



中国南方电网

CHINA SOUTHERN POWER GRID

服务好 管理好 形象好

# 高压直流输电技术及工程应用

云南电科院 杨洋

2016年11月

# 分享的目的



清洁能源的特点：

- 分散性
- 随机性
- 小型性
- 远离负荷中心

需要采用更加灵活、经济、环保的输电方式解决以上问题



## 清洁能源+直流输电

# 目录



## I、直流输电发展情况

## II、直流输电原理及设备组成

## III、直流输电仿真试验平台

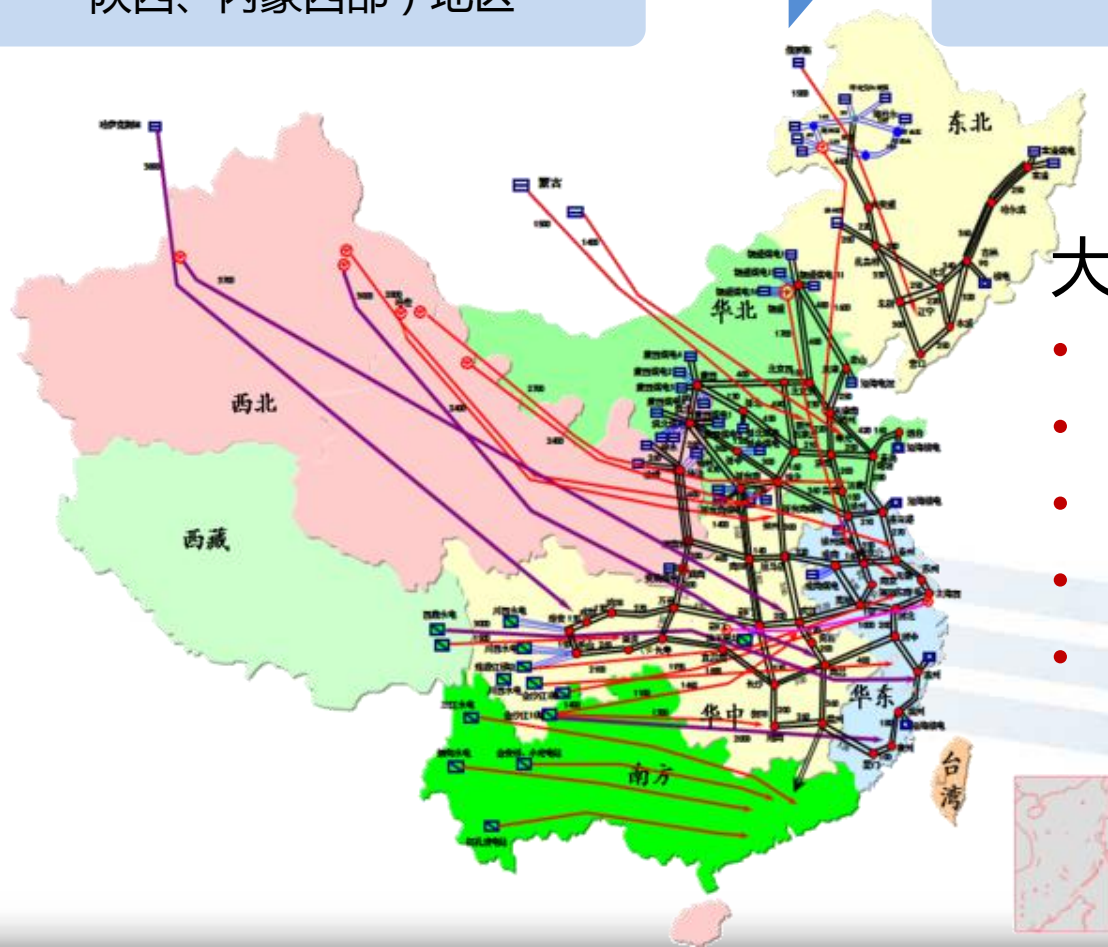
## IV、直流输电调试技术

# 高压直流输电发展情况

水力资源2/3集中在西南地区，煤炭资源60%集中在“三西”（山西、陕西、内蒙西部）地区

西电东送

负荷中心主要集中在东部沿海地区，电力消耗超过全国一半



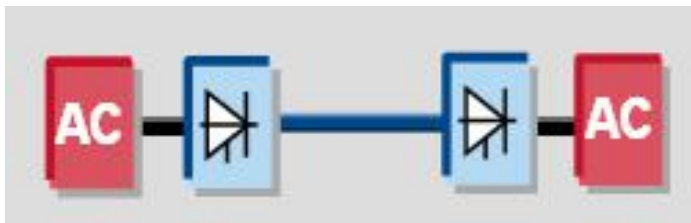
## 大的交流同步电网问题

- 区域间振荡以及连锁故障
- 短路容量增大
- 安稳装置及策略要求提高
- 大面积停电的风险增加
- 清洁能源消纳



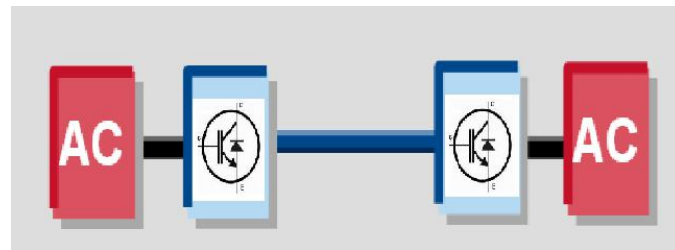
# 高压直流输电发展情况

- HVDC常规直流输电



核心部件是晶闸管，其换相原理是基于交流系统提供的短路电流，称作电流源换流器。

- VSC-HVDC柔性直流输电



核心部件是IGBT等可关断器件，基于电压换相，称作电压源换流器（Voltage Source Converter）。

# 高压直流输电发展情况

## • 常规直流输电

### – 经济性

- 和交流相比经济等价距离是  
**600km~900km**之间

### – 技术性

- 两端交流系统不需同步运行
- 不影响交流系统的短路电流
- 从网络结构上彻底根除了产生区域间低频振荡
- 隔断故障的传递，避免连锁故障的发生

适合长距离大容量输电

## • 柔性直流输电

### – 经济性

- 电压等级影响

### – 技术性

- 兼具常规直流输电的优点
- 有功无功可以独立控制（无功紧急支援，STATCOM的作用）
- 适合构建多端网络
- 受端系统可以是无源网络
- **不能控制直流侧故障时的故障电流**

跨越水体/新能源送出

# 高压直流输电发展情况

目前世界上已建成的直流输电工程超过100个。我国已建成30余个直流输电工程。还有相当数量工程正在建设和规划设计中，**已成为世界直流输电第一大国。**

云南2016年投产直流工程：

- $\pm 500\text{kV}$ 金中直流（梨园）
- $\pm 500\text{kV}$ 永富直流（观音岩）
- $\pm 500\text{kV}$ 鲁西背靠背

在建： $\pm 800\text{kV}$ 滇西北至广西直流输电工程

# 目录



I、直流输电发展情况



II、直流输电原理及设备组成

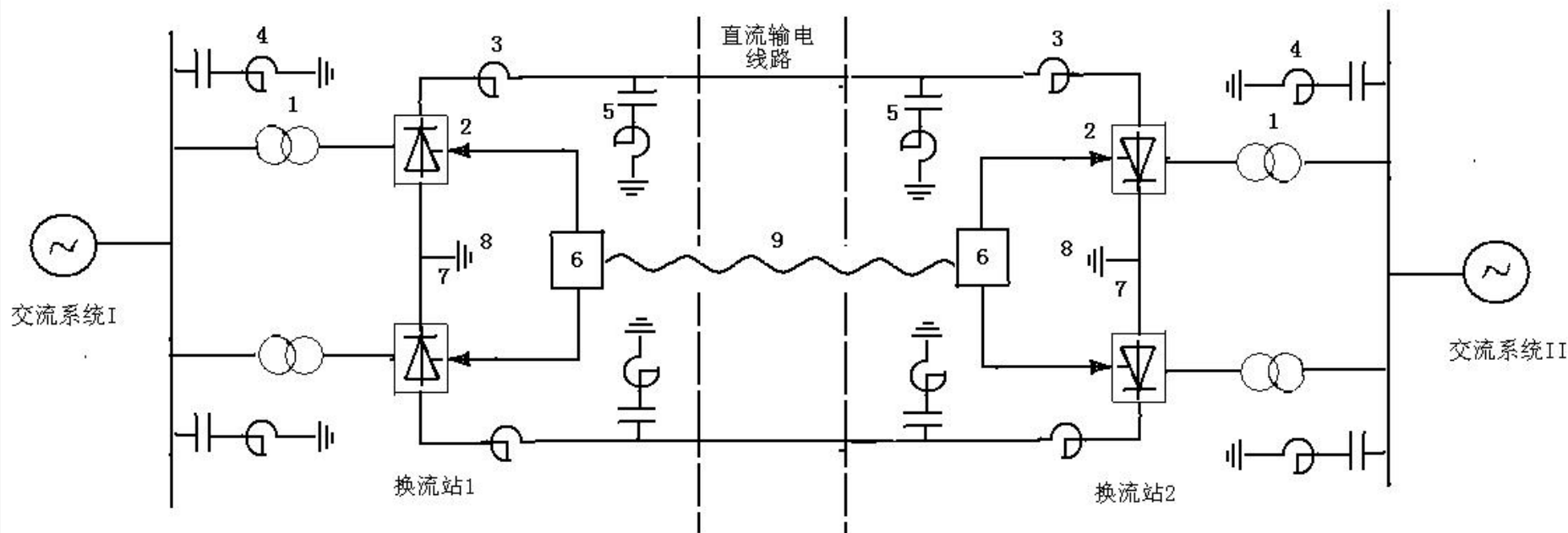
III、直流输电仿真试验平台

IV、直流输电调试技术



# 高压直流输电原理

## • 书本上的直流输电

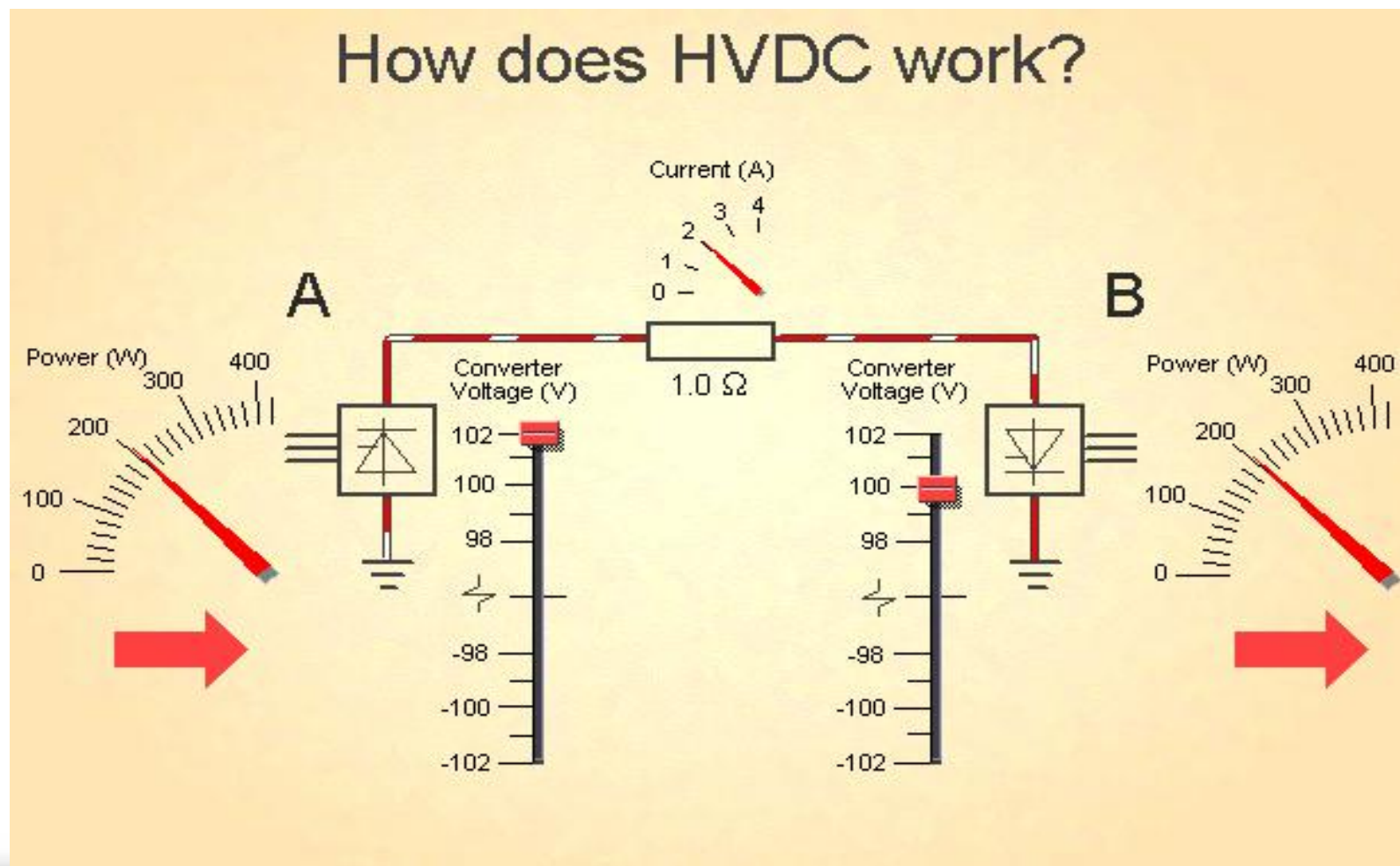


两端直流输电系统的构成原理图

- 1 - 换流变压器；2 - 换流器；3 - 平波电抗器；4 - 交流滤波器；5 - 直流滤波器；  
6 - 控制保护系统；7 - 接地极线；8 - 接地极；9 - 站间通信系统

# 高压直流输电原理

- 我想分享的直流输电



# 高压直流输电原理

- 关键是“把握3、2、1，做好两件事”

3、2、1

3个角度

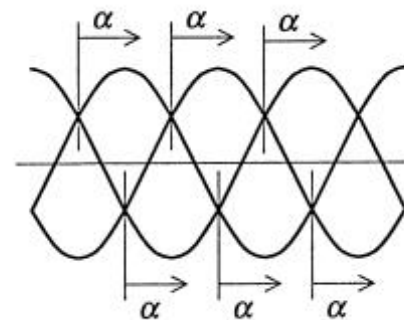
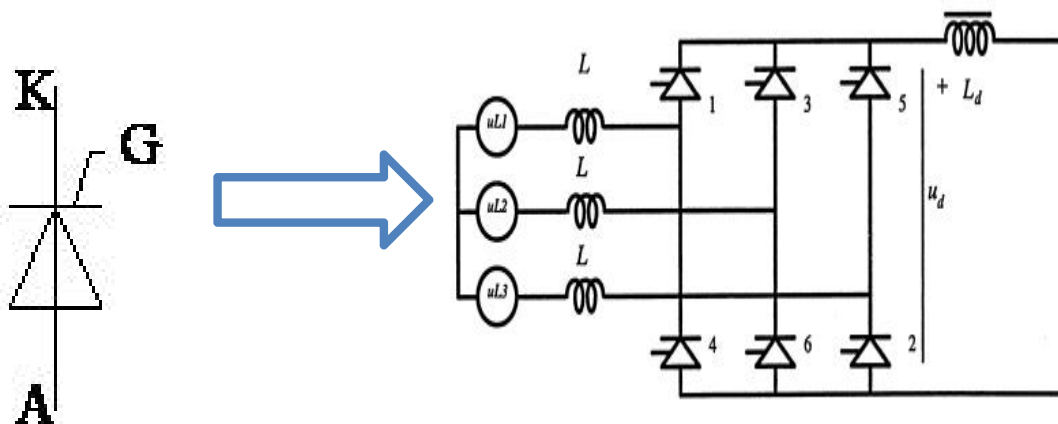
2个电压

1个电流

## — 两件事

- 交流变直流——整流
- 直流变交流——逆变

# 高压直流输电原理



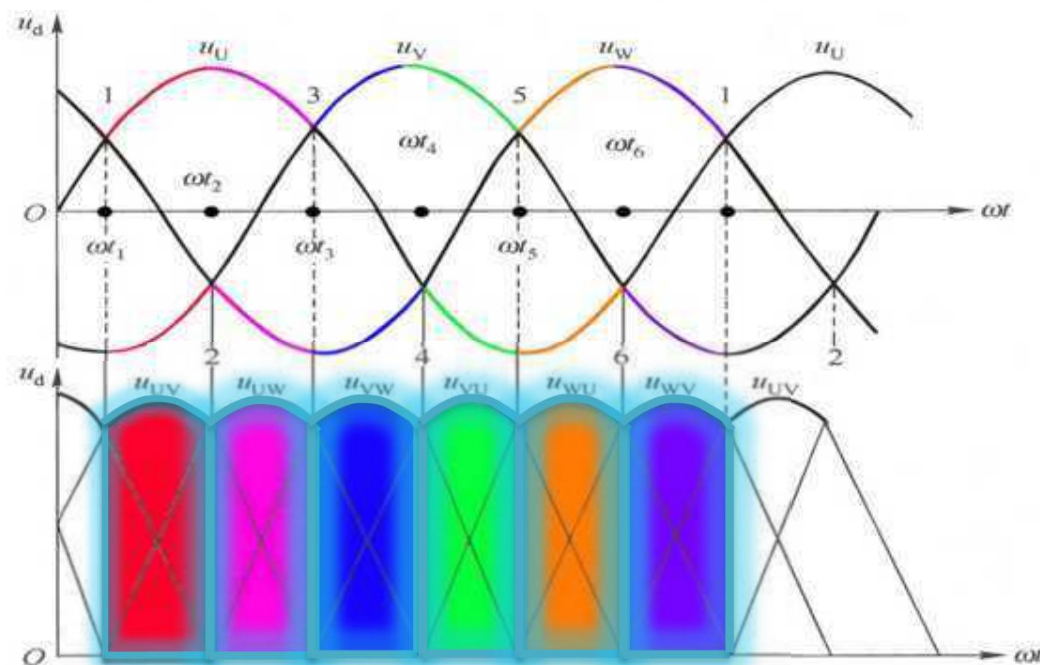
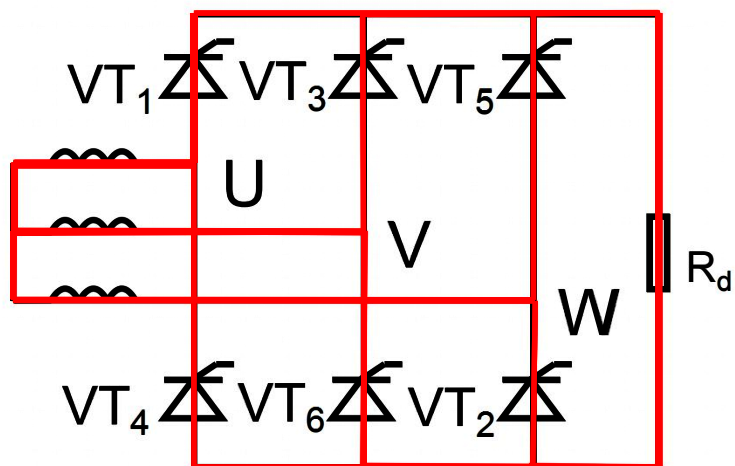
正向电压+门极触发  
后开通  
电流过零后关断

三相桥式整流电路

触发角 $\alpha$   
线电压零点后的  
延迟角度



# 高压直流输电原理



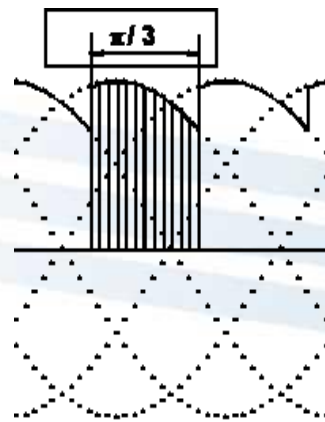
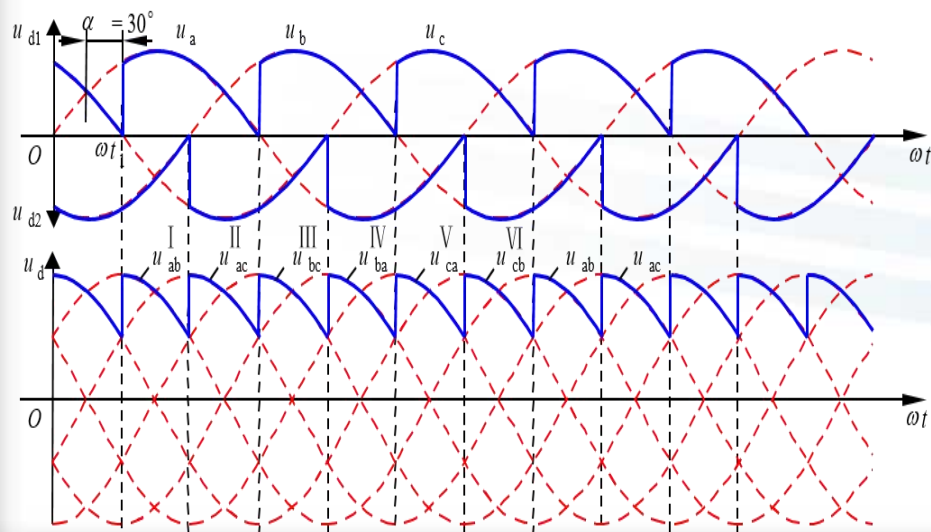
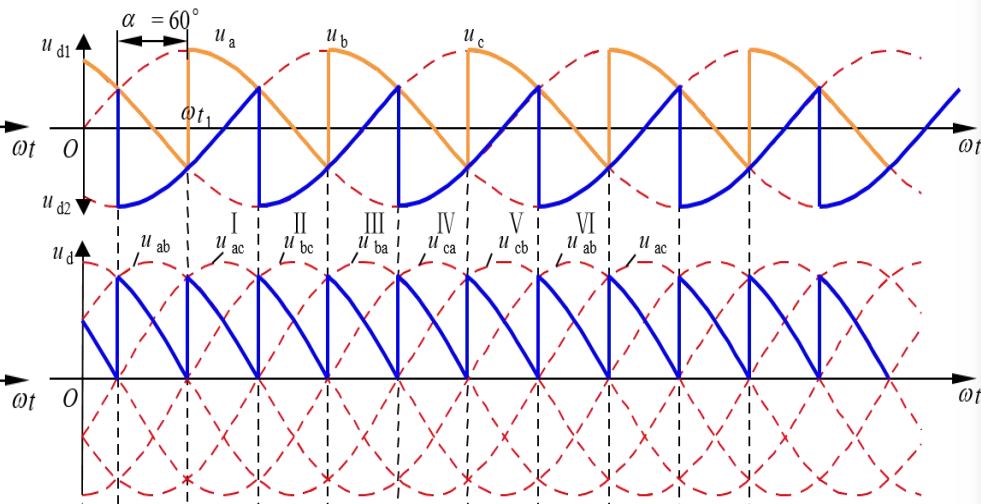
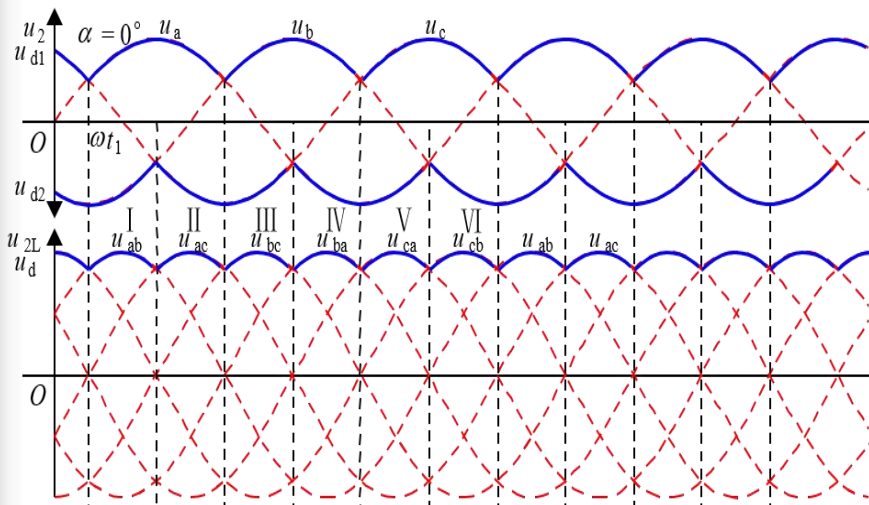
共阴极组中导通的晶闸管

VT1 VT1 VT3 VT3 VT5 VT5

共阳极组中导通的晶闸管

VT6 VT2 VT2 VT4 VT4 VT6

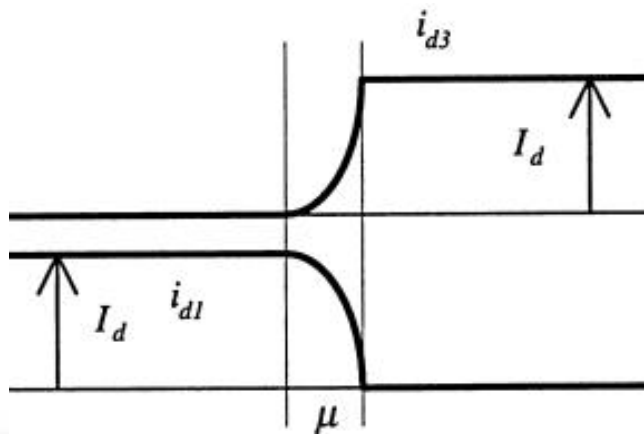
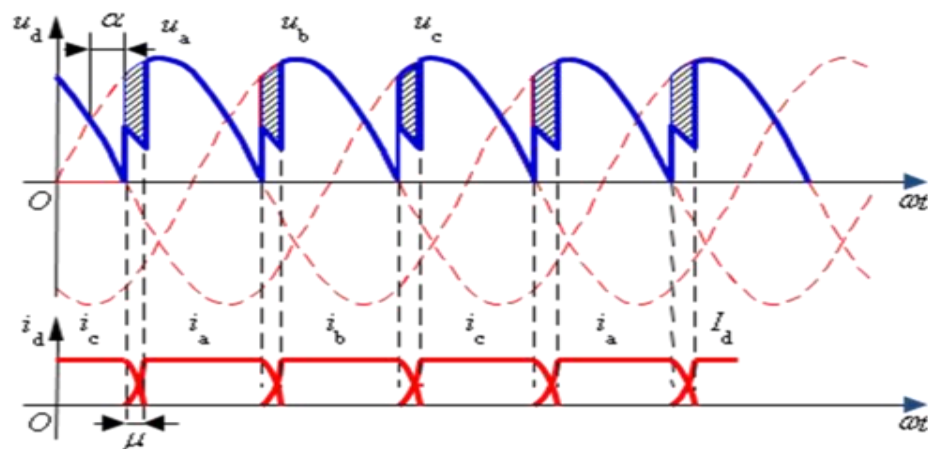
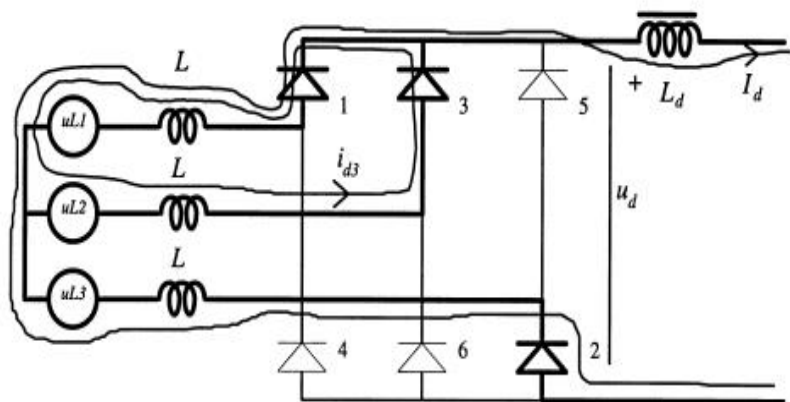
# 高压直流输电原理



$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{T} U\sqrt{2} \int_{\omega t_1 + \alpha}^{\omega t_1 + T + \alpha} \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{\pi} U\sqrt{2} \int_{\pi/3 + \alpha}^{2\pi/3 + \alpha} \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \cos \alpha \\
 &= \underline{\underline{1.35 U \cos \alpha}}
 \end{aligned}$$

# 高压直流输电原理

## • 换相叠弧角 $\mu$

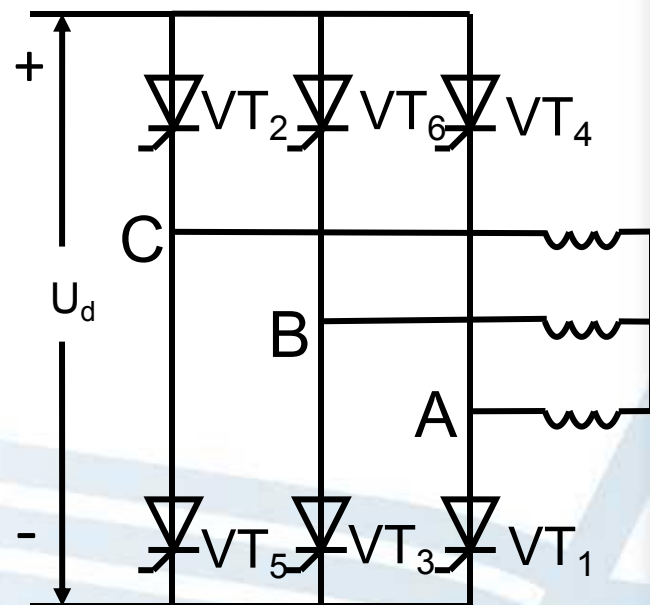
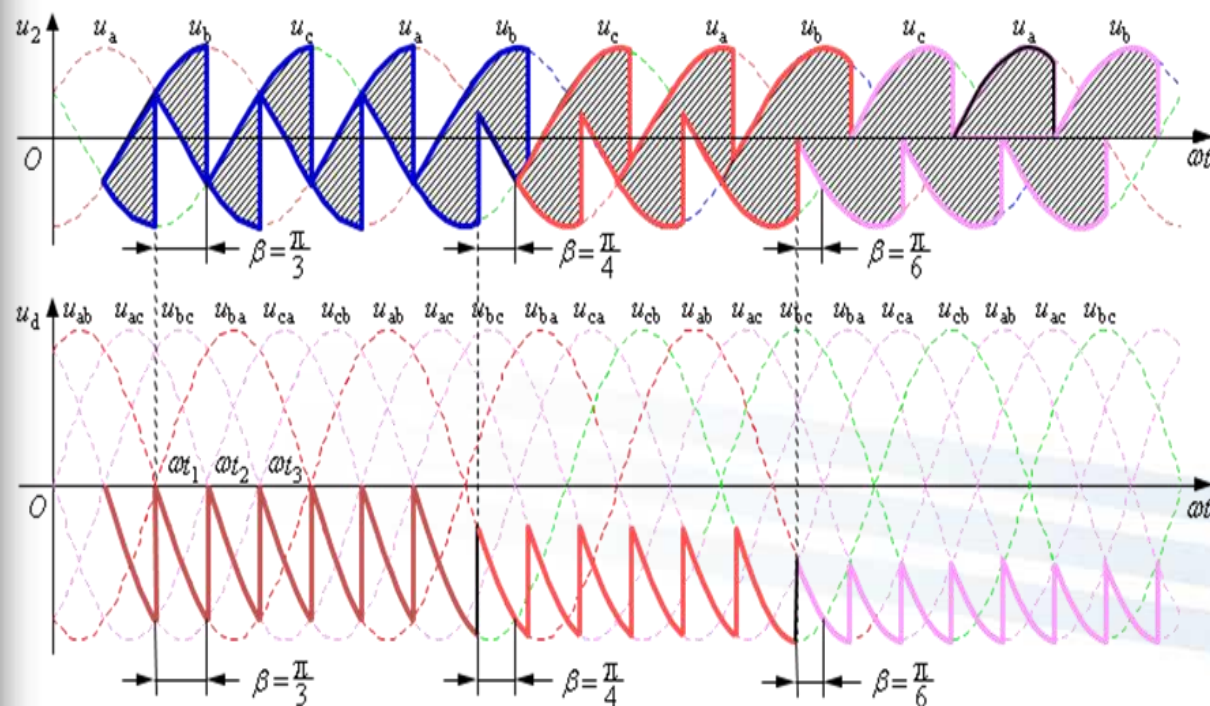


$$U_d = 1.35U \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \omega L I_d$$



# 高压直流输电原理

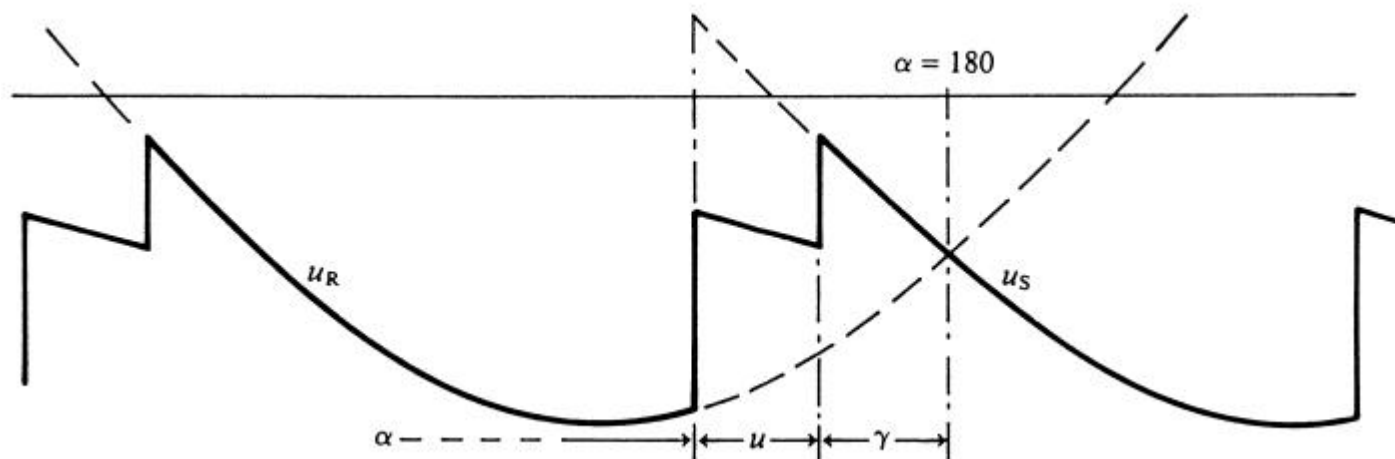
- 变流器工作在逆变状态是触发角 $\alpha$ 大于 $\pi/2$ ，通常把大于 $\pi/2$ 的控制角用 $\pi - \alpha = \beta$ 表示， $\beta$ 称为逆变角或超前角。





# 高压直流输电原理

- 熄弧角 $\gamma$

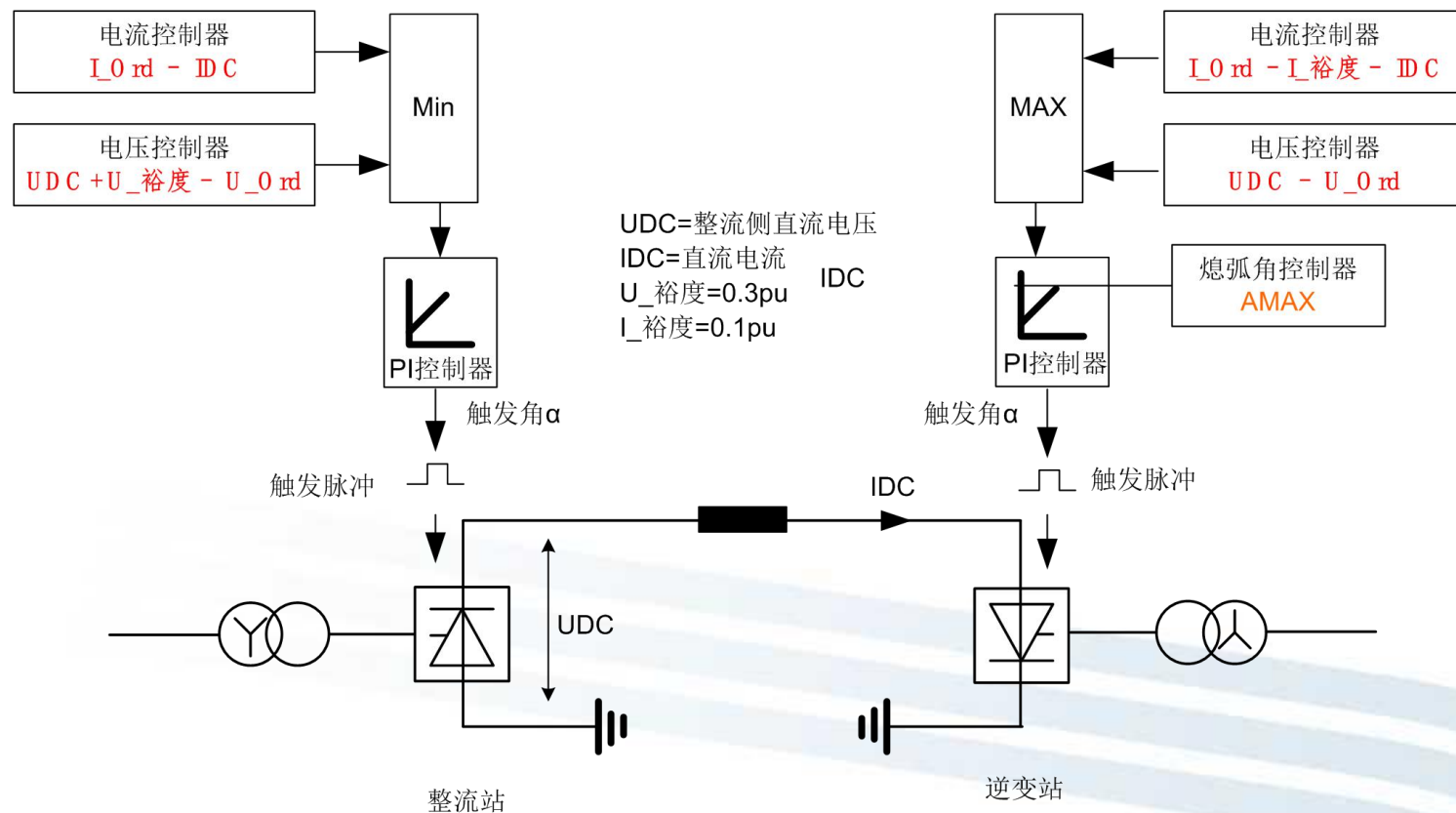


$$\alpha + \beta = \alpha + \mu + \gamma = \pi$$

$$U_d = 1.35U \cos \gamma - \frac{3}{\pi} \omega L I_d$$

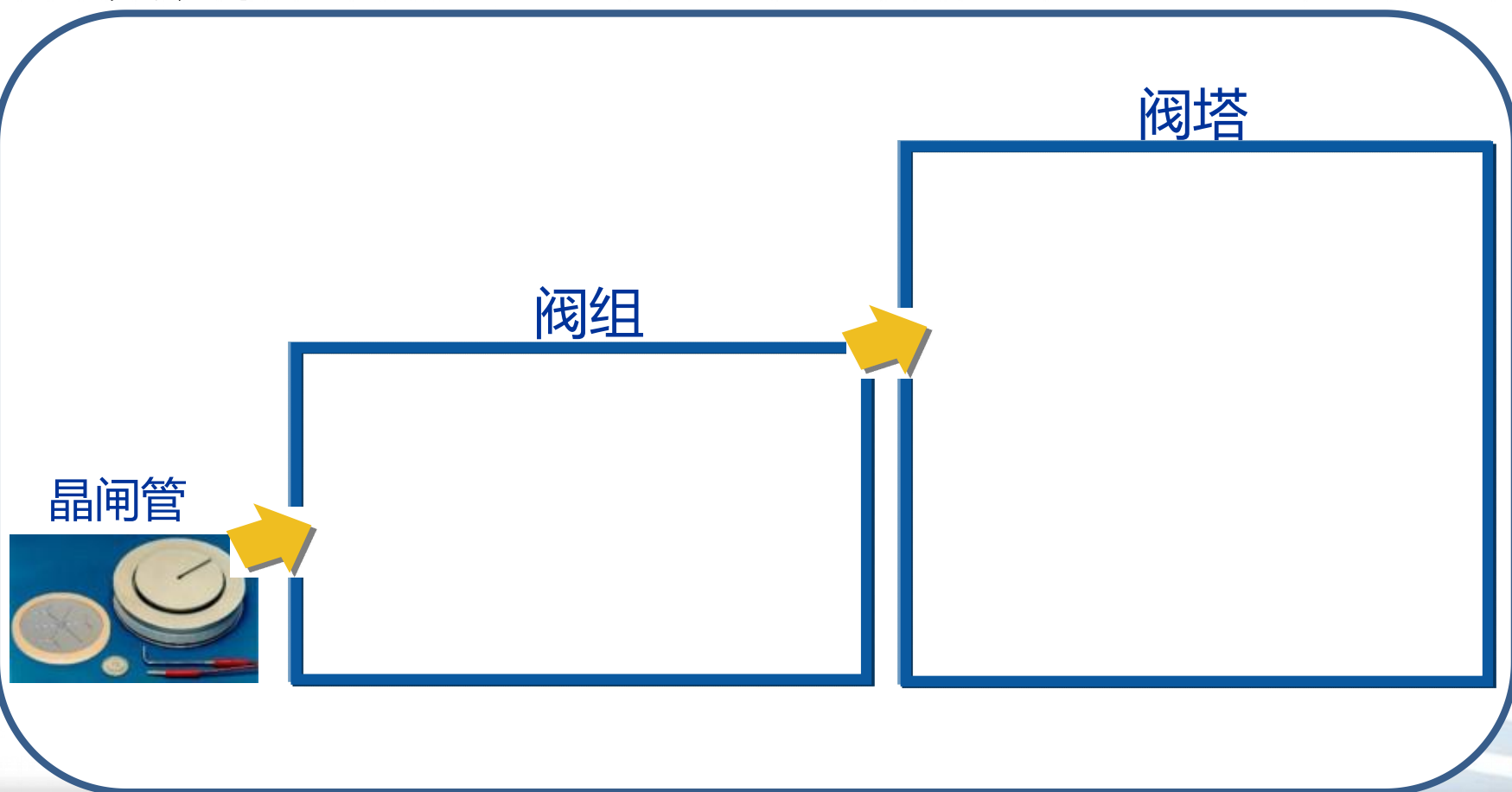
逆变侧同样存在换相阻抗，规定熄弧角 $\gamma = \beta - \mu$ ， $\mu$ 为逆变侧叠弧角。

# 高压直流输电原理



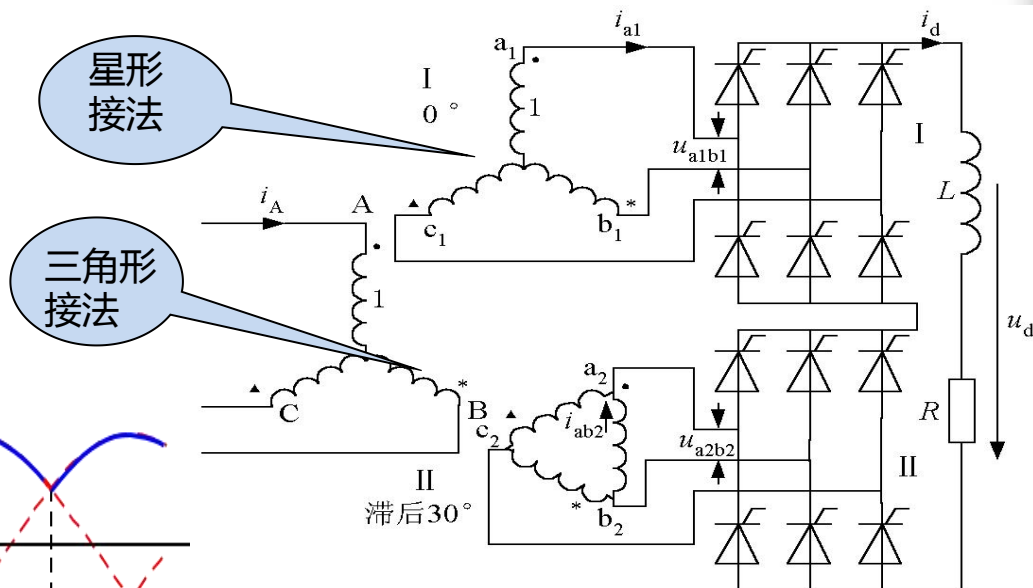
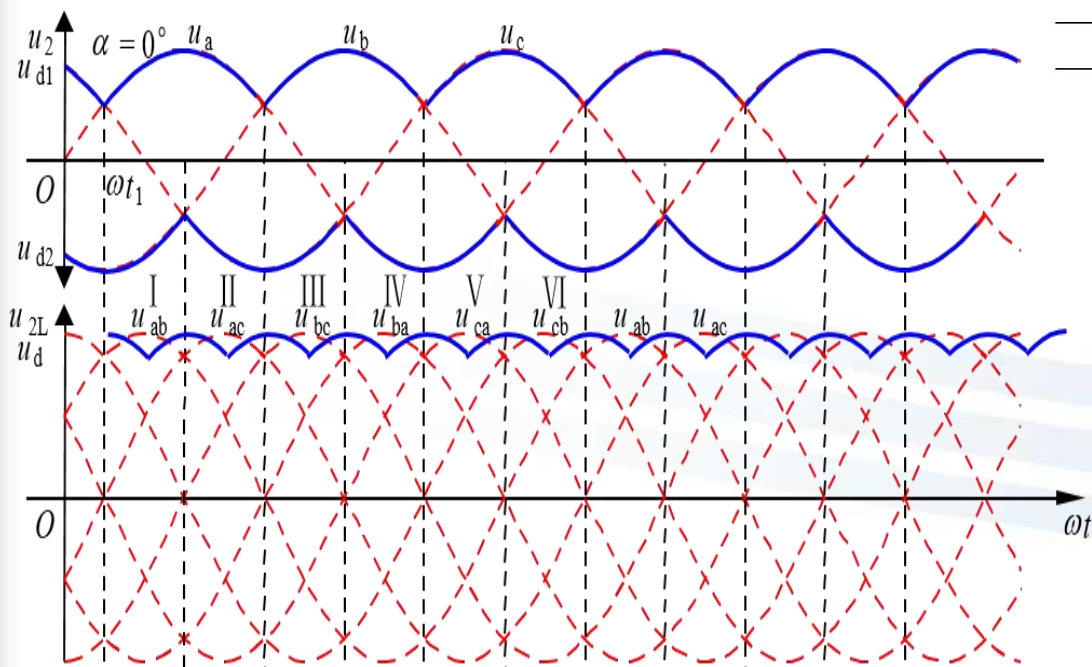
# 高压直流输电设备组成

- 换流阀



# 高压直流输电设备组成

## • 换流阀



- 减轻整流装置所产生的谐波
- 无功功率等对电网的干扰
- 减少交流侧输入电流谐波

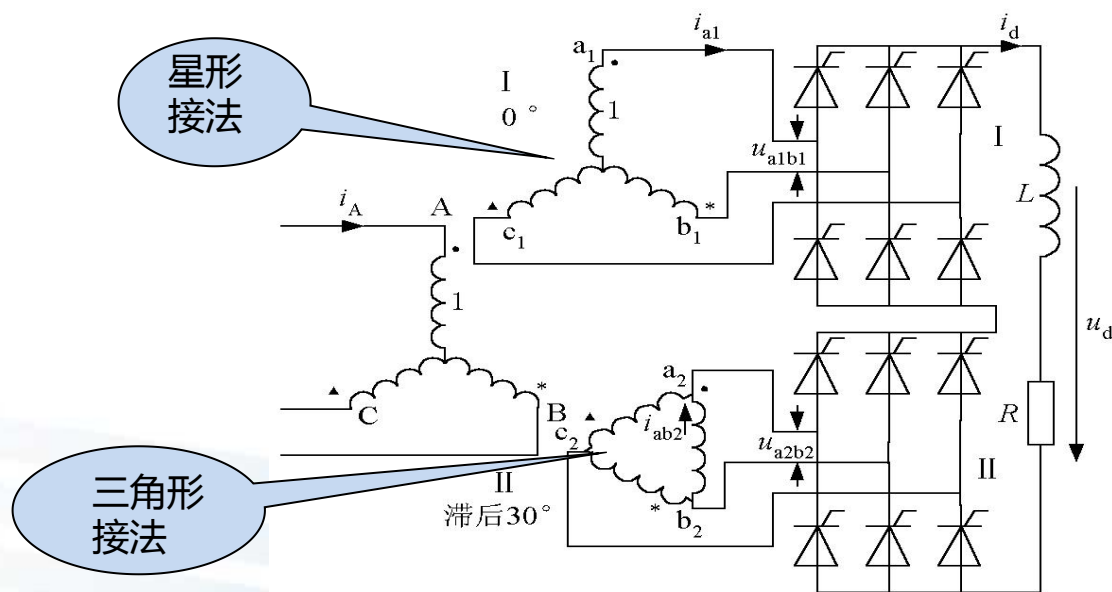


# 高压直流输电设备组成

- 换流变压器

- 相位变换
- 电压变换
- 电气隔离
- 有载调压

- 控制触发角  
(熄弧角) 在一定范围



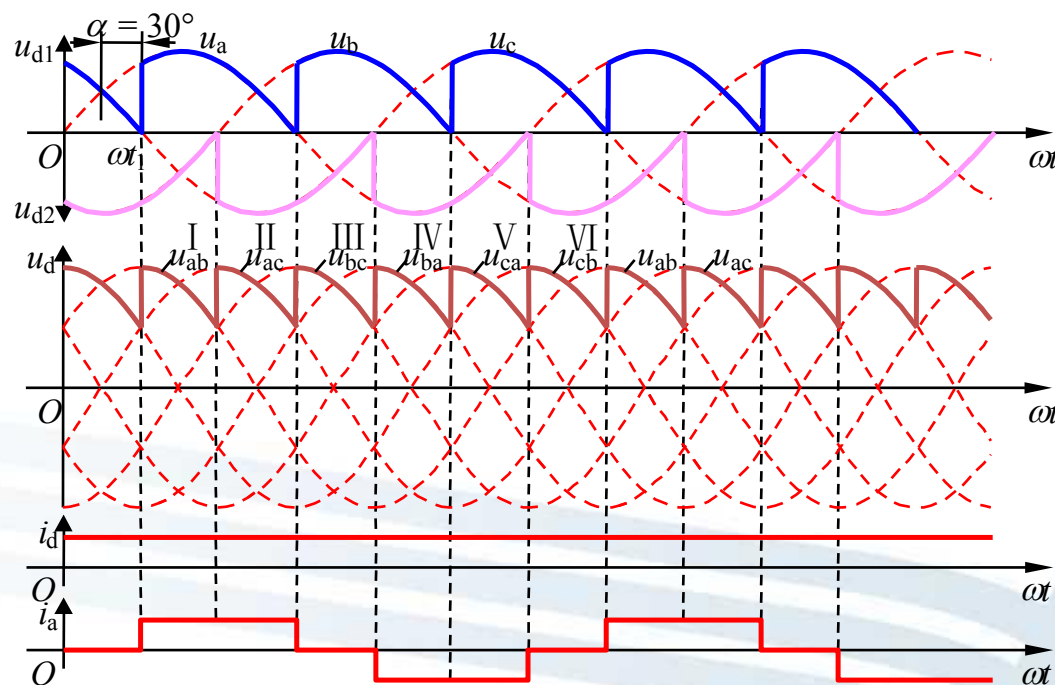
# 高压直流输电设备组成

- 换流变压器



# 高压直流输电设备组成

- 平波电抗器
  - 与直流滤波器组合滤波
  - 抑制陡波电流
  - 避免电流断续
  - 降低换相失败率
- 直流滤波器
  - 滤除直流纹波
- 交流滤波器
  - 滤除交流谐波
  - 无功补偿





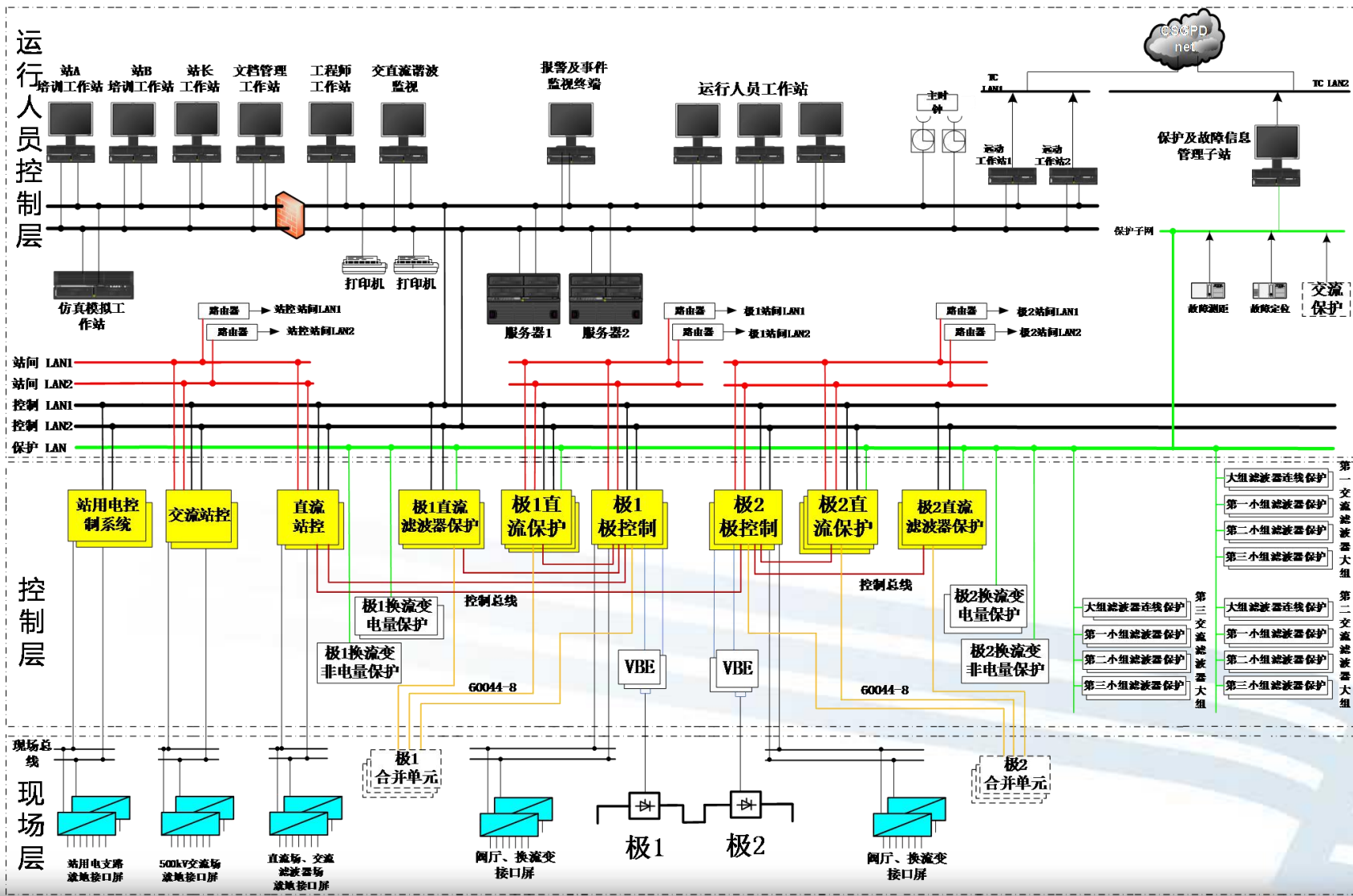
# 高压直流输电设备组成

- 平波电抗器+交直流滤波器



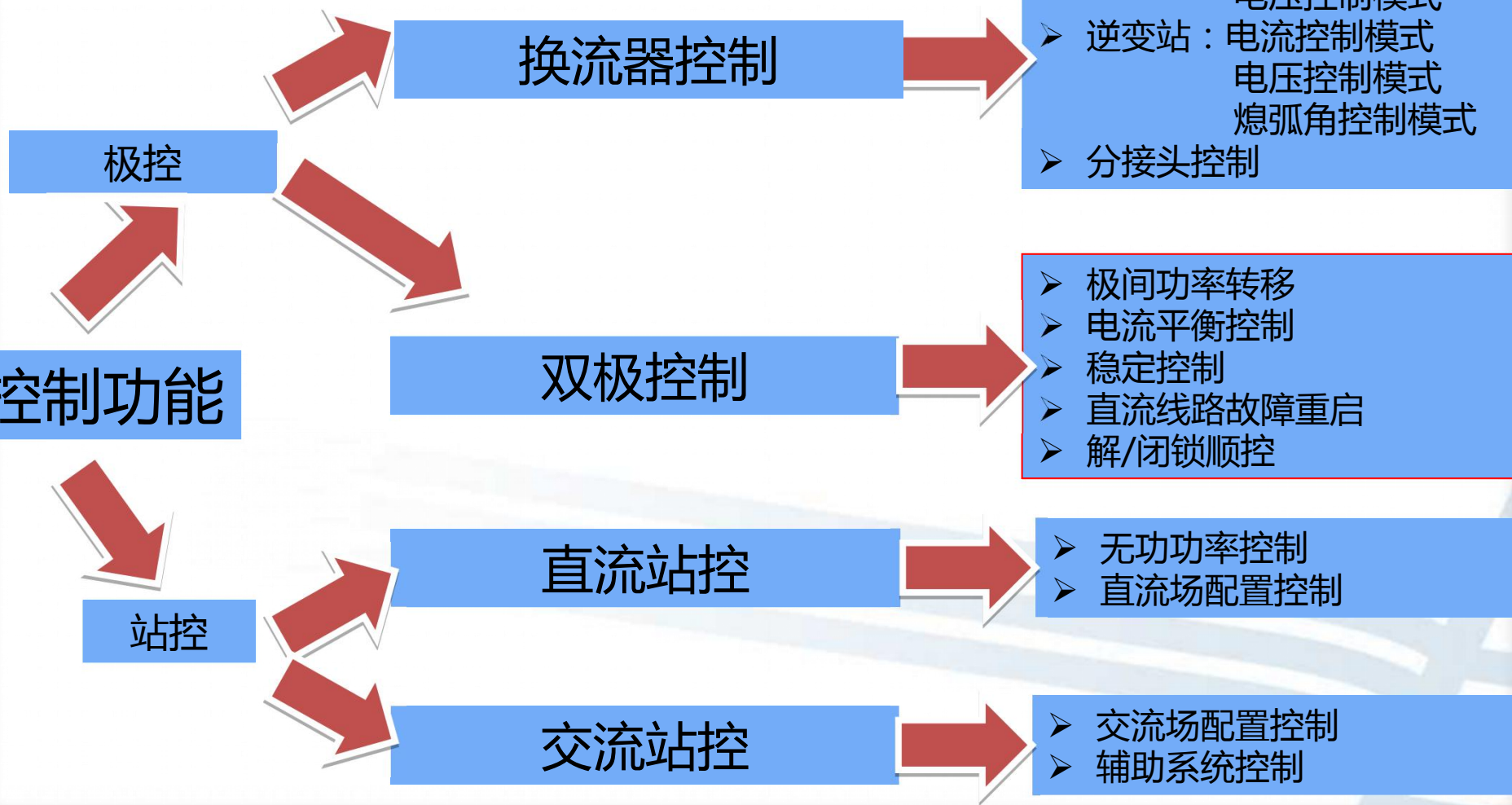


# 高压直流输电设备组成



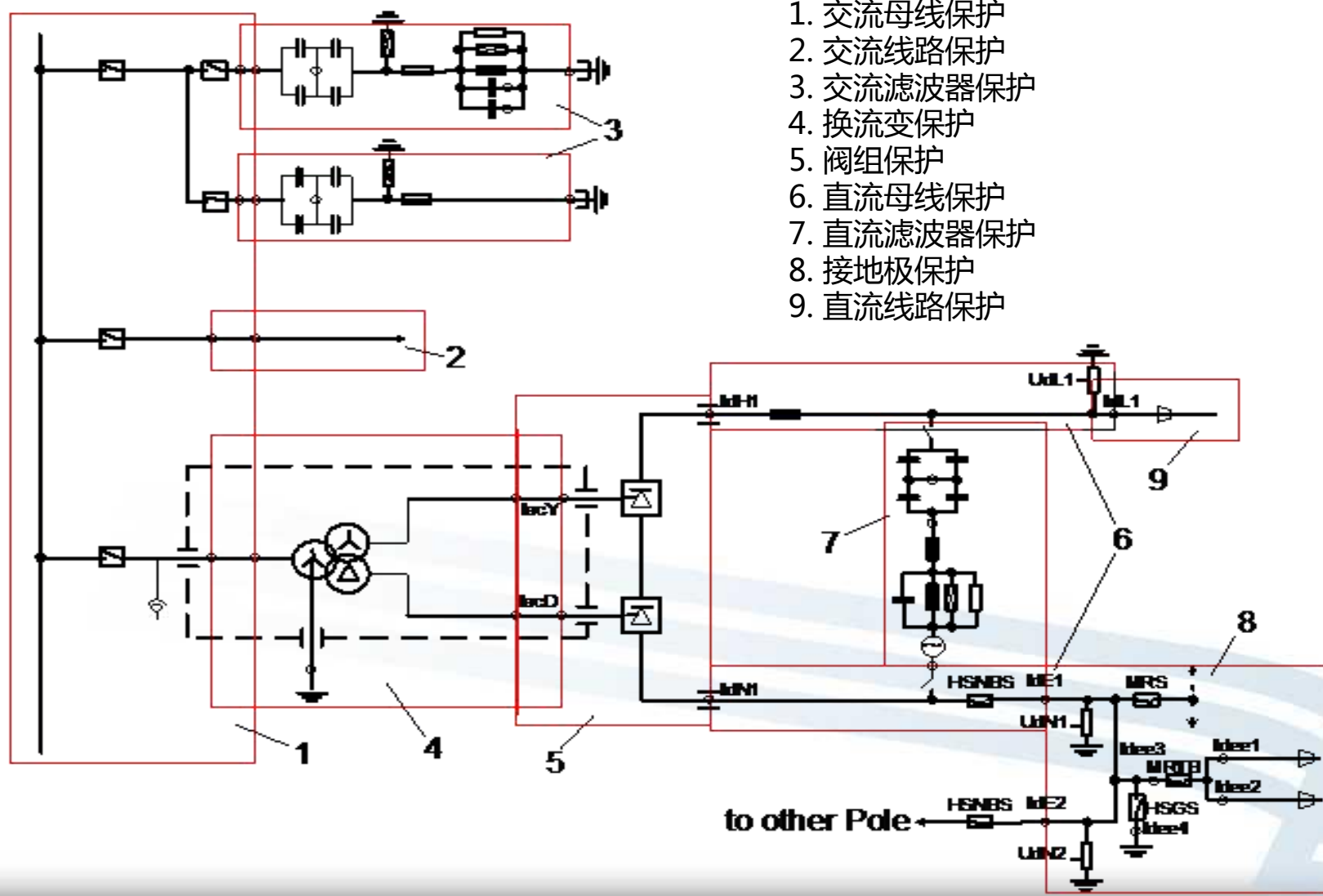
# 高压直流输电设备组成

控制功能

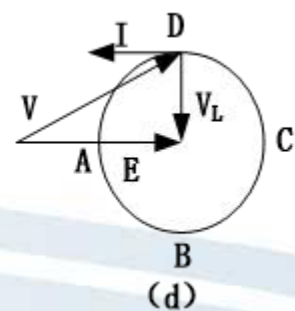
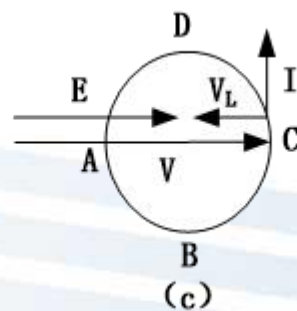
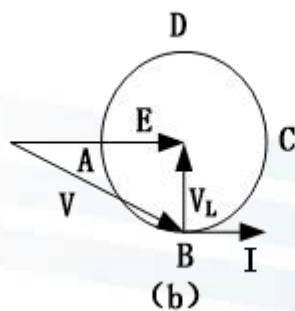
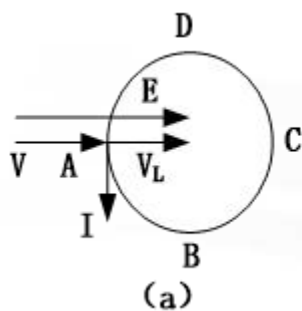
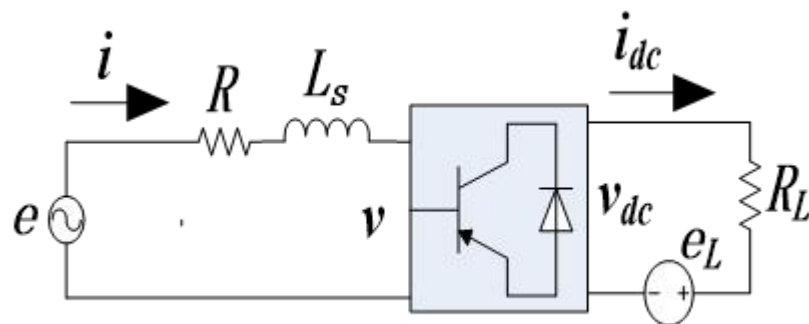


# 高压直流输电设备组成

## 保护功能



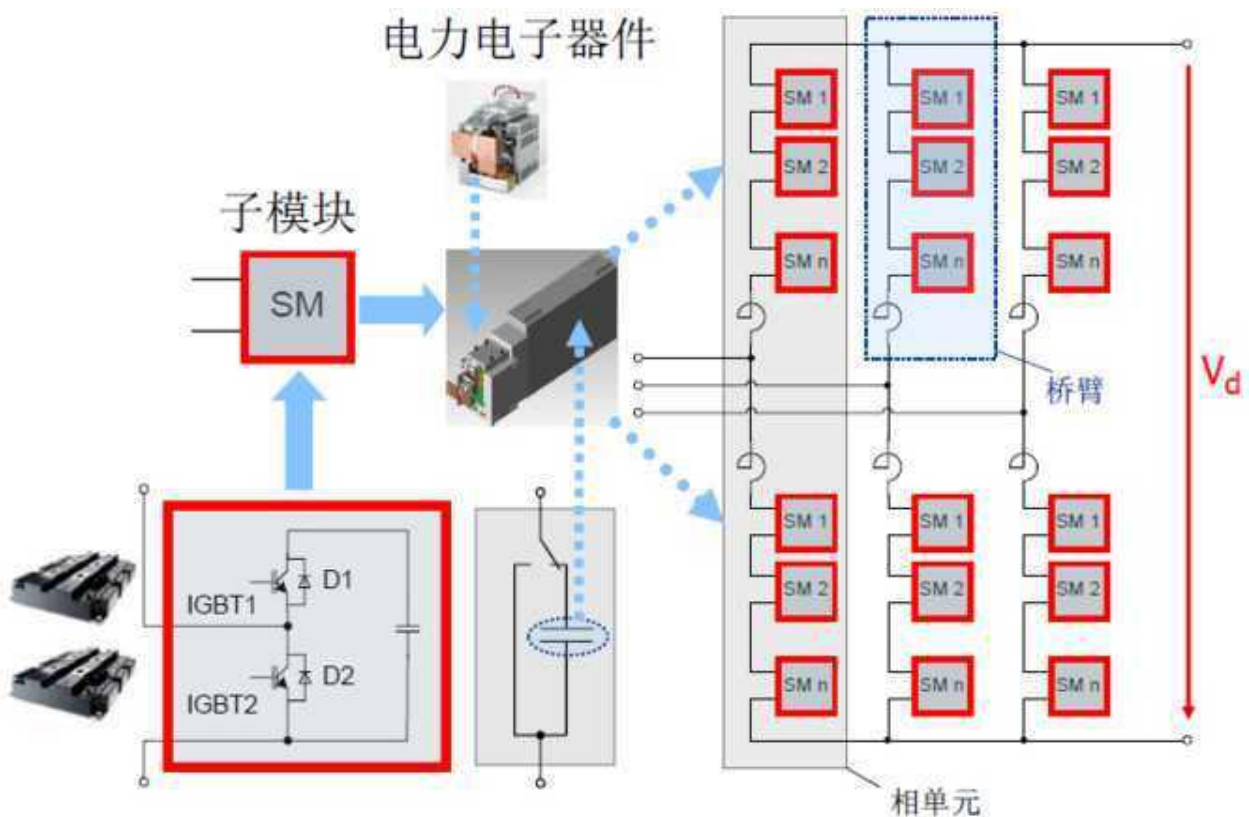
# 柔性直流输电原理





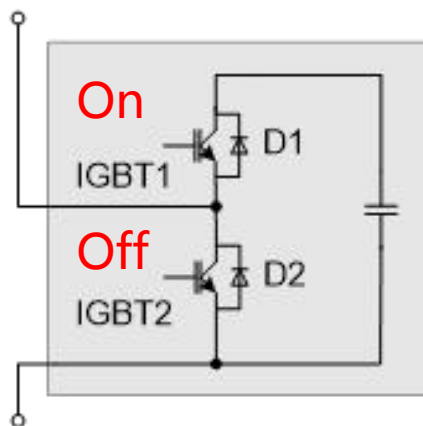
# 柔性直流输电原理

- MMC (Modular Multilevel Converter) 柔性直流输电拓扑

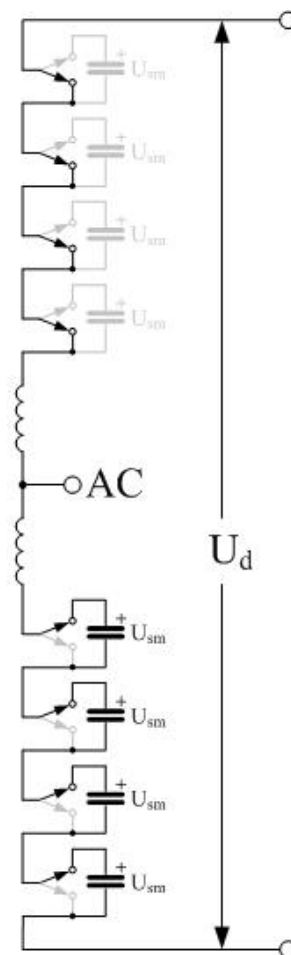
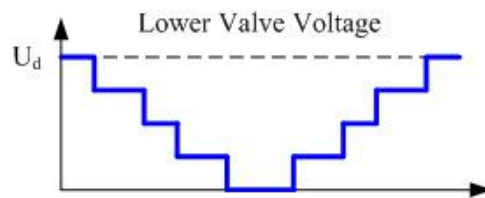
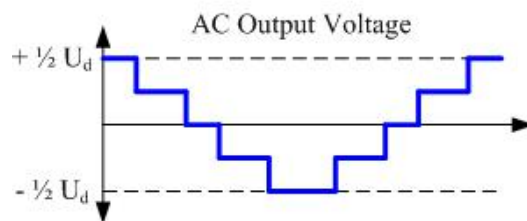
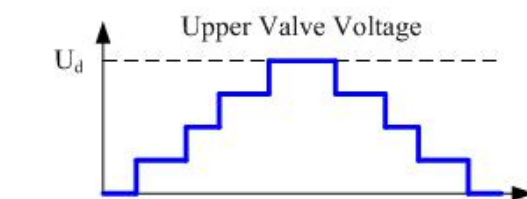
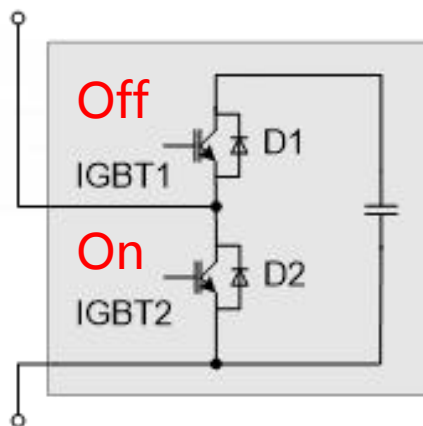


# 柔性直流输电原理

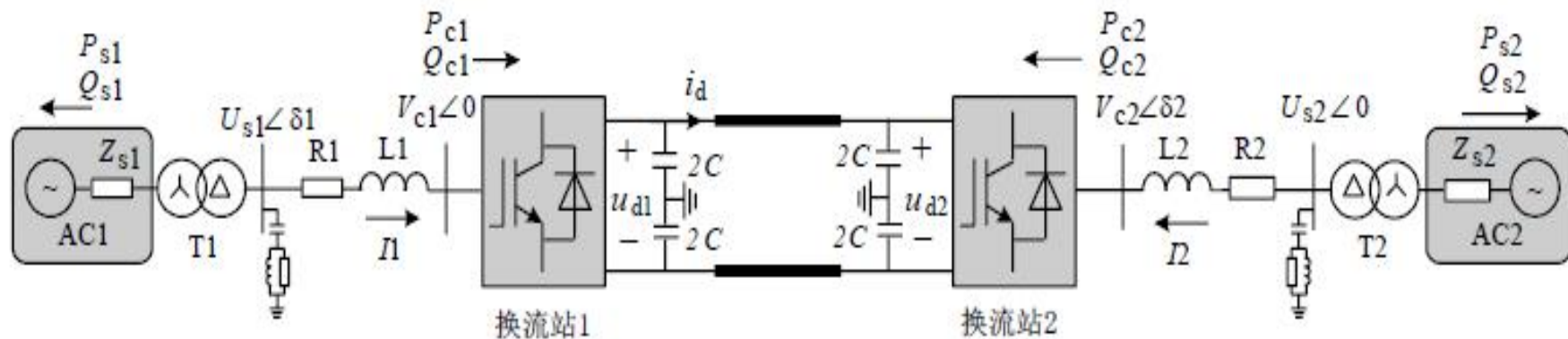
投入



切除



# 柔性直流输电原理



## VSC-HVDC关键设备

- 换流器:电压源型结构,可关断型器件采用的是IGBT
- 直流侧电容: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
- 换流电抗器:VSC与交流系统能量交换的纽带,同时又起到滤波功能
- 交流滤波器:采用高通滤波器结构,用于减少交流电压谐波
- 换流变压器:实现交流系统与直流系统的电压匹配与零序分量隔离

# 目录



I、直流输电发展情况

II、直流输电原理及设备组成

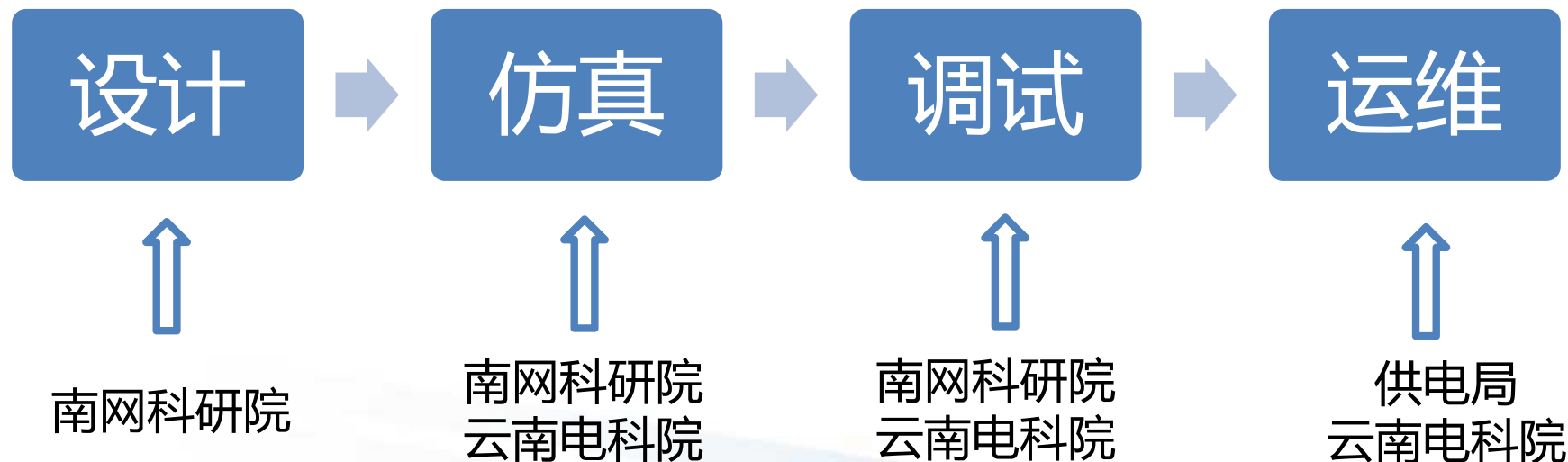


**III、直流输电仿真试验平台**

IV、直流输电调试技术



# 直流输电仿真试验平台



# 直流输电仿真试验平台

仿真试验的目的是对直流控制保护系统的功能和性能进行验证和完善。

- FPT

( Functional Performance Test , 功能性能试验 ) :

顺序控制、交流滤波器充电、换流变充电、OLT、解闭锁、控制模式切换、无功控制、稳态性能、功率升降、稳控功能、跳闸、过负荷、故障模拟等功能性试验。

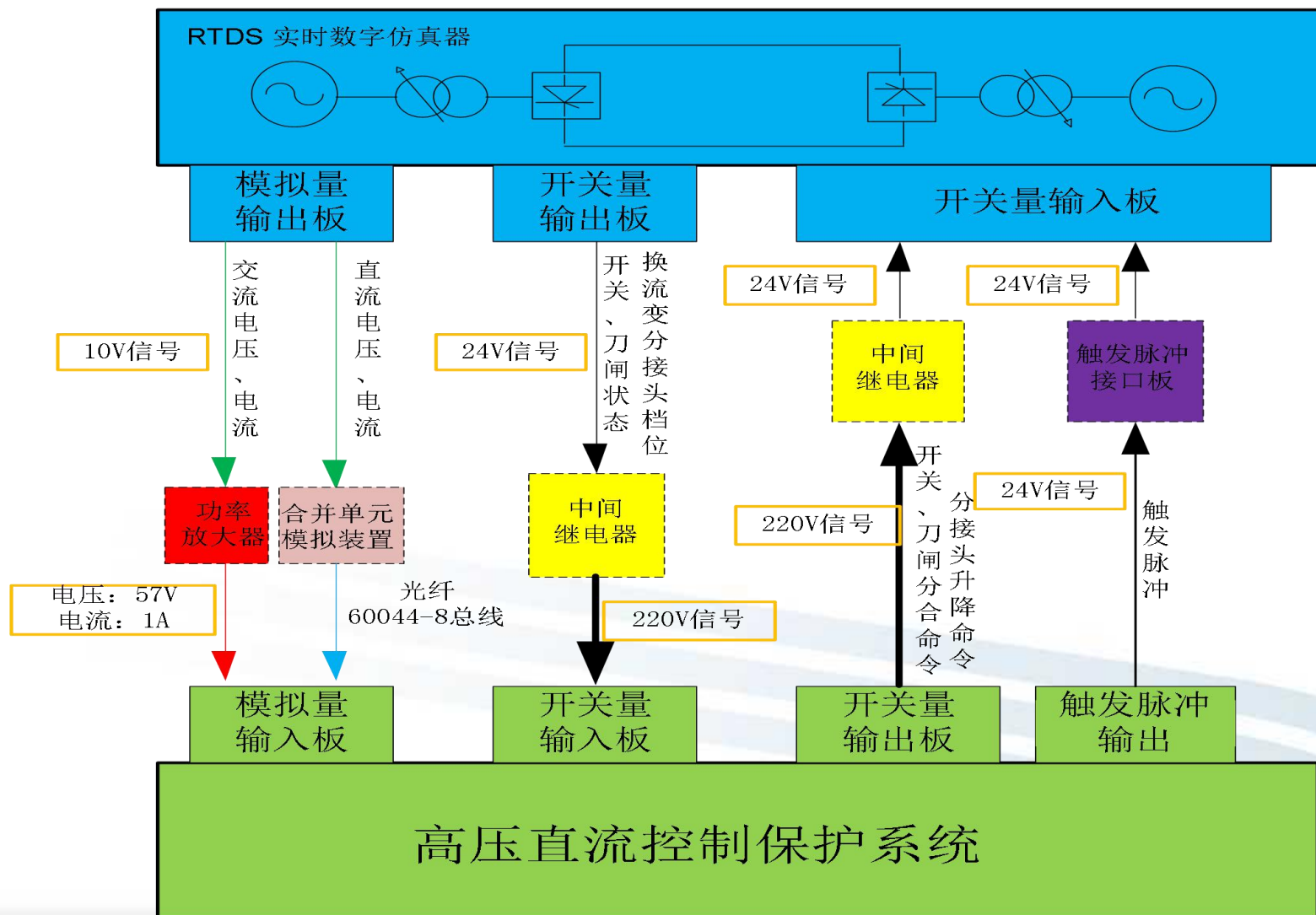
- DPT

( Dynamic Performance Test , 动态性能试验 ) :

交流滤波器和换流变充电、阶跃响应、交流故障、直流保护等试验，主要验证控保系统的动态响应性能。

需要大电网模型，在南网科研院开展

# 直流输电仿真试验平台



# 直流输电仿真试验平台





# 直流输电仿真试验平台



名称

永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第1期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第2期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第3期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第4期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第5期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第6期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第7期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第8期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第9期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第10期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第11期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第12期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第13期.pdf
永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报_第14期.pdf



# 直流输电仿真试验平台

## DPT预试验工作成果

### 试验

• 348项

### 报告

• 348份

### 问题

• 19个

### 周报

• 27份

序号	试验描述	功率水平	运行方式	输电方式	直流输电系统	直流输电系统	通信
<b>一、直流控制试验</b>							
<b>1. 换流器控制</b>							
1.01	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.02	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.03	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.04	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.05	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.06	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.07	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.08	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.09	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.10	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.11	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.12	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.13	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.14	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
1.15	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
<b>二、交流系统仿真</b>							
2.01	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
2.02	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
2.03	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
<b>三、换流器控制</b>							
3.01	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
3.02	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常



序号	试验描述	功率水平	运行方式	输电方式	直流输电系统	直流输电系统	通信
4.01	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.02	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.03	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.04	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.05	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.06	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.07	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.08	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.09	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.10	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.11	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.12	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.13	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.14	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常
4.15	换流器启动试验（手动启动）（两站）	10.0V	正常	正常	24.0V	9.00V	正常

名称

- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第1期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第2期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第3期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第4期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第5期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第6期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第7期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第8期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第9期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第10期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第11期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第12期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第13期.pdf
- 永富直流工程控制保护系统FPT试验工作周报-第14期.pdf

# 目录



I、直流输电发展情况

II、直流输电原理及设备组成

III、直流输电仿真试验平台



IV、直流输电调试技术



# 直流输电调试技术

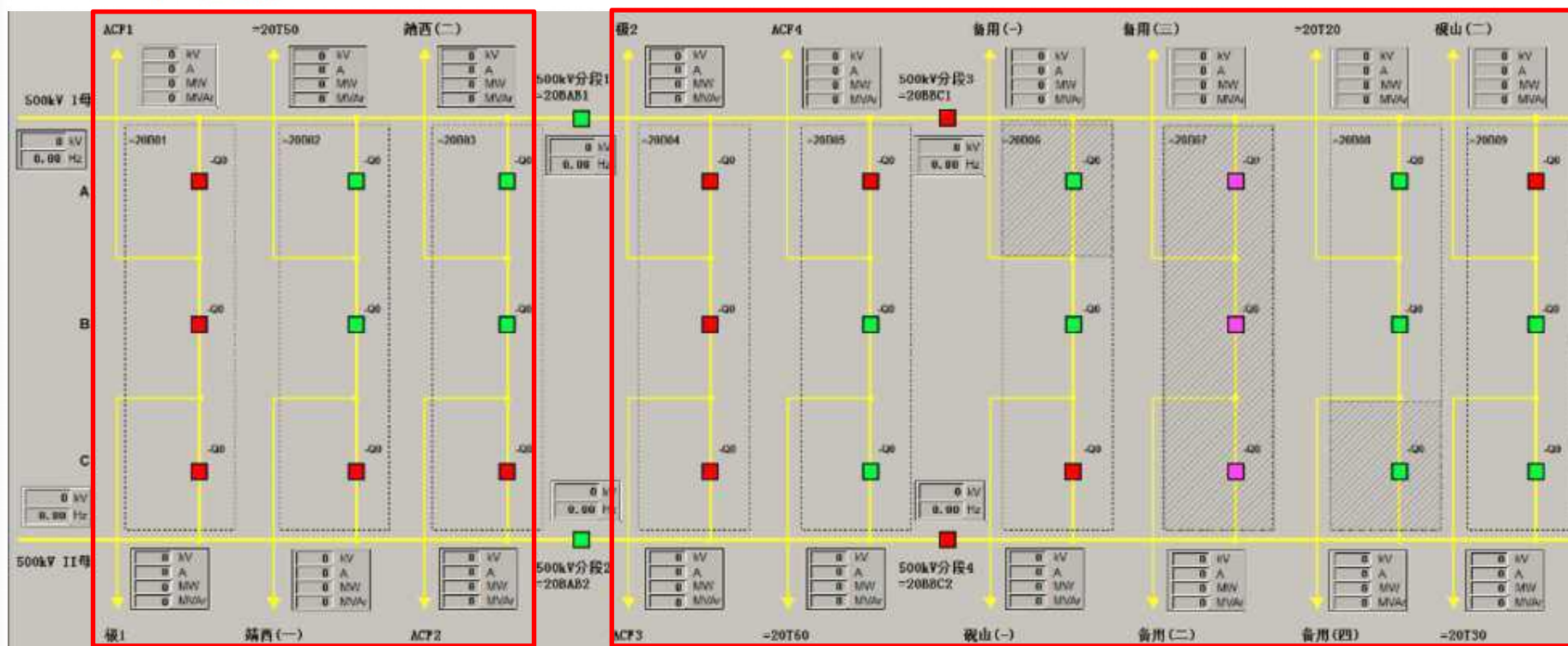


# 直流输电调试技术

- 第一条省内直流输电工程
- 第一条配置了STATCOM的直流输电工程
  - 3套100Mvar的STATCOM作为动态无功支撑
- 第一条可以分送的直流工程

# 直流输电调试技术

## 富宁换流站交流场连接方式 广西侧



云南侧



# 直流输电调试技术

## 鲁西背靠背工程

- 世界上第一次采用了常规和柔直单元的并联运行模式
- 常规直流单元本期1000MW远景2000MW
- 柔直单元额定容量1000MW
- 直流电压 $\pm 350\text{kV}$
- 电压和容量目前为止都是世界最高水平的





# 直流输电调试技术

## 一次设备

- 出厂监造
- 高压试验
- 计量试验
- 金化试验

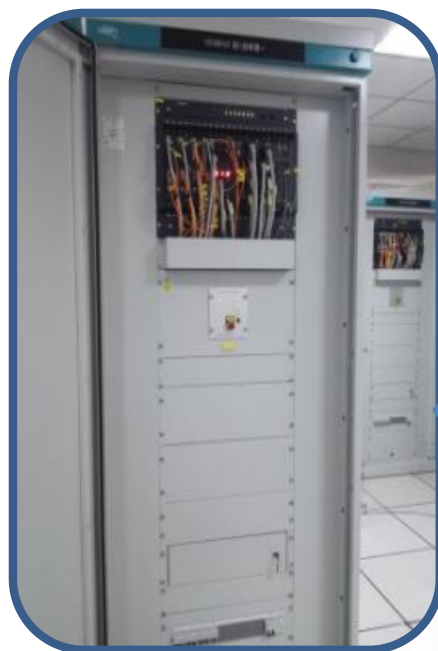
## 二次设备

- 保护装置测试
- 自动化装置测试
- 通信系统测试
- 辅助系统测试

## 系统试验

- 换流变充电
- 滤波器充电
- 单极站系统试验
- 端对端系统试验
- 稳控功能试验
- 系统短路故障试验

# 直流输电调试技术



极控系统

断路器位置、触发脉冲释放、电触发脉冲信号



电流过零信号、VBE状态信息

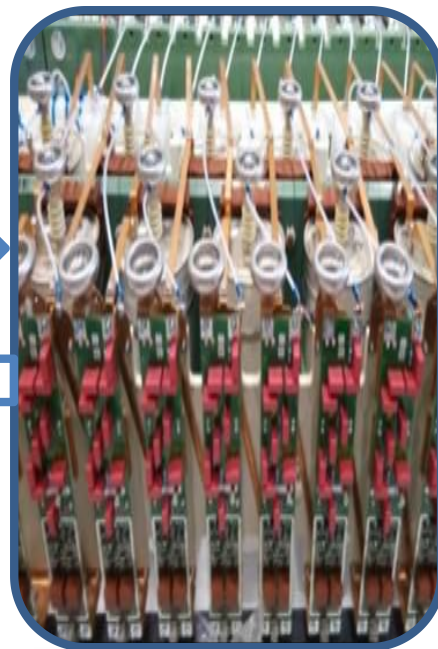


VBE系统

光触发脉冲、巡检脉冲



不同脉宽的光回报信号



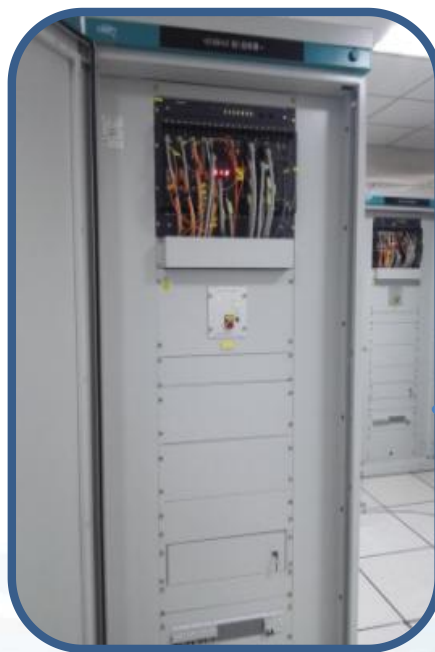
换流阀

# 直流输电调试技术

## • FCS信号丢失导致跳闸

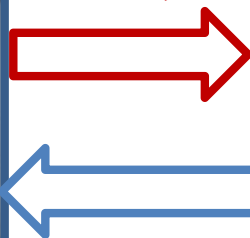
事件	从 (B)	1090690	站用电控制系统	11F100+11 极 1 直流300V直流屏-1 直流屏故障
事件	从 (A)	1039982	极 2 极控系统	YBE Y2 星网FCS 信号丢失
事件	从 (A)	1039999	极 2 极控系统	YBE A6 机箱 YBE 故障
事件	从 (A)	1037982	极 2 极控系统	YBE D6 星网FCS 信号丢失
事件	从 (A)	1037999	极 2 极控系统	YBE A2 机箱 YBE 故障
事件	主 (B)	1037481	极 2 极控系统	YBE D1 星网FCS 信号丢失
事件	主 (B)	1037499	极 2 极控系统	YBE A1 机箱 YBE 故障
事件	从 (A)	1034676	极 2 极控系统	换流变进线断路器闭合
事件	从 (A)	1034677	极 2 极控系统	换流变进线断路器打开
事件	主 (B)	1034676	极 2 极控系统	换流变进线断路器闭合
事件	主 (B)	1034677	极 2 极控系统	换流变进线断路器打开
事件	从 (A)	1034937	极 2 极控系统	本系统为主
事件	从 (A)	1034938	极 2 极控系统	本系统为从
事件	主 (B)	1034938	极 2 极控系统	冗余系统故障
事件	从 (A)	1034938	极 2 极控系统	本系统为从
事件	主 (B)	1034937	极 2 极控系统	本系统为主
事件	主 (A)	1091090	站用电控制系统	12V10+12/极 2 VBE 屏 系统 1 故障
事件	从 (B)	1091090	站用电控制系统	12V10+12/极 2 VBE 屏 系统 1 故障

换流变进线断路器闭合后60-70ms左右，VBE A、B系统都产生了FCS丢失信号，导致极控切换逻辑跳闸，问题的关键在于极控释放触发脉冲和VBE系统检测FCS信号时序应如何配合？



极控系统

电触发脉冲信号  
FCS丢失

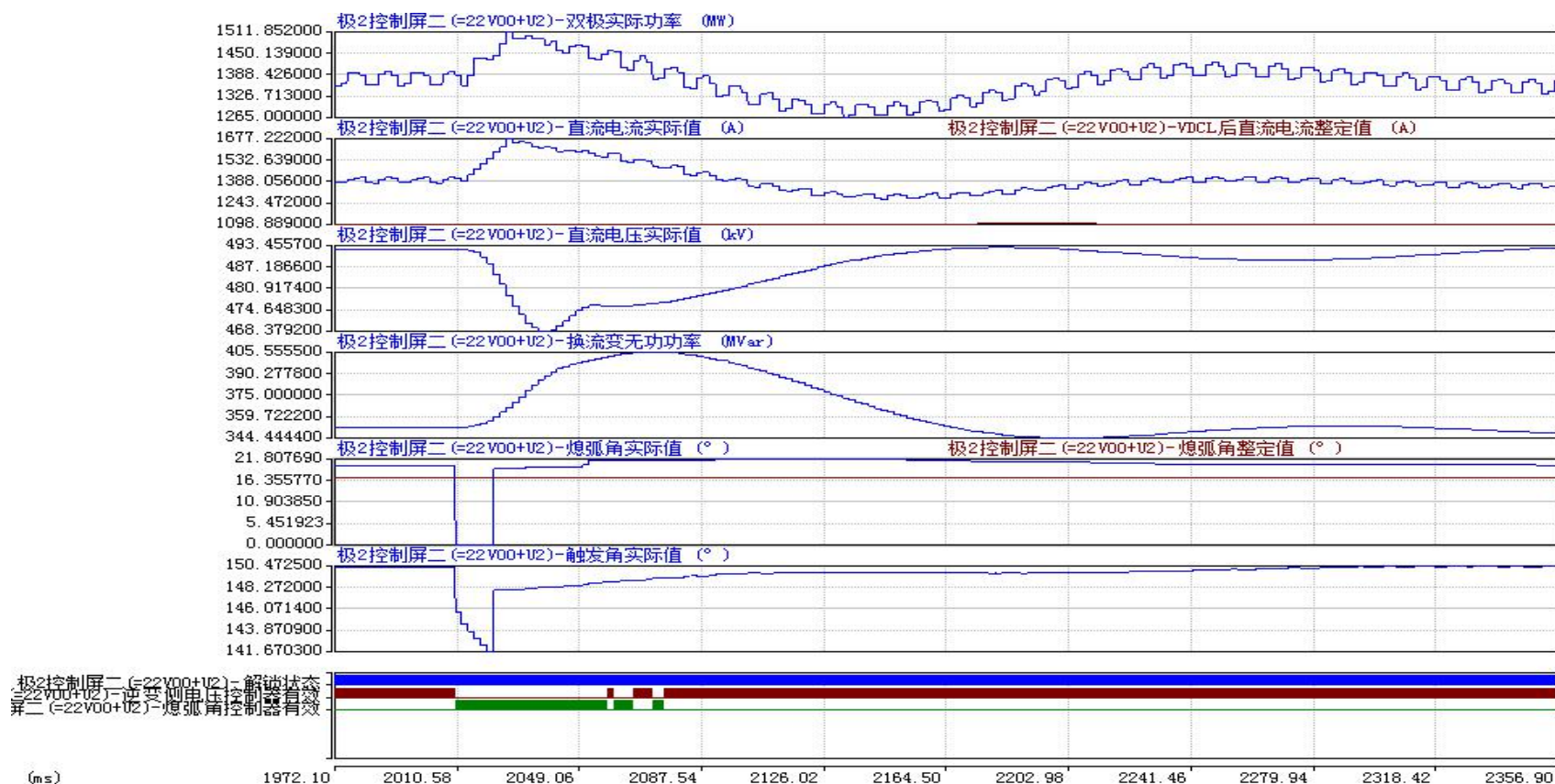


VBE系统



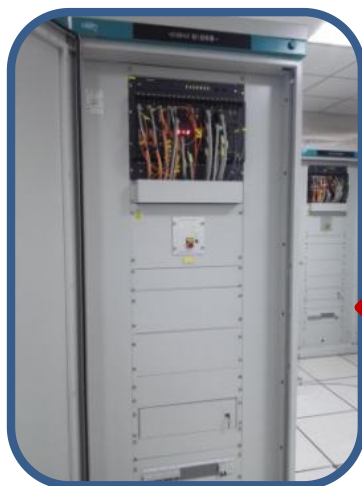
# 直流输电调试技术

## • 熄弧角突变导致功率波动

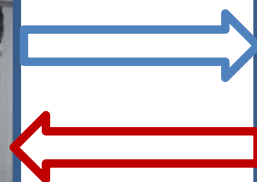




# 直流输电调试技术



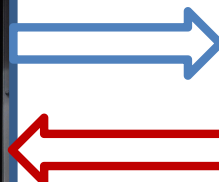
极控系统



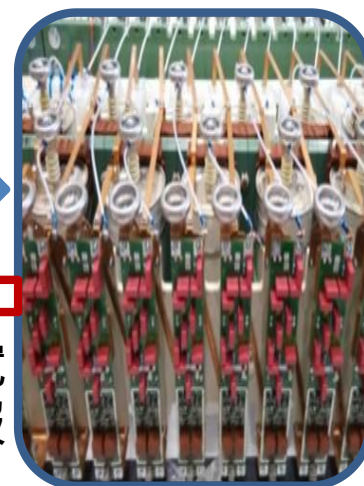
电流过  
零信号



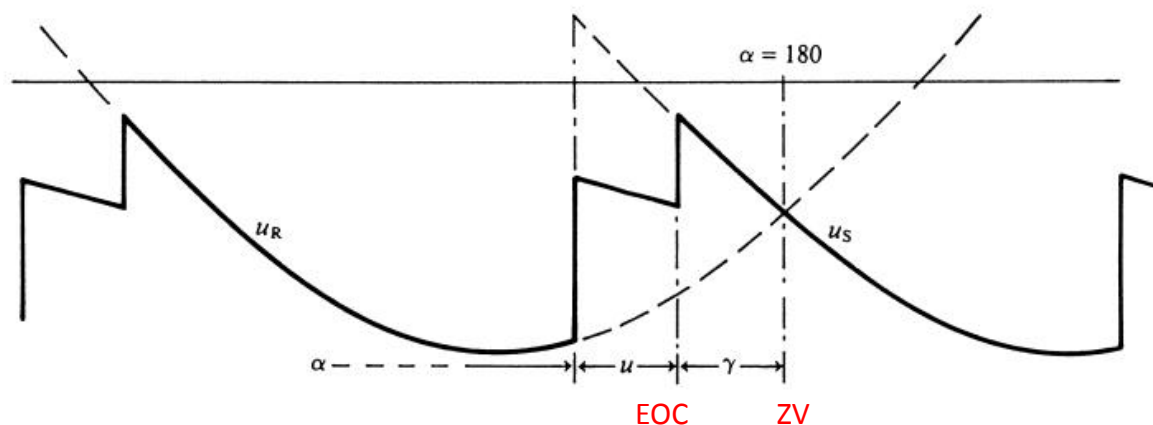
VBE系统



不同脉宽  
的光回报  
信号



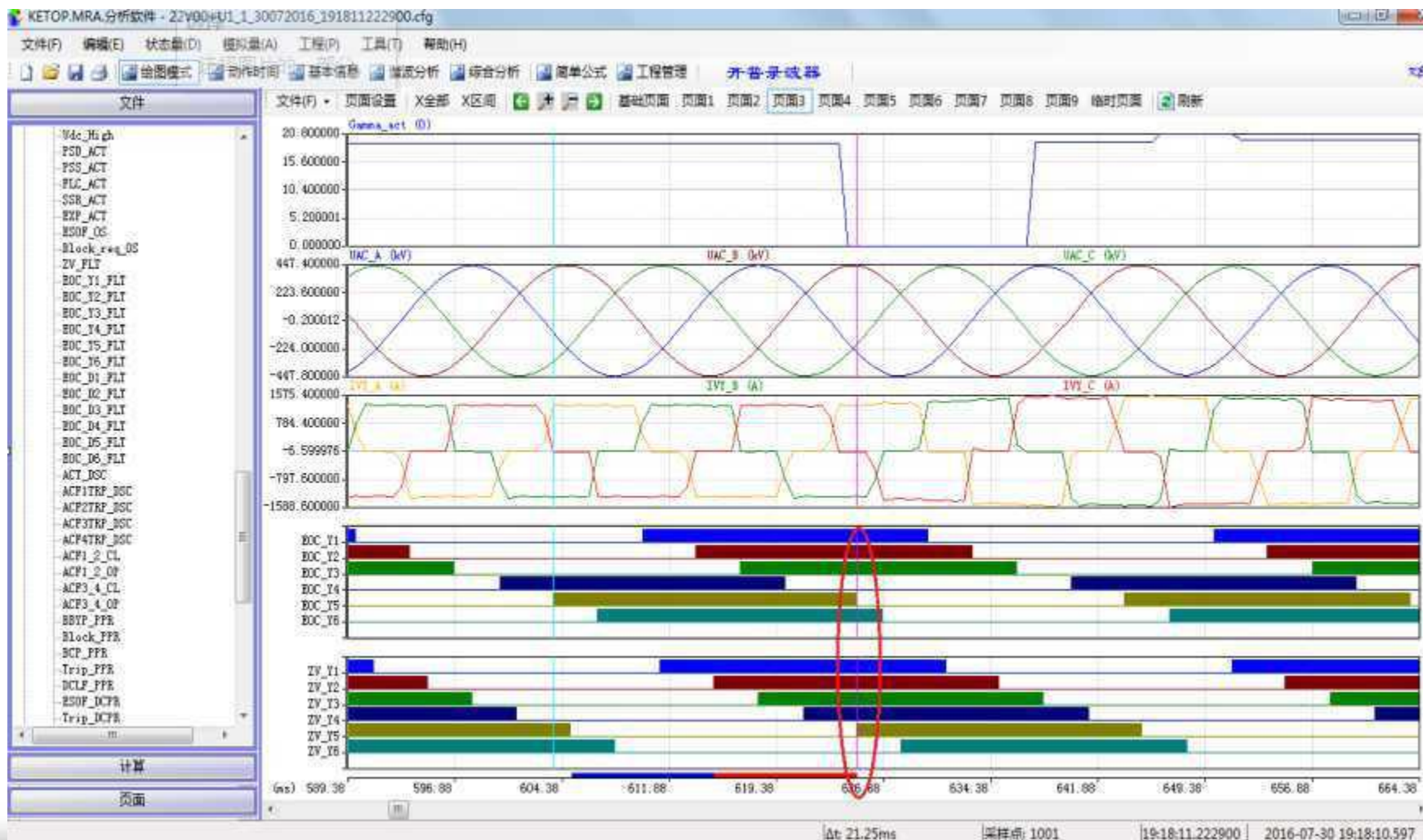
换流阀



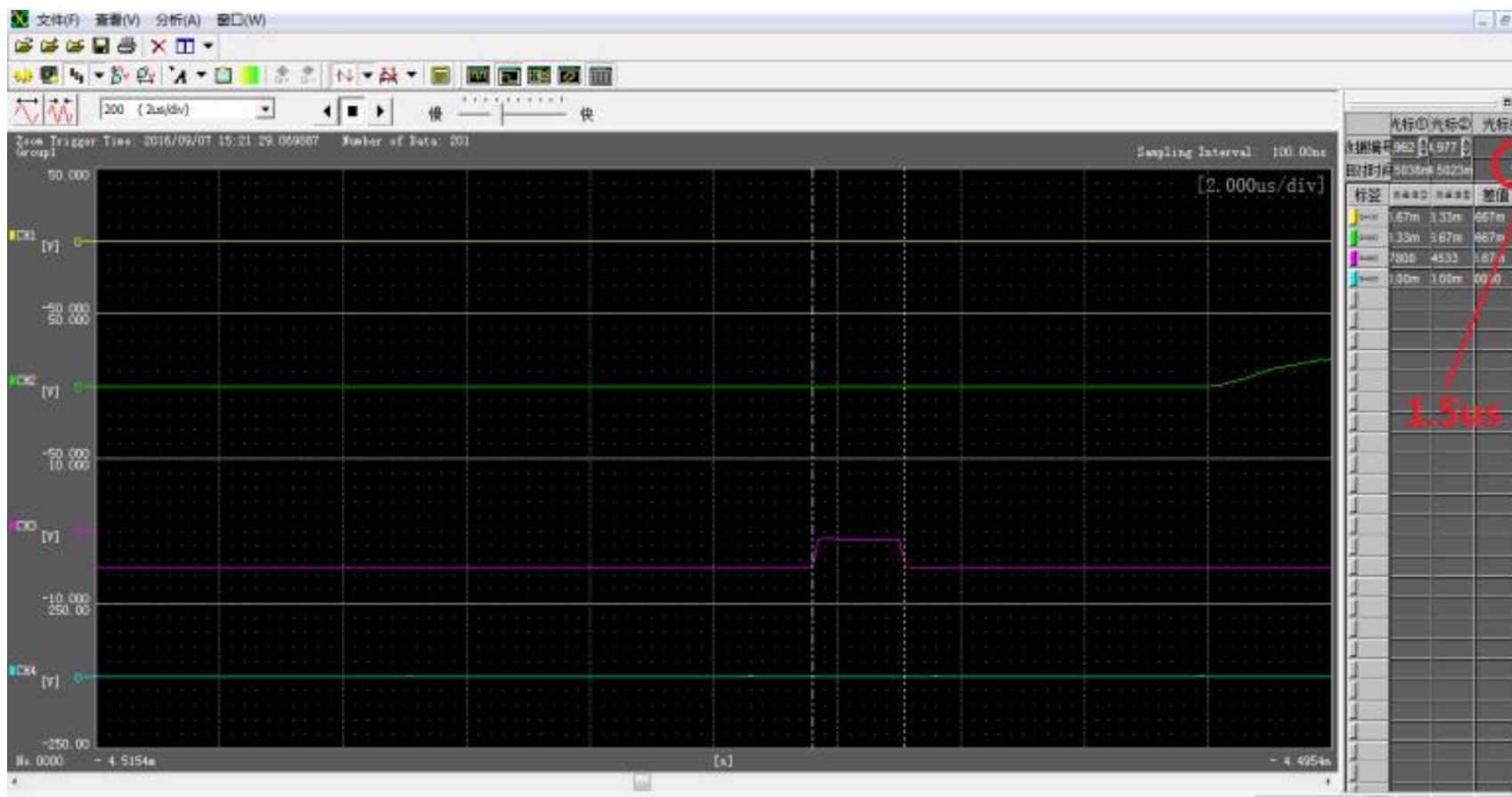
$$\gamma = \frac{(t_{eoc} - t_{zv})}{20} * 360$$

# 直流输电调试技术

极控系统接收到Y4 EOC信号延时了1.25ms，导致熄弧角计算值为0



进一步对TVM发回光接收板的负电压建立脉冲进行监测，发现TVM回报的负电压建立脉冲脉宽只有约 $1.5\ \mu\text{s}$ 。导致VBE无法准确识别该信号，从而引起了EOC信号延时，最终引起了熄弧角突变功率波动。





# 直流输电调试技术

仿真试验  
能力

调试能力

运行维护  
故障分析  
能力



谢谢！