

# 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-ВНИИФ  
ИМ. АКАДЕМИКА  
Е.И. ЗАБАБАХИНА»

**П**ри 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 А3, 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 А3 «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.

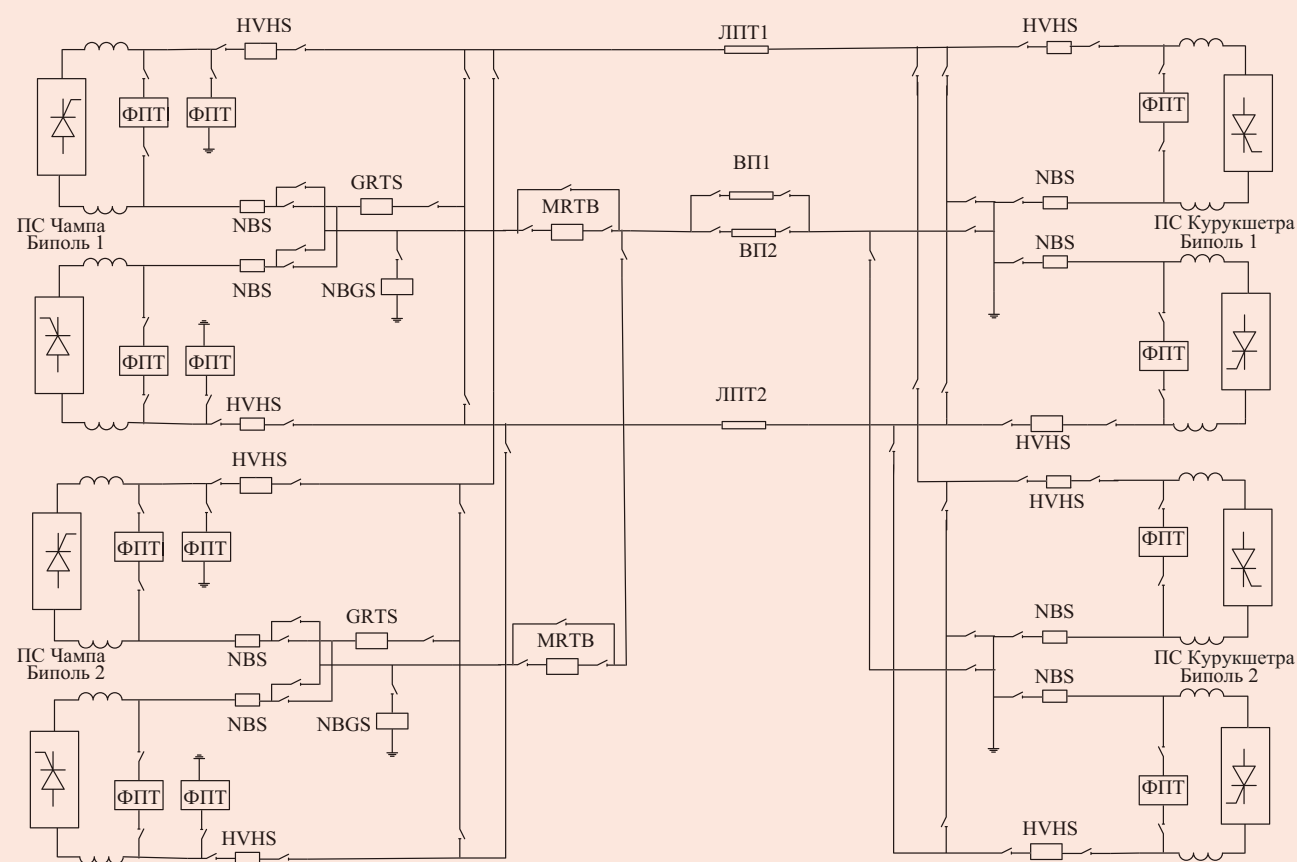
В табл/ 1 приведены примеры планируемых, сооружаемых и недавно введенных в эксплуатацию КЛ и ВЛ ППТ с преобразователями тока.

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  $\pm 800$  кВ и три ППТ находятся на стадии сооружения.

ППТ УВН с напряжением  $\pm 800$  кВ являются оптимальным решением при передаче электроэнергии на расстоянии до 2 тыс. км. Создание передач УВН с напряжением  $\pm 1100$  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

## Internet of Energy:

на пути к всеобщей совместимости

## Опыт и практика Smart Energy:

Промышленность. Города.

## Здания TECH HUB:

Решения Smart Energy

## 5 причин принять участие в Smart Energy Summit:

- 1 Лучший мировой практический опыт реализации проектов комплексных программ по умной энергетике, внедрения цифровых и инновационных технологий.
- 2 500 + лидеров энергетики, промышленности и инфраструктуры.
- 3 Бизнес-коннект - максимально удобный формат для поиска партнеров и решений.
- 4 50+ современных цифровых технологий и решений для снижения энергозатрат.
- 5 На одной площадке соберутся представители власти, бизнеса и инвесторы.



Компания АВВ в 2015–2017 гг. ввела в эксплуатацию в Индии четырех-терминальную ППТ УВН с напряжением  $\pm 800$  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 Agra, на которой расположены два параллельно соединенных инверторных преобразователя. Полная длина ВЛ составляет 1725 км.

## ПЕРЕДАЧИ И ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЬНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

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

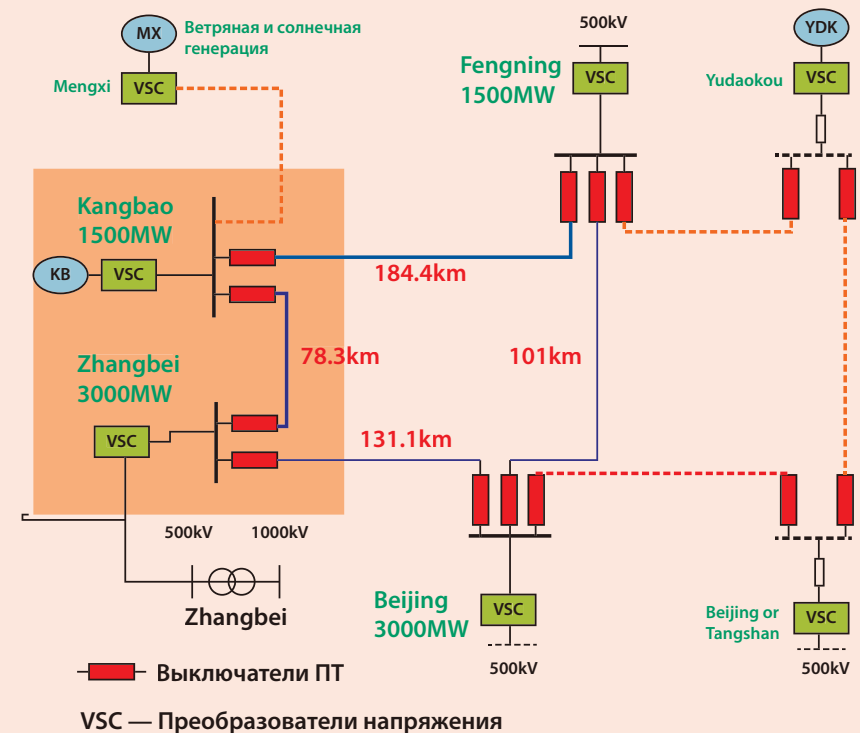


Рис. 3

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. Суслевой и Р.Н. Шульги [3].



**РМЭФ**  
Российский Международный  
Энергетический Форум

**25–27**  
**АПРЕЛЯ**  
**2018**

XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
**ЭНЕРГЕТИКА И**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР



RIEF.EXPOFORUM.RU  
rief@expoforum.ru  
+7 (812) 240 40 40, доб. 2160, 2168

**EXPOFORUM**



ПАРТНЕРЫ

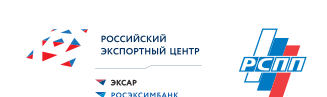


ENERGETIKA-RESTEC.RU  
energo@restec.ru  
+7 (812) 303 88 68



**РЕСТЭК®**  
выставочное объединение

ПРИ УЧАСТИИ



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР  
КОНГРЕССНОЙ ПРОГРАММЫ



КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР  
**ЭКСПОФОРУМ**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1

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  $\pm 160$  кВ, мощностью 200 МВт для передачи энергии с ВЭС и пятитерминальная (проект Zhoushan) с напряжением  $\pm 200$  кВ, мощностью 400 МВт для энергоснабжения островных территорий.

Также в Китае в стадии строительства находится сеть постоянного тока СПТ Zhangbei с напряжением  $\pm 500$  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

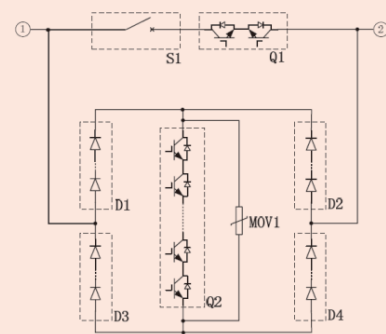


Рис. 4

## ПРОТОТИП ГИБРИДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

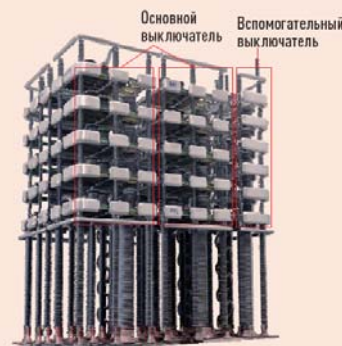


Рис. 5

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

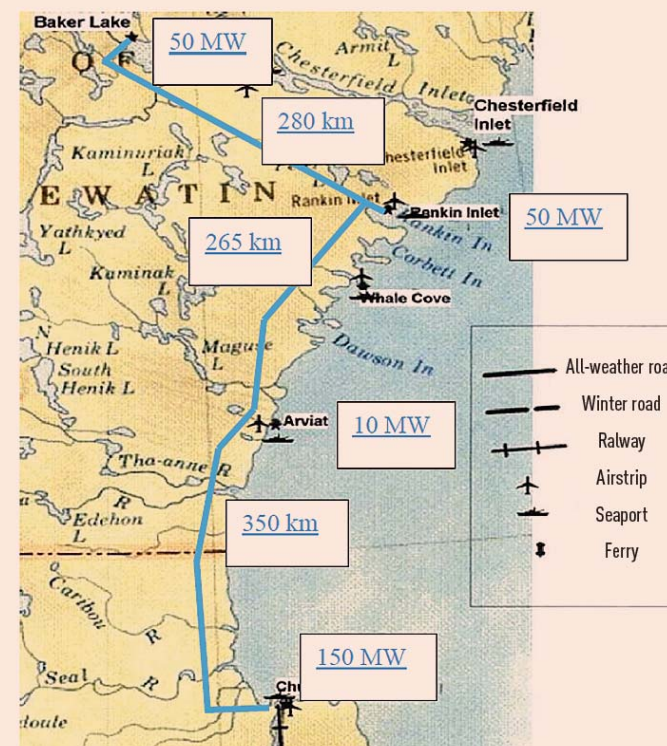


Рис. 6

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 электроустановок 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<sub>2</sub> 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  $\pm 100$  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

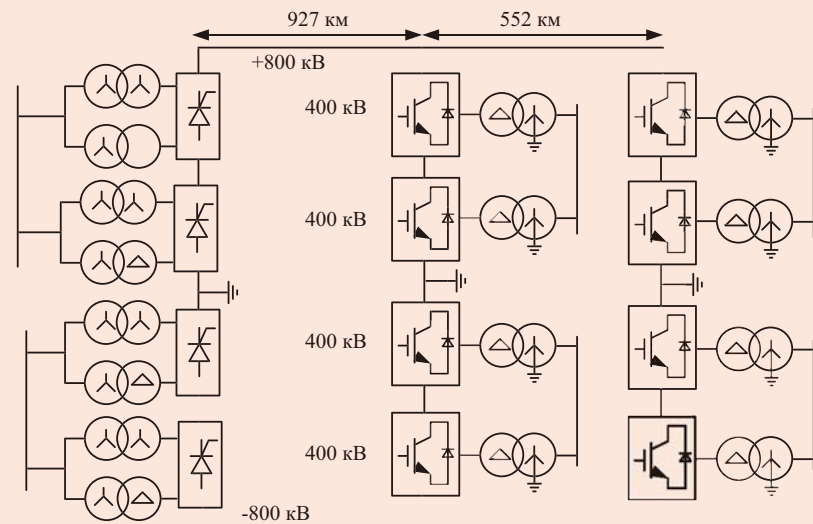


Рис. 7

нарушения коммутаций в преобразователе тока и дальнейшего развития аварийных процессов после нарушения коммутаций, обеспечить стабилизацию напряжения в прилегающей 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  $\pm 800$  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  $\pm 800$  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  $\pm 800$  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. V., 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. Техничко-экономические 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].

ОРГАНИЗАТОР:

ENSO  
ENERGY SUMMITS

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ПАРТНЕР:

ЭНЕРГИЯ  
ЕДИНОЙ СЕТИ



Комитет  
Государственной Думы  
по энергетике



Министерство  
экономического  
развития РФ



ДЕЛОВАЯ  
РОССИЯ

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



**Скидка при ранней регистрации для читателей журнала!**

Только до 31 января 2017 года действует уникальное предложение по промокоду: **res18**  
Позвоните по номеру **8 800 707 8149** (звонок бесплатный), **8 812 648 6177** или напишите нам на почту **info@ensoenergy.org** и забронируйте участие в знаменитом событии энергетической отрасли.