

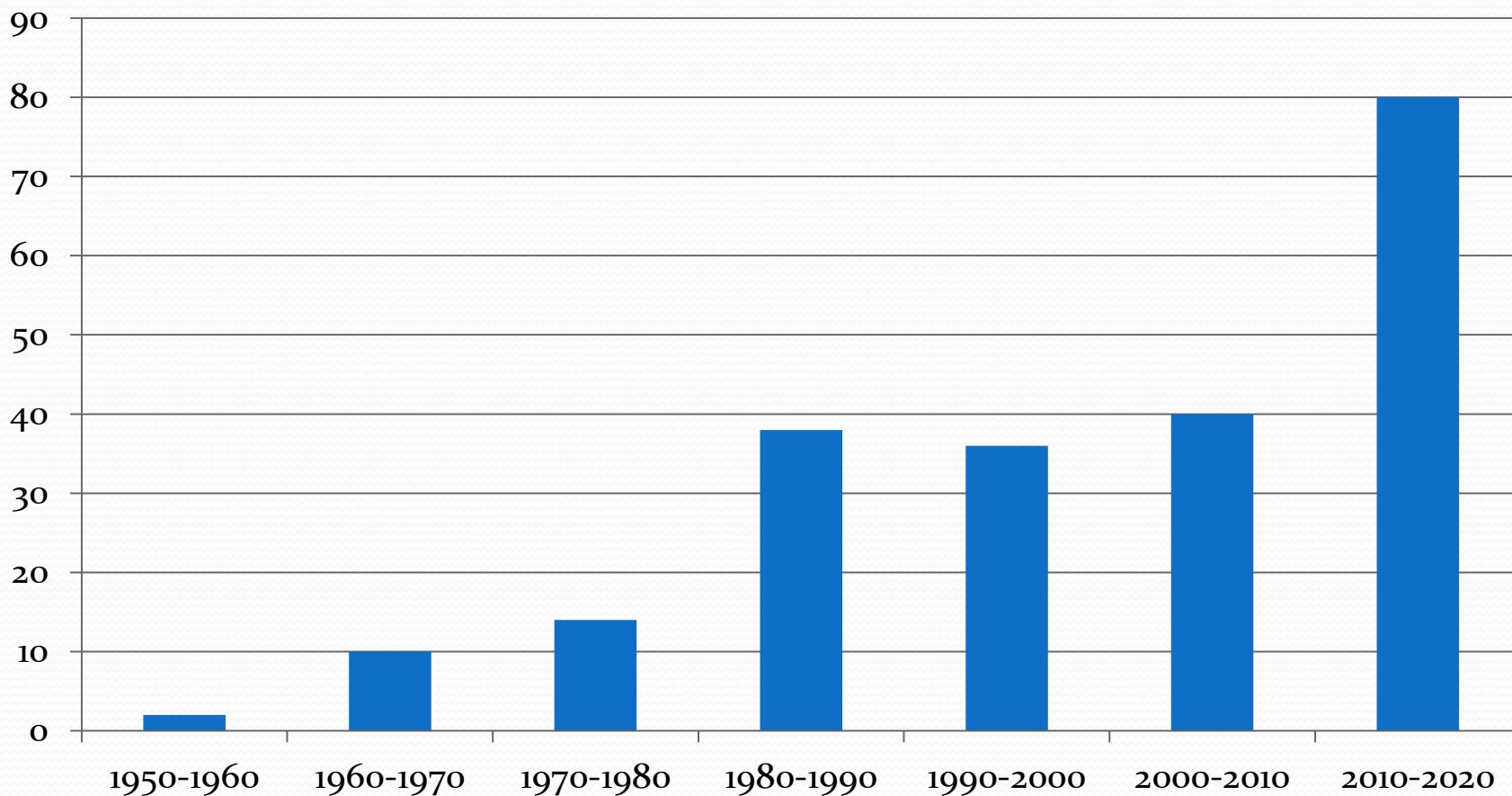
**«Современное состояние технологии
электропередач постоянным током и
расширение областей их применения
в мировой электроэнергетике. Опыт
СИГРЭ»**


**Руководитель подкомитета В4 РНК СИГРЭ
Суслова О.В.**

Содержание

- Тенденция увеличения количества объектов постоянного тока, внедряемых в энергосистемах различных стран мира
- Развитие технологии передачи электроэнергии постоянным током с помощью преобразователей напряжения
- Много терминальные ППТН
- Создание технической базы для развития сложнзамкнутых сетей ПТ
- Развитие ППТ ультравысокого напряжения в странах с протяженной территорией

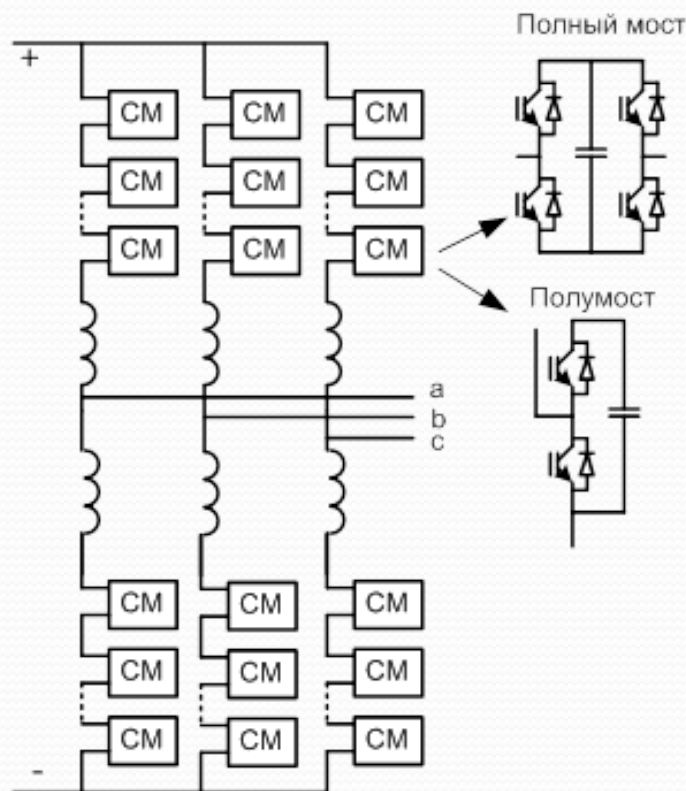
Количество введенных в эксплуатацию и планируемых к строительству объектов постоянного тока напряжением выше 50 кВ по десятилетиям





Развитие технологии передачи
электроэнергии постоянным
ТОКОМ С ПОМОЩЬЮ
преобразователей напряжения

Модульные многоуровневые преобразователи напряжения (ММПН)



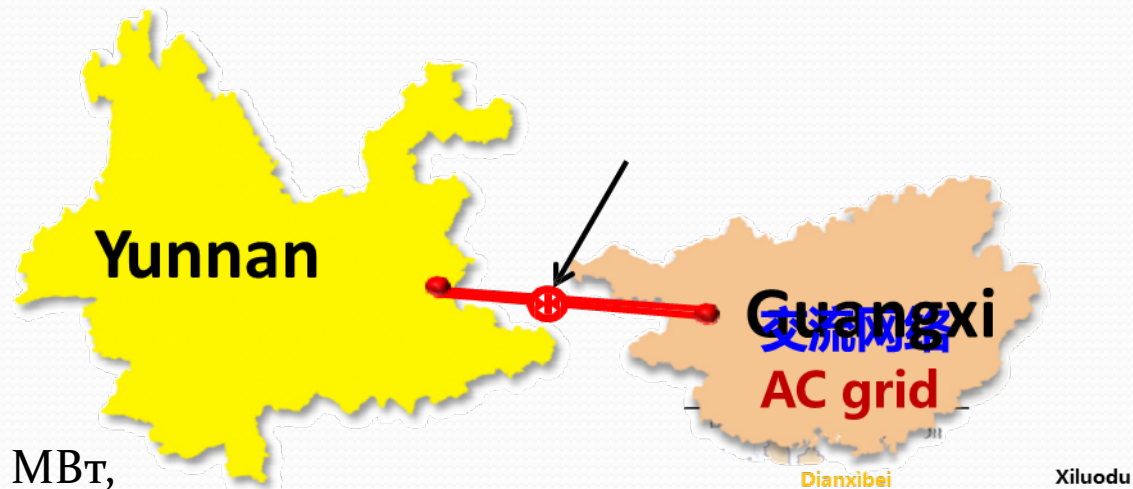
- Преимущества:
- Модульная структура
- Высокая надежность
- Возможность отключения токов КЗ
- Низкий уровень гармонических искажений

Объекты на ММПН

№ п/	Название проекта	Страна и год ввода	Мощность	Количество параллельных цепей	Напряжение	Длина линии (кабель)	Основная причина применения
1.	Trans Bay Cable	США 2010 г.	400 МВт	1	±200 кВ	85 км	Транспорт электроэнергии
2.	Borwin2	Германия, 2014г.	800 МВт		±300 кВ	200 км	Сбор мощности от ВЭС
3.	Inelfe	Франция-Испания 2014 г.	2x1000 МВт	2	±320 кВ	64 км	Межгосударственная связь
4.	Dolwin1	Германия, 2013 г.	800 МВт	1	±320 кВ	165 км	Сбор мощности от ВЭС
5.	Dolwin2	Германия, 2015 г.	924 МВт	1	±320 кВ	135 км	Сбор мощности от ВЭС
6.	Helwin1	Германия, 2014 г.	576 МВт	1	±260 кВ	130 км	Сбор мощности от ВЭС
7.	Helwin2	Германия, 2015 г.	690 МВт	1	±320 кВ	130 км	Сбор мощности от ВЭС
8.	Sylwin1	Германия, 2014 г.	864 МВт	1	±320 кВ	164 км	Сбор мощности от ВЭС
9.	Mackinac	США, 2014 г.	200 МВт	1	70 кВ	0 км (ВПТ)	Стабилизация напряжения, управление перетоками мощности
10.	NordBalt	Литва - Швеция, 2015 г.	700 МВт	1	±300 кВ	450 км	Межгосударственная связь
11.	South West link	Новая Зеландия 2014-2016	2x720 МВт	2	±300 кВ	180 км- КЛ, 70 км ВЛ	Межгосударственная связь (трехтерминальная передача)
12.	Nanao	Китай 2013	200 МВт		±160 кВ		Передача электроэнергии в ВЭС (трехтерминальная)
13.	Zhoushan	Китай 2014	400 МВт		±200кВ	134 км	Энергоснабжение островных территорий (четырёхтерминальная)

Примеры планируемых объектов на ММПН : Китай

ВПТН Yunnan для связи несинхронно работающих энергосистем



Мощность: 1000 МВт,
напряжение ± 350 кВ,
ток I_{dc} 1429А,
Количество модулей в плече 440
Реактивная мощность $Q = \pm 300$ Мвар
Основное оборудование поставляют Китайские
производители
Ввод в эксплуатацию : Июнь 2016


Рабочие группы ИК В4: преобразователи напряжения, взаимодействие с примыкающими сетями, области применения, испытания

Действующие рабочие группы

- **WG В4.62:** Присоединение ВЭС к слабым сетям переменного тока
- **WG В4.63:** Процедура ввода в эксплуатацию ППТН и ВПТН
- **WG А3/В4.34** Технические требования и характеристики современного коммутационного оборудования постоянного тока
- **WG В4.64** Влияние примыкающих систем переменного тока на свойства эксплуатационные свойства ППТ и ВПТ

Вновь создаваемые рабочие группы

- **WG В4-67:** Проблемы гармоник объектов ПТ на ПН и стратегии для их ограничения
- **WG В4-69** Минимизация теряемой мощности, передаваемой ППТН, при коротких замыканиях на воздушных линиях постоянного тока.
- **WG В4-70** Электромагнитные переходные процессы в объектах ПТ на ПН

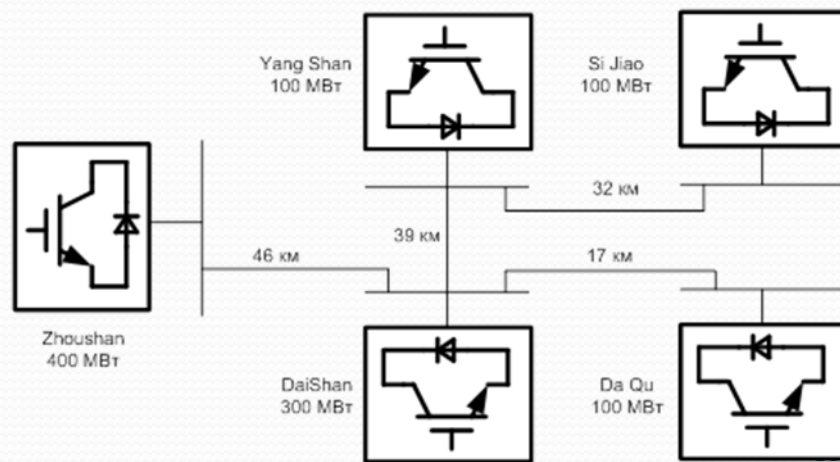


Многотерминальные передачи электроэнергии на преобразователях напряжения

Многотерминальные передачи на преобразователях напряжения (МППТН) в Китае

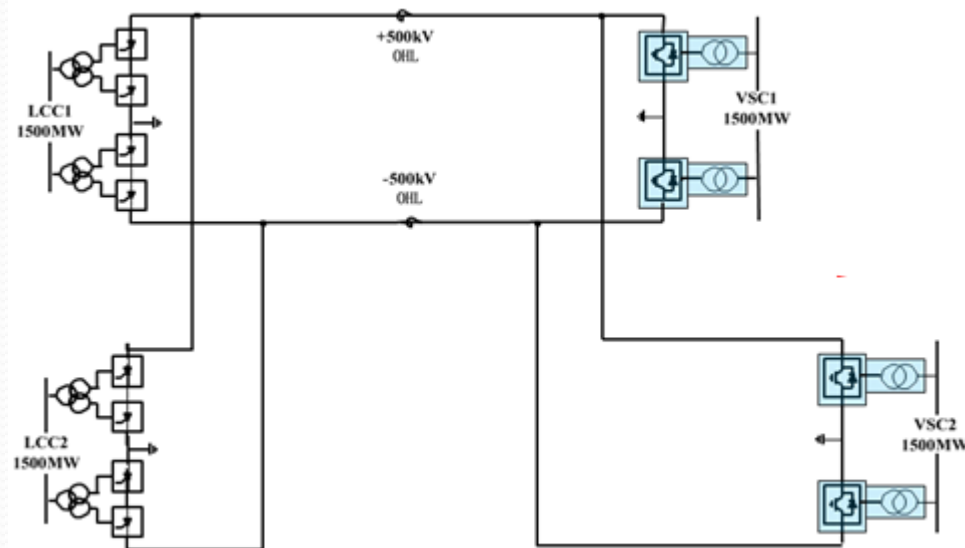
Проект Zhoushan

Проект	Год ввода в эксплуатацию	Число модулей в плече	Число терминалов	Напряжение, кВ	Мощность, МВт	Области применения
Nanhui	2011	50	2	±30	18	Передача электроэнергии от ВЭС
Nanao	2013	200	3	±160	200	Передача электроэнергии от ВЭС
Zhoushan	2014	250	5	±200	400	Энергоснабжение островных территорий
Luoping	2016	400	2		1000	Связь несинхронно работающих систем
Xiamen	2015	400	2		1000	Энергоснабжение мегаполиса



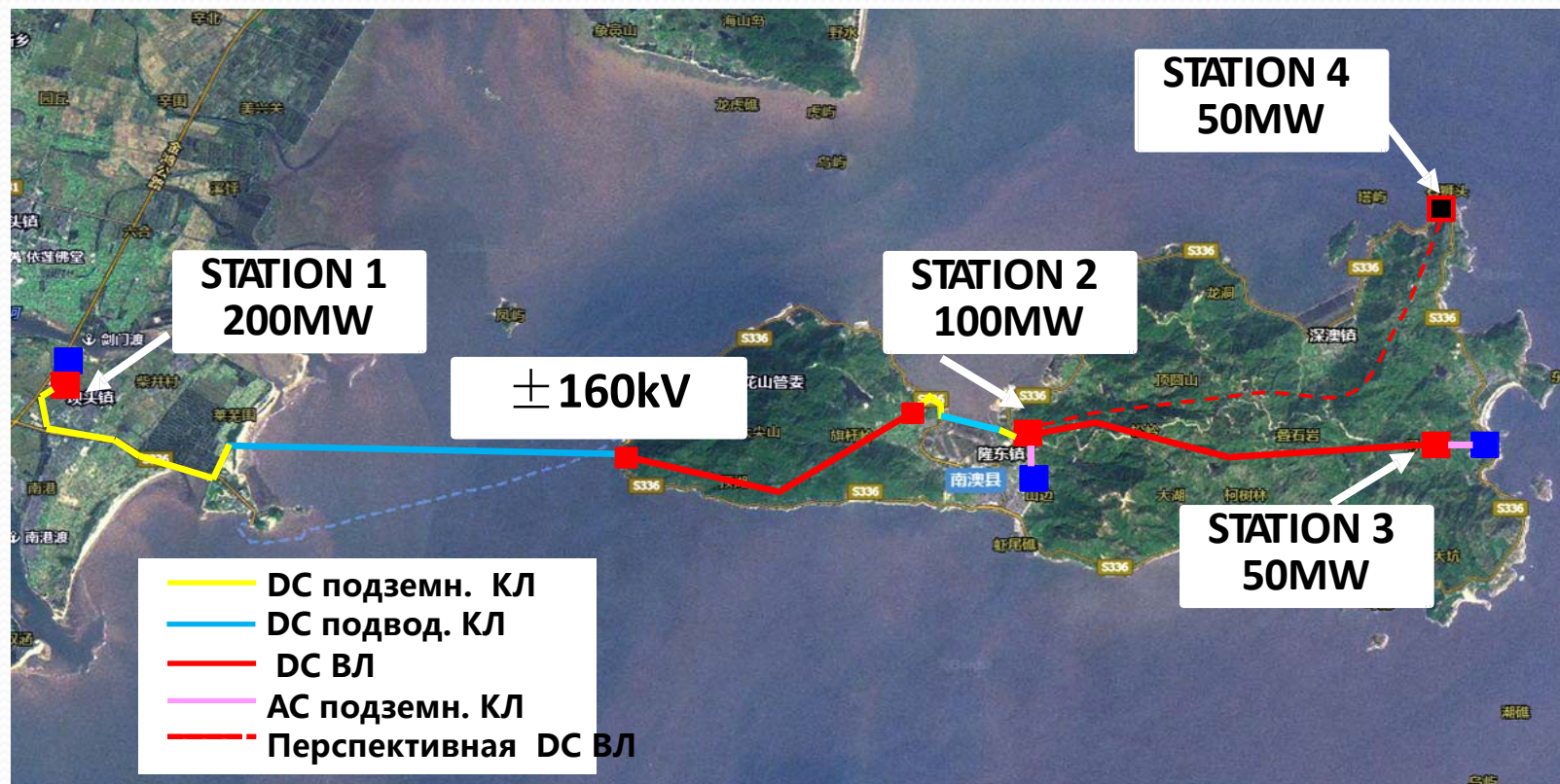
Примеры планируемых объектов на ММПН: Китай

Многоподстанционная ПТ+ ММПН с ВЛ

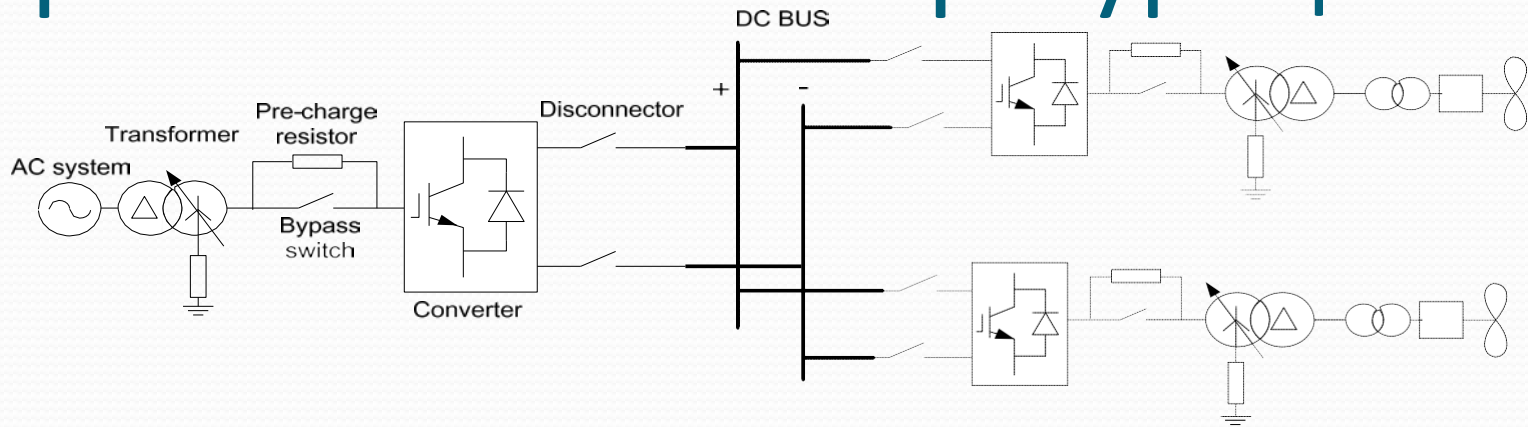


- Схема: 500кВ, 3000 МВт, длина ВЛ более 1000 км
- Преобразователь тока для передающей ПС, преобразователь напряжения для приемной ПС, для улучшения устойчивости приемной ПС и уменьшения финансовых затрат
- Передача мощности ГЭС
- От начала проектирования до ввода в эксплуатацию – 5 лет

Проект Нанао



Проект Нанао: конфигурация



3 терминала, схема симметричная монополярная

ММПН, полумостовые силовые модули

Нейтраль трансформатора заземлена через высокоомное сопротивление

На стороне постоянного тока - разъединители

Проект Нанао: преобразователи

STATION 1



STATION 2



STATION 3



	VSC1
P (MW)	200
Q (MVar)	-200~100
DC VOLTAGE (kV)	± 160
DC CURRENT (A)	625
DEVICE	PP IGBT

	VSC2
P (MW)	100
Q (MVar)	-100~60
DC VOLTAGE (kV)	± 160
DC CURRENT (A)	313
DEVICE	IGBT

	VSC3
P (MW)	50
Q (MVar)	-50~35
DC VOLTAGE (kV)	± 160
DC CURRENT (A)	157
DEVICE	IGBT

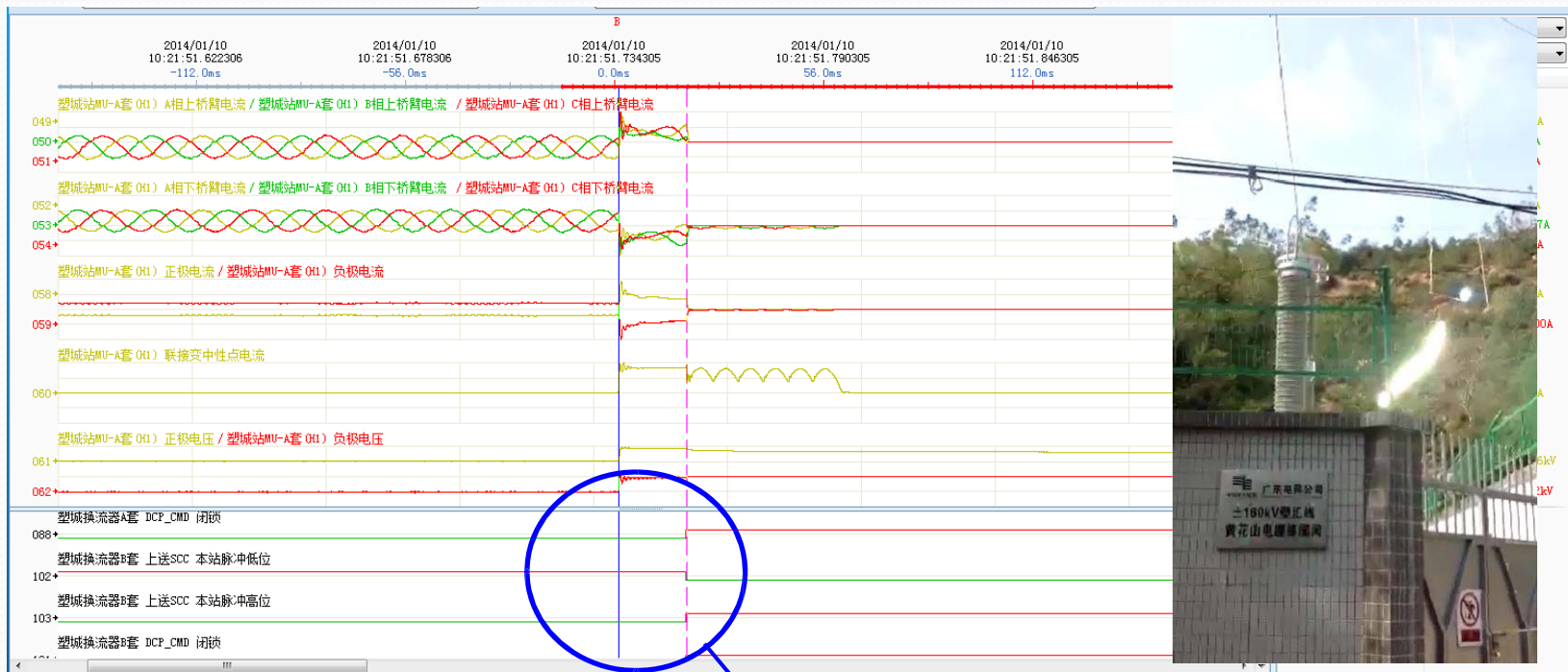
Проект Нанао: ввод в эксплуатацию

Испытания при КЗ на ВЛ ПТ

Полюс – земля

На другом полюсе напряжение ПТ возрастает в 2 раза

КЗ отключается выключателями на стороне переменного тока



Длительность КЗ 60ms

Проект Нанао: эксплуатационные показатели

- **Потери в вентильной преобразовательной части**
 - <1.0% согласно проекту
- **Надежность:**
 - Только один силовой модуль вышел из строя за время эксплуатации

Многотерминальные передачи на преобразователях напряжения в Европе (проект South West Link, Альстом)



- Трехтерминальная ППТПН
 - симметричная монополярная схема
 - 250 км
 - Кабельно-воздушная линия
- Параметры
 - 1400 МВт (2 x 720 МВт)
 - Напряжение 300 кВ
- Даты:
 - Контракт: Декабрь 2011
 - Сдача в эксплуатацию: 2015



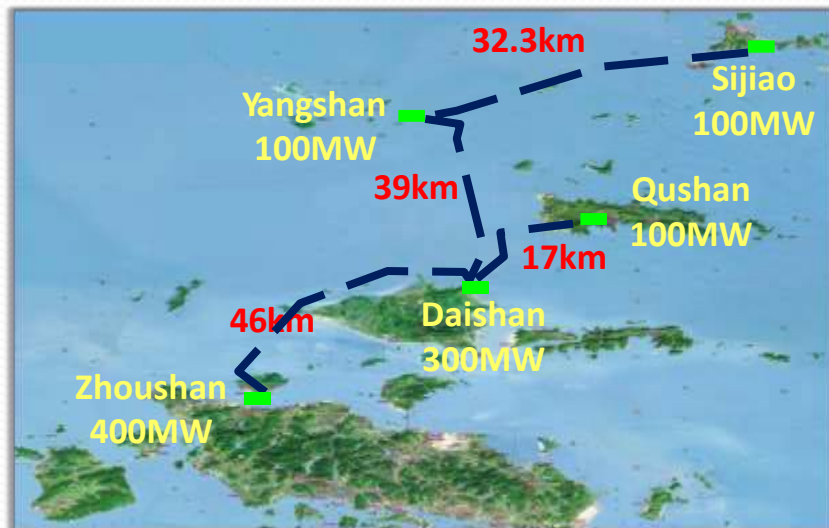
Сложно-замкнутые сети постоянного тока

Рабочие группы ИК В4: сети постоянного тока

- 1. WG B4.56 - Guidelines for the preparation of “connection agreements” or “Grid Codes” for HVDC grids («Руководящие указания для подготовки «электросетевого кодекса» для сетей постоянного тока (ПТ) высокого напряжения»).**
- 2. WG B4.57 - Guide for the development of models for HVDC converters in a HVDC grid («Руководящие указания для разработки моделей оборудования в сети ПТ»).**
- 3. WG B4.58 - Devices for load flow control and methodologies for direct voltage control in a meshed HVDC Grid («Устройства и методологии для управления перетоками мощности и напряжения в сложнзамкнутых сетях ПТ»).**
- 4. JWGB4/B5.59 - Control and Protection of HVDC Grids («Регулирование и защита в сетях ПТ»).**
- 5. JWGB4/C1.65 «Recommended Voltages for HVDC Grids» («Рекомендуемые напряжения для сетей постоянного тока»)**

МОДЕРНИЗАЦИЯ МППТН

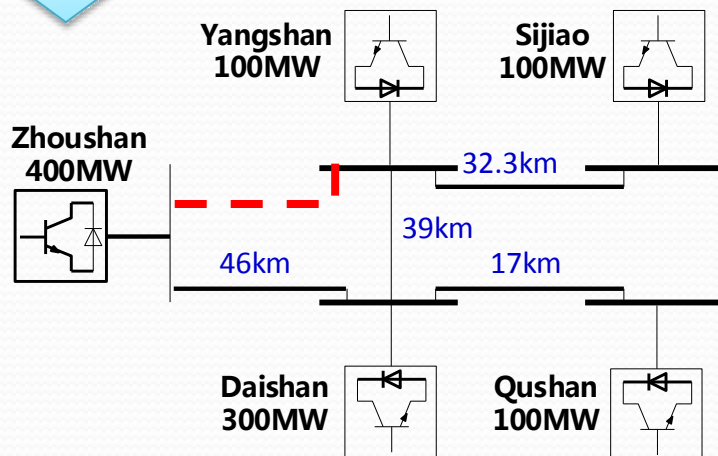
ZHOUSHAN



В эксплуатации	4 th Июля 2014
Мощность	400/300/100/100/100 MW
Напряжение	± 200 кВ

Текущее состояние

- Энергоснабжение островов
- 5-терминальная радиальная сеть
- Нет резервирования
- КЗ ПТ отключается на стороне АС



Модернизация

- Трансформация в сеть ПТ
- Обеспечение резервирования
- КЗ ПТ отключается выключателем ПТ

Отключение КЗ в сетях ПТ

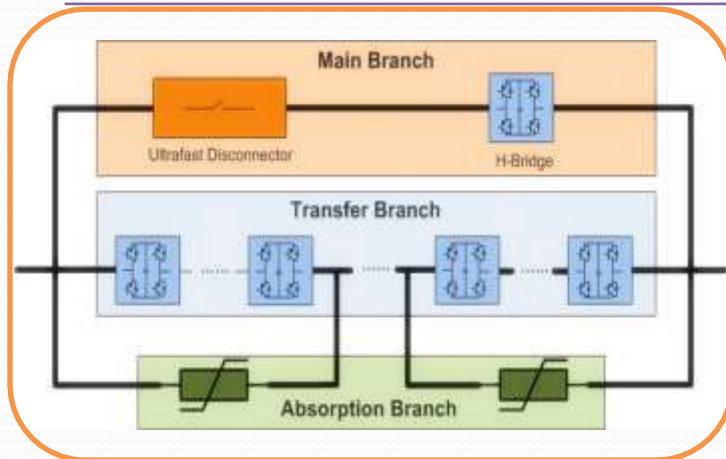
1. Выключатель ПТ (ВКПТ)
2. Блокирующий преобразователь (БП)+коммутационное устройство на стороне ПТ (БП+КУП)
3. ППТН с полумостовыми СМ + выключатель переменного тока + КУП

Варианты	1	2	3
Время отключения КЗ	< 5мс	>30мс	>70мс
Работа в режиме СТАТКОМ	Да	Да	Нет
Потери	Средние	Высокие	Низкие
Стоимость	Средняя	Высокая*	Низкая

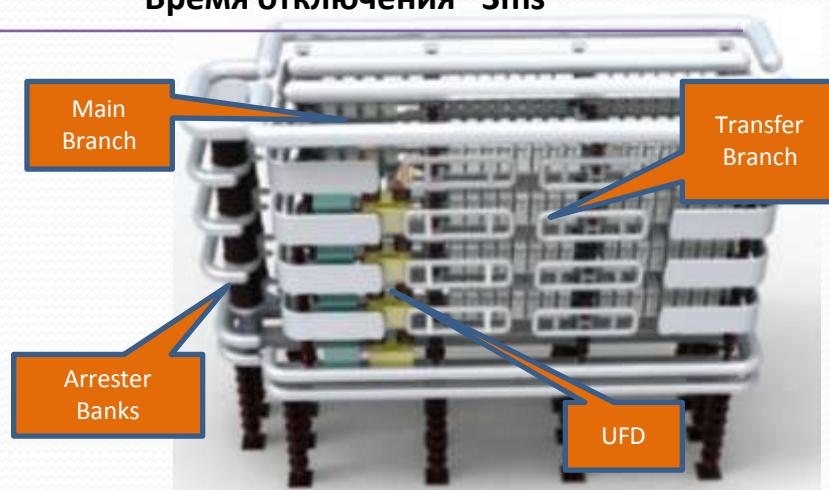
Выключатель постоянного тока

(разработчик – Китайская государственная энергетическая корпорация)

Напряжение	200кВ	Номинальный ток	1.2кА
Скорость нарастания	3.6кА/мс	Потери	<0.01%@1000 MW
Отключаемый ток	18кА	Время отключения	3мс



Схема



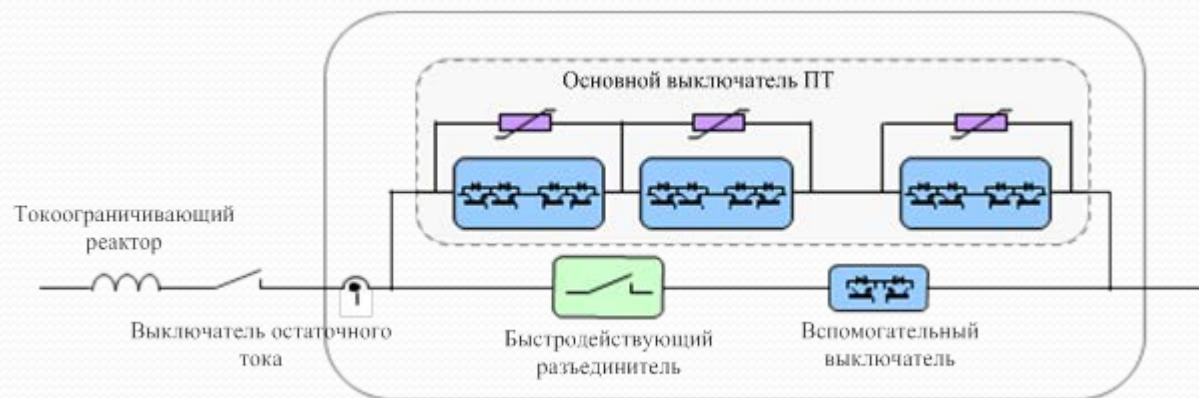
Прототип

- Три ветви: быстродействующий разъединитель, полномостовые силовые модули и разрядники
- Может работать в реверсивных схемах

Выключатель постоянного тока

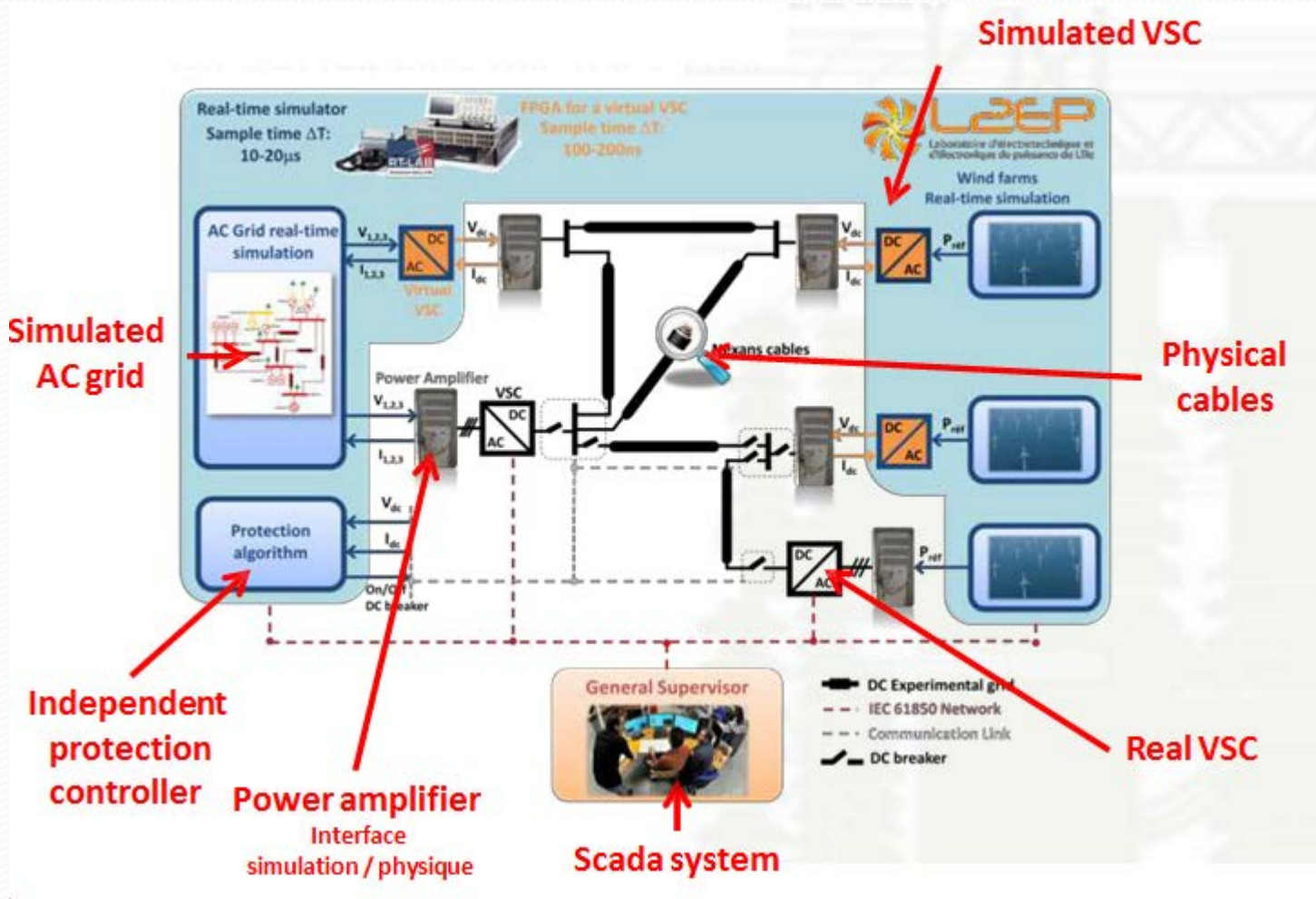
(разработчик ABB)

Номинальное напряжение одной ячейки	80 кВ	Номинальный ток	1.2 кА
Отключаемый ток	16 кА	Время срабатывания	2 мс



Гибридная модель пятитерминальной сети ПТ

$U_{dc} \pm 125 \text{ V}$, $I_{dc} 10 \text{ A}$ $U_{ac} 125 \text{ V}$



Причины использования физических элементов в модели:

- Корректное моделирование быстродействующих защит
- Низковольтный кабель ПТ 15 км:
распространение волны (скорость и форма)
- Датчики тока :

Полоса пропускания, задержки, помехи

- Выключатель ПТ:

время срабатывания не более 5 мс



Развитие ППТ ультравысокого напряжения в странах с протяженной территорией

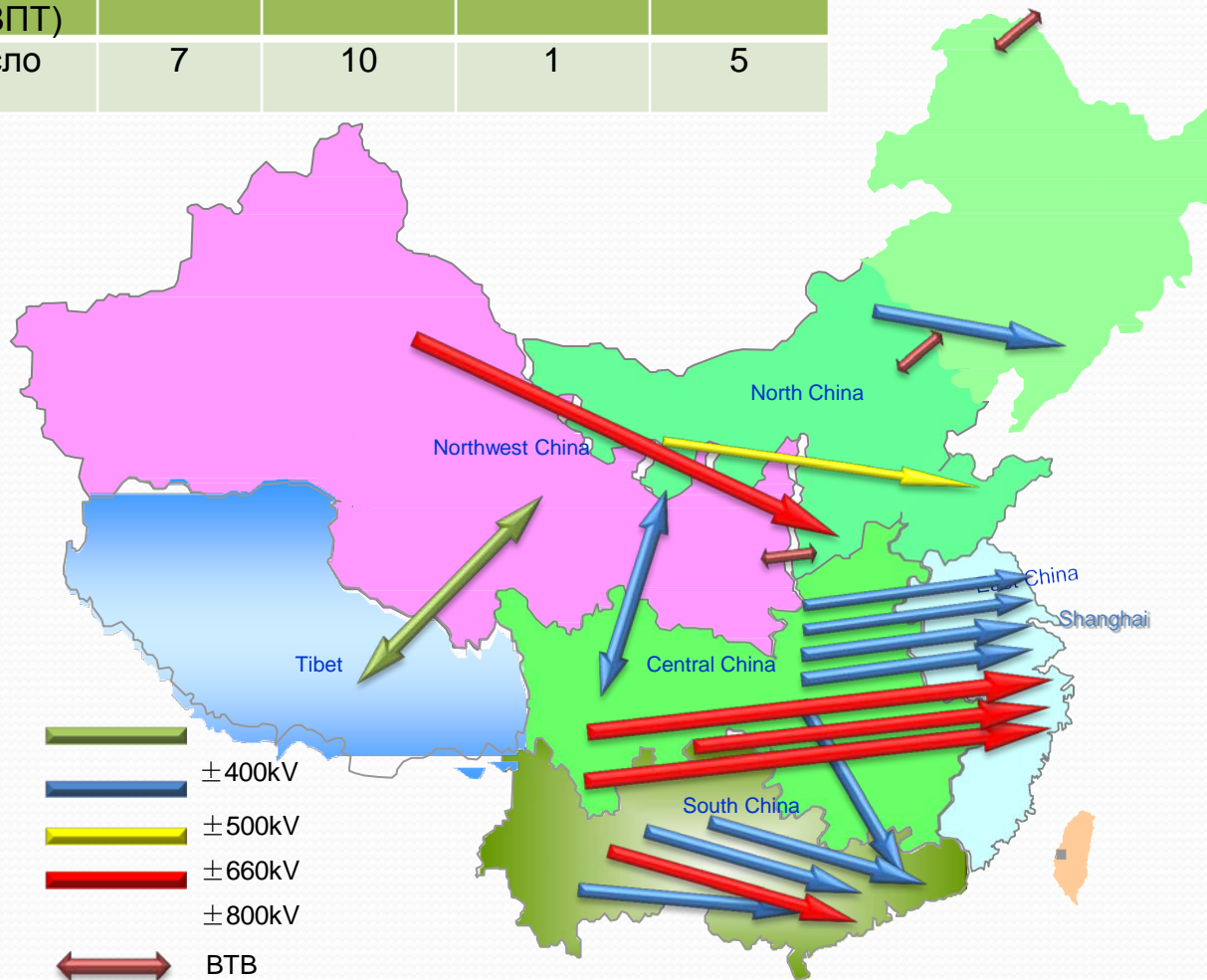
ППТ УВН в Китае

- Мощность ППТ $\pm 800\text{kV}$ около 35 ГВт
- Общая мощность ППТ 70 ГВт

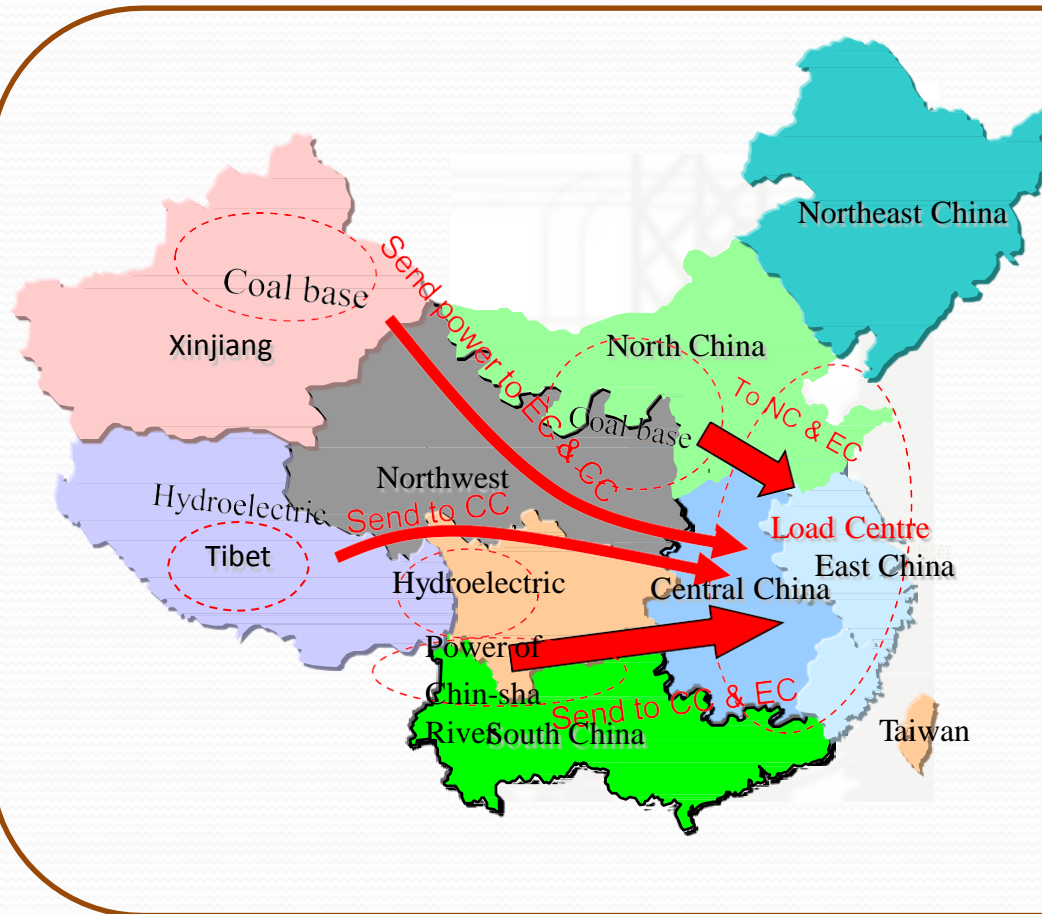
ППТ (ВПТ)	ВТВ	$\pm 500\text{kV}$	$\pm 660\text{kV}$	$\pm 800\text{kV}$
Число	7	10	1	5

800kV projects	Capacity
Yunnan-Guangdong	5000MW
Xiangjiaba-Shanghai	6400MW
Jinping-Sunan	7200MW
Hami-Zhengzhou	8000MW
Xiluo-Zhejiang	8000MW

500kV projects	Capacity
Gezhouba-Shanghai	1200MW
Tianshengqiao-Guangdong	1800MW
Three Gorges-Changzhou	3000MW
Guiyang-Guangdong I	3000MW
Three Gorges - Guangdong	3000MW
Three Gorges - Shanghai	3000MW
Guiyang-Guangdong II	3000MW
Deyang-Baoji	3000MW
Hulubeier-Liaoning	3000MW
Three Gorges - Shanghai II	3000MW



Неравномерное распределение энерго ресурсов и потребления

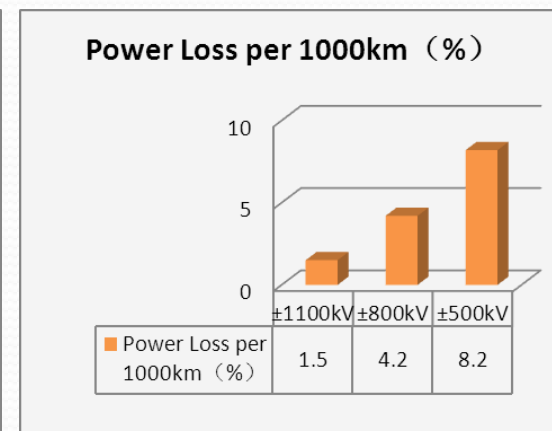
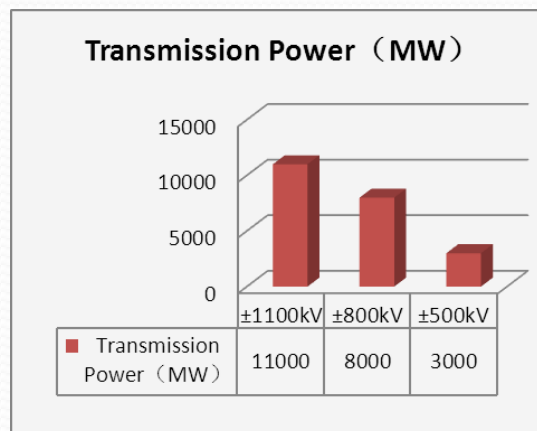
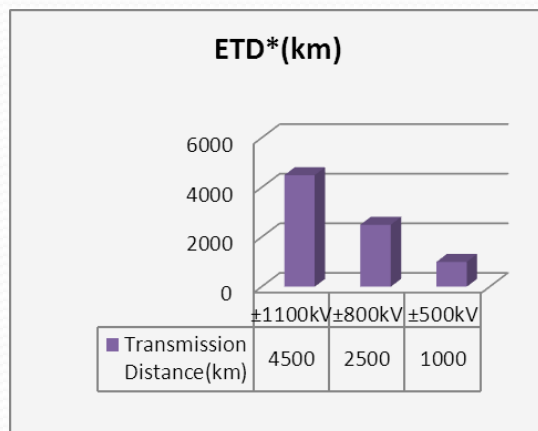


- Гидро и угольные ЭС в северной и юго-западной части Китая
- Центры потребления – в центральной и восточной частях
- Использование ППТ УВН для передачи мощности на дальние расстояния

Необходимость создания ППТ

УВН ± 1100 кВ

- Гидроресурсы в Тибете в угольные ресурсы в Ксиньянге до 160 ГВт (110 ГВт гидро & 50 гВт угольные ТЭЦ)
- Расстояние от Тибета и Ксиньянга до центров нагрузки превышает 2500 км
- Потери в линии длиной 2500 км напряжением ± 800 кВ составляют 10% и 4% в линии напряжением ± 1100 кВ при одинаковом токе (5 кА)

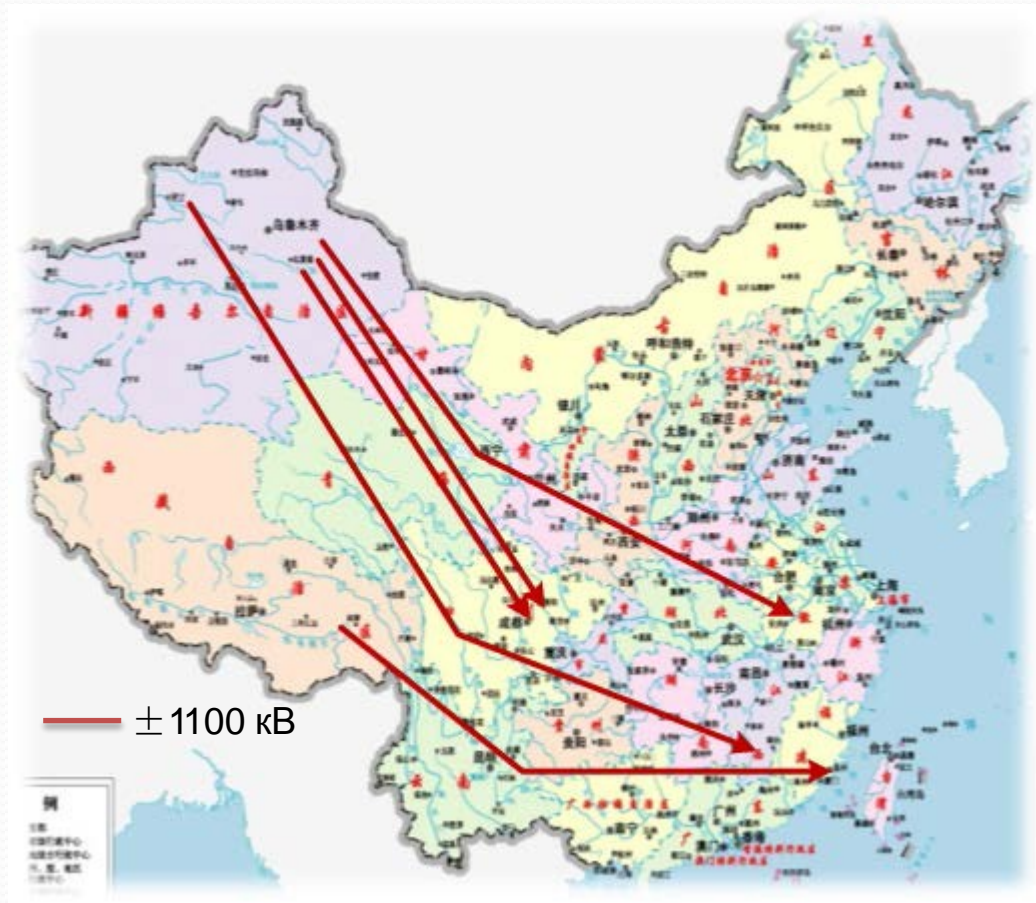


1.ETD*: Economical Transmission Distance

2.Economical Transmission Distance is determined based on 8% line losses

Проекты ППТ ±1100 кВ, намеченные к реализации до 2020 г в Китае

Выпрямительная ПС	Инверторная ПС
ZhunDong	ChengDu
ZhunDong	WanNan
ZhunDong	MianYang
YiLi	GanZhou
Tibet	QuanZhou



Основные параметры ППТ УВН ± 1100 кВ Zhundong Wuhan (ВЛ 3200 км)

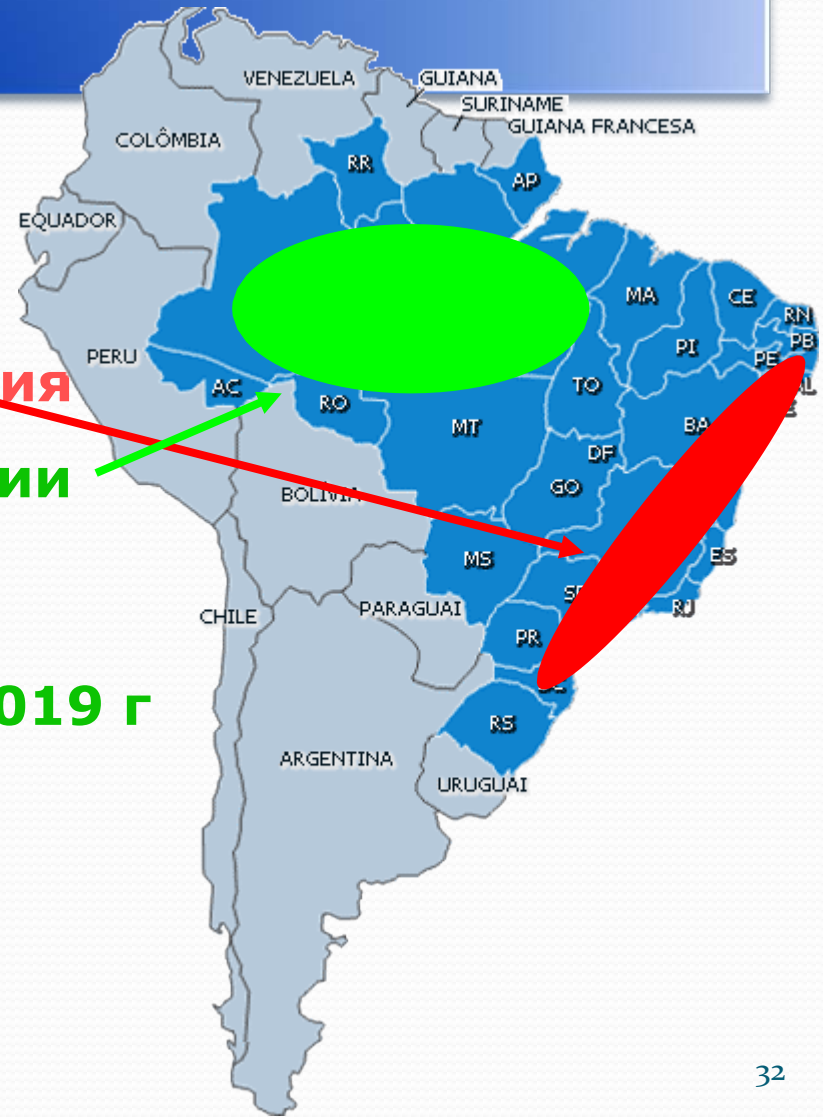
Наименование параметров	Параметры	
	Выпрямитель	Инвертор
Номинальная мощность, МВт	11000	11000
Номинальное напряжение, кВ	1100	1100
Номинальный ток, кА	5	5
Номинальное напряжение сети переменного тока, кВ	750	500
Число 12-пульсных мостов	4	4
Мощность трансформатора, МВА	563,79	539,66
Реактанс трансформатора, %	20	22
Число отпаяк 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

ППТ УВН в Бразилии

Проблема: неравномерное распределение генерации и нагрузки по территории страны
Решение: ППТ УВН

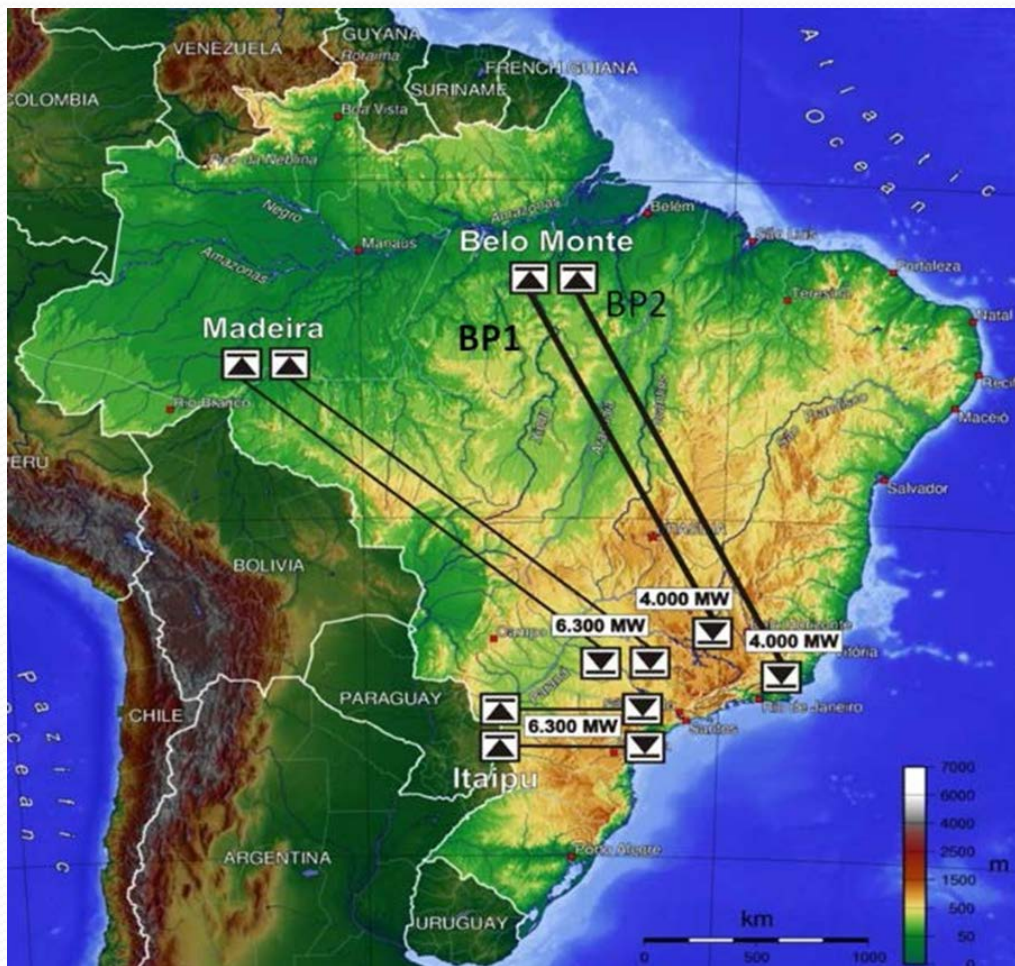
- Центры потребления
- Центры генерации

ГЭС Бело-Монте :
Мощность – 11233 МВт
Строительство с 2010 по 2019 г



ППТ УВН в Бразилии, планируемые к реализации до

2019 г



ППТ Бело Моте

BP1: 4000 МВт / ± 800кV / LCC / 2092 km

Тендер - 2014 г

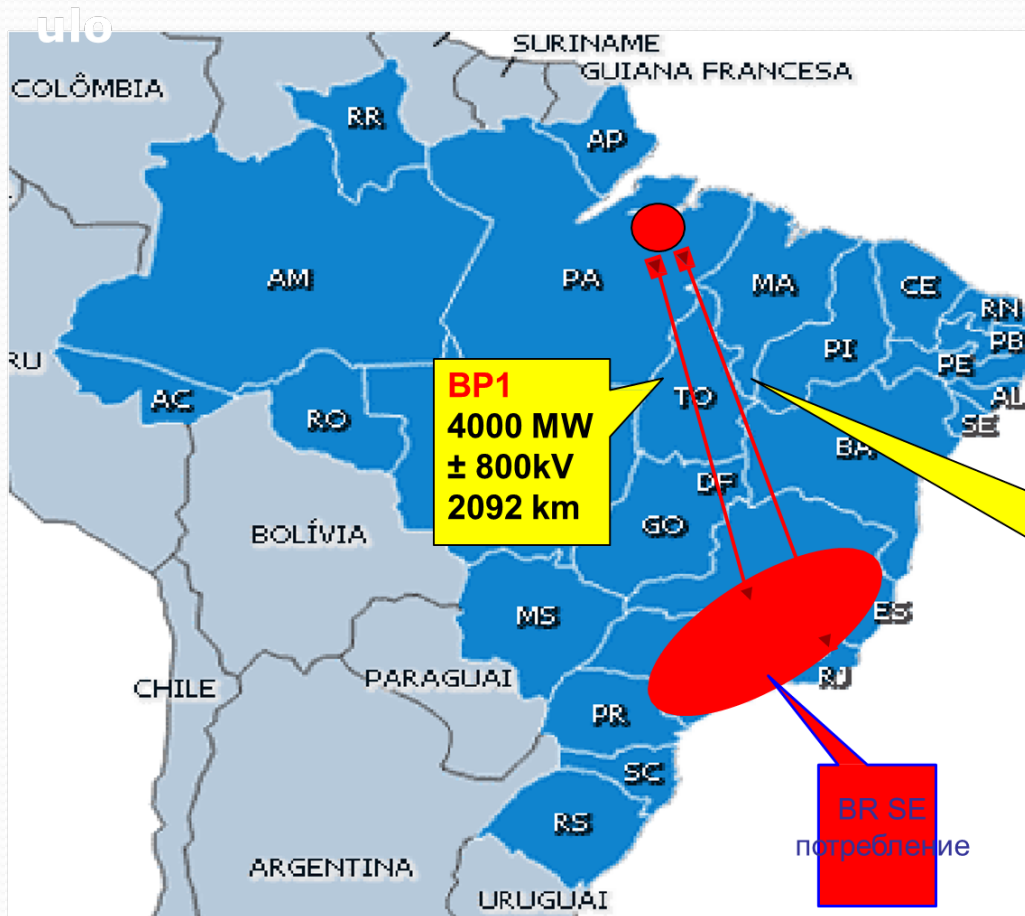
Производители: консорциум китайских и двух бразильских компаний

Окончание строительства 2017 г.

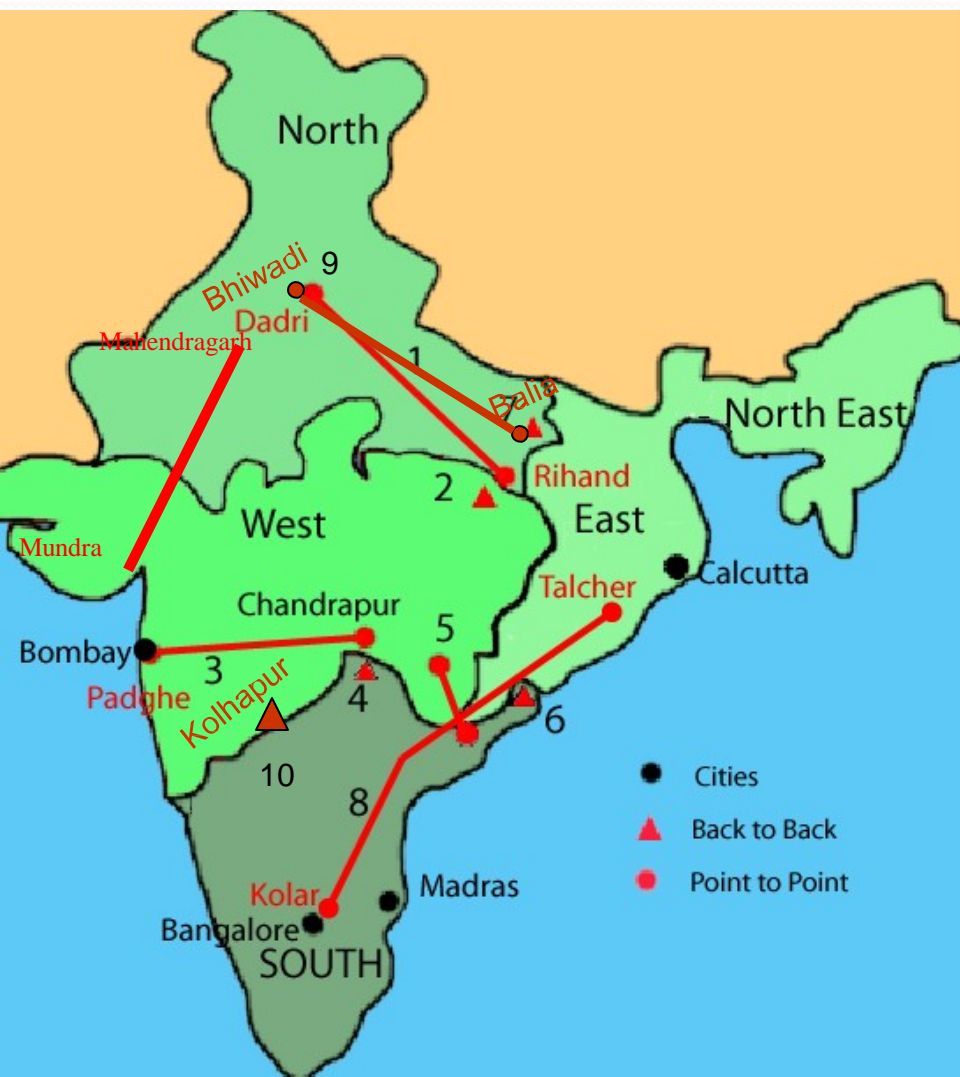
BP2: 4000 Вт / ± 800кV / LCC / 2439 km

Тендер - 2015 г.

Окончание строительства - 2019 г

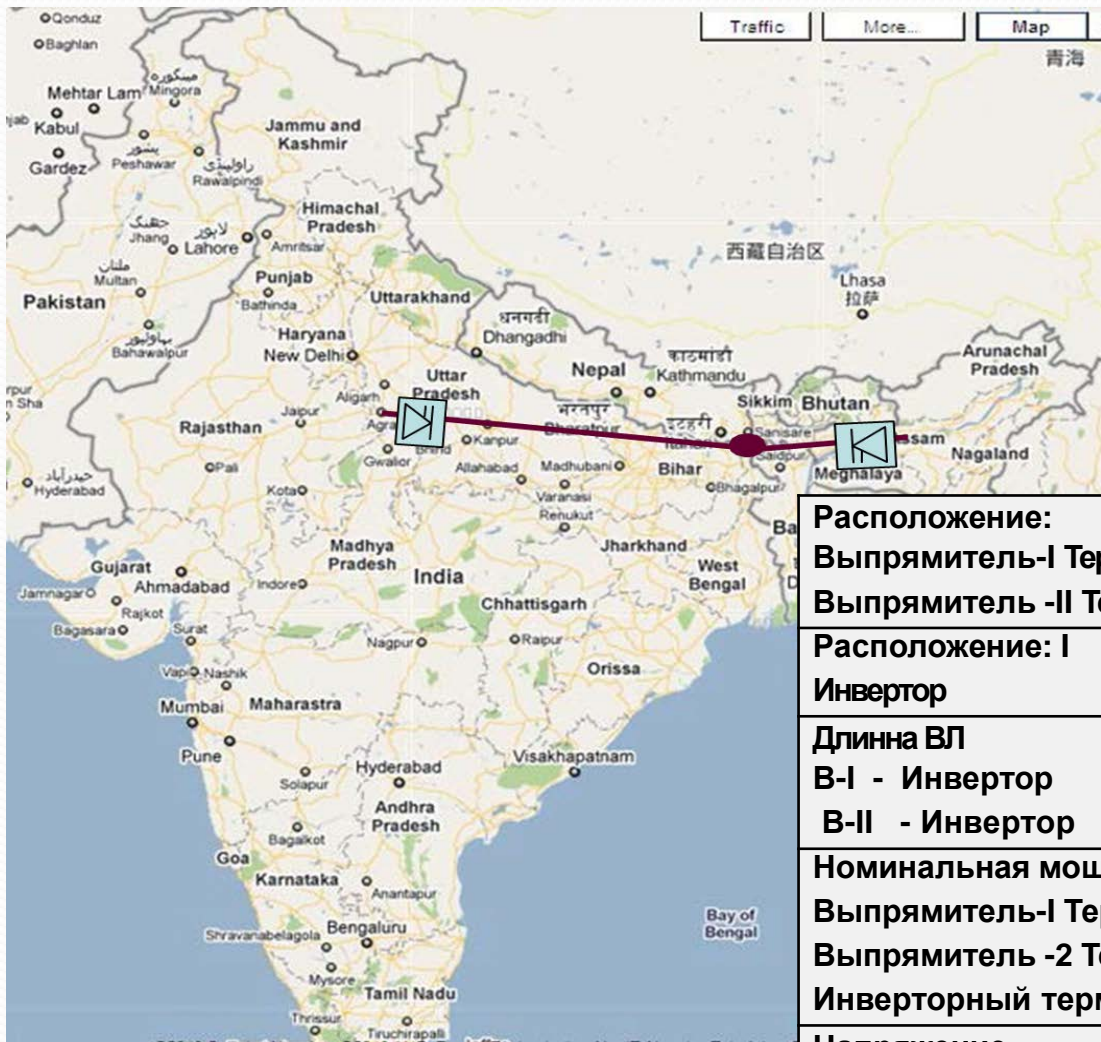


Существующие ППТ и ВПТ в Индии



- 1– Rihand-Dadri (1500MW)
- 2 - Vindiyachal (500MW)
- 3 - Chandrapur-Padghe (1500 MW) (MSEB)
- 4- Chandrapur-Ramagundam (1000MW)
- 5 – Gajuwaka 1 & 2(500MW each)
- 6 Sasaram (500MW)
- 7 - Talcher-Kolar (2500MW)
- 8 – Balia – Bhiwadi (2500 MW)
- 9 – Mundra – Mahendragarh (2500MW)

Сооружаемые ППТ В Индии



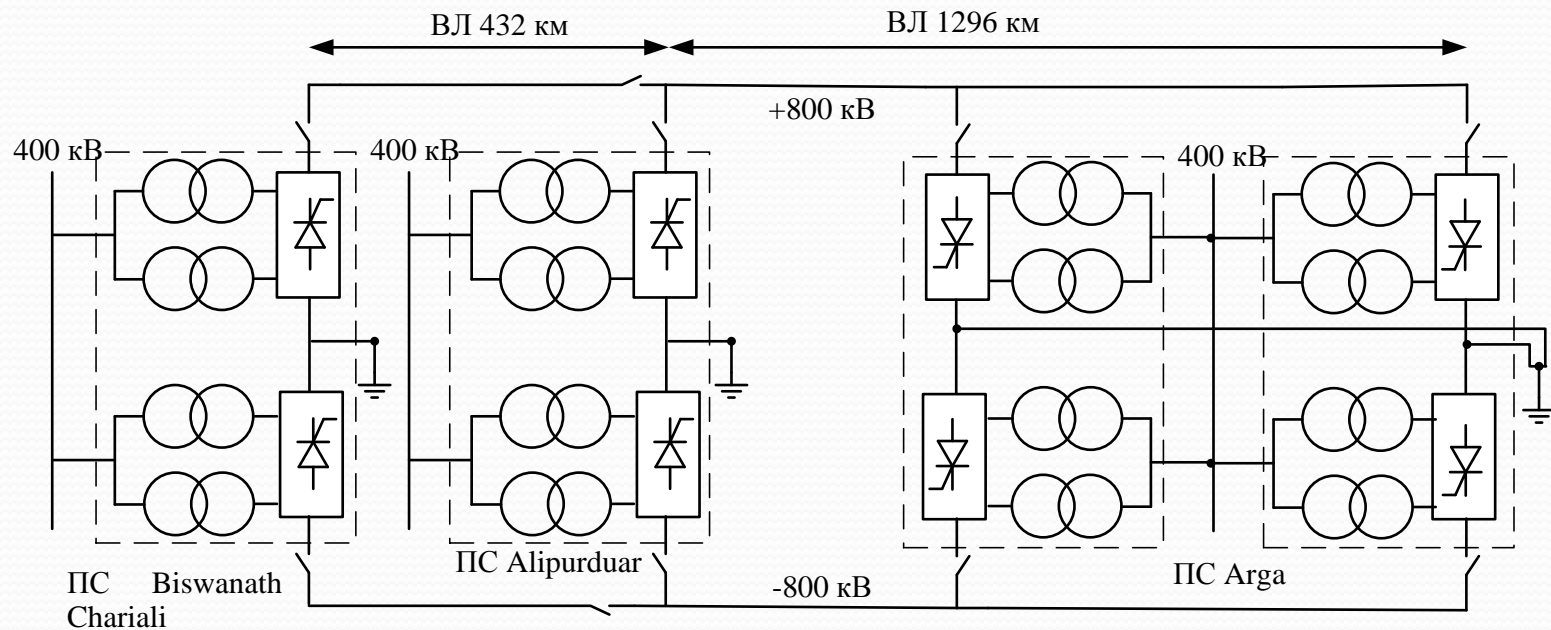
North-East Agra

Расположение:	
Выпрямитель-I Терминал	Biswanath Chairali, Assam
Выпрямитель -II Терминал	Alipurduar, West Bengal
Расположение: I	Agra, Uttar Pradesh
Инвертор	
Длина ВЛ	
В-I - Инвертор	About 1728 Km
В-II - Инвертор	About 1296 Km
Номинальная мощность:	
Выпрямитель-I Терминал	3000 MW
Выпрямитель -2 Терминал	3000 MW
Инверторный терминал	6000 MW (параллельная конфигурация)
Напряжение	± 800kV,
Напряжение примыкающих сетей	400 кВ

Сдача в эксплуатацию

2014-15

Схема ППТ УВН North-East Agra



Сооружаемые ППТ В Индии

Champa- Kurukshetra
± 800 KV , 6000 МВт



Расположение:	Champa (Western Part)
Выпрямитель	Kurukshetra (Northern Part)
Расположение :Инвертор	Kurukshetra (Northern Part)
Расстояние	1305 км
Мощность	3000 МВт + 3000 МВт
Напряжение примыкающих сетей	± 800kV
Напряжение примыкающих сетей	400kV AC
Сдача в эксплуатацию	Bipole 1: 2015 Bipole 2: 2017

Выводы

- Существует тенденция увеличения количества объектов постоянного тока, внедряемых в энергосистемах различных стран мира
- Развитие технологии передачи электроэнергии постоянным током с помощью преобразователей напряжения
- Создание технической базы для развития сетей ПТ
- Развитие ППТ ультравысокого напряжения в странах с протяженной территорией

Предпочтительные темы ИК В4 для обсуждения на 46 сессии

PS1 / Системы HVDC и области их применения:

- Планирование и реализация проектов HVDC, включая технико-экономическое обоснование, схемные решения, присоединение возобновляемых источников энергии, экологические аспекты.
- Применение новых технологий в HVDC, сетях постоянного тока, многотерминальных электропередачах постоянного тока высокого напряжения
- Реконструкция и модернизация
- Опыт эксплуатации

PS2 / FACTS и другая силовая электроника для электропередач:

- Планирование и реализация проектов FACTS, включая технико-экономическое обоснование, схемные решения, присоединение возобновляемых источников энергии, экологические аспекты.
- Применение новых технологий
- Реконструкция и модернизация
- Опыт эксплуатации

PS3 / Постоянный ток и силовая электроника для распределительных электрических сетей

- Применение для присоединения возобновляемых источников энергии, улучшения качества электроэнергии и увлечения эффективности использования капиталовложений
- Опыт эксплуатации
- Планирование и реализация, включая технико-экономическое обоснование, схемные решения, экологические аспекты.
- Новые схемные решения, алгоритмы управления и регулирования

Спасибо за внимание