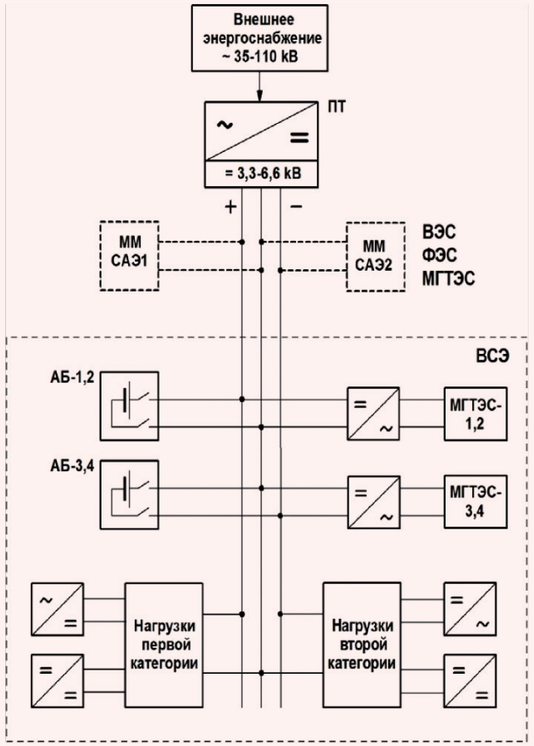


Рис. 6

МОДУЛЬНОЕ КРУ 10–35 КВ С ТВЕРДОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ [11]

1 — отсек низкого напряжения;
2 — блок испытания кабелей;
3 — верхнее присоединение;
4 — коммутационный аппарат;
5 — нижнее присоединение;
6 — нижний отсек;
7 — измерительные датчики тока и напряжения

СТРУКТУРА МОДУЛЬНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ САЭ



Обозначения: ММ — мобильный модуль; ВЭС — ветровая электростанция; ФЭС — фотоэлектрическая станция; МГТЭС — микрогазотурбинная электростанция; АБ — аккумуляторная батарея; ВСЭ — внутренняя система электроснабжения; ПТ — управляемый выпрямитель постоянного тока.

Рис. 7

микропроцессорный терминал управления и защиты, а также блоки мониторинга и испытания кабелей. Модульные КРУ выпускаются всеми известными фирмами и широко применяются для контейнерной установки благодаря компактности, удобству обслуживания, безопасности и ремонтопригодности. Наиболее важными проблемами обеспечения надежности работы таких КРУ являются контроль комбинированной изоляции кабелей, токопроводов и элементов, особенно в КРУ 35 кВ [12, 13].

На фото (см. стр. 18) в виде примера показан внешний вид контейнера СТК 35 кВ с использованием вышеописанных КРУ, а также устройств FACTS на основе тиристоров и приборов IGBT [14]. Указанные устройства позволяют устранить недостатки в части компенсации реактивной мощности, стабилизации и симметрирования напряжения, повышения пропускной способности, устойчивости и управляемости, особенно присущих локальным сетям при наличии ВИЭ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИВУЧЕСТИ, МОБИЛЬНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ САЭ

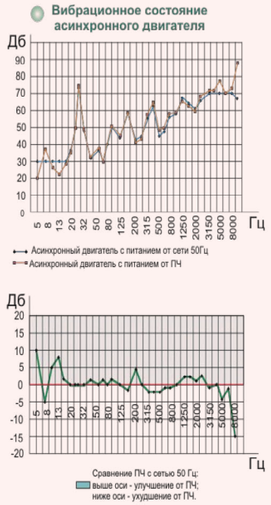
Живучесть:
- Разнесение ММ САЭ от ВСЭ на большое удаление (1–10 км) и отключение внешнего энергоснабжения при его отказе
- При коротком замыкании одного полюса его отключение и форсировка по току другого полюса
- При электромагнитном импульсе, ядерном взрыве и др. перевод ВСЭ на внутреннее питание и отключение внешнего энергоснабжения
- Мониторинг состояния разнесенных объектов по ВОЛС

Помехоустойчивость:
- Кабели подземные (подводные) экранированные и заземленные
- Отключение любого источника в одном из полюсов или целого полюса, компенсируется форсировкой по току другого полюса

Мобильность:
- Все элементы — контейнеры на колесах или на плотах
- Разнесение наземных (надводных), подземных (подводных) объектов
- Связь по ВОЛС (вмонтирована в силовой кабель) дублируется другими радиоканалами
- Кабели стыкуются герметичными разъемами

Рис. 8

ОБРАЗЦЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА И ЧАСТОТЫ (ПЧ) РАЗНОЙ МОЩНОСТИ, А ТАКЖЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ПЧ 212 КВТ



ПЧ 212 кВт **ПЧ 5 МВт**

Рис. 9

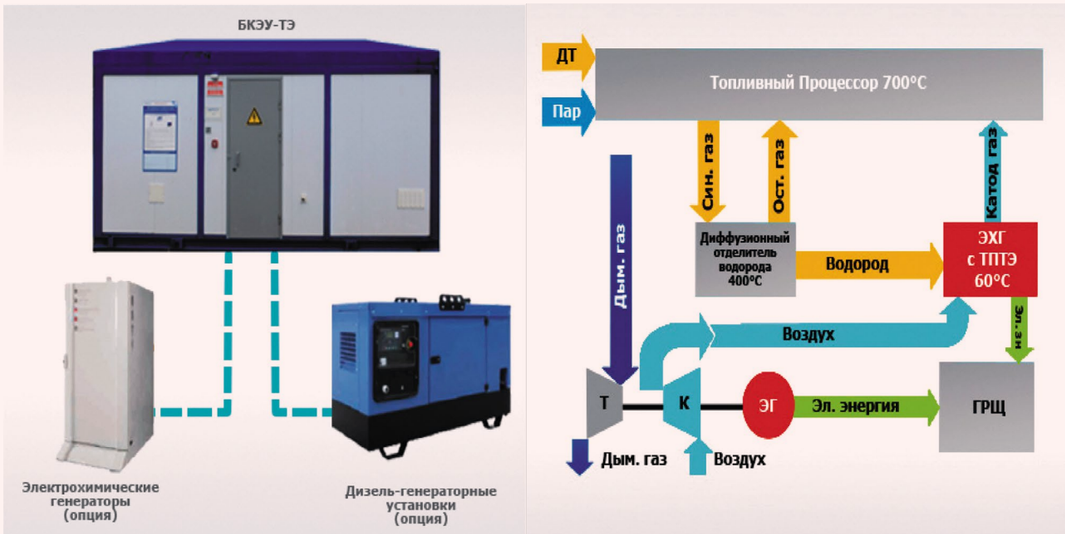
Контейнерное исполнение показано на примере СТК 35 кВ [14].

ЦИФРОВЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (ЦМП DC)

ЦМП DC по принципу действия являются дискретными и цифровыми с использованием микропроцессорных систем управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА). Если раньше на их основе строились передачи и вставки DC, то в настоящее время для организации надежного энергоснабжения больших систем проектируются сети DC вплоть до напряжений 500 кВ, создаваемые в Китае. Для локальных сетей, особенно с использованием ВИЭ, приходится применять НЭЭ разных типов и мощностей, которые могут работать только на постоянном токе, что стимулирует применение ЦМП DC.

На рис. 7 приведена структура модульной стационарной САЭ, которая питается от внешней сети АС 35–110 кВ и через управляемый выпрямитель (В), нагруженный на биполярный кабель DC, питает внутреннюю систему энергоснабжения (ВСЭ), которая может быть как наземной, так и подземной (подводной). Наряду с основным в составе ВСЭ имеется резервное энергоснабжение в виде модульной микрогазотурбинной электростанции (МГТЭС) либо модульной дизельной электростанции (МДЭС), которые через преобразователи AC/DC подключены к биполярному кабелю наряду с НЭЭ в виде аккумуляторной батареи и обеспечивают питание нагрузок при нарушении питания от внешней сети и источников ВСЭ. В состав САЭ могут также входить мобильные модульные САЭ, питаемые от источников ВИЭ (ВЭС, ФЭС) или традиционных источников (МГТЭС или МДЭС). МГТЭС в силу компактности лучше подходят для мобильных САЭ, однако повышенный расход топлива зачастую ограничивает их применение. Использование системы DC позволяет снизить потери в кабелях,

СТРУКТУРА КОНТЕЙНЕРНОГО НЭЭ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНОГО ТЭ [15]



Обозначения: ДТ – дизельное топливо; Т – турбина; К – компрессор; ЭГ – электрогенератор; ГРЩ – групповой распределительный щит; ЭХГ – электрохимический генератор; ТПТЭ – твердополимерный топливный элемент.

Рис. 10

длина которых может быть любой, а главное, обеспечивает гарантированное питание нагрузок, так как при пропадании одного из полюсов другой полюс форсируется по току, сохраняя бесперебойное энергоснабжение. Нагрузки ВСЭ, в свою очередь, могут подключаться через преобразователи DC/AC (инверторы) и преобразователи DC/DC, что позволяет упростить схемы собственных нужд и оперативного питания ВСЭ.

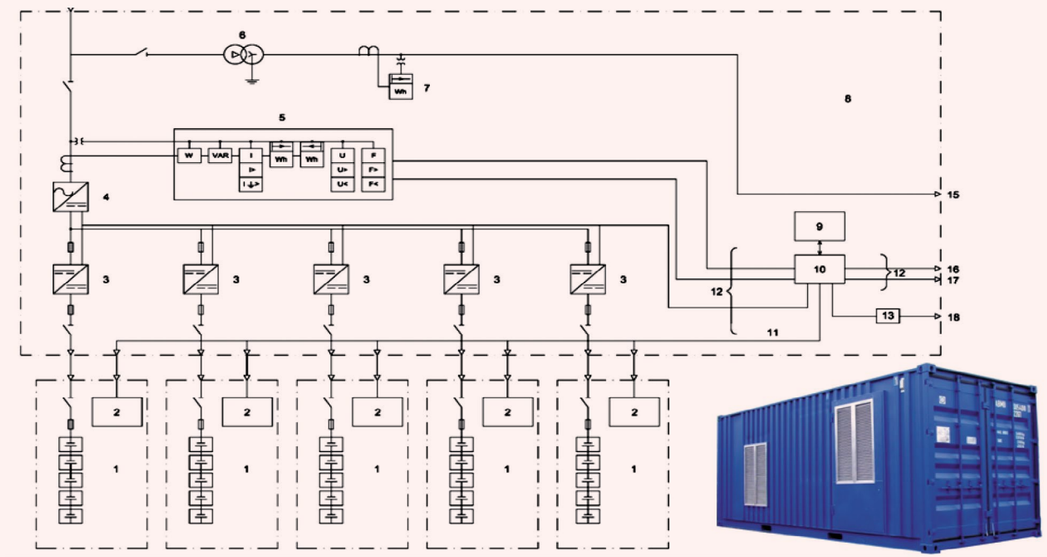
На рис, 8 в компактной форме приведены характеристики живучести, помехоустойчивости и мобильности САЭ на основе ЦМП DC, которые позволяют, несмотря на большие затраты сравнительно с ЦМП AC, обеспечить практически бесперебойное и качественное энергоснабжение потребителей.

На рис. 9 показаны фотографии преобразователей частоты (ПЧ), напряжения и тока на приборах IGBT, а также акустические характеристики ПЧ мощностью 212 кВт, позволяющих существенно снизить шумы в мобильных модулях, что важно в гражданских и военных приложениях.

На рис. 10 применительно к водородному топливному элементу (ТЭ), который может использоваться в качестве НЭЭ, приведены: а) внешний вид; б) структурная схема. Применение ТЭ оправдано высоким КПД на уровне 50 %, отсутствием вредных выбросов, возможностью работы при низких температурах, быстрым стартом, однако недостатки связаны с высокой степенью очистки водорода от примесей, ограниченным ресурсом мембраны в твердополимерном ТЭ.

На рис. 11 приведена структурная схема контейнерного НЭЭ на основе литий-ионного аккумулятора (ЛИА) мощностью 1 МВт энергоемкостью 3 МВт·ч [16], который обеспечивает гарантированное энергоснабжение САЭ при исчезновении питания. Основными элементами являются модули ЛИА-1 мощностью 200 кВт, которые контролируются и управляются с помощью блоков СКУ. Согласование напряжений шины питания и модулей ЛИА осуществляется с помощью преобразователей DC-DC (3), выход которых связан с входом инвертора DC-AC (4). Измерители (5) контролируют выдаваемую мощность, напряжение и ток НЭЭ, который через трансформатор (6) связан с нагрузкой переменного тока. Если НЭЭ работает по схеме, где инвертор и трансформатор отсутствуют, то это существенно упрощает и удешевляет НЭЭ.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОНТЕЙНЕРНОГО НЭЭ НА ОСНОВЕ ЛИА [16]



Обозначения: 1 – модуль ЛИА; 2 – система контроля и управления СКУ-модуля; 3 – преобразователь DC-DC; 4 – преобразователь DC-AC; 5 – измерители; 6 – трансформатор; 7 – счетчик; 8 – контейнер; 9 – уставка; 10 – контроллер; 11, 12 – кабели; 13 – защита; 14–18 – внешние присоединения.

Рис. 11

Области применения ЦМП AC и ЦМП DC характеризуются областями, показанными на рис. 12. Они зависят от наличия рынка комплектующих и заказчиков. При этом важное значение приобретают вопросы цифровизации, создания цифровых двойников, унификации и стандартизации, наличия испытательной базы и др.

ВЫВОДЫ

Предлагается универсальная энергетическая платформа мощностью 10–100 МВт, напряжением 10–110 кВ на базе ЦМП DC с внедрением в системы внутреннего и внешнего энергоснабжения гражданского и военного применения.

Использование ЦМП DC позволяет в два раза повысить надежность энергоснабжения, пропускную способность, управляемость и устойчивость по сравнению с ЦМП AC.

Применение ЦМП DC позволяет осуществить мобильное исполнение и реализовать САЭ повышенной устойчивости применительно к природным и техногенным воздействиям, а также к электромагнитному импульсу.

Тиражирование ЦМП DC воздушного, надводного и наземного исполнения для разной мощности и разного напряжения позволит существенно удешевить производство и эксплуатацию за счет унификации и стандартизации комплектующих.

ЦМП DC обеспечит повышенную живучесть, помехоустойчивость, мобильность.

ЦМП DC позволит создать единую энергетическую платформу наземного, водного и воздушного базирования, в том числе арктического исполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перминов В. М., Тягунов М. Г. К вопросу о структуре энергетики будущего//Энергия единой сети. 2019, № 5 (48), С. 10–28.
2. Рогалев Н. Д., Молодюк В. В. Проблемы развития электроэнергетики России и пути их решения//XXVIII Международная научно-техническая конференция ТРАВЭК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования». Москва, 7–8 ноября 2018 г.
3. Шульга Р. Н., Путилова И. В. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов//Альтернативная электроэнергетика и экология (ISJAEE), 2019, № 4–6, С. 65–82.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦМП АС И ЦМП DC

ЦМП АС — Наземные и подземные установки гражданского применения с использованием кабелей АС ограниченных длины и мощности

ЦМП DC — Наземные, подземные, надводные, подводные, воздушные установки, преимущественно военного назначения с неограниченными длиной кабелей и мощностью, наличием НЭЭ, сочетанием с ВИЭ

Рис. 12

4. Шульга Р. Н. Контейнерные подстанции среднего напряжения//Новости электротехники, 2018, № 2 (110), С. 16–20.
5. Шульга Р. Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока//Энергосбережение и водоподготовка, 2017, № 5 (109), С. 58–69.
6. Шульга Р. Н. Комплексы электрооборудования переменного и постоянного тока для автономной и распределенной генерации//Энергия единой сети, 2019, № 5 (48), С. 42–50.
7. Дорофеев В. В., Моржин Ю. И. Разработка концепции «Цифровая подстанция». М., 2010, С. 238.
8. Мокеев А. В., Ульянов Д. Н., Бовыкин Б. Н., Хромцов Е. И. Многофункциональные устройства для цифровых подстанций//Энергия единой сети, 2019, № 6 (49), С. 8–16.
9. Шаров Ю. В. и др. Цифровизация контроля текущего состояния и предиктивной диагностики турбогенераторов на электростанциях//Энергия единой сети, 2019, № 6 (49), С. 18–30.
10. Шульга Р. Н., Змиева К. А., Должиков Е. Ю., Тимофеев Е. М. Датчики тока и напряжения для цифровых подстанций нового поколения//Электро, 2012, № 5, С. 33–36.
11. Каталог Preset распределительных устройств среднего напряжения. URL: http:/www.se.com.ru (дата обращения 20.02.2020).
12. Шульга Р. Н., Шульга А. Р., Ковалев Д. И., Хренов С. Н. Разработка концепции систем управления и мониторинга комплектных распределительных устройств среднего напряжения с твёрдой изоляцией//Электротехника, 2017, № 8, С. 39–45.
13. Шульга Р. Н., Шульга А. Р., Ковалев Д. И., Мирзабекян Г. З., Вариводов В. Н. Некоторые особенности применения твёрдой изоляции из сшитого полиэтилена на постоянном и переменном токе//Электротехника, 2016, № 8, С. 39–45.
14. Аксенов В. В., Чуприков В. С. Устройства симметрирования напряжения в электрических сетях//Энергоэксперт, 2019, № 3, С. 40–45.
15. Опыт создания энергоустановки с топливными элементами. URL: http://www.sozvezdye-forum.ru/assets/files/Presentation_2016/Session%202/Alekseev.pdf (дата обращения 20.02.2020).
16. 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.
17. Khrennikov A. Yu., Kuvshinov A. A., Shkuropat I. A. Providing Reliable Operation of Electric Networks. New York: Nova Publishers, 2019.
18. Хренников А. Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2019.
19. Хренников А. Ю., Александров Н. М. Оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов//Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем». Чебоксары, 7 июня 2019 г., С. 378–382.
20. Александров Н. М., Хренников А. Ю., Кувшинов А. А. Автоматизация и цифровизация при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов на сетевых стендах с высоковольтным сильноточным полупроводниковым ключом//Международная конференция «Автоматизация и IT в энергетике». МФЭС 2019. Выставка «Электрические сети России». Москва, 3–6 декабря 2019.

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА: ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Периодичность: 6 раз в год.
Тираж: 3050 экземпляров
Учредитель: ПАО «ФСК ЕЭС»
Издатель: АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Редакционная коллегия:
представлена ведущими учеными и специалистами в энергетической области (докторов технических наук – 11, кандидатов технических наук – 9, член-корреспондентов – 2).

Журнал включен в каталог «Пресса России» и ведет ежегодную подписную кампанию.

Журнал включен в «Российский индекс научного цитирования».

РАСПРОСТРАНЕНИЕ:
- Министерство энергетики Российской Федерации;
- Министерство обороны Российской Федерации;
- Государственная Дума Федерального Собрания РФ;
- ПАО «Россети»;
- ПАО «ФСК ЕЭС»;
- АО «СО ЕЭС»;
- отраслевые НИИ;
- вузы и библиотеки;
- инфраструктурные энергетические компании;
- производители и поставщики электротехнического оборудования;
- отраслевые мероприятия.

Рубрики журнала:
- Электроэнергетика и электротехника
- Электрические машины и аппараты
- Трансформаторы и электрические реакторы
- Силовая преобразовательная техника
- Провода и кабели
- Электротехническое оборудование
- Электрические системы
- Средства РЗА
- Линии электропередачи и подстанции
- Возобновляемая энергетика

Приглашаем авторов к публикации статей в научно-техническом журнале «Энергия единой сети». С правилами подачи заявки можно ознакомиться на сайте www.Энергия-единой-сети.РФ.

Контакты:
editor@ntc-power.ru тел. +7 (495) 727-19-19 (доб. 1304, 1731)
press@ntc-power.ru www.Энергия-единой-сети.РФ

Зарегистрирован: в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 20 сентября 2012 г. Свидетельство о регистрации: № ПИ №ФС77-51276.