

КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ АВТОНОМНОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

АВТОР:

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

Проблема электроснабжения мегаполисов имеет особую значимость для России, поскольку значительная часть территории нашей страны находится в суровых

климатических зонах. Пиковые нагрузки приходится на зимний период, когда выживание людей и функционирование промышленных предприятий определяется электро- и теплоснабжением.

Ключевые слова: комплекс электрооборудования; среднее напряжение; постоянный ток; статический преобразователь; накопитель электроэнергии.



ВВЕДЕНИЕ

Централизованное энергоснабжение покрывает одну треть территории России, остальные две трети, включая большую часть Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) ограничены автономным энергоснабжением с использованием угольных электростанций, газопоршневых, дизельных и реже газотурбинных электростанций (соответственно ГПЭС, ДЭС и ГТЭС). Наличие запертых мощностей, необходимость обновления генерирующего оборудования, появление договоров на предоставление мощностей (ДПМ) привели к росту тарифов на централизованное энергоснабжение, вдвое превышающих тарифы в США и в полтора раза — тарифы в Европе, что способствует отказу более 200 крупных предприятий России от централизованного энергоснабжения и использованию более дешевого автономного энергоснабжения [1]. Взрывной рост распределенной генерации, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), накопители электроэнергии (НЭЭ), устройства FACTS, передачи и вставки постоянного тока (соответственно ППТ и ВПТ) за рубежом, отраженные в материалах СИГРЭ [2], пересматривают концепцию развития электроэнергетики в мире. Так, в [3] продолжает развиваться проблематика сетей постоянного тока на напряжения 200 кВ и 500 кВ за счет разработки выключателей постоянного тока. Развитие энергоснабжения удаленных регионов России из-за их малолюдности, неосвоенности, суровых климатических, природных условий и других факторов требует новых подходов к организации и технологии энергоснабжения, включая разработку новых источников электроэнергии на сжиженном природном газе (СПГ) и атомных станций малой мощности (АСММ), а также комплексов электрооборудования (КЭО) в составе

контейнерных подстанций стационарного и мобильного исполнения, которые на меньшие напряжения широко применяются на транспорте и в других отраслях.

Комплексы электрооборудования КЭО переменного тока напряжением 6–10 кВ в составе силовых трансформаторов (Тр), распределительных устройств (РУ), систем собственных нужд, сигнализации и оперативного управления широко применяются в распределительных сетях РС мегаполисов, промышленных предприятий, добывающих платформ, ГОКов в Арктике, на судах, включая ледоколы. КЭО постоянного тока напряжением от 0,8 до 3,3 кВ широко применяются на городском транспорте и РЖД. Коммутационная и защитная аппаратура указанных КЭО описана в статьях Р.Н. Шульги, В.П. Иванова [4, 5]. Рост энергопотребления деловых центров мегаполисов (например, Москвы) свыше 30 МВА привел к переводу РС на напряжение 20 кВ, прокладке свыше 1 тыс. км кабельных линий КЛ сшитого полиэтилена СПЭ сечением свыше 500 кв. мм с изменением структуры сетей, введением резистивного заземления нейтралей трансформаторов, перестройкой релейной защиты и автоматики (РЗА) и других мероприятий, описанных в статье А.В. Майорова [5, 6]. Аналогичный перевод сетей на напряжение 20 кВ ожидается и в других крупных городах России и соответствует принятым в Европе стандартам. Требования экологии, высокая стоимость земли и другие факторы позволяют в мегаполисах выполнить указанные КЭО подземного контейнерного исполнения, что существенно повышает надежность энергоснабжения с учетом природных и техногенных воздействий. Контейнерное исполнение КЭО может, по данным [7], примерно на 20 % снизить их стоимость и ускорить ввод в эксплуатацию.

Еще более актуальной является проблема энергоснабжения автономных объектов в Арктике, где так же, как и на 70 % территории России, отсутствует централизованное энергоснабжение, и, как отмечается в [8], приходится использовать наиболее дешевые и экономичные дизель-электрические станции (ДЭС), а в ряде случаев газопоршневые электростанции (ГПЭС) и газотурбинные электростанции (ГТЭС), желательно на СПГ преимущественно для западной Арктики. В восточной части Арктики плавучие и подводные атомные станции малой мощности должны заменить применение неэкологичных угольных электростанций мощностью 25 МВт примерно в 10 портах по трассе Севморпути (СМП). Неизбежное таяние вечной мерзлоты, особенно характерное для западной Арктики, заставляет переводить генерацию и распределение на воду, а в ряде случаев под воду (для добывающих платформ). Так, на Ямал СПГ-2 производство СПГ даже реализовано на плавучей платформе. Потребители мощностью менее 30 МВт смогут использовать контейнерные КЭО напряжением до 10 кВ, а свыше 30 МВт использовать напряжение 20 кВ. Наличие источников ВИЭ, которые требуют применения накопителей электроэнергии, а также большая длина КЛ, особенно подводного исполнения, вынуждают использовать КЭО постоянного тока напряжением 10–20 кВ, как в мегаполисах. Указанные КЭО должны дополнительно к КЭО переменного тока содержать статические преобразователи тока (ПТ) в составе источников и преобразователи напряжения (ПН) у потребителей, а также системы автоматического управления комплексами (САУК).

Аналогичная проблема создания КЭО напряжением 10–20 кВ возникает для гражданских и военноморских надводных судов большого

вентиляторы и др.), подключена к выходу инверторов (И), а потребители постоянного тока — либо непосредственно к шине ВН, либо к шине НН через DC-DC преобразователи.

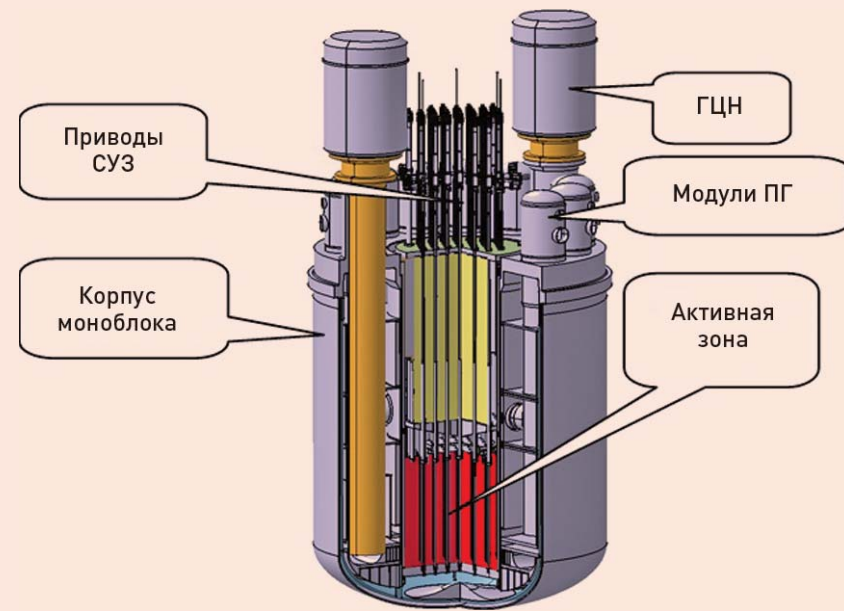
Число и тип источников и накопителей электроэнергии зависит от требований потребителей. Так, схема рис. 1 соответствует судовой установке. Для наземных, подводных и подводных установок достаточно 1–2 установок преимущественно наиболее экономичных и дешевых дизелей, одной аккумуляторной батареи (1 установки АБ), исключения вооружения в виде КО и/или ЛО, присущего военным судам и ледоколам.

Для потребителей мощностью свыше 10 МВт целесообразно использовать биполярную схему электропитания напряжением каждого полюса 10 кВ, а между полюсами — 20 кВ, что позволит использовать то же оборудование напряжением 10 кВ, но вдвое большей мощности. В отличие от КЭО переменного тока такая схема обеспечивает вдвое большую надежность энергоснабжения, так как при КЗ одного полюса этот полюс может быть отключен выключателями (или разъединителями) в бестоковую паузу, а другой полюс форсирован повышением вдвое уставки регулятора тока. К шине ВН дополнительно могут быть присоединены источники ВИЭ (при их наличии) в соответствии с [7].

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НАКОПИТЕЛИ

Показатели и характеристики источников, накопителей и статических преобразователей приведены в [8–10]. В качестве традиционных

РЕАКТОРНЫЙ МОНОБЛОК СВБР-100 [13]



Обозначения: ГЦН — главный циркуляционный насос, ПГ — парогенератор, СУЗ — система управления и защиты

Рис. 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВБР-100 [13]

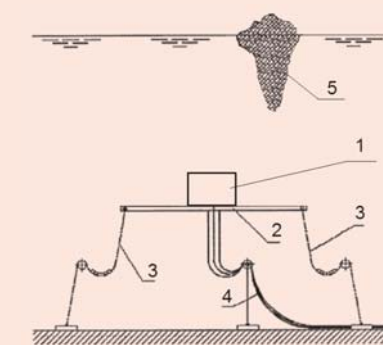
Показатель	Значение
Мощность РУ тепловая, МВт	280
Мощность электрическая, МВт	100
Давление генерируемого насыщенного пара, МПа	7,0
Паропроизводительность, т/ч	580
Теплоноситель 1 контура, состав	44,5 % Pb + 55,5 % Bi
Температура теплоносителя 1 контура, вх./вых., °С	340/490
Топливо: тип	UO ₂
среднее обогащение по U-235, %	16,3
максимальное обогащение по U-235, %	менее 20
Кампания активной зоны, тыс. эфф.ч	50
Интервал времени между перегрузками, лет (одномоментная перегрузка всего топлива)	7–8
Габариты СВБР (диаметр/высота), м	4,53/7,86

Таблица 1

источников на СПГ целесообразно использовать ГТУ, дизели и газопоршневые установки ГПУ, которые наиболее востребованы в западной части Арктики благодаря близости к источникам СПГ на Ямале. Для восточной части Арктики из-за затрудненной логистики и отсутствия углеводородных источников целесообразно использовать атомные станции малой мощности (АСММ), причем указанные источники могут быть на островах, побережье — надводного или подводного базирования, а на материке — наземного или подземного базирования. С учетом ускоряющегося таяния вечной мерзлоты, наличия ледового покрова подводное исполнение источников является предпочтительным.

Накопители электроэнергии НЭЭ мощностью от 10 до 20 % мощности нагрузки могут быть в виде литий-ионных АБ, либо в виде топливных элементов (ТЭ): твердополимерных или твердооксидных топливных

СХЕМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОДВОДНОЙ РУ



Обозначения: 1 — атомный энергоблок, 2 — платформа, 3 — якорная система, 4 — кабели, 5 — плавучий лед

Рис. 3

элементов [7, 8, 9]. Их применение обусловлено питанием собственных нужд реакторных установок (РУ), резервированием в процессе перезагрузки топлива РУ, а также возможным присоединением ВИЭ. Структура минисетей постоянного тока с использованием АСММ и НЭЭ приведена в [11]. На рис. 2 приведен схематический чертеж реакторного моноблока СВБР-100 разработки «АКМЭ-Инжиниринг».

Реакторные установки электрической мощностью до 300 МВт относятся к малым АСММ, в то время как к малым с точки зрения потребителей относятся установки мощностью менее 30 МВт.

Подобные реакторные установки, например РИТМ-200, относятся к 4-му поколению и выпускаются также на малые мощности от 3 до 25 МВт подводного исполнения в АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» [12,13]. Схематически расположение подводной РУ приведено на рис. 3.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КЭО ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для применения на вышеуказанных объектах КЭО постоянного тока необходимо использовать КЛ взамен прокладки ВЛ не только в силу большей пропускной способности, надежности, но и силу большей стойкости к техногенным, природным воздействиям, улучшения экологии в условиях таяния вечной мерзлоты и др. факторов. Особенно это относится к подводной или надводной реализации КЭО. Разработанный в ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», Москва, проект Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения (ММКЖ) [14] позволяет обеспечить потребителей не только электричеством, но и теплом, холодом, водой (по по-

требности — воздухом). Структурная схема ММКЖ приведена на рис. 4.

Основными модулями КЭО являются управляемый выпрямитель 4 и модуль преобразования, накопления и распределения 2.

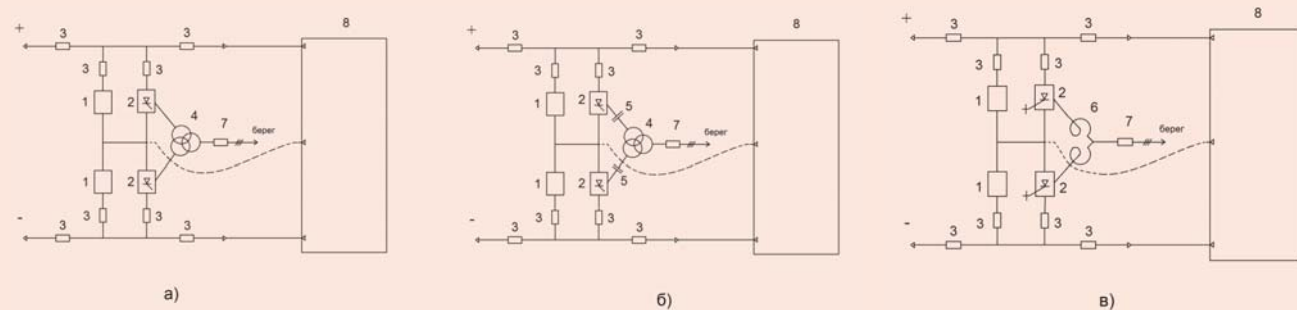
На рис. 5 и 6 соответственно приведены однолинейные принципиальные схемы модулей 4 и 2, причем модуль 4 встраивается в подводный энергомодуль 1 для передачи питания на модуль 2 биполярным силовым и оптическим кабелем 6.

На рис. 6 приведена однолинейная принципиальная схема (а), которая соответствует модулю преобразования, накопления и распределения 2, указанному на рис. 4.

На рис. 5 схема (а) соответствуют некомпенсированному преобразователю тока ПТ и обычно употребляется для работы с синхронным генератором 1; схема (б) соответствует компенсированному преобразователю тока КПТ и приспособлена для работы с генератором 1 на постоянных магнитах с целью регулирования напряжения ПН на шинах генератора; схема (в) соответствует преобразователю напряжения и позволяет работать с любым типом генератора 1. Наличие трансформатора позволяет осуществить гальваническую развязку и согласовать по напряжению генератор и преобразователь. Применение ПН позволяет отказаться от трансформатора, но это примерно на 30 % дороже ПТ.

Схемы рис. 6 аналогичны рис. 5, но работают в инверторном режиме с большим потреблением реактивной мощности и отличаются желательной установкой накопителей 1 вместо генераторов 1 на рис. 5. Если потребители на берегу используют переменный ток (например, при модернизации электроснабжения), то применяются схемы рис. 6. Если система электроснабжения созда-

ОДНОЛИНЕЙНАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МОДУЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ 2 (СМ. РИС. 4) ДЛЯ: НЕКОМПЕНСИРОВАННОГО ПТ (А); КОМПЕНСИРОВАННОГО ПТ (Б); ПН (В)



Обозначения: 1 — накопитель электроэнергии типа ТЭ или АБ; 2 — преобразователь тока на тиристорах (либо преобразователь напряжения на приборах IGBT или IGCT); 3 — однополюсный выключатель постоянного тока; 4 — трансформатор; 5 — конденсатор; 6 — реактор; 7 — трехполюсный выключатель переменного тока; 8 — технологический модуль водо- или воздухоподготовки либо другой по необходимости

Рис. 6

пределенной генерации. Показана целесообразность с ростом мощностей в мегаполисах, а также в Арктике использовать подводные кабели и накопители электроэнергии в составе КЭО СН постоянного тока. На примере судовых электроустановок показана возможность их применения для электроснабжения автономных потребителей. Описана структура и характер использования мобильных модульных комплексов жизнеобеспечения для производства электричества, тепла, холода, водоподготовки и воздухоподготовки (при необходимости).

ЛИТЕРАТУРА

1. Роголев Н.Д., Молодков В.В. Проблемы развития электроэнергетики России и пути их решения, XXVIII Международная научно-техническая конференция ТРАВЕК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования», 7–8 ноября 2018 г., Москва.
2. Сулова О.В. Развитие сетей постоянного тока различных классов напряжения (по итогам 47-й Сессии СИГРЭ), III Научно-практическая

3. Tang G., Zhou W., He Z., Wei X., Gao C. Development of 500 kV modular cascaded hybrid HVDC breaker for DC grid applications, 47-я Сессия СИГРЭ, 26–31 августа 2018 г., доклад А 3-105.
4. Шульга Р.Н., Иванов В.П. Выключатели постоянного тока для многоподстанционных сетей постоянного тока // Электричество. 2018. № 12. С. 28–34.
5. Шульга Р.Н., Иванов В.П. Новые технологии и комплексы электрооборудования переменного и постоянного тока // Электричество. 2019. № 1.
6. Майоров А.В. Совершенствование технических решений по развитию структуры и повышению надежности эксплуатации электрической сети 20 кВ мегаполиса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 4 (49). С. 30–36.
7. Шульга Р.Н. Контейнерные подстанции среднего напряжения // Новости электротехники. 2018. № 2 (110). С. 16–20.
8. Шульга Р.Н. Технологии постоянного тока для энергообеспечения Арктики // Новости электротехники. 2018. № 5 (113). С. 2–7.

9. Шульга Р.Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 5 (109). С. 58–69.
10. Шульга Р.Н. Характеристики накопителей и статических преобразователей // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 1 (99). С. 68–76.
11. Шульга Р.Н. Минисети постоянного тока на базе атомных станций малой мощности. III Научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов». Москва, 6 декабря 2018 г.
12. Комлев О.Г., Тошинский Г.И., Тормышев И.В. СВБР-100: Потенциальная энергия теплоносителя и безопасность АЭС // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 1.
13. Атомные станции малой/средней мощности. URL: <http://www.okbm.nnov.ru/business-directions/atomnye-stantsii-maloy-sredney-moshchnosti-i-plavuchie-atomnye-teploelektrostantsii>.
14. Шульга Р.Н., Стальков П.М., Кокуркин М.П., Лавринович В.А. Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения. Заявка № 2019101084 от 10.01.2019.

Приглашаем принять участие в
XXX Международной научно-технической и практической конференции
«Состояние и перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Трансформаторы. Коммутационные аппараты. Преобразователи. Системы управления и диагностики»
9–10 июня 2020 г.

Гостиница «Холидей Инн Сокольники»,
г. Москва, ул. Русаковская, 24.

Тематическая направленность конференции:

1. Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электрических сетей. Вопросы цифровизации электроэнергетических систем и сетей.
2. Развитие возобновляемых источников энергии и систем распределенной малой генерации.
3. Новые методы и средства повышения надежности и энергоэффективности электрических сетей и электротехнического оборудования.
4. Силовые и распределительные трансформаторы и реакторы.
 - 4.1. Перспективы развития и совершенствования силовых, распределительных, преобразовательных трансформаторов, реакторов и их комплектующих.
 - 4.2. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.
 - 4.3. Управляемые шунтирующие реакторы.
 - 4.4. Технологии производства трансформаторно-реакторного оборудования.
 - 4.5. Комплектующие изделия, приборы, материалы для производства трансформаторно-реакторного оборудования (высоковольтные вводы, устройства РПН, устройства контроля и защиты, электротехническая сталь, изоляционные материалы).
5. Высоковольтное коммутационное оборудование на напряжения 6–1150 кВ.
 - 5.1. Колонковые и баковые выключатели с газовой изоляцией.
 - 5.2. Комплектные распределительные устройства.
 - 5.3. Газоизолированные линии (ГИЛ).
 - 5.4. Вакуумные выключатели.
 - 5.5. Высоковольтные разъединители.
6. Преобразовательная техника.
 - 6.1. Силовая электроника.
 - 6.2. Преобразовательное оборудование для повышения энергоэффективности и надежности работы электрических сетей и обеспечения потребителей электрической энергией.
7. Системы управления, защиты и диагностики высоковольтного электротехнического оборудования.
8. Электротехническое оборудование с использованием технологий «теплой» сверхпроводимости.
9. Вопросы стандартизации и испытаний высоковольтного электротехнического оборудования.
10. Опыт эксплуатации высоковольтного электротехнического оборудования.