

高压直流断路器技术及应用

周万迪

直流输电技术研究所

2024.06



一、高压直流断路器概述

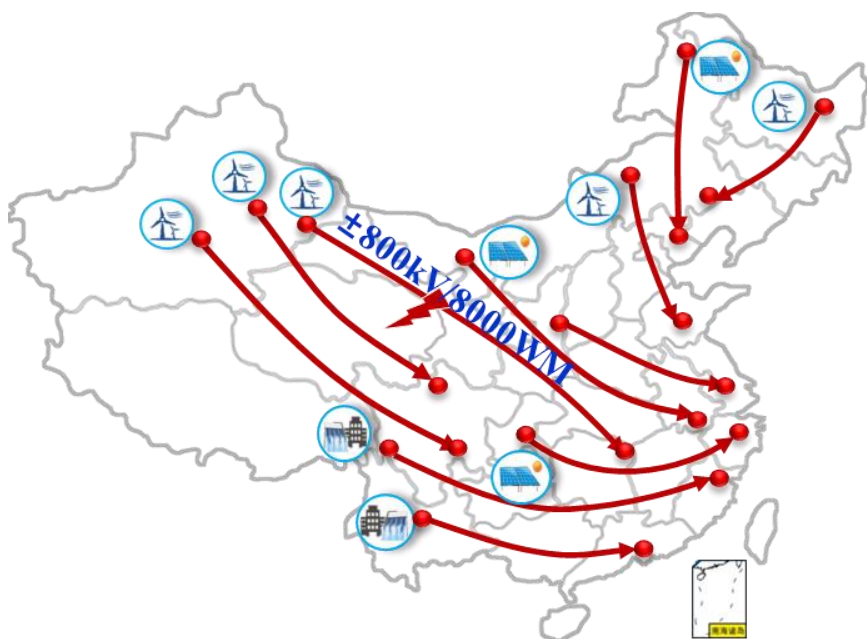
二、混合式直流断路器研制

三、混合式直流断路器应用

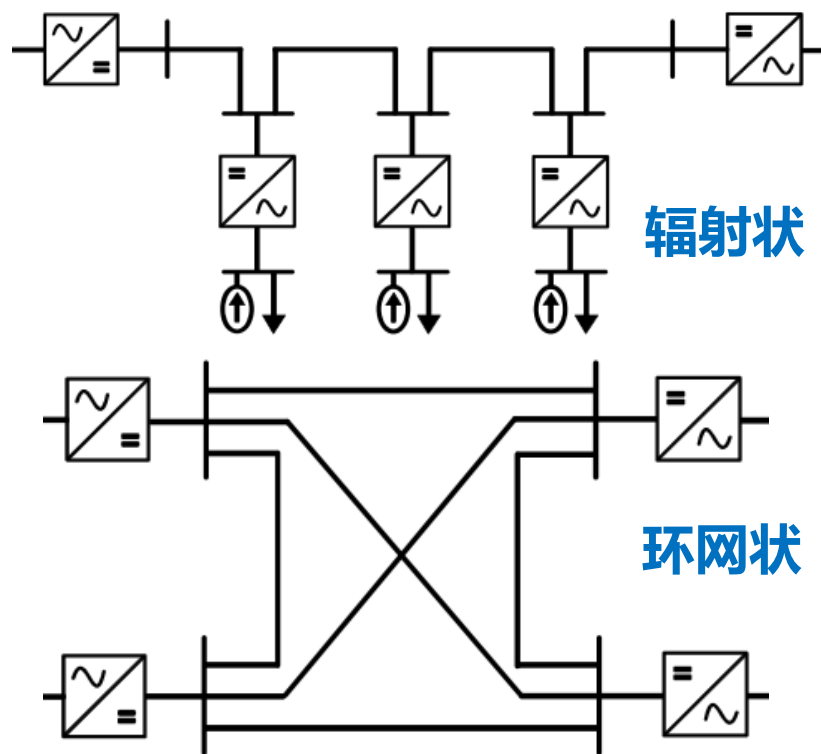
四、发展需求与最新进展

1.1 技术背景

- “端对端” 直流输电线路一旦故障，传输功率中断
- 构建多电源、多落点的直流电网需要高压直流断路器



我国建成直流工程 (约30条)

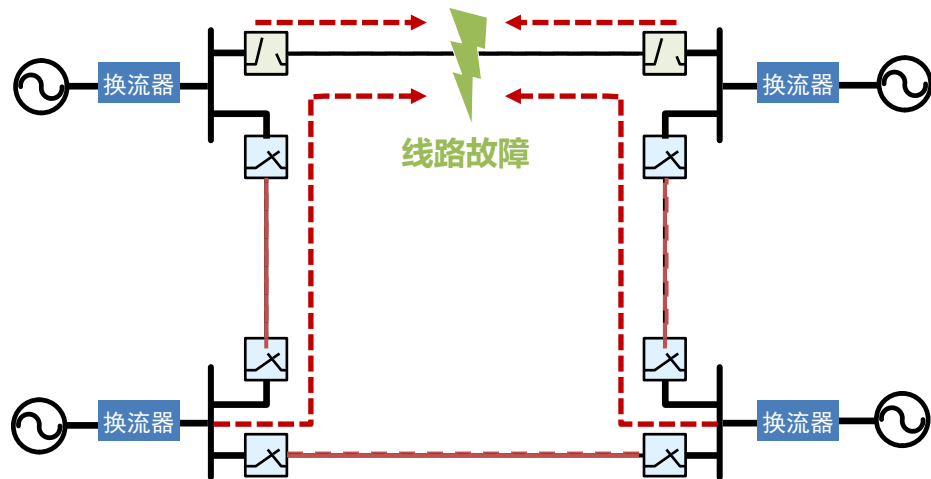


1.2 直流断路器功能

- 关合、承载及开断直流系统额定/短路电流的开关装备
- 控制与保护功能，实现系统运行模式转换、选择性隔离故障
- 快速、双向、低损、重合等功能



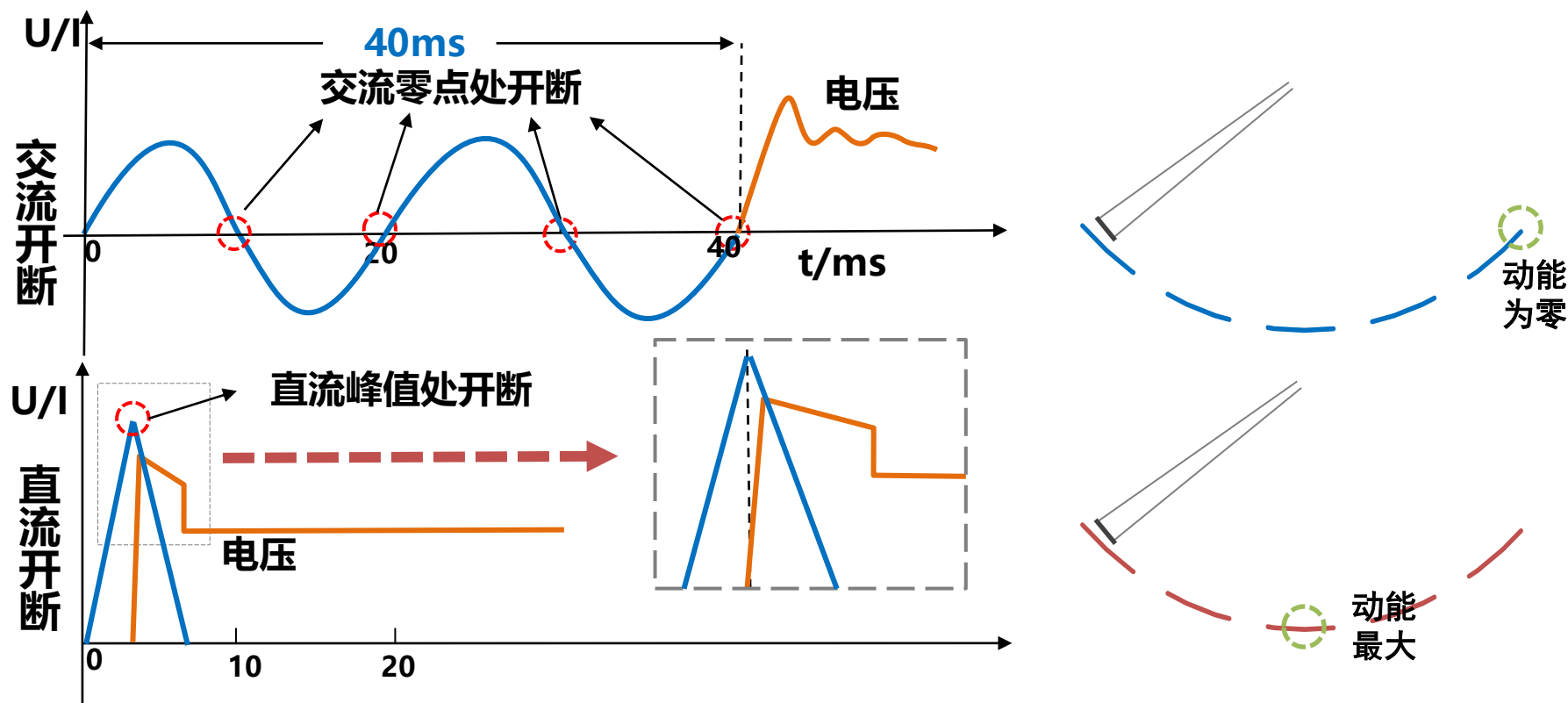
电网遭受雷击故障



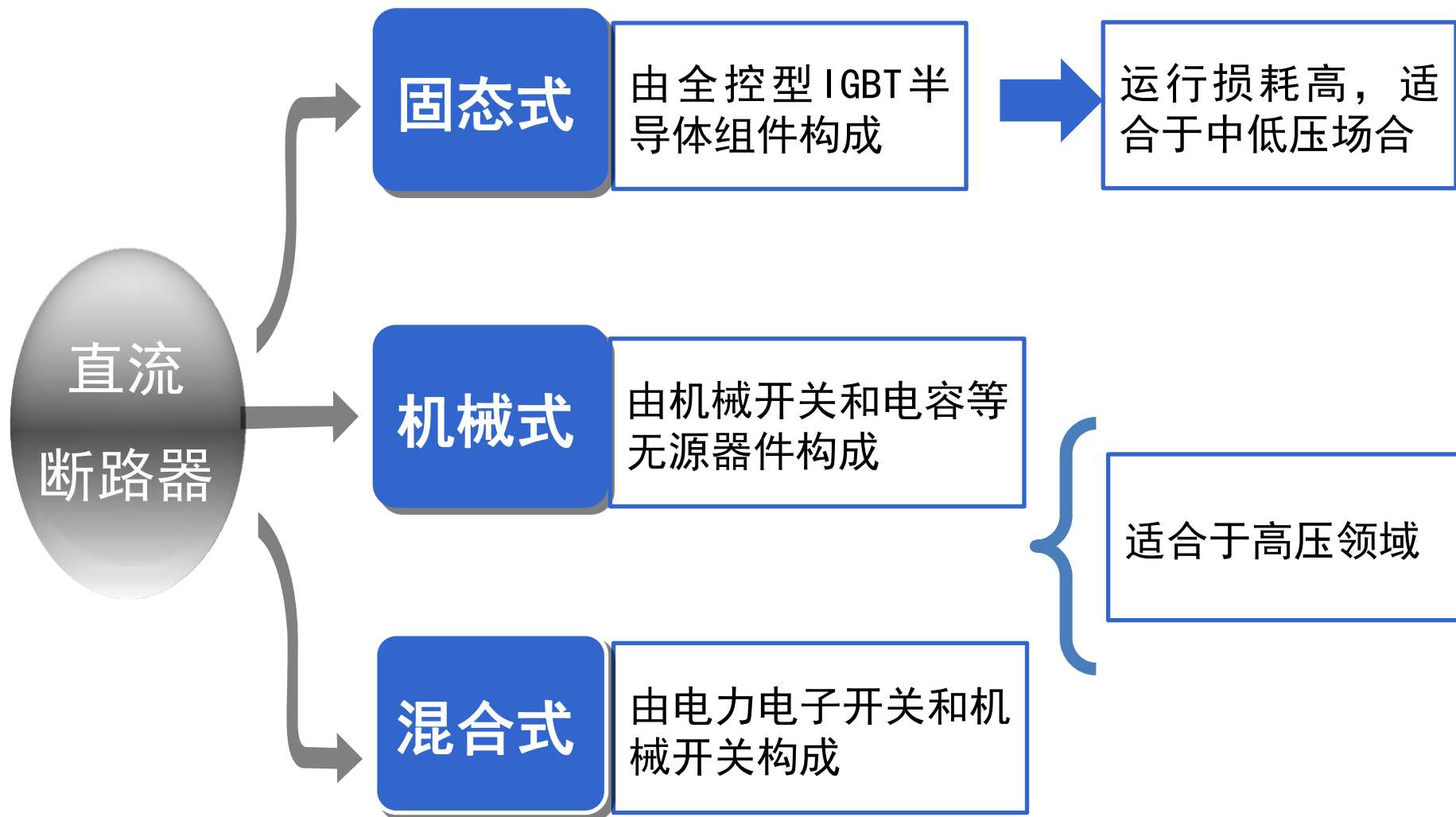
直流断路器切除故障，系统持续运行

1.3 直流断路器技术挑战

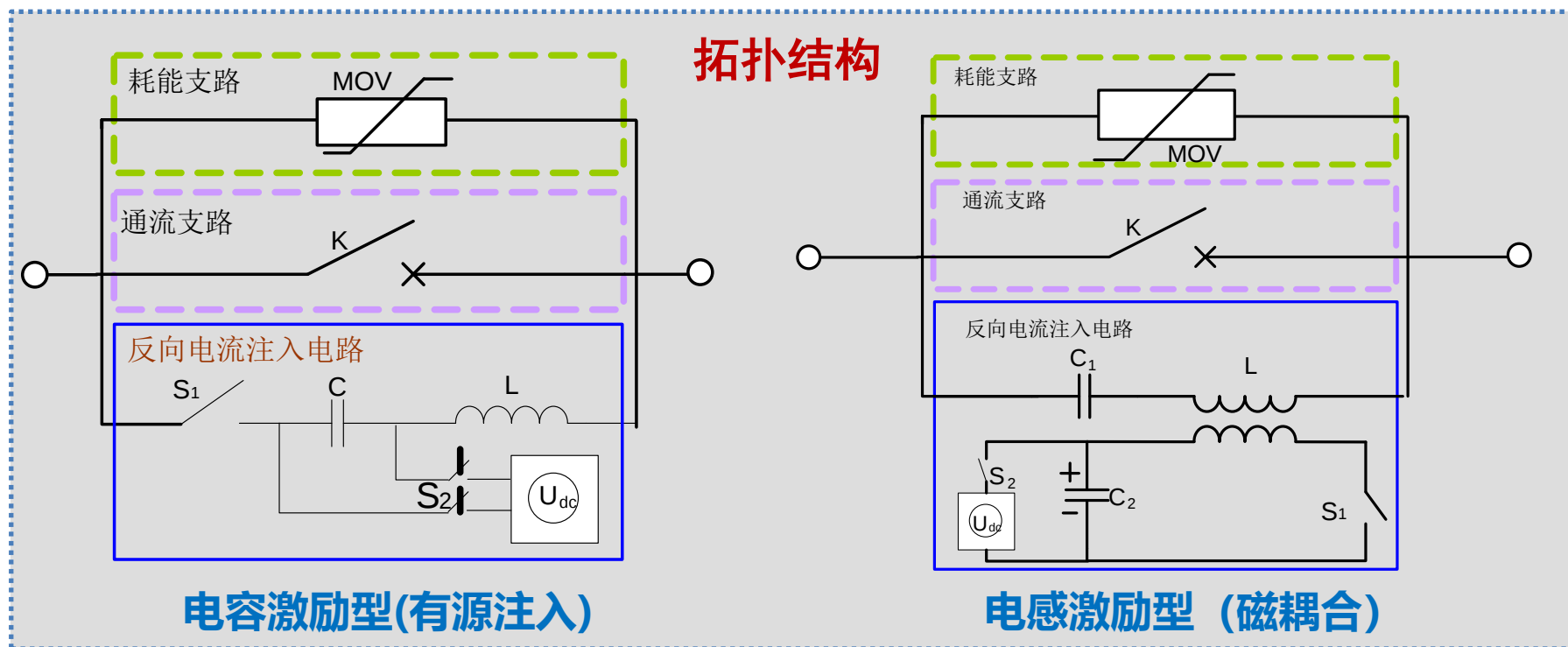
- 直流无自然零点，传统交流熄弧技术无法应用
- 开断速度极快（数个ms），高出交流断路器一个数量级
- 开断过程耗散巨额的系统能量（数十至百兆焦）



1.4 直流断路器技术路线

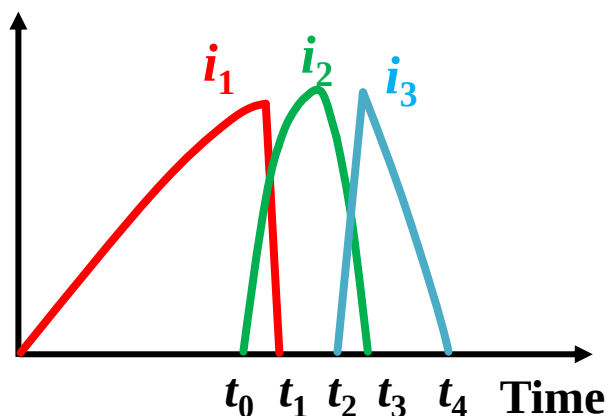
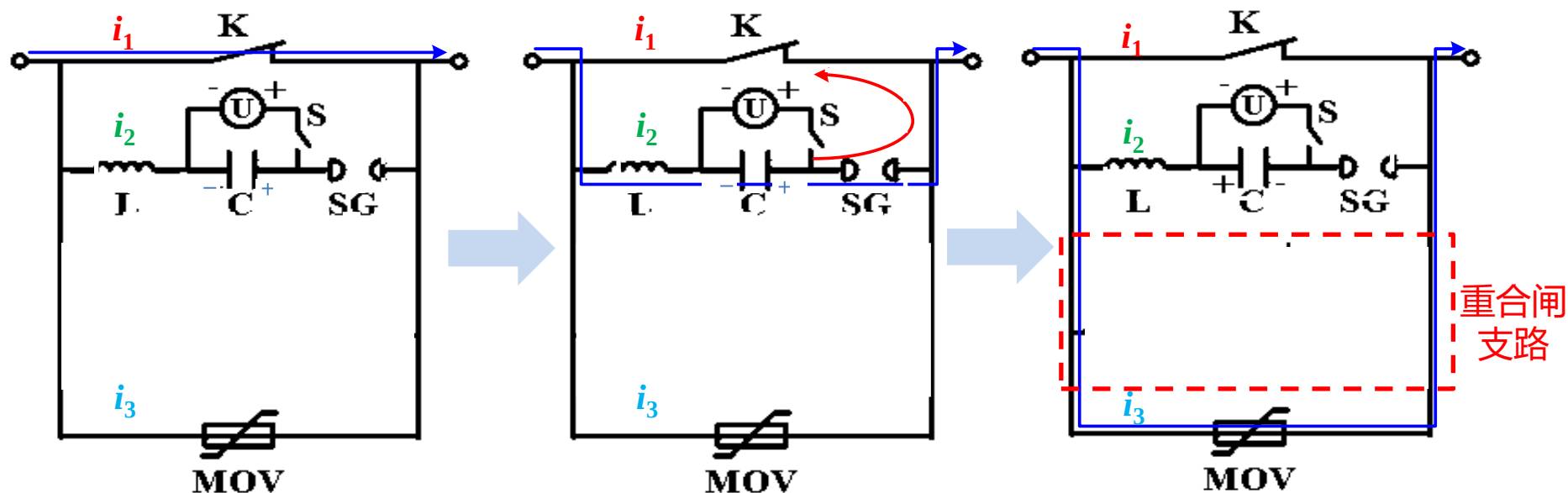


2.2 机械式拓扑



- 机械开关K、电容器C、电感L、触发开关等元件构成
- 电容激励：高压预充电容直接放电
- 电感激励：低压侧磁耦合感应电流

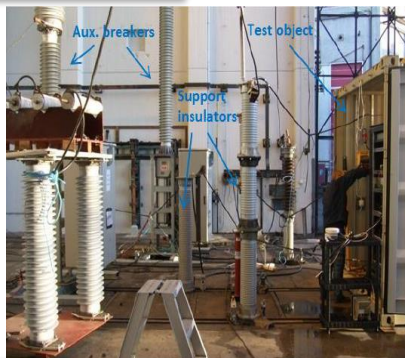
2.2 机械式拓扑



- 无损耗、燃弧、成本相对较低
- 高 di/dt 、 dv/dt 开关重燃风险
- 开断过程与系统振荡抑制
- 重合闸设计困难

2.2 机械式拓扑

国外

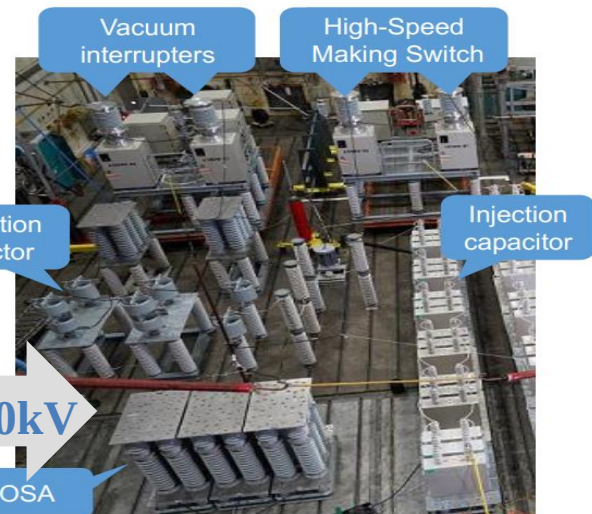


2014 ABB
80kV/2ms/8.5kA



2015 三菱电气
80kV/8ms/16kA

2020年 160kV



国内



2014 西交
55kV/5ms/16kA

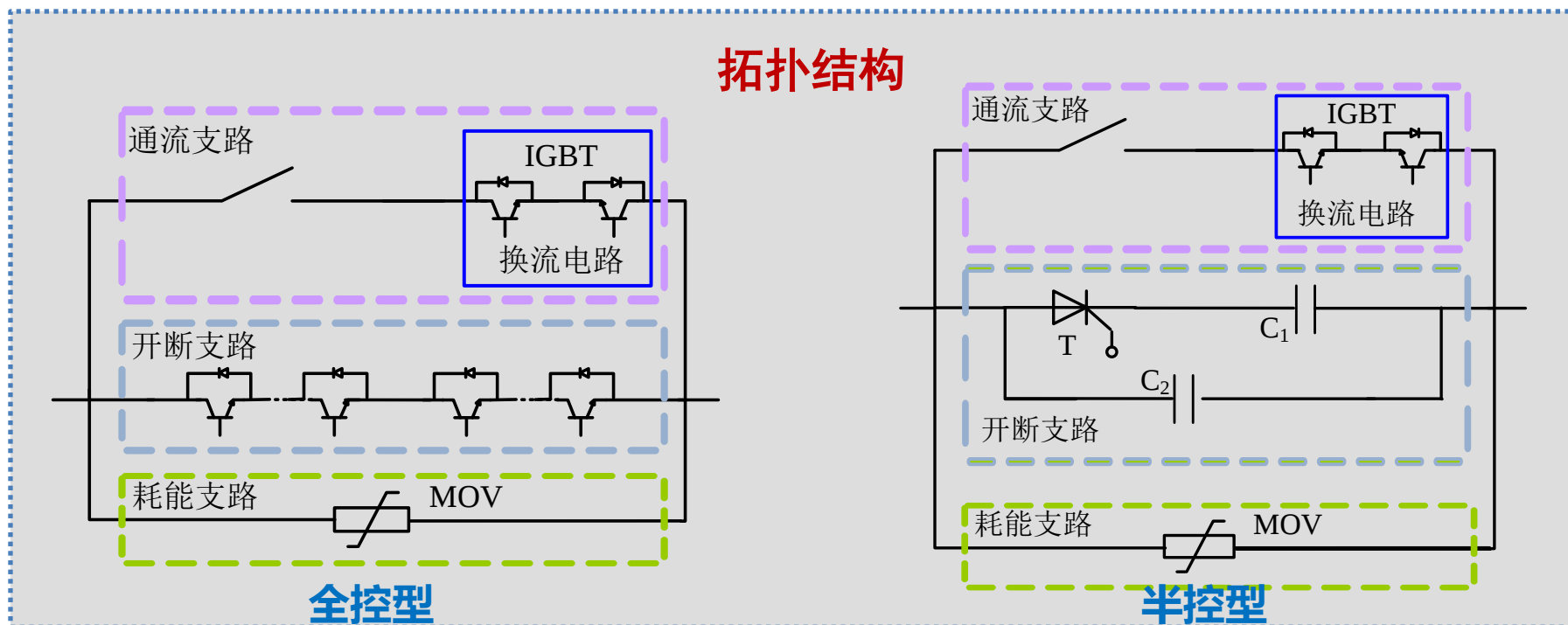


2017 华科
160kV/5ms/9kA



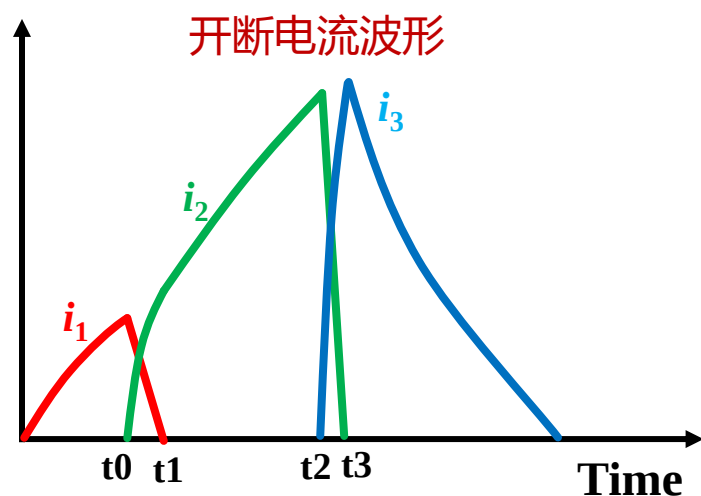
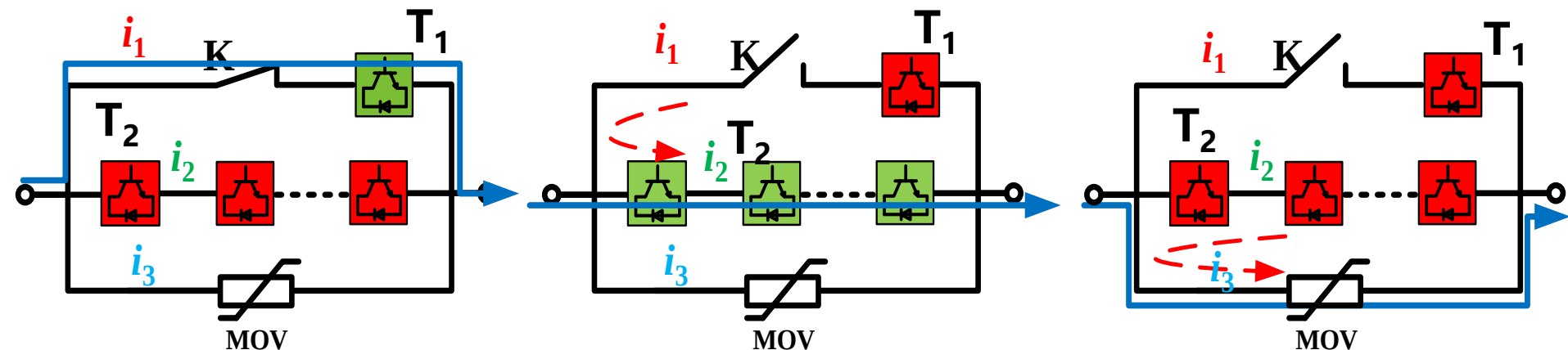
2019 思源电气
500kV/3ms/25kA

2.3 混合式拓扑



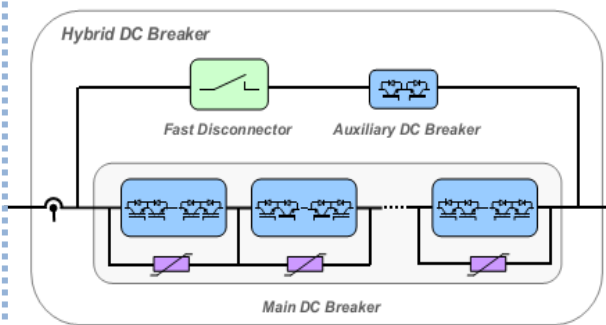
- 机械开关K、电力电子器件T等元件构成
- 全控型：全控器件实现电流转移开断
- 半控型：全控器件转移、电容辅助半控器件关断

2.3 混合式拓扑

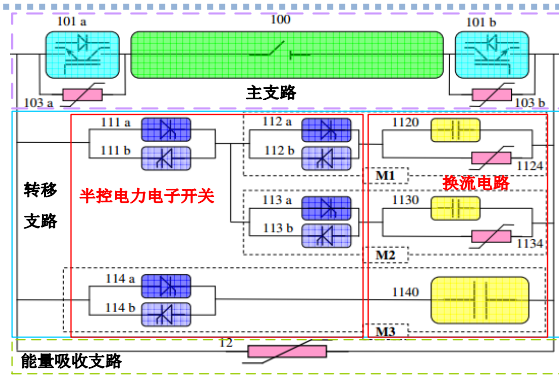


- 低损耗、少量器件水冷
- 无弧，免维护
- 开断与重合灵活、适应性好
- 成本相对高

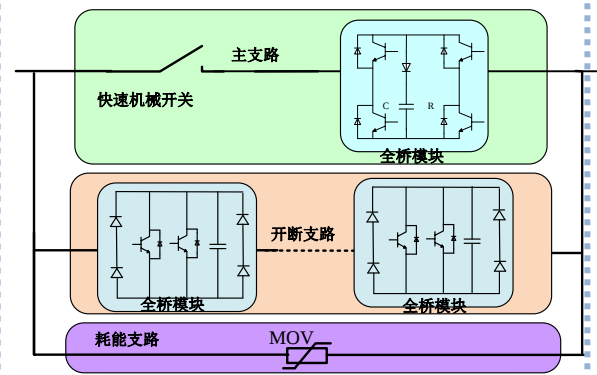
2.3 混合式拓扑



2012 ABB
80kV/5ms/9kA



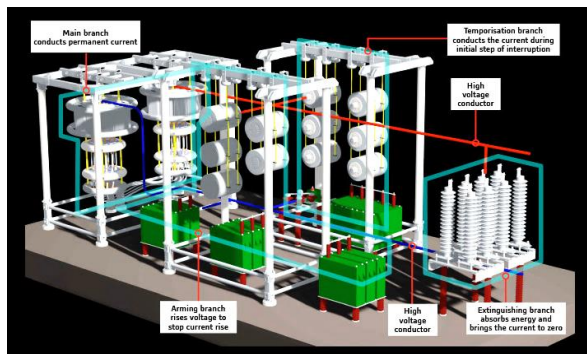
2014 Alstom
120kV/5ms/5kA



2014 联研院
200kV/3ms/15kA

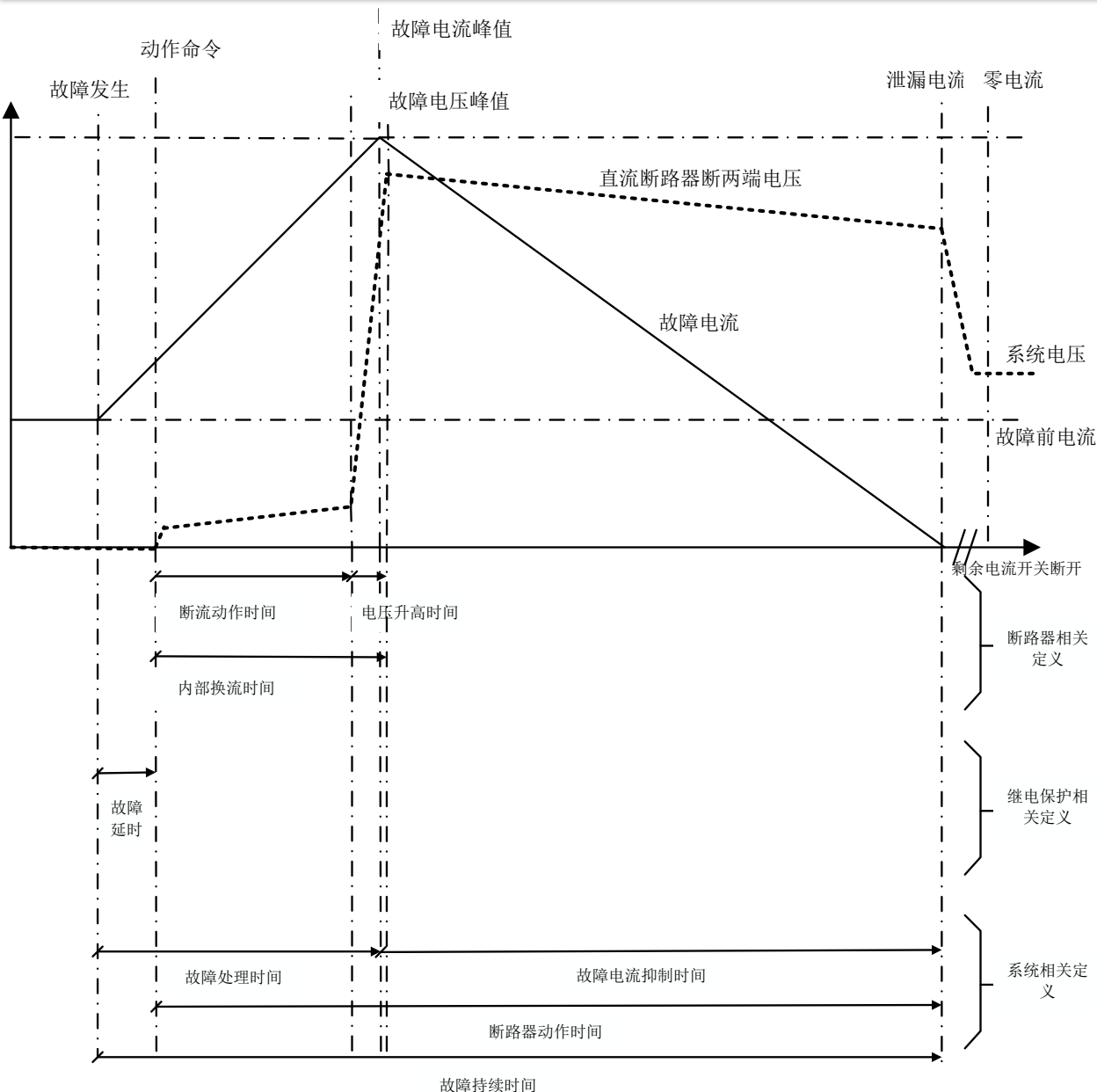


2020年 320kV/3ms/20kA



2017年 500kV/3ms/25kA

2.4 核心参数



电流

- ✓ 额定电流
- ✓ 额定短时耐受电流
- ✓ 额定开断电流

电压

- ✓ 额定电压
- ✓ 最大暂态开断电压

时间

- ✓ 开断时间
- ✓ 清除时间
- ✓ 重合闸时间

能量

- ✓ 额定吸收能量

内容提纲

一、高压直流断路器概述

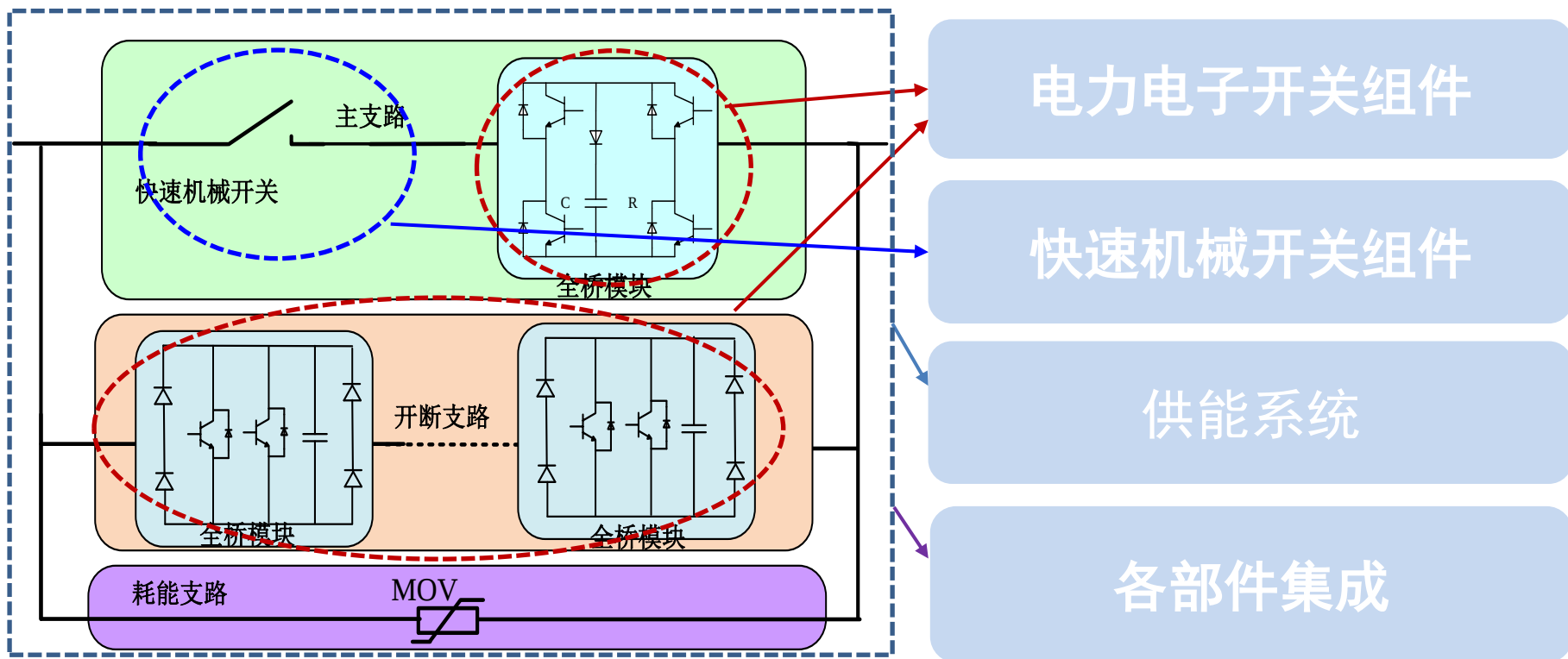
二、混合式直流断路器研制

三、混合式直流断路器应用

四、发展需求与最新进展

2.1 模块级联混合式拓扑

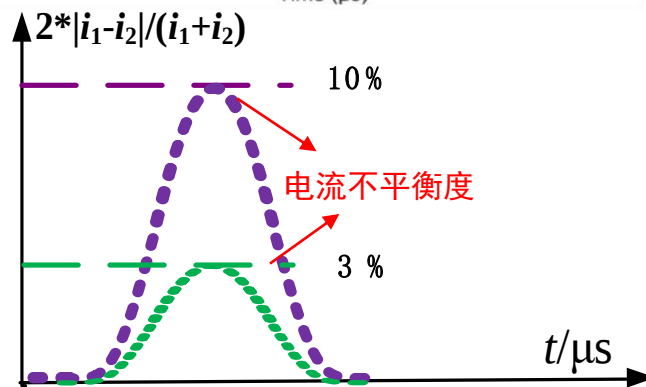
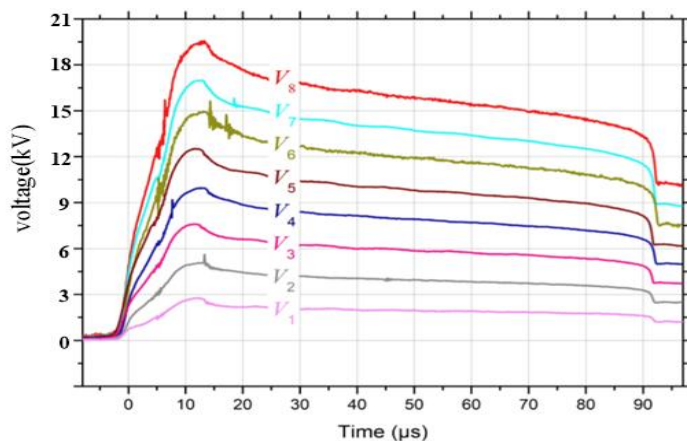
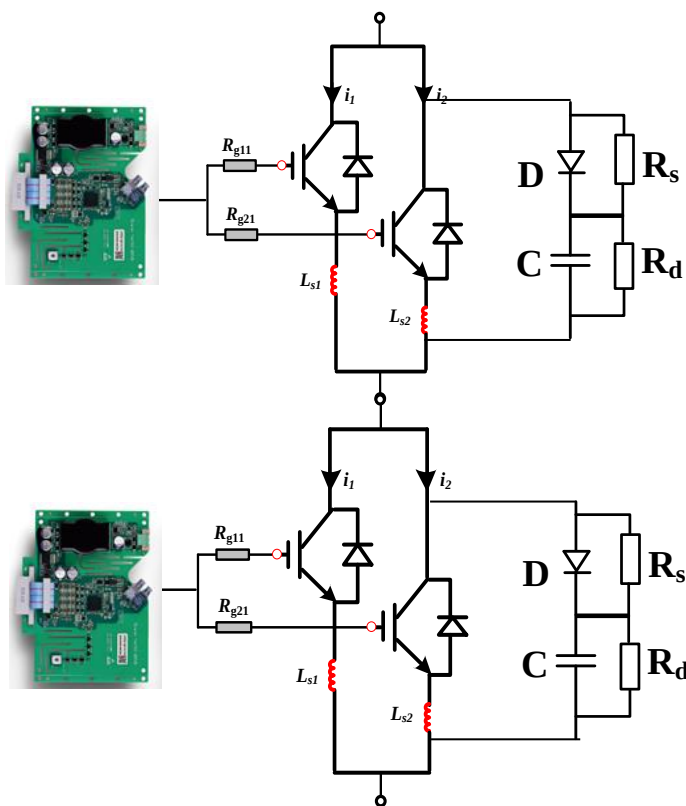
- 2012年，首创了模块级联混合式直流断路器拓扑电路
- 损耗 $< 0.01\%$ 、无弧分断、软关断、强扩展性、全控器件相对少



2.2 电力电子组件

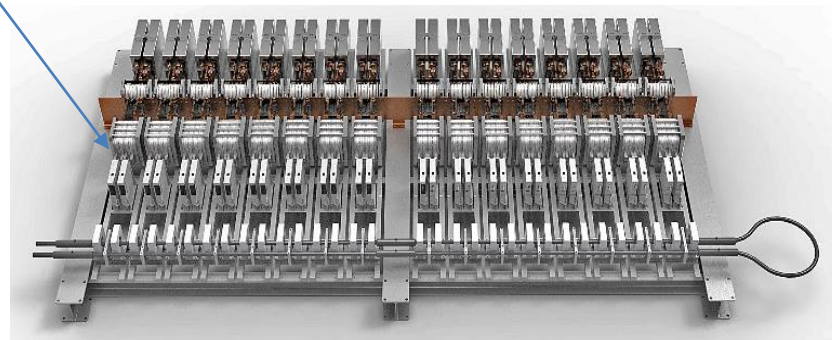
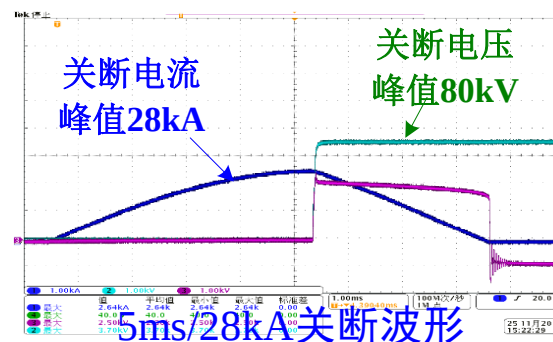
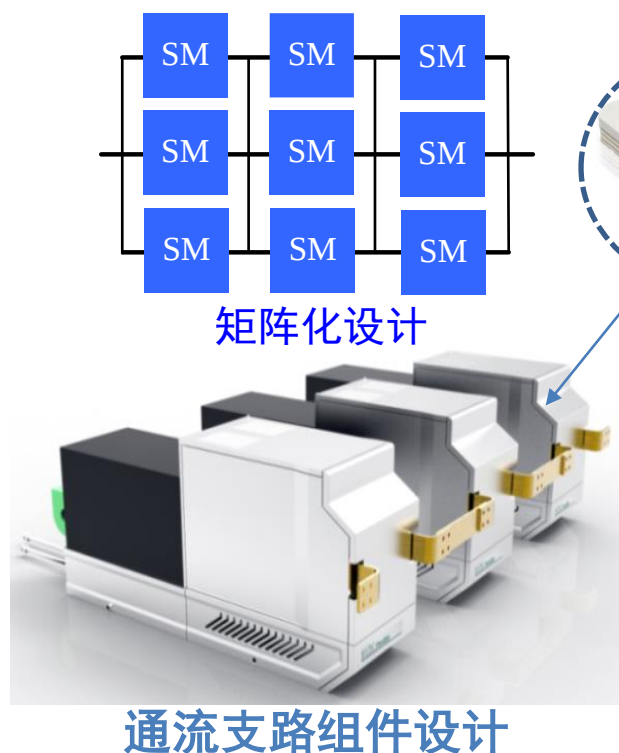
数百级模块单元串、并联实现高压大电流开断

- 电压调控：RCD阻容设计、杂散电感抑制
- 电流均衡：关断过程动态调节、对称结构



2.2 电力电子组件

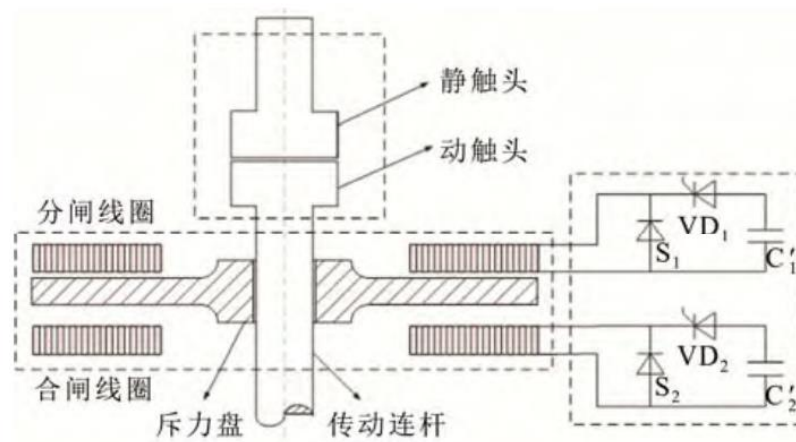
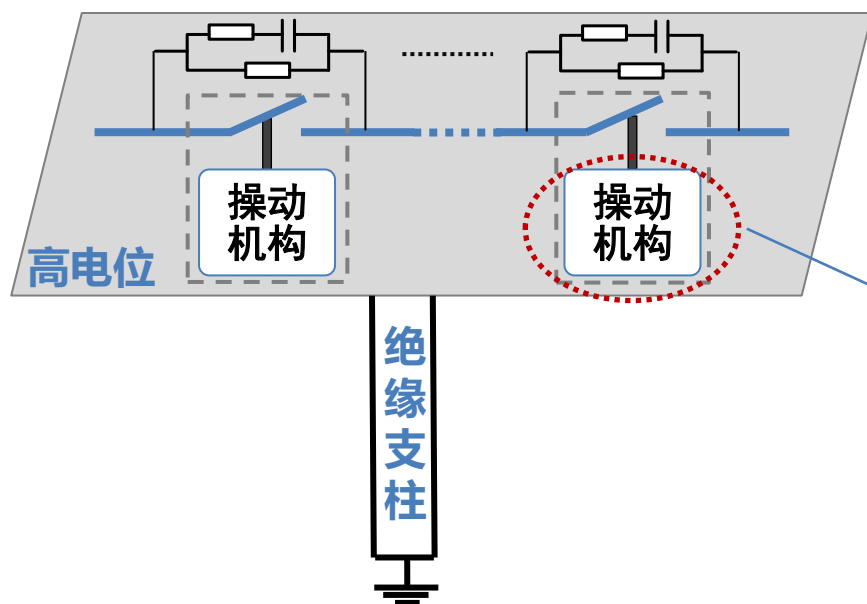
- 全控器件：压接式、IGBT/IEGT/BIGT
- 通流支路：矩阵式设计、强迫水冷、可抽卸；
- 开断支路：模块化串联压装、紧凑低感设计、自然冷却



2.3 快速机械开关

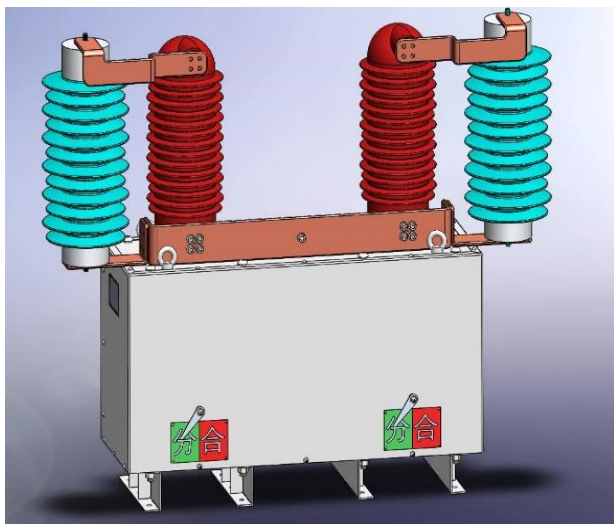
毫秒级时间完成分闸耐受数百kV暂态开断电压

- 运动行程：多断口串联
- 分闸速度：电磁斥力操动、高电位布置



2.3 快速机械开关

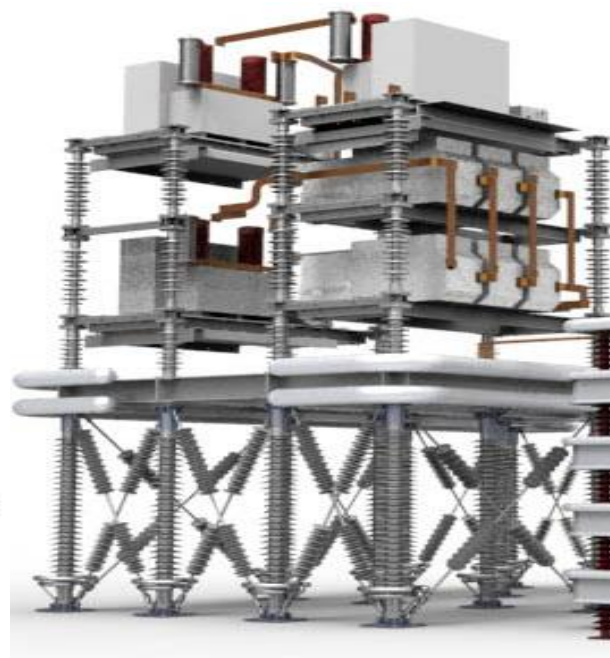
- ❑ 开发出真空高速开关，100kV双断口开关1.8ms耐受180kV暂态电压
- ❑ 串联应用至200kV、500kV等级，各级均压10%以内，寿命5000次



100kV/2kA双断口真空开关



60kV/3kA单断口真空开关

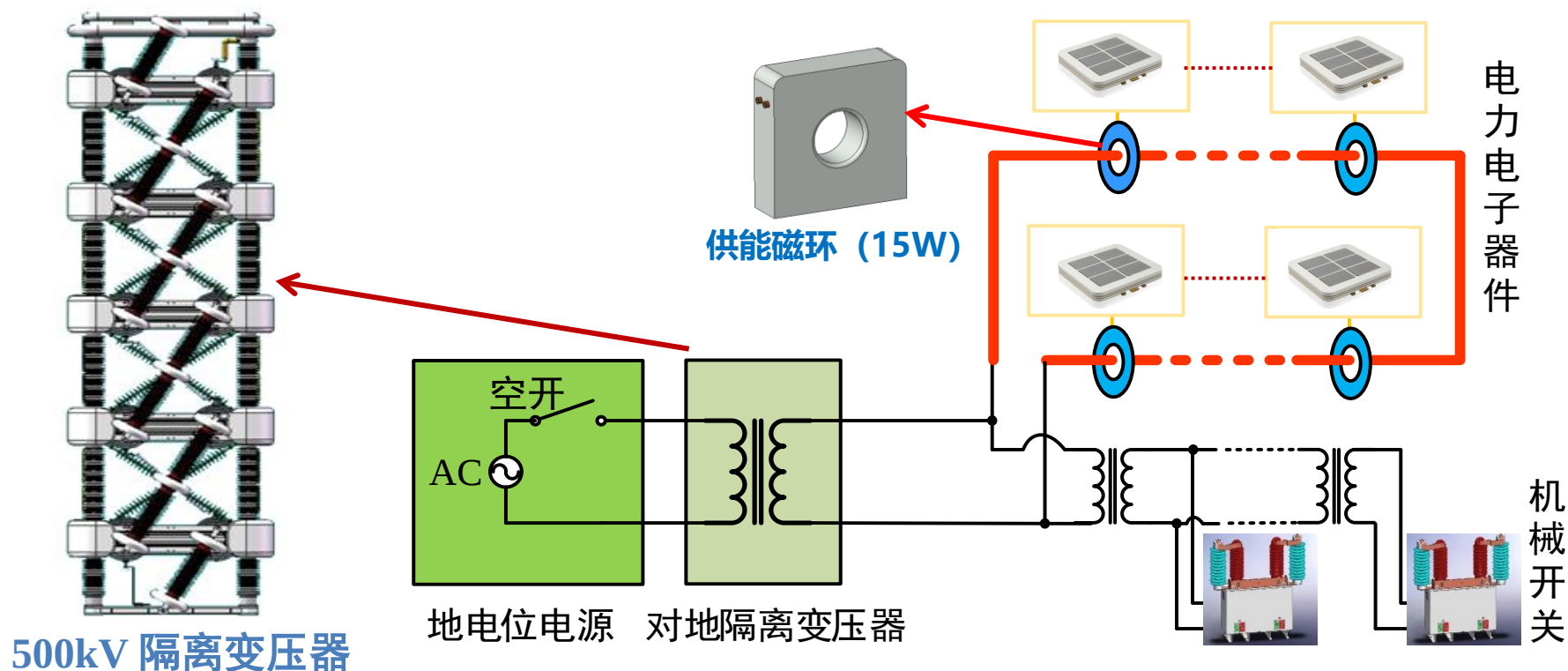


200kV直流断路器真空开关

2.4 供能系统设计

高电位真空开关、电力电子器件工作提供能量

- 高电位分布式供能：隔离变压器、电缆、磁环组合
- 机械开关供能：电压源型、隔离变压器
- 电力电子开关：电流源型、电缆与分布式磁环



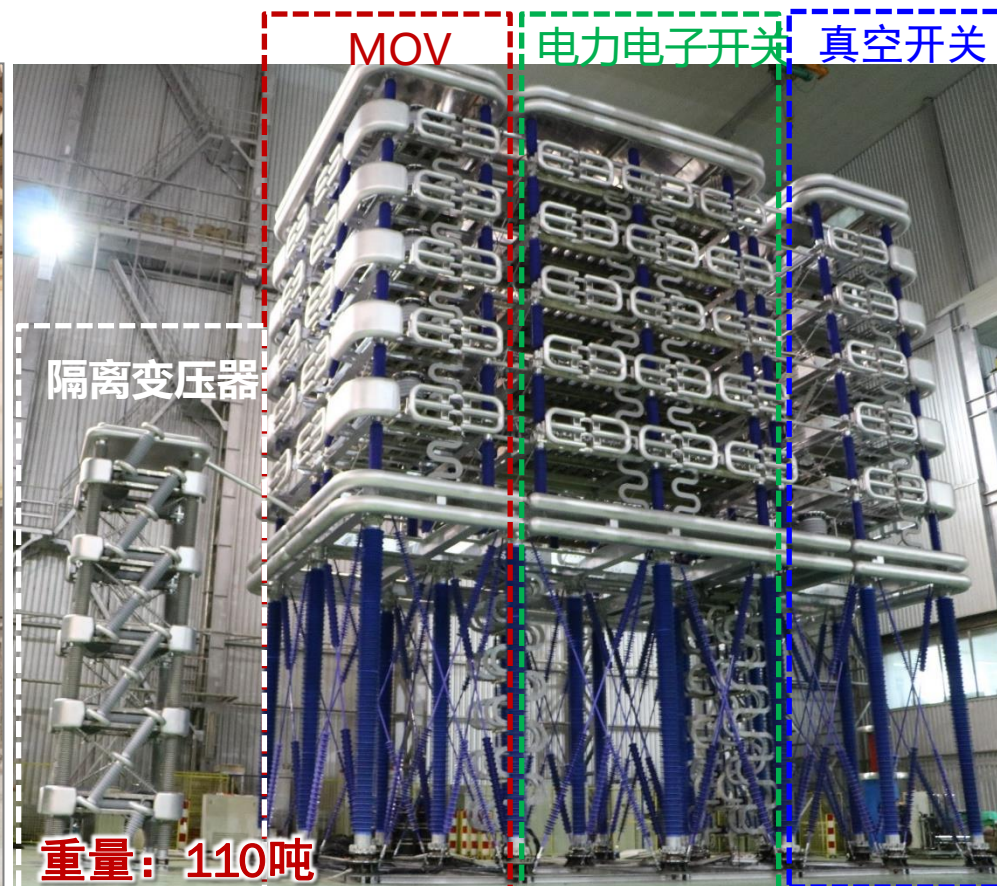
2.5 样机集成

研制出国际首台和当前国际参数最高的直流断路器

□ 集成方法：支撑式、分区、分层



2014年 200kV/15kA高压直流断路器

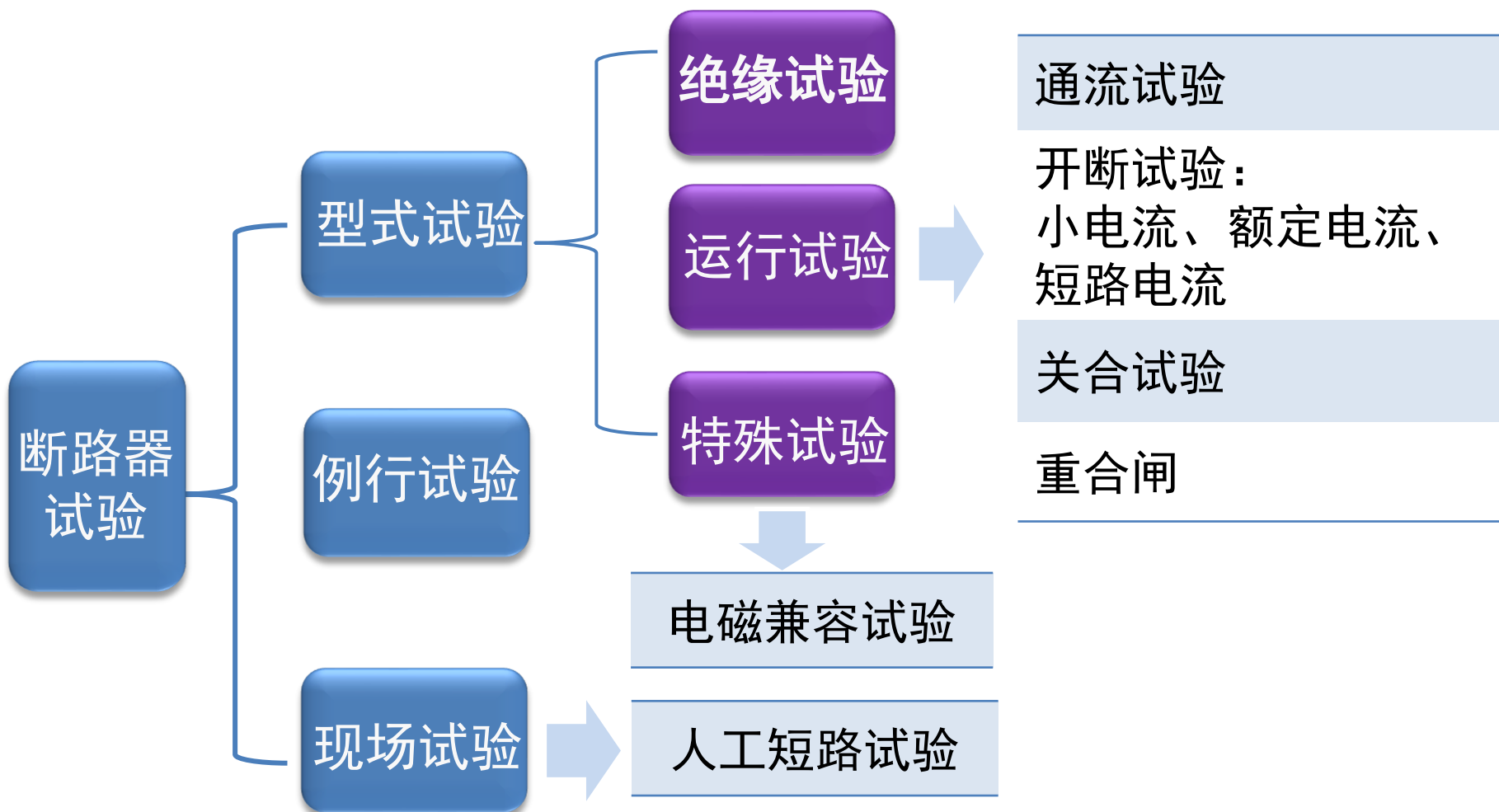


2019年 500kV/25kA高压直流断路器

(18m*7m*15m)

2.6 型式试验

□ 行标《混合式高压直流断路器试验规范》，IEC 62271-313



内容提纲

一、高压直流断路器概述

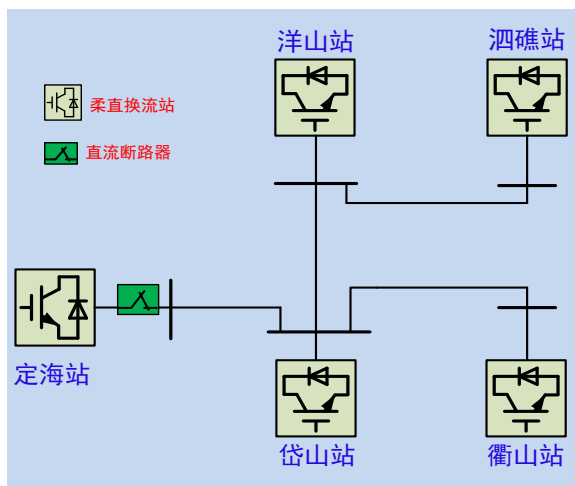
二、混合式直流断路器研制

三、混合式直流断路器应用

四、发展需求与最新进展

3.1 200kV混合式直流断路器

- ❑ 舟山5端柔直、 $\pm 200\text{kV}/1000\text{MW}$ 、闭锁换流阀清除直流海缆故障
- ❑ 换流站出口加装直流断路器：快速隔离故障、带电投退换流站



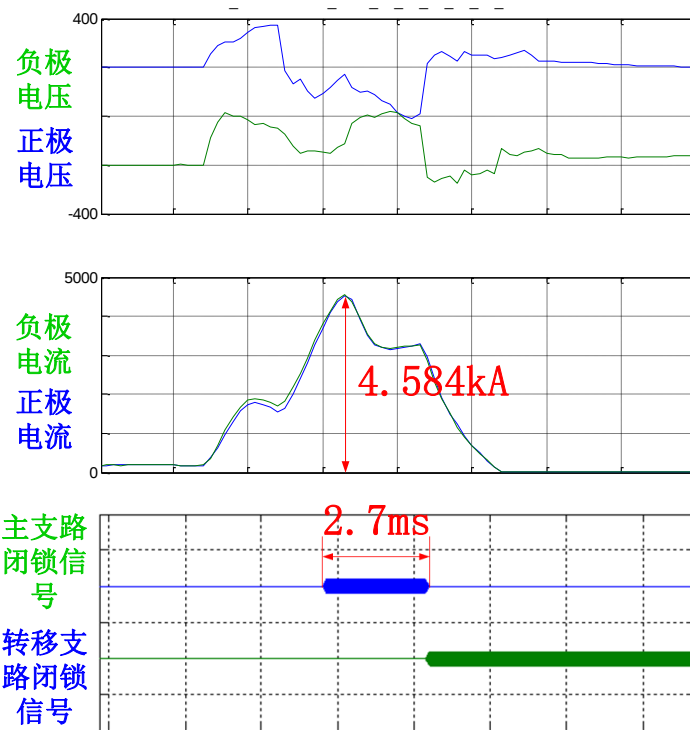
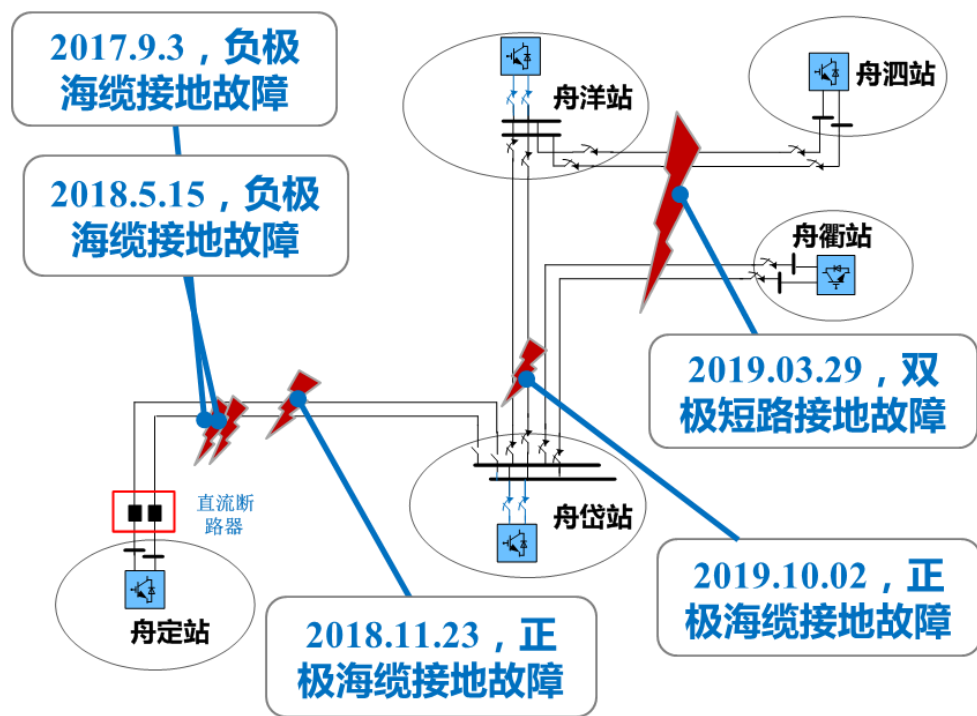
舟山5端柔直工程



2016年 实现高压直流断路器首次工程应用

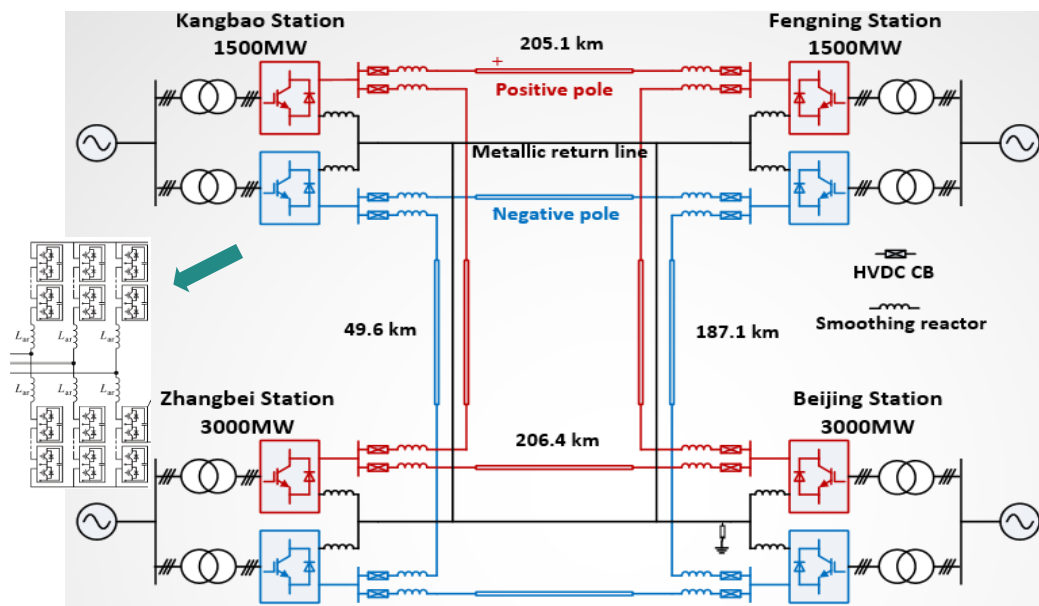
3.1 200kV混合式直流断路器

- 多次完成单、双极短路故障隔离，显著提升舟山工程可用率
- 技术成果经多位院士组成鉴定委员会认为“设计先进，性能优越，运行可靠，整体技术达国际领先水平”



3.2 500kV高压直流断路器

- 张北四端电网、500kV/3000MW，双极对称系统
- 半桥MMC+直流断路器，实现架空线路故障隔离
- 共16台，14台混合式，2台机械式

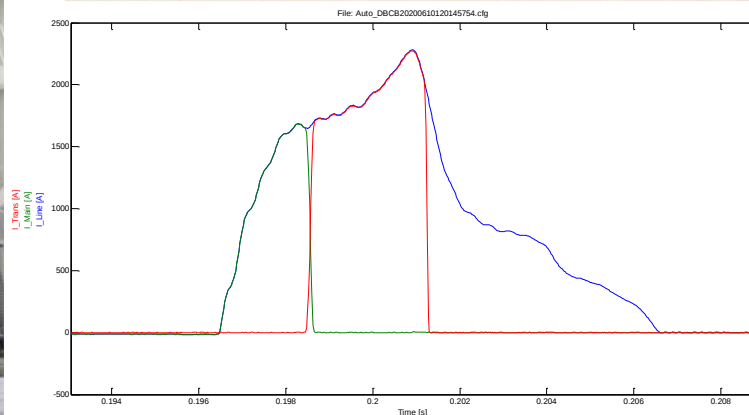


3.2 500kV高压直流断路器

- 2020年6月投运，单极人工短路试验，2.8ms/2275A
- 500kV直流断路器运行稳定，支撑实现了**新能源经直流网络传输**



张北500kV/3ms/25kA混合式直流断路器



现场人工短路试验波形

内容提纲

一、高压直流断路器概述

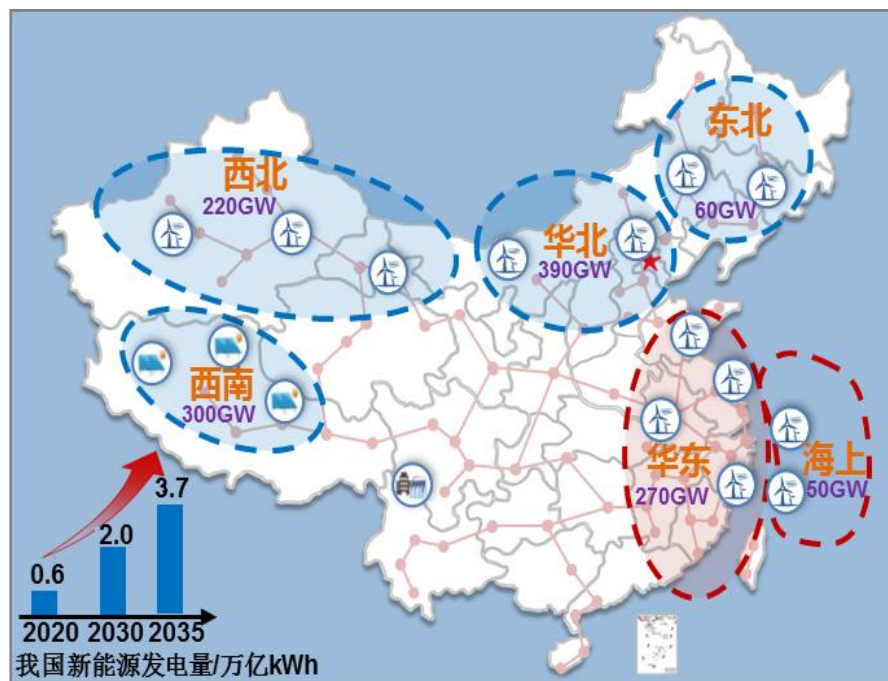
二、混合式直流断路器研制

三、混合式直流断路器应用

四、发展需求与最新进展

4.1 应用前景

- 柔性直流是我国藏东南、沙戈荒等大型能源基地以及远海风电送出的重要手段，欧洲规划16条2GW海上柔直工程
- 柔直在新型电力系统构建作用日益突出，多端及直流电网建设需求逐步凸显，对高压直流断路器提出了广泛应用需求



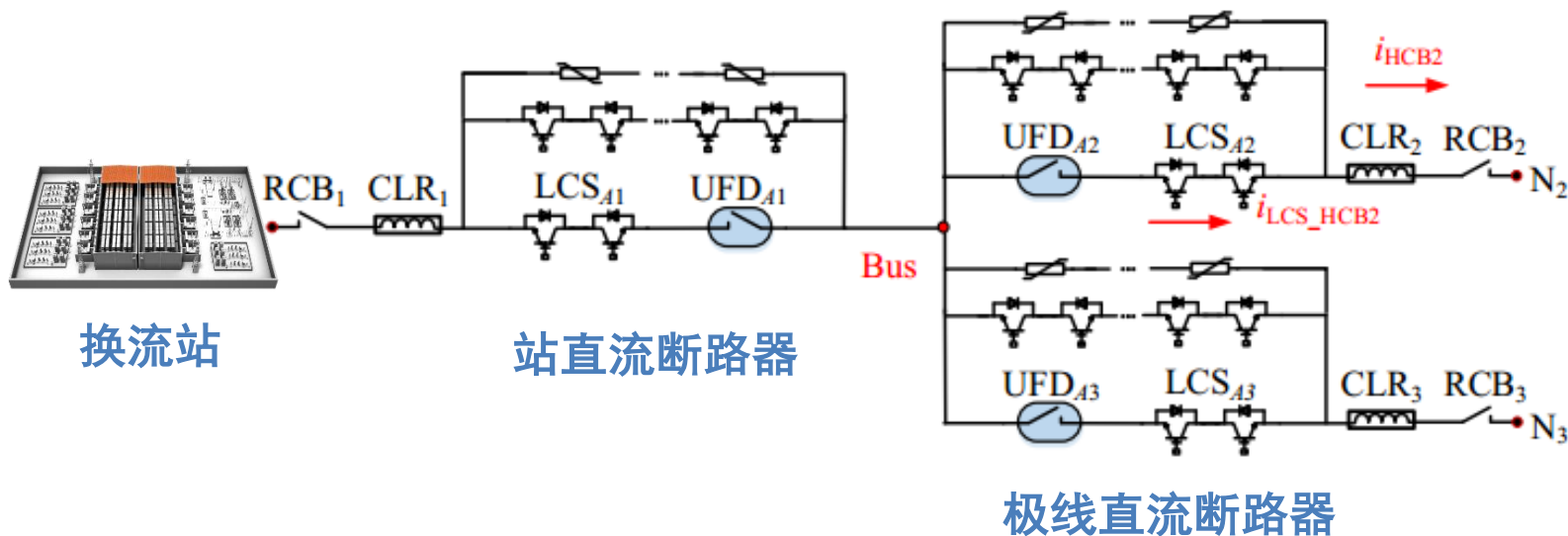
我国新能源发展设想

序号	工程名称	电压/kV	容量/GW	投运时间
1	BalWin4	±525	2	2029
2	Lanwin1	±525	2	2030
3	IJmuiden Ver2	±525	2	2030
4	IJmuiden Ver3	±525	2	2030
5	Nederwiek 2	±525	2	2030
6	Doordewind1	±525	2	2031
7	Doordewind2	±525	2	2031
8	IJmuiden Ver1	±525	2	2028
9	Lanwin5	±525	2	2031
10	Nederwiek 1	±525	2	2030
11	Nederwiek 3	±525	2	2031
12	BalWin1	±525	2	2029
13	BalWin2	±525	2	2030
14	BalWin3	±525	2	2029
15	Lanwin2	±525	2	2030
16	Lanwin4	±525	2	2031

欧洲北海海风柔直并网工程

4.2 发展方向

- 电网规模、容量扩大，对开断性能、成本、体积等要求更高
- 现有技术尚难以完全满足规模化应用技术与经济等要求

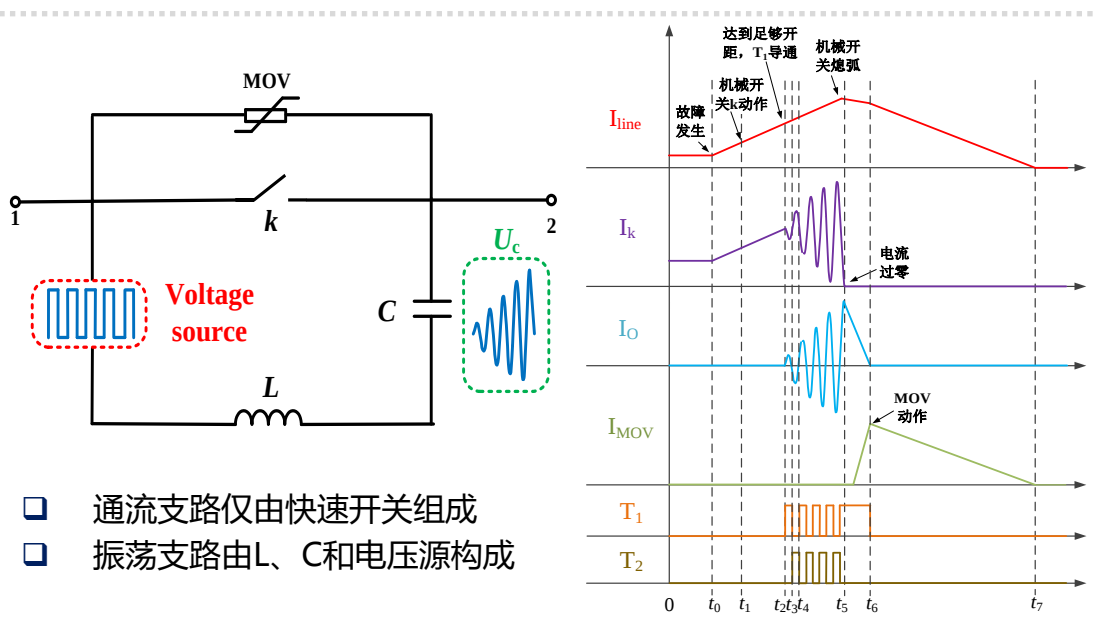


- ✓ 大量电力电子器件，500kV/9000万
- ✓ 混合式开断性能提升受限于器件
- ✓ 机械式小电流开断、重合闸能力

低成本、小体积、高性能
新型直流断路器

4.3 有源振荡直流断路器

- ▣ 振荡开断新思路：将电力电子强迫关断转换为开关断口“构建人工电流零点”熄弧开断；
- ▣ 实现方法与拓扑：通过电压源受控激励，产生幅值快速提升的振荡电流，创造快速开关过零熄弧点，完成电流转移开断



◆零损耗，无需水冷

◆电力电子器件减少80%，成本、体积可降低50%以上

◆开断电流不受器件关断能力限制，可提升至数十kA

◆扩展灵活，满足中高电压应用

谢 谢 !