

Продолжаем обсуждать тему контейнерных подстанций. В предыдущем номере («Новости ЭлектроТехники» № 1(109) 2018, www.news.elteh.ru) подробно рассматривалось контейнерное распределительное преобразовательно-стабилизирующее устройство.

В новом материале Роберт Николаевич Шульга рассказывает о современных решениях, расширяющих возможности применения КП. Как отмечает автор, в области КП переменного тока накоплен большой опыт, а вот КП постоянного тока пока используются не так широко, хотя появление генерации на основе ВИЭ, накопителей и статических преобразователей в составе многоподстанционных кабельных сетей постоянного тока (МСПТ) должно изменить ситуацию.

КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Анализ новых решений

Контейнерные подстанции (КП) – неотъемлемый элемент сетей среднего напряжения (СН) – используются как в виде стационарных моноблоков, так и в виде мобильных установок полной заводской готовности. Масштабы применения КП возрастают благодаря использованию новых технологий: твердой и газовой изоляции для КРУ, вакуумных коммутационных аппаратов гибридного типа, комбинированных защитных устройств, цифровых интеллектуальных приборов, датчиков новых типов, средств обработки, коммуникации и управления для автономных и централизованных энергосистем.

При этом, если в области проектирования и эксплуатации КП переменного тока накоплен значительный опыт, охватывающий все классы напряжения вплоть до 245 кВ с использованием КРУЭ, то КП постоянного тока пока не получили заметного распространения даже в зарубежной практике.

Сегодня достаточно широко применяются КП мобильного типа для испытания силовых трансформаторов, КРУЭ, вводов и другого оборудования на месте его установки [1, 2].

Многообразие технических решений во всех направлениях технического обеспечения вынуждает ограничиться анализом преимущественно первичного оборудования – трансформаторов, выключателей, конденсаторов, ограничителей перенапряжения и полупроводниковых вентилях и преобразователей.

Цель данной статьи – проанализировать новые решения по реализации КП переменного и постоянного тока СН как для сооружения новых установок, так и для модернизации существующих.

КП ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

КП переменного тока в части СН получили широкое распространение как для стационарных установок, так и для мобильного применения. КП выпускаются в виде трансформаторных подстанций ТП, комплектных распределительных устройств КРУ, дизель-электрических (ДЭС) и газотурбинных станций (ГТЭС), накопителей электроэнергии (НЭЭ), компенсирующих, стабилизирующих устройств и др. В большинстве случаев мощность мобильных устройств ограничена значением 1–2 МВт, хотя в ряде применений доходит до 10 МВт, а для КП стационарного типа может не иметь ограничений.

Обычно КП мобильного типа выполняется в виде набора контейнеров различного функционального назначения: одного – для ТП, второго – для КРУ или КРУЭ, третьего – для собственных нужд, систем управления, защиты и др. ДЭС и ГТЭС вместе со своими системами обслуживания размещаются в отдельных контейнерах, так же как и системы ГСМ и обслуживающей инфраструктуры.

Уровень рабочего напряжения мобильных устройств редко превышает 10 кВ, хотя большинство потребителей получают питание от шин 0,4 кВ и распределяют по нагрузкам с помощью кабелей или самонесущих изолированных проводов (СИП).

Например, фирма Siemens в 1994 г. ввела в Германии КП 110 кВ при модернизации старой подстанции с сохранением двух существующих трансформаторов 110/20 кВ, с прямым присоединением ВЛ 110 кВ. Срок ввода составил 2 недели, сум-

ма затрат была снижена на 20% по сравнению со стоимостью капитального строительства. Быстрая готовность КП благодаря заводскому исполнению, короткий период реконструкции определили преимущества подобного подхода. Интересным решением стало размещение на крыше контейнеров высоковольтных вводов и устройств системы собственных нужд.

Однако лучшее решение этой фирмы – КП с КРУЭ, созданная для геотермальной электростанции в Калифорнии (США) мощностью 50 МВА. Эта КП работает уже более 20 лет, несмотря на загрязнение внешней изоляции соевыми осадками.

Для различных областей применения Siemens и ABB выпускают КП с КРУЭ на напряжение до 245 кВ, которые размещают в отдельном контейнере с наружными вводами в торцах контейнера [3].

Большинство зарубежных и ряд отечественных фирм вслед за фирмой Toshiba (Япония), освоившей в 2003 г. производство КРУ с твердой изоляцией, выпускают такое оборудование на классы напряжения 12, 24, а в настоящее время и 35–36 кВ.

Твердая экранированная изоляция позволяет на 20% снизить габариты по сравнению с КРУ с элегазом и в 2 раза по сравнению с КРУ с воздушной изоляцией. Кроме того, она обеспечивает экологичность, повышенную надежность и безопасность КП при открытой двери. Все части, находящиеся под напряжением, герметизированы, причем выключатели и разъединители заключены в оболочку из эпоксидной смолы, а шины изолированы силиконовой резиной. Оболочка КРУ обеспечивает высокую степень защиты от проникновения пыли и влаги – IP67. Механизмы пружинного или магнитного приводов герметизированы, не требуют обслуживания, имеют механический ресурс 20000 циклов.

Например, КРУ 12 кВ Toshiba благодаря компактности (400x1430x780 мм) может применяться в стационарных, мобильных, подземных и др. условиях в сочетании с комплектными блочными трансформаторами. Конструкция является модульной, токопроводящие части герметизированы, покрыты диэлектриком с хорошей адгезией к меди и одинаковым температурным коэффициентом расширения и усадки. Поверхность диэлектрика имеет токопроводящее покрытие и заземлена с конструкцией шкафа, что обеспечивает безопасность при открытой двери. Модульность обеспечивает возможность расширения и модификации, а также замену модулей.

Температура стеклования эпоксидной смолы 135–150 °С, а коэффициент теплопроводности 80–100 обеспечивает отвод тепла и стойкость к старению диэлектрика. Эпоксидная смола разлагается с помощью термообработки и может быть повторно использована путем экстракции.

Номинальный ток этой КРУ – 630 А, ток сборных шин – 1250 А, номинальный ток включения/отключения КЗ – 50/63 А. Допустимая температура окружающей среды от –50 до +70 °С, влажность – 95%, срок службы 30 лет.

Еще один пример – КРУ 10 кВ Premset фирмы Schneider Electric [4]. Габариты ячейки (375x900x1350/1990 мм) с экранированной изоляцией 2SIS зависят от габарита кабельного отсека,



Роберт Шульга,
к.т.н., ведущий научный сотрудник,
ВЭИ-филиал «РЯЦ-ВНИИФ»,
г. Москва

высота которого 500(700) мм, номинальный ток 630 А, ток термической стойкости 25 кА в течение 1–4 с, ударный ток КЗ – 65 кА.

Указанное КРУ отличается объединением в одном аппарате с твердой изоляцией выключателя нагрузки, разъединителя и заземлителя с наличием взаимных блокировок с дверцей кабельного отсека. Привод выключателя – мотор-редуктор или рычаг с пружиной для заземляющего разъединителя. Особенности КРУ: модульная конструкция; система защиты с ТТ первичным током и тестированием цепи отключения выключателя; наличие от 8 до 16 тепловых датчиков; наличие датчиков замыкания на землю вокруг проходных изоляторов или кабелей, воздействующих на расцепители.

Предусмотрены испытания КРУ и подходящих кабелей постоянным напряжением 36 кВ в течение 15 мин.; напряжением 20 кВ (0,1 Гц) в течение 30 мин.; напряжением 18 кВ (50 Гц) в течение 1 мин. Измеряется также $\tan \delta$ и мощность тепловыделения при напряжении 18 кВ (50 Гц).

Ориентировочная стоимость распространенных традиционных КРУ с воздушной изоляцией класса 10 кВ в зависимости от комплектации изменяется в диапазоне от 900 до 1800 тыс. руб., стоимость КРУ с твердой изоляцией примерно на 20% выше. Пример отечественной разработки – КРУ 10 кВ типа «Эталон» фирмы «Таврида Электрик».

Трансформаторы

Наиболее часто в КП применяются сухие или масляные трансформаторы мощностью 1 МВА напряжением 10/0,4 кВ. Сухие трансформаторы преимущественно с литой изоляцией имеют перегрузочную способность на 20–30% ниже масляных и их стойкость в 3–4 раза ниже масляных трансформаторов. Замена минерального масла растительным или негорючей жидкостью повышает температуру воспламенения до 400 °С и позволяет снизить пожароопасность масляных трансформаторов, которые к тому же на 20% дешевле сухих.

Применение аморфного железа вместо электротехнической стали позволяет снизить потери холостого хода, хотя нагрузочные потери в обоих случаях одинаковы. Ориентировочная стоимость распределительных масляных трансформаторов с электротехнической сталью и обмотками из меди 900 руб. за кВА. Так, трансформаторы ТМ (ТМГ)-1000/10 с медными обмотками стоят 900 тыс. руб. при массе 2000 кг и объеме 5,2 м³, при потерях КЗ 11 кВт и потерях холостого хода примерно 1,5 кВт (с обмотками из аморфного железа – в несколько раз ниже).

Весьма перспективны для применения в КП кабельные трансформаторы на основе кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) с рабочей напряженностью 10–15 кВ/мм, которые проще по конструкции, имеют вдвое меньшие нагрузочные потери, в три раза более высокую надежность, содержат вдвое меньше горючих материалов, пожаро- и взрывобезопасны, допускают длительную перегрузку 115% при температуре 70 °С, а получасовую 140% при температуре 90 °С. Повышенная надежность и экологичность кабельных трансформаторов несмотря на высокую цену благоприятствует их применению в КП в сочетании с кабелями со СПЭ-изоляцией.

Источники и накопители

Применение традиционных источников в виде ДЭС или ГТЭС получило импульс дополнительного развития благодаря расширению распределенной генерации на отечественном и зарубежном рынке электроэнергетики, причем расширенное применение ВИЭ за рубежом также способствовало развитию КП благодаря разнесенности источников ВИЭ, их стохастической природе и потому обязательному применению НЭЭ в сочетании с ДЭС или ГТЭС.

Контейнерные НЭЭ номинальной мощностью до 1–2 МВт на основе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) иногда используются для покрытия пиков электроснабжения в мегаполисах, где вопросы экологии выходят на передний план. Так, в Лос-Анджелесе (США) вместо традиционной ТЭС в черте города размещены 50 контейнеров (в дальнейшем их количество увеличится до 100) мощностью 2 МВт каждый с электроемкостью до 3–4 часов разряда для покрытия утреннего и вечернего пиков нагрузки.

В отличие от стационарного НЭЭ в Фербенксе (США) мощностью 55 МВт указанные НЭЭ прямо смонтированы с преобразователями на крыше контейнеров и имеют простую модульную структуру. ►

● Рис. 1. ТЭУ фирмы Siemens мощностью 200 кВт



● Рис. 2. Общий вид контейнерного СТК 10 кВ



Весьма распространены за рубежом КП с НЭЭ на основе кинетических, комбинированных с ДЭС и др. накопителей электроэнергии. Удельная стоимость наиболее распространенных кислотных аккумуляторов – 12 тыс. руб. за кВт, в то время как на отечественном рынке удельная стоимость ЛИА в пять раз выше. За рубежом благодаря расширенному применению ВИЭ и электротранспорта их стоимость ненамного превышает стоимость кислотных аккумуляторов.

Конкурирующее с ЛИА направление – создание установок на базе топливных элементов (ТЭУ) водородного цикла. Их разновидность – твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), которые в перспективе заменят традиционные источники благодаря высокому КПД (до 60%, а в гибридном цикле – до 75%), отсутствию вредных выхлопов, простой конструкции, хотя и работают при 700–1000 °С.

Выработка электричества и тепла в базисном цикле за счет разделения ионов из природного газа в ионопроводящем электролите с длительным (до 12 час.) временем запуска – недостаток ТОТЭ, который ликвидируется в топливных элементах с протообменной мембраной ПЭМТЭ, работающих при температурах в районе 100 °С с быстрым запуском, хотя и при использовании чистого водорода и редкоземельных катализаторов. На рис. 1 приведена ТЭУ фирмы Siemens мощностью

200 кВт [5]. За рубежом многочисленные фирмы выпускают ТЭУ типа ТОТЭ в виде КП, например фирма Ballard (Канада). Мощность ее до 1000 кВт, масса 40 т, габариты 2,9×2,4×9 м, выходное напряжение 380 В.

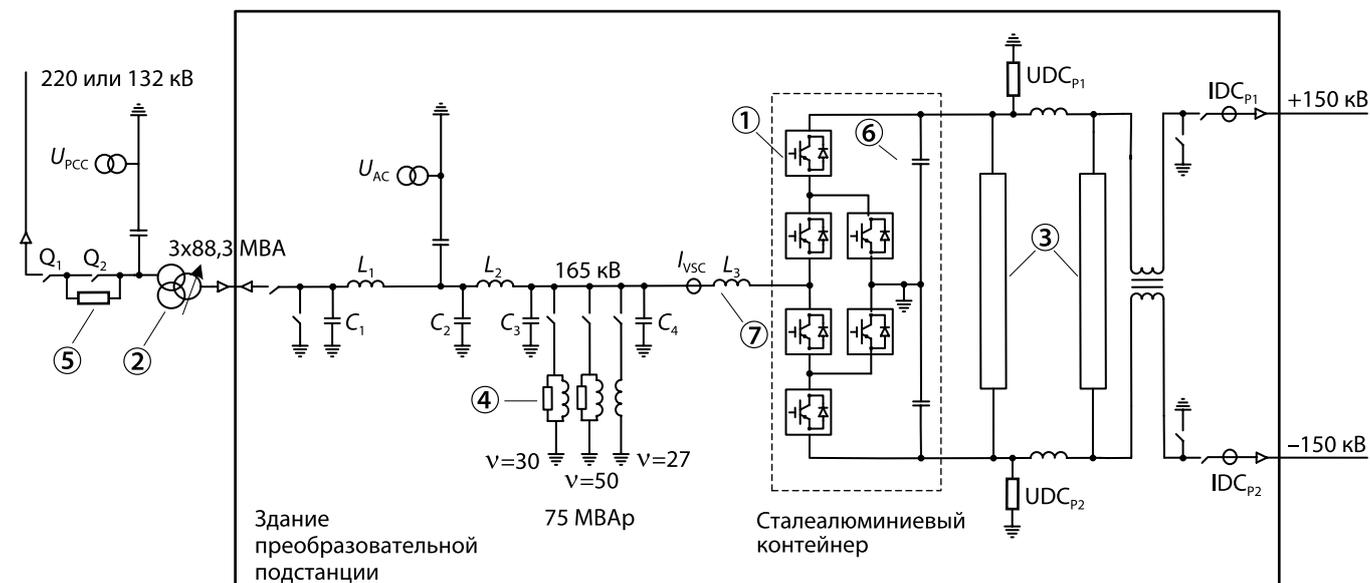
Промышленное производство и внедрение ТЭУ в значительной мере определяется созданием инфраструктуры производственной базы и испытательного оборудования, которые в отечественных условиях отражены в наработках РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск [6, 7], но в производственной линейке предприятия отсутствуют.

Устройства КРМ

В связи с тем, что сети переменного тока, особенно кабельные, имеют ограниченную длину из-за высокой зарядной мощности, высокие потери из-за неконтролируемых перетоков реактивной мощности (РМ), недостаточную устойчивость и управляемость, широкое применение устройств FACTS в виде СТК, УШР и др. установок поперечной компенсации становится неотъемлемой частью сетей 6–20 кВ. Пример такого применения – контейнерное распределительное преобразовательно-стабилизирующее устройство КРПСУ [8].

КРПСУ состоит из двух отсеков: распределительного и устройства прямой компенсации АУКРМ с пятью ступенями об-

● Рис. 3. Однолинейная схема преобразовательной подстанции ПП с применением трехуровневых преобразователей напряжения



1 – полностью управляемый высоковольтный транзисторный вентиль;
2 – преобразовательный трансформатор;
3, 4 – фильтры гармоник на стороне постоянного и переменного тока;
5 – предвключенный резистор;

6 – конденсатор;
7 – реактор, L1, L2, C1, C2, C3 и C4 – высоковольтные конденсаторные батареи, реактор с воздушным сердечником фильтра нижних частот

щей мощностью 1500 кВАр и автоматическим регулированием напряжения и мощности. Это устройство – наиболее простой и дешевый элемент сети. Оно предназначено для компенсации РМ и стабилизации напряжения на шинах нагрузки.

Более дорогим, но обладающим большими возможностями является статический тиристорный компенсатор СТК косвенной компенсации. Общий вид контейнерного СТК 10 кВ приведен на рис. 2. По данным [7], он содержит тиристорно-реакторную группу (ТРГ) по схеме «треугольник», фильтры 5 и 7 гармоник наружного исполнения с использованием шунтовых конденсаторов с удельной стоимостью ориентировочно 1200 руб. за кВАр напряжением 0,38–13,8 кВ и сухих реакторов с удельной стоимостью примерно 300 руб. за кВА.

ТРГ вместе с системой управления и защиты размещается в контейнере, а реакторы – за ним. С помощью воздушных токопроводов и кабелей вместе с изоляционными конструкциями в виде этажерок с конденсаторными батареями они образуют силовую схему СТК мощностью 10 МВА и более на напряжение до 35 кВ. СТК на напряжения свыше 110 кВ требуют использования силового трансформатора соответствующей мощности также наружной установки.

Некоторой разновидностью компенсатора является управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа УШРТ, в котором тиристорные группы размещаются либо в контейнере, либо в баке с маслом.

КП ПОСТОЯННОГО ТОКА

КП постоянного тока СН широко применяются для городского транспорта напряжением 600 и 800 В, а также для железнодорожного транспорта напряжением 3,3 кВ. Они выполняются в виде стационарных и мобильных устройств с использованием преимущественно преобразователей тока (ПТ) на диодах и тиристорах.

Достоинства КП с применением тиристорных вентиляей:

- хорошо отработанная технология преобразования энергии, использующаяся с начала 70-х годов XX века;
- низкие потери мощности в преобразователе тока (0,8–0,85%).

Недостатки КП с ПТ. В первую очередь к ним относится невозможность использовать кабели со СПЭ-изоляция, которые дешевле, чем кабели с вязкой пропиткой для равных классов напряжения и значений тока. Это связано с тем, что реверс мощности таких преобразователей осуществляется изменением полярности напряжения.

Кроме того, для ПТ характерно значительное потребление РМ (до 50% от пропускной способности преобразователя) и требуется значительный состав конденсаторных батарей на стороне переменного тока для компенсации РМ и фильтрации ВЧ-гармоник, что увеличивает площадь подстанции, ее стоимость и ограничивает применение ПТ для пассивных приемных систем и систем малой мощности. ПТ имеют минимум передаваемой мощности и не могут функционировать при мощности менее 10% от номинальной передаваемой мощности.

Указанные ограничения снимаются применением преобразователей напряжения (ПН) с полностью управляемыми вентилями на базе полупроводниковых транзисторов (IGBT).

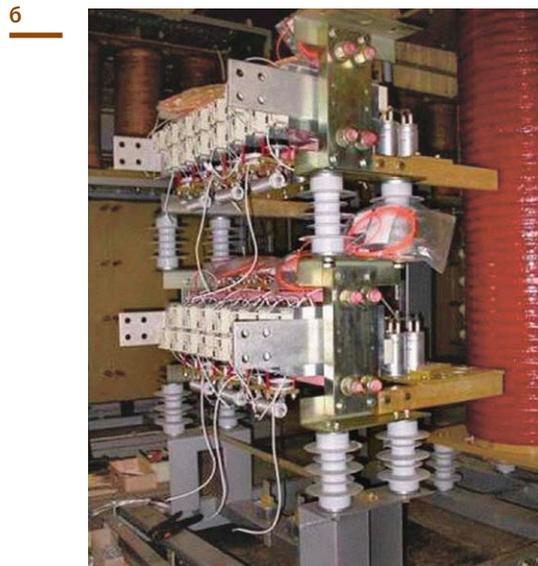
Мощные ПН обычно строятся на основе мостовых схем, состоящих из высоковольтных запираемых вентиляей, управляемых с высокой (до нескольких тысяч герц) частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 3 представлена схема преобразовательной подстанции (ПП) с использованием преобразователей напряжения на примере ПП «Мюррейлинк» (Австралия) пропускной способностью 200 МВт [9]. Как правило, ПП строятся по симметричной униполярной схеме, при этом оба провода постоянного тока имеют высокий потенциал противоположной полярности, средняя точка конденсатора постоянного тока заземлена, к полюсам присоединены балансирующие резисторы для балансировки полюсных напряжений. В этом случае вентильные обмотки преобразовательных трансформаторов не нагружены постоянной составляющей.

Применительно к мощным передачам (ППТ) и вставкам постоянного тока (ВПТ) высокого напряжения получили распространение ПН, реализованные на основе двухуровневых и трехуровневых схем с заземленной средней точкой (Neutral Point Clamped Converter). Двухуровневая схема состоит из шести транзисторных полностью управляемых вентиляей. Она ►

Рис. 4

Оборудование для МСПТ СН:

- а) конденсаторный выключатель постоянного тока;
б) преобразовательный модуль.



- не всегда приемлема, поскольку качество фазного тока может быть обеспечено только при высокой частоте коммутации, что увеличивает потери ПН.

Трехуровневая схема с соединительными диодами отличается от двухуровневой тем, что в каждом плече преобразователя количество управляемых вентилях удваивается, средние точки «плеч» через специальные соединительные диоды подключаются к средней точке на стороне постоянного тока (средней точке конденсаторной батареи). Замена диодов на дополнительные полностью управляемые вентили позволяет уменьшить длительность проводящего состояния и число коммутаций фазных вентилях, а также достичь более равномерной загрузки вентилях по току. Вентили, имеющие подвесное исполнение, монтируются внутри сталеалюминиевого контейнера для улучшения ЭМС преобразователя, а также условий транспортировки.

Кроме того, в контейнере расположена конденсаторная батарея для накопления энергии, создания контура с низкой индуктивностью для отключаемого тока, сглаживания колебаний постоянного напряжения. Указанная батарея выполняется на основе сухих конденсаторов, изготовленных из самовосстанавливающейся металлизированной пленки, и отличается компактными размерами и низкой собственной индуктивностью. Трехфазный воздушный реактор предназначен для сглаживания фазного напряжения преобразователя, обеспечения возможности регулирования активной и реактивной мощностей преобразователя, снижения токов КЗ.

В состав ПП входят также два или три заземленных или разземленных фильтра высших гармоник на стороне переменного тока. Суммарная мощность фильтров обычно составляет 20–30% от номинальной активной мощности передачи. Следует отметить, что фильтрация определенных гармоник также осуществляется за счет применения специальных видов ШИМ.

Предвключенный резистор в цепи выключателя предназначен для ограничения бросков тока при включении преобразователя в процессе заряда конденсаторов.

Минимизация мощности фильтров в сочетании с использованием сухих реакторов и сухих конденсаторов позволила существенно снизить площадь ПП. Например, габариты ПП ППТ пропускной способностью 350 МВт, напряжением постоянного тока ± 150 кВ – $80 \times 25 \times 11$ м. Габариты ППТ Valhall – ПП в компактном исполнении, расположенной на платформе в открытом море, пропускной способностью 80 МВт, напряжением постоянного тока 150 кВ – $16 \times 30 \times 12$ м.

Реализованные в отечественной практике контейнерные СТАТКОМы, установленные на ПС «Выборгская» (50 МВт, 15,75 кВ) и ВПТ «Могоча» (200 МВт), подтверждают возможность поставки контейнерных ПП для районов Крайнего Севера, нефтегазовых платформ и перекачивающих станций, а также для автономного и распределенного энергоснабжения.

При этом для реализации ПП более перспективна схема многуровневой модульной преобразователя напряжения ММС, позволяющая снизить потери в вентилях примерно до 1% за

счет снижения частоты коммутации на сетевой частоте взамен сотен–тысяч Гц в трехуровневой ПП [10]. Предполагаемый ввод в эксплуатацию плавучей АЭС «Ломоносов» взамен выводимой из строя Билибинской АЭС обеспечит энергоснабжение Чукотки с помощью МСПТ СН на основе КП переменного и постоянного тока, связанных между собой кабелями или проводами со СПЭ-изоляцией, подвешенными на металлических опорах СН. Эти опоры, как и опорные фермы контейнеров, должны изолировать вечную мерзлоту от таяния и обеспечить доступ персоналу для обслуживания.

Отправная ПП большой мощности для удешевления может выполняться на фототиристорах, а приемные ПП меньшей мощности должны выполняться на IGBT. Ключевыми элементами являются разработанные в ВЭИ конденсаторные выключатели постоянного тока (рис. 4а) [11] и полупроводниковые модули (рис. 4б), созданные для замены вентилях Выборгской ПС. Эти элементы изготовлены на отечественной элементной базе и могут служить основой для реализации МСПТ СН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство для испытаний силовых трансформаторов и кабелей. Заявка № 2014145791, опубликована 17.11.2014 г., RU 160203U1, опубликована 10.03.2016, Бюл. №4, МПК G01R 31/06, патентообладатель ФГУП ВЭИ.
2. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство электроснабжения с регулируемым напряжением и перестройкой частоты // Электро. 2015. № 1. С. 48–51.
3. Мобильные подстанции до 245 кВ [www.energy.siemens.com]
4. Premset 6–10 кВ: Каталог. www.schneider-electric.ru.
5. Energy: Products&Services. www.powergeneration.siemens.com.
6. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2017. 392 с.
7. Доросев С.М. Энергетическая установка мощностью 100 кВт с электрохимическим генератором на ТОТЭ. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Забабахина.
8. Шульга Р.Н., Дружинин М.Ю., Риэр Б.А., Пестриков Р.В. Контейнерное распределительное преобразовательно-стабилизирующее устройство для применения в кабельных сетях // Новости ЭлектроТехники. 2018. № 1(109). С. 34–37.
9. Mattsson I., Railing B.D., Williams B., Moreau G., Clarke C.D., Ericsson A., Miller J.J. Murraylink, the longest underground HVDC cable in the world. B4-103 // CIRGE Session. 2004.
10. Сулова О. В., Шульга Р. Н. Технико-экономические характеристики преобразовательных подстанций для электропередач и вставок постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2017. № 1(76). С. 125–139.
11. Выключатель постоянного тока вакуумный типа ВПТВ-15-5/400: ТУ 16-674.068-86.