



国家电网  
STATE GRID

全球能源互联网研究院  
GLOBAL ENERGY INTERCONNECTION RESEARCH INSTITUTE

# 混合式高压直流断路器 关键技术及工程应用

全球能源互联网研究院有限公司

魏晓光

2019年11月

# 汇报提纲

contents

## 一、概述

## 二、混合式直流断路器关键技术

## 三、混合式直流断路器样机研制

## 四、混合式直流断路器应用与展望

# 直流电网发展

- 近几十年来，世界经济快速发展，各国都在大力推进能源结构转型和可再生能源开发利用；
- 利用柔性直流输电技术构建多端和直流电网，可实现风电、光伏等多种能源之间的互补，是电网发展的重要方向之一。

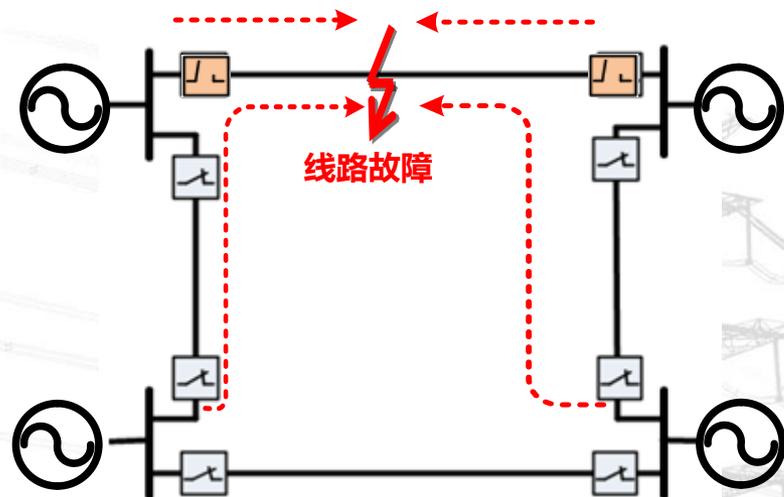


# 高压直流断路器

高压直流断路器可开断直流系统短路电流，能够实现直流输电系统运行方式切换和故障快速隔离，对保障直流电网可靠、灵活与经济运行意义重大。



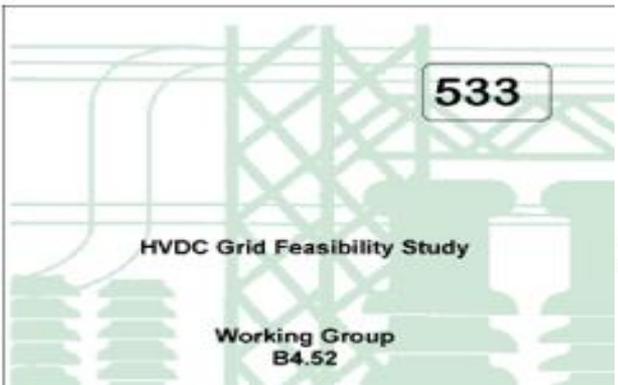
电网遭受雷击故障



电网故障及断路器隔离

# 高压直流断路器需求

能够快速开关大电流的高压直流断路器是直流电网发展最迫切需要解决的瓶颈技术（ CIGRE TB533 ），被列入我国《能源技术革命创新行动计划》。



DC breakers that could serve in an HVDC Grid have to be extremely fast. The total time for protection and breaker is in the order of five milliseconds. This is an order of magnitude faster than in AC grids.  
VSC converters are very well suited for an HVDC Grid. With the protection of DC breakers the problem of feeding DC current through the diodes at DC faults can be solved, since the DC breakers blocks or limits the DC fault current, while the converter continues with SVC operation. VSC converters operate with a fixed voltage polarity and can operate in both power

There are several important components that need further development before planning of HVDC Grids should be considered. Most obvious is the present lack of HVDC breakers that are fast enough and capable of breaking high enough currents. Questionnaires have been sent to HVDC experts and suppliers. The results show that HVDC breakers will be available within five to ten years depending on the voltage level. One supplier has already demonstrated a prototype breaker that could serve in an HVDC Grid.

**缺乏快速大电流开断高压直流断路器**

## 能源技术革命创新行动计划 (2016-2030)

装备和系统成套技术。完全解决可再生能源和分布式电源并网消纳问题。建成世界领先的、安全高效的、绿色环保的现代电网。

### (三) 创新行动

**1. 先进输变电装备技术。**研发高可靠性、环保安全（难燃、低噪声）、低损耗、智能化及紧凑化的变压器；研制高电压、大电流、高可靠性和选相控制的替代 SF6 的新型气体介质断路器及真空和固态断路器，并开展示范应用；研制安全高效的新型限流器；突破高压海底电力电缆的制造和敷设技术，研发新型电缆材料、先进附件；研发高质量在线监测/检测装备和系统。

**2. 直流电网技术。**研究直流电网架构及运行控制技术，建立直流电网技术装备标准体系；开展新型电压源型换流器、直流断路器、直流变压器、直流电缆、直流电网控制保护等核心设备研发和工程化；建设包含大规模负载群、集中/分布式新能源、大规模储能在内的直流电网示范工程。

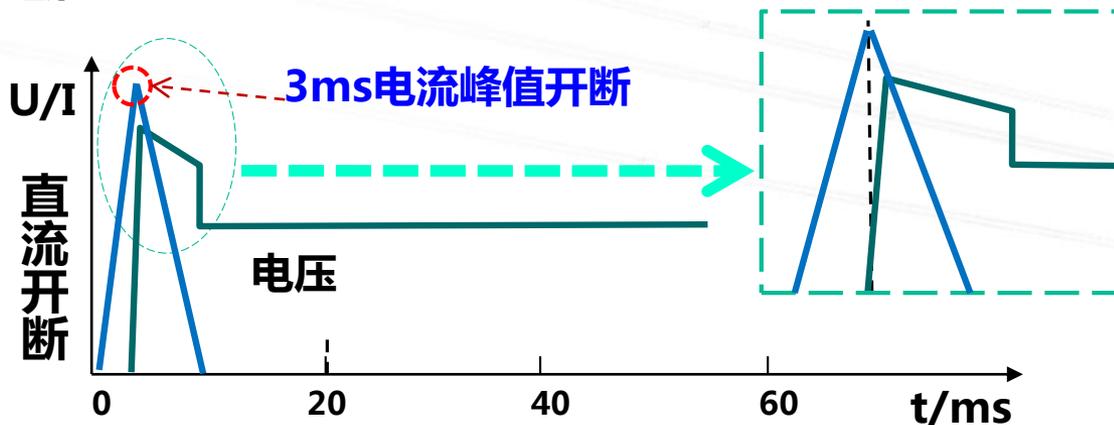
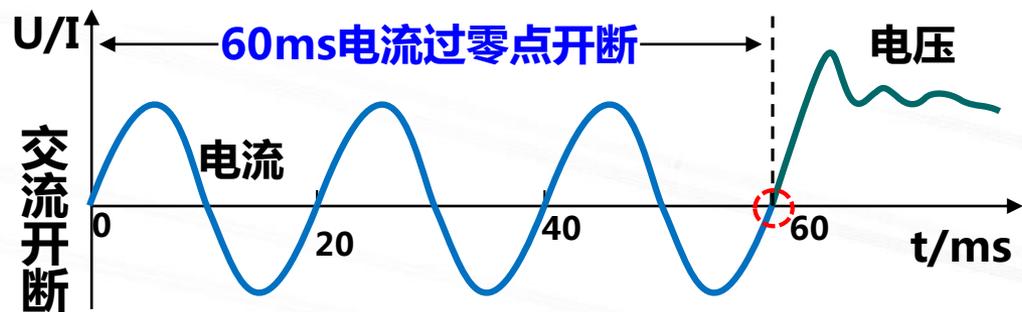
**3. 电动汽车无线充电技术。**以电动汽车无线充电为突破点和应用对象，研发高效率、低成本无线电能传输系统，实现即停即充，甚至在行驶中充电。制定电动汽车无线充电技术标准体系，研究电动汽车无线充电技术标准体系，研究建设电动汽车无线充电场站示范

## 开展高压直流断路器研发与工程化

材料研发和关键工艺技术研究；研发用于高电压、大容量直流断路器

# 高压直流开断技术挑战

直流故障电流无自然过零点，在开断过程中系统故障电流将持续向断路器注入能量，无法采用交流断路器中成熟的灭弧技术，开断难度大。



# 高压直流开断技术挑战

- 直流故障电流一般需要在3ms（一次眨眼时间约300ms）左右完成开断，速度要求极高；
- 直流断路器的开断电流一般要十几千安以上，开断电磁能量达百兆焦，能量转移与耗散困难。

断路器分断时间	3ms
断路器开断电流	15kA及以上
分断电磁能量	98MJ
故障电流上升率	5kA/ms
断路器分断电压	320kV及以上
断路器分断容量	5GVA

直流断路器技术参数

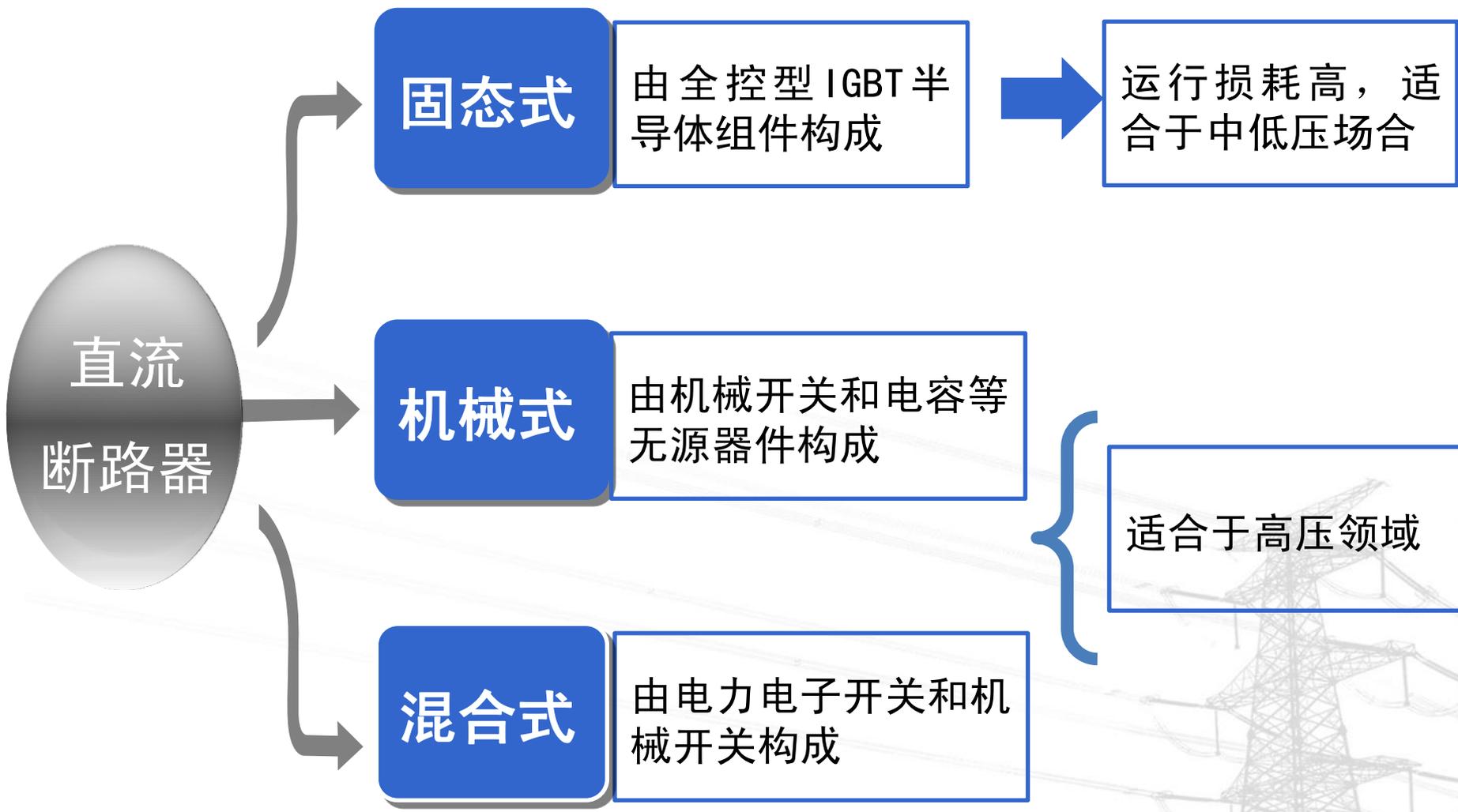


人类一次眨眼时间：300ms



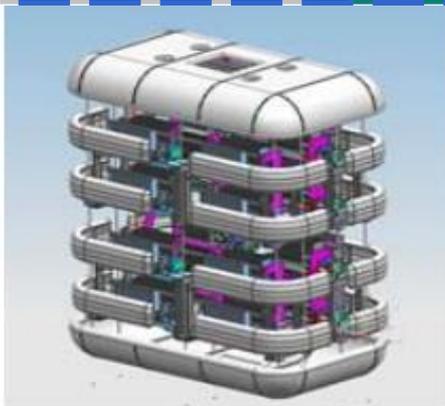
100km/h列车制动能量：100MJ

# 直流断路器技术路线

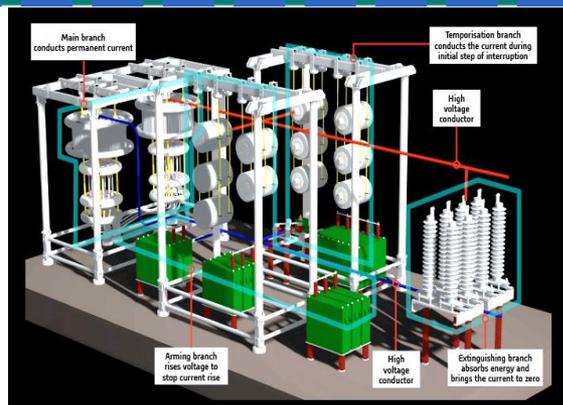


混合式具备快速、双向、低损、重合等功能，满足直流电网需求

# 混合式直流断路器研制现状



2012  
ABB公司  
80kV/3ms/9kA



2014  
Alstom  
120kV/3.5ms/5.2kA



2014  
联研院  
200kV/3ms/15kA



- 联研院于2017年，研制出500kV/3ms/25kA产品；
- 国内高校、设备厂家等普遍采用混合式技术路线，开发出不同类型的500kV样机。

混合式直流断路器是高压直流开断领域主流技术路线

# 汇报提纲

contents

一、概述

二、混合式直流断路器关键技术

三、混合式直流断路器样机研制

四、混合式直流断路器应用与展望

# 七大关键技术

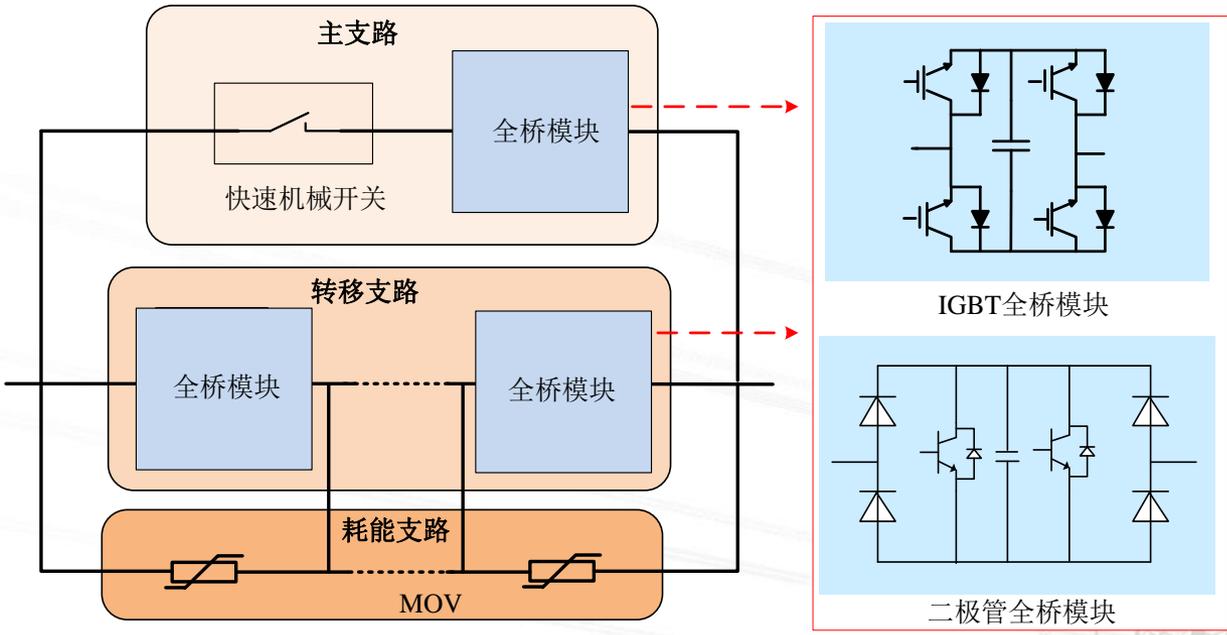
混合式直流断路器开发面临拓扑、半导体、超高速开关、供能、控保设计、集成和等效试验七方面技术难题。

- ❑ **拓扑设计**：适用于直流电网应用需求、高速、低损与重合闸功能、良好的扩展性与经济性；
- ❑ **半导体组件设计**：5倍以上额定电流（一般为2倍）可靠关断以及高 $di/dt$ 下暂态电热应力均衡调控；
- ❑ **高速开关设计**：毫秒级分断与平滑缓冲、串联断口同步动作与暂态均压；
- ❑ **供能系统设计**：数百kV干式隔离变压器对地绝缘设计、数百级负载电位匹配隔离的内部分布式绝缘设计；
- ❑ **控制保护设计**：在强电磁环境中实现多目标状态精确识别与精准控制；
- ❑ **集成设计**：多功能部件在同一平台紧凑空间绝缘设计及9级抗震设计；
- ❑ **等效试验技术**：高压大电流和强磁场联合作用下的全工况电、热、机械等应力等效复现。

# 1 拓扑设计--模块化混合式断路器

设计了模块化混合式断路器拓扑电路，通过电力电子开关毫秒级电流转移、机械开关毫秒级分断和百兆焦能量耗散的高速协调配合，实现了快速、双向、低损、无弧及重合等功能。

模块级联混合式断路器拓扑电路

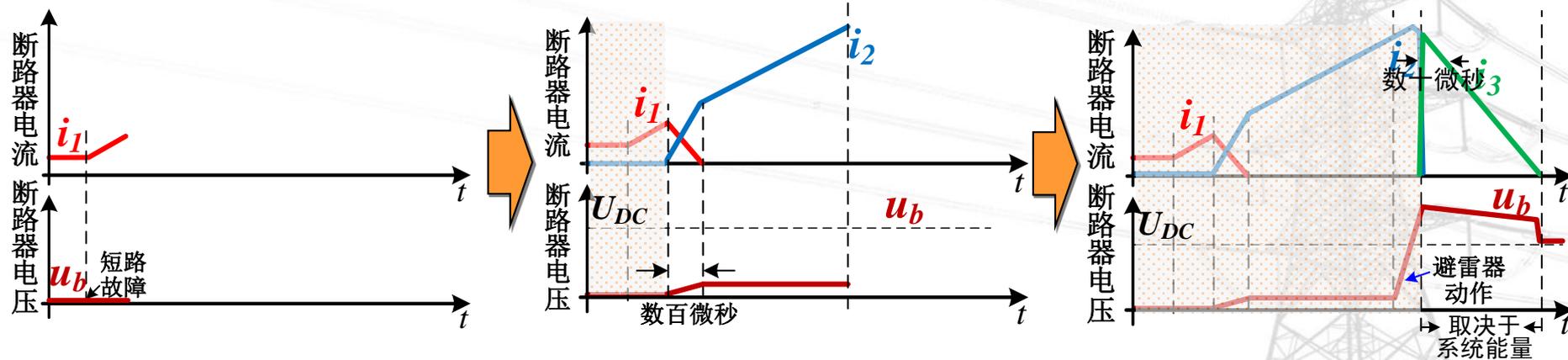
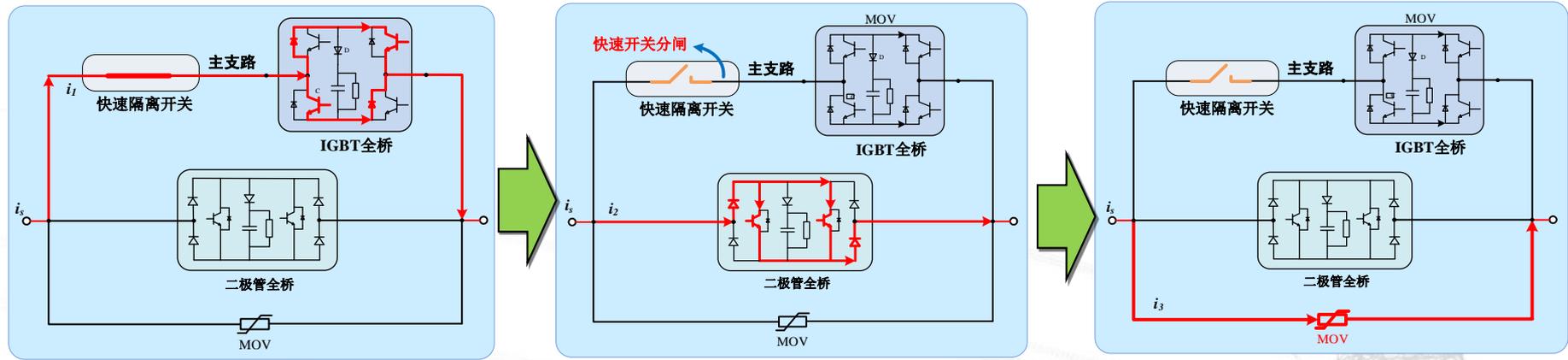


模块化，扩展性强(50-800kV)  
分断能力强，无死区(0-30kA)

快速无弧分断(< 3ms)  
通态损耗低(< 0.01%)

# 1 拓扑设计--开断原理

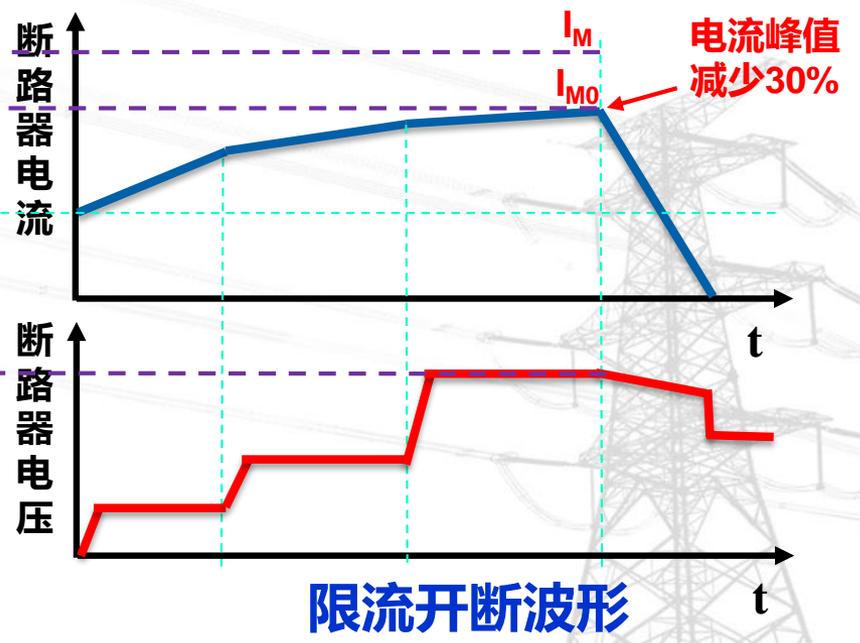
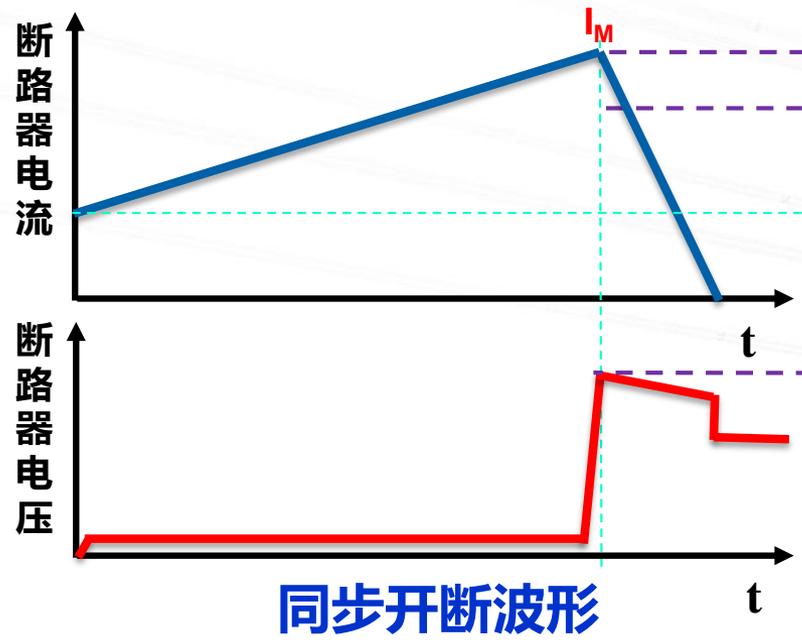
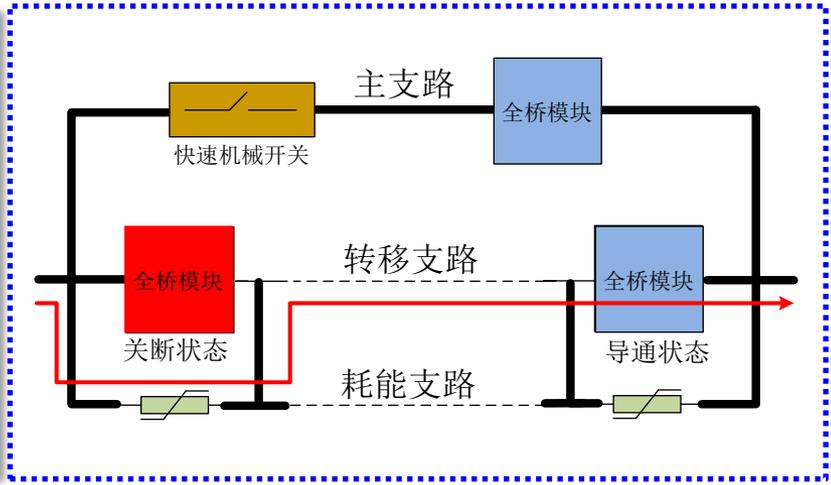
- 主支路：由快速机械开关和少量IGBT全桥构成，导通系统负荷电流；
- 转移支路：由多级IGBT全桥串联构成，短时承载和关断直流故障电流；
- 耗能支路：由MOV串联构成，抑制分断电压和吸收感性储存能量。



模块化混合式直流断路器原理

# 1 拓扑设计--限流开断

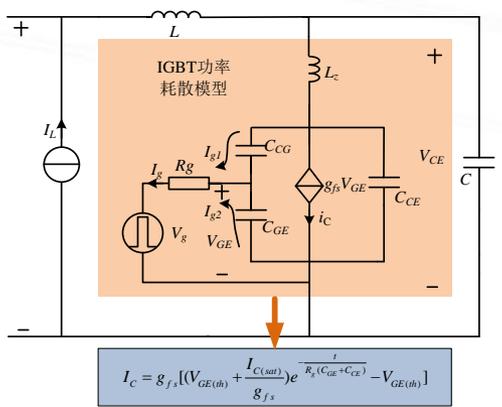
通过转移支路全桥模块单元分组关断，可有效限制故障电流，显著降低故障对系统及核心设备应力（含断路器自身）。



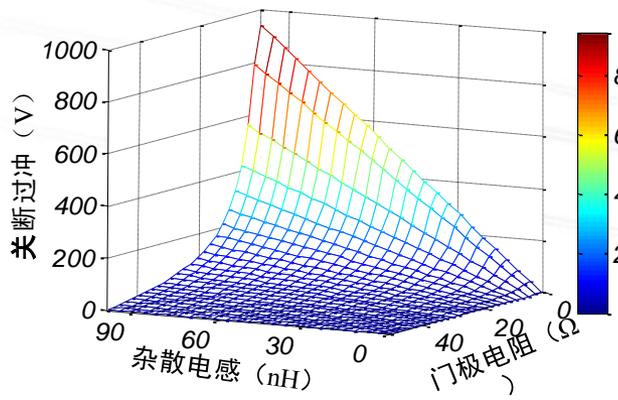
# 2 半导体组件设计

半导体组件安全开断数十kA短路电流，需攻克半导体组件的动态特性、驱动特性及电气与结构协同优化设计技术，实现关断能力提升和暂态电热应力调控。

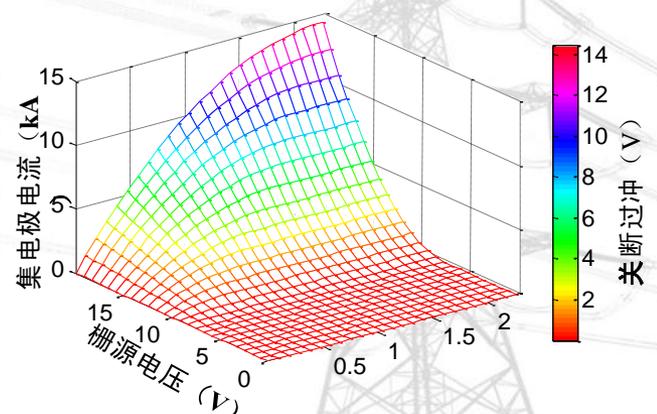
- 建立半导体器件暂态电热模型与融合分布参数半导体组件模型；
- 完成IGBT关断时间、杂散电感及门极驱动电阻协调优化设计；
- 提出半导体组件在速变电场中的暂态均压方法及过冲抑制措施；
- .....



IGBT暂态电热模型



关断过冲抑制协调设计

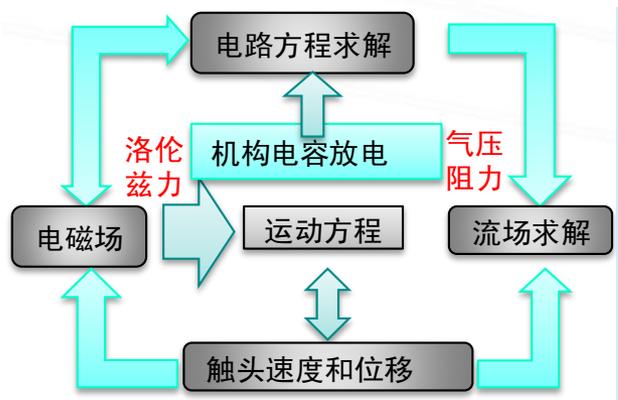


IGBT关断优化设计

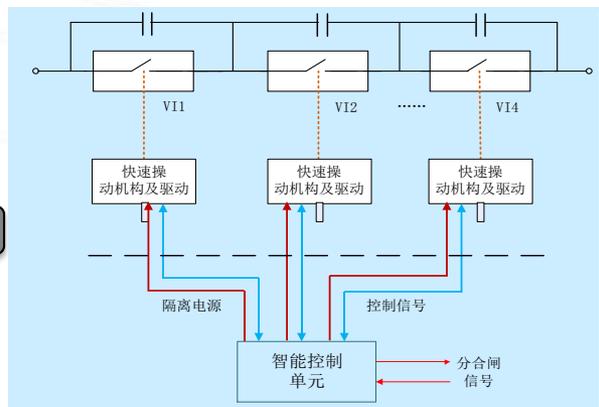
# 3 高速机械开关设计

超高速机械开关在2ms内耐受数百kV暂态过电压，需解决电磁斥力、操动、缓冲等机构运动特性优化与迭代设计，以及串联多断口毫秒级同步联动与微秒级动态均压技术。

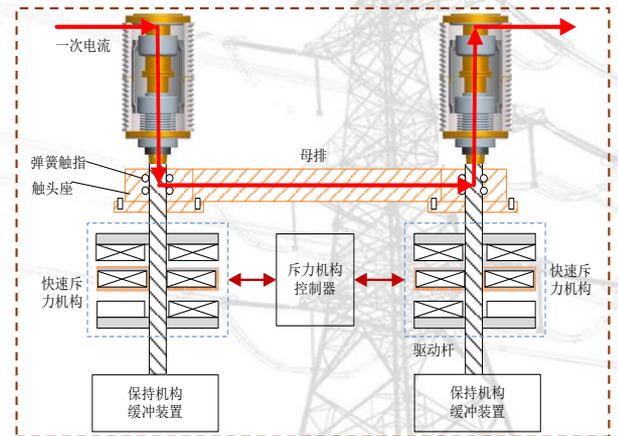
- 掌握多断口斥力结构单元的电磁和运动特性交互作用机理；
- 提出强冲击力下数毫秒平滑缓冲和可靠制动的高速缓冲技术；
- 发明断口动触头联动、同步脉冲控制及断口动态均压方法；
- .....



开关联合优化计算方法



多断口串联开关方案

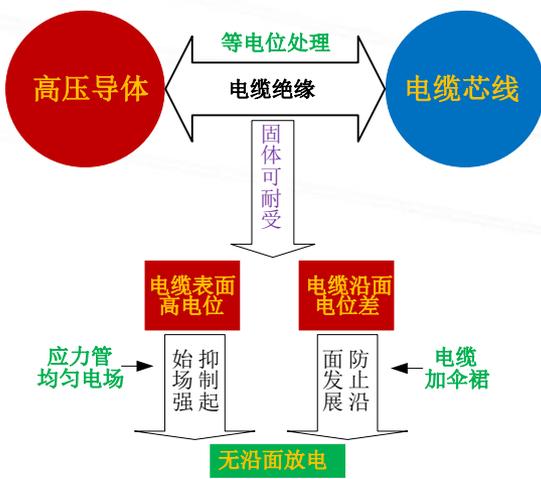


开关模块技术方案

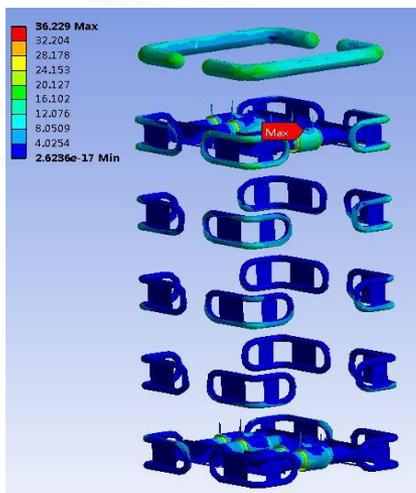
# 4 高电位供能系统设计

供能系统在数百kV电位上对数百级不同类型的二次设备提供能量，需解决负载平衡控制、电位隔离及局放抑制等难题，实现对地和内部分布式电压以及自适应功率调节能力。

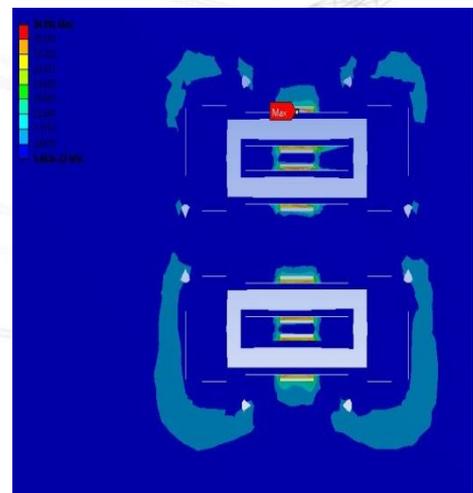
- 设计适用于高电位下电磁与激光复合供能系统方案；
- 发明多级供能磁环与动态负载能耗线性匹配与平衡控制技术；
- 提出干式变压器整体绝缘设计与等效负载特性测试方法；
- .....



多级电位隔离设计



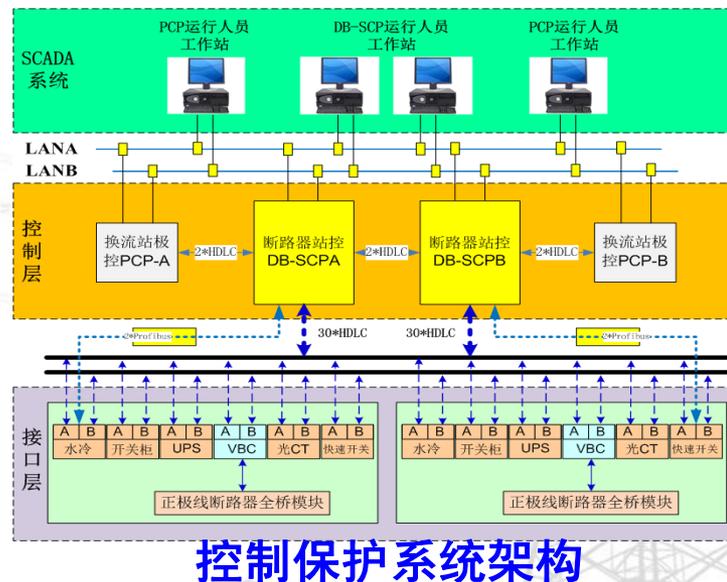
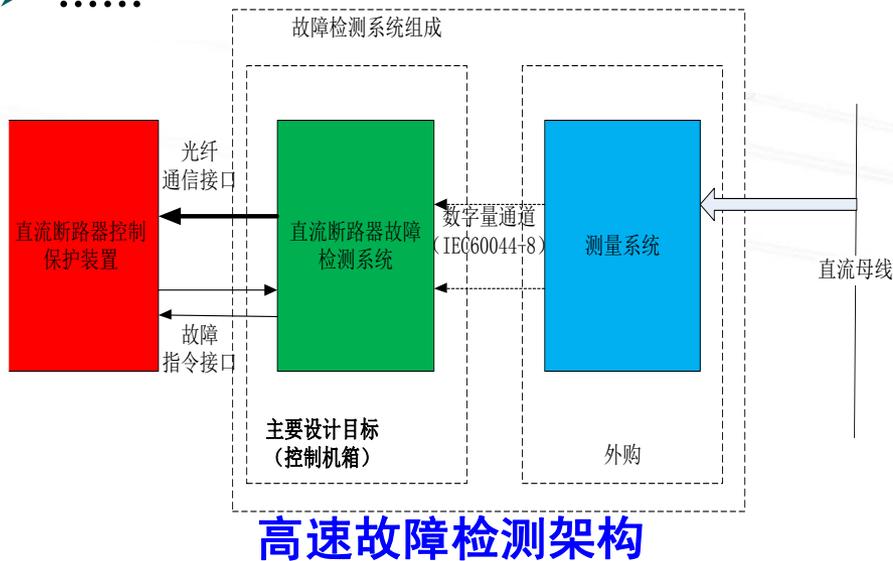
干式隔离变压器电场分布



# 5 高精度控保系统设计

控保系统在高电流变化率和强电磁环境中精确实现状态识别与数百级控制单元同步触发，需在数微秒解决电流零点预判、开关动态行程监测、多目标控制与故障保护等技术难题。

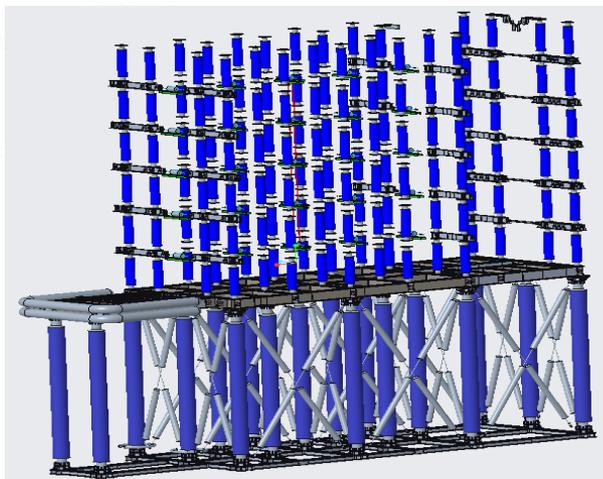
- 提出瞬变电流强磁场环境下故障电流的快速无扰动高精度采样技术；
- 掌握多控制保护目标的精确时序配合技术；
- 设计暂稳态运行下全故障工况的自适应保护策略；
- .....



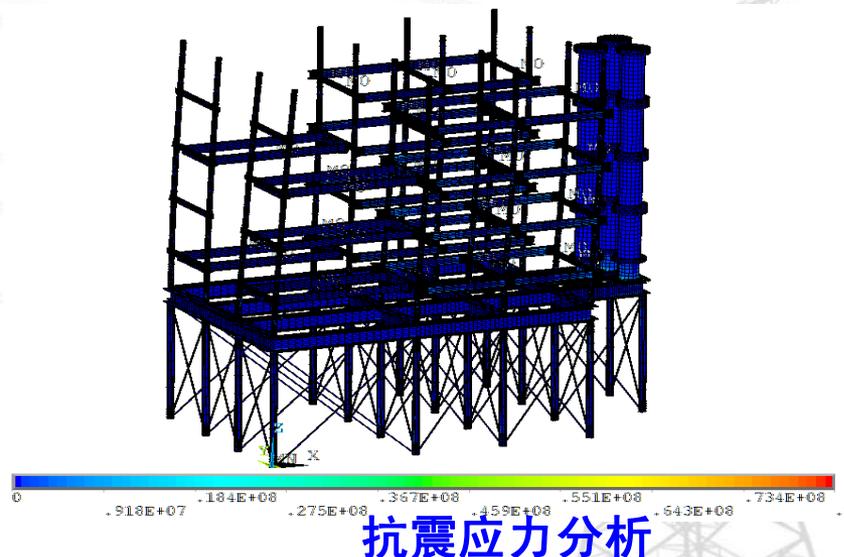
## 6 紧凑化集成技术

为实现直流断路器多功能部件在电、磁、热、力等多物理场耦合作用下有限空间内紧凑集成设计，需要突破过电压绝缘配合、均压屏蔽、结构与抗震等系列关键技术。

- 掌握断路器表面电场分布特性和多介质环境的电场耦合特性；
- 提出阀塔的绝缘配合裕度和爬电比距差异化设计方法；
- 完成满足9级地震烈度的紧凑模块化结构与抗震特性分析；
- .....



紧凑化集成设计

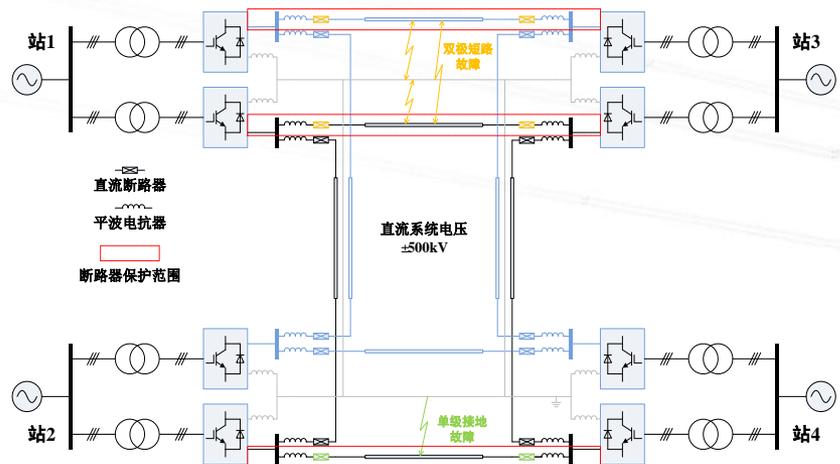


抗震应力分析

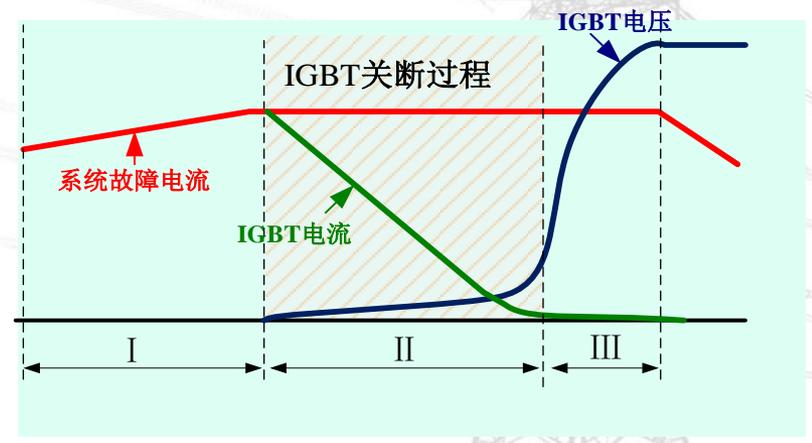
# 7 等效试验技术--等效方法

高压直流断路器对电流、电压及其变化率和热等应力极其敏感，尚无试验标准可依，实现断路器全面考核，需要突破能复现全工况电、热、机械等应力等效试验技术。

- 分析直流断路器在典型直流系统暂稳态运行工况下极端电气应力；
- 基于相似理论研究直流断路器的分步等效试验机理；
- 明确直流断路器等效试验评价体系；
- .....



典型直流电网



分阶段等效示意

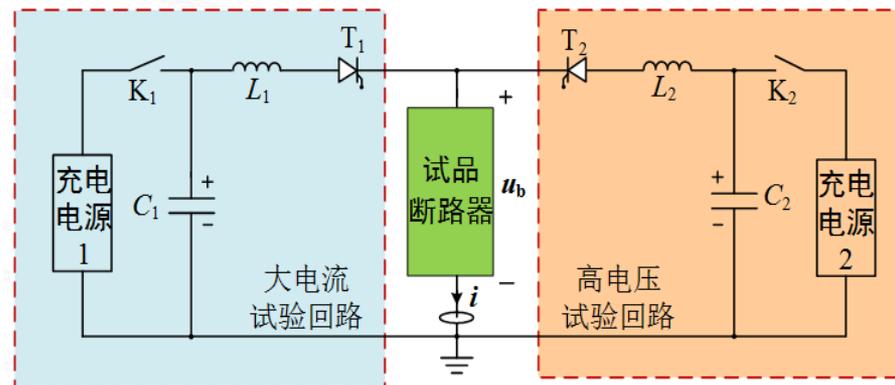
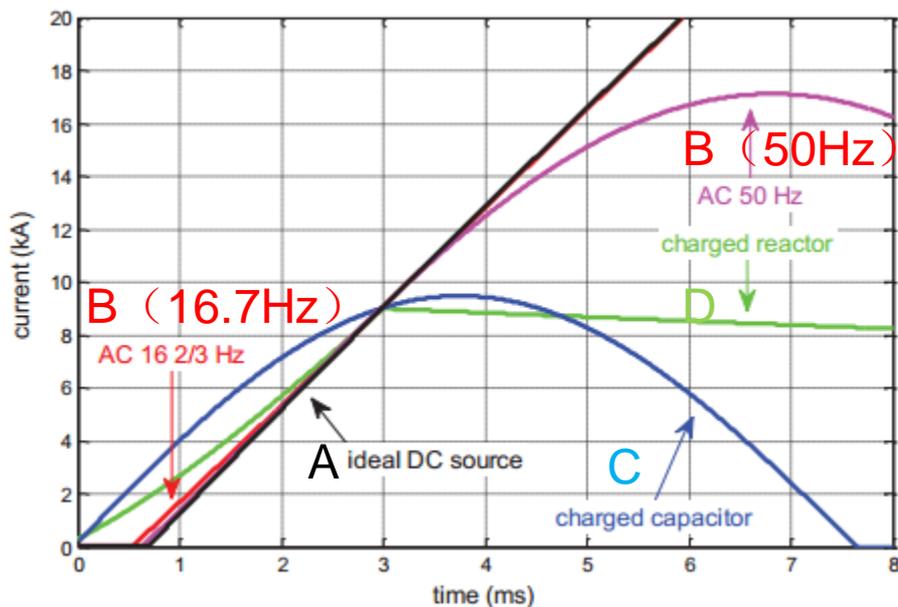
# 7 等效试验技术--开断应力

- 基于应力特征与作用对象，提出了断路器试验必须提供直流电流、最大电流变化率、故障电流峰值、直流电压等应力；
- 实际系统中还需要考虑断路器自身故障工况，若故障态应力超出正常工作应力幅值，则试验也应能提供故障态应力。

对象	电流应力	电压应力	热应力
主支路 全桥模块	系统额定电流 $I_N$ 、 短时过电流（故障识别）	--	--
主支路 快速机械开关	系统额定电流 $I_N$ 、 短时过电流（故障识别）	最大暂态电压 $du/dt$ 、 暂态电压峰值 $U_p$ 、 系统额定电压 $U_{DC}$	--
转移支路 全桥模块	最大故障电流 $di/dt$ 、 额定开断电流值 $I_p$	最大暂态电压 $du/dt$ 、 暂态电压峰值 $U_p$ 、 系统额定电压 $U_{DC}$	--
耗能支路 MOV	额定开断电流值 $I_p$	--	MOV设计吸收能 量（ $E_{mov}$ ）

# 7 等效试验技术--开断试验电路设计

- 分析了不同电源下试验等效性，低频交流源和LC源均能够较好复现直流源故障应力，LC源更符合柔直系统故障特征；
- 设计了由低频大电流源和高频高电压源复合的双LC源试验电路，可全面复现试验核心应力，同时显著降低了试验容量。



合成开断试验电路

直流断路器分断试验理想电路和试验电流波形  
A: 直流源; B: 交流源; C: LC源; D: 电抗

# 汇报提纲

contents

一、概述

二、混合式直流断路器关键技术

三、混合式直流断路器样机研制

四、混合式直流断路器应用与展望

# 关键零部件及产品研制

## 混合式直流断路器研制

1

大功率半导体组件研制

2

高速机械开关研制

3

高电位供能装置研制

4

控制保护装置研制

5

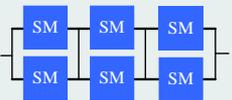
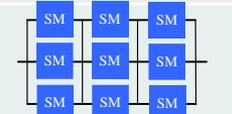
直流断路器紧凑化集成

6

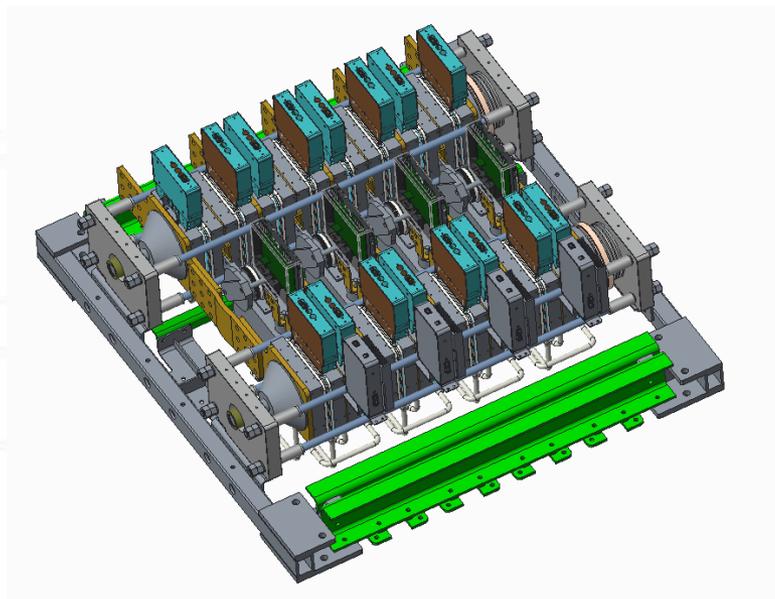
直流断路器全工况试验

# 1 半导体组件研制

- 综合考虑总损耗、器件功率及可靠性，主支路半导体组件采用串并联混合式矩阵式设计，在结构上采用易于维护的可拆卸式的模块化结构；
- 研制出矩阵化主支路半导体组件，提升了断路器通流能力，有效降低了器件损耗（额定通流3kA，损耗低于0.01%），配置旁路保护，可靠性高。

矩阵结构	IGBT	二极管
	1.6kW	1.4kW
	1.2kW	1.0kW
	1.0kW	0.9kW

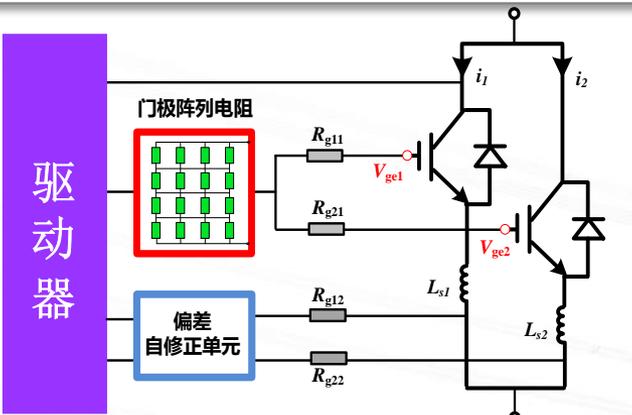
矩阵式设计方案及器件损耗功率



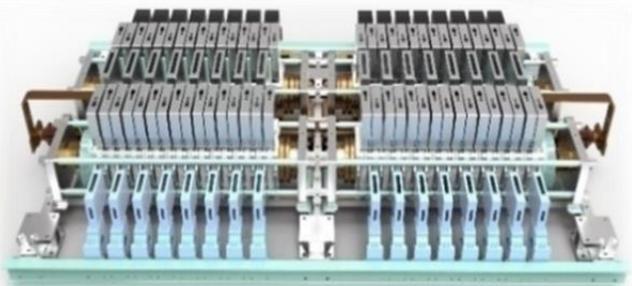
主支路半导体组件

# 1 半导体组件研制

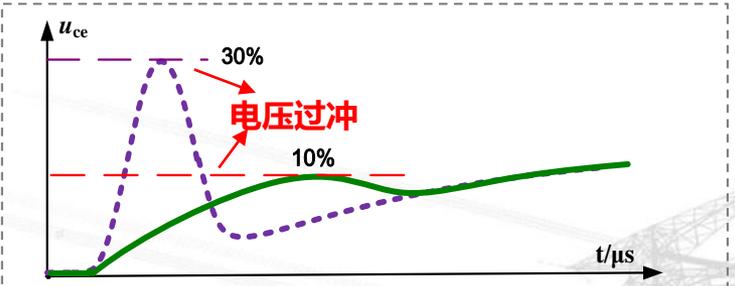
- 研制出门极阵列电阻动态调节智能化IGBT驱动，将并联全控器件动态电流与电压应力偏差控制在 $\pm 3\%$ ；
- 研制出采用空气散热的大组件单元转移支路半导体组件，回路分布电感小，关断过冲低于10%。



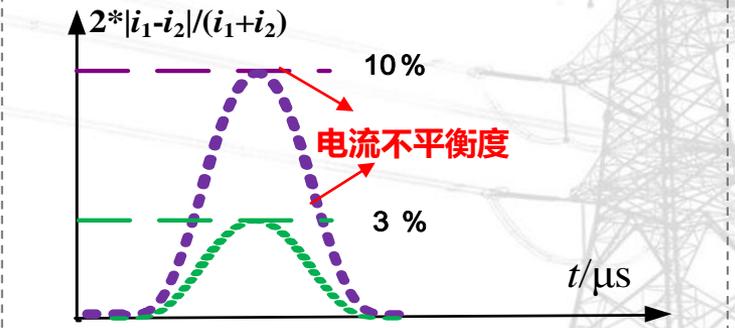
智能化驱动应力动态调控



转移支路半导体组件



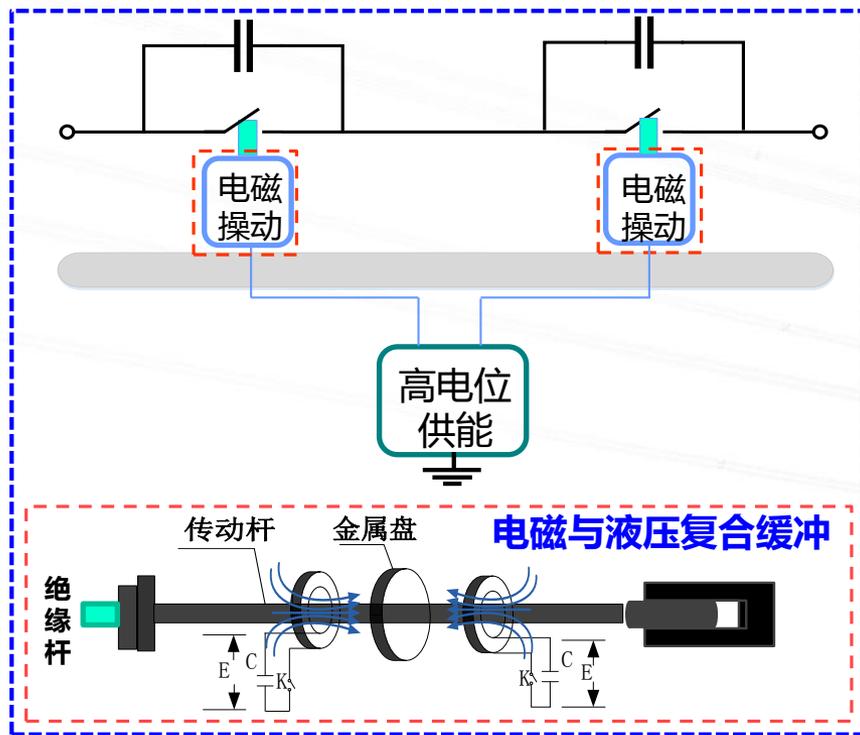
电压过冲抑制



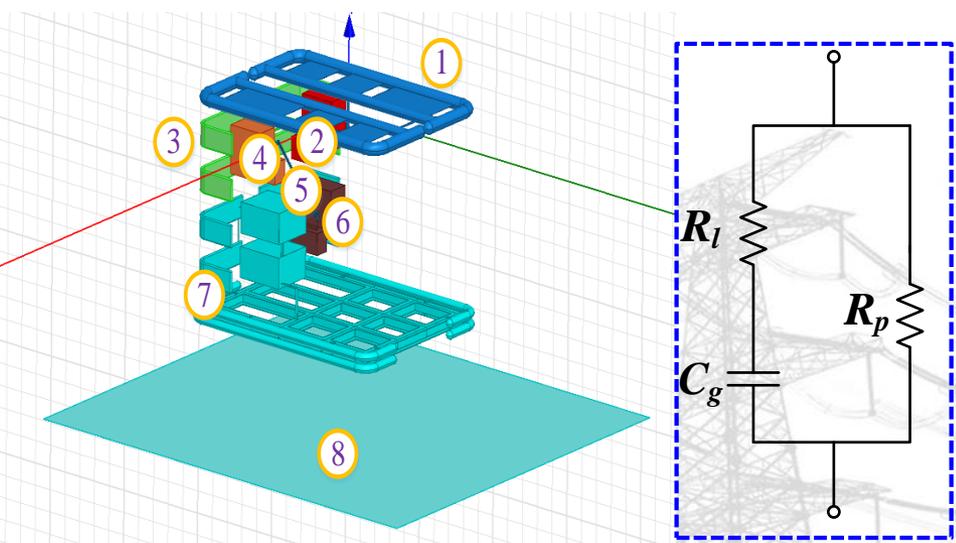
动态均流控制

# 2 高速机械开关研制

- ❑ 设计了多断口串联真空高速机械开关，提取了断口之间阻容装置系统设计参数，各断口配置均压电路实现超高速开关内部电压偏差不得超过5%；
- ❑ 研制出电磁液压复合的操动与缓冲机构，分闸加速度达3000g，实现了8kg运动单元在90kN强冲击力下2ms内短距离平滑缓冲和可靠制动。



多断口真空高速开关



分布参数提取

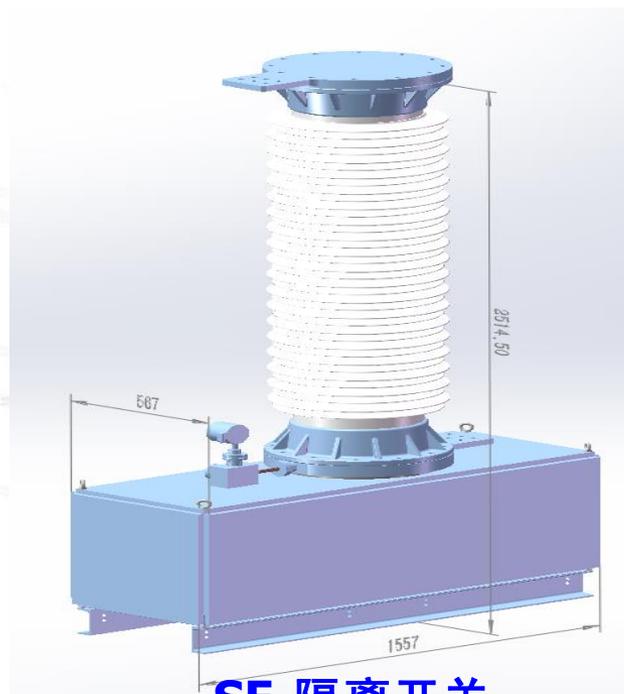
阻容均压示意图

## 2 高速机械开关研制

- 研制出参数为180kV/3000A 的真空高速开关模块，可在1.8ms内达到额定开距；
- 研制出参数可达250kV/3kA的SF<sub>6</sub>高速开关模块，2ms行程可耐受操作电压490kV。



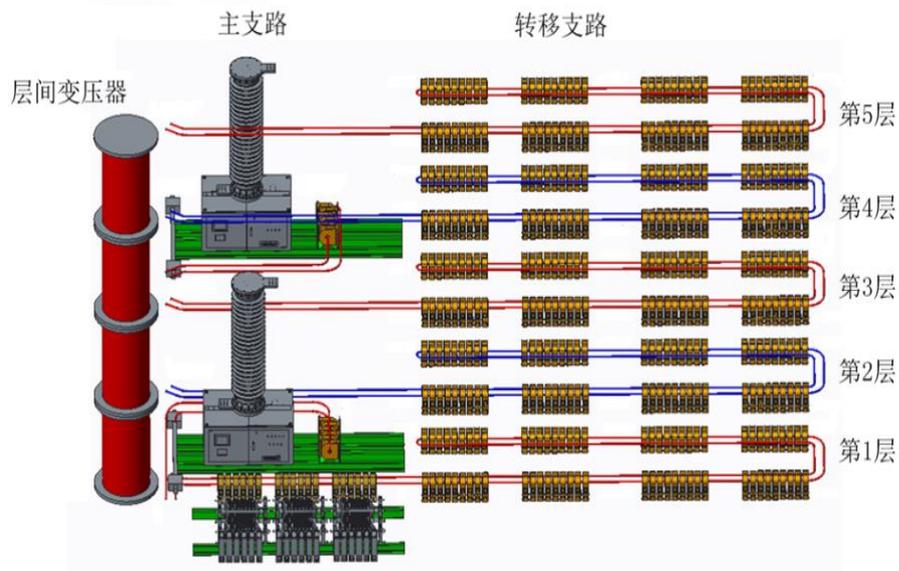
真空高速开关



SF<sub>6</sub>隔离开关

### 3 高电位供能装置研制

- 研制出由工频变压器、电缆与分布式磁环构成的供能系统，实现了对直流断路器上百级半导体组件单元和高速隔离开关的分布式供能；
- 研制了新型的电压可达到500kV的无局放干式隔离变压器，解决了内部绝缘和局放问题，实现了断路器对地可靠电压隔离。



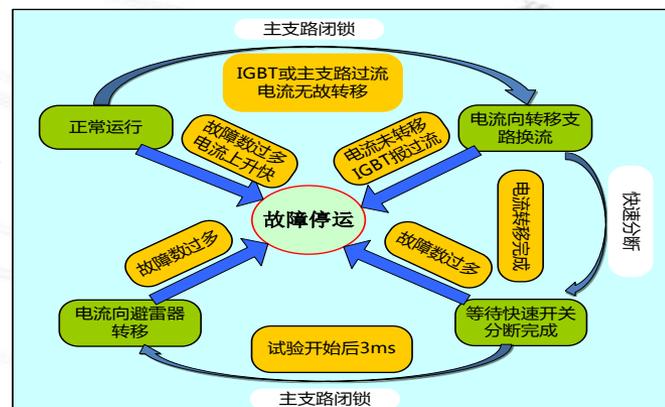
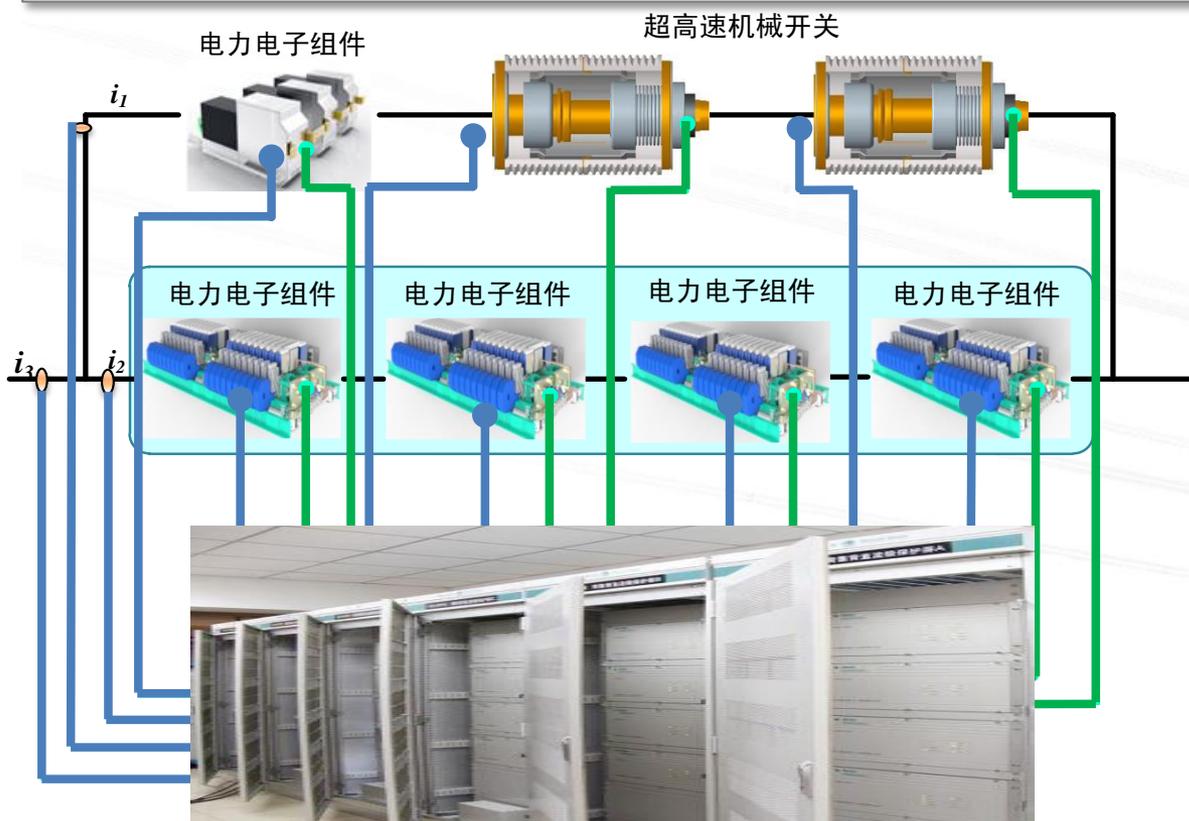
分层分级供能系统设计



500kV高压隔离变压器

# 4 控制保护装置研制

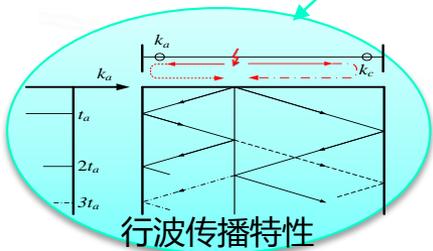
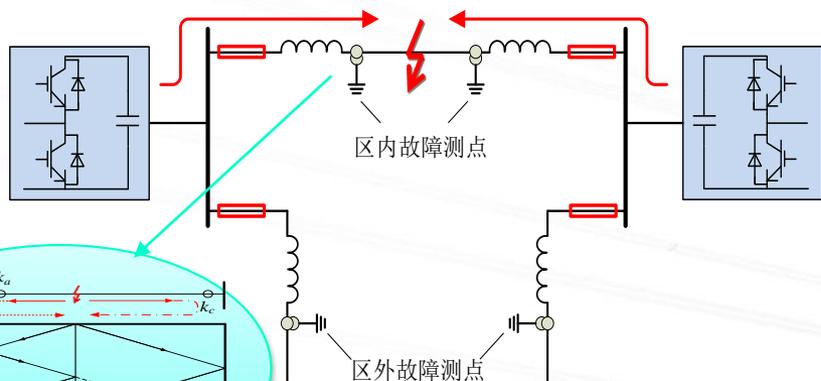
- 建立了断路器内部换流过程等效模型，提出了综合多电气因子和子模块状态的换流判据，提高了判断的准确性和快速性，缩短了整体分断时间；
- 采用全局时钟共享、传输延时补偿技术，研制了同步触发单元，实现了差异小于100ns的数百级IGBT组件同步关断。



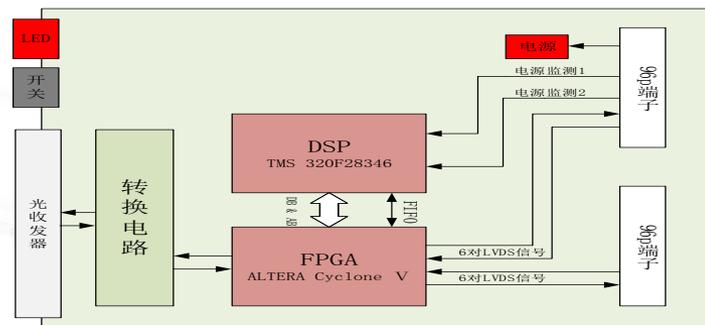
控制保护逻辑图

# 4 控制保护装置研制

- ❑ 研制了采用本地信号的单端保护装置，利用行波突变量等快速变化信号实现对区内与区外故障快速识别；
- ❑ 通过不同故障类型与地点下区内外故障识别测试，研制出具备在1.3ms可靠发出断路器分断命令的保护装置，实现直流断路器快速分断。



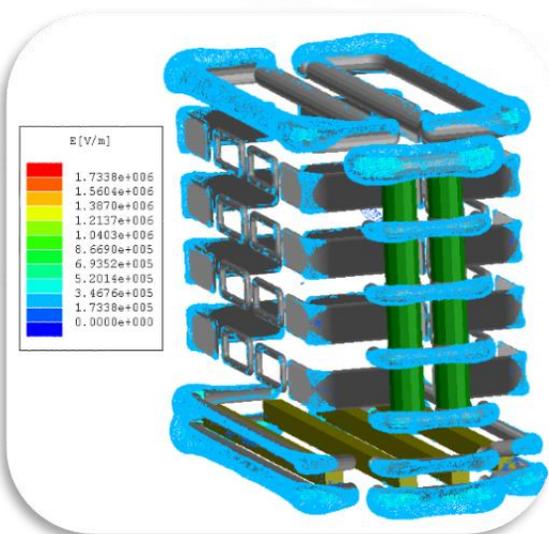
行波突变量检测



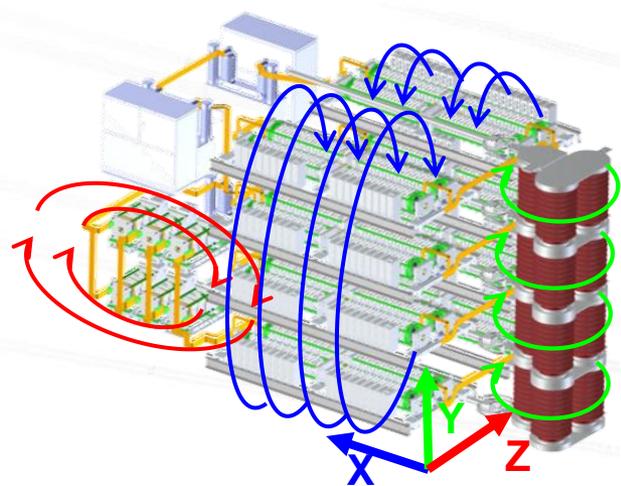
基于本地信号保护装置

# 5 直流断路器紧凑集成--结构设计

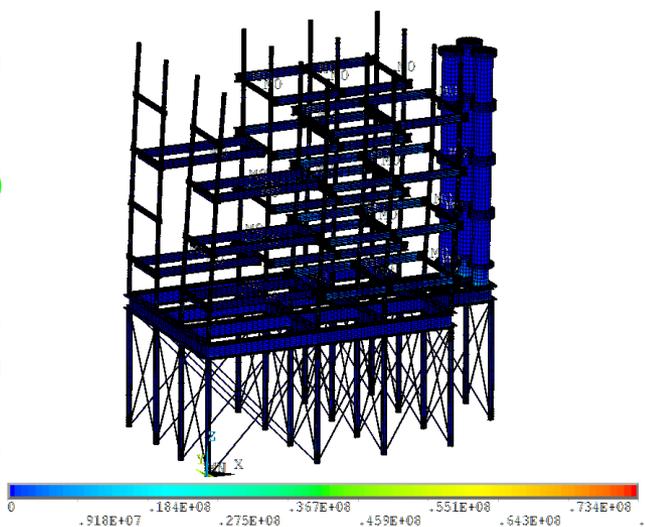
- 提出了各核心部件单一平台高度集成的整体式设计方法，实现了断路器内部低感设计，同时有效解决了绝缘、均压等问题；
- 采用可灵活扩展的单一模块化设计理念，实现了电气与结构的有效统一，可实现200~500kV电压等级的灵活扩展，便于工程推广。



整体电场分析



空间磁场正交约束技术



抗震应力分析

# 5 直流断路器紧凑集成--产品开发

2014、2017年分别开发出200kV和500kV混合式直流断路器。



- 额定电压：200kV
- 额定电流：3kA
- 开断时间：3ms
- 开断电流：15kA
- 吸收能量：20MJ

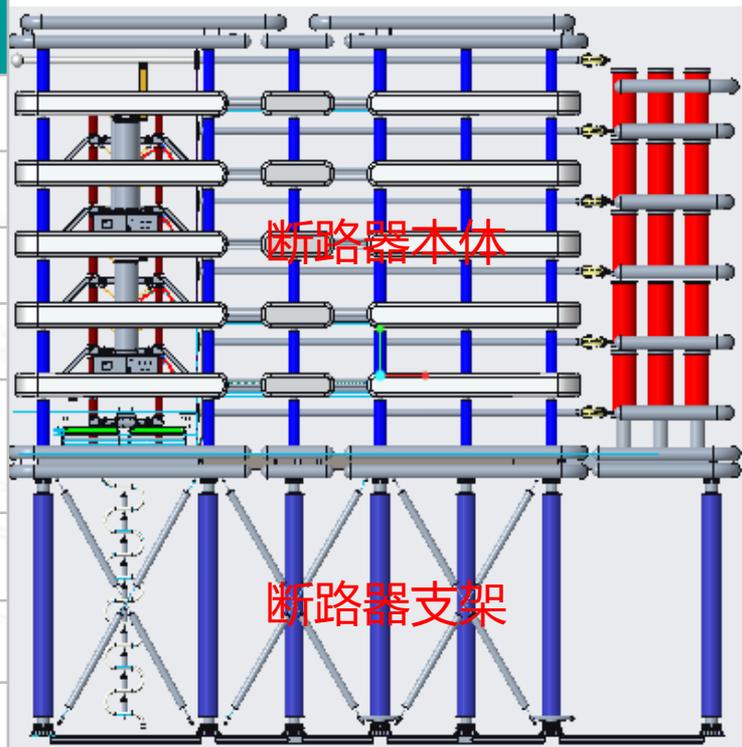


- 额定电压：535kV
- 额定电流：3.3kA
- 开断时间：2.5ms
- 开断电流：25kA
- 吸收能量：150MJ

# 6 全工况试验--试验项目

基于直流断路器原理及其在实际系统中应力特征，提出了全面考核设备性能的类型试验项目，主要分为绝缘、通流与开断性能。

试验类型	试验对象	试验项目
型式试验	断路器支架	对地直流耐压试验
		对地操作冲击试验
		对地雷电冲击试验
	断路器本体	端间直流耐压试验
	断路器本体	最大连续运行及过负荷电流试验
		额定电流开断
		短路电流开断
		额定电流关合
	重合闸	

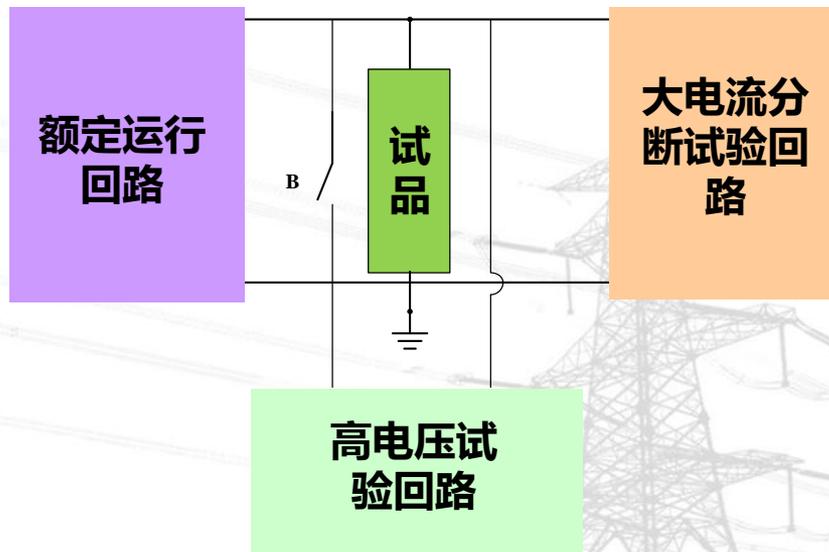


## 6 全工况试验--装置开发

- 基于多源复合的高压直流断路器全工况等效试验方法，建成了低容量的成套试验装置；
- 装置最大稳态电流6kA， $di/dt$ 为1~10kA/ms可调，故障电流峰值100kA，直流电压550kV，具备500kV以下直流断路器等效试验需求。



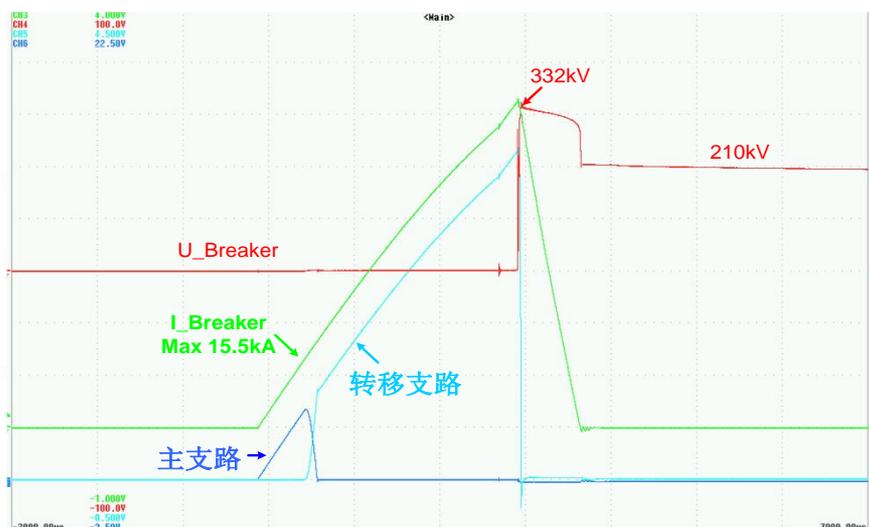
合成试验装置外观



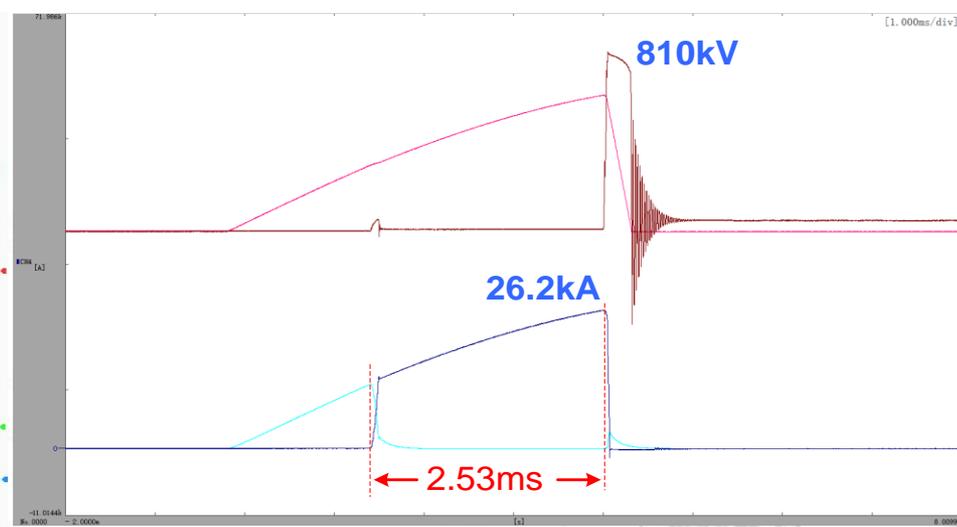
合成试验装置拓扑

# 6 全工况试验--试验结果

所研制200kV和500kV样机完成了全套绝缘和运行试验考核，试验结果表明：断路器在各种过电压下的绝缘特性以及不同运行工况下通流、开断与关合特性满足设计要求。



200kV直流断路器分断试验波形



500kV直流断路器分断试验波形

# 汇报提纲

contents

一、概述

二、混合式直流断路器关键技术

三、混合式直流断路器样机研制

四、混合式直流断路器应用与展望

# 1 舟山5端直流工程

- $\pm 200\text{kV}$ 舟山五端柔性直流输电工程是目前国际上端数最多、容量最大的多端柔性直流工程；
- 因缺少直流断路器，舟山系统自投运以来面临着换流站无法带电投切，直流故障无法快速隔离等，制约了舟山系统运行的灵活性与可靠性。



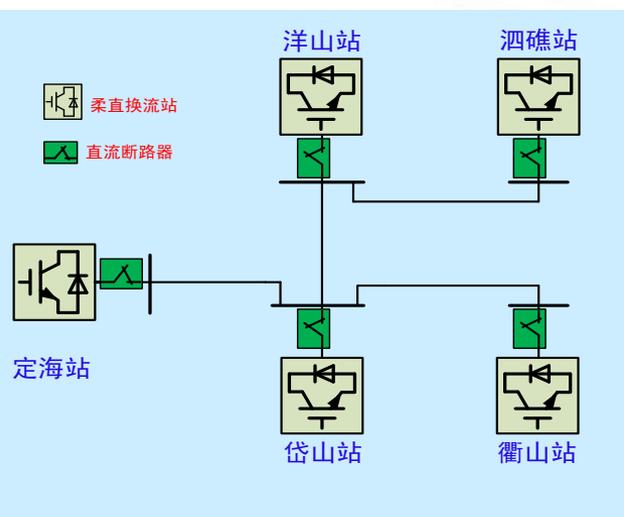
舟山5端柔性直流工程地理图

## 工程参数

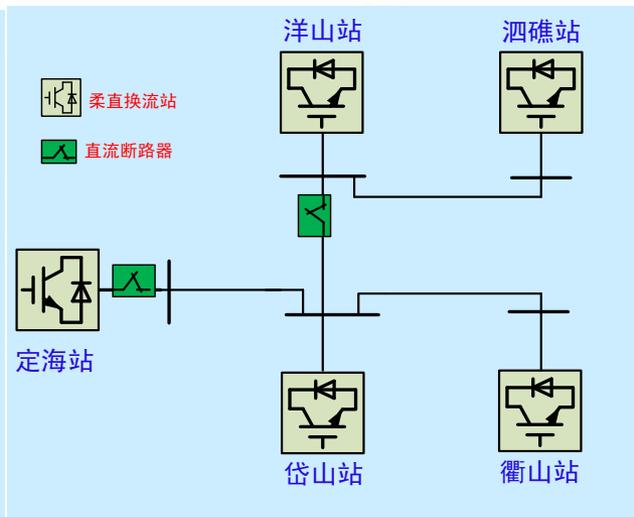
直流电压	$\pm 200\text{kV}$
换流站容量	400/300/100/100/100MW
线路总长度	141km

# 1 舟山工程直流断路器配置

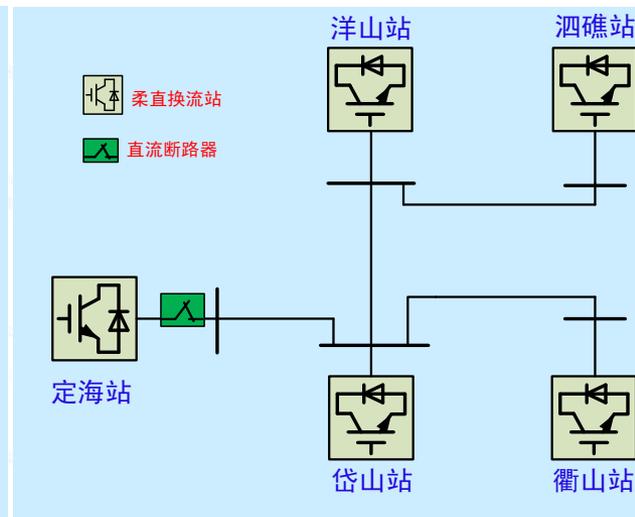
- 综合考虑系统保护策略、核心换流站的安全运行以及设备经济性等因素，提出了舟山系统安装5套、2套或1套断路器三种典型技术方案。
- 采用在舟定站出口安装1套直流断路器（方案3），快速隔离定岱线直流海缆故障（至今已发生约3次，频率最高），实现健全区域快速重启。



方案1：5套配置



方案2：2套配置



方案1：1套配置

# 1 200kV直流断路器--工程示范

2016年12月，实现了高压直流断路器工程示范应用。



舟山工程舟定站正、负极200kV直流断路器

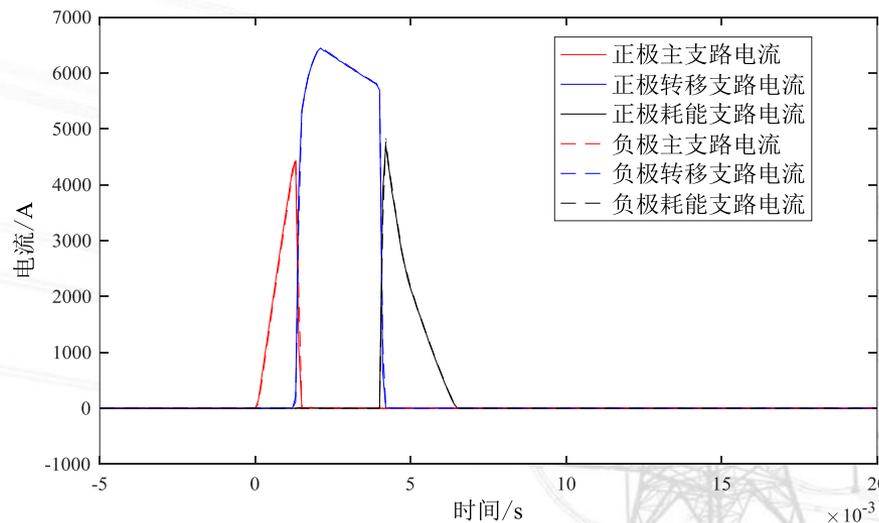
# 1 200kV直流断路器--人工短路试验

2019年5月，完成了舟定站出口单、双极人工短路对直流断路器性能考核。

- 单极接地工况：断路器与系统控保协同配合完成分断，耐受住对地约380kV电压；
- 双极短路工况：断路器在3ms内成功开断6.4kA电流，暂态开断电压300kV。



双极人工短路瞬间

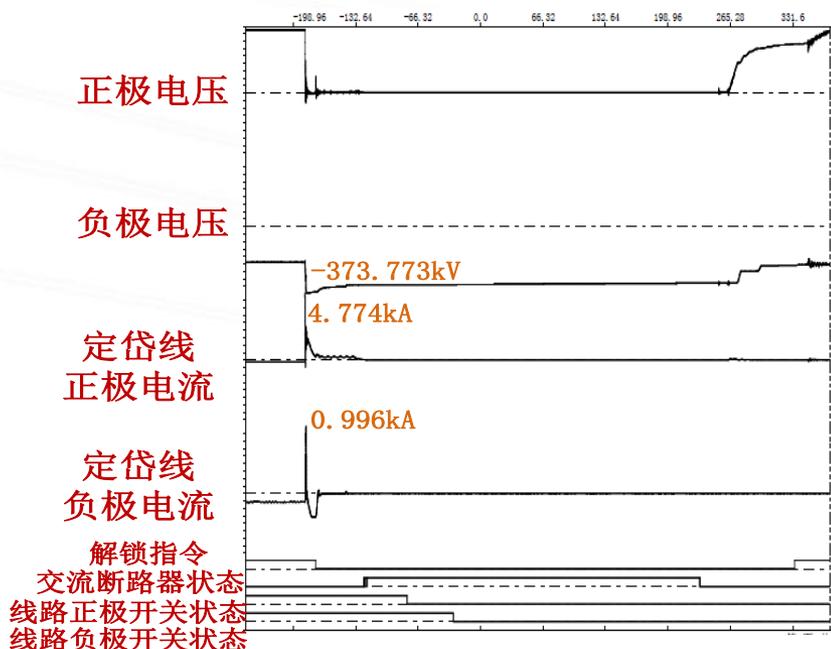


双极短路开断波形（断路器各支路电流）

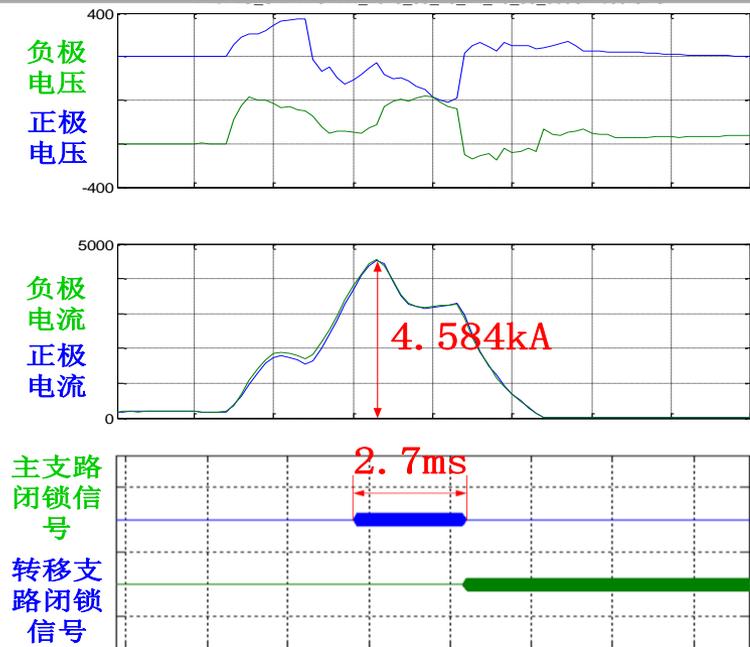
# 1 200kV直流断路器--系统故障开断

自投运以来多次实现直流海缆单、双极故障清除，**舟山工程可用率由87%提升至99%**。

- 2018年5月和11月，分别正确完成定岱线生正、负极海缆单极接地故障隔离；
- 2019年3月，正确完成舟山工程双极短路故障隔离，成功在2.7ms内分断4.58kA故障电流。



舟岱站故障时刻现场录波

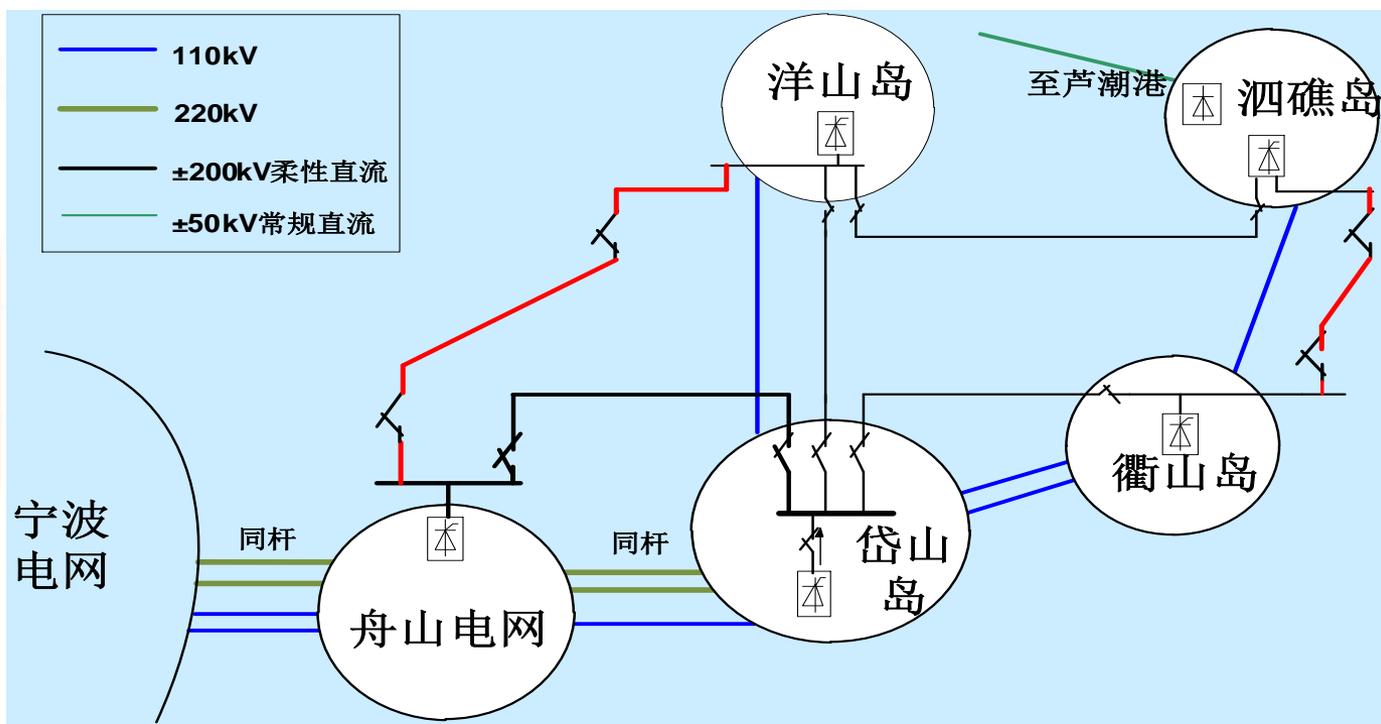


双极短路故障直流断路器录波

# 1 200kV直流断路器--应用前景

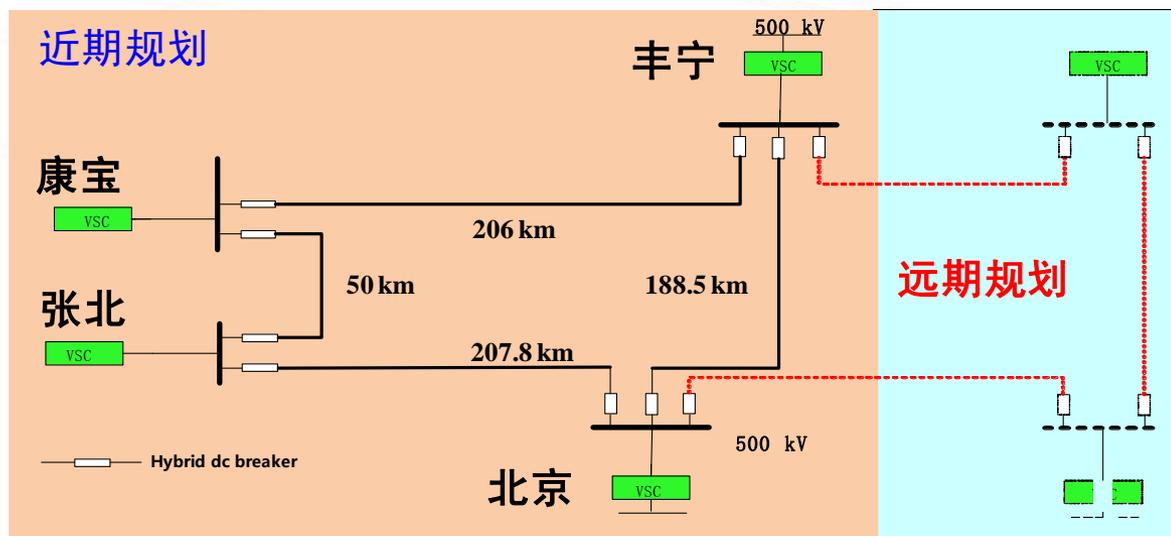
- 舟山系统未来将通过架空线将舟山电网与洋山站、衢山和泗礁换流站连接形成直流电网，实现多端直流向直流电网的跨越；
- 架空线路需两侧需配置200kV直流断路器，实现直流故障快速清除。

## 舟山联网规划



## 2 500kV混合式断路器应用

- 张北规划建设4端 $\pm 500\text{kV}/3000\text{MW}$ 柔性直流电网，经架空线向北京输送张北地区风、光等清洁能源；
- 采用“半桥MMC”换流阀和直流断路器方案，共计16台，其中有14台采用500kV混合式直流断路器（另2台机械式）；
- 远期规划，在四端环网基础扩建成日字型6端直流电网，增加500kV断路器8台。

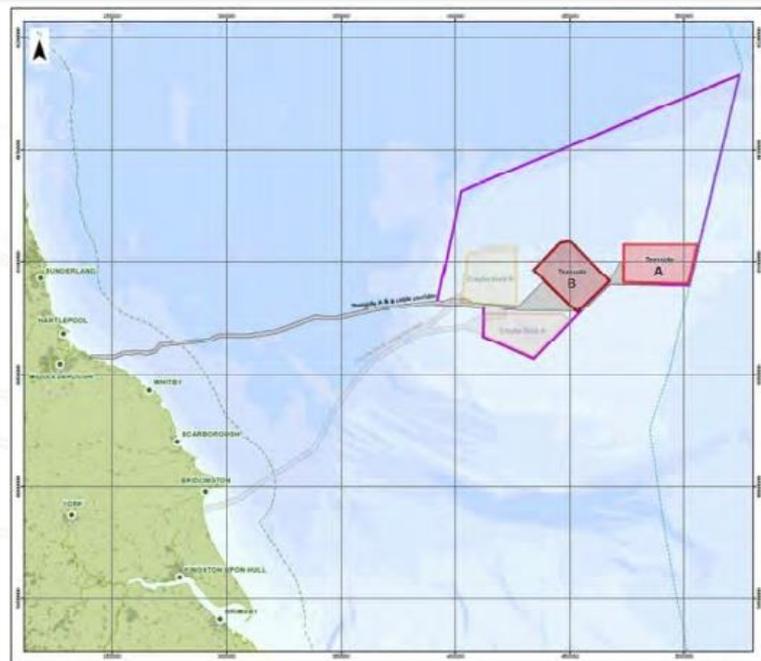


### 3 直流断路器海外应用

- 英国Sofia、德国DolWin5等多个海外直流输电工程在积极开展320kV直流断路器应用可行性分析和前期建设规划；
- 希腊国家电网公司规划建设500kV柔性直流电网实现陆上与岛屿供电互联、推动岛可再生能源开发利用，对500kV直流断路器应用带来需求。



德国DolWin直流输电工程



英国Sofia直流输电工程

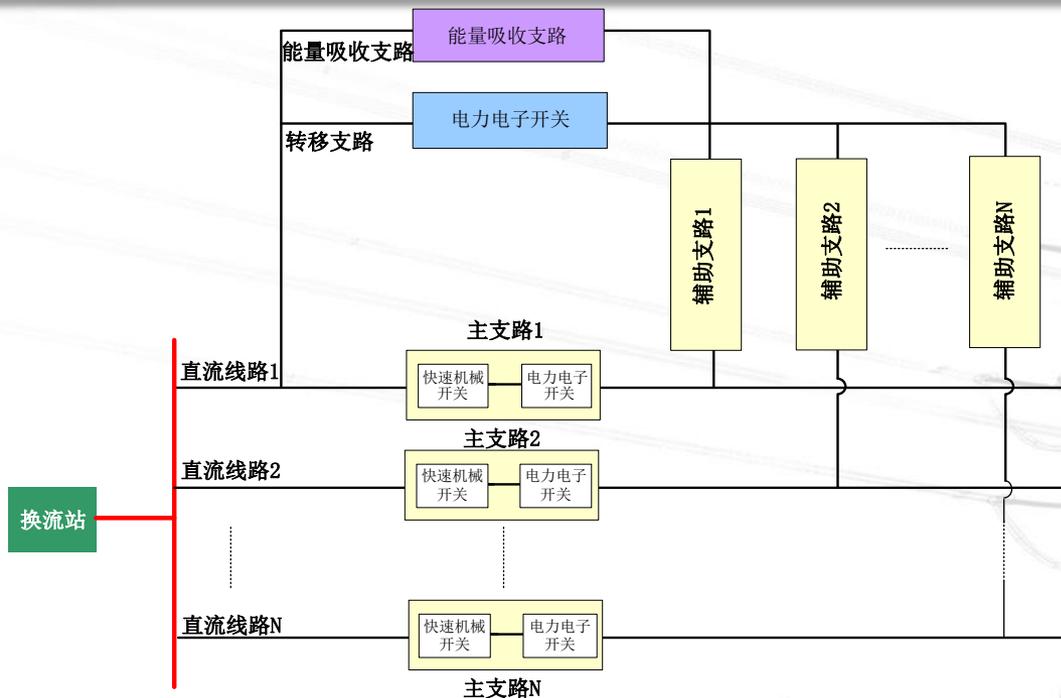
# 4 总结

- 高压直流断路器是多端直流和直流电网构建的核心装备，对保障直流系统可靠、灵活与经济运行意义重大；
- 混合式直流断路器在舟山工程成功示范应用有力验证了该技术可行性与可靠性；
- 推动混合式直流断路器规模化应用，需进一步开展拓扑、电气、结构等优化设计，提升直流断路器综合技术经济性能。

# 5 展望

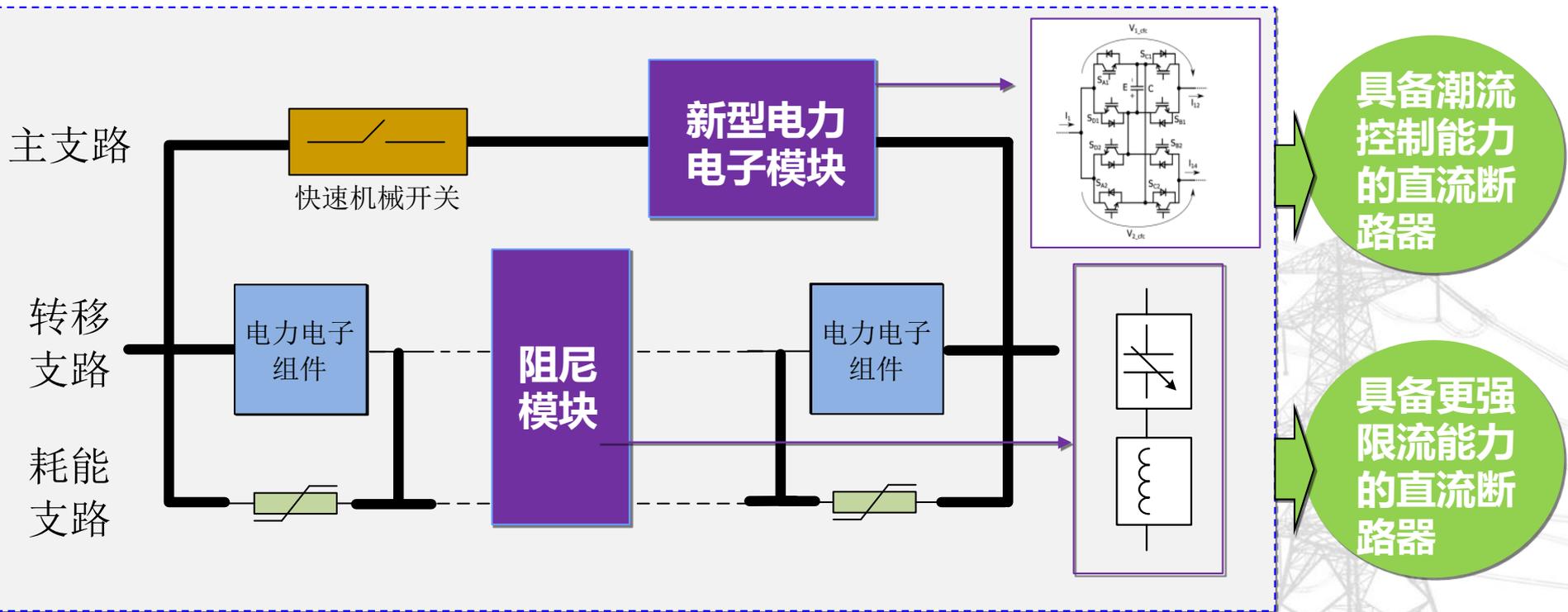
- 随着直流电网规模扩大，将会形成单站多直流出线的网架结构，每条线路配置均两台直流断路器会对影响工程经济性；
- 混合式直流断路器成本集中在转移支路电力电子组件，其在运行中长期处于“不工作状态”；
- 开展组合式断路器技术研究，共用同母线多台直流断路器转移支路，相较于布置独立断路器方案，整体经济性将大幅提升。

组合式直流断路器框图



# 5 展望

混合式直流断路器可控性强、灵活度高，在直流电网中充分开发其核心部件电力电子组件功能，实现其与直流潮流控制器、限流器等电力电子装备深度融合，打造“一体化、多功能”柔直输电装备。



**谢谢！**

