

# 柔性直流换流阀技术及应用

李 鹏

国网江苏电科院

2024年6月

# 目录

## CONTENTS

1

**柔性直流技术概况**

2

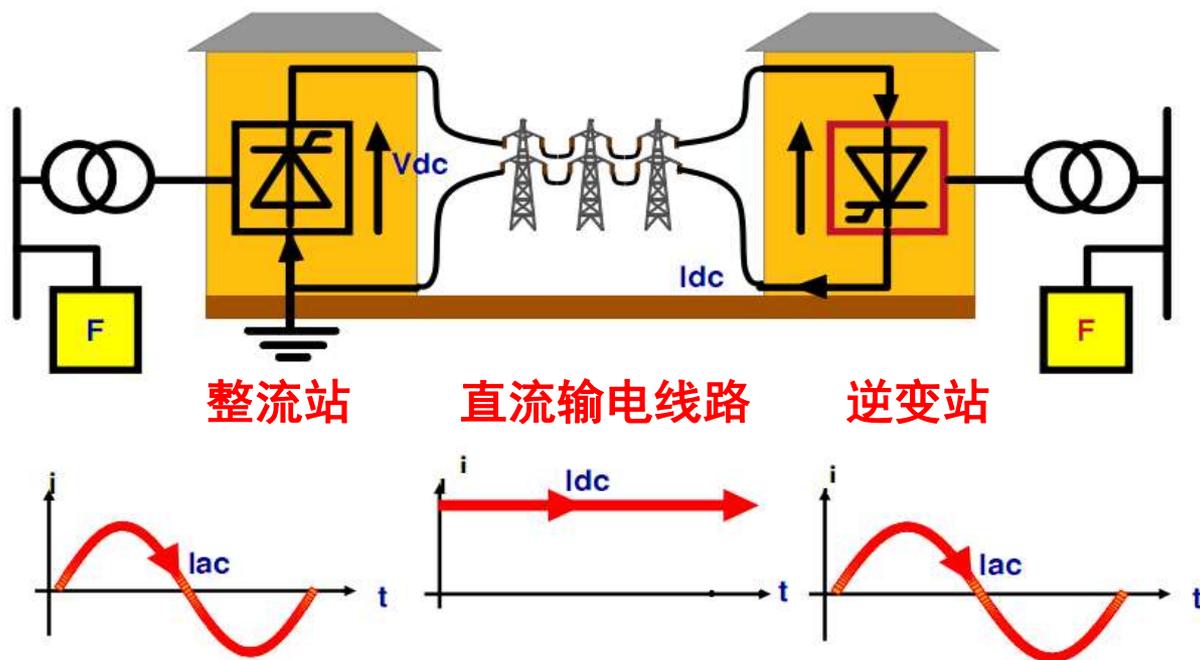
柔性直流换流阀技术

3

柔性直流工程

# 1.1 直流输电技术发展

- 直流输电技术与高电压、大功率电力电子技术的发展密切相关，包括：电力电子器件和换流技术。



# 1.1 直流输电技术发展

## 直流输电电力电子技术发展：

### ● 第一阶段：汞弧阀换流时期

- ✓ 1928年，具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功，为高压直流输电发展创造了条件；
- ✓ 1954年，世界首个工业用高压直流输电系统——**瑞典±100kV/20MW哥特兰岛直流工程**投运。
- ✓ 1954-1977年，共投运**12个**汞弧阀直流输电工程。
- ✓ 制造技术复杂、价格昂贵、故障率高、可靠性低、维护不变等缺陷使得直流输电应用受到限制。



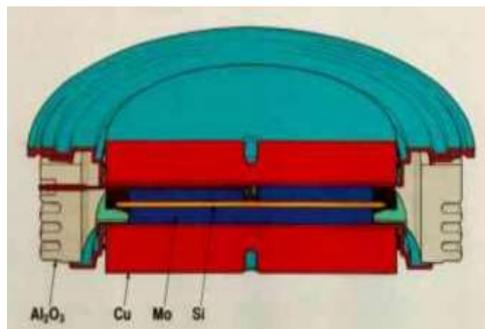
1954年，用于第一套 Gotland 线路的汞弧阀



# 1.1 直流输电技术发展

## ● 第二阶段：晶闸管换流时期

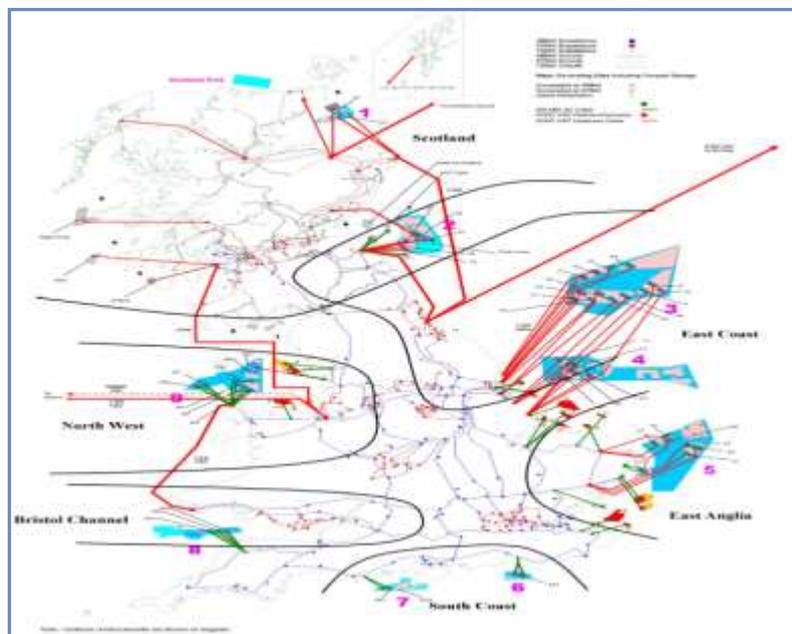
- ✓ **晶闸管**：又称可控硅，通过控制门极信号，可控制其开通，但不能控制关断，为半控型器件。
- ✓ 1970年，瑞典首先在哥特兰岛直流输电扩建工程中采用了晶闸管换流阀（50kV/10MW）；
- ✓ 1972年，世界首个全部采用晶闸管阀的直流输电工程加拿大伊尔河背靠背直流输电系统建成；
- ✓ 晶闸管换流阀以其运行可靠、制造简单和维护方便等优势逐步在直流输电取代了汞弧阀。



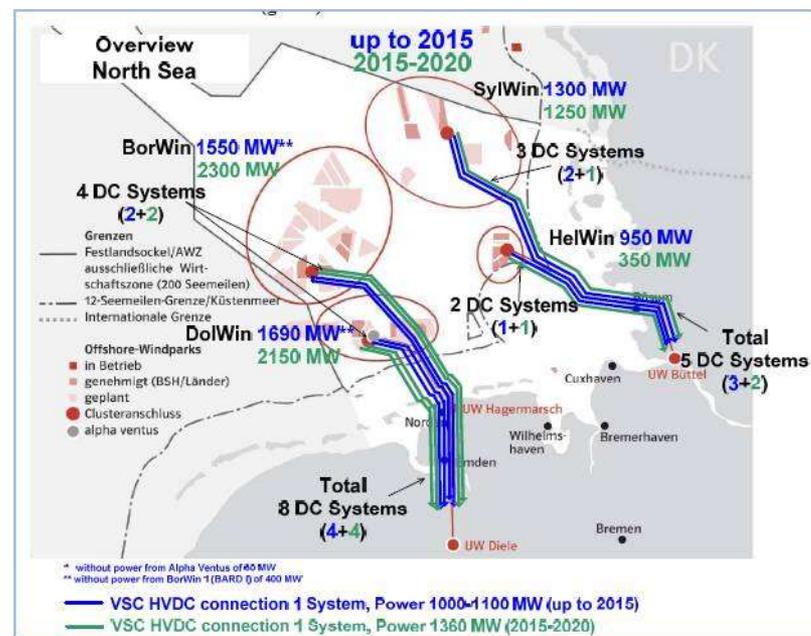


# 1.1 直流输电技术发展

- ▶ 近年来，由于大型海上风电接入、电网互联等领域的推动，柔性直流输电需求日益高涨，在建工程已超过前十年已建工程的总和。预计到2030年，世界范围内柔性直流输电工程将达上百条。



英国规划柔性直流近20条，解决东海岸和北海区域海上风电接入需求。



德国北海区域规划超过20条柔性直流工程。

# 1.1 直流输电技术发展

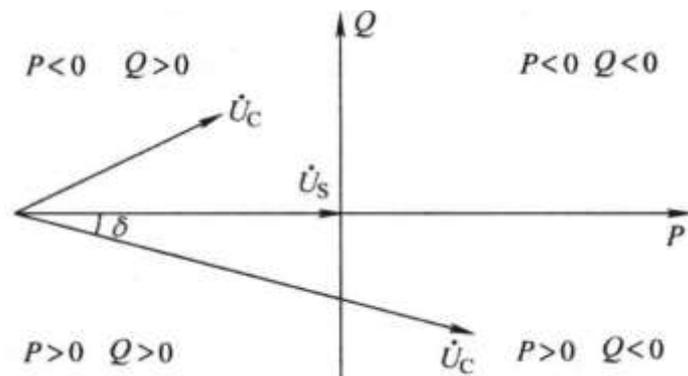
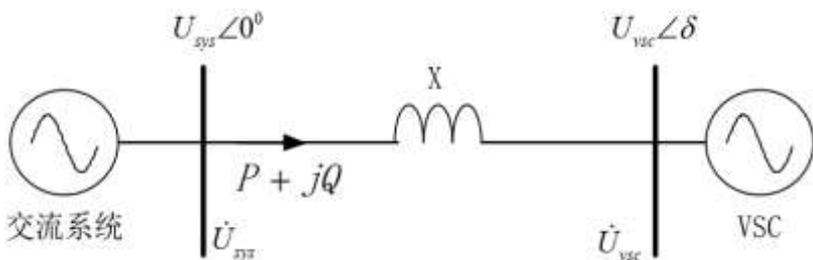
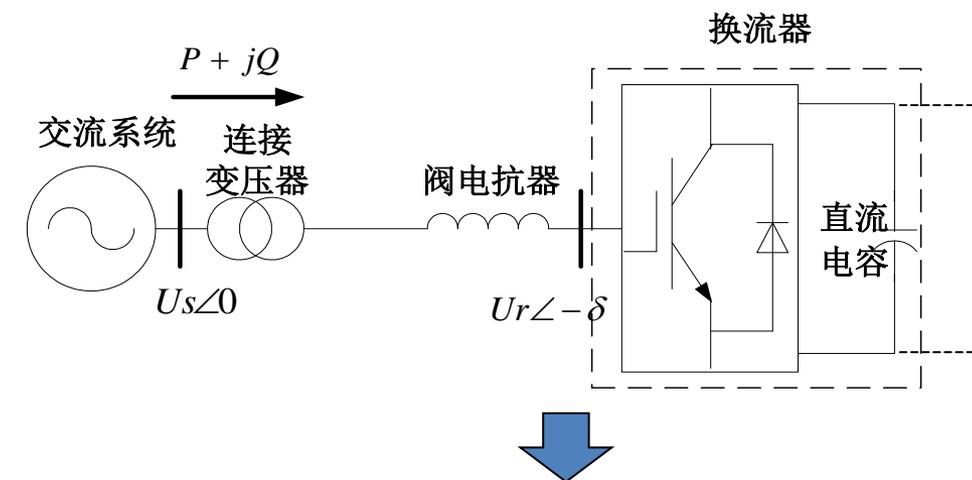
- 柔性直流输电工程：我国已投运柔性直流输电工程

序号	工程名	额定电压 /kV	额定容量 /MW	投运年份
1	上海南汇风电场柔性直流输电工程	±30	18	2011
2	南澳三端柔性直流输电工程	±160	200	2013
3	舟山五端柔性直流输电工程	±200	400	2014
4	厦门柔性直流输电工程	±320	1000	2015
5	鲁西背靠背联网工程	±350	1000	2016
6	渝鄂背靠背联网工程	±420	2500	2019
7	张北四端柔性直流输电工程	±500	3000	2020
8	昆柳龙混合直流	±800kV	5000+3000	2020
9	如东海上风电柔直	±400kV	1100	2021
10	白江工程虞城站低端	±400kV	4000	2022
11	广东背靠背柔直	±300kV	1500*4	2023

规划工程：±800kV甘苏-浙江工程、蒙西-京津冀、藏东南-大湾区等

# 1.2 柔性直流输电系统

- 柔性直流输电的运行原理完全不同于**LCC**的电网换相换流理论，VSC有2个控制自由度，其输出电压基波相量的幅值和相位都可控，从交流系统角度来看，可在PQ平面四个象限内实现有功无功功率的独立控制。



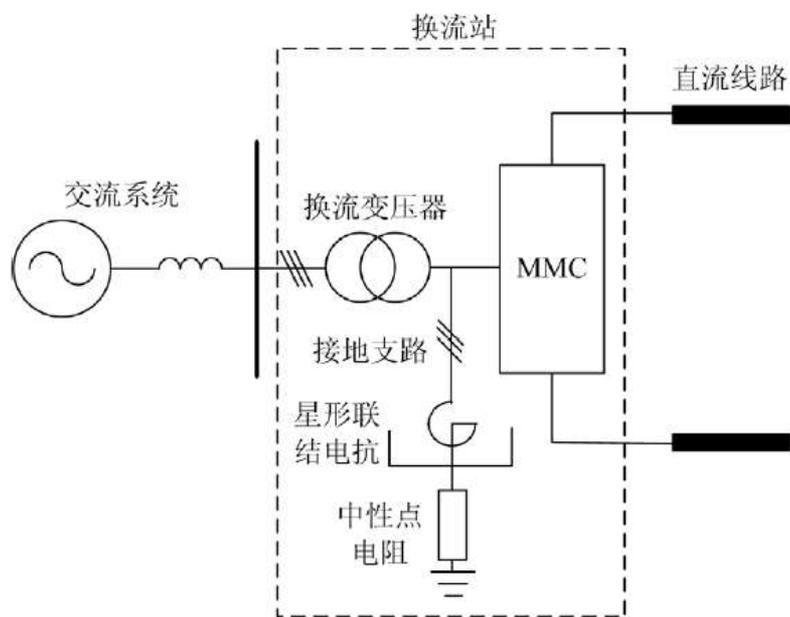
$$P = \frac{U_{sys} U_{vsc}}{X} \sin \delta$$

$$Q = \frac{U_{sys} (U_{sys} - U_{vsc} \cos \delta)}{X}$$

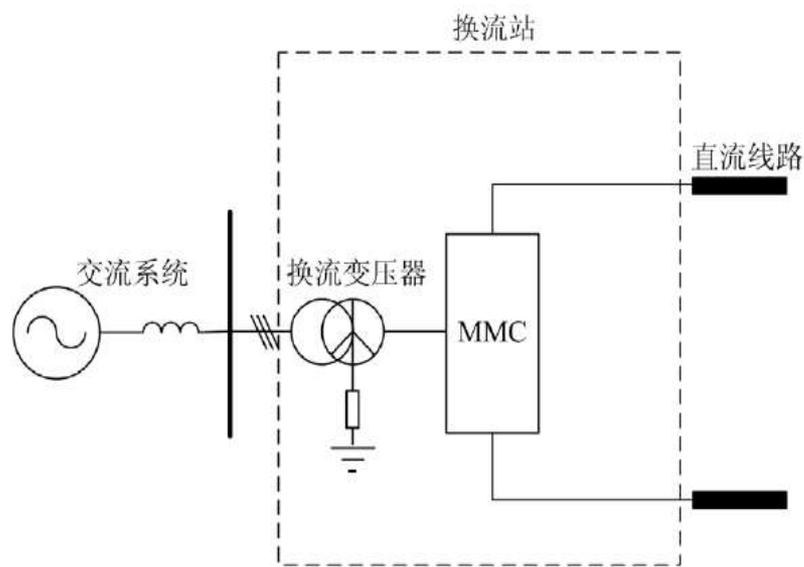
# 1.2 柔性直流输电系统

- 系统典型接线

  - 伪双极拓扑（对称单极）



阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地

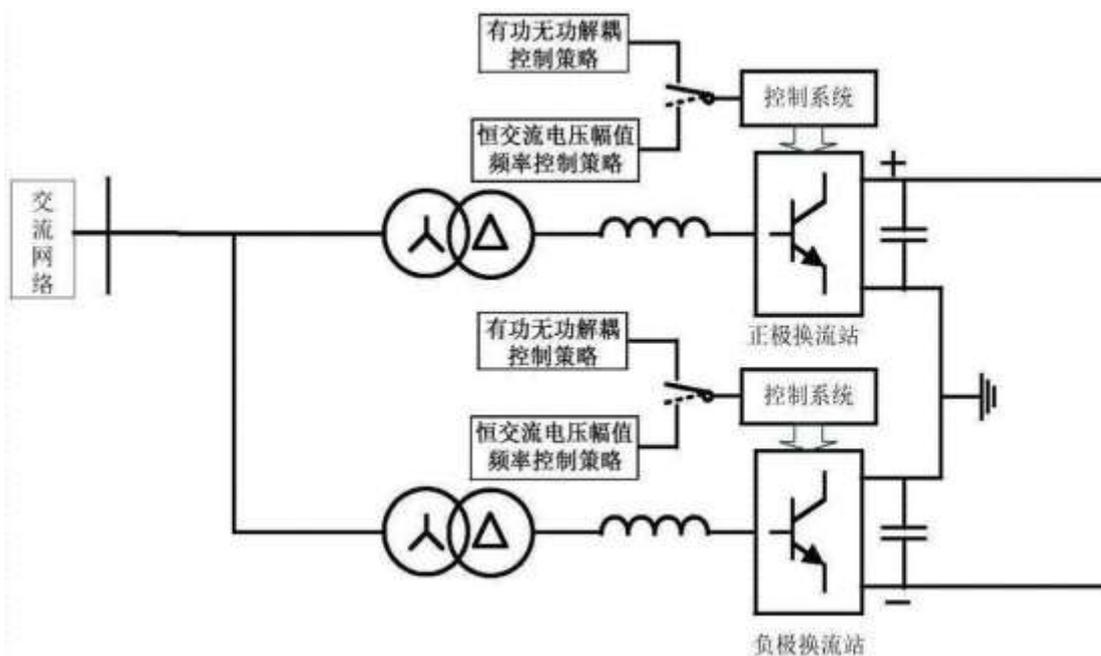


变压器阀侧绕组中性点经电阻接地

# 1.2 柔性直流输电系统

## • 系统典型接线

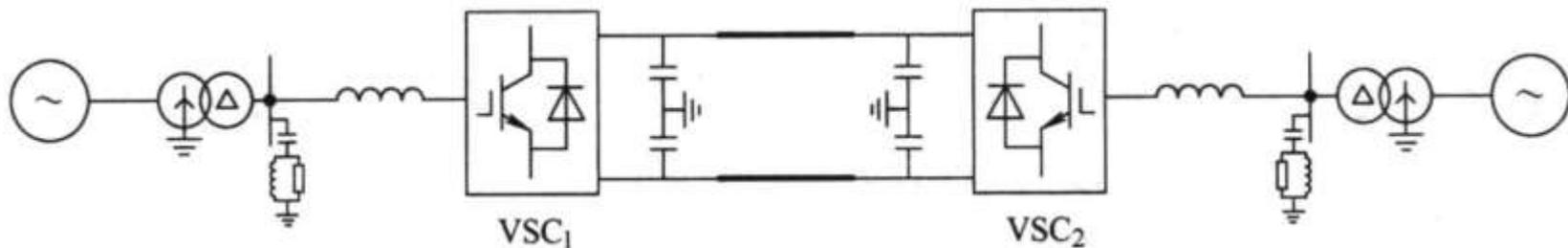
### – 真双极拓扑（对称双极）



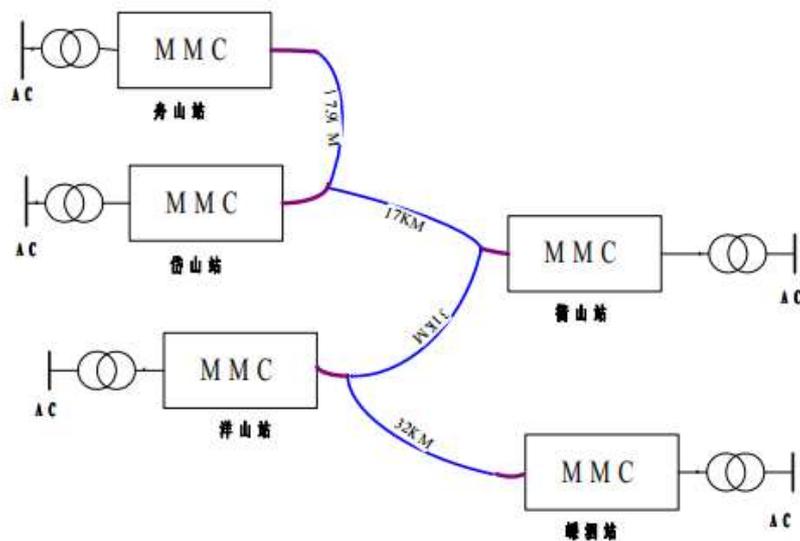
- 一极故障不影响另一极
- 易于分期建设和扩建
- 运行方式灵活

# 1.2 柔性直流输电系统

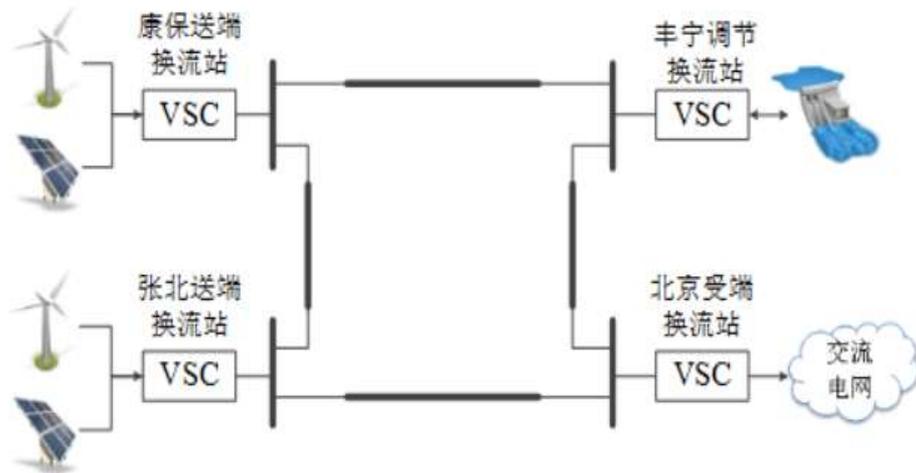
## • 系统典型接线



两端结构



多端结构



环网结构

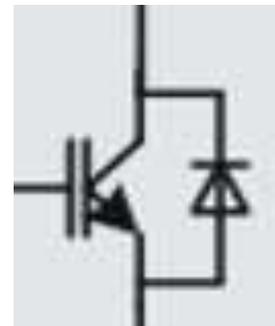
# 目录

## CONTENTS

- 1 柔性输电技术概况
- 2 **柔性直流换流阀技术**
- 3 柔性直流工程

## 2.1 柔直换流阀

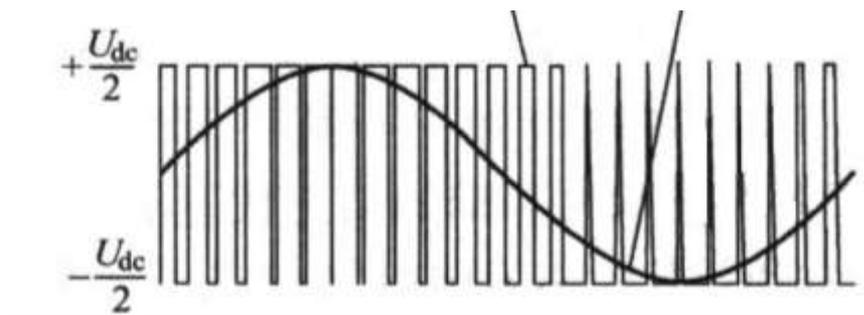
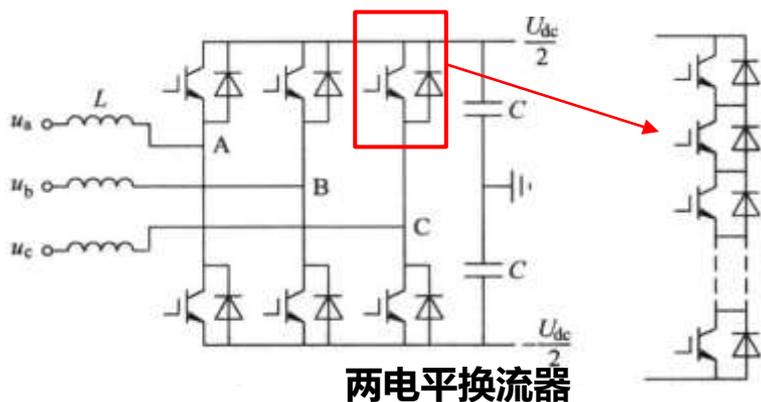
- 柔直换流阀主要包括IGBT及反向并联二极管、直流电容等
  - IGBT通过高速通断实现交直流变换。
  - 二极管起反向续流和抑制过压作用。
  - 直流电容器为换流器提供稳定电压支撑、缓冲桥臂关断时的冲击电流以及减小直流侧谐波。



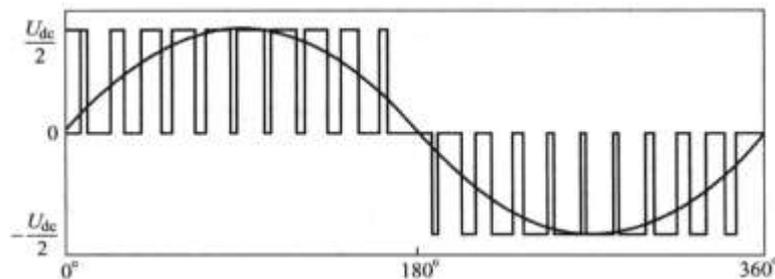
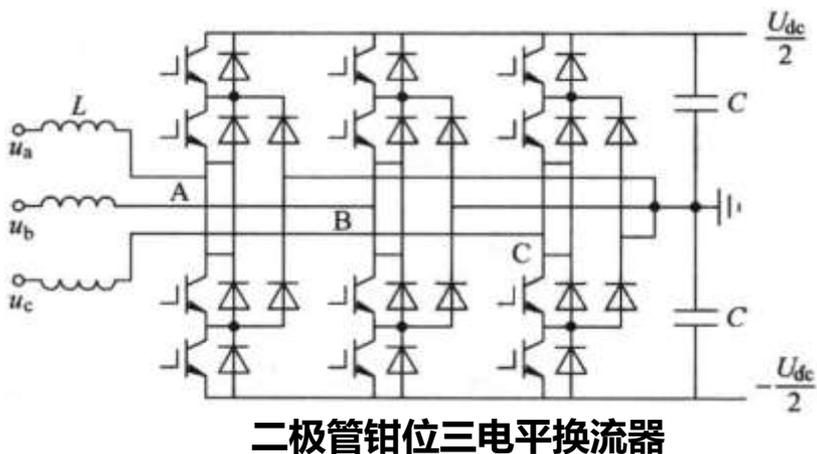
## 2.1 柔直换流阀

- 柔性直流输电根据换流阀技术发展可以划分成两个阶段：

- 第一个发展阶段是1990年代初到2010年，这一阶段柔性直流输电技术基本上由**ABB**公司垄断，采用的换流器是二电平或三电平电压源换流器（**VSC**），其基本理论是脉冲宽度调制（**PWM**）理论。

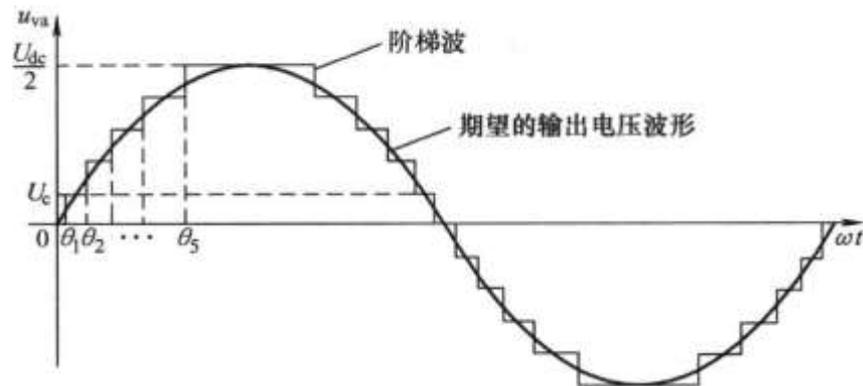
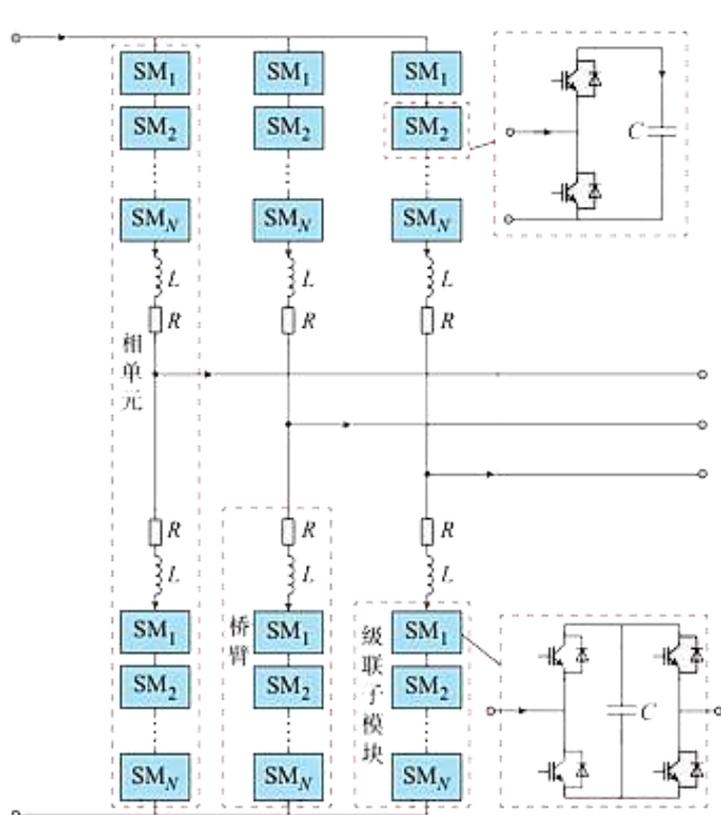


通过控制上下桥臂的导通时间生成一系列等幅不等宽面积对应的脉冲来等效获得正弦波。



## 2.1 柔直换流阀

- 第二个发展阶段是**2010**年至今，其基本标志是**2010**年**11**月在美国旧金山投运的**Trans Bay Cable**柔性直流输电工程；该工程由西门子公司承建，采用的模块化多电平换流器（**MMC**）。**MMC**的运行原理不是**PWM**，而是阶梯波逼近正弦波。MMC的出现使柔直得到快速发展应用。



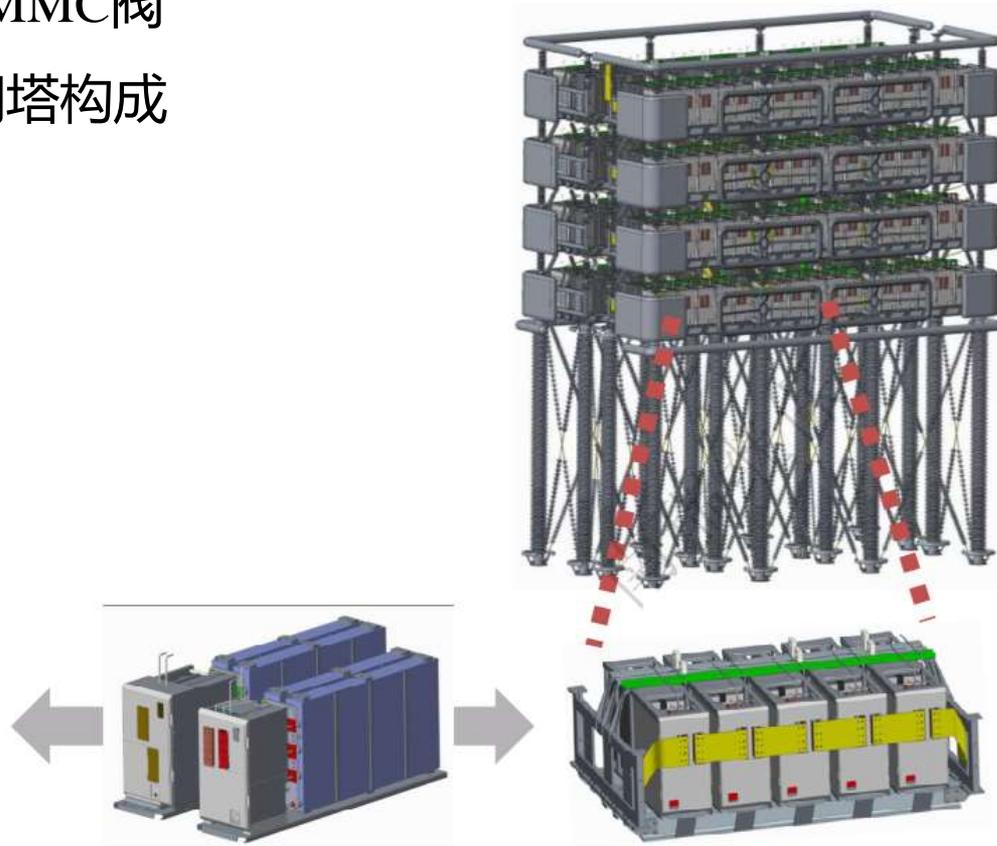
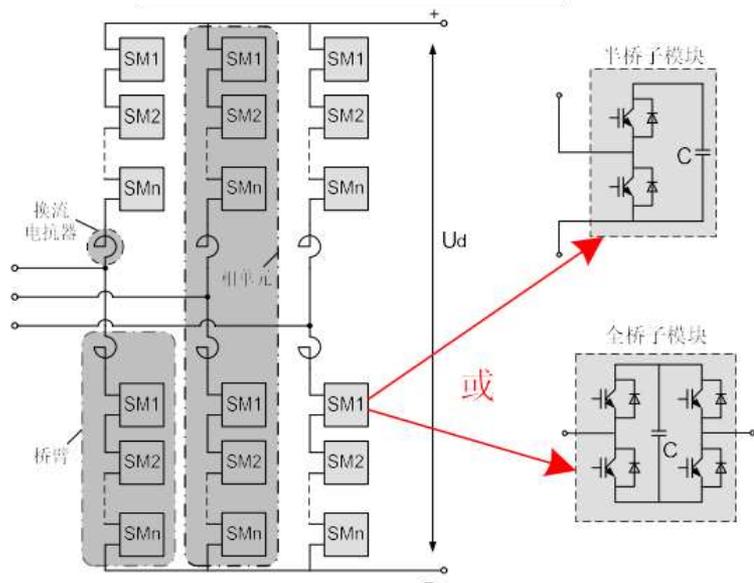
**MMC适用于高压大功率电能变换场合：**

- ❑ 子模块串联，无动态均压问题；
- ❑ 开关频率低，损耗低；
- ❑ 输出电压的谐波含量低；
- ❑ 模块化结构，易维护等。

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • MMC结构

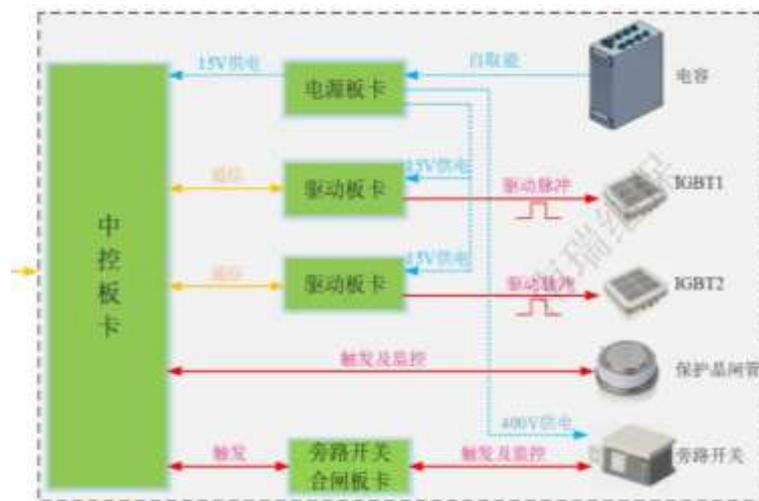
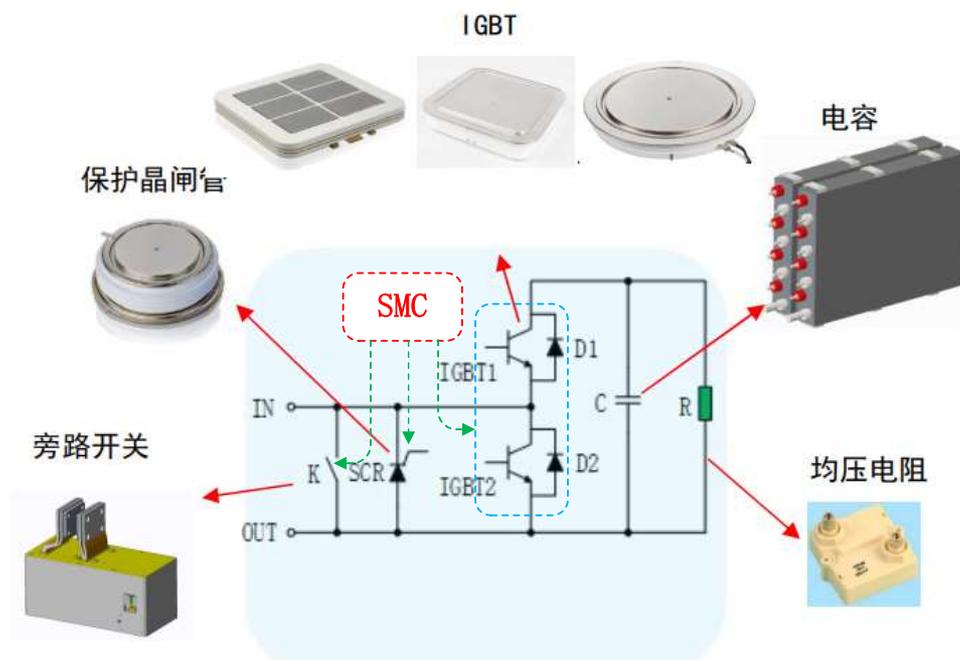
- 子模块→桥臂→相单元→MMC阀
- MMC由子模块、阀段、阀塔构成



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

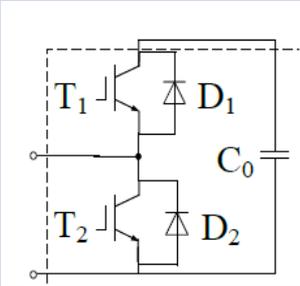
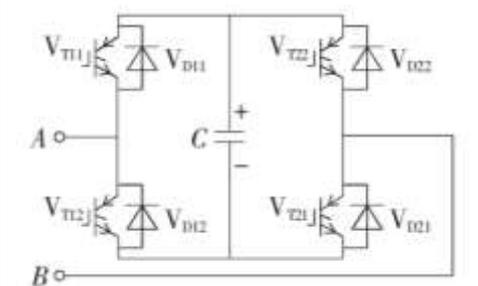
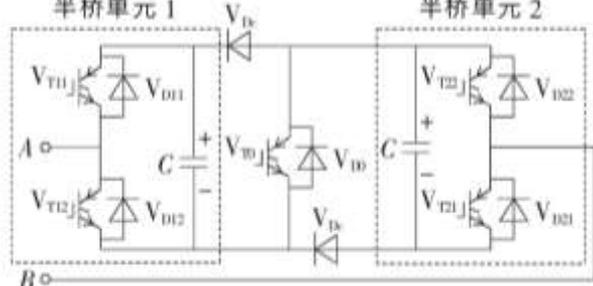
### • MMC子模块

- 功率元器件：IGBT、二极管、电容，旁路晶闸管，机械旁路开关等。
- 控制板：子模块控制板SMC、驱动板、高位取能电源板等。



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

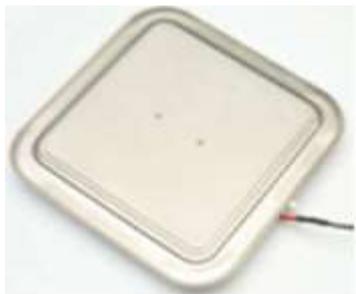
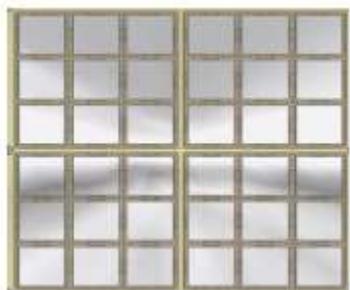
### • MMC子模块拓扑

	半桥子模块 (HBSM)	全桥子模块 (FBSM)	钳位双子模块 (CDSM)
结构			
优点	价格相对便宜, 控保易实现	具备故障自清除能力	具备故障自清除能力
缺点	故障电流大, 需和断路器配合实现直流故障清除, 重投启动慢	价格贵, 效率低于半桥	价格和效率介于半桥和全桥之间, 控制复杂
应用	应用多	应用相对较少	应用较少

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### ● IGBT器件

- 按封装工艺主要有焊接式IGBT、**压接型IGBT**，压接型IGBT以其耐受电压高、通流大、控制功率低、开关速度快及双面散热等优势，非常适合大功率场合，且具有短路失效的特点，适合冗余设计，目前**柔直主要采用压接型IGBT**。
- 现阶段，4.5kV/3kA的压接型IGBT已经很成熟，并已有万只以上的工程应用；4.5kV/5kA 的IGBT已有样片，将在特高压柔直工程应用。



中车 (IGBT+FRD)

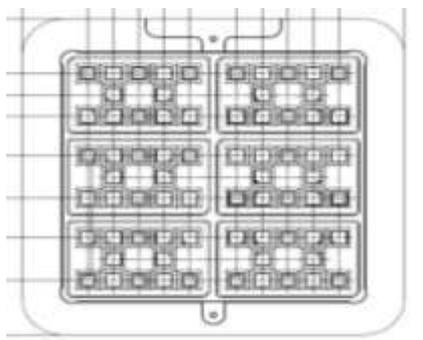


ABB (IGBT+FRD)



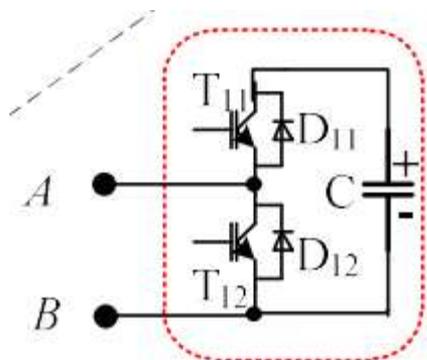
东芝 (IEGT)



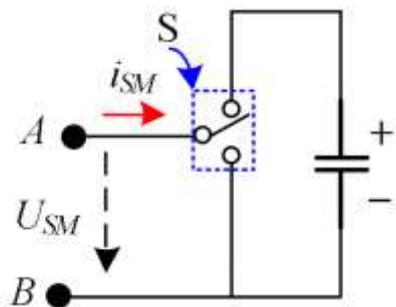
英飞凌 (IGBT)

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

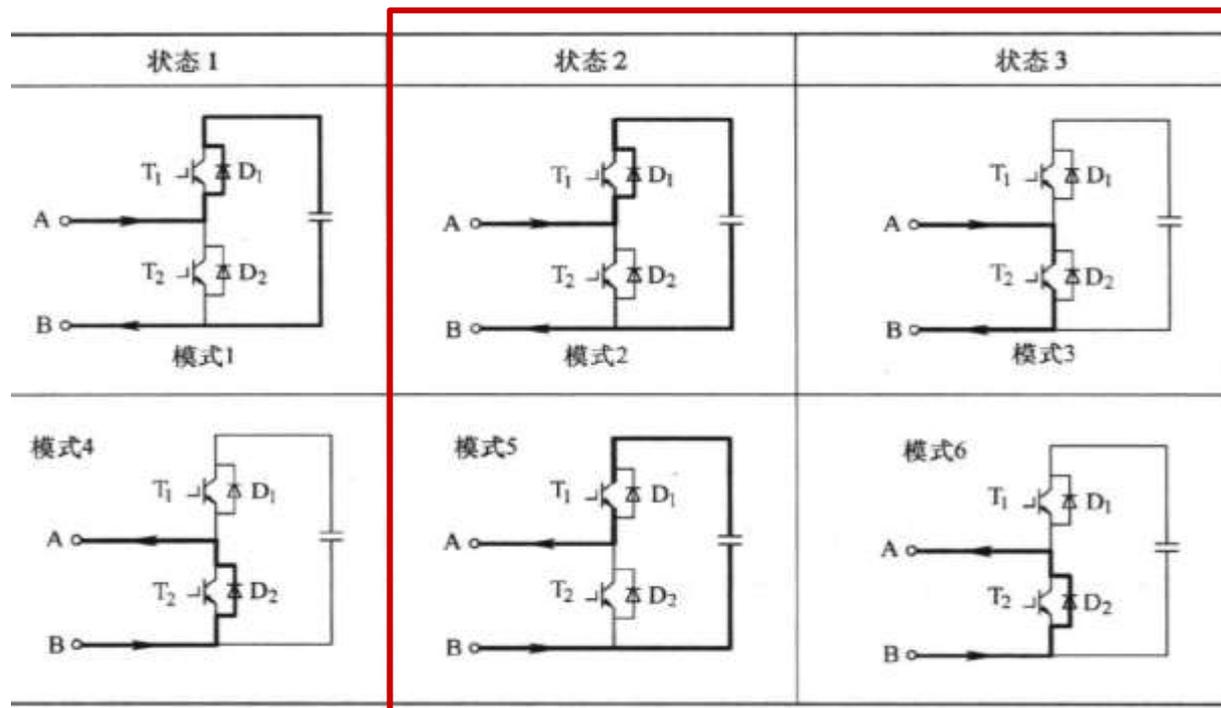
### • MMC子模块（半桥）工作状态



半桥子模块



半桥子模块等效电路

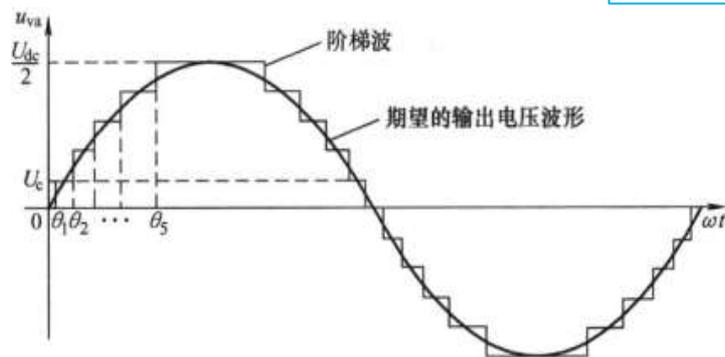


状态	模式	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	电流方向	$u_{SM}$	说明
闭锁	1	0	0	1	0	A 到 B	$u_C$	电容充电
投入	2	0	0	1	0	A 到 B	$u_C$	电容充电
切除	3	0	1	0	0	A 到 B	0	旁路
闭锁	4	0	0	0	1	B 到 A	0	旁路
投入	5	1	0	0	0	B 到 A	$u_C$	电容放电
切除	6	0	0	0	1	B 到 A	0	旁路

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

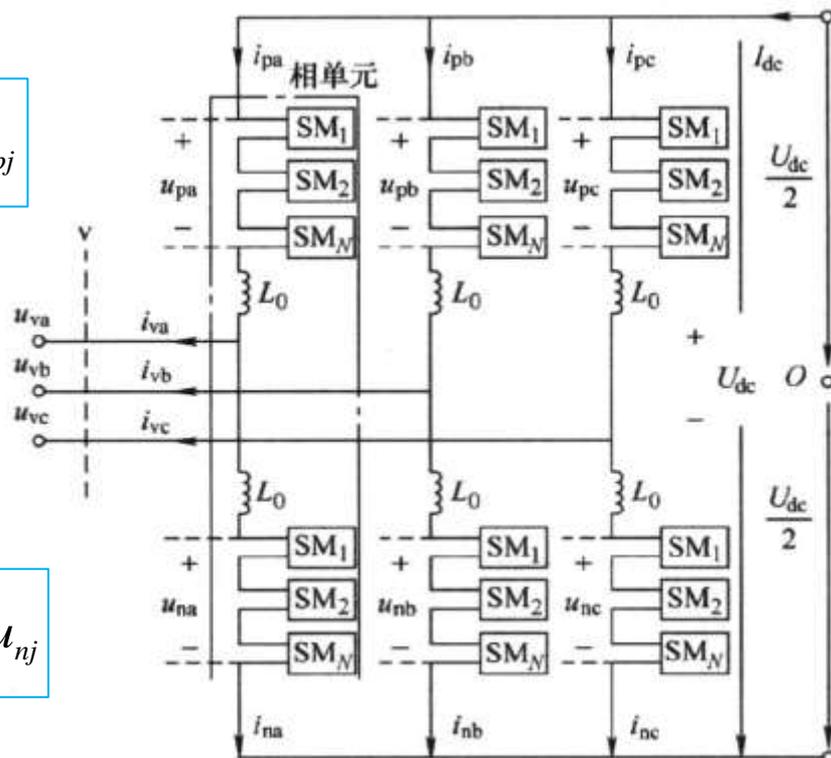
### • MMC工作原理

- **直流侧维持电压恒定**: 三个相单元中处于投入状态的子模块数目相等且不变;
- **交流侧输出三相交流电压**: 通过对三个相单元上、下桥臂中处于投入状态的子模块数目进行分配实现换流器输出三相交流电压。



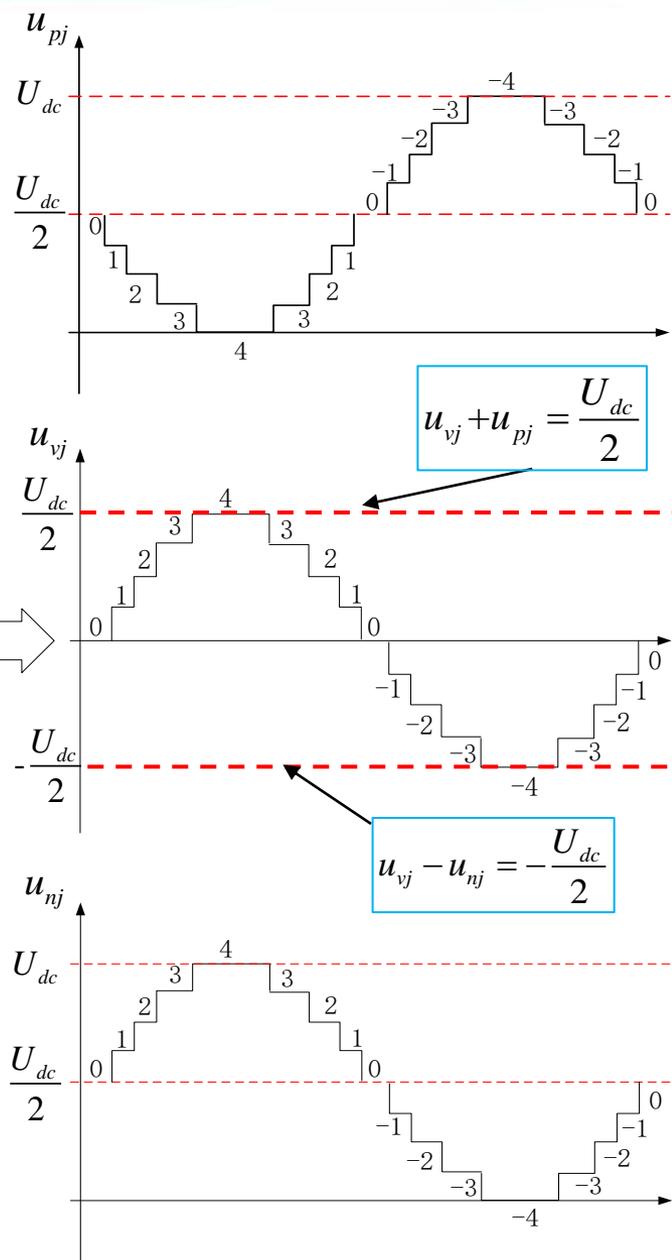
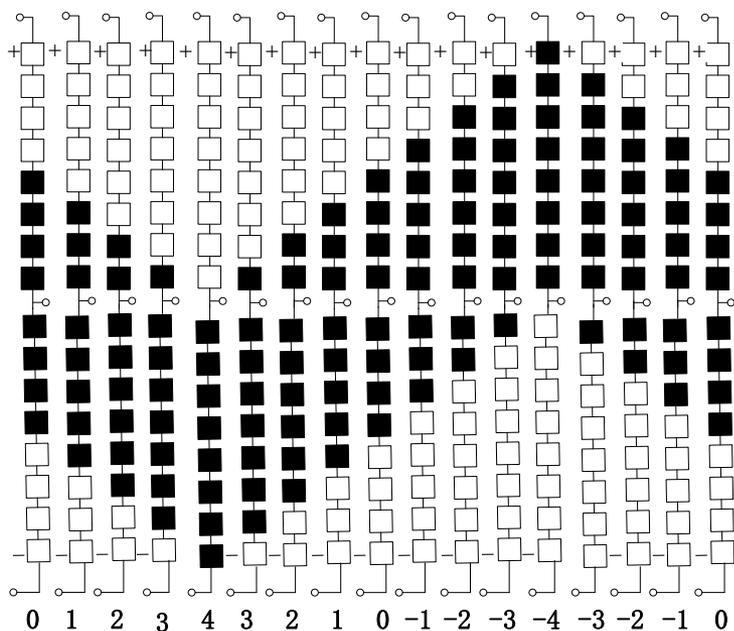
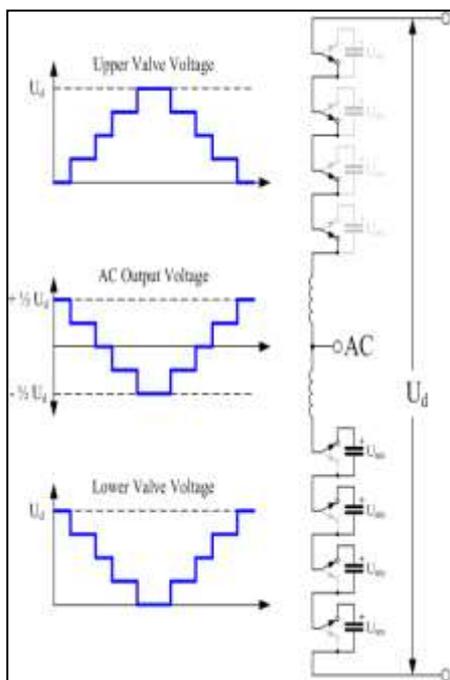
$$u_{vj} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{pj}$$

$$u_{vj} = -\frac{U_{dc}}{2} + u_{nj}$$



# 2.2 模块换多电平换流器MMC

## • MMC工作原理





## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • MMC环流及其控制

– **产生机理**：MMC三相相单元直流侧并联，在稳态运行时各桥臂间的电压不可能完全一致，因此在各相桥臂之间产生环流。

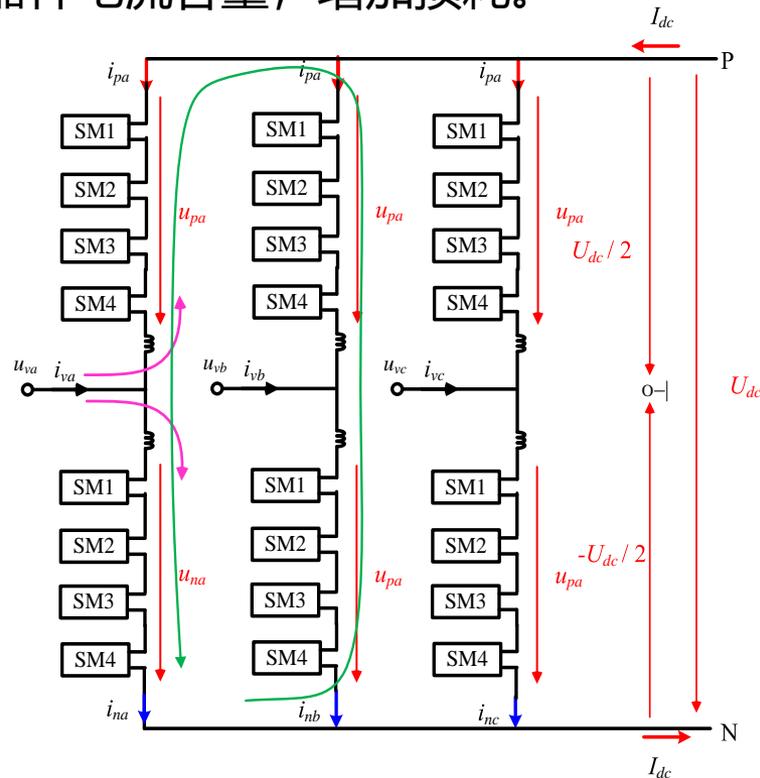
– **环流影响**：使桥臂电流发生畸变；增大开关器件电流容量；增加损耗。

– **环流特征**：

- 环流在三相桥臂间流动，对外部交流系统不产生影响；

- 环流包括直流电流及交流分量，交流分量中**两倍频的负序分量占主要成份**。

– **环流控制**：采用两倍频负序旋转坐标下的MMC环路方程，将两倍频环流变换成直流分量，以控制该直流分量为目标设计控制器



**桥臂电流：直流分量+基频+二倍频**

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

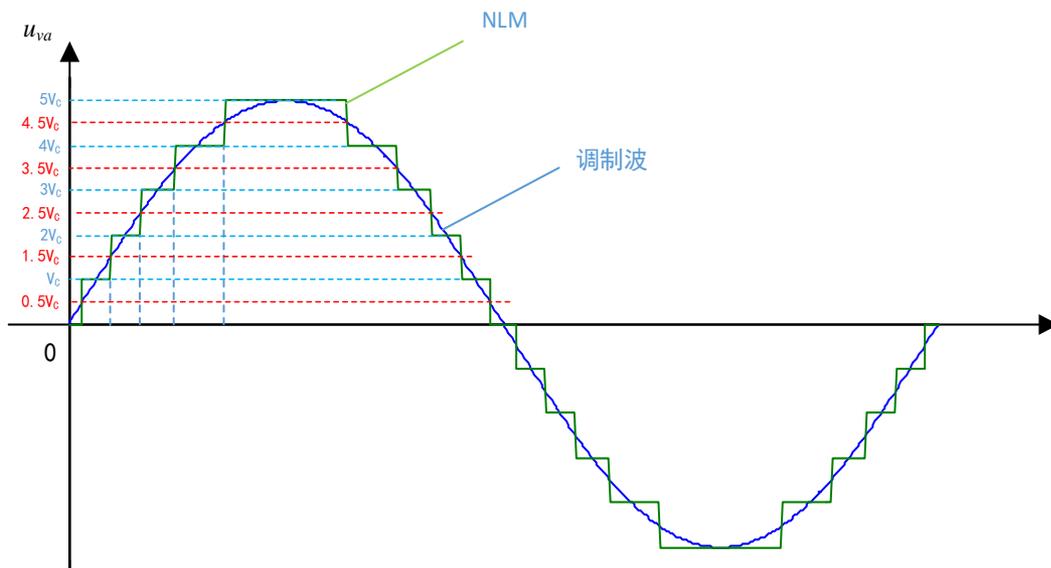
### • MMC调制策略

- **最近电平逼近调制NLM**：一种阶梯波调制方法，用最接近的电平瞬时逼近正弦调制波（参考波）。
- NLM的基本原理是通过参考波**确定上下桥臂投入子模块的个数**，在交流侧形成多电平组成的阶梯波来逼近期望实现的参考波。

$$\left. \begin{aligned} u_{pj} &= U_{dc} / 2 - e_j \\ u_{nj} &= U_{dc} / 2 + e_j \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{计算桥臂} \\ \text{参考电压} \end{array}$$

$$n_p = \left\lfloor \frac{u_p}{V_c} \right\rfloor = \frac{N}{2} - \left\lfloor \frac{u_{ref}}{V_c} \right\rfloor$$

$$n_n = \left\lceil \frac{u_n}{V_c} \right\rceil = \frac{N}{2} + \left\lceil \frac{u_{ref}}{V_c} \right\rceil$$



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • MMC调制比

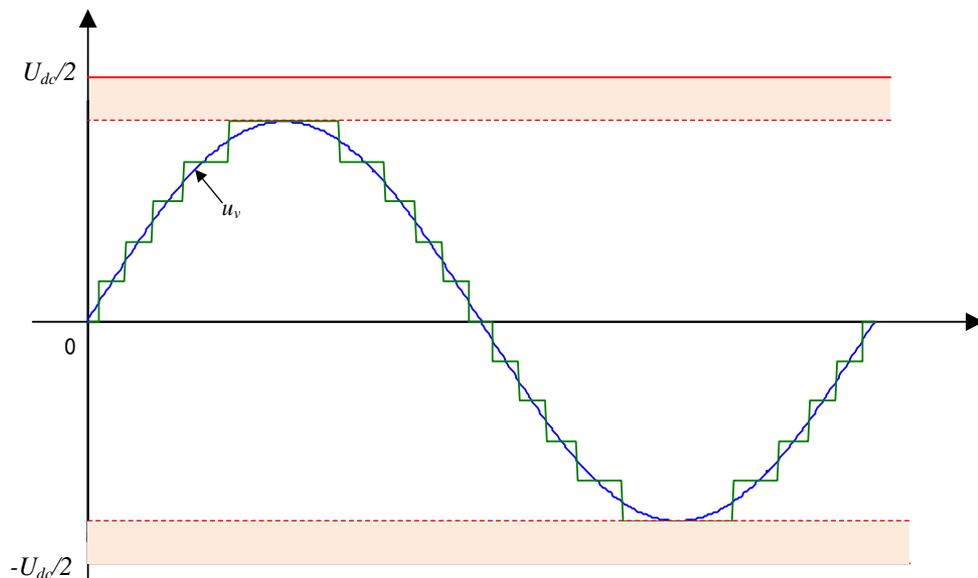
– 调制比是MMC输出交流相电压峰值与直流电压的比值

$$m = \frac{E_m}{U_{dc} / 2} \quad (E_m \text{ 为VSC输出交流相电压峰值})$$

– **调制比最大不超过1.0**；调制比可降低至0，即交流输出电压接近或者等于零。

– 从减小子模块个数和提高直流电压利用率的角度而言，调制比越高越好（一般0.7~0.9），并配合换流变分接头调整。

– 可通过调整功率运行范围、三次谐波注入等方式使调制比超过1.0（小范围）。



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • MMC子模块电容均压

– 在MMC交直流侧传输功率时，维持子模块电容电压稳定是了MMC运行中一个至关重要的问题。

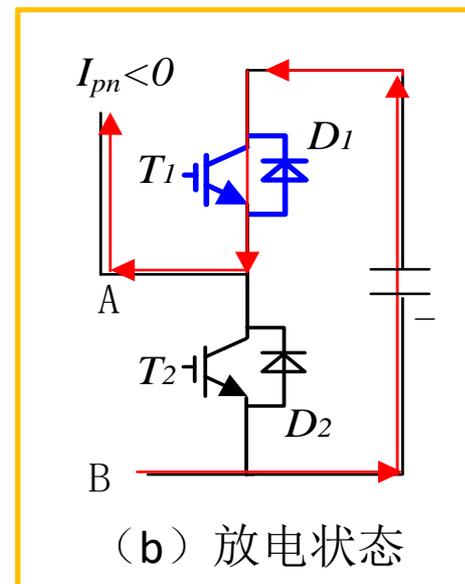
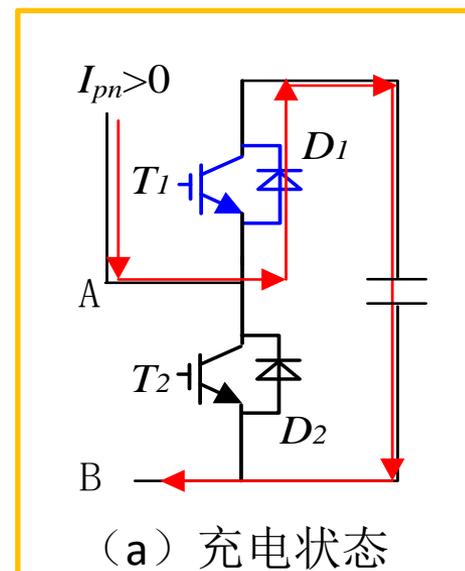
– 控制要求：

- 简单易行，能适应子模块数较多的情形；
- 控制每次动作时，投切的子模块数量尽量少；
- 均压控制与触发控制相配合。

– **目标：**并不是追求各子模块电容电压完全一致，而是减小子模块电容电压相对其额定值的波动幅度。

– **基本原理：**基于子模块电容电压排序的均压控制

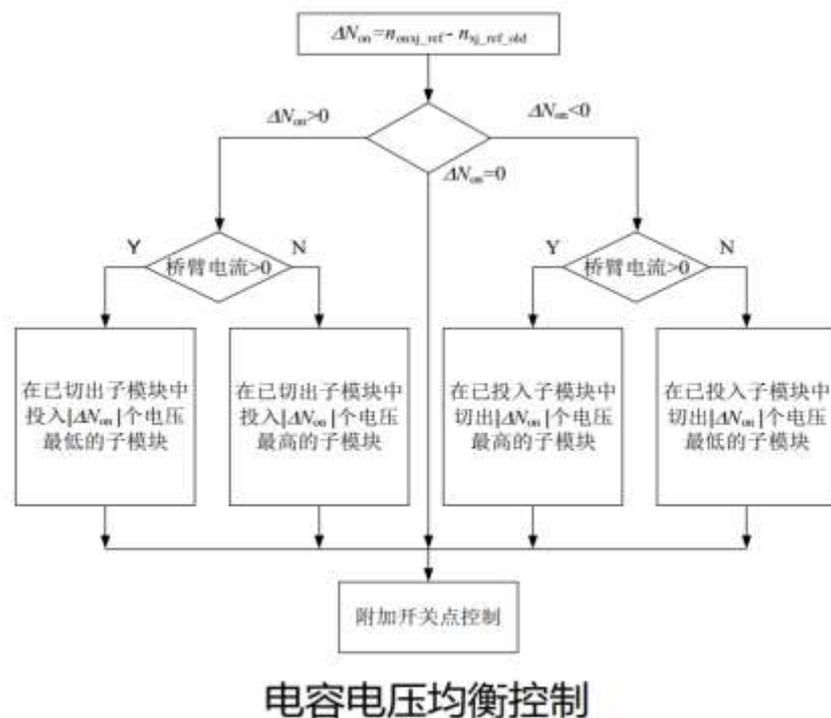
- 桥臂电流为正，投入电压低的子模块，电容将充电；
- 桥臂电流为负，投入电压高的子模块，电容将放电。



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • MMC子模块开关频率优化

- 为了降低柔性直流输电系统的损耗，MMC用了开关频率优化方法，如保持因子排序法、按状态排序与增量附加开关控制等，可有效减小计算量、降低开关频率及开关损耗。



- 优化后子模块电容电压排序和触发方法，会造成子模块电容电压间的差异变大，造成调制电压与触发电压的偏差，加剧直流电压波动。

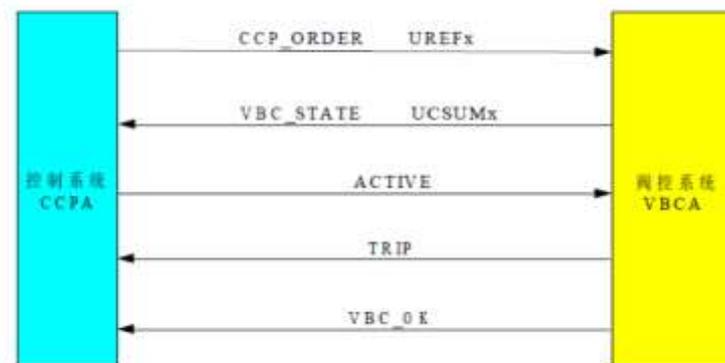
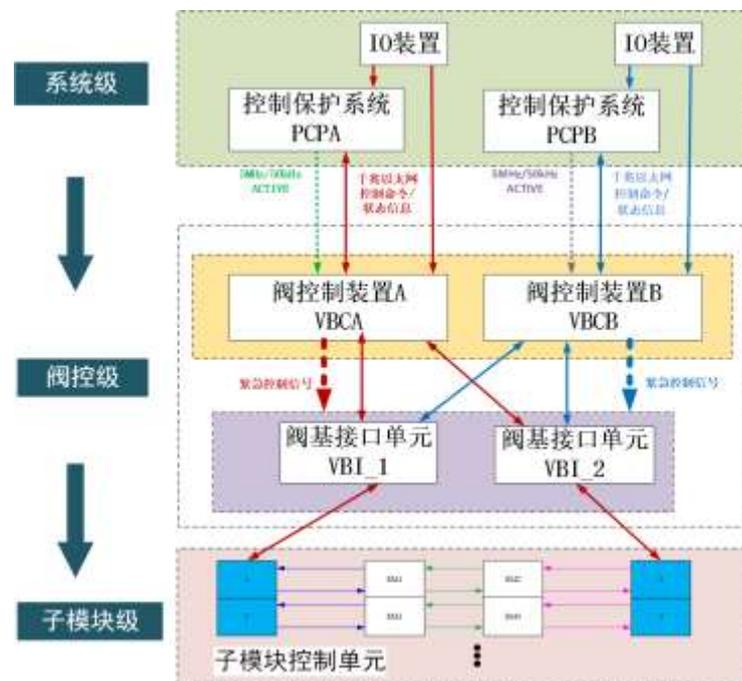
某工程MMC实测录波计算的平均开关频率

功率/MW	937	403	58	28
开关频率/Hz	94	64	54	48

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • 阀控系统

- **对上:**与PCP通信, 接受换流阀的调制信号;
- **对下:**与换流阀子模块通信实现模块的控制、保护和监测换流;
- **阀控功能:**子模块投切控制、电压均衡控制、开关频率优化、环流控制、阻尼控制等;
- **保护功能:**过电流保护、桥臂临时性过流闭锁保护、阀控不平衡等。

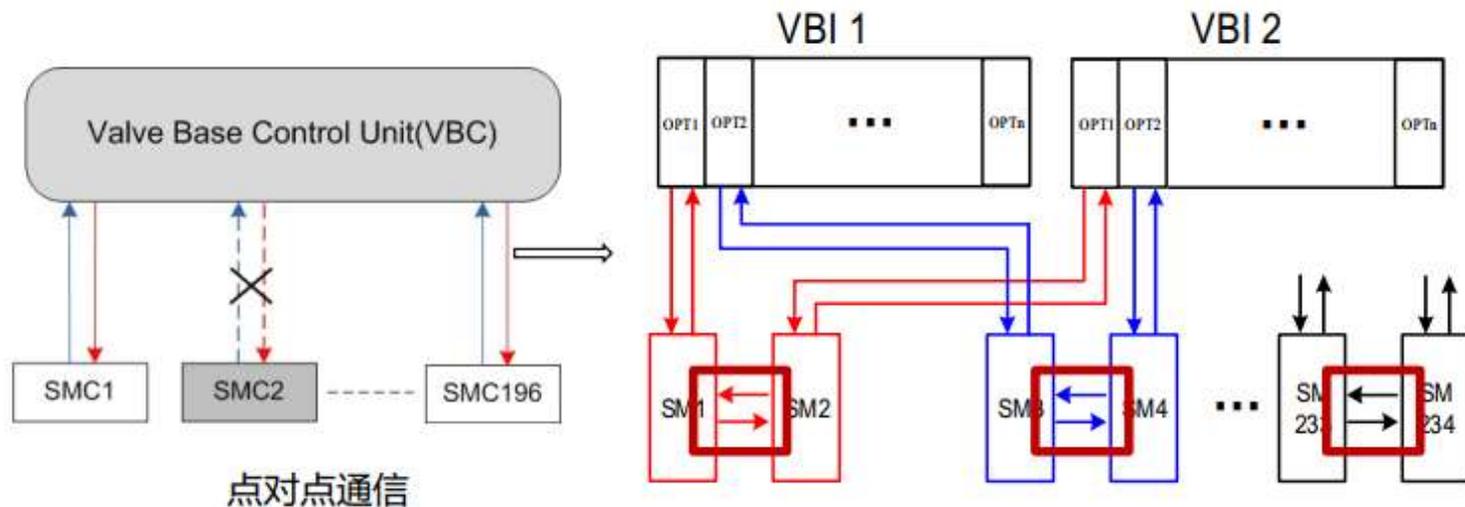


## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • 阀控系统

#### – 冗余通信:

- 子模块分组串联构成环网通信，子模块故障时，通过相邻子模块通信，提高容错能力
- 脉冲分配板冗余：采用两台阀控接口装置的对称位置光纤分配板相互冗余方式，其中一块光纤分配板故障，连接功率模块工作不受影响。

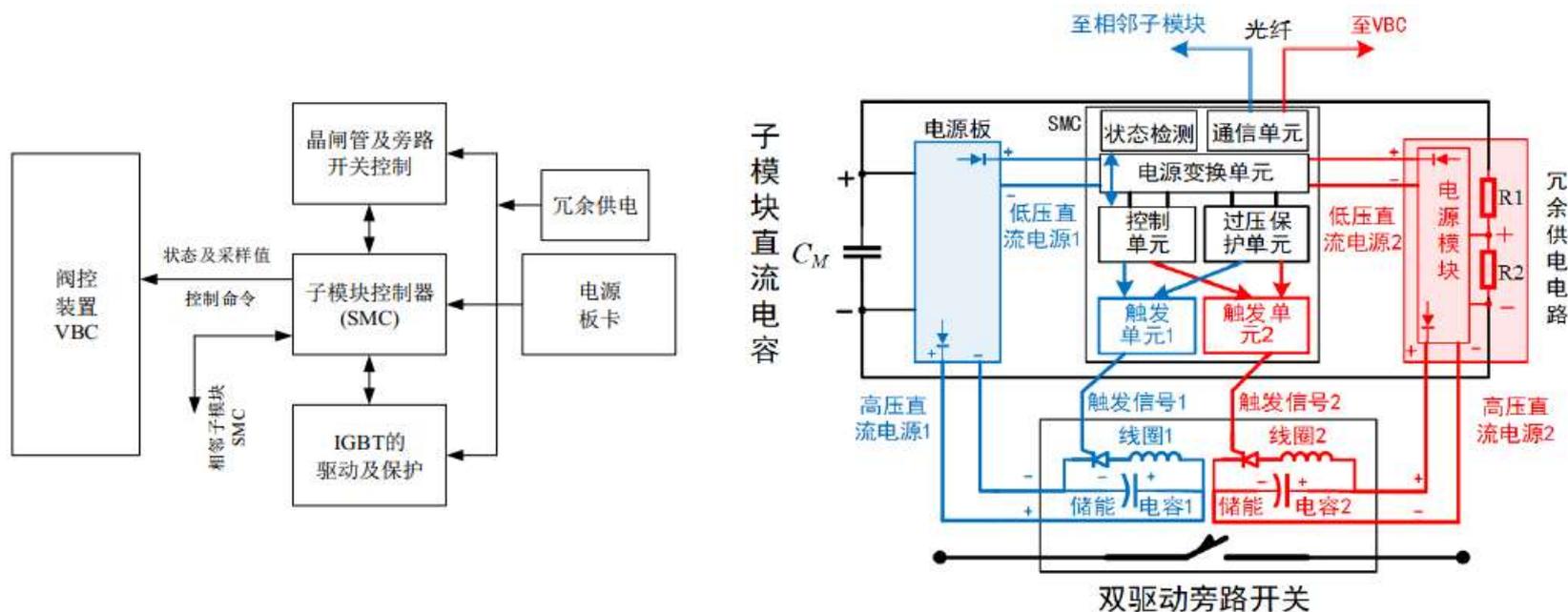


## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • 阀控系统

#### – 子模块冗余供电回路

- 子模块控制板卡和旁路开关取能回路冗余设计，避免取能电源板卡故障造成的黑模块问题；有效避免旁路开关取能回路故障导致的开关拒合故障，不依赖于相邻的子模块的运行状态。



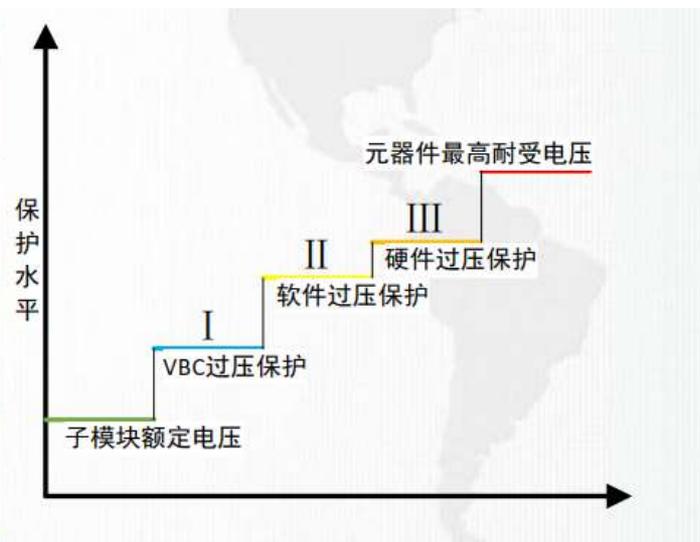
## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### —子模块旁路方案

- 主动旁路（旁路开关）和无源旁路（转折晶闸管）方案，解决单一子模块故障引起系统跳闸或者闭锁的问题
- 子模块过压保护配置VBC过压保护、软件过压保护和硬件过压保护多级保护，保护动作后发命令合闸旁路开关。

保护名称	保护定值(V)	精度
VBC过压保护	3000	1%
软件过压保护	3200	1%
硬件过压保护	3800	1%

过压定值设计



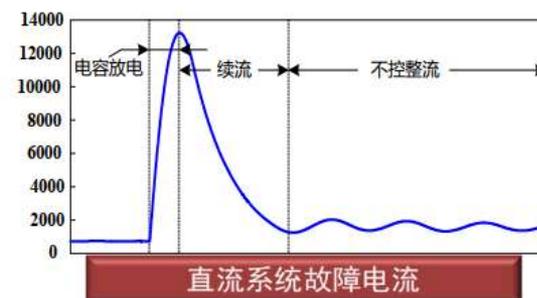
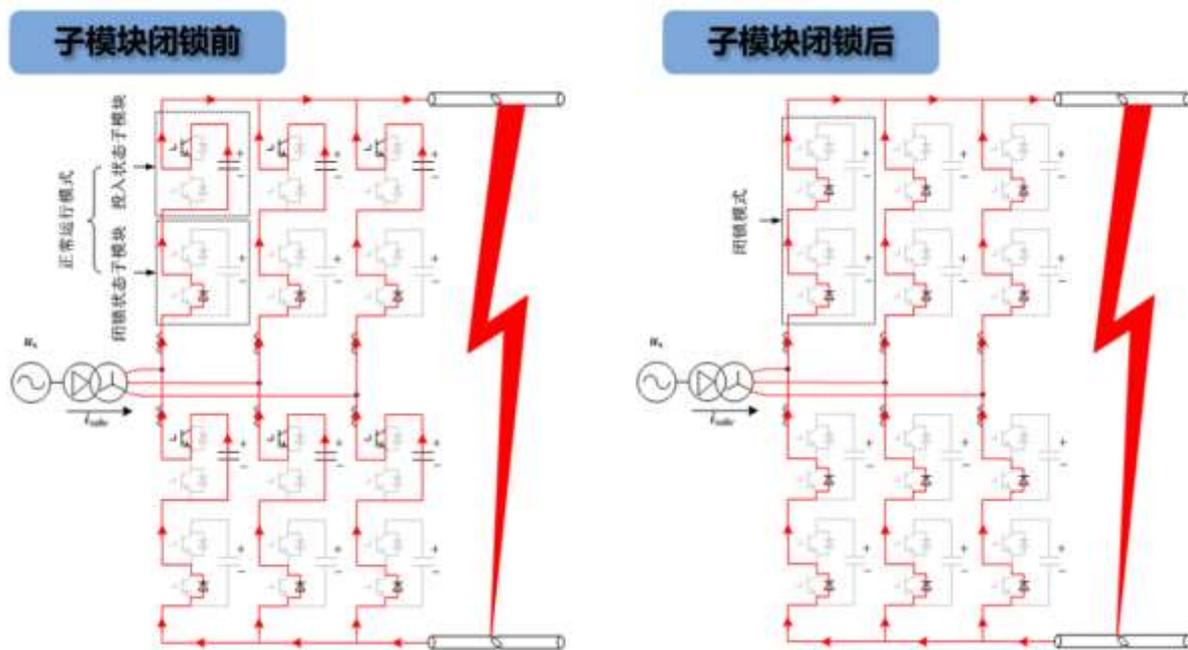
子模块过压保护配合逻辑

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • 直流侧故障特性

#### – 直流极间短路 (F4)

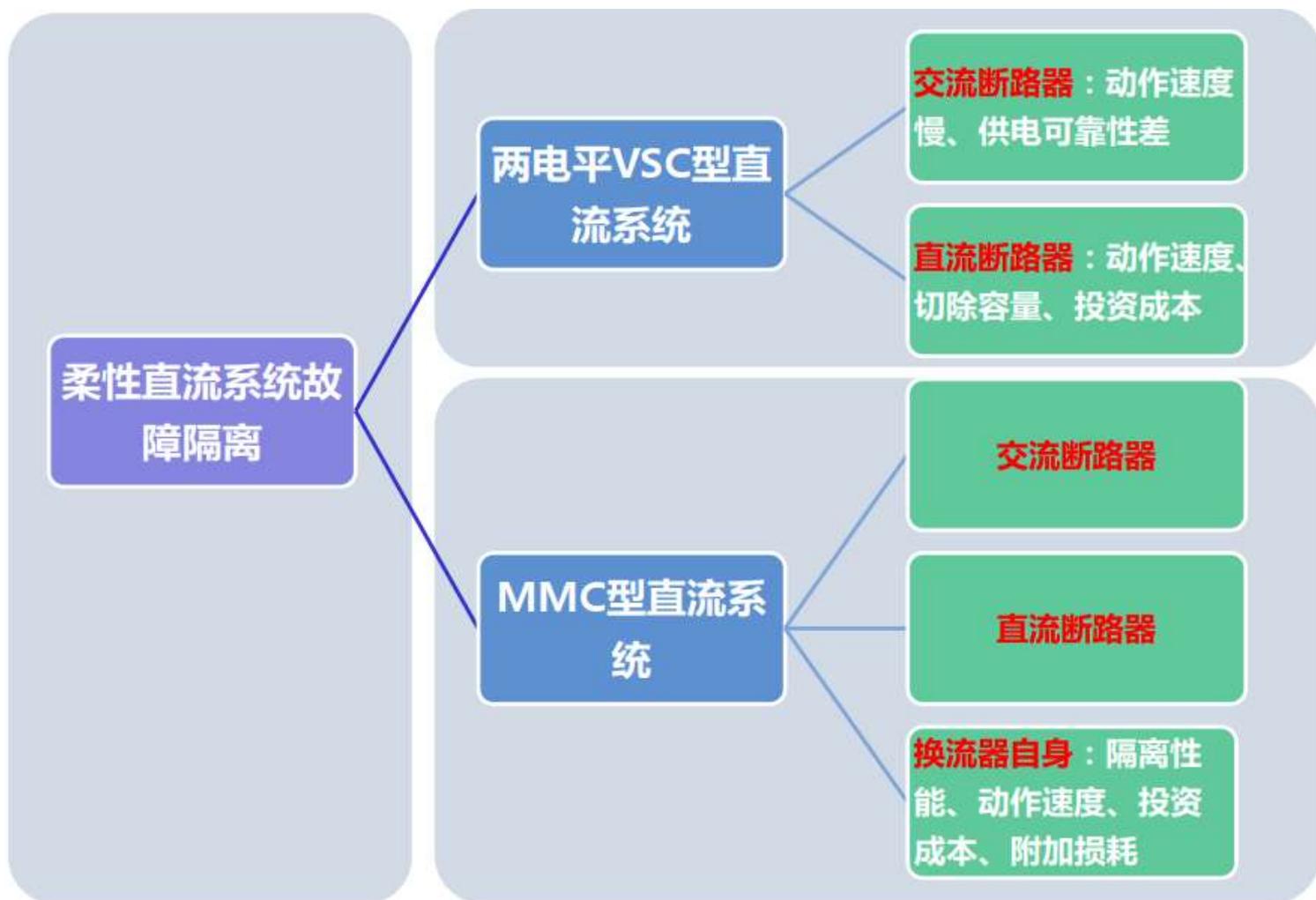
- 闭锁前，直流电容放电；
- 闭锁后，二极管续流；不控整流，等效交流侧三相短路。



- 直流系统阻尼相低，故障电流上升速度快、幅值高，故障隔离速度极高要求；
- 与交流系统不同，直流故障电流无自然过零点，故障熄弧困难。

## 2.2 模块换多电平换流器MMC

- 柔直系统故障隔离

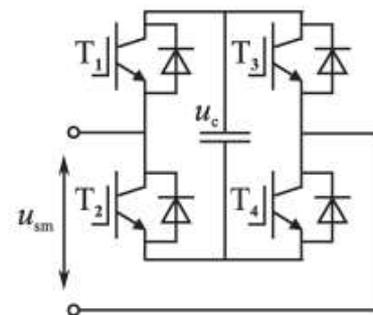
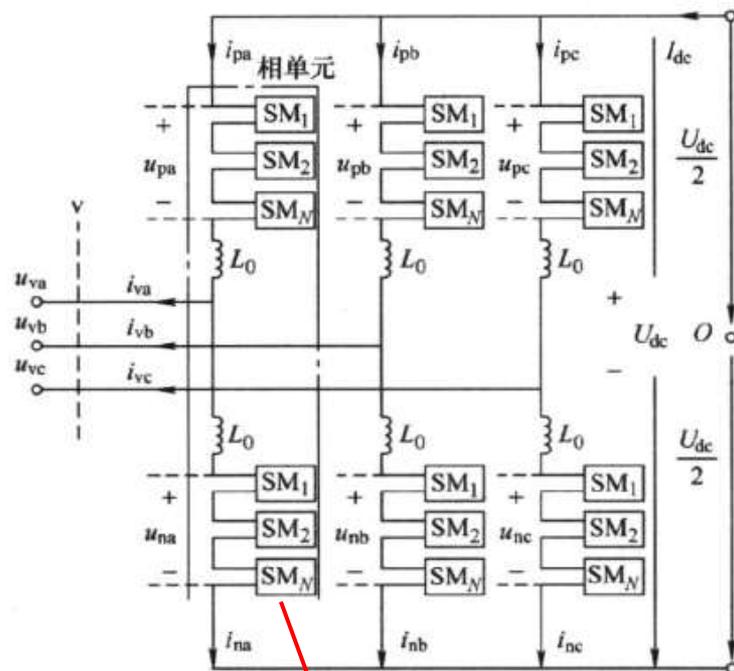


## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### • 换流器故障自清除

#### – 全桥型子模块 (FBSM)

- 全桥子模块可输出**正、零、负**三种电平;
- 全桥MMC拓扑, 桥臂电压可正可负:
  - 交流电压和直流电压解耦, 调制比变化从  $[0,1]$  拓展到  $[-\infty, +\infty]$ ;
  - 具有直流电压、直流电流4象限运行能力;
  - 直流电压可调节, 能实现直流降压运行;
  - 具有直流故障穿越性能;

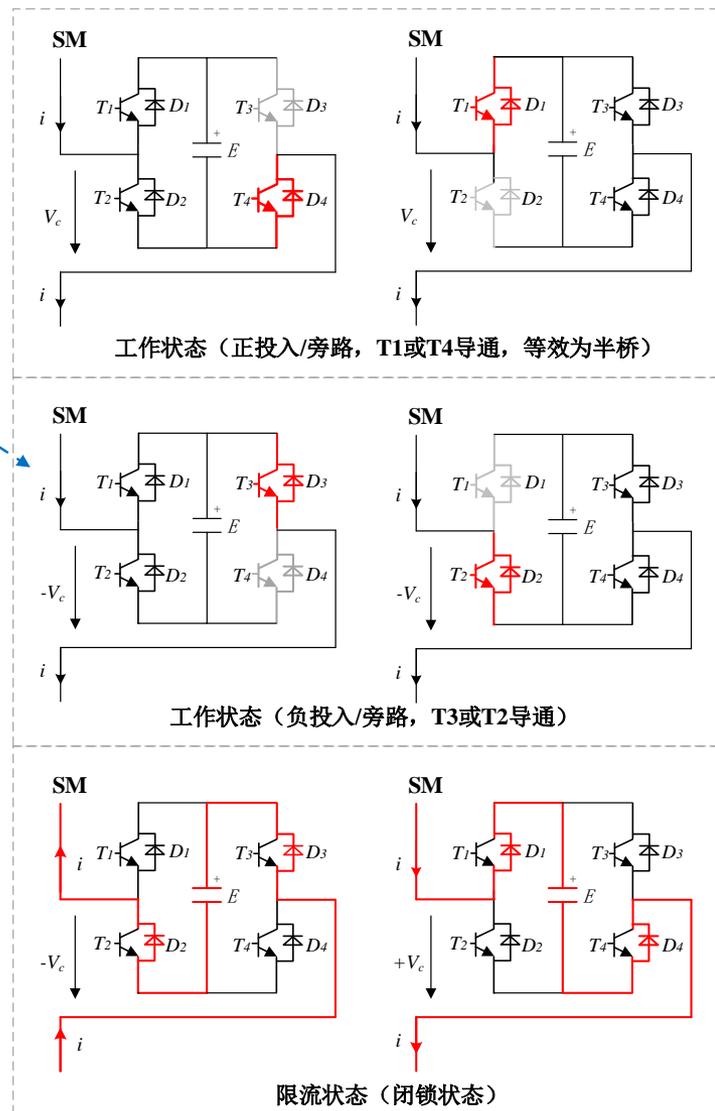
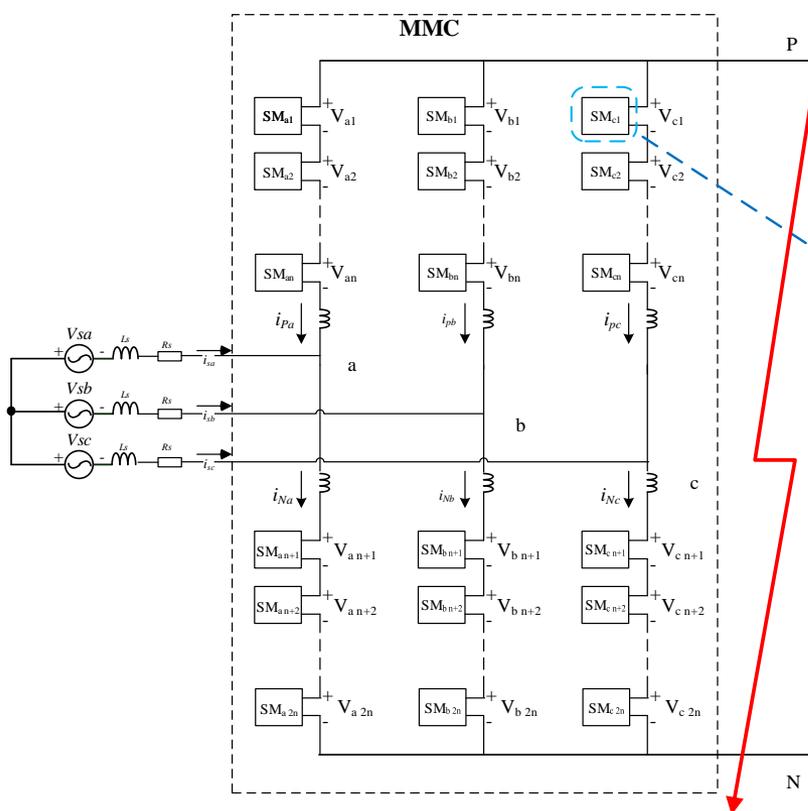


序号	工作模式	$T_1 \sim T_4$ 开关状态
1	正投入 ( $U_{sm}=U_c$ )	$T_1, T_4$ 导通; $T_2, T_3$ 关断
2	负投入 ( $U_{sm}=-U_c$ )	$T_1, T_4$ 关断; $T_2, T_3$ 导通
3	切除 ( $U_{sm}=0$ )	$T_1, T_3$ 导通或 $T_2, T_4$ 导通
4	闭锁 ( $U_{sm}=U_c$ 或 $U_{sm}=-U_c$ )	$T_1, T_2, T_3, T_4$ 关断

# 2.2 模块换多电平换流器MMC

## – 全桥模块的MMC

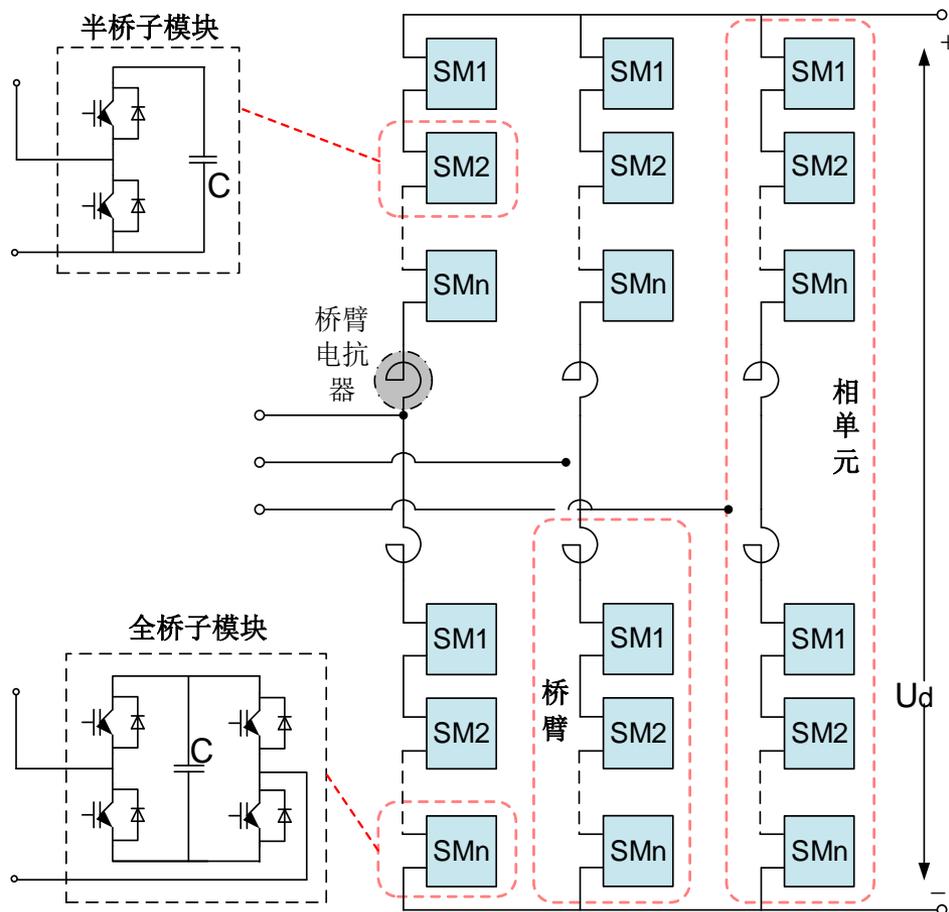
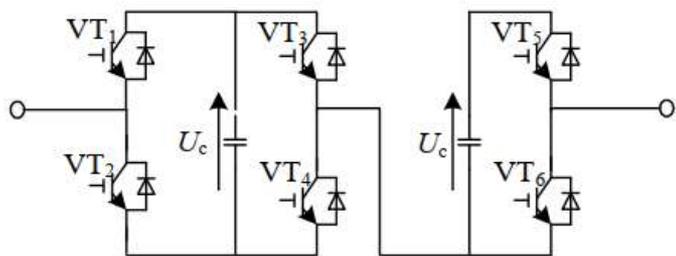
- 闭锁可阻断故障回路
- 控直流零压或负压加速故障点熄弧



## 2.2 模块换多电平换流器MMC

### — 全桥模块与半桥模块构成混合桥MMC

□ 60%全桥+40%半桥;



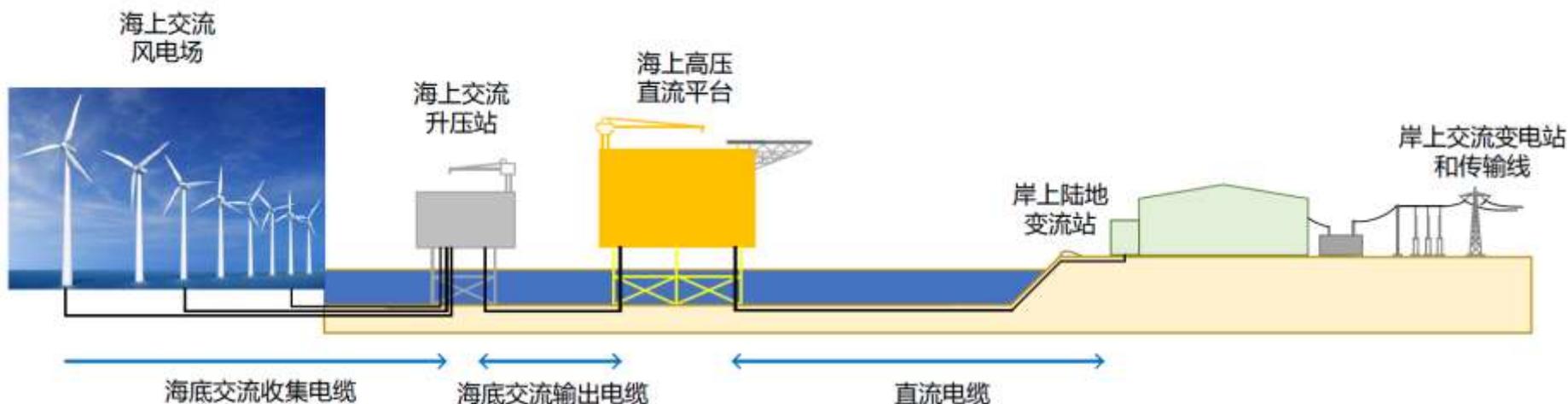
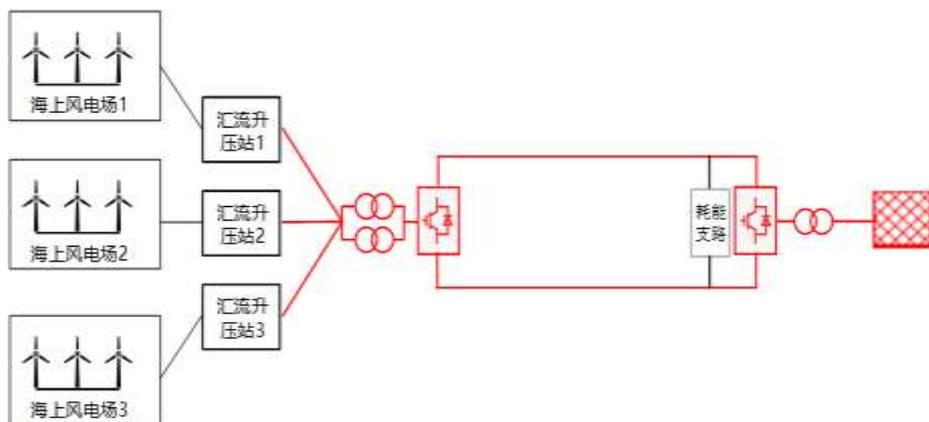
# 目录

## CONTENTS

- 1 柔性直流技术概况
- 2 柔性直流换流阀技术
- 3 **典型柔性直流工程**

# 典型柔直工程

## • 如东海上风电柔直送出工程





# 典型柔直工程

**耗能装置：** 为避免并网交流系统发生故障后直流系统的功率盈余导致直流电压快速抬升（几十ms），实现故障穿越，需要加装耗能装置。

解决方案：

快速消耗盈余能量



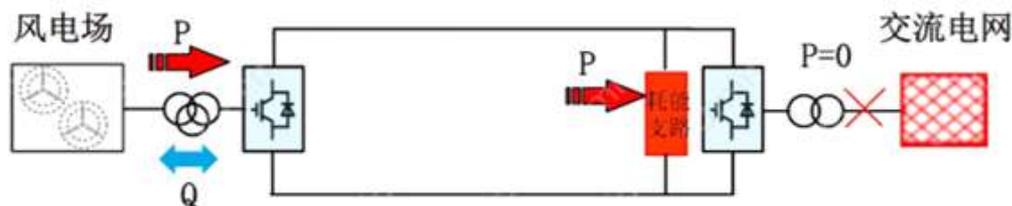
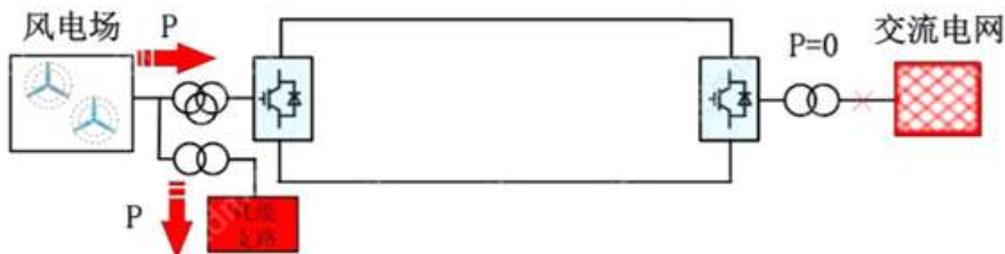
送端风电场交流侧

布置于送端，消纳盈余能量

在直流侧（陆地上）

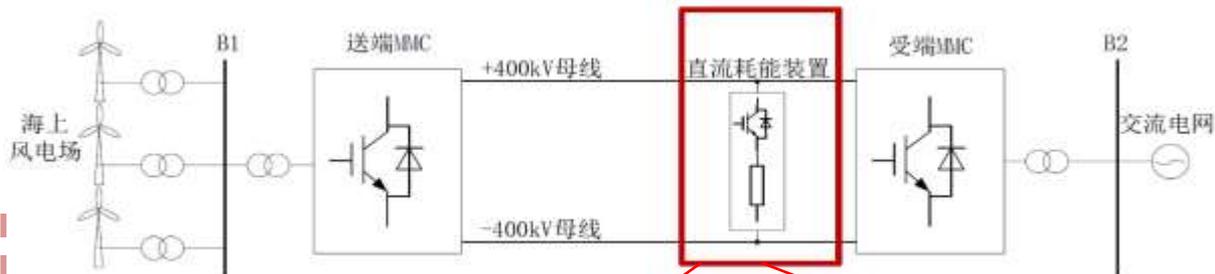
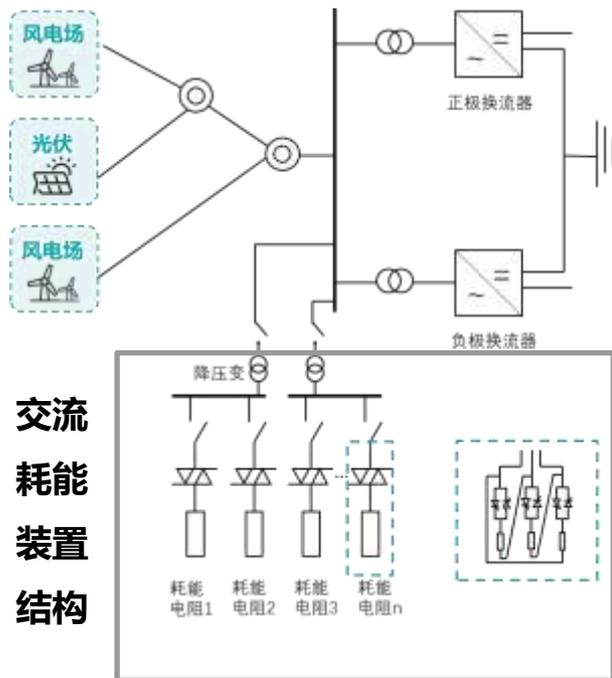
布置于岸端换流站直流侧

优选方案



# 典型柔直工程

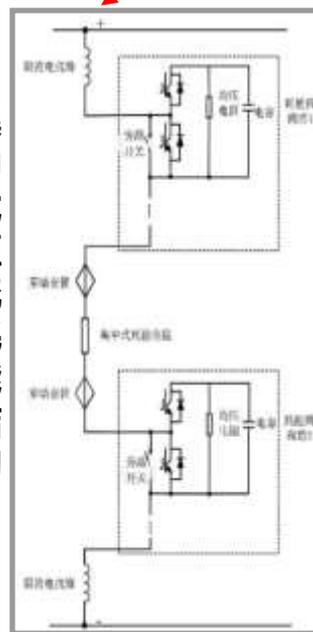
## 耗能装置拓扑结构



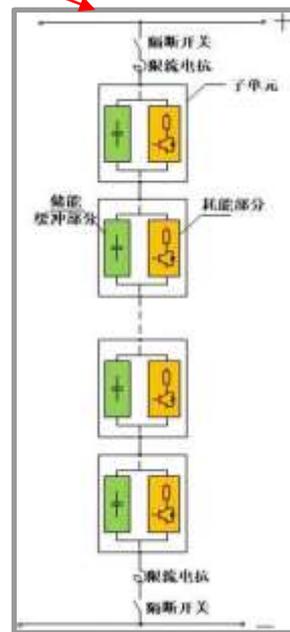
### 如东工程:

额定功率: 1100MW  
 耗能阀拓扑: 半桥模块  
 桥臂子模块数量: 400+32  
 耗能电阻: 564Ω  
 最大持续运行时间: 1.5s  
 直流电压限制: 1.12pu

### 集中式直流耗能结构

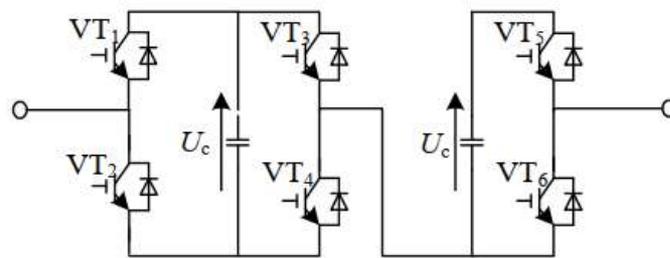
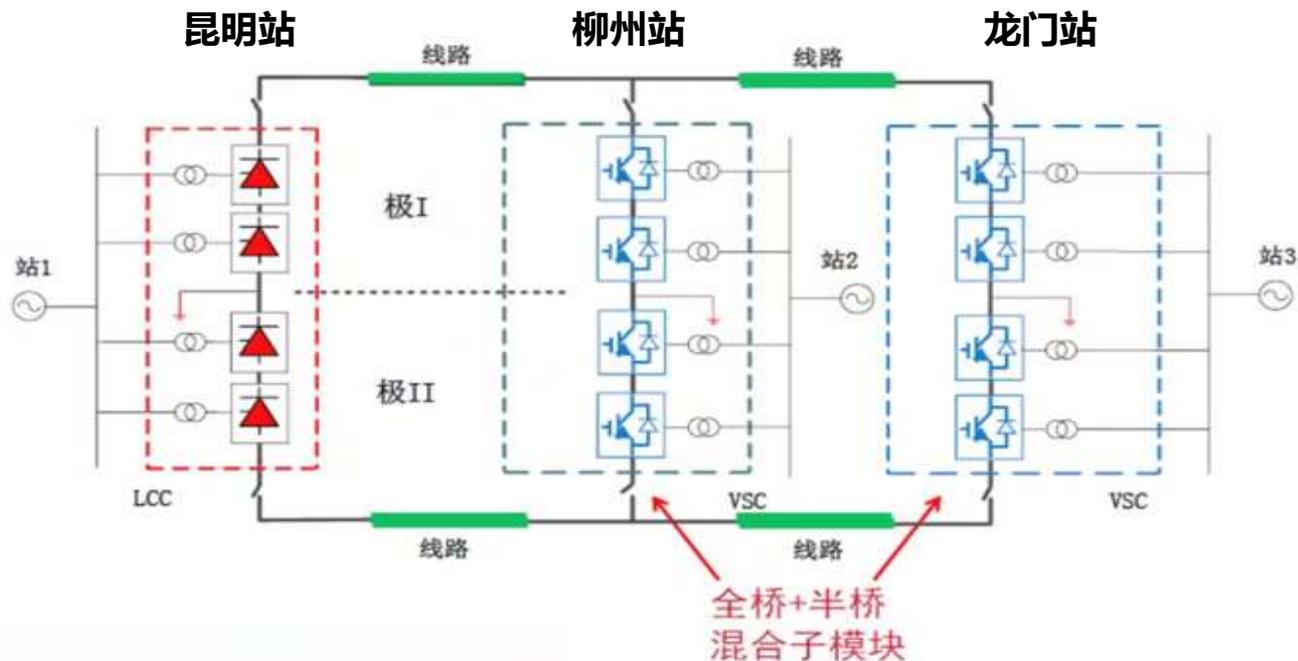


### 分布式直流耗能结构



# 典型柔直工程

- $\pm 800\text{kV}$  昆柳龙特高压三端混合直流输电工程

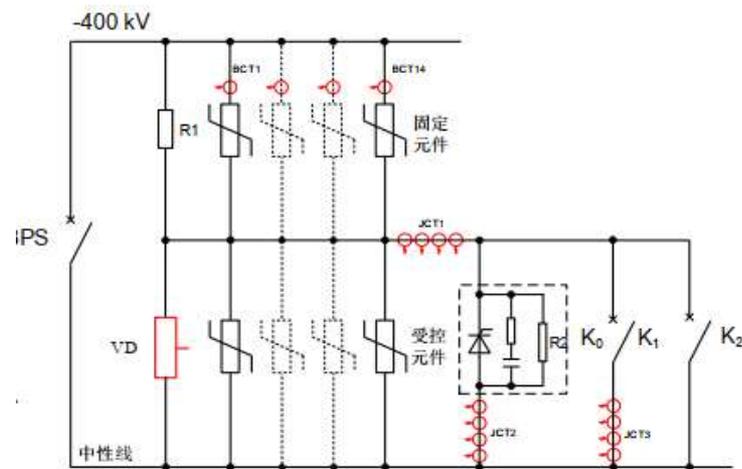
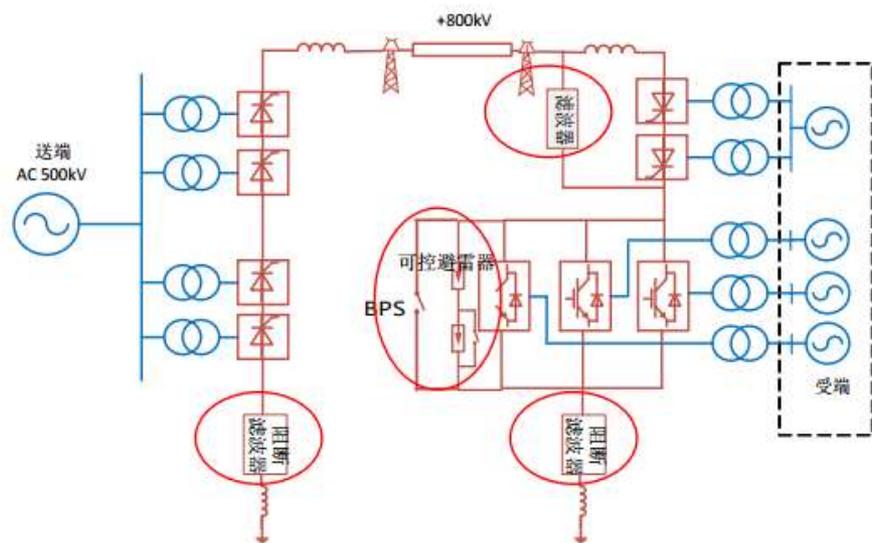




# 典型柔直工程

## • 主接线方案

- 受端混合直流换流站400kV母线和中性母线间配置可控避雷器，以解决VSC侧交流系统故障时的功率盈余和过电压抑制问题；
- VSC配置旁路开关，实现可控避雷器能量越限时快速保护和故障情况下VSC的整组退出。



可控自恢复耗能装置



谢谢