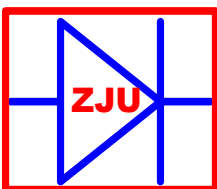




浙江大学  
Zhejiang University

# 柔性直流输电技术概述



徐政

浙江大学

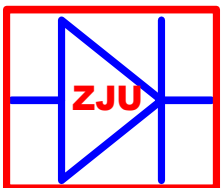
0571-87952074

[www.hvdc.cn](http://www.hvdc.cn), [xuzheng007@zju.edu.cn](mailto:xuzheng007@zju.edu.cn)

2018年8月



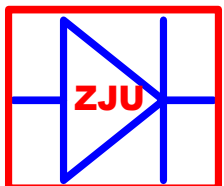
# 内容提要



- 1 柔性直流输电的定义
- 2 电压源换流器的基本特性
- 3 柔性直流输电系统的基本特点
- 4 柔性直流输电应用于点对点输电
- 5 柔性直流输电应用于背靠背联网
- 6 柔性直流输电应用于构建直流电网



浙江大学  
Zhejiang University

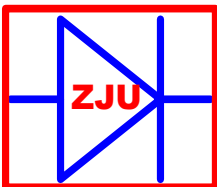


# 第1章

## 柔性直流输电的定义



# 第一代直流输电技术



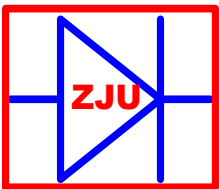
高压直流（**HVDC**）输电技术始于**1920**年代，到目前为止，经历了**3**次技术上的革新，其主要推动力是组成换流器的基本元件发生了革命性的重大突破。

**1954**年，世界上第一个直流输电工程（瑞典本土至**Gotland**岛的**20 MW**、**100 kV**海底直流电缆输电）投入商业化运行，标志着第一代直流输电技术的诞生。

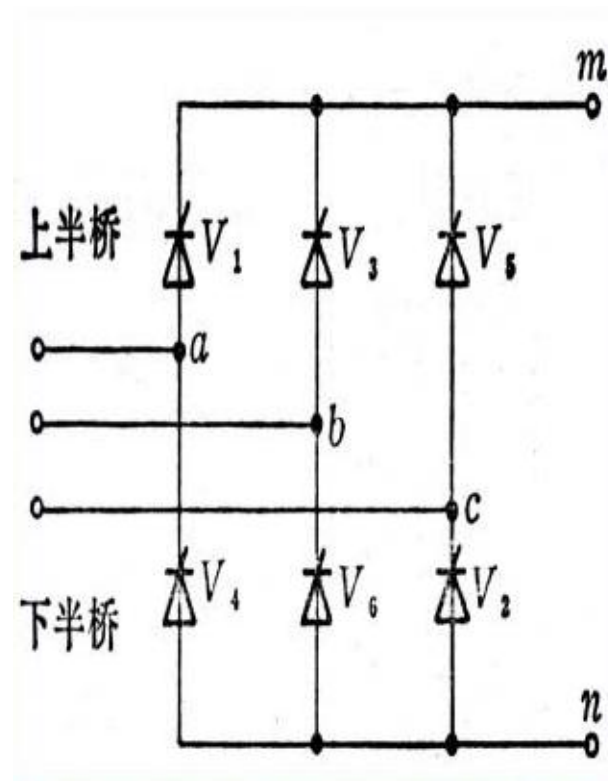
第一代直流输电技术采用的换流元件是汞弧阀，所用的换流器拓扑是**6**脉动**Graetz**桥，其主要应用年代是**1970**年代以前。



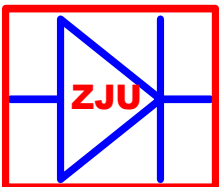
# 第一代直流输电技术



汞弧阀



6脉动Graetz桥



# 第二代直流输电技术



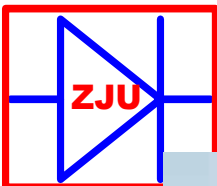
浙江大学  
Zhejiang University

**1970**年代初，晶闸管阀开始应用于直流输电系统，标志着第二代直流输电技术的诞生。

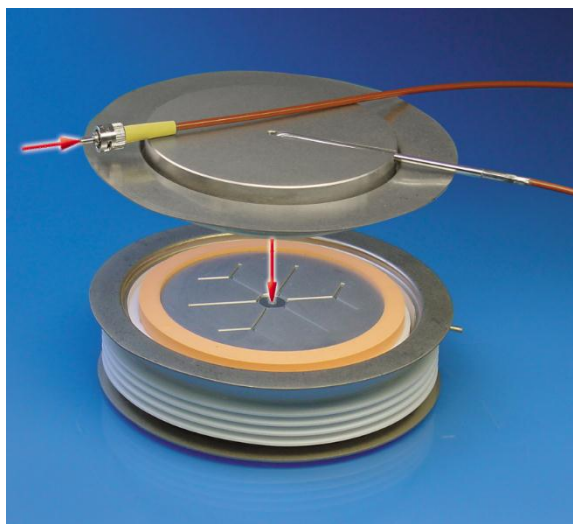
第二代直流输电技术采用的换流元件是晶闸管，所用的换流器拓扑仍然是**6脉动Graetz桥**，因而其换流理论与第一代直流输电技术相同，其应用年代是**1970**年代初直到今后一段时间。



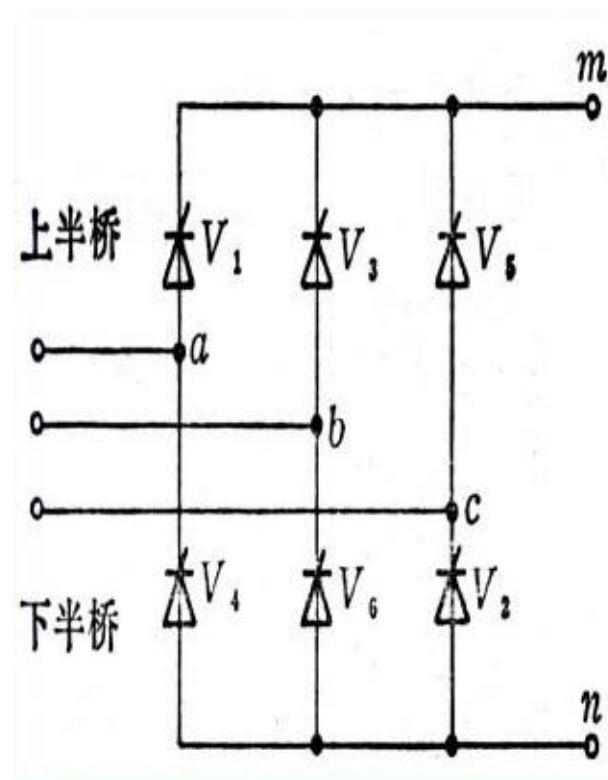
# 第二代直流输电技术



电触  
发晶  
闸管



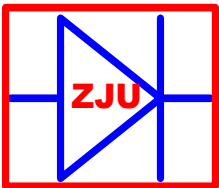
光触  
发晶  
闸管



6脉动Graetz桥



# LCC 与 CSC 的概念澄清



通常我们将基于**Graetz**桥式换流器的第一代和第二代直流输电技术称为传统直流输电技术，其运行原理是电网换相换流理论。因此我们也将传统直流输电所采用的**Graetz**桥式换流器称为“电网换相换流器”，英文是“**Line Commutated Converter**”，缩写是“**LCC**”。

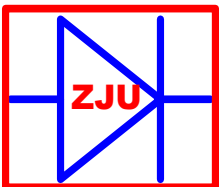
这里必须明确一个概念，有人将电流源换流器（**CSC**）与电网换相换流器（**LCC**）混淆起来，这是不对的。

**LCC**属于**CSC**，但**CSC**的范围要比**LCC**宽广得多，基于**IGBT**构成的**CSC**目前也是业界研究的一个热点。



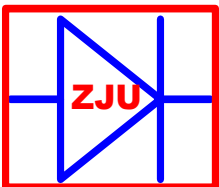


# 第三代直流输电技术



1990年，基于电压源换流器的直流输电概念首先由加拿大McGill大学的Boon-Teck Ooi等提出。在此基础上，ABB公司于1997年3月在瑞典中部的Hellsjon和Grangesberg之间进行了首次工业性试验（3 MW， $\pm 10\text{kV}$ ），标志着第三代直流输电技术的诞生。

这种以可关断器件和脉冲宽度调制（PWM）技术为基础的第三代直流输电技术，国际权威学术组织国际大电网会议（CIGRE）和美国电气和电子工程师协会（IEEE），将其正式命名为“VSC-HVDC”，即“电压源换流器型直流输电”。



# 柔性直流输电的定义

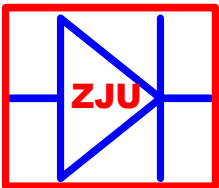
**2006年5月**，由中国电力科学研究院组织国内权威专家在北京召开“轻型直流输电系统关键技术研究框架研讨会”，会上，与会专家一致建议国内将基于电压源换流器技术的直流输电（第三代直流输电技术）统一命名为“柔性直流输电”。

另：

**ABB公司**称之为轻型直流输电（**HVDC Light**），并作为商标注册。

西门子公司则称之为**HVDC Plus**。

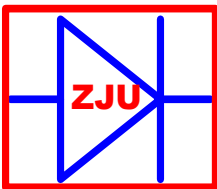
# 柔性直流输电发展的2个阶段



柔性直流输电技术采用的换流元件是既可以控制导通又可以控制关断的双向可控电力电子器件，其典型代表是绝缘栅双极型晶体管（**IGBT**）。

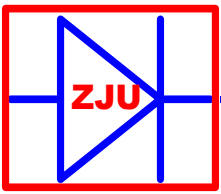
柔性直流输电的运行原理完全不同于**LCC**的电网换相换流理论，实际上柔性直流输电技术本身到目前为止也可以划分成**2**个发展阶段。

# 柔性直流输电发展的第一阶段

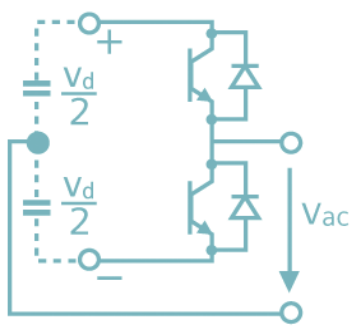


第一个发展阶段是**1990**年代初到**2010**年，这一阶段柔性直流输电技术基本上由**ABB**公司垄断，采用的换流器是二电平或三电平电压源换流器（**VSC**），其基本理论是脉冲宽度调制（**PWM**）理论。

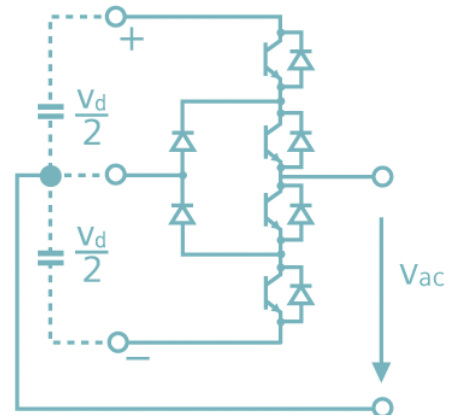
# 柔性直流输电发展的第一阶段



2电平

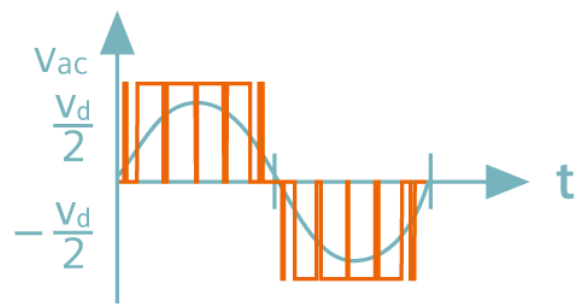
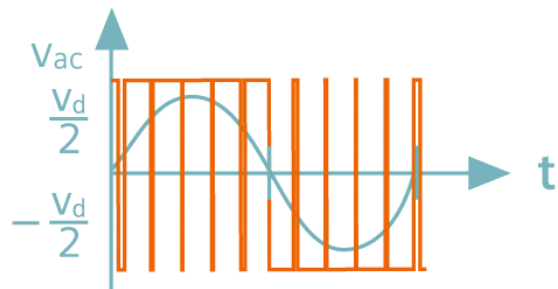


3电平

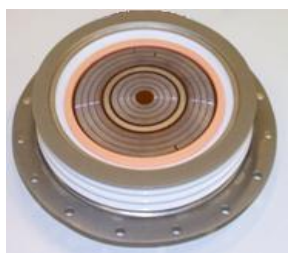


拓扑:

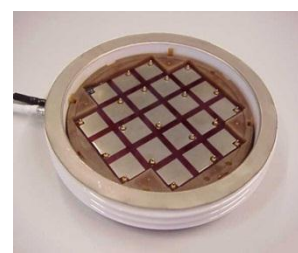
运行原理:



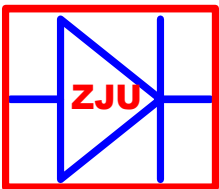
GTO/IGCT



IGBT



# 柔性直流输电发展的第三阶段

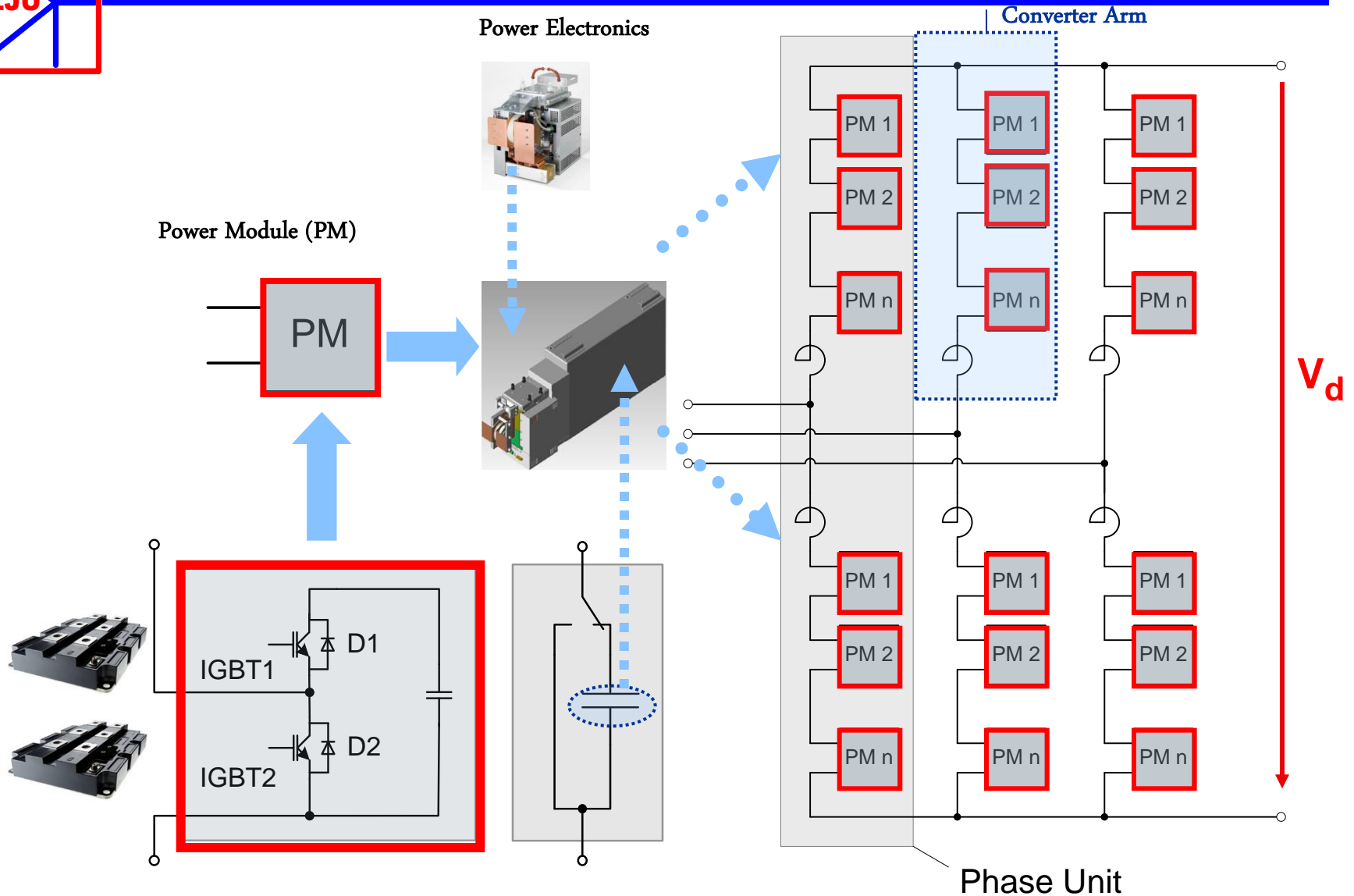
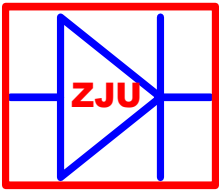


第二个发展阶段是**2010**年到今后一段时间，其基本标志是**2010**年**11**月在美国旧金山投运的 **Trans Bay Cable** 柔性直流输电工程；该工程由西门子公司承建，采用的换流器是模块化多电平换流器（**MMC**）。**MMC**的运行原理不是**PWM**，而是阶梯波逼近。

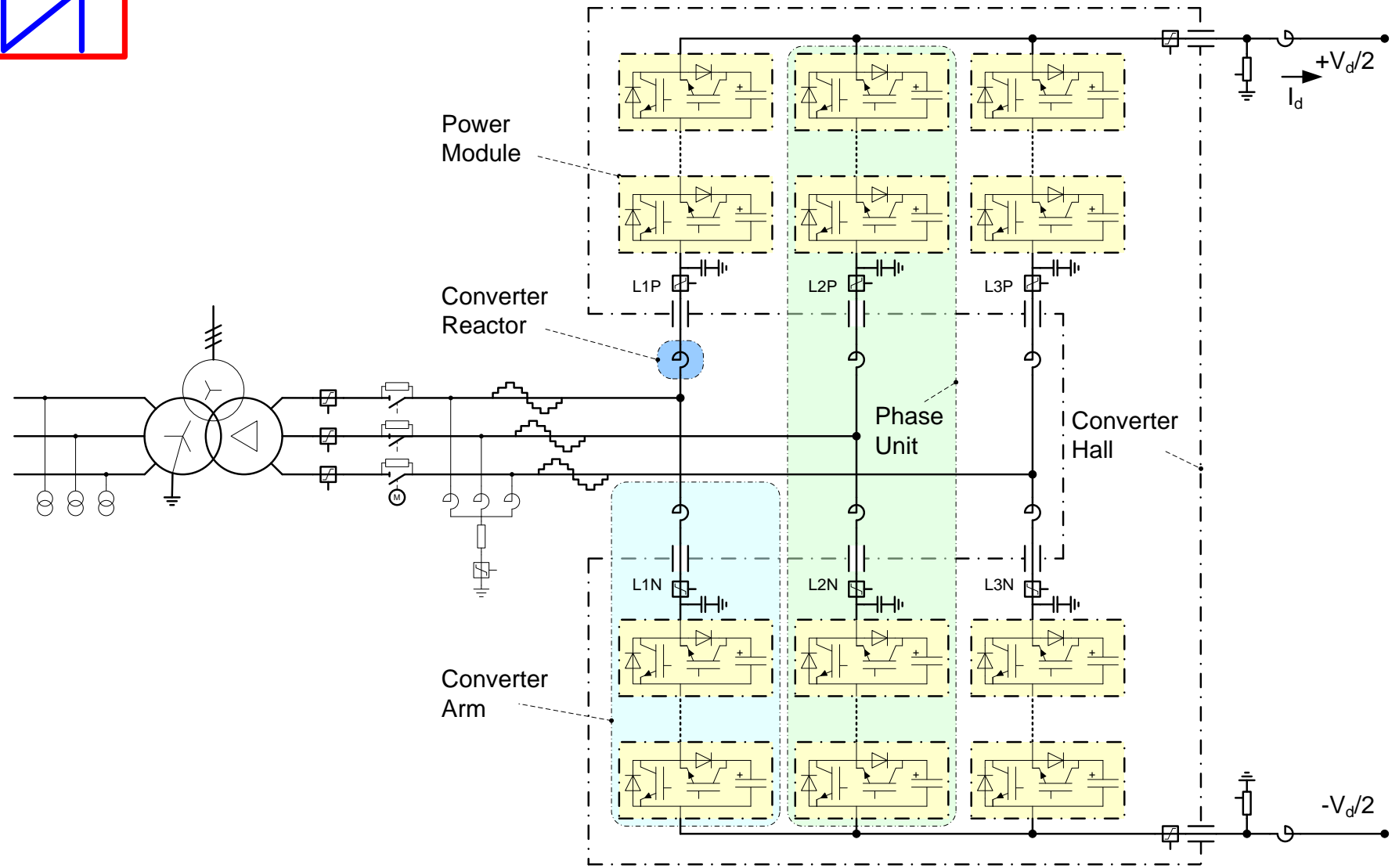
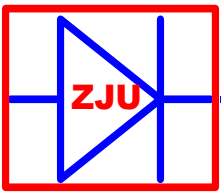
# MMC及其子模块构成



浙江大学  
Zhejiang University



# MMC的拓扑结构

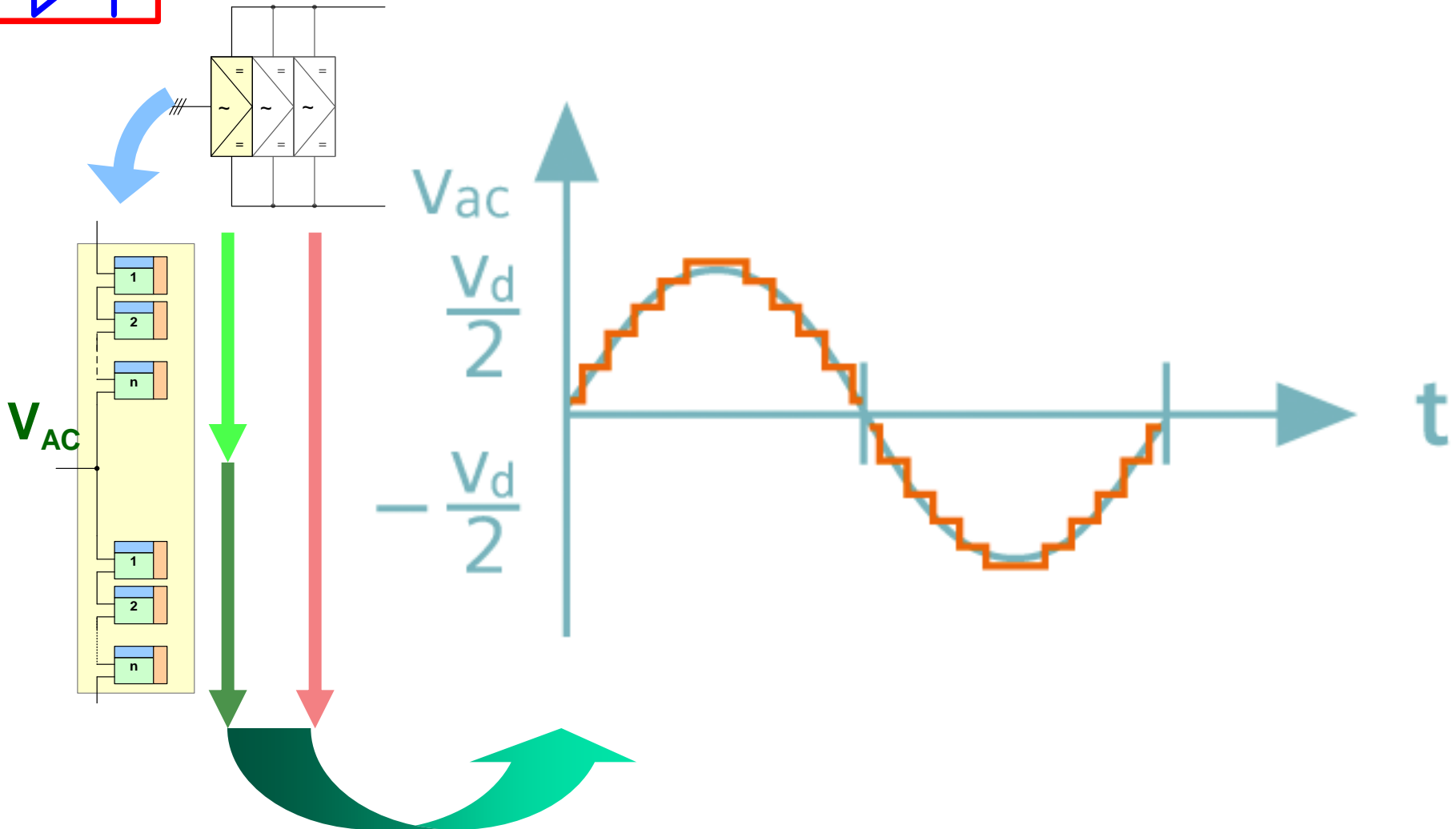
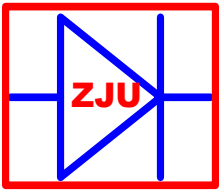


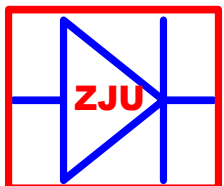


# MMC阶梯波逼近原理



浙江大学  
Zhejiang University



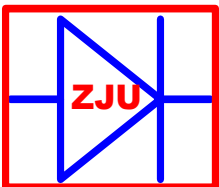


## 第2章

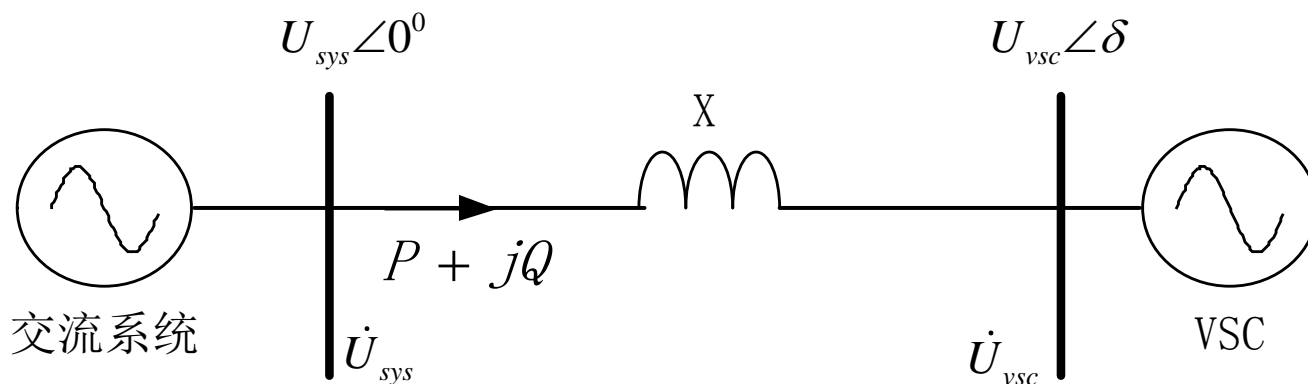
# 电压源换流器的基本特性



# 电压源换流器的基本特性



不管是两电平、三电平或**MMC**换流器，由于都属于电压源换流器，其基波频率下的外特性是完全一致的。

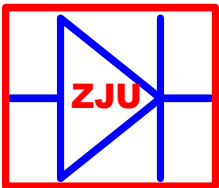


$$P = \frac{U_{sys} U_{vsc}}{X} \sin \delta$$

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



# 电压源换流器的基本特性

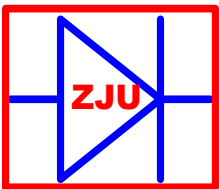


VSC 与 LCC 相比，具有的根本性优势是多了一个控制自由度。LCC 因为所用的器件是晶闸管，晶闸管只能控制导通而不能控制关断，因此 LCC 的控制自由度只有 1 个，就是触发角 $\alpha$ ，这样 LCC 实际上只能控制直流电压的大小。而 VSC 因为所用的器件是双向可控的，既可以控制导通，也可以控制关断，因而 VSC 有 2 个控制自由度，反映在输出电压的基波相量 $\dot{U}_{vsc}$ 上，就表现为 $\dot{U}_{vsc}$ 的幅值 $U_{vsc}$ 和相位角 $\delta$ 都是可控的。因此从交流系统的角度来看，VSC 可以等效成一个无转动惯量的电动机或发电机，几乎可以瞬时地在 PQ 平面的 4 个象限内实现有功功率和无功功率的独立控制，这就是电压源换流器的基本特性。而柔性直流输电系统的卓越性能在很大程度上就依赖于电压源换流器的基本特性。

# 第2代柔直超越第1代柔直的点



浙江大学  
Zhejiang University

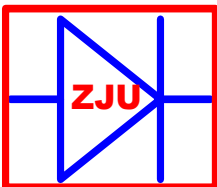


- (1) 制造难度下降
- (2) 损耗成倍下降
- (3) 阶跃电压降低
- (4) 波形质量高
- (5) 故障处理能力强

# 第2代柔直不如第1代柔直的点



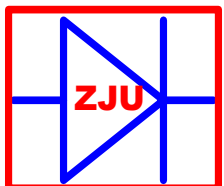
浙江大学  
Zhejiang University



- (1) 所用器件数量多
- (2) 控制更复杂



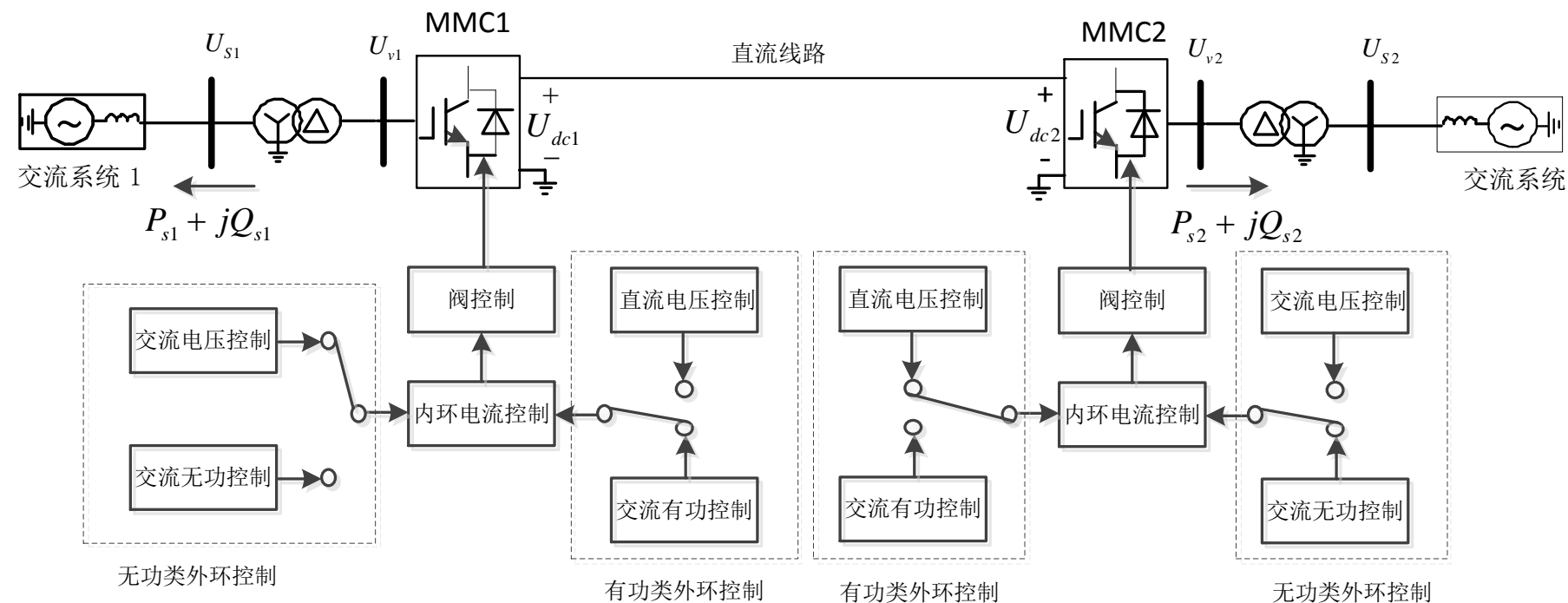
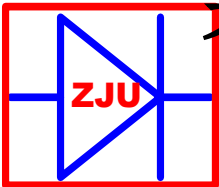
浙江大学  
Zhejiang University



## 第3章

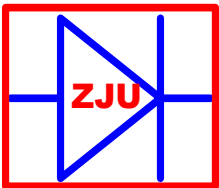
# 柔性直流输电系统的基本特点

# 柔性直流输电系统的基本控制结构





# 两侧控制变量的组合要求

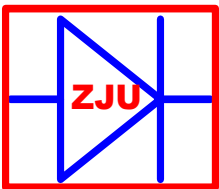


当两端交流系统为有源系统时，取其中的一端控制直流电压即可。

当使用柔性直流输电联接风电场时，风电场侧**MMC**控制交流侧频率和交流侧电压，电网侧**MMC**控制直流侧电压和交流侧无功功率。

当柔性直流输电向无源交流网络供电时，联接无源网络的那个**MMC**站控制交流系统频率和交流系统电压，而联接有源电网的那个**MMC**站控制直流侧电压和交流侧无功功率。

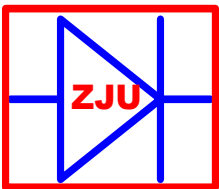
# 柔性直流如何超越传统直流？



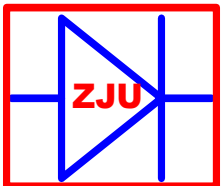
- (1) 没有无功补偿问题
- (2) 没有换相失败问题
- (3) 可以为无源系统供电
- (4) 可同时独立调节有功功率和无功功率
- (5) 谐波水平低
- (6) 适合构成多端直流系统
- (7) 占地面积小



# 柔性直流不如传统直流之处



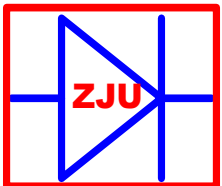
- (1) 损耗较大
- (2) 设备成本较高
- (3) 容量相对较小
- (4) 不太适合长距离架空线路输电



# 第4章

## 柔性直流输电应用于点对点输电

# 传统直流输送功率与母线电压的非线性关系

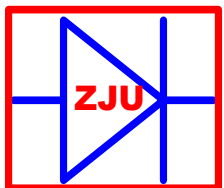


(1) 当逆变站交流母线电压瞬间跌落不超过**8%**时，直流输送功率基本保持不变；逆变站交流母线电压瞬间跌落不超过**10%**时，传统直流输电逆变器会发生换相失败，直流输送功率可以跌落到零。

(2) 对于多直流馈入场景：换相失败引起输送功率中断威胁系统的安全稳定性。当交流系统发生短路故障时，瞬间电压跌落可能会引起多个换流站同时发生换相失败，导致多回直流线路输送功率中断，引起整个系统的潮流大范围转移和重新分布，影响故障切除后受端系统的电压恢复，从而影响故障切除后直流功率的快速恢复，由此造成的冲击可能会威胁到交流系统的暂态稳定性。



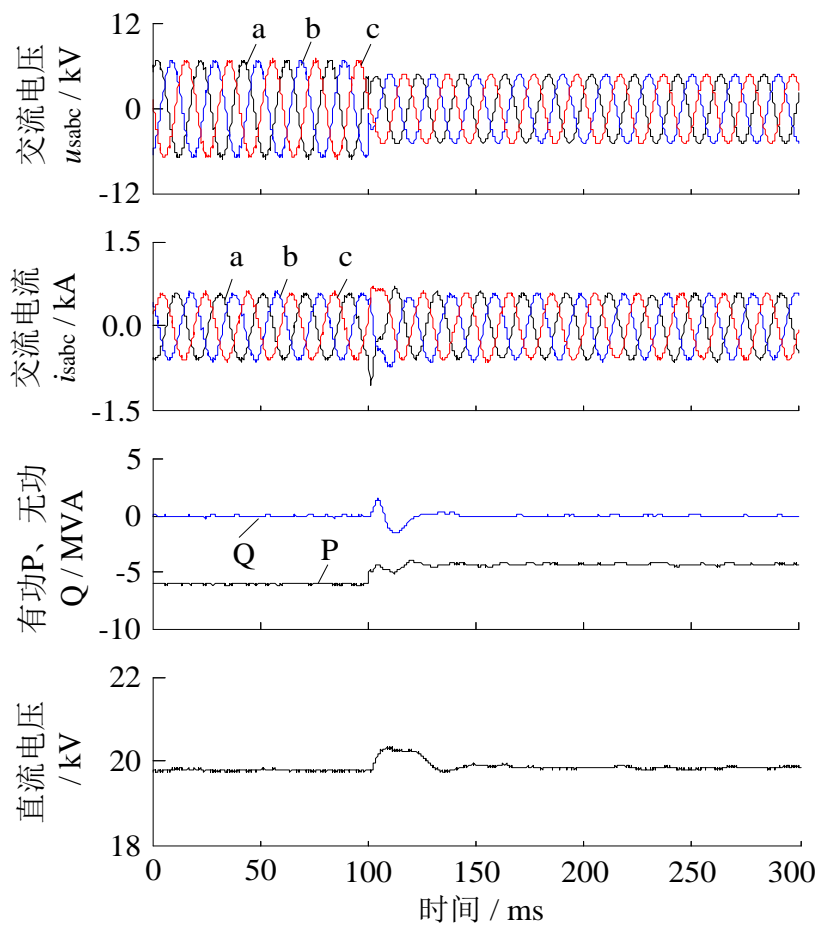
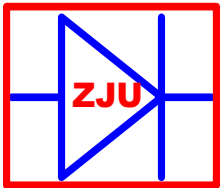
# 柔性直流输送功率与母线 电压的线性关系



在交流系统故障时，只要换流站交流母线电压不为零，柔性直流输电系统的输送功率就不会中断。例如，当逆变侧交流系统发生三相故障，导致逆变站交流母线电压瞬间跌落**30%**时，功率输送变化如图所示。可见，直流输送功率有所下降，但并没有中断。而这种情况若发生在传统直流输电系统上，则逆变器必然发生换相失败，造成输电中断。



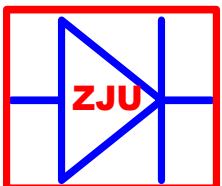
# 柔性直流输送功率与母线 电压的线性关系



对于多直流馈入场景：  
即使交流系统发生故障，  
多回柔性直流输电线路  
也不会中断输送功率，  
一定程度上避免了潮流  
的大范围转移，因此对  
交流系统的冲击比传统  
直流输电线路要小得多。



# 点对点直流输电



另外，柔性直流输电线路在故障下的响应特性与交流线路类似甚至更好，即在故障时只要还存在电压，就能输送功率，而在故障切除电压得到恢复的情况下输送功率就立即恢复到正常水平，且柔性直流输电系统可以帮助交流系统恢复电压，这是交流线路所做不到的。

因此，采用柔性直流输电技术，受端电网中接受直流输电馈入的落点个数已不受限制，正像交流输电线路接入电网时其落点个数不受限制一样（但实际上交流线路落点的个数还是要受到短路电流超限的限制）。

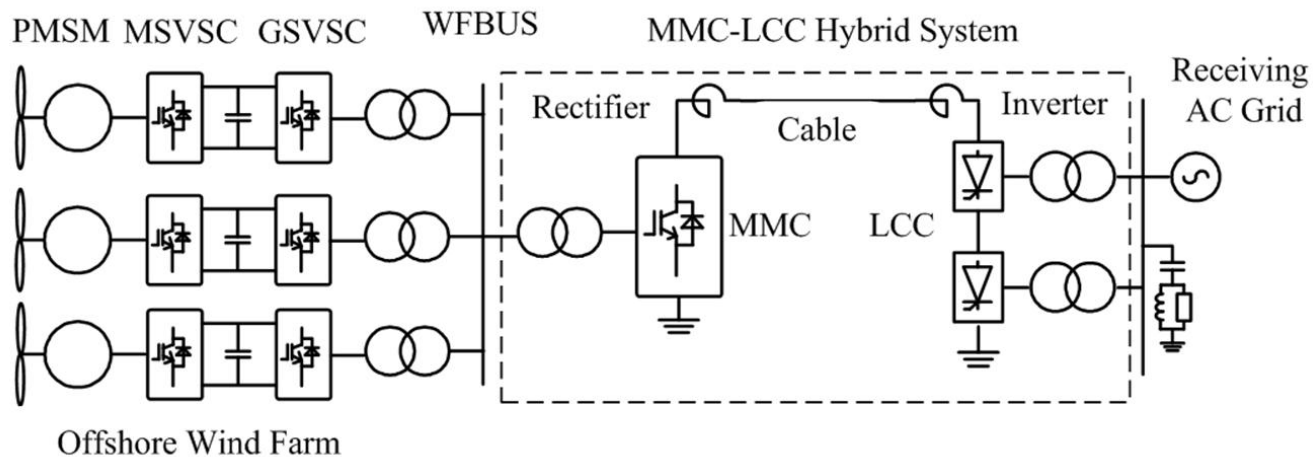
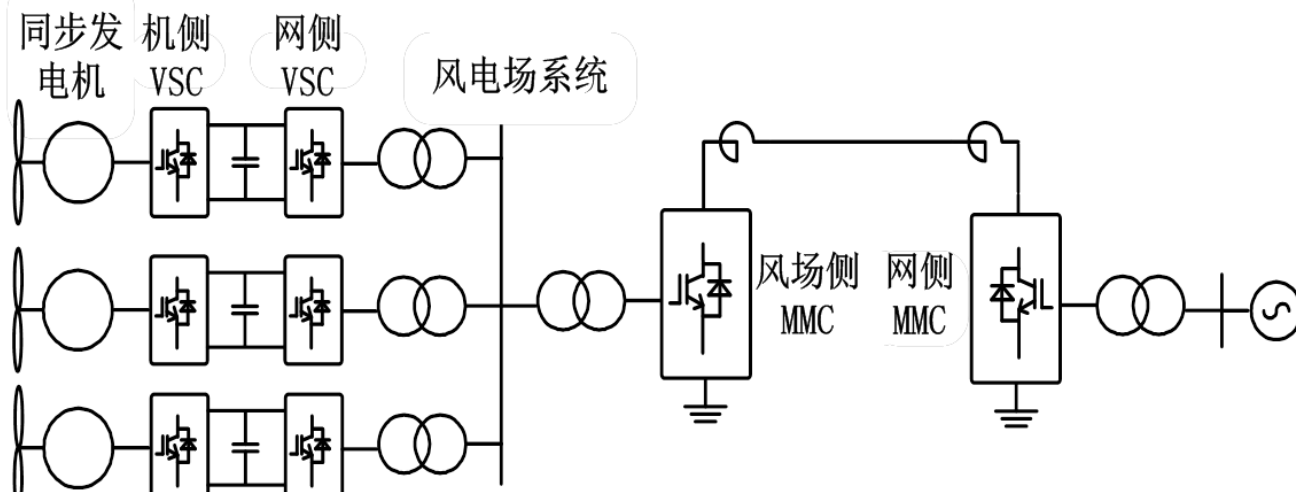
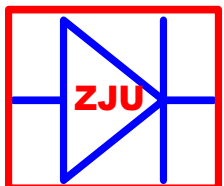
**柔性直流输电线路与交流线路相比的优点：**

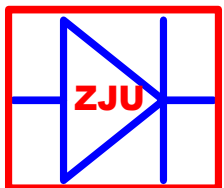
- 1、具有电压支撑能力**
- 2、不增加短路电流水平**





# 用于新能源送出



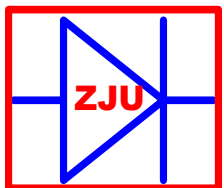


# 第5章

## 柔性直流输电应用于背靠背联网



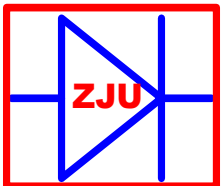
# 交流电网之间的防火墙



**ABB**公司将这种用于交流电网异步互联的直流输电系统形象地称为防火墙（**firewall**），用于隔离交流系统之间故障的传递。美国电力研究院（**EPRI**）在其主导的研究中，将柔性直流输电系统称作电网冲击吸收器（**grid shock absorber**），并倡导将其嵌入到北美东部大电网中，从而将北美东部大电网分割成若干个相互之间异步互联的小型同步电网，仿真结果表明采用这种小型同步电网异步互联结构，可以有效预防大面积停电事故的发生。



# 直流异步联网的优点



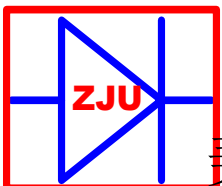
**(1)** 避免连锁故障导致大面积停电。直流异步联网后，就在网络结构上将送端电网的故障限制在送端电网内，受端电网的故障限制在受端电网内，从而消除了潮流的大范围转移，避免了交流线路因过载而相继跳闸，因而是预防大面积停电事故发生的最有效措施。

**(2)** 根除低频振荡。采用直流异步联网结构，就从网络结构上彻底根除了产生低频振荡的可能性。

**(3)** 不会对被联交流系统的短路电流水平产生影响，因为直流换流站不会像发电机那样为短路点提供故障电流。

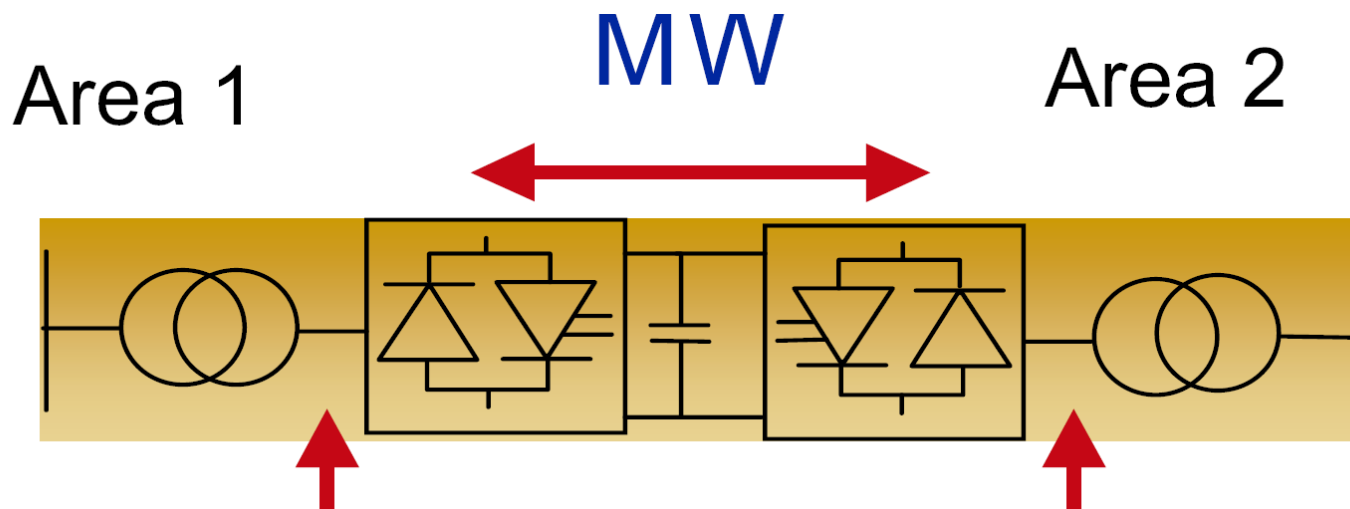


# 电网冲击吸收器（Grid Shock Absorber）的概念

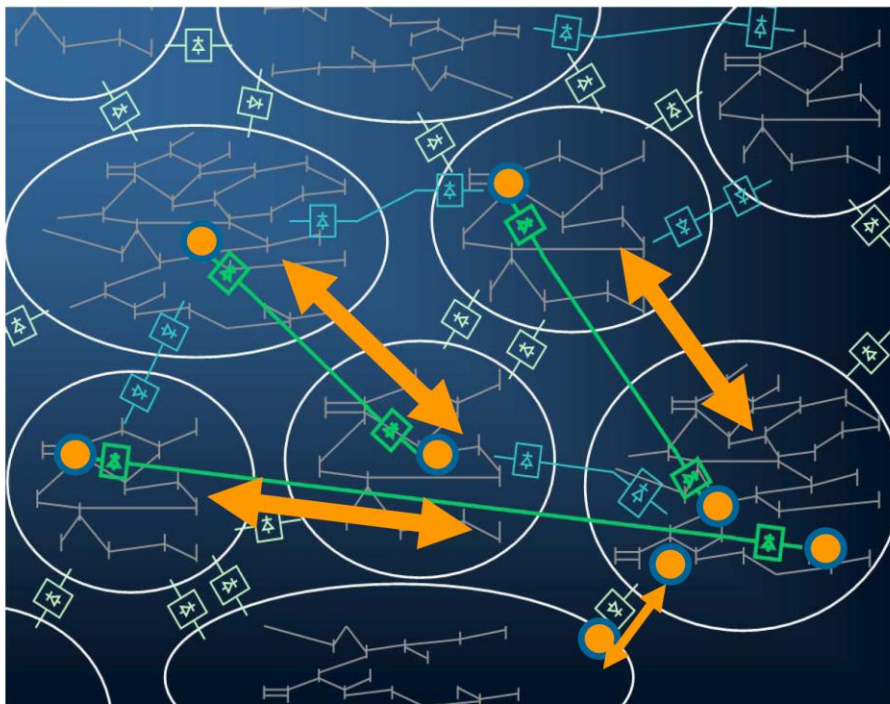


美国电科院（EPRI）在2006年提出了基于VSC—HVDC技术的所谓电网冲击吸收器。

## 基于VSC-HVDC的 背靠背技术



# 电网冲击吸收器（Grid Shock Absorber）的概念

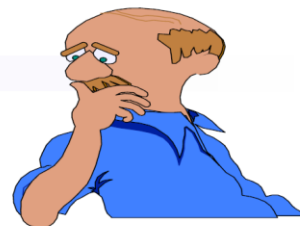


利用VSC—HVDC将大电网分成非同步运行的几块，其优点是VSC—HVDC的连接点本身就是电网的电压支撑点，因而克服了传统HVDC对受端电网的依赖性。这样，某一块中的电网冲击不会对其他块造成影响，从而达到电网冲击吸收器的功能。



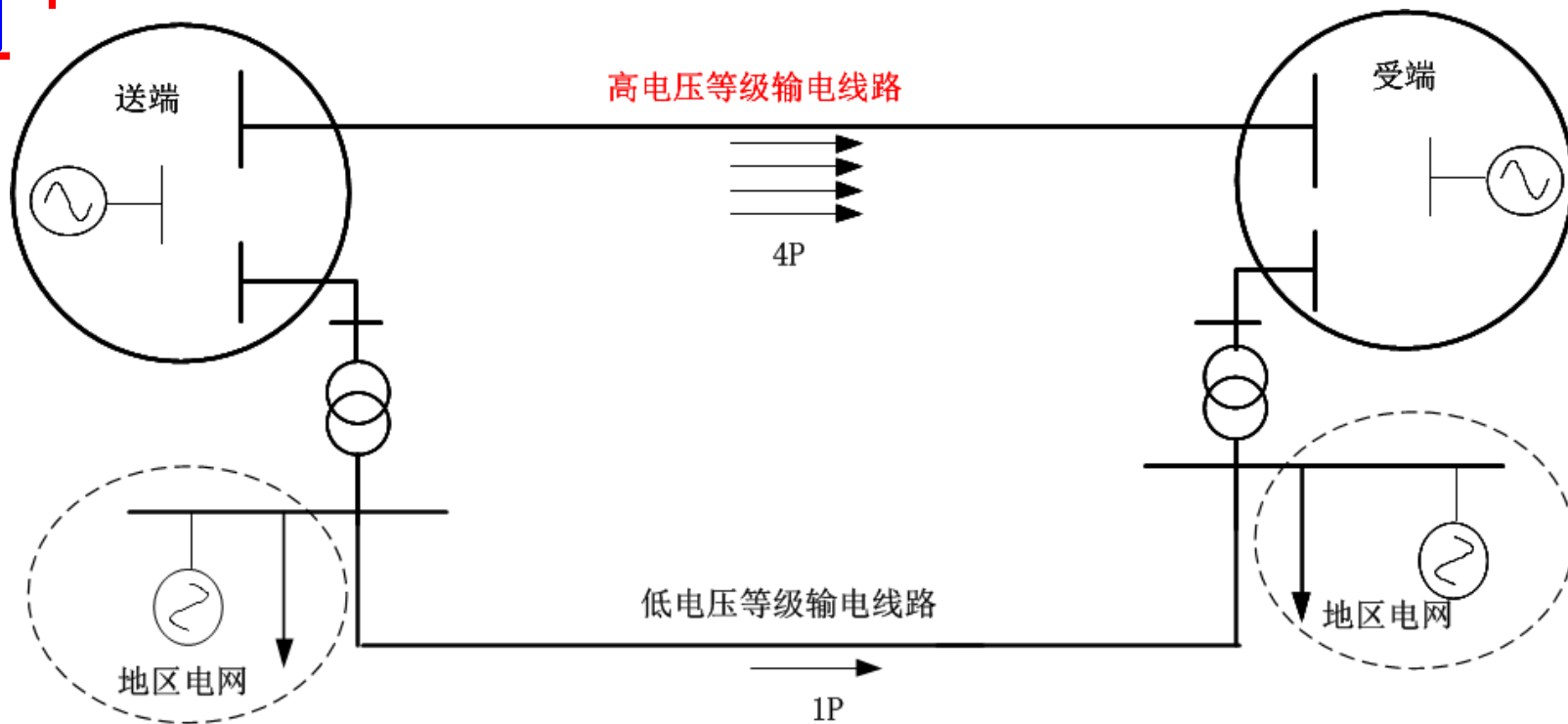
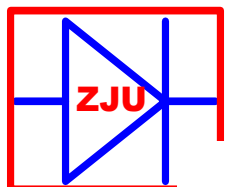
电压支撑节点

好主意！





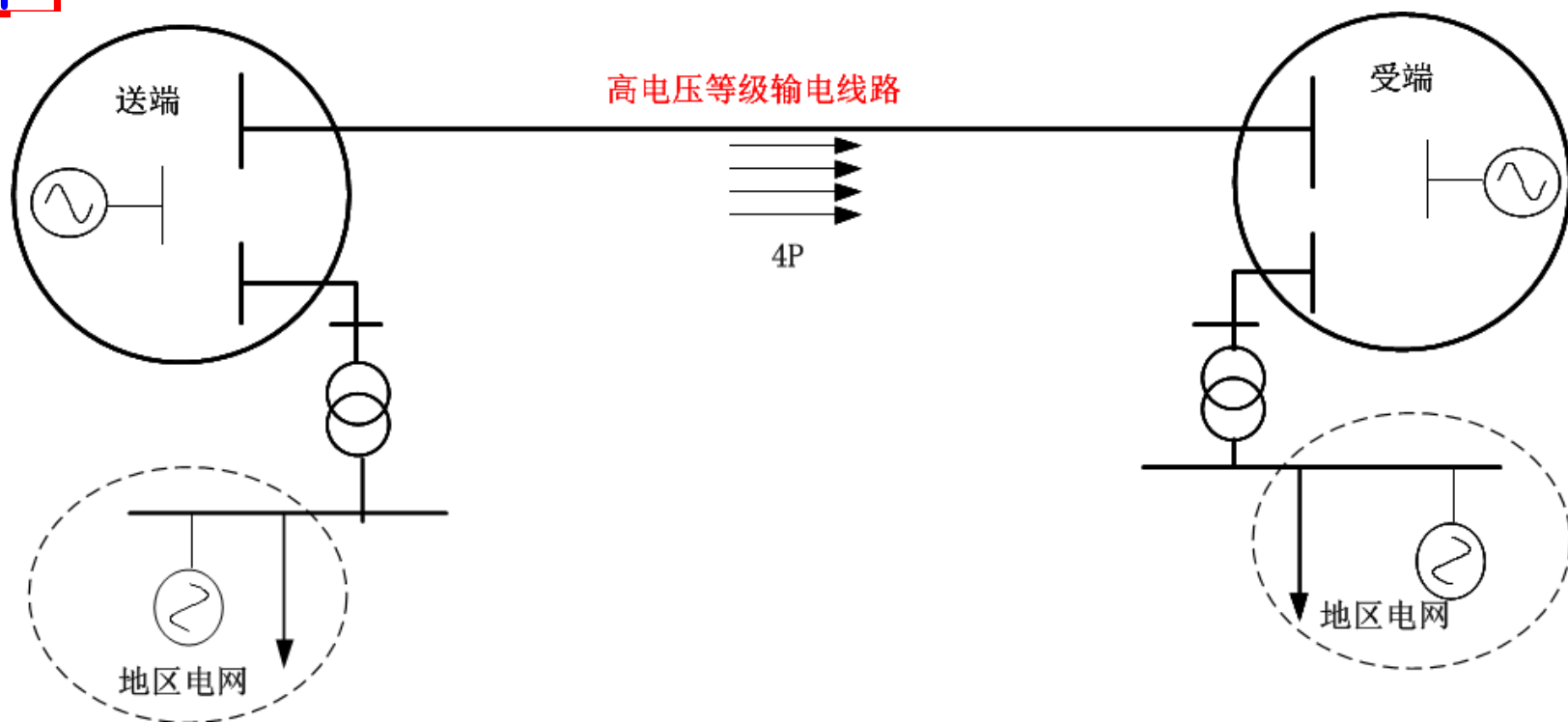
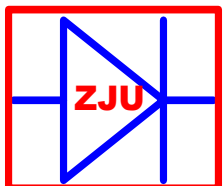
# 应用于破解电磁环网



电磁环网及其危害



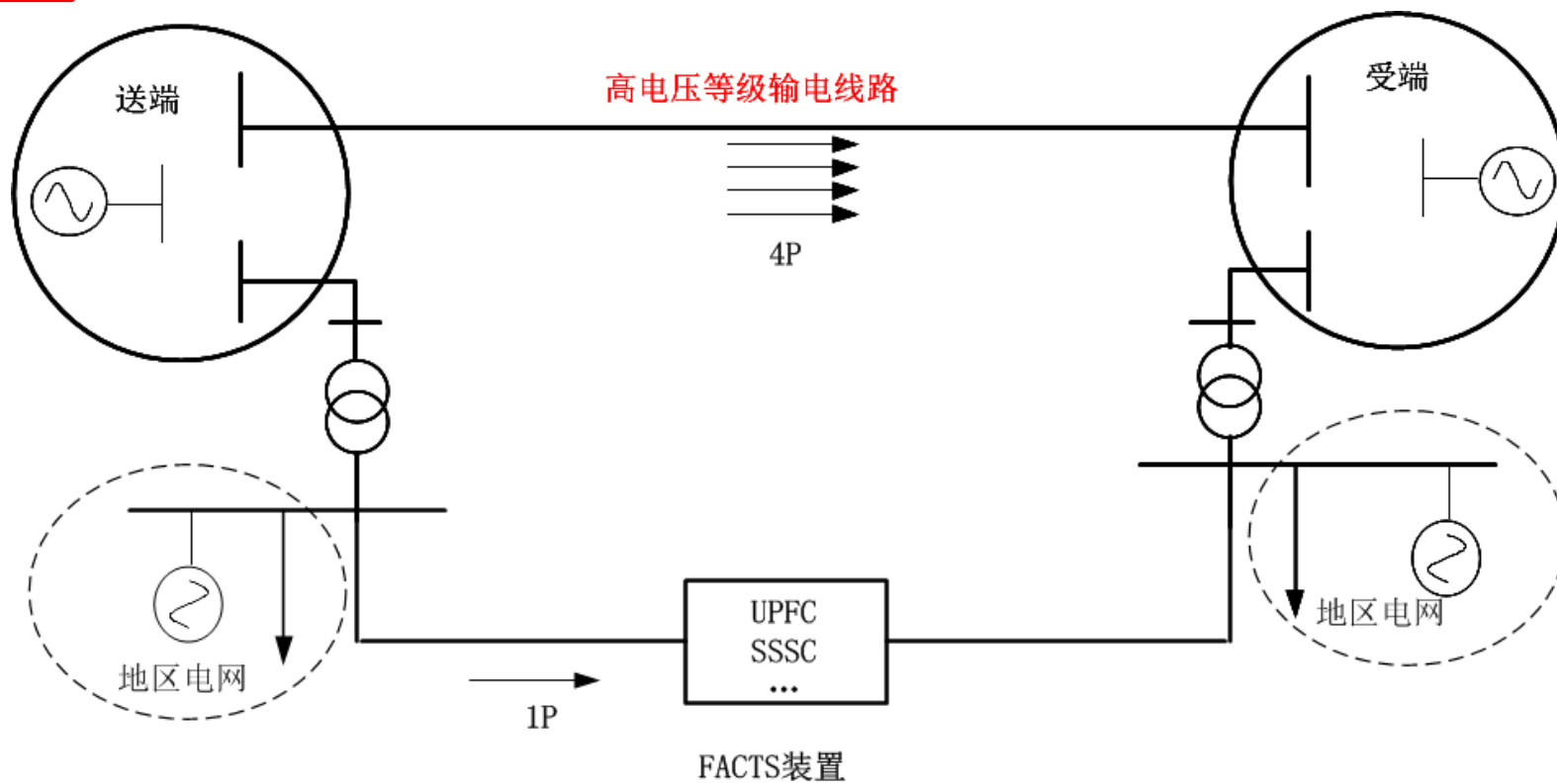
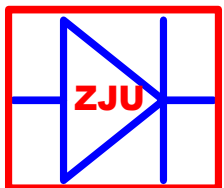
# 破解电磁环网方案一 直接解环





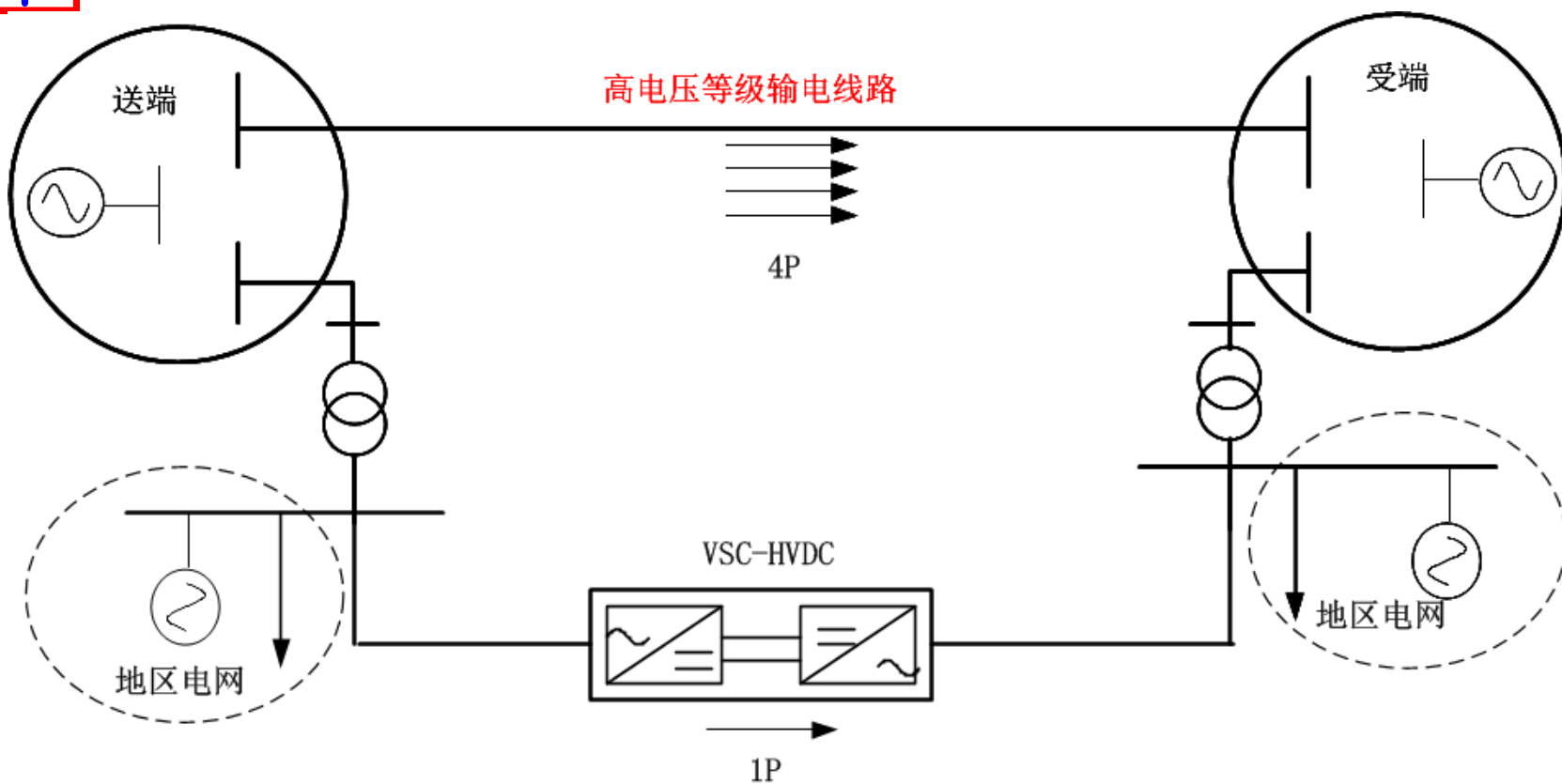
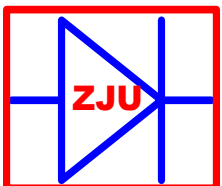


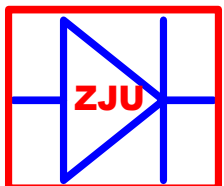
# 破解电磁环网方案二 采用柔性交流输电装置





# 破解电磁环网方案三 采用柔性直流输电装置



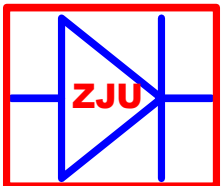


# 第6章

## 柔性直流输电应用于构建直流电网

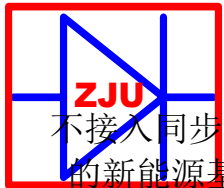


# 为什么传统直流技术不适合于构建直流电网？

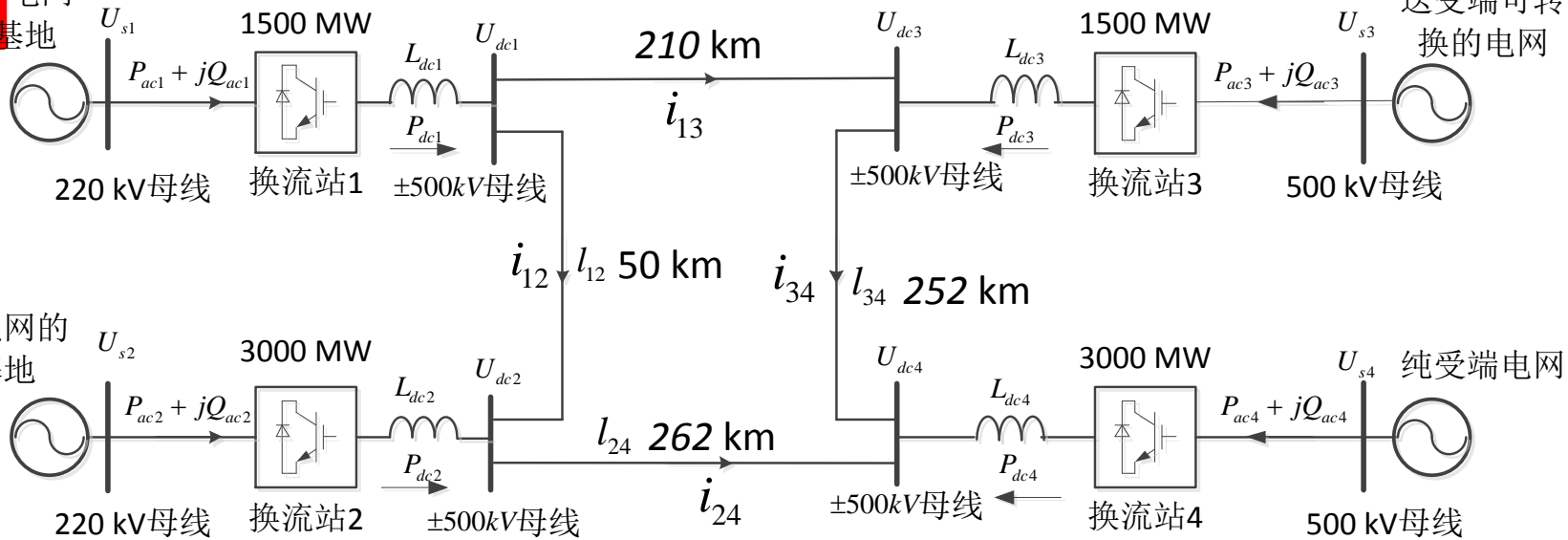


传统直流输电技术采用的是晶闸管换流阀，电流是单方向流通的，不能反向，构成直流电网时潮流方向也是单一的，难以发挥直流电网的优势，因而传统直流输电技术并不适合于构建直流电网，这就是为什么直流输电发展的前**50**年中，直流电网并没有得到发展的原因。

# 柔性直流构建直流电网的特点



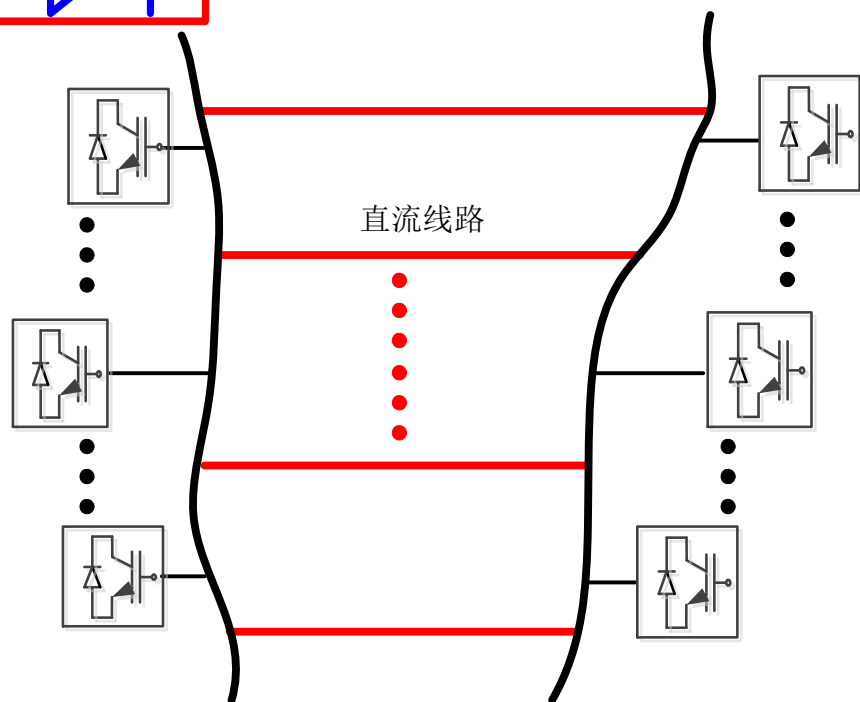
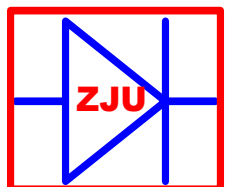
不接入同步电网  
的新能源基地



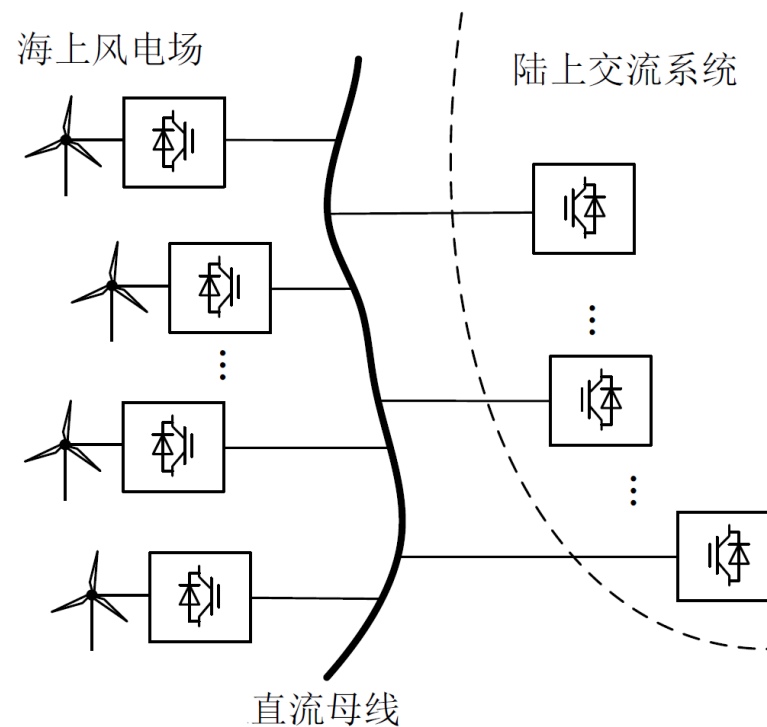
- (1) 与交流电网类似，电网各点的电压在运行方式改变时基本保持不变。
- (2) 与交流电网类似，通过改变线路电流的大小来改变流过线路的潮流的大小。
- (3) 交流线路中的潮流方向是由线路始端和末端的电压相角差决定的，直流线路中的潮流方向直接由流过线路的电流方向决定，也可以理解为由线路始端和末端的电压大小决定。



# 直流电网的应用

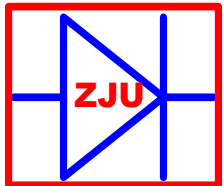


两条直流母线间的直流输电网



具有直流母线的海上风电送出系统

# 柔性直流构建直流电网的技术瓶颈



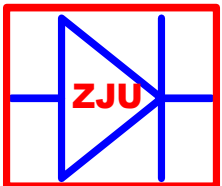
发展直流电网的主要技术瓶颈有**3**个：

- (1) 直流侧故障的快速检测和隔离技术；
- (2) 直流电压的变压技术；
- (3) 直流线路的潮流控制技术。

与这**3**个技术瓶颈相对应的核心装置是大容量高电压高速直流断路器，大容量直流变压器，和直流线路潮流控制器。



浙江大学  
Zhejiang University



THANK YOU!