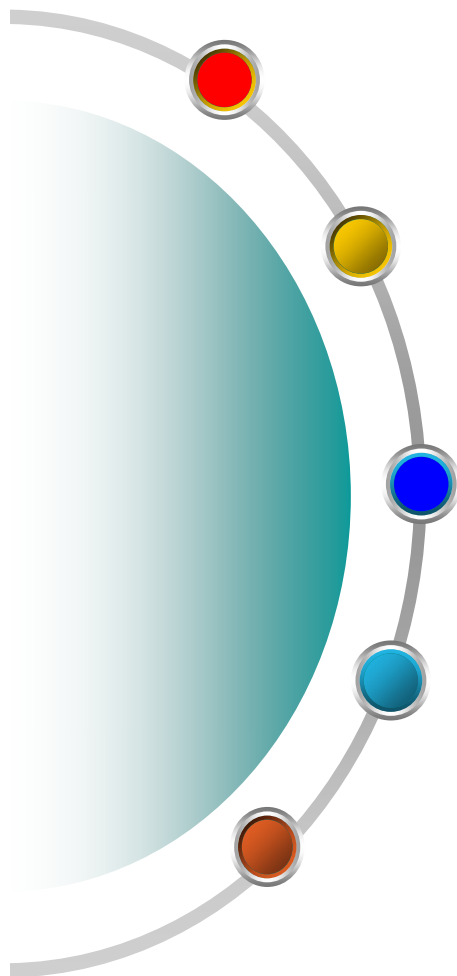


柔性直流输电

内 容 提 要



- 1 柔性直流输电概述
- 2 柔性直流输电运行原理
- 3 柔性直流输电设备
- 4 柔性直流输电换流器拓扑
- 5 柔性直流输电典型工程

1 柔性直流输电概述

- **1954年**，连接**Gotland**与瑞典大陆之间的世界上第一条高压直流输电线路建成，标志着以电流源换流器为基础的直流输电（**LCC-HVDC**）进入了商业化时代。
- **1990年**，加拿大**McGill**大学的**Boon-Teck Ooi**等首次提出使用脉宽调制技术（**PWM**）进行控制的电压源换流器直流输电（**VSC-HVDC**）的概念。
- **1997年**，**ABB**公司在瑞典中部的**Hallsjon**和**Grangesberg**之间建成首条工业试验**VSC-HVDC**工程。

从此**VSC-HVDC**作为一种新兴的输电技术开始进入大发展的商业应用阶段。

柔性直流输电的发展

不同的称谓

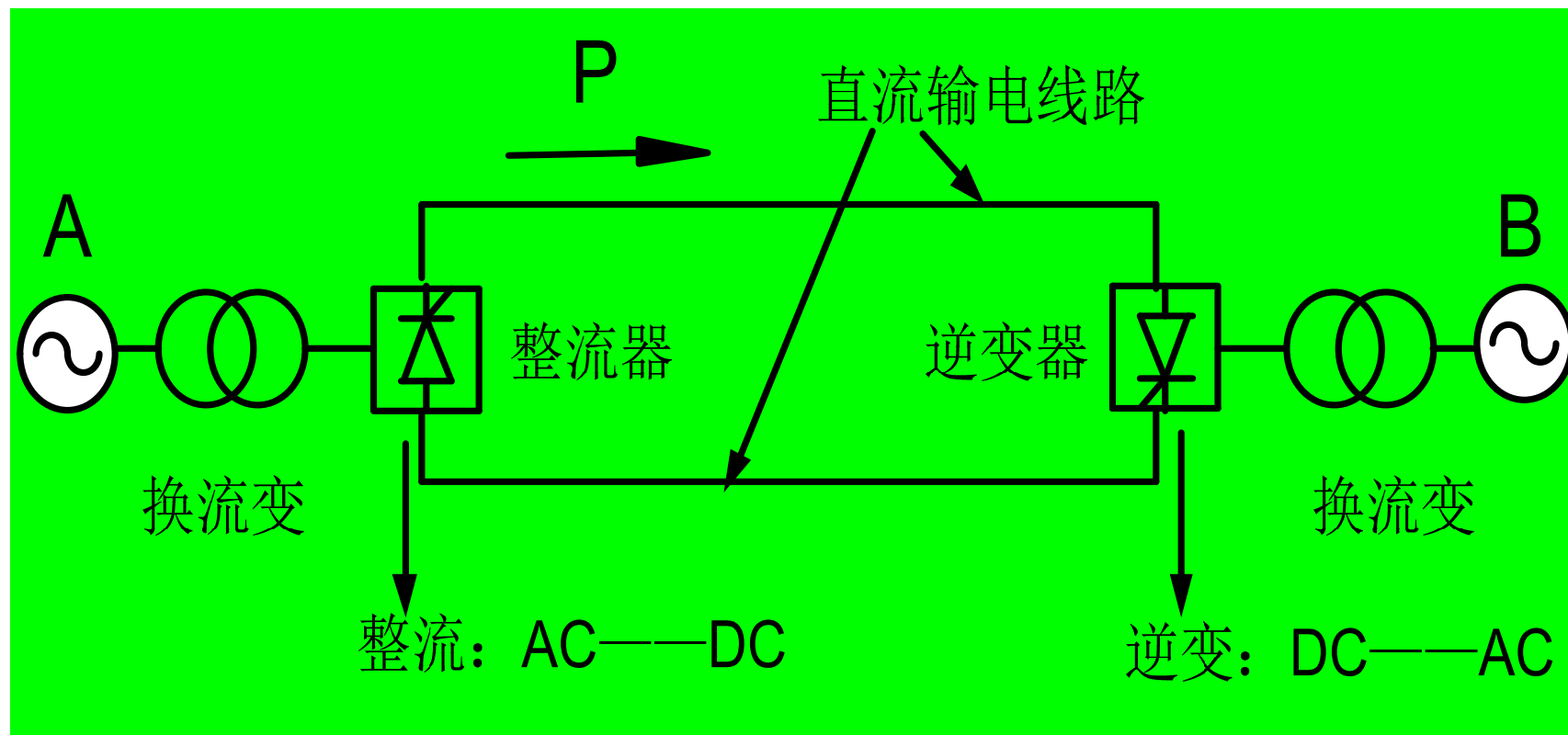
- ABB公司称之为**轻型直流输电**（**HVDC Light**）并作为商标注册；
- Siemens公司将其注册为**新型直流HVDC^{PLUS}**；
- 国际上电力学术组织CIGRE和IEEE将其正式称为**VSC-HVDC**，即“电压源换流器型高压直流输电”。
- 国内很多专家称之为“**柔性直流（HVDC-Flexible）**”。

柔性直流输电的发展趋势

- 随着直流电缆制造水平和半导体器件制造工艺的快速提升，高电压大容量的柔性直流输电系统将具备应用于大规模输电网的能力。

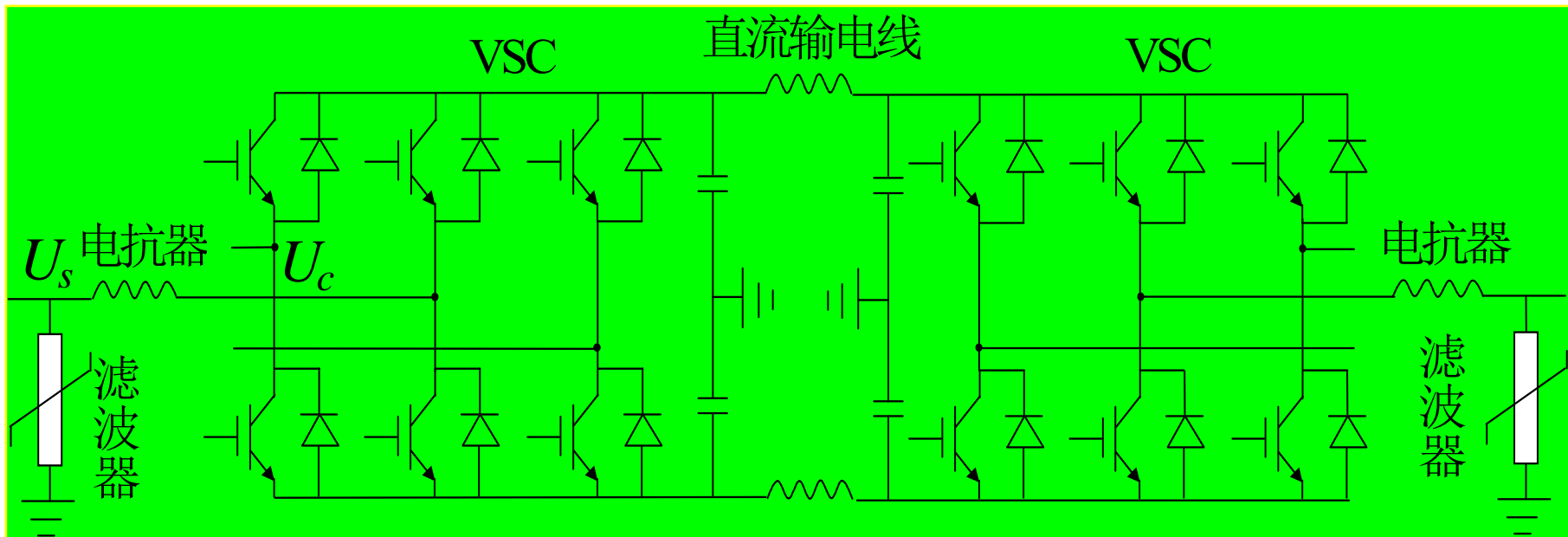
2 柔性直流输电运行原理

柔性直流与传统直流的比较



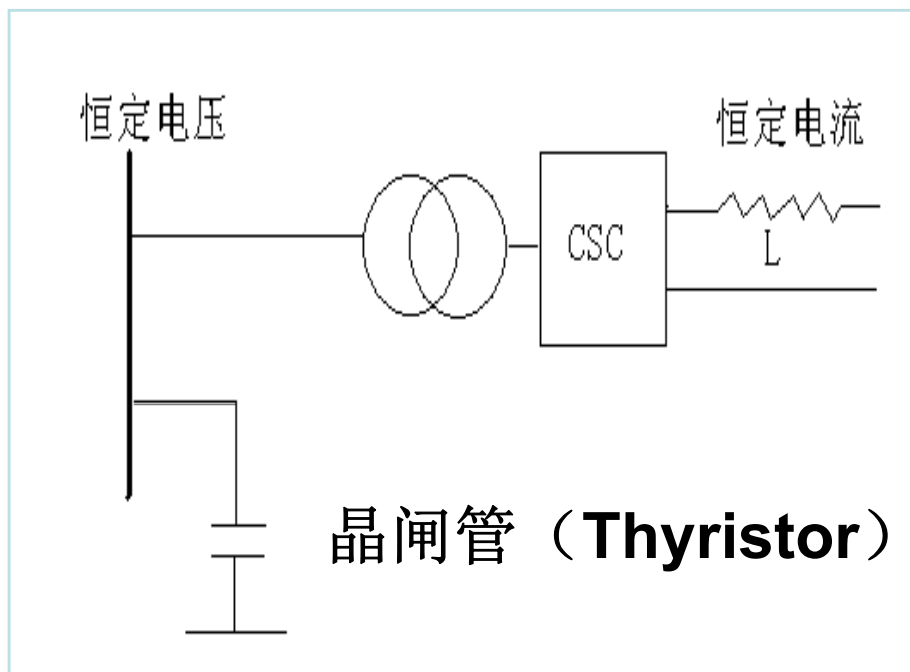
传统直流输电系统（LCC-HVDC）的拓扑

柔性直流与传统直流的比较

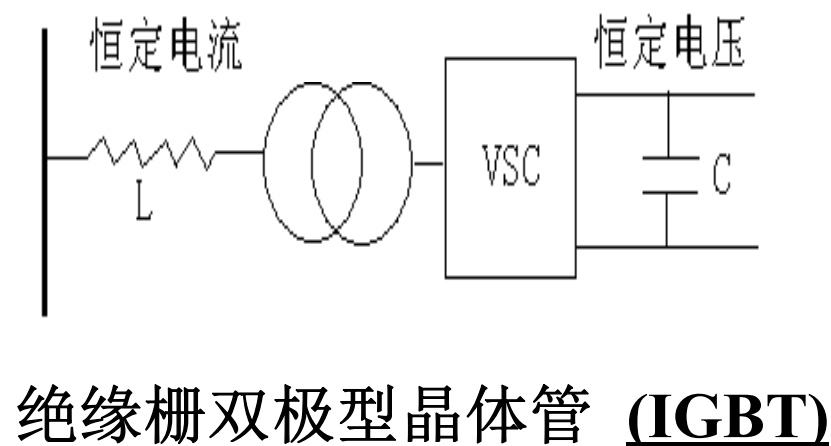


柔性直流输电系统（**VSC-HVDC**）的拓扑
（二电平为例）

柔性直流与传统直流的比较



电流源换流器



电压源换流器

柔性直流与传统直流的比较

电流源和电压源换流器的比较

电流源换流器	电压源换流器
电抗器 L 作为直流侧的储能元件，电容器 C 作为交流侧的储能元件	电容器 C 作为直流侧的储能元件，电抗器 L 作为交流侧的储能元件
直流电流是单向的，直流电压极性随直流潮流而变化	直流电压是单向的，直流电流极性随直流潮流而变化
控制快速准确	控制较慢
损耗较小	损耗较大
容量大	容量相对小
故障承受能力和可靠性较高	故障承受能力和可靠性较低

柔性直流与传统直流的比较

LCC-HVDC

交流侧提供换相电流，受端为有源网络，且容量足够大，否则易发生换相失败

吸收大量的无功功率，约为输送直流功率的40%~60%，需要大量的无功功率补偿和滤波设备

VSC-HVDC

电流自关断，可向无源网络供电

不需要交流侧提供无功功率且能起到STATCOM的作用，即动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流母线电压。若VSC容量允许，VSC-HVDC系统可向故障系统提供有功功率和无功功率的紧急支援，提高系统功角电压的稳定性。

柔性直流与传统直流的比较

LCC-HVDC	VSC-HVDC
潮流翻转时，直流电流方向不变而直流电压极性发生翻转，不利于构建多端直流输电系统	潮流翻转时直流电流反向，而直流电压极性不变， 有利于构成并联多端直流系统
换流器对于交流系统来说，除了是一个负荷（在整流站）和一个电源（在逆变站）以外，还是一个谐波电流源	采用SPWM技术，开关频率较高，经低通滤波后就可得到所需的交流电压，可不用换流变压器，所需滤波装置的容量也大大减小
控制量只有触发角， 2个象限运行，不可单独控制有功功率或无功功率	可在4个象限运行，同时且独立控制有功和无功功率
换流站间需要通讯	换流站间的通讯不是必需的

柔性直流与传统直流的比较

此外，由于VSC交流侧电流可以控制，同HVDC，不会增加系统的短路容量，也即增加柔性直流输电线路后，交流系统的保护整定无需改变。

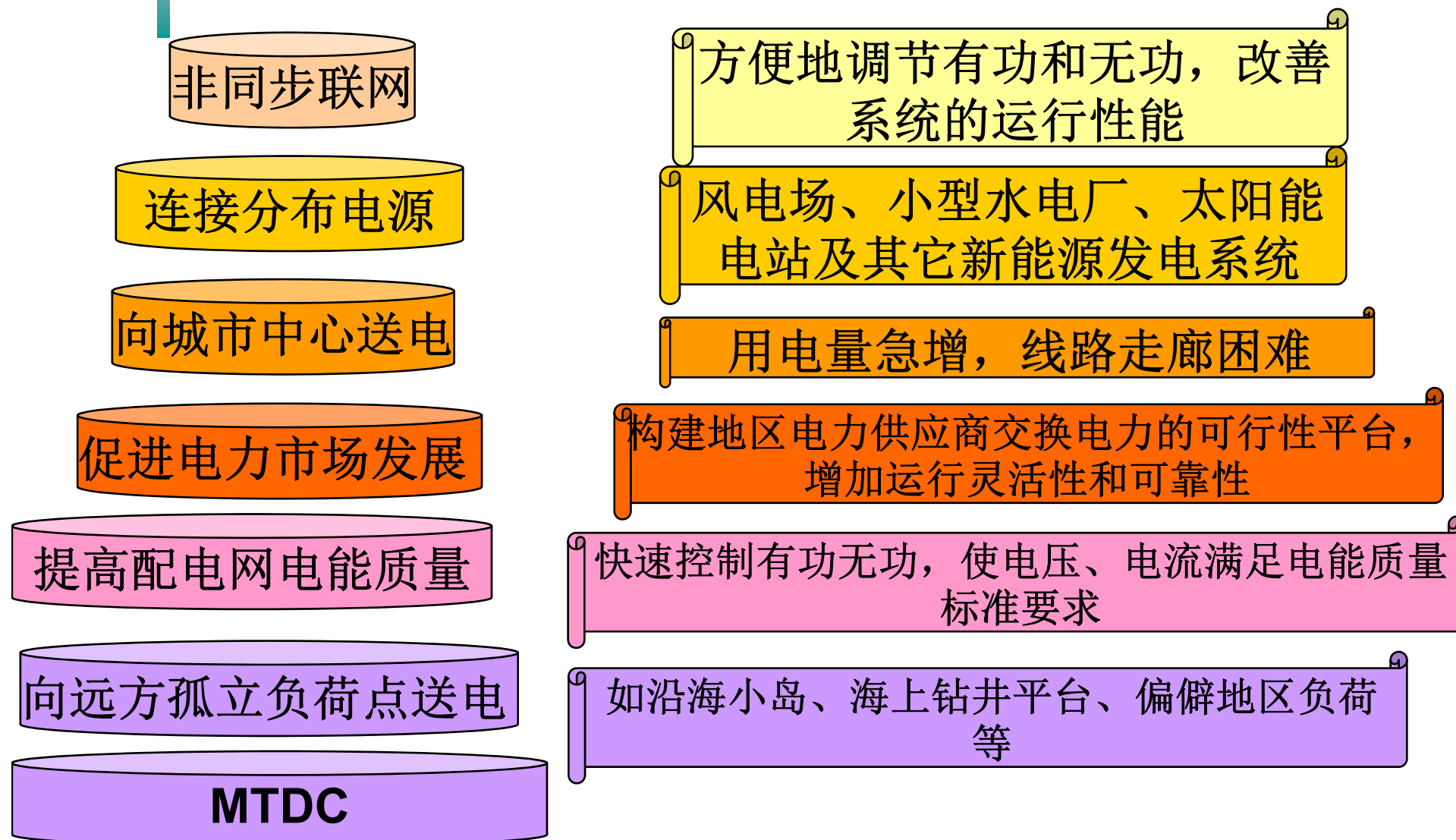
VSC-HVDC能够提高系统阻尼，通常情况下不会引起发电机组的次同步振荡，而且会提高发电机组的次同步阻尼。

VSC-HVDC换流站设备小型化和标准模块化模块化设计，占地面积小，设计、生产、安装和调试周期大大缩短，并具有更高的可靠性。

柔性直流输电的技术特点

- 能对有功和无功进行独立控制，能给无源网络提供电源；
- 能为交流侧提供无功支持，起到STATCOM的作用，对电压质量和电压问题提供支撑；
- 换流站标准化、小型化，整体式的设计以及可以进行出厂前的调试，有利于缩短施工时间，并保证其可靠性；
- 无需架设架空线，并在噪音水平、谐波畸变、电话干扰和电磁场等方面满足环境保护的要求。

柔性直流输电的应用场合



柔性直流输电典型应用领域

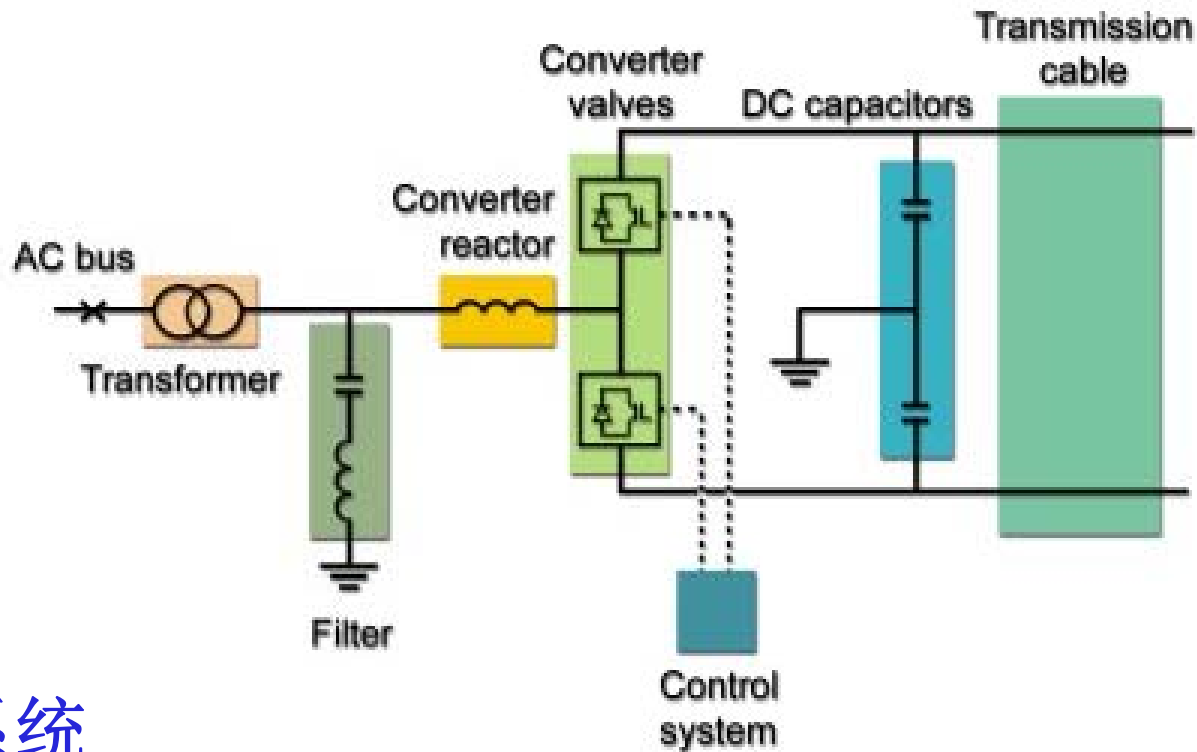


3 柔性直流输电系统设备

VSC-HVDC的设备

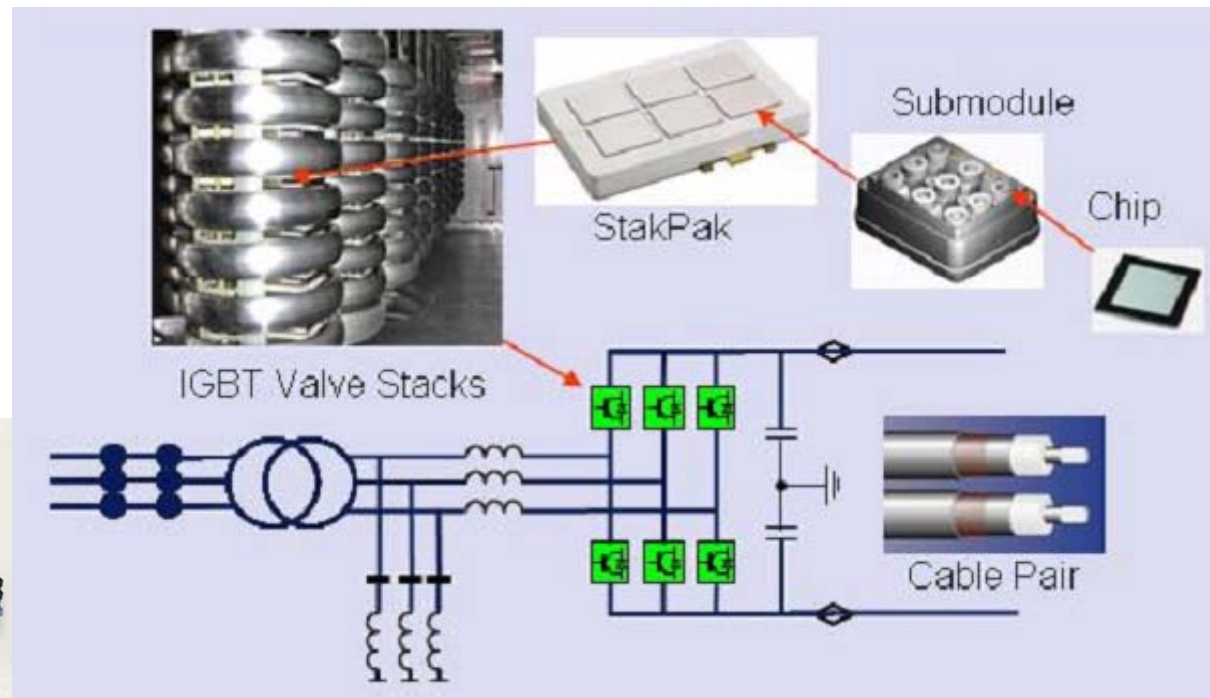
主要由七部分构成：

- ⊕ 换流桥
- ⊕ 换流变压器
- ⊕ 换流电抗器
- ⊕ 交流滤波器
- ⊕ 直流电容器
- ⊕ 直流电缆
- ⊕ 控制与保护系统



VSC-HVDC的设备1—换流桥

换流桥每个桥臂是由若干个**IGBT**级联而成。对于大容量换流器，每臂可能有上百个**IGBT**级联而成。**IGBT**旁边都反并联一个二极管，它不仅是负载向直流侧反馈能量的通道，同时也起续流的作用。



VSC-HVDC的设备2—换流变压器

不同于**CSC-HVDC**，**VSC-HVDC**并不需要特殊的换流变压器或移相变压器，其所用换流变压器与**常规**的**单相或三相变压器**大体类似。



VSC-HVDC的设备3—换流电抗器

换流电抗器是**VSC**与交流侧能量交换的纽带，决定有功功率与无功功率的控制性能

⊕作用

- ⊕ 滤除换流器所产生的特征谐波，以获得期望的基波电流和基波电压；
- ⊕ 抑制直流过电流的上升速度。



VSC-HVDC的设备4—直流电容器

⊕ 作用：

- ⊕ 为逆变器提供电压支撑；
- ⊕ 缓冲桥臂关断时的冲击电流；
- ⊕ 减小直流侧谐波。





VSC-HVDC的设备5—交流滤波器

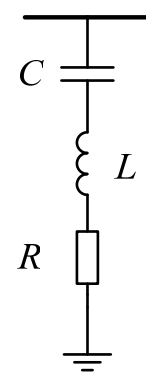
换流站在较高的开关频率下，其输出的交流电压和电流中含有的低次谐波很少。

换流电抗器的滤波作用使得电流的谐波较容易符合标准。然而，在没有任何滤波装置的情况下，输出的交流电压中还含有一定量的高次谐波，且其总的谐波畸变率并不能达到相关的谐波标准。故装设小容量滤波器。

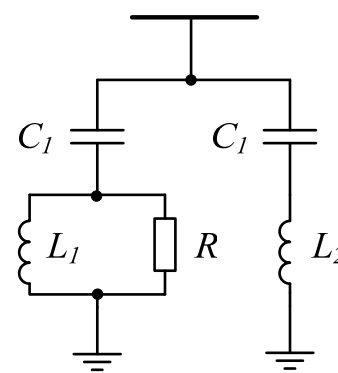
⊕ 作用：

⊕ 滤去交流侧电压谐波分量；

⊕ 对系统提供部分无功补偿的作用。



(a)二阶高通滤波器

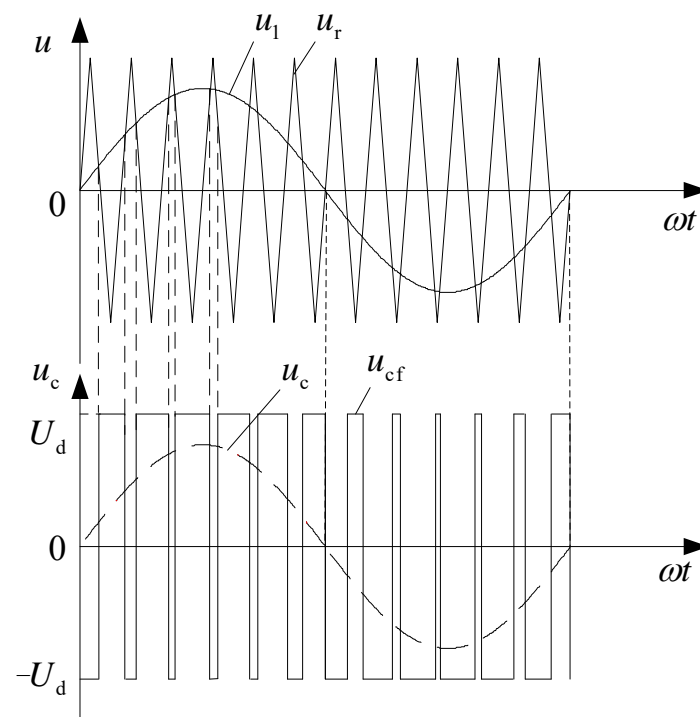
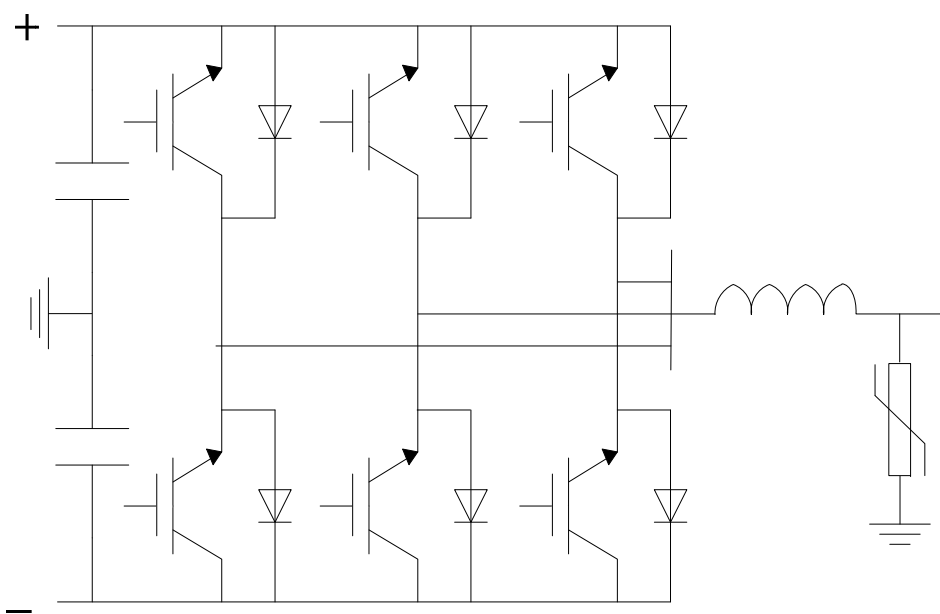


(b)四阶高通滤波器

4 柔性直流输电换流器拓扑

柔性直流输电换流器拓扑及调制策略

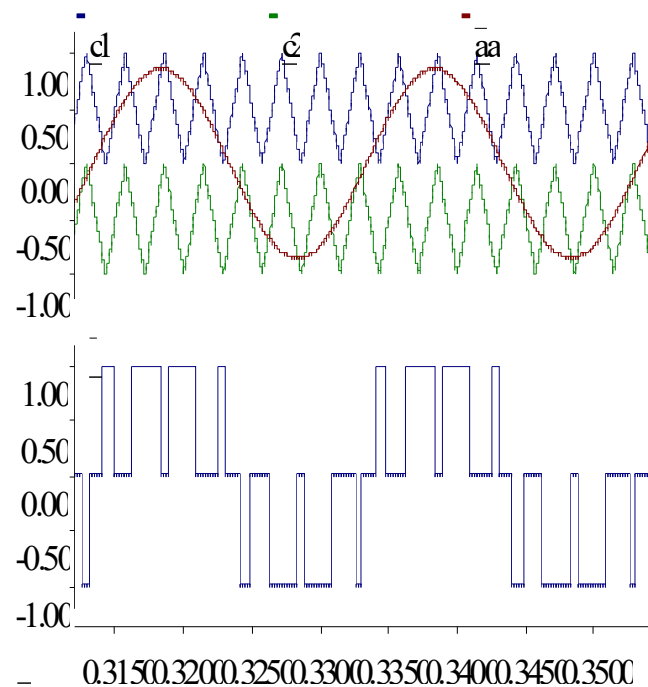
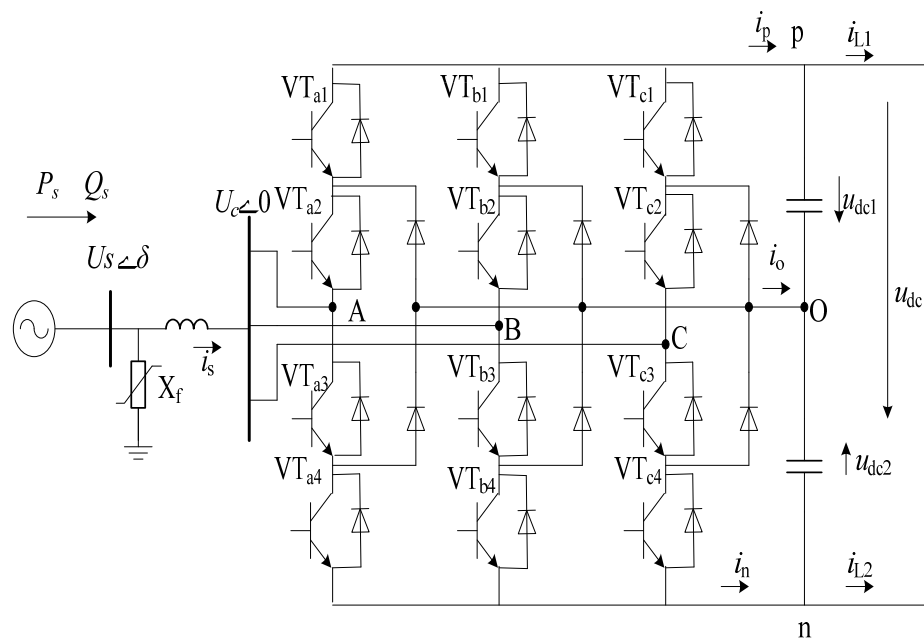
拓扑结构1—两电平结构



现在世界范围内已投运的柔性直流输电大多为两电平结构

柔性直流输电换流器拓扑及调制策略

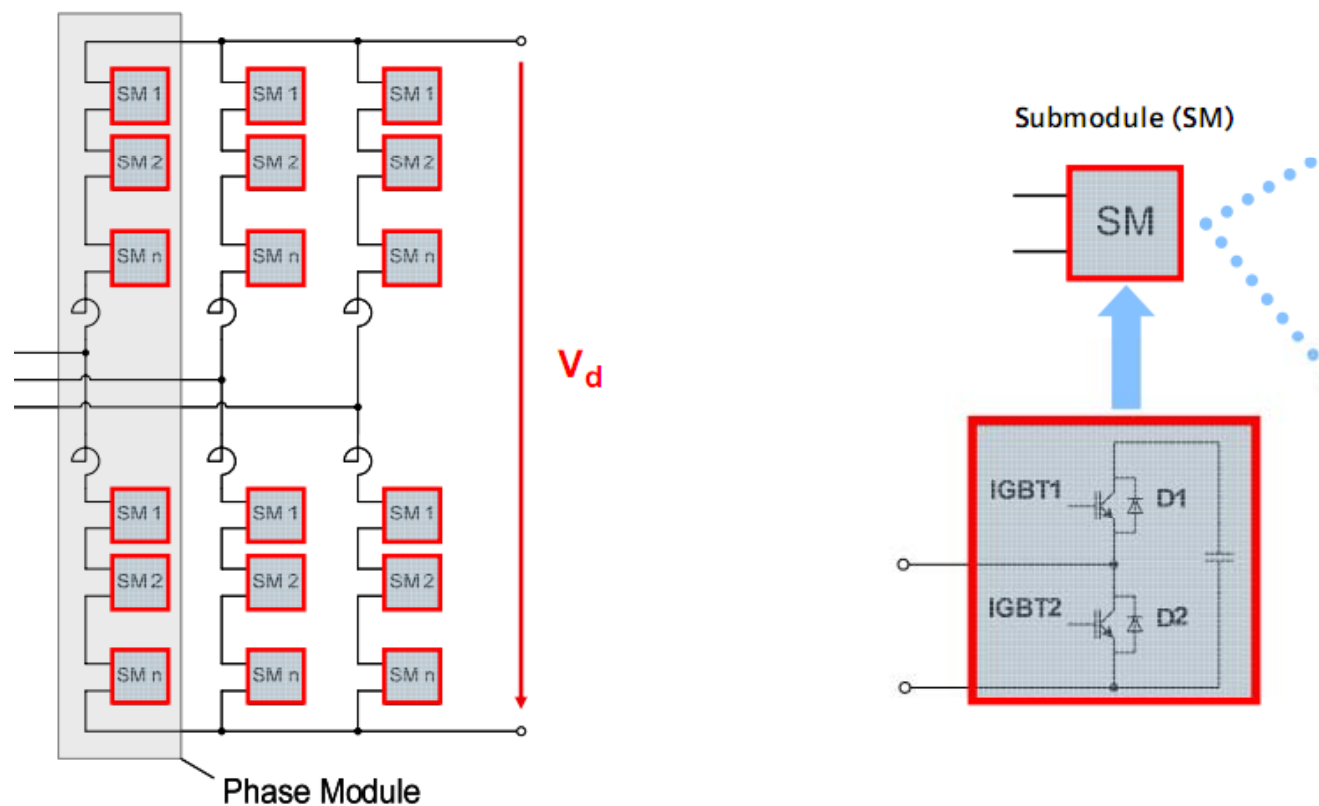
拓扑结构2—三电平结构



三电平结构也有工程投运，比两电平结构开关频率低，损耗小。

柔性直流输电换流器拓扑及调制策略

拓扑结构3—多电平结构1（半桥）



模块化多电平换流器（MMC）由西门子公司首先实施

MMC的优势

MMC的技术优势:

MMC

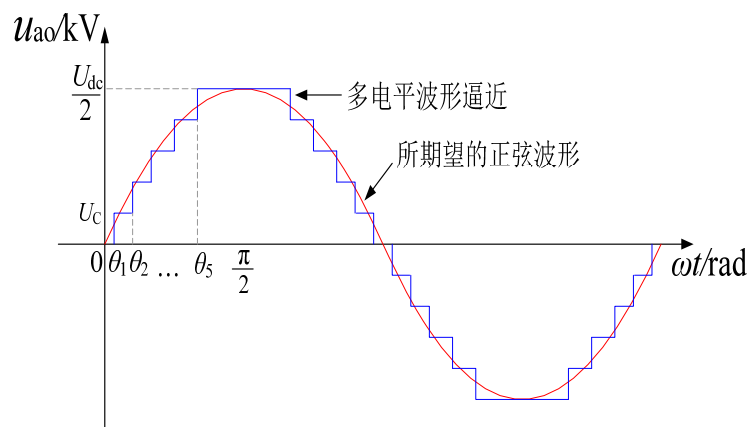
模块化设计

开关频率低损耗小

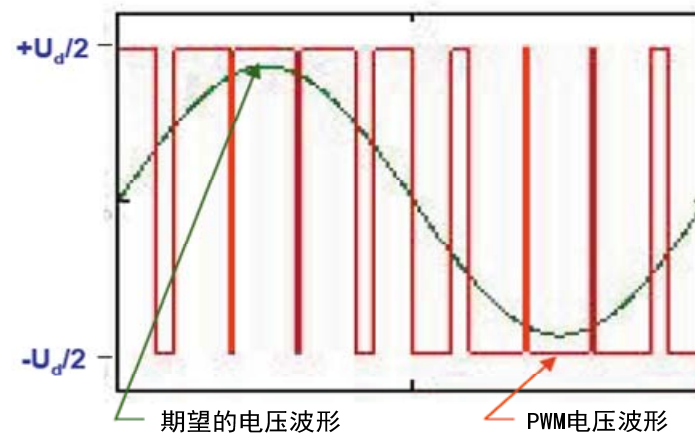
输出滤波器容量小

电压谐波畸变率小

投资成本较低



MMC输出的多电平波形



两电平VSC输出波形

5 柔性直流输电典型工程

柔性直流输电典型工程-TBC

西门子公司建设的世界上第一个采用MMC结构的柔性直流输电工程：**HVDC PLUS工程——“Trans Bay Cable Project（TBC）”**，已于**2010**年投运。工程的目的是用来消除加利福尼亚州匹兹堡到旧金山之间的输电瓶颈并增强系统的安全性和可靠性。

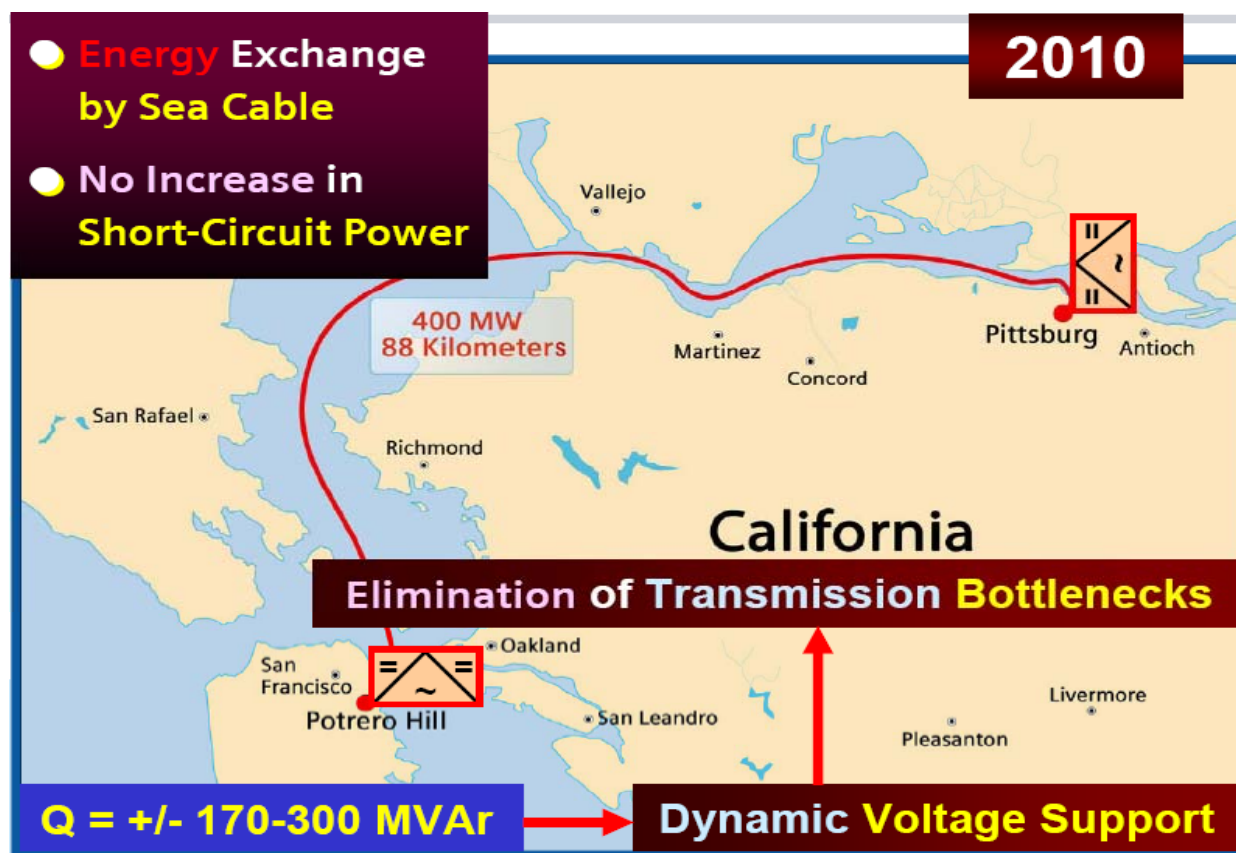
柔性直流输电典型工程-TBC

“Trans Bay Cable Project”

传输容量: **400MW**

直流电压: **$\pm 200\text{kV}$**

桥臂子模块数: **216**



“Trans Bay Cable Project”

柔性直流输电典型工程-TBC

HVDC PLUS 与HVDC的比较

比较项目	HVDC	HVDC PLUS 方案
换流站建筑物高度	19.8米	10.7米
旧金山伊利诺伊街道噪音	72dB	48dB
避雷针高度	26米	20米
覆盖区域	20,200平方米	12,100平方米
交流滤波器	需要	不需要
布局大量设备导致布局	受限	可以较为灵活布置，美观
变压器	换流变压器	可使用常规变压器，体积较小
无功支持	无	两换流站能够提供+170至-300Mvar无功
受端电源	需要	不需要

我国柔性直流输电发展现状

1-上海南汇风电场柔性直流输电工程：

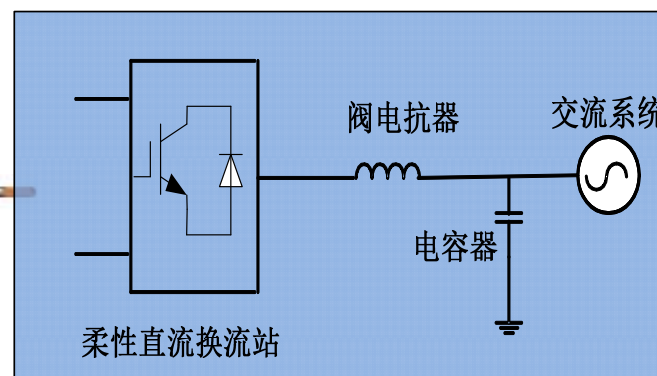
- 传输功率： 18MW
- 直流电压： $\pm 30\text{kV}$
- MMC电平数： 49

柔性直流输电示范工程建设

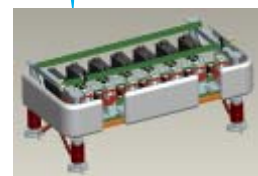
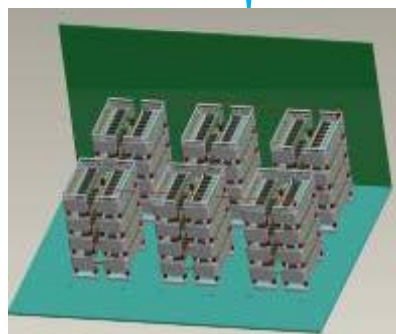
2011年7月25日，亚洲首项柔性直流输电示范工程——上海南汇风电场柔性直流输电工程投入正式运行。这是我国第一条拥有完全自主知识产权、具有世界一流水平的柔性直流输电线路，它的成功投运标志着我国在智能电网高端装备方面取得重大突破。工程的投运将打破ABB在柔性直流输电工程上的独家垄断地位。



示范工程换流站效果图



示范工程原理图

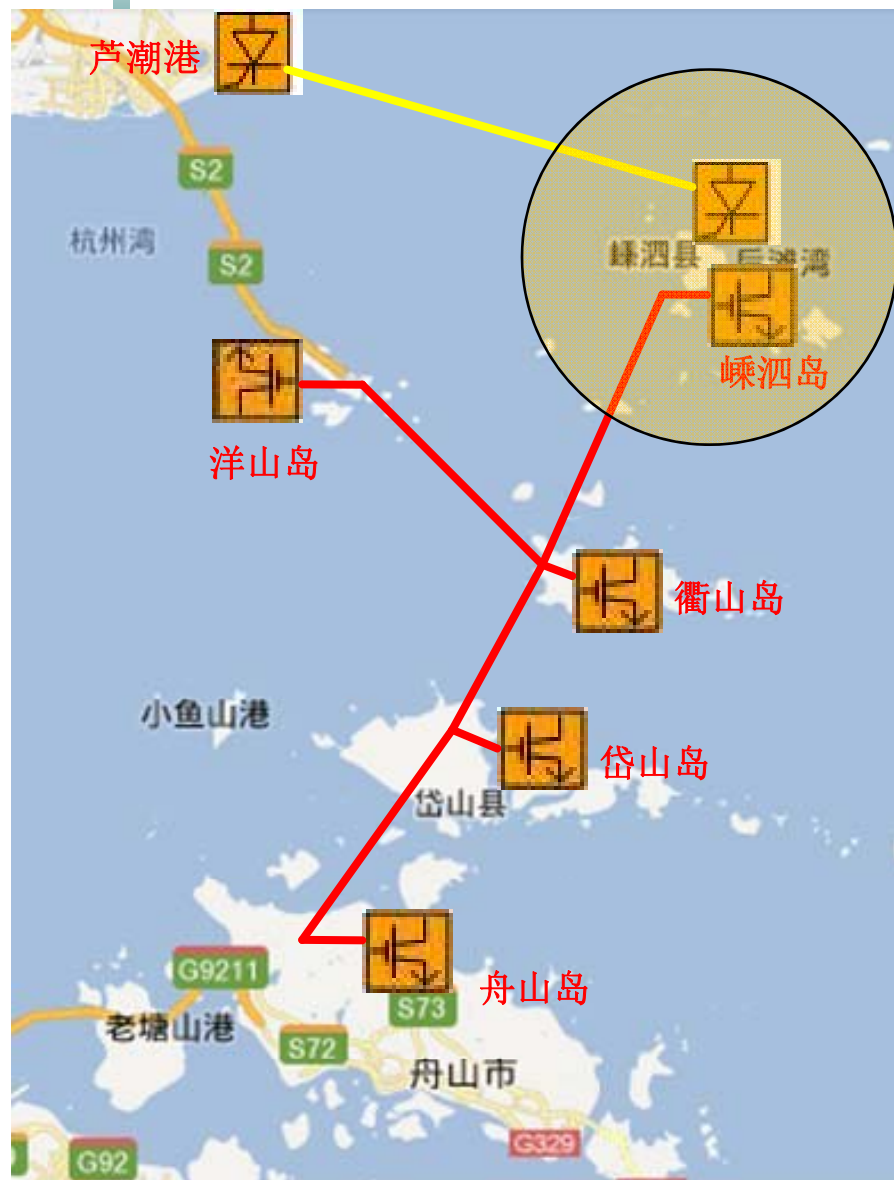


2-大连跨海柔性直流输电重大科技示范工程



◆ 直流电压: $\pm 320 \text{ kV}$

我国柔性直流输电发展现状



3-舟山5端MMC-HVDC直流输电工程

世界首个五端柔直工程

系统参数:

◆ 额定容量: 400MW

◆ 直流电压: ± 200 kV