

Современное состояние технологий электропередачи постоянным током и расширение областей их применения в мировой электроэнергетике (по материалам 45-й сессии СИГРЭ)

Представлен краткий обзор докладов, сделанных в рамках исследовательского комитета В4 «Электропередачи постоянным током высокого напряжения и силовая электроника». Ключевыми темами обсуждения явились: применение модульных многоуровневых преобразователей, создание законодательной и технической базы для развития сетей постоянного тока, применение сетей постоянного тока для объединения ветроэлектрических установок, применение передач ультравысокого напряжения для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Ключевые слова: передача постоянного тока на преобразователях напряжения, модульный многоуровневый преобразователь напряжения, ветроэлектрическая установка, сети постоянного тока, передачи постоянного тока ультравысокого напряжения.

Введение

В статье представлен краткий обзор докладов, сделанных на сессии СИГРЕ 2014 г., в рамках деятельности исследовательского комитета В4 «Электропередачи постоянным током высокого напряжения и силовая электроника». В настоящее время за рубежом технологии передачи постоянным током (ППТ) быстро развиваются: начиная с 2010 г. и на перспективу до 2020 г. строится и запланировано к строительству более 80 объектов постоянного тока.

Быстрыми темпами развиваются мощные ППТ ультравысокого напряжения (ППТ УВН) на дальние расстояния. Проекты ППТ УВН реализуются в Китае, Бразилии, Индии. Необходимость ППТ УВН обусловлена неравномерностью распределения генерации и нагрузки по территориям этих стран. В настоящее время строится и проектируется порядка 30 ППТ УВН ± 800 кВ на преобразователях тока с длиной воздушной линии (ВЛ) до 2000 км мощностью 6–8 ГВт. В Китае стартовал пилотный проект ППТ УВН ± 1100 кВ мощностью 11 ГВт, протяженностью ВЛ 3200 км.

ИК В4 уделяет много внимания вопросам разработки законодательной и технической базы для создания и развития радиальных и сложнзамкнутых сетей постоянного тока высокого напряжения. Строительство сетей ПТ – дело ближайшего будущего. В выступлениях обсуждались результаты работ по следующим темам: рекомендации по разработке моделей преобразователей в составе сетей ПТ; способы управления перетоками мощности и напряжением; системы регулирования и защиты в сетях ПТ; проектирование сетей ПТ с целью достижения оптимальных надежностных показателей; разработка рекомендаций по выбору классов напряжения для сетей ПТ; технические требования для выключателей на стороне постоянного тока.

Сегодня в ППТ и СТАТКОМ широкое применение нашли модульные многоуровневые преобразователи напряжения (ММПН), обладающие рядом преимуществ,

основными из которых являются повышенная надежность, высокий к. п. д, возможность отключать токи короткого замыкания на стороне постоянного тока (ПТ). Такие преобразователи сегодня проектируются и сооружаются на напряжение до ± 300 кВ, мощностью до 800 МВт.

1. Сети постоянного тока

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 подсчетам, 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 г. и на перспективу до 2020 г. строится и запланировано к строительству более 80 объектов постоянного тока. В настоящее время в Европе более 30 % капиталовложений в сетевое строительство направлено в проекты передач электроэнергии постоянным током.

В последнее десятилетие получили импульс к развитию передачи и вставки постоянного тока с применением преобразователей напряжения (ППТН и ВПТН). Находят применение как традиционные ПН, выполненные по двухуровневой и трехуровневой схемам, так и многоуровневые ПН.

Преобразователи напряжения характеризуются независимым управлением активной и реактивной мощностью, способностью выдавать реактивную мощность, поддерживать напряжение на стороне переменного тока, возможностью энергоснабжения слабых энергосистем и пассивных нагрузок, уменьшенным размером фильтров высших гармоник на стороне переменного тока.

Одно из направлений использования передач постоянного тока на преобразователях напряжения (ППТН) – передача электроэнергии через водные преграды, например, от комплекса ветроэлектрических установок в открытом море (ВЭУОМ) или для снабжения электроэнергией островных территорий. В настоящее время большинство таких ППТН является двухтерминальными. В качестве примеров можно привести ППТН ± 150 кВ BorWin1 мощностью 400 МВт, DolWin1 ± 320 кВ мощностью 800 МВт, спроектированные и построенные фирмой АВВ. Компания Siemens Energy и производитель кабеля Prysmian Powerlink получили контракт на разработку и сооружение ППТН ± 300 кВ BorWin2 (мощностью 800 МВт) и HelWin1 ± 250 кВ (мощностью 576 МВт). Эти передачи спроектированы по монополярной симметричной схеме [1] с применением модульных многоуровневых преобразователей напряжения.

Конфигурация этих преобразователей согласно [2] имеет вид, представленный на рис. 1.

Плечо такого преобразователя состоит из последовательно соединенных полумостовых или полномостовых силовых модулей. С помощью транзисторов IGBT можно управлять током модуля таким образом, чтобы он протекал либо через конденсатор, разряжая или заряжая его, либо только через диоды и транзисторы, минуя конденсатор. Таким образом, один модуль может создавать единичный отрицательный, положительный или нулевой уровни напряжения. Результирующая синусоида

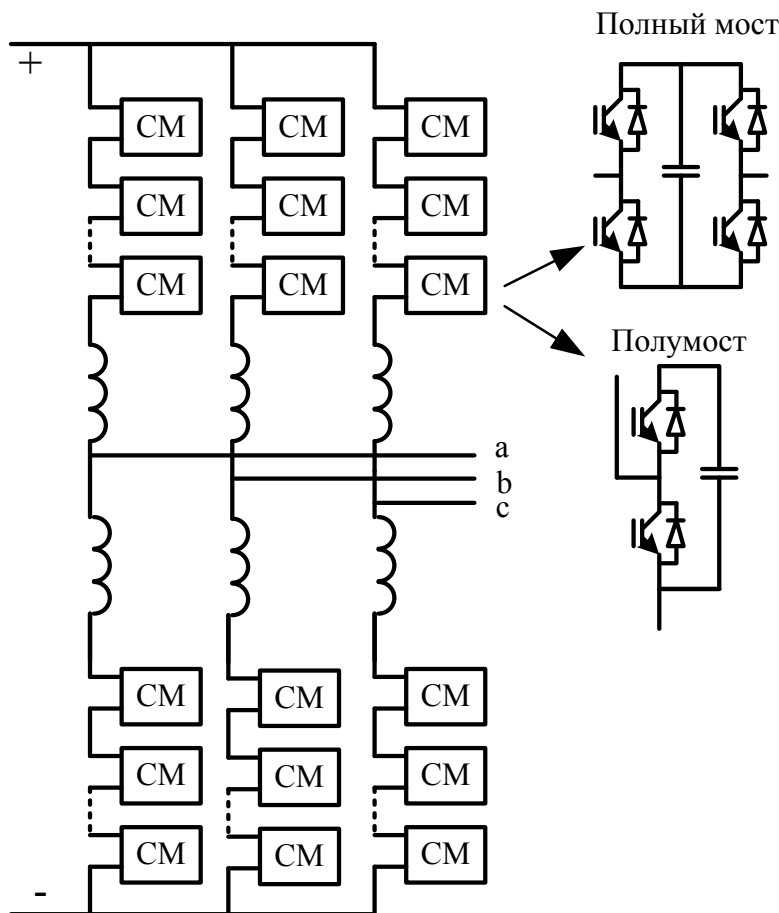


Рис. 1. Схема модульного многоуровневого преобразователя напряжения

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.

Модульные многоуровневые преобразователи напряжения находят все более широкое применение в электроэнергетике благодаря следующим преимуществам:

- повышение напряжения и мощности достигается увеличением количества модулей, не требуется применение дорогих высоковольтных транзисторов;
- модульность, заключающаяся в возможности использования недорогих стандартных низковольтных электронных компонентов, обеспечивающая максимальную экономическую эффективность и возможность легкой замены вышедшего из строя компонента;
- высокая надежность, обеспечиваемая за счет установки резервных модулей и шунтировании вышедших из строя модулей без прекращения работы преобразователя;
- возможность отключать ток короткого замыкания на стороне постоянного тока без применения специальных выключателей;

- низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения благодаря высокой эквивалентной частоте модуляции (в некоторых случаях даже не требуется фильтров на стороне переменного тока);
- низкие потери (КПД преобразователя достигает 98,9 %).

Наметилась тенденция создания многотерминальных ППТН (МППТН), объединяющих три и более преобразовательные подстанции на ММПН. Среди достоинств МППТН по сравнению двухтерминальными ППТН отмечаются меньшее количество преобразователей, лучшие стоимостные характеристики, возможность поэтапного построения МППТН путем расширения двухтерминальных передач. В Китае в 2013 и 2014 г. были запущены в эксплуатацию две такие передачи [3]: трехтерминальная (проект Nanao) ППТН ± 160 кВ мощностью 200 МВт для передачи энергии с ВЭУ и пятитерминальная (проект Zhoushan) напряжением ± 200 кВ мощностью 400 МВт для энергоснабжения островных территорий.

При строительстве этих передач также нашли применение многоуровневые преобразователи напряжения. Схема и основные параметры МППТН Zhoushan представлены на рис. 2.

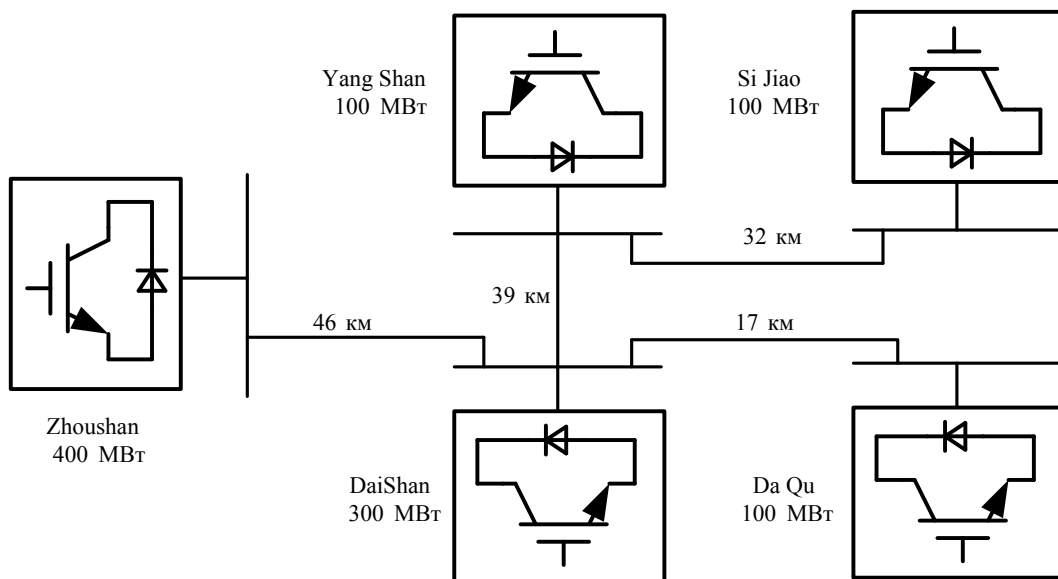


Рис. 2. Схема и основные параметры МППТН Zhoushan

Компания Alstom [4] приступила к сооружению первой в Европе трехтерминальной передачи South West link с воздушно-кабельной линией (ВКЛ) с использованием ММПН, которая свяжет энергосистемы Норвегии и Швеции. Эта МППТН имеет следующие характеристики: мощность 1400 МВт, напряжение ± 300 кВ, длина ВКЛ 250 км.

В последнее время возник интерес среди научного сообщества и производителей к сложнзамкнутым сетям постоянного тока.

Среди преимуществ использования сложнзамкнутых сетей постоянного тока для интеграции офшорных ВЭУ вместо двухтерминальных передач и радиальных сетей называются следующие [5]:

- сеть ПТ обеспечивает несколько путей для передачи мощности от офшерных ВЭУ в наземную сеть переменного тока, обеспечивая передачу балансового потока мощности при отключенном состоянии одного из элементов сети (принцип « $n-1$ »);
- соединение между собой ВЭУ, находящихся в разных географических регионах, позволяет добиться усреднения при распределении электрической мощности, получаемой от энергии ветра.

Пока сложноразветвленные сети ПТ не реализованы на практике, они являются объектом исследований в самых разных аспектах. Разрабатываются способы управления перетоками мощности и стратегии управления напряжением, методы достижения оптимальных показателей надежности [6], методы моделирования ММППН, в том числе и в реальном времени, стратегии и устройства защит при аварийных процессах, общие подходы к методологии проектирования, методы расчета технико-экономических показателей [7]. Результаты этих исследований, проведенные в рамках рабочих групп с 2012 по 2014 г., были представлены и обсуждались на заседании Исследовательского комитета В4.

Основное назначение сетей постоянного тока сегодня – интеграция нетрадиционных источников энергии (например, ВЭУОМ, солнечных батарей) с единой электрической сетью. В частности, Европейская комиссия, планируя создание крупных офшерных электрических сетей ПТ, запустила и финансирует проект TWENTIES, в рамках которого научно-исследовательские институты, производители, системные операторы, операторы ВЭУОМ исследуют различные вопросы, связанные с сетями ПТ для интеграции офшерных ВЭУ. Проводится оценка нетехнологических барьеров для развития офшерных сетей ПТ, изучаются вопросы экономической эффективности и проблемы правового регулирования. Значительное внимание уделяется и техническим аспектам: предлагаются методы оценки надежности [6], алгоритмы регулирования и защиты, проводится оценка влияния сетей ПТ на примыкающие сети переменного тока.

В качестве основного достижения в рамках проекта TWENTIES отмечается разработка первой в мире маломасштабной физической модели (на напряжение постоянного тока 250 В) пятитерминальной сложноразветвленной сети ПТ, содержащей реальные преобразователи напряжения, выключатели короткого замыкания на линии постоянного тока, кабель постоянного тока (фирма Nexans), оборудование для системы управления и регулирования. Примыкающие системы переменного тока, ВУЭ и часть ПН моделировались с помощью системы реального времени (на рис. 3 эта часть схемы выделена серым цветом). С помощью физической модели производится отработка алгоритмов управления, регулирования и защиты, а также макета выключателя тока короткого замыкания на стороне ПТ, разработанного фирмой Alstom [8].

В большинстве кабельных ППТН на сегодняшний день при коротком замыкании на кабеле постоянного тока преобразователи отключаются выключателем со стороны переменного тока. При этом теряется возможность преобразователя поддерживать напряжение в системе переменного тока, т. е. работать в режиме СТАТКОМ на время простоя передачи активной мощности. В сетях ПТ в случае КЗ на одном кабеле ПТ, приходится отключать все преобразователи, входящие в эту сеть, что

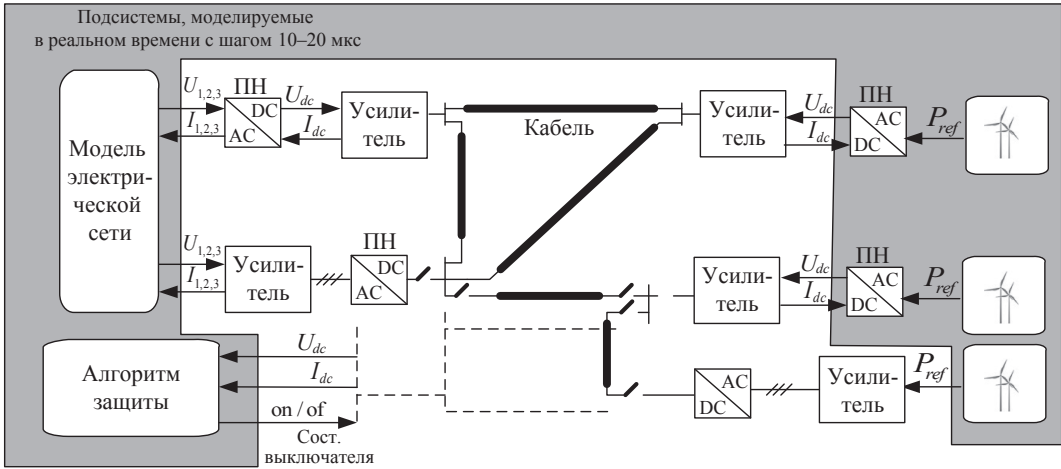


Рис. 3. Схема макета пяти терминальной сложноразветвленной сети ПТ

создает значительное возмущающее воздействие в примыкающих сетях переменного тока. В настоящее время за рубежом ведутся разработки различных стратегий защиты при коротких замыканиях [2], в частности, для минимизации количества отключенных преобразователей: снабжение каждого присоединения с двух сторон выключателями постоянного тока, использование многоуровневых ПН с полностовыми ячейками, выявление поврежденного участка с последующим делением сети постоянного тока.

Для того чтобы преобразователь мог выполнять функцию регулирования напряжения в сети переменного тока, в случае перерыва передачи активной мощности из-за КЗ на стороне постоянного тока, необходимо отключать преобразователь со стороны ПТ, для чего необходимо иметь эффективный быстродействующий выключатель. Гибридные быстродействующие выключатели, состоящие из механической части и силовой электроники, предложены фирмами Alstom [8] и ABB [9]. Схема выключателя ABB представлена на рис. 4.

Выключатель работает следующим образом. В нормальном режиме ток протекает через ветвь, в которую включены быстродействующий разъединитель и вспомогательный выключатель, ток в обходной ветви основного выключателя ПТ не протекает.

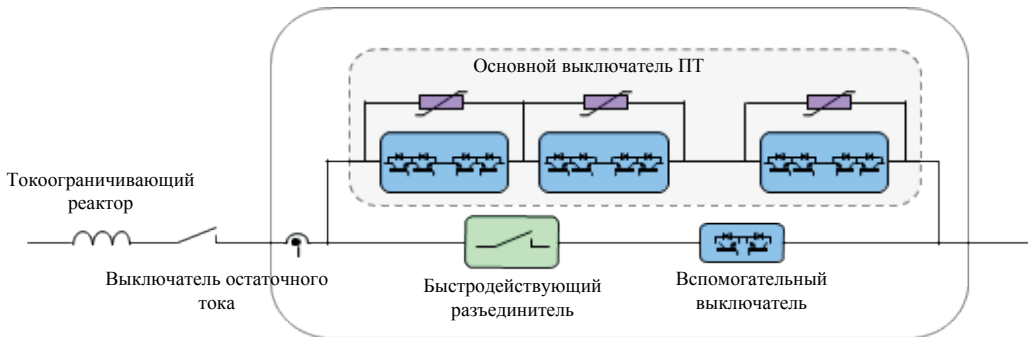


Рис. 4. Схема гибридного выключателя постоянного тока

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

При возникновении короткого замыкания транзисторы обходной ветви переходят в проводящее состояние, ток распределяется по двум цепям: обходной и основной. Вспомогательный выключатель закрывается, сопротивление основной ветви становится большим, ток перенаправляется в обходную ветвь. Быстродействующий разъединитель размыкается, изолируя вспомогательный выключатель от высокого напряжения на обходной цепи. Транзисторы основного выключателя переходят в непроводящее состояние, ток, коммутируемый в разрядник, уменьшается до нуля. Защитный уровень разрядника выбирается равным $1,5U_d$. Кроме этого разрядник служит для защиты от перенапряжений модулей IGBT в главном выключателе.

По данным [9], такой выключатель может отключить ток до 16 кА, время срабатывания составляет 2 мс. Стандартная ячейка выключателя, состоящая из IGBT транзисторов, рассчитана на напряжение 80 кВ в номинальном режиме.

Выключатель, предложенный фирмой Alstom, работает по схожему принципу; отличие состоит в том, что для него предусмотрена работа в реверсивном режиме, а функциональным элементом основного выключателя является ячейка, состоящая из тиристора, конденсатора, параллельно к которому присоединен разрядник. Характеристики выключателя: номинальное напряжение – 120 кВ; номинальный ток – 1500 А, отключаемый ток короткого замыкания – 7,5 кА.

Многоуровневые ПН с полномостовыми силовыми модулями, предложенные фирмой Alstom (рис. 1), позволяют эффективно контролировать ток в случае КЗ на стороне постоянного тока без необходимости дополнительных быстродействующих выключателей ПТ. Использование полных мостовых силовых модулей позволяет разряжать и заряжать конденсаторы при любом направлении тока. Таким образом, преобразователь может создавать напряжение, противоположное сетевому напряжению, что позволяет снизить ток короткого замыкания. Отмечается также возможность функционирования ПН в составе гибридных ППТ с преобразователями тока на обычных тиристорах.

2. ППТ ультравысокого напряжения

Одной из тенденций развития технологий постоянного тока за рубежом является передача больших количеств электроэнергии на дальние расстояния с использованием передач постоянного тока ультравысокого напряжения (ППТ УВН). Лидером в области разработки и эксплуатации таких проектов является Китай, где использование ППТ УВН связано с неравномерностью распределения энергоресурсов и промышленности по территории страны. Основные крупные потребители электроэнергии расположены в центральной и восточной частях Китая, а гидро- и угольные ресурсы – в западной. В Китае в настоящее время функционируют три ППТ УВН ± 800 кВ, мощностью 5, 6.4, 7.2 ГВт, еще три подобные ППТ планируется ввести в эксплуатацию в 2014 г.

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

с необходимостью уменьшать потери при передаче электроэнергии на дальние расстояния. По данным [10] потери мощности в ППТ УВН ± 1100 кВ составляют 1,5 % на 1000 км. Работы по созданию ППТ УВН ± 1100 кВ ведутся с 2010 г. К настоящему времени разработаны прототипы оборудования, включая трансформаторы, вводы, высоковольтный вентиль, реактор, разъединитель ПТ и т. д. [10]. Предложены решения по транспортировке и сборке оборудования, обеспечению процесса ремонта, предварительный проект вентильного зала, технические решения по линии электропередачи. Сейчас ведутся работы по производству оборудования для пилотного проекта ППТ УВН Zhundong – Wuhan мощностью 11 ГВт, длиной 3200 км. Основные параметры приведены в табл. 1. К 2020 г. в Китае планируется соорудить шесть ППТ ± 1100 кВ.

Таблица 1

Основные параметры ППТ УВН ± 1100 кВ Zhundong – Wuhan

Наименование параметров	Параметры	
	Выпрямитель	Инвертор
Номинальная мощность, МВт	11000	11000
Номинальное напряжение, кВ	1100	1100
Номинальный ток, кА	5	5
Номинальное напряжение сети переменного тока, кВ	750	500
Число 12-пульсных мостов	4	4
Мощность трансформатора, МВ·А	563,79	539,66
Реактанс трансформатора, %	20	22
Число отпаек РПН	+28 / –6	+25 / –5
Напряжение холостого хода на один шестипульсный мост, кВ	319.03	309.21
Угол зажигания/угол погасания, град.	15 / 17	15 / 17
Индуктивность сглаживающего реактора в полюсе, мГн	60*2	60*2

Проекты ППТ УВН реализуются также в Бразилии, Индии. Целесообразность реализации этих проектов также обусловлена неравномерностью распределения генерации и нагрузки по территориям этих стран. Отметим наиболее интересные из них.

Например, в Бразилии в связи со строительством гидроэлектростанции мощностью 11 ГВт в Бело Монте на севере страны возникла необходимость передачи большого количества мощности от этой гидроэлектростанции в центры потребления в южной части страны. Оптимальным техническим и экономическим решением для этой цели стало построение двух биполярных ППТ УВН ± 800 кВ, мощностью 4 ГВт каждая, длиной 2092–2439 км [11]. Передача находится в стадии планирования.

Сетевая компания Индии сообщает о строительстве ППТ УВН Champa – Kurukshetra [12] мощностью 6000 МВт, напряжением ± 800 кВ с металлическим возвратным проводом. Длина ВЛ ППТ составляет 1305 км. Это будет первая ППТ такого класса напряжения, в которой полюсной и обратный провода находятся на одной и той же опоре. Строительство передачи обосновано необходимостью передачи большого количества электроэнергии в северные регионы страны.

Компания АВВ [13] сообщила о строительстве к 2015 г. в Индии первой четырехтерминальной ППТ УВН ± 800 кВ номинальной мощностью 6000 МВт (8000 МВт длительно допустимая перегрузка) North-East Agra link. 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 1728 км. Общая схема передачи представлена на рис. 5.

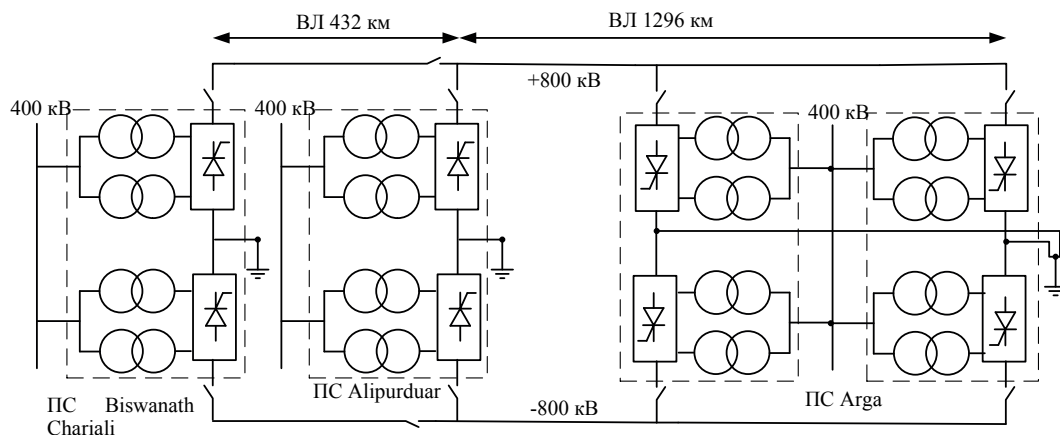


Рис. 5. Схема ППТ УВН North-East Agra

Выводы

Материалы, представленные на 45-ю сессию CIGRE, свидетельствуют о существенном расширении области использования техники постоянного тока в мировой электроэнергетике. Благодаря технико-экономическим и экологическим преимуществам ППТ широко используются за рубежом для передачи электрической мощности на дальние расстояния, через водные преграды на островные и полуостровные территории, для осуществления глубоких вводов в промышленные центры и большие города, присоединения изолированных энергосистем к единой электрической сети, осуществления несинхронного объединения энергосистем переменного тока.

В странах с протяженной территорией (Бразилия, Китай, Индия) в настоящее время строится и проектируется порядка 30 ППТ УВН ± 800 кВ на преобразователях тока с длиной ВЛ до 2000 км мощностью 6–8 ГВт. Китайские специалисты работают над созданием пилотного проекта ППТ УВН ± 1100 кВ протяженностью ВЛ 3200 км, мощностью 11 ГВт.

Другими тенденциями развития технологий постоянного тока за рубежом стали широкое применение модульных многоуровневых преобразователей напряжения в составе вставок и передач постоянного тока, а также СТАТКОМ, разработка технической базы для проектирования и строительства сетей постоянного тока для присоединения комплексов ветроэлектрических установок и для передачи электроэнергии на островные территории.

Список литературы

1. *Hussennether V., Rittiger J., Barth A.* and other. Projects BorWin2 and HelWin1 – Large Scale Multilevel Voltage-Sourced Converter Technology for Bundling of Offshore Windpower, CIGRE, 2012
2. *Barker C. D., Whitehouse R. S., Adamczyk A. G., Boden M.* Designing fault tolerant HVDC networks with a limited need for HVDC circuit breaker operation. B4-112, CIGRE 2014.
3. *Guangfu Tang.* Research and application on HVDC and DC Grid in China. Материалы коллоквиума CIGRE 2013 г.
4. Материалы с сайта Alstom: <http://www.alstom.com/uk/projects/grid/south-west-link/>
5. *Despouys O., Denis A.-M., Cirio D., Bell K., Moreira C., Liu C. C., Grieshaber W., Dupraz J.-P.* TWENTIES: Conclusions of a major R&D Demonstration Project on Offshore DC Grids, B-107, CIGRE 2014
6. *Maciver C., Bell K. R. W.* Reliability Analysis of Design Options for Offshore HVDC Networks, B4-111, CIGRE, 2014
7. Working Group B4-52 CIGRE, "HVDC Grid Feasibility Study," 2013.
8. *Grieshaber W., Dupraz J.-P., Penache D.-L., Violleau L.* Development and test of a 120 kV direct current circuit breaker, B-301, CIGRE 2014.
9. *Derakhshanfar R., Jonsson T. U., Steiger U., Habert M.* Hybrid HVDC breaker – A solution for future HVDC system. B-304, CIGRE 2014.
10. *Liu Zehong, Gao Liying, Yu Jun, Zhang Jin, Lu Licheng* Research Work of ± 1100 kV UHVDC Technology, B-105, CIGRE 2014.
11. *Carvalho Jr. D. S., Bianco A., Rothstein O. J., Souza D. F., Ximenes M. J., Ristow R., Rizzoto T. C., Cardoso J. A.* Final project planning conception for the first 800 kV HVDC link of Belo Monte, B4-103, CIGRE 2014.
12. *Puneet Tyagi, Vikas Bagadia, Rakesh Kumar, Anish Anand, Goswami M. M., Jha I. S.* Design Challenges for ± 800 kV, 3000 MW HVDC Champa – Kurukshetra Transmission link with Dedicated Metallic Return (DMR) – User's Perspective, B-109, CIGRE 2014.
13. *Andre Balzi, Abhay Kumar.* Possible HVDC Power Transmission Solutions for Remote Hydroelectric Plants in Challenging Environments. Материалы симпозиума HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance October 2–3, 2013 Brasilia – Brazil.

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

E-mail: suslova_o@ntcees.ru

Suslova O. V.

State-of-the-art of HVDC power transmissions and development of their application in the global power industry (review of 45th CIGRE Session reports).

Review of presentations made by Study Committee B4 "HVDC and power electronics" during 45th CIGRE Session is given. Key topics of discussions were: modular multilevel converters, connection of off-shore intermittent power sources, DC grid economics, and control and protection issues, research work of UHVDC power transmission for transmit bulk electrical power over long distances.

Keywords: high voltage direct current power transmission, voltage source converter, modular multilevel converter, offshore windfarm, direct current grid, ultra high voltage direct current (UHVDC) power transmission.