

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ (ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОГО КОЛЛОКВИУМА 2017 СИГРЭ А3, В4 И D1)

АВТОРЫ:

О.В. СУСЛОВА,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ЕЭС»

Л.В. ТРАВИН,
ВЗИ, ФИЛИАЛ ФГУП
«РФЯЦ-ВНИИТФ
ИМ. АКАДЕМИКА
Е.И. ЗАБАБАХИНА»

При передаче больших объемов электроэнергии на большие расстояния высоковольтные ЛЭП постоянного тока в некоторых случаях оказываются более экономичными. Такие ЛЭП позволяют повысить надежность работы, предотвращая каскадные сбои из-за рассинхронизации фазы между отдельными частями крупной энергосистемы. Современный способ передачи

электроэнергии по линиям постоянного тока (HVDC) использует технологию, разработанную в 30-х гг. XX в. шведской компанией ASEA. Одни из первых систем HVDC были введены в строй в Советском Союзе в 1950 г. между городами Москва и Кашира, где была использована немецкая трофейная техника (проект «Эльба»), и в Швеции в 1954 г. от материковой части страны до острова Готланд.

Ключевые слова: передача постоянного тока на преобразователях напряжения; модульный многоуровневый преобразователь напряжения; сети постоянного тока; многотерминальные передачи постоянного тока; передача постоянного тока ультравысокого напряжения.



Преобразовательная подстанция передачи постоянного тока Estlink 2 (Эстония — Финляндия). Мощность 650 МВт

ВВЕДЕНИЕ

С 30 сентября по 6 октября 2017 г. в г. Виннипег (Канада) прошел Международный коллоквиум СИГРЭ АЗ, В4 и D1 «Сети высокого напряжения постоянного и переменного тока — технологии будущего». Ведущие отраслевые эксперты со всего мира представили последние разработки по тематическим направлениям Исследовательских комитетов АЗ «Высоковольтное оборудование», В4 «Электропередачи постоянного тока высокого напряжения и силовая электроника» и D1 «Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики».

В данной статье представлен обзор основных тенденций развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током, выполненный на основе анализа докладов, а также информационных сообщений ведущих фирм — производителей оборудования для систем постоянного тока, представленных на коллоквиуме в рамках деятельности Исследовательского комитета В4 «Электропередачи постоянного тока высокого напряжения и силовая электроника».

ПЕРЕДАЧИ И ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА

Преобразователи тока с тиристорными вентилями для передач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ) получили промышленное применение с начала 70-х годов прошлого века.

Преобразователи тока используются в составе воздушных

ПЛАНИРУЕМЫЕ, СООРУЖАЕМЫЕ И НЕДАВНО ВВЕДЕННЫЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ КЛ И ВЛ ППТ И ВПТ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТОКА

Название, страна, годы ввода	Напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ВЛ/КЛ, км	Основное назначение
Changji — Guquan, Китай, 2017–2018	± 1100	12 000	3284 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния
North East — Agra, Индия, 2015–2017	± 800	6000	1725 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния от гидроэлектростанций, четырехтерминальная
Western HVDC Link, Англия, 2017	± 600	2250	422 (КЛ)	Передача энергии от ветроэлектрических станций через водные преграды (Шотландия — Англия, Уэльс)
Bipole III, Manitoba Hydro, Канада, 2018	± 500	2000	1400 (ВЛ)	Обеспечение дополнительных возможностей для передачи мощности от ветроэлектрических станций, расположенных на севере Манитобы, к центрам нагрузки около Виннипега, увеличение надежности энергоснабжения
BeloMonte 1, Бразилия, 2018	± 800	4000	2092 (ВЛ)	Передача электроэнергии от гидроэлектростанций к центрам нагрузки
Champa — Kurukshetra, Индия, 2017–2018	± 800	2×3000	1300 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния
Bangladesh, Block II, Индия — Бангладеш, 2018	± 158	500	0	Асинхронная связь, коммерческая передача
Buk-Dangjin — Godeok, Южная Корея, 2018	± 500	1500	34 (КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения крупных мегаполисов
Labrador-Island link, Канада, 2018	± 350	900	400 + 700 (ВЛ) + 35 (КЛ)	Передача электроэнергии от гидроэлектростанций, находящихся на материке, для обеспечения энергоснабжения острова Лабрадор
Matiari — Lahore, Пакистан, 2019	± 660	4000	1192 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния
Electricity Highway Project, Эфиопия — Кения, 2019	± 500	2000	1045 (ВЛ)	Передача электроэнергии от гидроэлектростанций в Эфиопии, коммерческая передача
Raigarah — Pugalur (RP800), Индия, 2020	± 800	6000	1830 (ВЛ)	Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния с возможностью реверса, увеличение надежности энергоснабжения

Таблица 1

(ВЛ) и кабельных линий (КЛ) ППТ различных классов напряжения — от 250 до 1100 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.

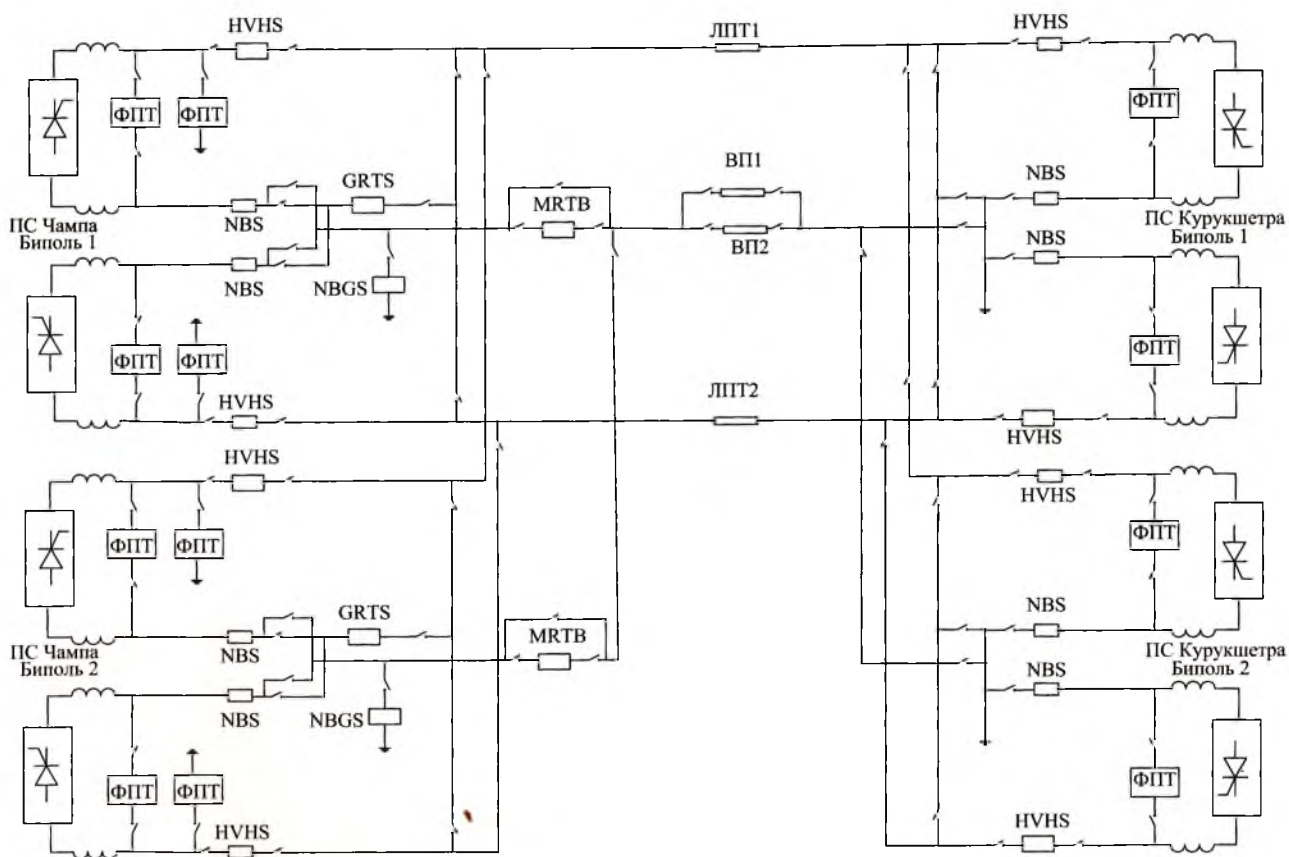
В табл/ 1 приведены примеры планируемых, сооружаемых и недавно введенных в эксплуатацию КЛ и ВЛ ППТ с преобразователями тока.

Одной из тенденций применения технологий постоянного тока является передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния с использованием передач постоянного тока ультравысокого напряжения (ППТ УВН). Лидерами в области эксплуатации таких проектов являются Китай, Индия,

Бразилия, где использование ППТ УВН связано с неравномерностью распределения энергоресурсов и центров потребления электроэнергии по территории страны. Например, в Китае в настоящее время функционируют 14 ППТ УВН с напряжением ± 800 кВ и три ППТ находятся на стадии сооружения.

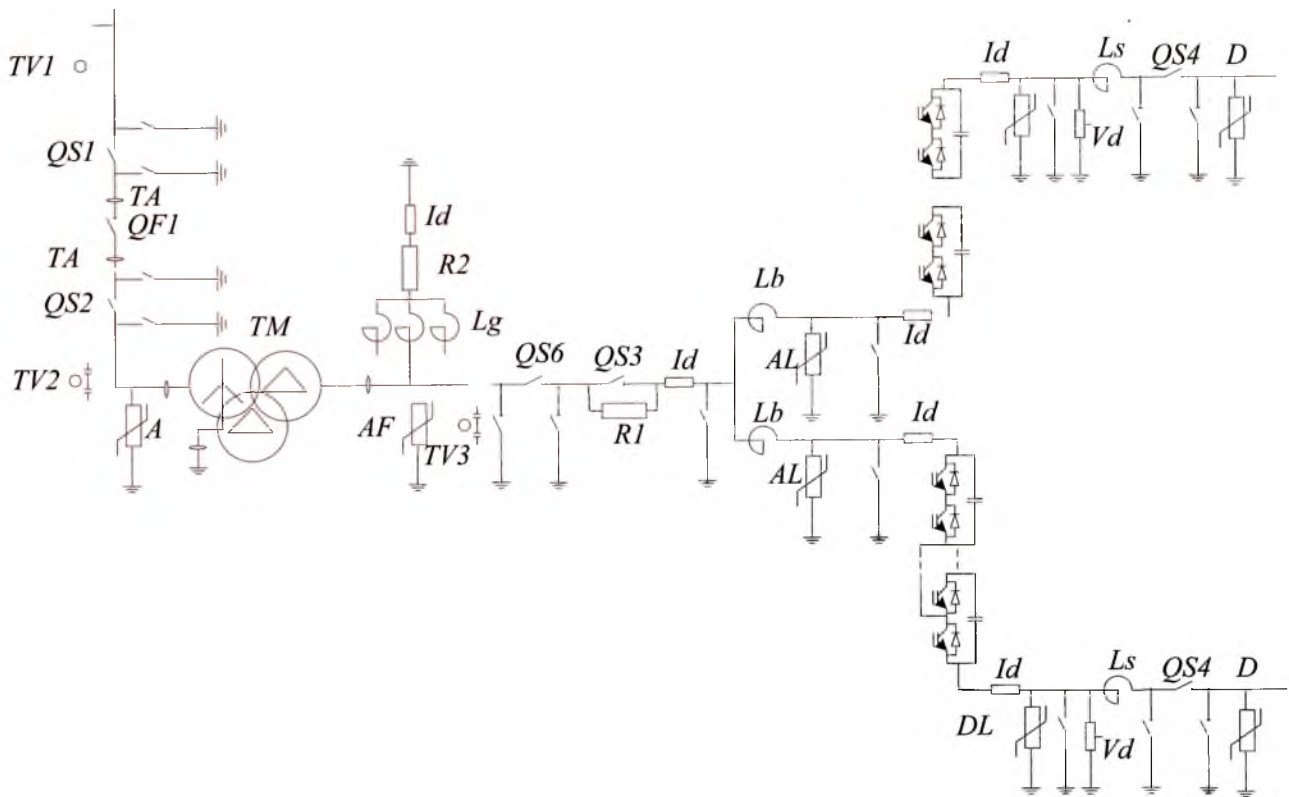
ППТ УВН с напряжением ± 800 кВ являются оптимальным решением при передаче электроэнергии на расстоянии до 2 тыс. км. Создание передач УВН с напряжением ± 1100 кВ связано с необходимостью уменьшать потери при передаче

ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ППТ ШАМРА — KURUKSHETRA



ФПТ — фильтр постоянного тока; ВП — возвратный провод; ЛПТ — линия постоянного тока; MRTB (Metallic Return Transfer Breaker) — выключатель в возвратном проводе; HVHS — быстродействующий отделитель в полюсах; NBS (Neutral Bus Switch) — отделитель нейтральной шины; NBGS (Neutral Bus Ground Switch) — заземляющий выключатель нейтрального провода; GRTS (Ground Return Transfer Switch) — коммутационный аппарат для переключения возвратного провода

УПРОЩЕННАЯ ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ММПН



TV — трансформатор напряжения; QS — разъединитель; TA — трансформатор тока; TM — преобразовательный трансформатор; R1 — предвключенный резистор; R2 — 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

Рис. 2

электроэнергии на дальние расстояния. Компания ABB разработала прототипы оборудования для ППТ с напряжением ± 1100 кВ, включая трансформаторы, вводы, высоковольтный вентиль, реактор, разъединитель ПТ и т.д. Предложены решения по транспортировке и сборке оборудования, обеспечению процесса ремонта, технические решения по линии электропередачи. Компания ABB выиграла тендер на поставку оборудования для первой ППТ с напряжением ± 1100 кВ в Китае пропускной способностью 11 ГВт, длиной ВЛ 3284 км Changji —

Guquan. Планируемые сроки ввода в эксплуатацию этой ППТ — 2017–2018 гг.

Наметилась тенденция создания многотерминальных ППТ (МППТ) ультравысокого напряжения, объединяющих три и более преобразовательные подстанции. Среди достоинств МППТ по сравнению с двухтерминальными ППТ отмечаются возможности их поэтапного построения путем расширения двухтерминальных передач, связи нескольких энергосистем, гибкого регулирования мощности.

К наиболее сложным и интересным объектам можно отнести ППТ Champra — Kurukshetra с напряжением ± 800 кВ, длиной ВЛ 1300 км, предназначенной для передачи электроэнергии от электростанций, находящихся в регионе Чампа, к центрам нагрузки в регионе Курукшетра в Индии [1]. Особенность этой ППТ заключается в том, что передающая и приемная преобразовательные подстанции состоят из двух биполей, подключенных параллельно, т.е. фактически это четырехтерминальная ППТ. Пропускная способность каждого биполя — 3000 МВт,

допускается 10 %-я длительная перегрузка и 20 %-я кратковременная перегрузка в течение 2 ч. Линия постоянного тока состоит из двух полюсных проводов и двух возврат-

ных проводов. Коммутационная аппаратура рассчитана на перегрузки по току при условии функционирования всех биполей, с ее помощью можно изменять конфигурацию схе-

мы, отсоединяя биполь, например, в случае аварии, планового ремонта или по схемно-режимным условиям. Упрощенная схема ППТ представлена на рис. 1 [1].

ПЛАНИРУЕМЫЕ, СООРУЖАЕМЫЕ И НЕДАВНО ВВЕДЕННЫЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ КЛ И ВЛ ППТ И ВПТ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Название, страна, год ввода	Напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ВЛ/КЛ, км	Основное назначение
ÅL-link, Финляндия, Швеция, 2015	± 80	100	158 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС
Maritime Link, Канада, 2017	± 200	500	140 (ВЛ) 220 (КЛ)	Передача электроэнергии от ВЭС, расположенных на территории Ньюфаундленда и Лабрадора, в энергосистему полуострова Новая Шотландия
Dolwin 3, Германия, 2017	± 320	900	162 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС
Tres Amigas, США, 2018	± 300	750	0	Обмен между ЭС электроэнергией, полученной от возобновляемых источников
Caithness Moray, Шотландия, 2018	± 320	1200	160 (КЛ)	Усиление электрической сети, сбор мощности от ВЭС
Vogwin 3, Германия, 2019	± 320	900	160 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС
Nemo, Англия — Бельгия, 2019	± 400	1000	140 (КЛ)	Соединение несинхронно работающих энергосистем, коммерческая передача, интеграция энергосистемы Европы
Cobra Cable, Голландия — Нидерланды, 2019	± 320	700	325 (КЛ)	Компенсация суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей, увеличение надежности энергоснабжения
Johan Sverdrup, Норвегия, 2019	± 80	100	200 (КЛ)	Энергоснабжение оффшорной платформы
Kriegers Flak, Германия, 2019	± 140	400	0	Получение мощности от ВЭС, соединение несинхронных энергосистем
ElecLink, Франция — Англия, 2019	± 320	1000	51 (КЛ)	Интеграция рынков электроэнергии
NordLink, Норвегия — Германия, 2020	± 525	1400	570 (КЛ) + 53 (ВЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, коммерческое назначение, компенсация суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей
IFA2, Франция — Англия, 2020	± 320	2 × 1000	240 (КЛ)	Компенсация суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей, выравнивание пиков нагрузки и потребления, увеличение надежности энергоснабжения
PK2000, Pugalur — Trichur, Индия, 2020	± 320	2 × 1000	142 (ВЛ), 32 (КЛ)	Энергоснабжение дефицитной энергосистемы
Allegro, Бельгия — Германия, 2020	± 320	1000	75 (КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения
North Sea Network, Норвегия — Англия, 2021	± 525	1400	730 (КЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, коммерческое назначение, компенсация суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей
ZHANGBEI, Китай, 2019–2021	± 500	3000 (P _{dс} max)	500 (ВЛ)	Увеличение надежности энергоснабжения потребителей, сеть ПТ
Shetland, Шотландия, 2021	± 80	60	250 (КЛ)	Энергоснабжение островного потребителя
UltraNet, Германия, 2022	± 380	2000	340 (ВЛ)	Перевод линии переменного тока напряжением 380 кВ на постоянный ток. Демонстрационный проект
Dolwin 6, Германия, 2023	± 320	900	90 (КЛ)	Сбор мощности от ВЭС

Таблица 2

Компания АВВ в 2015–2017 гг. ввела в эксплуатацию в Индии четырехтерминальную ППТ УВН с напряжением ± 800 кВ, номинальной мощностью 6000 МВт North-East Agra link [2]. Передача содержит две выпрямительные подстанции — Biswanath Chariali и Alipurduar, связанные ВЛ длиной 432 км, и приемную подстанцию Агра, на которой расположены два параллельно соединенных инверторных преобразователя. Полная длина ВЛ составляет 1725 км.

ПЕРЕДАЧИ И ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЬНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПЯЖЕНИЯ

Преобразователи напряжения имеют ряд достоинств по сравнению с преобразователями тока, в том числе [3]:

- независимое управление активной и реактивной мощностью;
- более высокое быстродействие, возможность работы со слабой и пассивной системой переменного тока;
- для ППТ и ВПТ на базе преобразователей напряжения нет ограничений по минимальной передаваемой активной мощности;
- преобразователь ППТ при отключении линии постоянного тока может работать как СТАТКОМ и др.

Благодаря этим достоинствам, ППТ и ВПТ на базе преобразователей напряжения применяются для повышения надежности энерго-

СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПТ ZHANGBEI

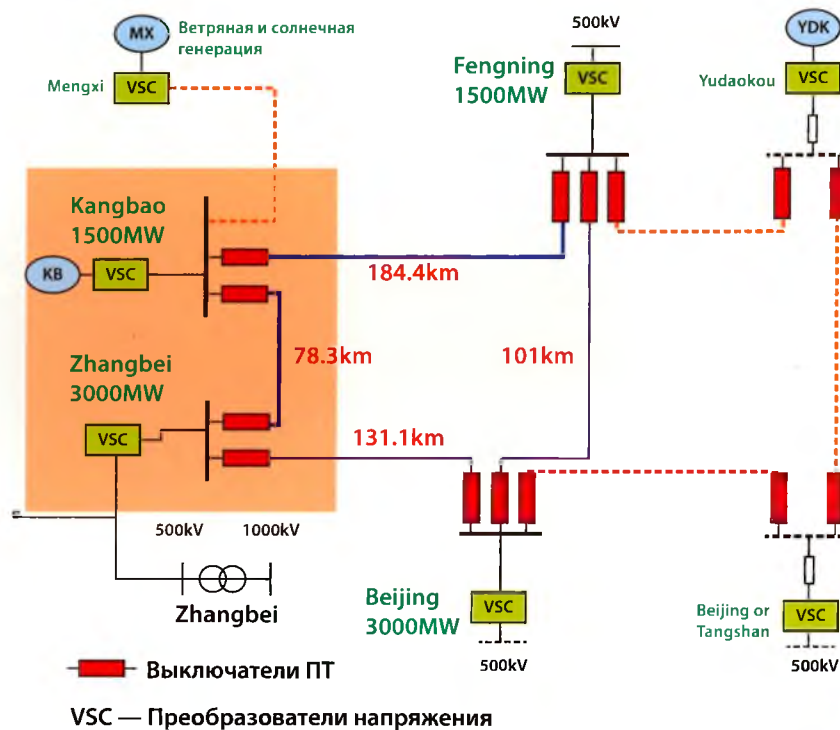


Рис. 3

снабжения слабых и автономных энергосистем, нефтяных и газовых платформ в открытом море, обеспечения передачи электроэнергии от ветроэлектрических станций (ВЭС), расположенных в открытом море, компенсации суточных и сезонных колебаний генерируемых мощностей, сохранения стабильности напряжения в сети переменного тока. Преобразователи напряжения используются в составе ВЛ и КЛ ППТ различных классов напряжения до 525 кВ.

В настоящее время все вводимые в эксплуатацию и проектируемые преобразователи напряжения для ППТ и ВПТ строятся на основе модульных многоуровневых схем. К преимуществам модульных

многоуровневых преобразователей напряжения (ММПН) относятся модульность конструкции, высокая надежность, низкие потери (порядка 0,95–1 %).

ППТ с применением таких преобразователей могут строиться как по симметричной монополярной схеме, так и по асимметричной монополярной, когда один полюс преобразователя имеет высокий потенциал, а другой полюс заземлен.

На рис. 2 представлена типовая схема преобразовательной подстанции (ПП) с использованием преобразователей напряжения, описание основных элементов которой приведено в работе О.В. Сусловой и Р.Н. Шульги [3].

В табл. 2 приведены примеры планируемых, сооружаемых и недавно введенных в эксплуатацию КЛ и ВЛ ППТ и ВПТ с преобразователями напряжения.

Наметилась тенденция создания многотерминальных ППТН (МППТН), объединяющих три и более преобразовательные подстанции с применением ММПН. В Китае в 2013 и 2014 г. были запущены в эксплуатацию две кабельные многотерминальные передачи: трехтерминальная (проект Nanao) ППТН с напряжением ± 160 кВ, мощностью 200 МВт для передачи энергии с ВЭС и пятитерминальная (проект Zhoushan) с напряжением ± 200 кВ, мощностью 400 МВт для энергоснабжения островных территорий.

Также в Китае в стадии строительства находится сеть постоянного тока СПТ Zhangbei с напряжением ± 500 кВ, ВЛ постоянного тока (рис. 3), планируемая к вводу в эксплуатацию в 2019–2021 гг. Назначение СПТ Zhangbei — увеличение надежности энергоснабжения потребителей, получение электроэнергии от ветряных и солнечных электростанций.

В большинстве кабельных ППТН на сегодняшний день при коротком замыкании на кабеле постоянного тока преобразователи отключаются выключателем со стороны переменного тока. При этом увеличивается время на восстановление передачи в нормальном режиме. В сетях ПТ и МППТН в случае КЗ на одном кабеле ПТ необходимо отключать все преобразователи, входящие в эту сеть, что создает значительное возмущающее воздействие в примыкающих сетях переменного тока. В настоящее время ведутся разработки различных стратегий защиты СПТ и МППТН при коротких замыканиях [4]: снабжение каждого присоединения с двух сторон выключателями

постоянного тока, использование многоуровневых ПН с полномостовыми модулями.

Первый способ применен в схеме СПТ Zhangbei (см. рис. 3). Специалисты из Китая представили гибридный быстродействующий выключатель постоянного тока на класс напряжения 500 кВ [5]. Схема выключателя и фотография его прототипа приведена на рис. 4, 5.

Выключатель работает следующим образом. В нормальном режиме ток протекает через ветвь нагрузки, в которую включен быстродействующий разъединитель S1 и вспомогательный выключатель Q1, ток в ветви основного выключателя ПТ Q2 не протекает.

Падение напряжения на вспомогательном выключателе Q1, находящемся в проводящем состоянии, составляет несколько вольт при классе напряжения устройства в несколько сотен киловольт, что обеспечивает минимальные потери в нормальном режиме.

При возникновении короткого замыкания транзисторы основного выключателя Q2 переходят в проводящее состояние, ток распределяется по двум цепям Q2, D1, D4 (или D2, D3 в случае, если ток протекает в обратном направлении) и Q1. Вспомогательный выключатель Q1 закрывается, сопротивление основной ветви становится большим, ток перенаправляется в обходную цепь Q2, D1, D4 (или D2, D3). Быстродействующий разъединитель S1 размыкается, изолируя вспомогательный выключатель от высокого напряжения на обходной цепи. Транзисторы основного выключателя переходят в непроводящее состояние, ток, коммутируемый в разрядник MOV1, уменьшается до нуля. По данным доклада Кирби и соавторов [5], выключатель может отключить ток

до 25 кА, время срабатывания составляет 3 мс, номинальный ток ветви нагрузки выключателя равен 3 кА.

В докладе Кирби и соавторов [5] рассматривается возможность энер-

СХЕМА ГИБРИДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

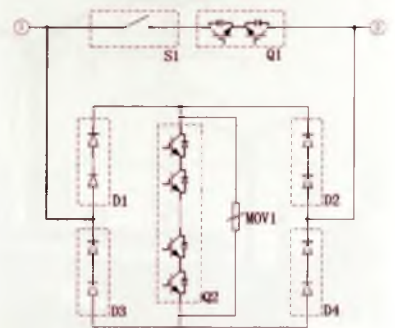


Рис. 4

ПРОТОТИП ГИБРИДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Рис. 5

СХЕМА РАССТАНОВКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ МНОГОПОДСТАНЦИОННОЙ ППТ (ПОБЕРЕЖЬЕ КАНАДЫ) ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ



Рис. 6

госнабжения удаленных поселений с использованием ППТ. Речь идет об удаленных населенных пунктах и промышленных предприятиях в Канаде, нагрузка которых составляет от нескольких сотен киловатт до нескольких десятков мегаватт. Присоединение изолированных нагрузок к центральным сетям линиями переменного тока экономически невыгодно, в том числе из-за высоких потерь мощности и значительной длины линий, по которым нужно передавать электроэнергию

небольшой мощности. Традиционно энергоснабжение таких потребителей осуществляется при помощи дизельных электростанций небольшой мощности. Недостатками подобных установок являются низкий коэффициент полезного действия, высокая стоимость электроэнергии, существенная экологическая нагрузка на окружающую среду.

Обеспечение снабжения электроэнергией удаленных потребителей от единой электрической сети

при помощи кабельной передачи постоянного тока позволит сократить суммарное потребление топлива на выработку электроэнергии (даже с учетом потерь в кабельной передаче), приведет к уменьшению выброса CO_2 в атмосферу, повысит надежность и понизит стоимость электроснабжения потребителей. Применение передач на преобразователях напряжения позволит решить проблему энергоснабжения автономного потребителя.

В докладе Кирби и соавторов [5] предлагается осуществлять энергоснабжение при помощи многоподстанционной ППТ на преобразователях напряжения с воздушными линиями постоянного тока. Пример схемы расстановки преобразователей и их пропускная способность приведены на рис. 6. Экономически выгодный уровень напряжения передачи составляет ± 100 кВ. ППТ проектируется с учетом перспективы расширения путем присоединения новых выпрямительных и инверторных преобразовательных подстанций. Такой способ энергоснабжения удаленных нагрузок может быть применен и в Российской Федерации. В связи с тем, что в настоящее время рассматриваются различные варианты повышения надежности электроснабжения удаленных районов Крайнего Севера и островных территорий (например, о. Соловки, о. Валаам), необходимо при принятии решений использовать преимущества энергоснабжения при помощи передач постоянного тока.

Существует тенденция использования преобразователей тока и преобразователей напряжения в одном объекте электропередачи постоянного тока. Такие электропередачи получили название гибридных. Наличие преобразователя напряжения позволяет улучшить переходные процессы при коротких замыканиях в примыкающей сети переменного тока, снизить риск

СХЕМА ГИБРИДНОЙ ППТ, ПЛАНИРУЕМОЙ К ВВОДУ В 2020 Г. В КИТАЕ

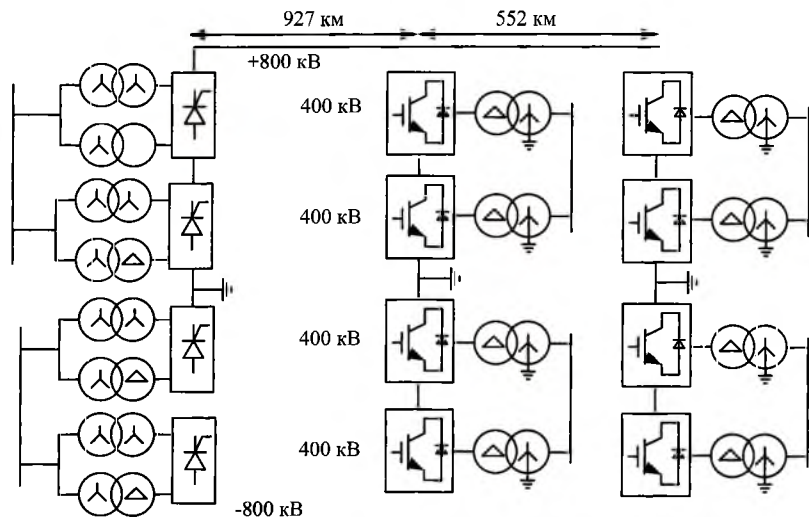


Рис. 7

нарушения коммутаций в преобразователе тока и дальнейшего развития аварийных процессов после нарушения коммутаций, обеспечить стабилизацию напряжения в принимающей сети.

Среди планируемых электропередач такого типа можно выделить многотерминальную ППТ в Китае, выпрямитель которой построен на линейно-коммутируемых преобразователях тока, инверторы — на преобразователях напряжения. Общая длина ВЛ ППТ составляет около 1500 км, напряжение равно ± 800 кВ, пропускная способность — 5 ГВт. Упрощенная схема электропередачи представлена на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работ, представленных на Международном коллоквиуме СИГРЭ А3, В4 и D1 в рамках деятельности Исследовательского комитета В4, позволяет выявить

следующие тенденции развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током:

1. Широкое использование в энергосистемах ППТ на преобразователях тока с тиристорными вентилями в качестве высоковольтных передач электрической мощности на дальние расстояния в странах с протяженной территорией, повышение классов напряжения таких ППТ до 1100 кВ, пропускной способности — до 11–12 ГВт.
2. Разработка и внедрение многотерминальных ППТ на преобразователях тока с напряжением ± 800 кВ.
3. Широкое использование в энергосистемах преобразователей напряжения в составе КЛ и ВЛ ППТ пропускной способностью до 1,4 ГВт при классах напряжения до 525 кВ. Ведутся работы по совершенствованию схем ММПН и управлению ими с целью уменьшения потерь

мощности, увеличения пропускной способности и классов напряжения.

4. Создание многотерминальных передач и сетей постоянного тока с применением преобразователей напряжения, разработка методов и средств их защиты при коротких замыканиях на стороне постоянного тока.
5. Также следует отметить тенденцию использования ППТ и ВПТ, имеющих в составе преобразователи тока и напряжения, так называемых гибридных электропередач, в том числе многоподстанционных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar A., Jhampati S., Ujjwal L., Ebockayuk D., Mukhedkar R., O'Heidhin G., Champa — Kurukshetra HVDC ± 800 kV, 6000 MW HVDC Parallel Bipole Transmission System — Main Scheme Design and Operational Considerations for Different Parallel Operation Modes. В4 — 072 [Материалы Международного коллоквиума СИГРЭ А3, В4 и D1, 2017].
2. Kumar N., Rao M. S., Mukherjee B. B., Kumar R., Goswami M. M., Chandy O. Commissioning Experience and Challenges of World's First 800 kV, 6000 MW NER — Agra Multi terminal HVDC System. В4-109 [Материалы 46-й Сессии СИГРЭ, 2016].
3. Сулова О.В., Шульга Р.Н. Технические характеристики преобразовательных подстанций для электропередач и вставок постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2017. № 2 (76). С. 127–128.
4. Chongxue J., Lu Yu, Nannan W., Hui W., Jiacheng W., Xicai Z. Comparative Analysis of DC Line Fault Recovery Technology in VSC HVDC. В4 — 032 [Материалы Международного коллоквиума СИГРЭ А3, В4 и D1, 2017].
5. Kirby N.M., Jacobson D.A., Adamczyk A.G., Barker C.D., Whitehouse R.S. Remote Community Supply Using DC Transmission. В4 — 119 [Материалы Международного коллоквиума СИГРЭ А3, В4 и D1, 2017].
6. Yang B., Cao D., Shi W., Lv W., Wang W., Liu B. A novel commutation-based hybrid HVDC circuit breaker. А3/В4 — 015 [Материалы Международного коллоквиума СИГРЭ А3, В4 и D1, 2017].