УДК 621.314.58

О. В. Суслова, Р. Н. Шульга

Технико-экономические характеристики преобразовательных подстанций для электропередач и вставок постоянного тока

Проведен сравнительный анализ технико-экономических характеристик, схемных решений, областей применения преобразователей для передач постоянного тока высокого напряжения по материалам зарубежных производителей.

Ключевые слова: преобразовательная подстанция, тиристорный вентиль, полностью управляемый вентиль, преобразователь тока, преобразователь напряжения, двухуровневая схема, трехуровневая схема, модульный многоуровневый преобразователь напряжения, однолинейная схема преобразовательной подстанции, стоимость.

Введение

Развитие технологий электропередачи постоянным током является одним из глобальных трендов развития электроэнергетики. Передачи электрической мощности постоянным током высокого напряжения развиваются и реализовываются в промышленных масштабах с начала 50 х годов прошлого столетия. В последние годы число проектов передач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ) в мировой энергетике значительно возросло. По приблизительным подсчётам за пять десятилетий с начала 50-х по конец 90-х годов прошлого века в мире введено в эксплуатацию около 100 объектов постоянного тока на напряжение выше 50 кВ, за десятилетие 2000–2010 гг. – около 40, начиная с 2010 года и на перспективу до 2020 года строится и запланировано к строительству более 80 объектов постоянного тока.

В преобразовательной части большинства функционирующих и проектируемых ВПТ и ППТ используются два типа преобразователей: преобразователь тока (ПТ) с тиристорными вентилями и преобразователь напряжения (ПН) с вентилями на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов. Они отличаются элементной базой, техническими и ценовыми характеристиками, областями применения.

Целью настоящей статьи является обобщение областей применения, схемотехнических решений и характеристик преобразовательных подстанций для ППТ и ВПТ на основе анализа материалов зарубежных производителей.

1. Преобразовательные подстанции с использованием преобразователей тока

Преобразователи тока для ППТ и ВПТ получили промышленное применение в 1950-х годах. Первые преобразователи были построены на основе ртутных вентилей, с начала 1970-х годов они строятся на основе тиристорных вентилей. Свойства этих преобразователей хорошо изучены, особенностям их функционирования посвящено множество публикаций, как в России, так и за рубежом, например [1, 2].

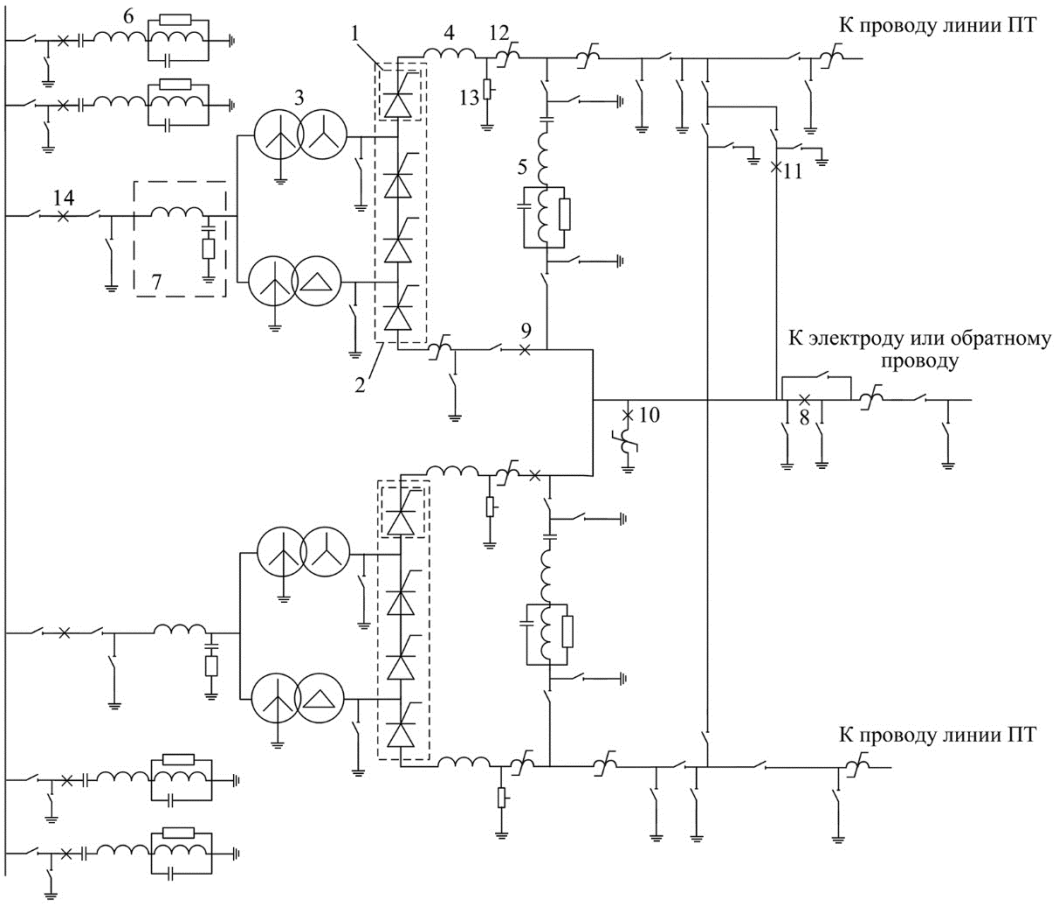

Рис. 1. Однолинейная схема преобразовательной подстанции с применением преобразователей тока:
1 – высоковольтный вентиль; 2 – счетверенный вентиль; 3 – преобразовательный трансформатор; 4 – сглаживающий реактор; 5 – фильтр гармоник на стороне постоянного тока; 6 – фильтры гармоник на стороне переменного тока; 7 – фильтр нижних частот; 8, 9, 10, 11 – система выключателей в распредустройстве постоянного тока; 12 – датчик тока; 13 – датчик напряжения; 14 – выключатель полюса

На рис. 1 представлена типовая схема преобразовательной подстанции (ПП) биполярной передачи постоянного тока с использованием преобразователей тока [2].

Основой преобразовательной схемы служит шестипульсная мостовая схема, состоящая из шести тиристорных вентилей. Вентиль преобразователя состоит из нескольких последовательно соединенных модулей, сформированных из идентичных тиристорных ячеек (ТЯ) и анодных реакторов. Каждая тиристорная ячейка состоит из непосредственно тиристора, модуля управления тиристором, демпфирующих и выравнивающих цепей, присоединенных параллельно к ТЯ. Демпирующие цепи обеспечивают равномерное распределение напряжения по компонентам вентиля. Они также служат для снижения величин напряжения и тока в переходных процессах при отпирании вентиля и восстановлении напряжения на нем. Ячейка управления тиристором обеспечивает формирование управляющего сигнала на управляющем электроде тиристора в нормальном и аварином режимах. Последова-

тельно с ТЯ или с вентильной секций, состоящей из нескольких последовательно соединенных ТЯ, устанавливаются насыщающиеся реакторы для ограничения скорости нарастания тока в первые моменты времени после включения тиристора, а также скорости изменения напряжения при отключенном состоянии тиристора. Несколько вентилей формируют многовентильный блок (МВБ). Как правило, в одном блоке содержатся четыре вентиля (счетверенный вентиль). Почти все современные тиристорные вентили охлаждаются деоинизированной водой или смесью деионизированной воды и этилен гликоля.

Преобразовательные трансформаторы служат для объединения шестипульсных мостов в двенадцатипульсную схему, а также для связи с сетью переменного тока и согласования напряжения преобразователя с напряжением сети. Сглаживающие реакторы с индуктивностью порядка сотен мГн предназначены для сглаживания пульсаций постоянного тока в линии, предотвращения прерывания тока при малой нагрузке ППТ и ограничения токов короткого замыкания в линии постоянного тока. Фильтры высших гармоник на стороне переменного тока служат для фильтрации токов высших гармоник, генерируемых преобразователями, а также для компенсации части реактивной мощности, потребляемой преобразователями.

Фильтры высших гармоник на стороне постоянного тока предназначены для улучшения гармонического состава постоянного тока. Источники реактивной мощности компенсируют реактивную мощность, потребляемую преобразователями, которая в нормальных установившихся режимах ППТ может достигать величины примерно 50 % от передаваемой по ППТ активной мощности.

Для минимизации влияния высокочастотных помех, генерируемых преобразовательным оборудованием на оборудование примыкающей сети переменного тока используется фильтр нижних частот 7 (в зарубежной терминологии это устройство называется «*PLC-filter*»).

Выключатели 8 и 11 предназначены для переключения обратного тока из земли в линию неиспользуемого полюса, если ППТ временно функционирует в униполярном режиме. Выключатель 10 замыкается при аварии на электроде или обратном проводе, обеспечивая временный возврат тока через землю. Выключатель 9 используется для отвода постоянного тока от блокированного полюса на землю.

К основному оборудованию подстанции также должна быть отнесена система управления регулирования и защиты преобразователей.

Преобразователи с тиристорными вентилями применяются в составе воздушных и кабельных ППТ различных классов напряжения от 250 до 800 кВ. Среди задач, решаемых с помощью этих ППТ, можно отметить следующие: передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния; коммерческая передача электроэнергии; увеличение надежности энергоснабжения; оптимальное распределение мощности электростанций между энергосистемами, компенсация суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей, выравнивание пиков нагрузки и потребления, передача электроэнергии через протяженные водные и наземные преграды.

В табл. 1 приведены примеры кабельных и воздушных ППТ с преобразователями тока.

Таблица 1

Примеры ППТ с преобразователями тока

Название, год ввода, страна	Напряжение, кВ	Мощность, МВт	Длина ВЛ/КЛ, км	Основное назначение
Нептун, 2007, США	500	600	102 (КЛ)	Надежное энергоснабжение потребителей островной энергосистемы
Basslink, 2006, Австралия	400	500	290 (КЛ)	Выравнивание пиков нагрузки и потребления
Cometa, 2011, Испания	±250	400	247 (КЛ)	Надежное энергоснабжение потребителей островной энергосистемы
SAPEI, 2011, Италия	±500	1000	435(КЛ)	Надежное энергоснабжение потребителей островной энергосистемы, получение энергии от ветроэлектрических станций (ВЭС)
Brit-Ned, 2011, Великобритания – Нидерланды	±500	1000	260 (КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения энергосистем, компенсация колебаний генерируемых мощностей, свойственных ветровым электростанциям
Nuozhadu-Guangdong, 2013, Китай	±800	5000	1451(ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния
Xiluodu-Zhejiang, 2014, Китай	±800	8000	1688 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния

Преобразовательная подстанция ППТ или ВПТ обычно занимает большую площадь, чем подстанция для передачи переменного тока той же мощности. На рис. 2. показана типичная подстанция ППТ с номинальной мощностью 600 МВт. Такая подстанция занимает участок размером 90×180 м.

Основное оборудование подстанции ППТ занимает:

- здание тиристорного преобразователя – 8 % общей площади подстанции;
- фильтры переменного тока – 35 %;
- распределительное устройство переменного тока и трансформаторы – 45 %;
- оборудование постоянного тока – 11 %.

Преобразовательная подстанция биполярной ППТ пропускной способностью 1 ГВт напряжением постоянного тока ±500 кВ занимает участок размером 180×240 м, пропускной способностью 2 ГВт – участок размером 330×385м, пропускной способностью 5 ГВт напряжением ±800 кВ – участок размером 394×560 м. Характерной особенностью этих ПП является то, что распределительные устройства переменного тока и фильтры переменного тока занимают более 50 % общей площади преобразовательной подстанции.

На рис. 3 показана зависимость удельной стоимости преобразовательной подстанции ППТ (US$/кВт) от ее мощности (МВт), которая с увеличением мощности преобразователя снижается. Стоимость варьируется в зависимости от класса

напряжения объекта, особенностей территории, на которой сооружается ПП. В табл. 2 приведены стоимостные показатели подстанций ППТ по каждому виду оборудования в виде отношения (в процентах) к удельной стоимости затрат на проект [3].

Достоинства ПП с применением тиристорных вентилей:

- это хорошо отработанная технология преобразования энергии, имеется длительный опыт ее использования с начала 70-х годов XX века;
- низкие потери мощности в преобразователе тока, которые составляют 0,8–0,85%;
- достигнуты высокие значения передаваемой мощности более 8ГВт при высоких классах напряжения до 800 кВ – для воздушных линий и до 500 кВ – для кабельных линий с вязкой пропиткой.

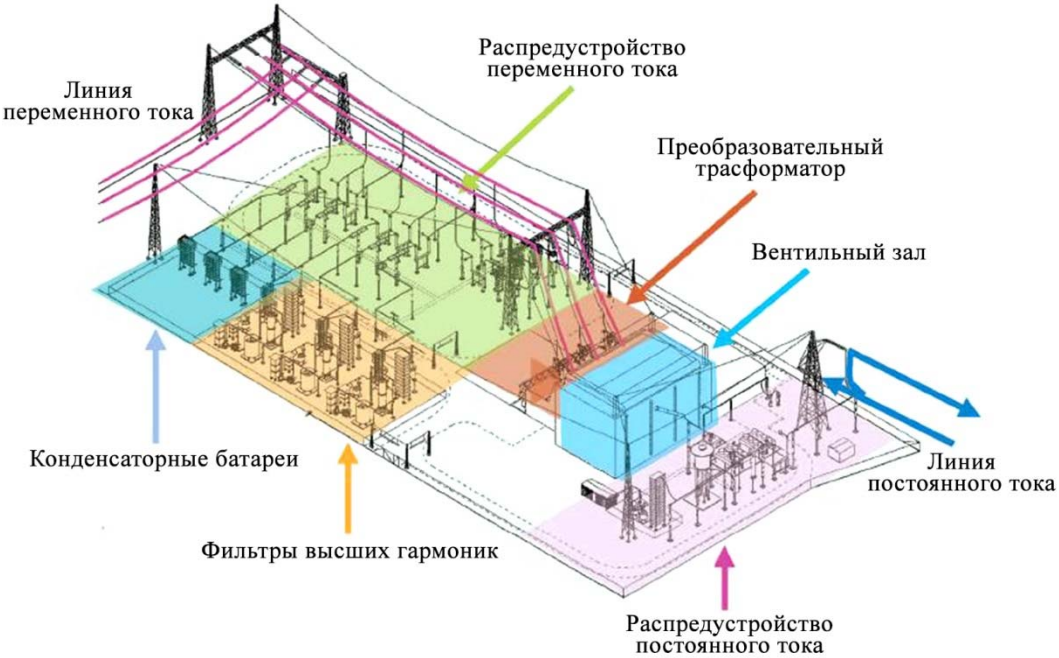

Рис. 2. Униполярная преобразовательная подстанция мощностью 600 МВт

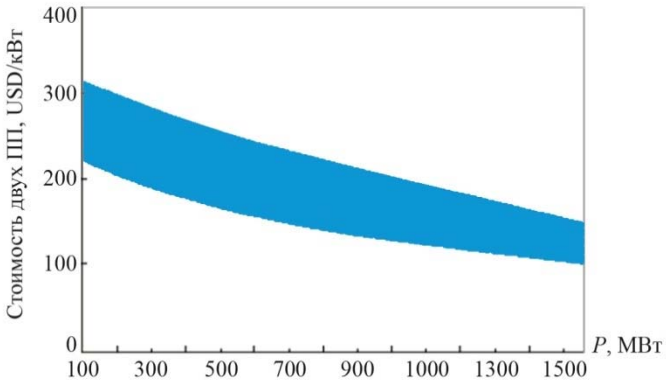

Рис. 3. Удельная стоимость ПП с преобразователями тока

Таблица 2

Стоимостные показатели преобразовательных подстанций

Параметры, виды оборудования и работ	ВПТ		Униполярная ППТ	Биполярная ППТ	
Напряжение, кВ			500	±500	±500
Мощность, МВт	200	500	500	1000	2000
Тиристоры, %	19	19	21	21	22
Преобразовательные трансформаторы, %	23	23	21	22	22
РУ и фильтры постоянного тока, %	3	3	6	6	6
РУ и фильтры переменного тока, %	11	11	10	9	9
Система управления и коммуникации, %	8	8	8	8	8
Строительно-монтажные работы, %	13	13	14	14	13
Собственные нужды, %	2	2	3	3	3
Разработка и администрирование, %	21	21	17	17	17
Всего, %	100	100	100	100	100
Удельная стоимость, US$/кВт	130	90	180	170	145

Примечания:
1. Устройства компенсации реактивной мощности и поддержания напряжения не учитываются.
2. Для напряжения постоянного тока ниже ±500 кВ стоимость подстанции ориентировочно снижается на 5–10 % на каждые 100 кВ.

Среди недостатков ПП с преобразователями тока можно выделить следующие.

В качестве линий передачи на основе ПП с применением ПТ невозможно использовать кабели из сшитого полиэтилена (которые дешевле, чем кабели с вязкой пропиткой для равных классов напряжения и значений тока), так как реверс мощности таких преобразователей осуществляется изменением полярности напряжения.

Для ПТ характерно значительное потребление реактивной мощности (до 50 % от пропускной способности преобразователя). Для ПТ требуется значительный состав конденсаторных батарей на стороне переменного тока для компенсации реактивной мощности и фильтрации ВЧ гармоник, что увеличивает площадь подстанции, удорожает ее стоимость и ограничивает применение ПТ для пассивных приемных систем и систем малой мощности сравнительно с мощностью ППТ.

ПТ имеют минимум передаваемой мощности и не могут функционировать при мощностях менее 10 % от номинальной передаваемой мощности.

3. Преобразовательные подстанции с использованием двух- и трёхуровневых преобразователей напряжения

Указанные ограничения снимает применение преобразователей напряжения с полностью управляемыми вентилями (ПУВ) на базе полупроводниковых транзисторов (IGBT). Пилотный демонстрационный проект ППТ с применением ПН мощностью 3 МВт был запущен компанией ABB в 1997 г.

Мощные преобразователи напряжения обычно строятся на основе мостовых схем, состоящих из высоковольтных запираемых вентилей, управляемых с высокой (до нескольких тысяч герц) частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 4 представлена схема подстанции ППТ с использованием преобразователей напряжения на примере ППТ Мирралинк пропускной способностью 200 МВт [4]. Как правило, они 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.

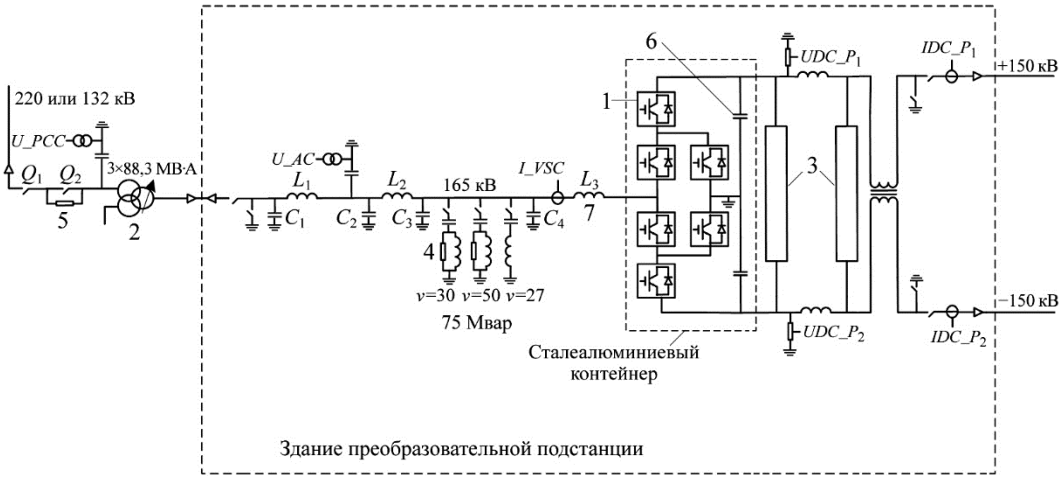

Рис. 4. Однолинейная схема преобразовательной подстанции с применением трехуровневых преобразователей напряжения:
1 – полностью управляемый высоковольтный транзисторный вентиль; 2 – преобразовательный трансформатор; 3, 4 – фильтры гармоник на стороне постоянного и переменного тока; 5 – предвключенный резистор; 6 – конденсатор; 7 – реактор; L_1, L_2, $C_1 – C_4$ – реакторы с воздушным сердечником и высоковольтные конденсаторные батареи фильтра нижних частот

Кратко рассмотрим основные компоненты преобразовательной подстанции.

Применительно к мощным ППТ и ВПТ высокого напряжения получили распространение преобразователи напряжения, реализованные на основе двухуровневых и трехуровневых схем с заземленной средней точкой (Neutral Point Clamped Converter) [5]. Двухуровневая схема состоит шести транзисторных полностью управляемых вентилей. Она 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 вентилей удваивается, средние точки «плеч» через специальные соединительные диоды подключается к средней точке на стороне постоянного тока (средней точке конденсаторной батареи). Замена диодов на дополнительные полностью управляемые вентили (рис. 4) позволяет уменьшить длительность проводящего состояния и число коммутаций фазных вентилей, а также достичь более равномерной загрузки вентилей по току. Вентили, имеющие подвесное исполнение, монтируется внутри сталеалюминиевого контейнера для улучшения свойств электромагнитной совместимости преобразователя, а также условий транспортировки.

Также в контейнере расположена конденсаторная батарея, основное назначение которой состоит в обеспечении накопления энергии, создании контура с низкой индуктивностью для отключаемого тока, сглаживании 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 короткого замыкания.

Также в состав преобразовательной подстанции входят 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 [6].

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 позволили добиться существенного снижения занимаемой площади преобразовательной подстанции и всего оборудования. Например, габариты ПП ППТ пропускной способностью 350 МВт напряжением постоянного тока ±150 кВ составляют 80×25×11 м (рис. 5). Габариты ПП в компактном исполнении, расположенной на платформе в открытом море ППТ Valhall пропускной способностью 80 МВт напряжением постоянного тока 150 кВ – 16×30×12 м. [7]. В соответствии с [8] площадь ПП на базе двухуровневого ПН на 23 % меньше площади ПП на базе ПТ аналогичной пропускной способности 500 МВт.

Удельная стоимость ПП с преобразователями напряжения выше стоимости ПП с применением ПТ на 20–50 %. Стоимость ПП в компактном исполнении для морских платформ будет выше.

Преобразователи напряжения имеют следующие достоинства по сравнению с преобразователями тока:

- независимое управление активной и реактивной мощностью;
- более высокое быстродействие;
- возможность работы со слабой и пассивной системой переменного тока;
- более компактные размеры;

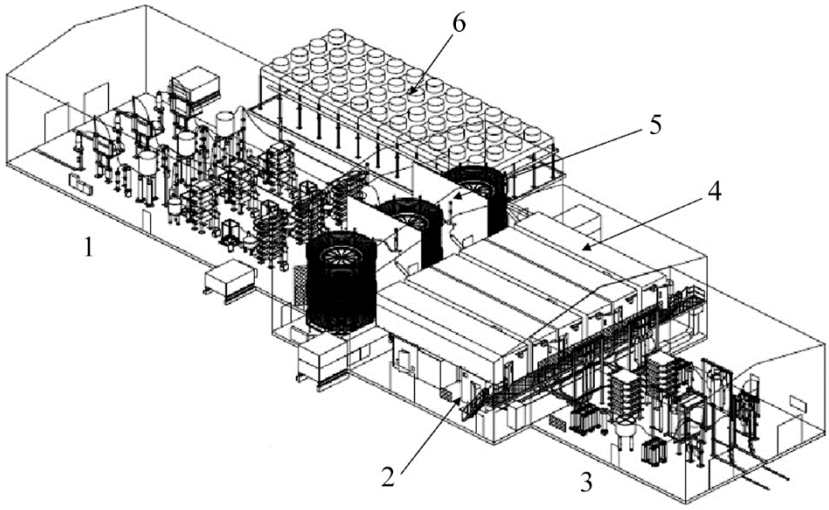

Рис. 5. Общий вид ПП 350 МВт с применением трехуровневых преобразователей напряжения:
1 – фильтры *AC*; 2 – управление; 3 – *DC* фильтр; 4 – вентили; 5 – фазный реактор; 6 – охладители

- возможность питания автономной системы переменного тока (системы, не имеющей собственных источников генерирующих мощностей);
- как правило, не требуют разработки специальных трансформаторов;
- изменение потока активной мощности возможно без изменения полярности линии (кабеля) передачи постоянного тока;
- не требуют установки мощных источников реактивной мощности, как правило, достаточно фильтров высших гармоник с выдаваемой реактивной мощностью не более 20–30 % мощности преобразователя;
- могут выполнять роль активных фильтров высших гармоник и симметрировать напряжение в примыкающей сети при применении соответствующих алгоритмов управления;
- для ППТ и ВПТ на базе преобразователей напряжения нет ограничений по минимальной передаваемой активной мощности;
- есть возможность создания объекта из готовых и испытанных в условиях завода-изготовителя модулей, что позволяет сократить время проектных и строительных работ;
- преобразователь ППТ при отключении линии постоянного тока может работать как СТАТКОМ;
- ППТ на базе преобразователей напряжения может работать при отсутствии связи между подстанциями по информационным каналам.

Благодаря этим достоинствам ППТ и ВПТ на базе преобразователей напряжения применяются для повышения надежности энергоснабжения слабых и автономных энергосистем, нефтяных и газовых платформ в открытом море, обеспечения передачи электроэнергии от ветроэлектрических станций, расположенных в открытом море. Преобразователи напряжения используются в составе воздушных и кабельных ППТ различных классов напряжения до 350 кВ.

В табл. 3 приведены примеры кабельных и воздушных ППТ с преобразователями напряжения, выполненными по двух- и трехуровневым схемам.

К недостаткам преобразователей напряжения, выполненным по двух- и трехуровневым схемам относятся:

- высокие потери мощности (для двухуровневых схем – около 3 %, для трехуровневых около 2 %);
- максимально достигнутая мощность преобразователя на сегодняшний день – 500 МВт при напряжении постоянного тока ± 200 кВ;
- транзисторные вентили чувствительны к токовым перегрузкам

Таблица 3

Примеры ППТ с преобразователями тока

Название, год ввода, страна	Напряжение, кВ	Мощность, МВт	Длина ВЛ/КЛ, км	Основное назначение
Cross Sound Cable, 2002, США	±150	330	40 (КЛ)	Обеспечение надежного энергоснабжения потребителей острова
Murray Link, 2002, Австралия	±150	200	180(КЛ)	Объединение слабых несинхронных энергосистем, коммерческая передача
Estlink, 2006, Эстония–Финляндия	±150	350	105(КЛ)	Коммерческая передача, увеличение надежности энергоснабжения
Caprivi Link, 2010, Намибия–Замбия	350	300	950 (ВЛ)	Передача электроэнергии, выработанной на тепло- и гидроэлектростанциях, на дальние расстояния в слабую энергосистему
Valhall, 2010, Норвегия	150	78	292 (КЛ)	Электрификация нефтяной платформы
EastWest, 2012, Уэльс–Ирландия	±200	500	261 (КЛ)	Коммерческая передача, увеличение надежности энергоснабжения

4. Преобразовательные подстанции с использованием модульных многоуровневых преобразователей напряжения

Преодоления указанных ограничений удалось добиться при использовании модульных многоуровневых преобразователей напряжения (МППН), которые были представлены компанией Сименс в 2005 году. ППТ с применением таких преобразователей могут строиться как по симметричной униполярной схеме, так и по ассиметричной униполярной, когда один полюс преобразователя имеет высокий потенциал, другой полюс заземлен.

На рис. 6 представлена схема подстанции ППТ с использованием модульных многоуровневых преобразователей напряжения на примере ПС Zhoushan мощностью 400 МВт, напряжением ±200 кВ пятитерминальной ППТ Zhoushan [9].

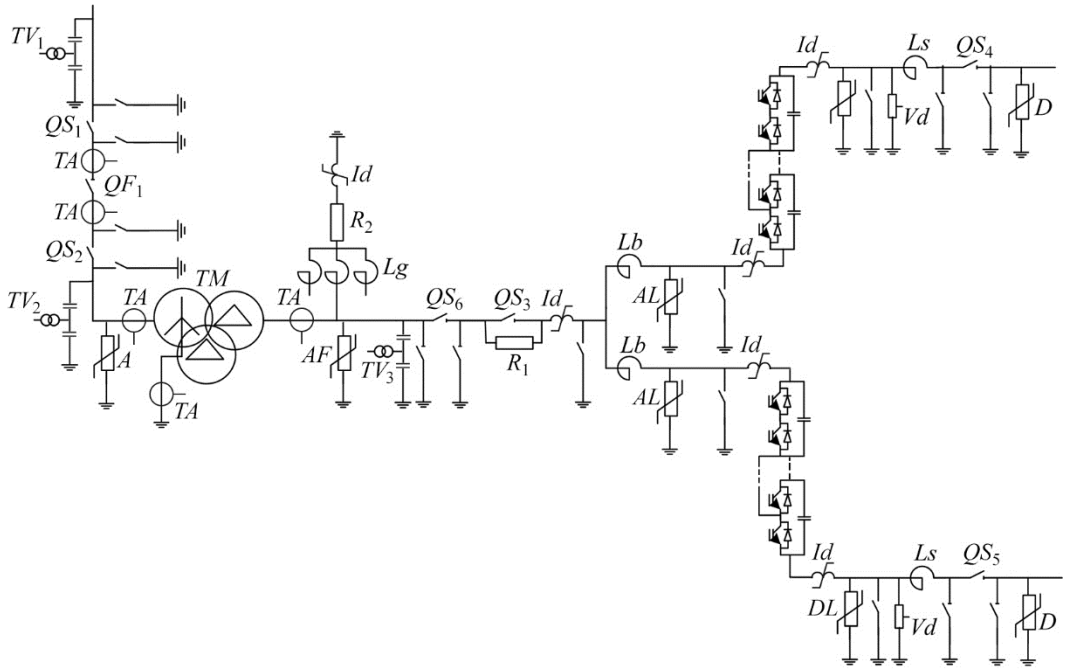

Рис. 6. Упрощенная однолинейная схема преобразовательной подстанции с применением ММПН:
TV – трансформатор напряжения; *QS* – разъединитель; *TA* – трансформатор тока; *TM* – преобразовательный трансформатор; R_1 – предвключенный резистор; R_2 – заземляющий резистор; *Lg* – заземляющий реактор; *Id* – датчик постоянного тока; *Vd* – датчик постоянного напряжения; *Lb* – реактор в плечах моста; *Ls* – сглаживающий реактор; *A*, *AF*, *AL*, *DL*, *D* – ограничители перенапряжений

Плечо такого преобразователя состоит из последовательно соединенных полумостовых или полномостовых силовых модулей. Один модуль может создавать единичный отрицательный, положительный или нулевой уровни напряжения. Результирующая синусоида фазного напряжения составляется из напряжений, генерируемых в каждом модуле. В зависимости от мощности и напряжения преобразователя в одном плече могут быть установлены до 400 модулей. Сухие реакторы в плечах моста *Lb* устанавливаются с целью сглаживания фазных токов, ограничения бросков фазных токов и циркулирующих токов, возникающих из-за переходных процессов при балансировке напряжений конденсаторов модулей. Фазы заземляющего реактора *Lg* соединены в звезду и присоединены к земле через резистор R_2. Заземляющий реактор устанавливается на одной ПП передачи с целью балансировки напряжений полюсов в случае применения симметричной униполярной схемы. ММПН имеют более сложную систему управления по сравнению с системой управления ПН, выполненных по двух- и трехуровневых схемам, так как ей необходимо выполнять в том числе и функции балансировки напряжения на большом количестве конденсаторов силовых модулей, минимизации циркулирующих токов, оптимизации количества переключений транзисторов.

Модульные многоуровневые преобразователи напряжения находят все более широкое применение в электроэнергетике благодаря таким преимуществам, как модульность конструкции, высокая надежность, низкие потери [10].

В ППТ на базе ММПН короткое замыкание на линии постоянного тока отключается выключателем со стороны переменного тока. При этом увеличивается время на восстановление передачи в нормальном режиме. Это один из факторов, который ограничивает использование ММПН в составе воздушных ППТ. Ведутся разработки различных способов защиты при коротких замыканиях, в частности, использование ММПН с полномостовыми ячейками, выключателей постоянного тока [10].

Применение ММПН позволило увеличить классы напряжений и мощность ППТ на преобразователях напряжений. В настоящее время успешно функционирует ряд ППТ напряжением ±320 кВ, несколько ППТ напряжением ±500 кВ находятся в стадии строительства, в стадии проектирования находится воздушная ППТ напряжением ±800 кВ длиной 1300 км, мощностью 5 ГВт. Таким образом, ППТ с применением ММПН в перспективе могут занять традиционную область использования ППТ с тиристорными вентилями – передача энергии большой мощности на дальние расстояния.

Уровень потерь мощности в ММПН, достигнутый на сегодня, составляет порядка 0,95–1 %. Перегрузочная способность ППТ с ММПТ (на примере ППТ Ксиамен мощностью 1 ГВт, напряжением ±320 [11] составляет 1,1–1,2 о.е. в течение 2 ч, 1,5–1,3 о.е. в течение 5 с. Стоимость одной ПП с применением ММПН составляет 102–115 евро/кВт [12].

Габариты преобразовательной подстанции биполярной ППТ пропускной способностью 1 ГВт напряжением ±320 кВ составляют 126×108×17 м, пропускной способностью 2×1 ГВт – 150×220×17 м, пропускной способностью 5 ГВт напряжением ±800 кВ (проект) – 341×323 м [12]. В соответствии с [8] площадь ПП на базе ММПН на 48 % меньше площади ПП на базе ПТ аналогичной пропускной способности 500 МВт, однако вентильный зал ММПН занимает приблизительно в 4 раза большую площадь.

Естественный низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения ММПН благодаря высокой эквивалентной частоте модуляции позволяет обойтись без установки фильтров на стороне переменного тока, и значительно уменьшить площадь преобразовательной подстанции по сравнению с площадью ПП с применением преобразователей тока.

В табл. 4 приведены примеры ППТ, выполненных с применением ММПН.

Выводы

1. ПП с применением преобразователей тока отличаются более простой схемотехникой, меньшей стоимостью вентильного оборудования, меньшими потерями (до 0,8%), но большей занимаемой площадью. Они широко используются в составе воздушных и кабельных ППТ пропускной способностью более 8ГВт при высоких классах напряжения до 800 кВ – для воздушных линий и до 500 кВ – для кабельных линий с вязкой пропиткой.

2. Среди основных преимуществ ПП с применением ПН на основе двух и трехуровневых схем по сравнению с ПП с преобразователями тока можно отметить возможность работы на автономную нагрузку и на энергосистему с низким значением ОКЗ (около 1), возможность поддержания уровня и качества напряжения

Таблица 4

Примеры ППТ ММПН

Название, год ввода, страна	**Напряжение, кВ**	**Мощность, МВт**	**Длина ВЛ/КЛ, км**	**Основное назначение**
NordBalt, 2015, Литва–Швеция	±300	700	450(КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, коммерческое назначение
Zhoushan, 2014, Китай	±200	400	134 (КЛ)	Энергоснабжение островных территорий (пятитерминальная)
Helwin2, 2015, Германия	±320	690	130 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС
Maritime, Link, 2017, Канада	±200	500	360 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС
NordLink, 2020, Норвегия–Германия	±525	1400	516 (КЛ) +53 (ВЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, коммерческое назначение
North Sea Network, 2021, Норвегия–Великобритания	±525	1400	730 (КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, коммерческое назначение

на шинах переменного тока, меньшую занимаемую площадь, отсутствие ограничений по минимальной передаваемой мощности. Однако ПН имеют сравнительно высокие потери мощности (2–3%), низкий уровень перегрузки. Максимально достигнутая пропускная способность ПН на основе двухуровневой схемы – 500 МВт при напряжении постоянного тока ±200 кВ. ПН используются преимущественно в составе кабельных ППТ пропускной способностью до 350 МВт при напряжении постоянного тока ±150 кВ. Последняя ППТ с применением ПН на основе двухуровневой схемы была введена в эксплуатацию компанией ABB в 2012 г. (ППТ East-West). Начиная с 2010–2013 гг. для ППТ и ВПТ на преобразователях напряжения применяются только преобразователи, имеющие модульную многоуровневую структуру – ММНП.

3. ПП с применением ММПН занимают наименьшую площадь по сравнению с ПП на базе преобразователей тока и на базе ПН, реализованных по двух- и трехуровневым схемам, но имеют более сложную систему управления. Потери мощности в ММПН составляют около 1%, что сопоставимо с уровнем потерь в преобразователях тока. Кратковременная перегрузочная способность составляет порядка 1,1–1,3 о.е. ММПН широко используются в составе преимущественно кабельных ППТ пропускной способностью до 1,4 ГВт при классах напряжения до 500 кВ. Ведутся работы по совершенствованию схем ММПН и управления ими с целью уменьшения потерь мощности, увеличения пропускной способности и классов

напряжении, возможности отключения токов КЗ на стороне постоянного тока без отключения преобразователей. В стадии проектирования находится воздушная ППТ напряжением ±800 кВ длиной 1300 км, пропускной способностью 5 ГВт, что позволяет сделать вывод о том, что ППТ с применением ММПН в перспективе могут занять традиционную область использования ППТ с тиристорными вентилями – передача энергии большой мощности на дальние расстояния.

Список литературы

1. *Barker C. and the others.* HVDC for beginners and beyond. Alstom, 2011. 591 с.
2. *Рыжов Ю. П.* Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
3. Economic Assessment of HVDC Links. CIGRE Working Group 14.20. June 2001.
4. *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.
5. VSC Transmission. CIGRE Working Group WG B4.37 № 269, 2005 г.
6. *Mohamed S. A. Dahidah, Georgios Konstantinou, Vassilios G. Agelidis.* A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications IEEE Transactions on Power Electronics. Year: 2015, Volume: 30, Issue: 8.
7. It's time to connect. Technical description of HVDC Light® technology. ABB, Ludvika, Sweden, 2008.
8. *Sellick R. L., Åkerberg M.* Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme. ET ACDC 2012 conference in Birmingham, UK, December 4 - 5, 2012
9. *Guangfu Tang, Member, IEEE, Zhiyuan He, Member, IEEE, Hui Pang, Xiaoming Huang, and Xiao-Ping Zhang*. Basic Topology and Key Devices of the Five-Terminal DC Grid. CSEE Journal Of Power And Energy Systems, vol. 1, no. 2, June 2015.
10. *Суслова О. В.* Современное состояние технологии электропередач постоянным током и расширение областей их применения в мировой электроэнергетике (по материалам 45-й сессии СИГРЭ). Известия НТЦ Единой энергетической системы, № 2(71), 2014, с. 154-162.
11. *Xiaojun Guo, Mingfeng Deng, Kang Wang.* Characteristics and performance of Xiamen VSC-HVDC transmission demonstration project. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016.
12. *Les Brand, Ranil de Silva, Errol Bebbington, Kalyan Chilukuri*. Grid West Project HVDC Technology Review. Отчет PSC, 2014.

Суслова Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, главный специалист Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: suslova@ntcees.ru

Шульга Роберт Николаевич, канд.техн.наук, ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.
E-mail: rnshulga@vei.ru