



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

中国特高压直流输电技术现状和发展方向

刘泽洪

国家电网有限公司

2019年11月



1

特高压直流建设总体情况

2

特高压直流输电创新成果

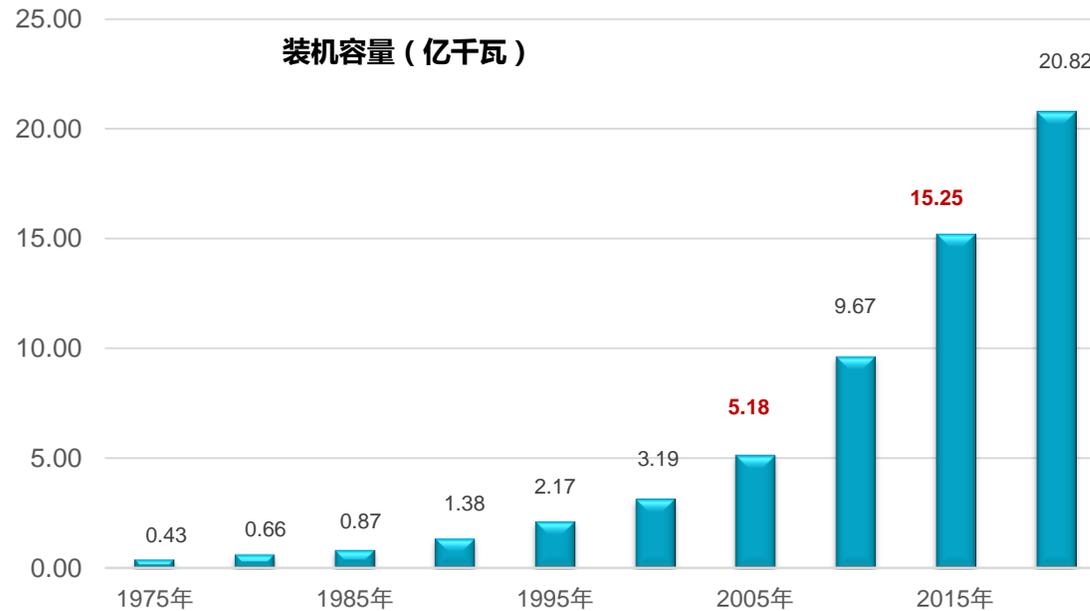
3

特高压直流输电发展展望



■ 中国电力需求呈长期持续增长趋势

□ 本世纪以来，年均新增装机接近1亿千瓦，预计到2020年装机达20亿千瓦以上。从2006年到2016年全社会用电量已翻番，预计到2030年将达到11万亿千瓦时。



■ 中国能源与负荷呈逆向分布

□ 中国能源与负荷逆向分布。80%以上的能源资源分布在西部、北部，75%电力消费集中在东部、中部，供需相距800~3000km，必须实施能源大范围优化配置。



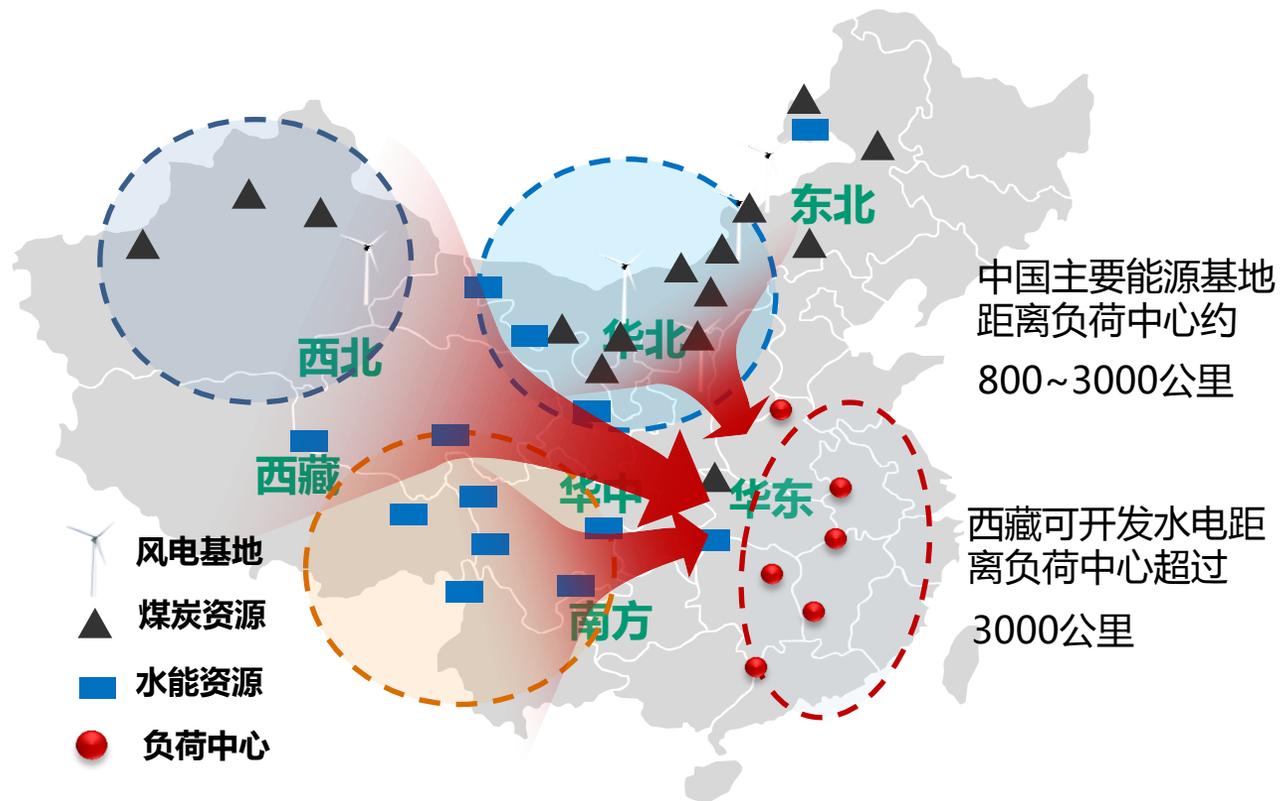
煤炭资源分布在西部、北部



水能分布在西南部



能源需求集中在东中部

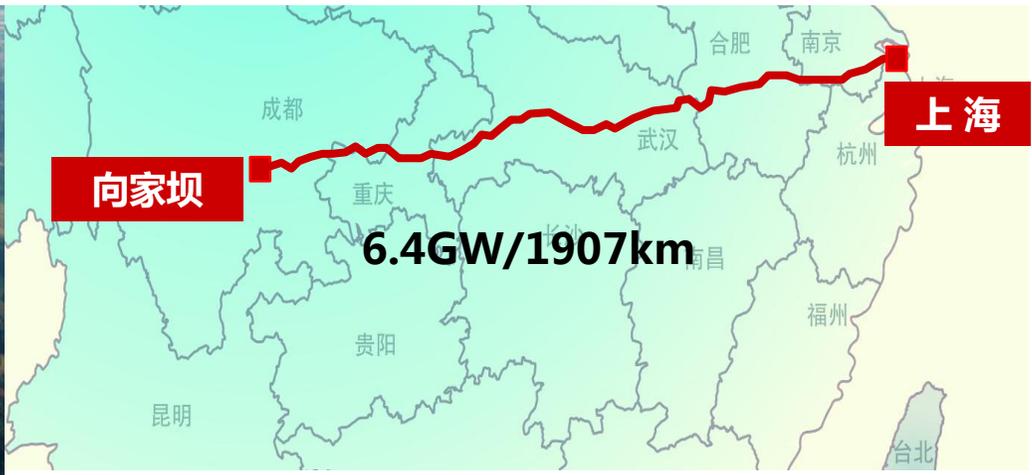


中国能源与负荷分布形态



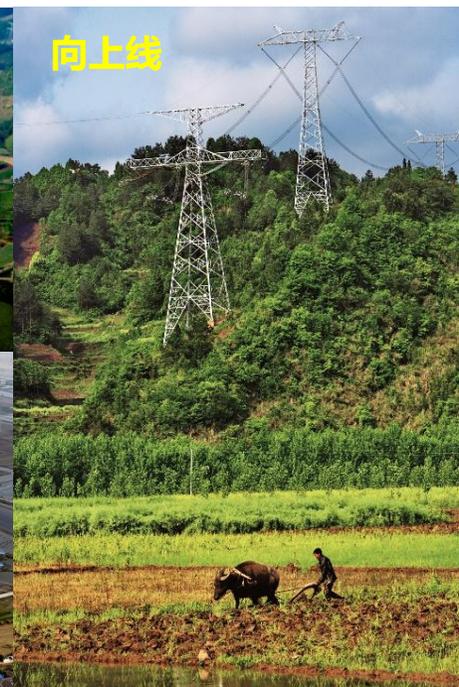
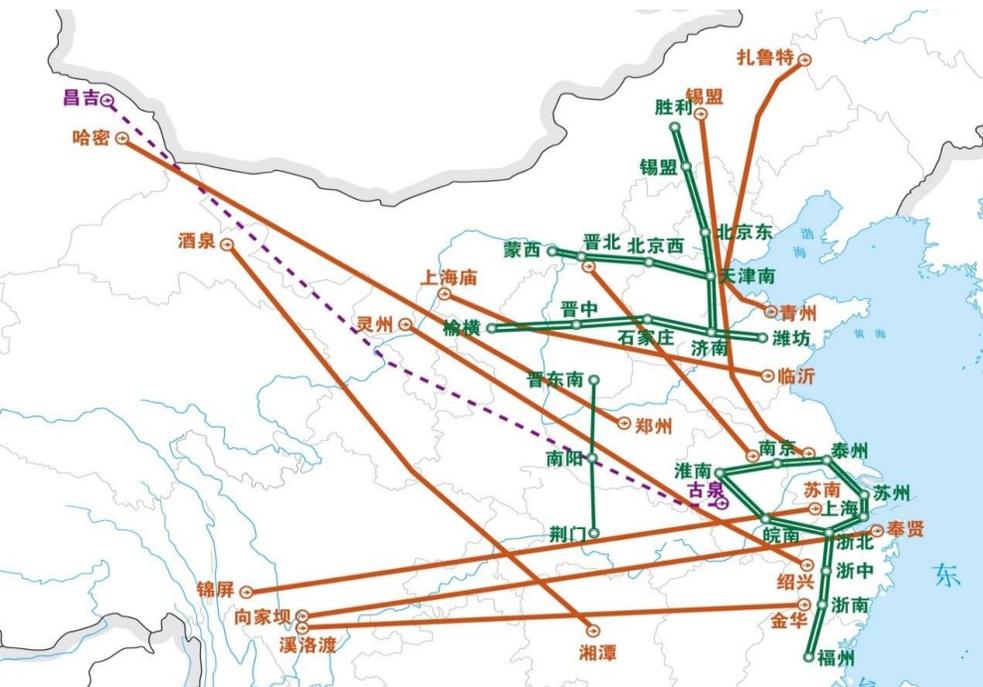
■ 中国特高压直流输电实现国际首创

- 2004年，国家电网公司提出研发±800kV特高压直流输电技术，组织国内外160多家单位，产学研用协同攻关，2010年，国家电网公司向家坝-上海、南方电网公司云南-广东±800kV特高压直流输电示范工程建成投运。



■ 中国特高压直流输电已规模化建设运行

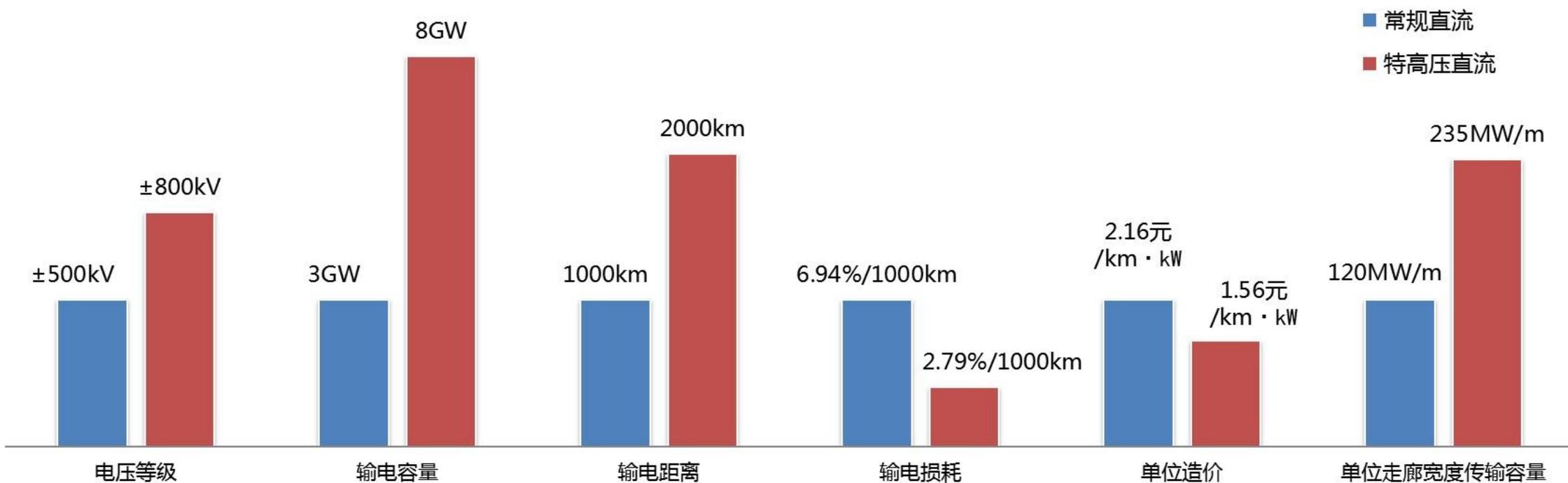
- 目前国家电网公司已建成投运10回±800kV特高压直流工程，额定输送功率从6.4GW、7.2GW、8GW到10GW，最远输送距离达2383km，总换流容量167.2GW，线路总长17245km。





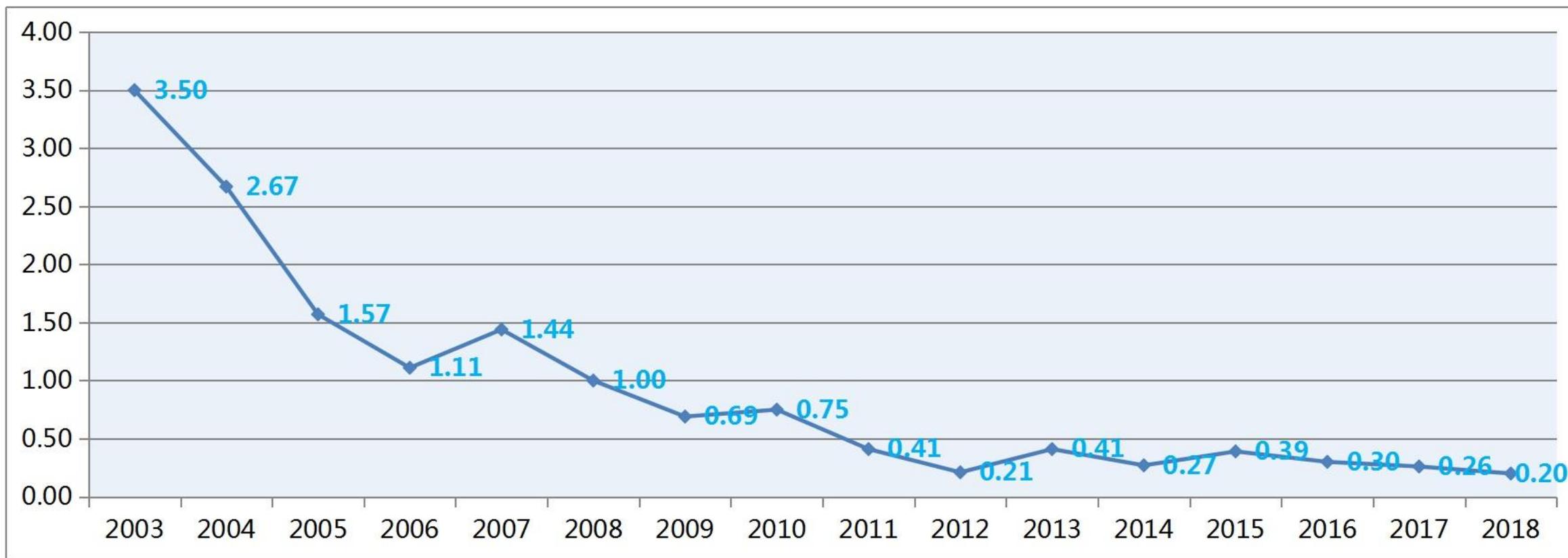
■ 特高压直流输电技术经济指标优越

□ 特高压直流输电具有输送容量大、送电距离远、输电损耗低、走廊宽度小等优点。以±800kV/8GW特高压直流为例，与±500kV/3GW常规直流相比，损耗率由每千公里的6.94%降低到2.79%，每千瓦每公里造价由2.16元降低到1.56元，单位走廊宽度传输容量增大近一倍。



■ 中国特高压直流工程运行稳定

- 已建成特高压直流工程覆盖中国各种复杂地理和气象条件，经受了高温、重冰、大负荷等极端条件的考验，强迫停运次数、强迫能量不可用率等关键可靠性指标显著优于常规直流工程，可靠性水平居世界前列。



直流工程单极年平均强迫停运次数 (次/极·年)



■ 中国特高压直流输电发挥了重要作用

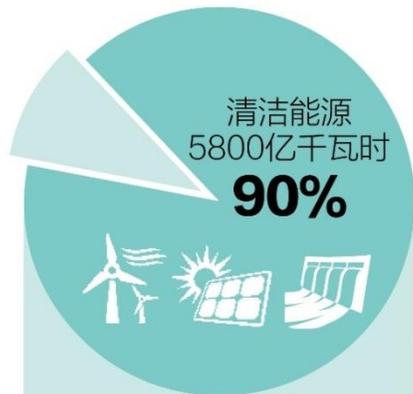
- 截止2017年底，国家电网已累计通过特高压直流向东中部地区送电6500亿千瓦时，其中水电5000亿千瓦时，风电、太阳能发电约800亿千瓦时，清洁能源合计5800亿千瓦时左右，占比接近90%，新能源年均增长87%。



每年可输送电能 **4600亿**千瓦时 = 标准燃煤**1.5亿**吨 = 二氧化碳排放量 **3.9亿**吨
= **3750000**辆 

到2017年底

已建成特高压直流工程
累计输送电量
6500亿千瓦



相当于减少标煤消耗
1.8亿吨
减排二氧化碳
4.9亿吨



1

特高压直流建设总体情况

2

特高压直流输电创新成果

3

特高压直流输电发展展望



■ 特高压直流输电不断创新发展

- 自2010年向上工程建成投运后，国家电网公司特高压直流输电技术不断发展，在过电压与绝缘配合、电磁环境控制、直流设备研制等关键技术方面进一步创新突破，建成多项世界电压等级最高、容量最大的特高压直流工程，实现了**直流电压、输送容量和交流网侧电压**的“三提升”：

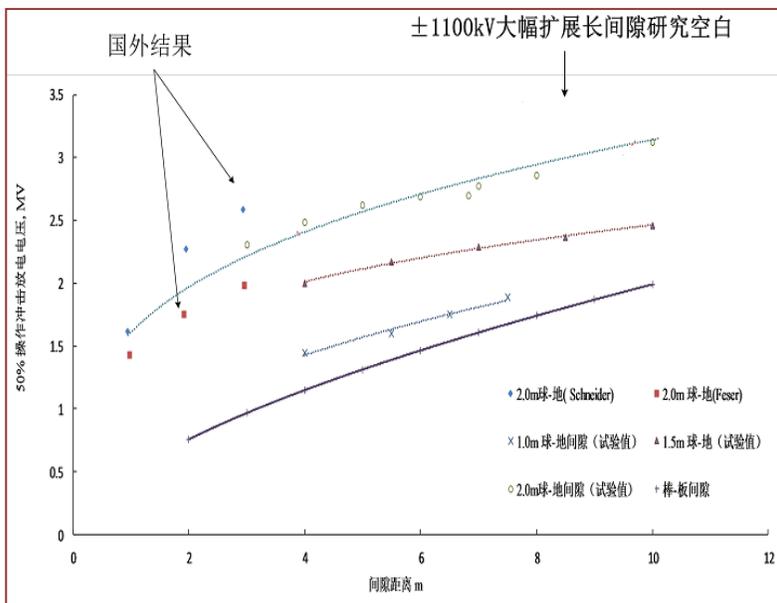
交流电压提升：直流工程接入交流系统电压从500kV发展到750kV和1000kV，有利于大容量直流电能汇集与消纳，提高了系统的安全稳定水平。

直流电流提升： ± 800 kV特高压直流工程额定直流电流从4000A提升至6250A，单位走廊输送功率提升1倍； ± 1100 kV特高压直流额定电流提升至5455A，输送容量达12GW。

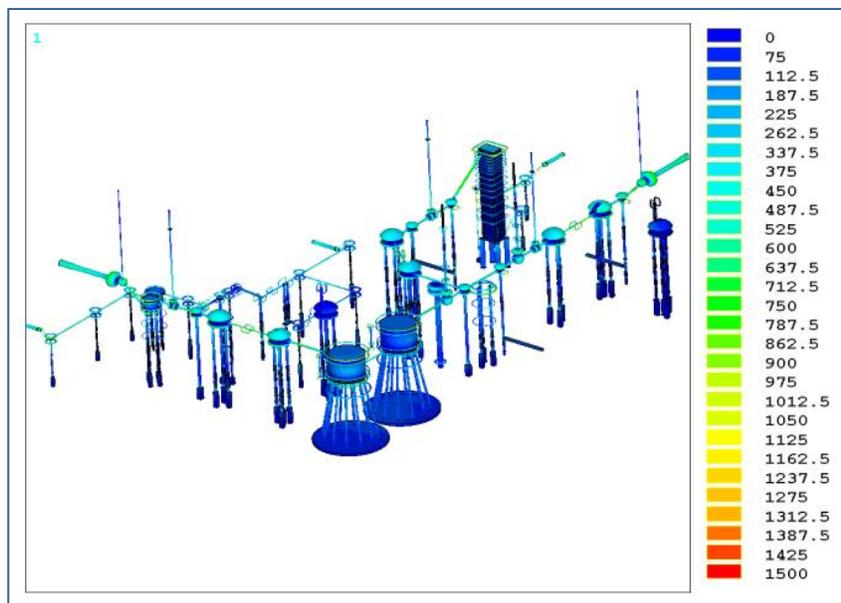
直流电压提升：额定直流电压从 ± 800 kV进一步提升至 ± 1100 kV，线路每千公里损耗率降低到1.6%，输电效率和经济输送距离大幅提高。

■ 攻克了空气间隙与外绝缘配置难题

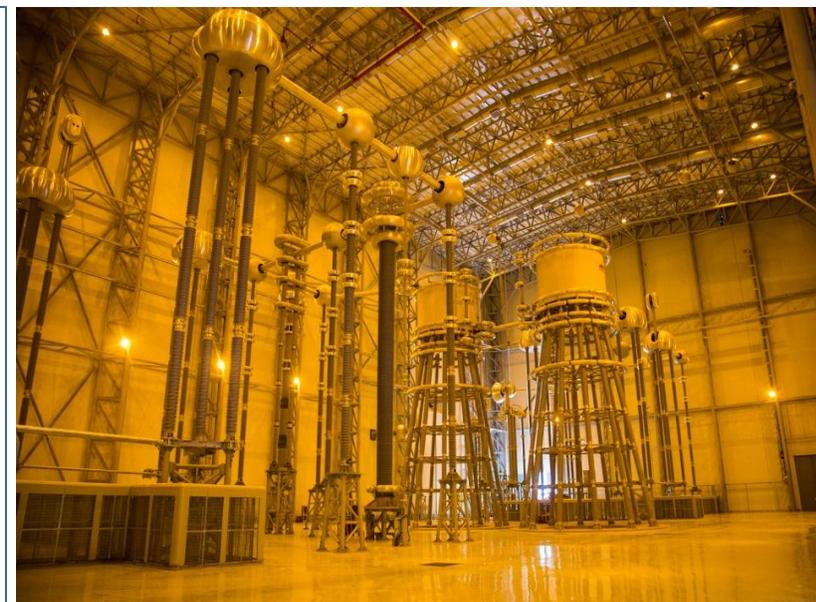
- 直流电压提高到 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ ，饱和效应和静电吸附效应更加突出，阀厅与户内直流场复杂间隙合理选取极为困难，超长线路重污秽、重覆冰、强雷电等复杂环境下的外绝缘可靠配置难度极大。
- 通过开展特高压直流全尺寸绝缘子在重污秽、重覆冰、高海拔条件下真型试验，掌握了大尺度外绝缘的非线性放电特性，确定了基于长波前冲击试验的过电压绝缘配合方法，解决了 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 阀厅与户内直流场复杂空气间隙选取、直流场与直流线路绝缘子选型等难题，保证了绝缘可靠性。



超长间隙放电曲线（世界首创）



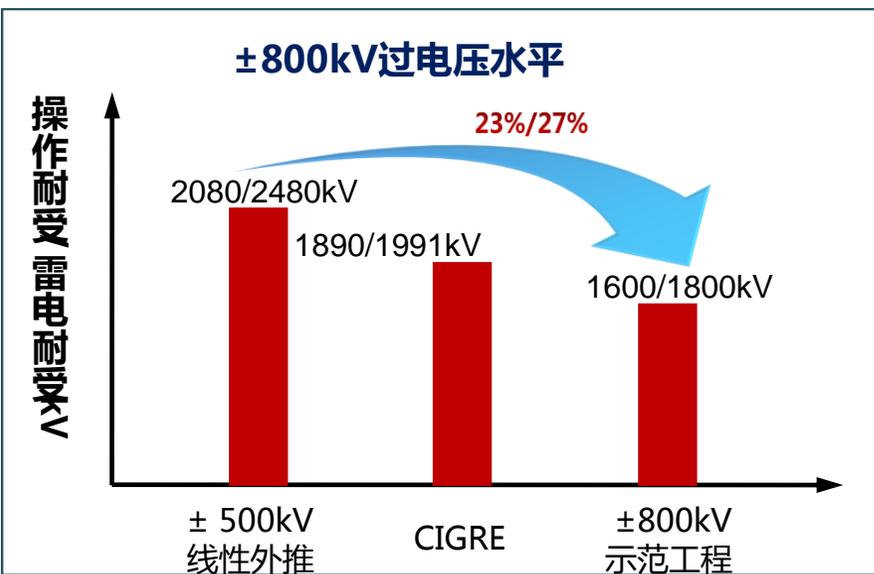
$\pm 1100\text{kV}$ 直流工程户内场区域场强分布



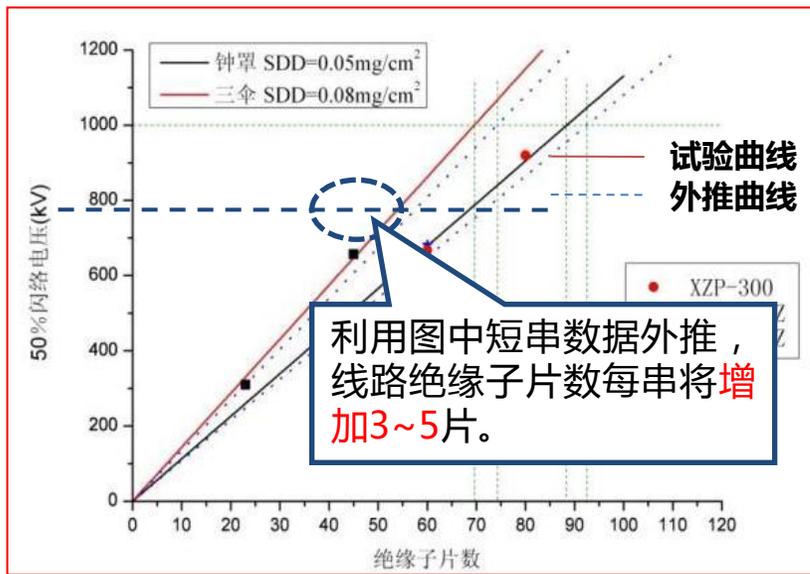
$\pm 1100\text{kV}$ 直流工程户内场

■ 解决了特高压直流过电压与绝缘配合难题

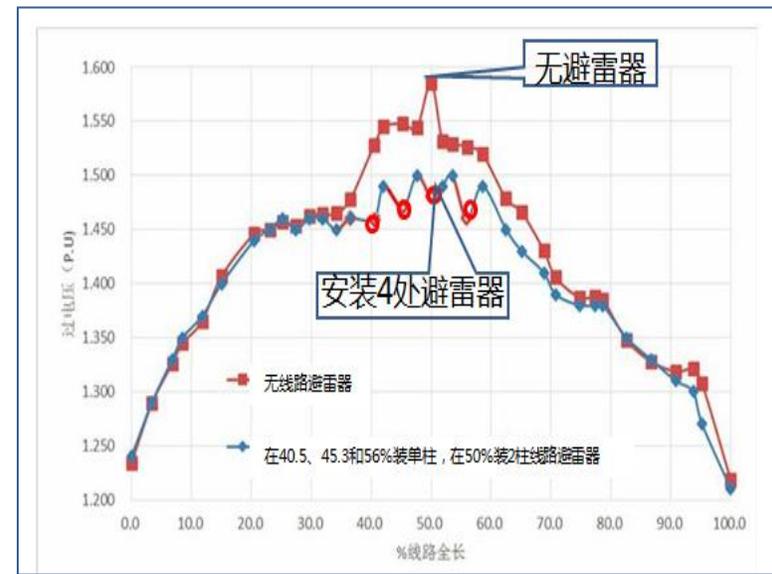
- ±800kV、±1100kV直流工程绝缘水平不能按常规原则简单线性放大，需大量仿真计算和试验验证，最大限度地降低操作及雷电过电压水平，科学经济地确定设备绝缘水平和外绝缘配置。
- 通过科学配置±800kV、±1100kV直流避雷器和参数，优化控制保护配合策略和动作时序，±1100kV工程在高、低端Yy型换流变阀侧分别增设避雷器，优化直流滤波器参数，实现过电压非线性深度抑制，降低了直流设备绝缘水平和研制难度。
- ±1100kV工程或高海拔±800kV工程线路中点及其附近安装避雷器，将全线操作过电压限制在1.5p.u.以下，降低了塔头间隙。



操作过电压深度抑制效果



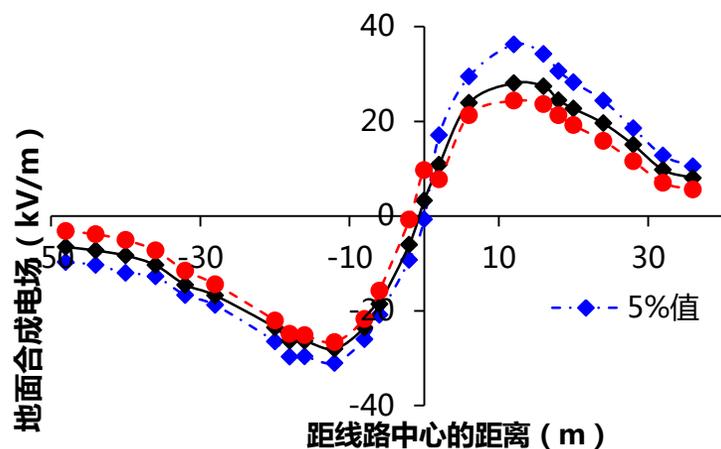
基于全尺寸试验获得了绝缘子污闪特性
避免短串外推造成的偏差



±1100kV直流工程线路避雷器配置方案

■ 掌握了电磁环境特征规律和控制方法

- ❑ $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 直流构成的多导体系统，电压高，电流大，交直流线路走廊关系复杂，尺度大、结构复杂，带电导体表面及附近空间的电场强度显著增大，容易引发强烈电晕放电，电磁环境控制难度极大。
- ❑ $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 工程采用大截面、多分裂导线，增大导线对地距离和极间距离，电磁环境限值与 $\pm 500\text{kV}$ 直流工程保持相同水平，实测优于 $\pm 500\text{kV}$ 工程。
- ❑ 通过采用低噪音设备、优化换流站平面布置、合理设置隔声屏障等措施，换流站场界噪声昼间不大于 60dB(A) ，夜间不大于 50dB(A) ，完全满足国家标准要求。



地面合成电场横向分布



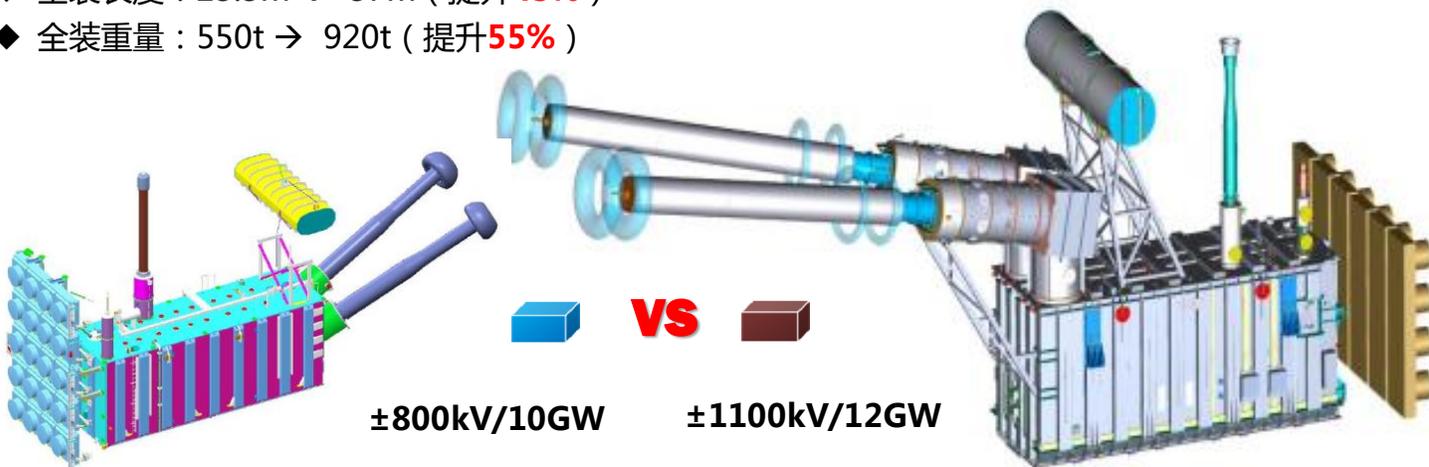
试验线段与电晕试验笼

- 直流 $\pm 800\text{kV}/6250\text{A}$ 、
 $\pm 1100\text{kV}/5454\text{A}$
- 地面合成电场 $\leq 30\text{kV/m}$
- 离子流密度 $\leq 100\text{nA/m}^2$
- 磁感应强度 $\leq 10\text{mT}$
- 可听噪声 $\leq 45\text{dB(A)}$
- 无线电干扰 $\leq 55\mu\text{V/m}$

■ 成功研制世界最高电压等级最大容量换流变

□ $\pm 1100\text{kV}/12\text{GW}$ 、 $\pm 800\text{kV}/10\text{GW}$ 换流变阀侧和网侧耐压水平均大幅提升，换流容量和尺寸重量远超以往工程，绝缘设计、温升控制、机械设计协同优化难度大，通过中外协同攻关，攻克了电、磁、热、机械受力等换流变压器设计、制造难题，成功研制了800kV、1100kV换流变压器。

- ◆ 容量：500MVA \rightarrow 600MVA (提升**20%**)
- ◆ 阀侧绝缘水平：1600kV \rightarrow 2100kV (提升**31%**)
1小时ACLD：951kV \rightarrow 1297kV (提升**36%**)
- ◆ 铁芯重量：220t \rightarrow 330t (提升**50%**)
- ◆ 全装长度：25.5m \rightarrow 37m (提升**45%**)
- ◆ 全装重量：550t \rightarrow 920t (提升**55%**)



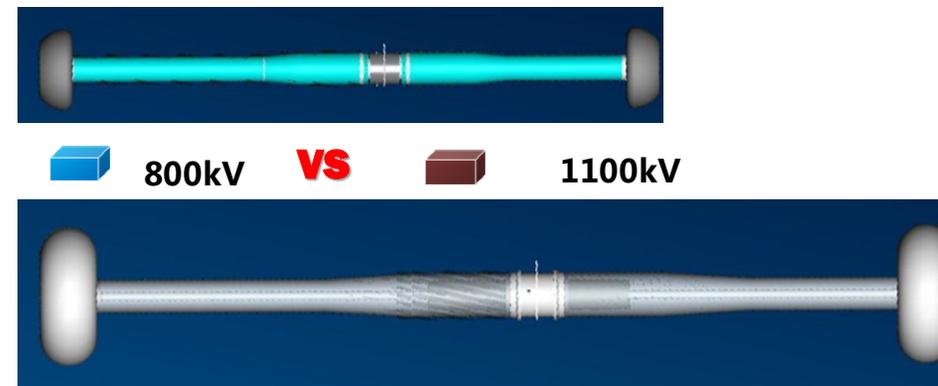
1100kV、800kV换流变压器

■ 成功研制出最高电压等级的直流套管

□ 解决了内外绝缘统筹、轴向径向电场协调、绝缘增厚与散热，尺寸增大与机械受力平衡、超大尺寸电容芯子生产等难题，成功研制了800kV/6250A、1100kV/5500A阀侧套管。

□ 在绝缘耐受水平显著提高条件下，确保套管轴向、径向电场合理分布，并妥善解决端子受力、温升等引起的复合形变对内绝缘的影响，成功研制1100kV直流穿墙套管。

- ◆ 干弧距离：户内侧- 6.7m \rightarrow 9.3m (提升**40%**)
户外侧- 8.9m \rightarrow 12.3m (提升**40%**)
- ◆ 总长度：18.8m \rightarrow 26.2m (提升**40%**)
- ◆ 重量：4t \rightarrow 7.5t (提升**87.5%**)



1100kV、800kV直流穿墙套管

■ 成功研制世界最大容量6英寸晶闸管

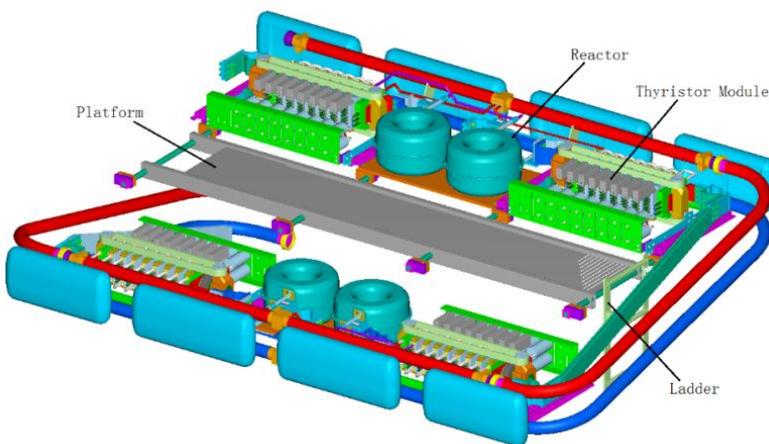
- 通过提高硅单晶的均匀性，增加阴极有效面积和初始导通线长度，优化管壳结构降低热阻，优化台面造型增加阻断能力。研发出7.2kV/6250A和8.5kV/5500A的6英寸晶闸管，在提升通流能力同时，控制关断时间、通态压降等参数，提高了抵御换相失败能力。



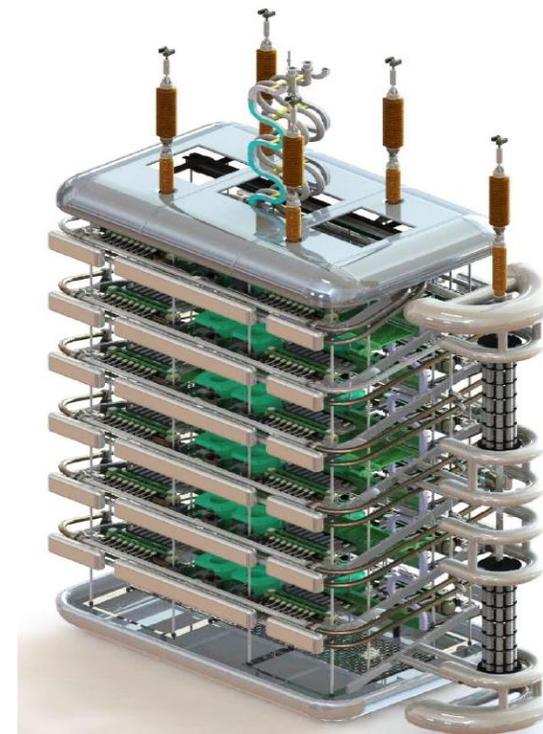
7.2kV/5500A 6英寸晶闸管

■ 成功研制世界最高电压/容量的晶闸管换流阀

- 开展换流阀本体全域电场仿真，优化均压电极外形尺寸，改善内部杂散电容分布，控制阀塔不均匀系数，成功研制了800kV（6250A），1100kV（5500A）特高压直流换流阀。



换流阀组件



1100kV换流阀

■ 成功研制大截面导线

- 成功研制并在特高压直流工程推广应用了1250mm²大截面导线，开发了配套金具、施工机具，掌握了大截面导线施工技术和防振技术，进一步提高了工程的输送能力、降低了线路损耗、改善了电磁环境。



钢芯铝绞线
JL1/G3A-1250/70-
76/7

钢芯铝绞线
JL1/G2A-
1250/100-84/19

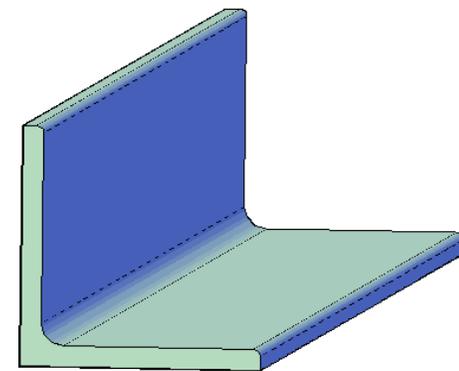
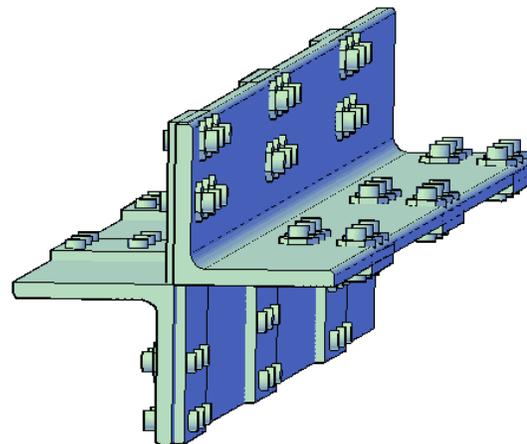
钢芯成型铝绞线
JL1X1/G3A-1250/70-
431

钢芯成型铝绞线
JL1X1/G3A-
1250/100-437

特高压直流工程中应用的1250mm²导线

■ 成功研制大规格角钢

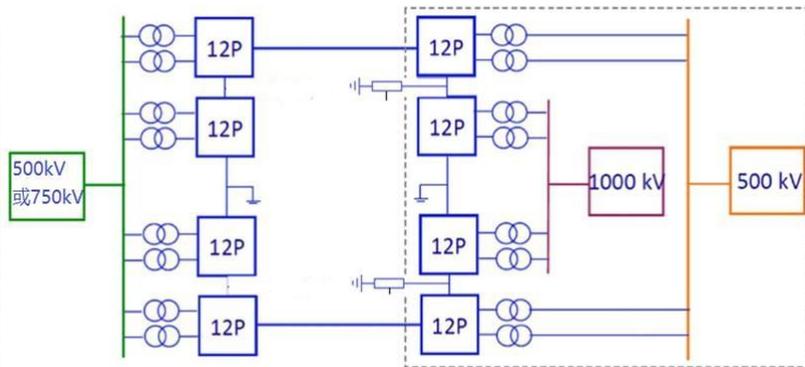
- 国际上首次设计制造了肢宽220mm和250mm级大规格高强角钢铁塔，并实现在±800kV特高压直流线路规模化推广应用，优化了铁塔构造，减轻了铁塔组立的施工量和施工难度，降低了工程造价。



大规格角钢替换双拼普通规格角钢组合

■ ±1100kV特高压直流输电技术研发和工程建设

- 吉泉工程额定电压±1100kV、额定输送功率12GW，送端接入750kV交流电网，受端分层接入500/1000kV交流电网，直流线路全长约3320km。
- 吉泉工程首次实现了“直流电压、输送容量、交流网侧电压”的全面提升，创造了新的世界纪录，是世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远、技术水平最先进的高压直流输电工程。现已完成系统调试和试运行，9月正式投产。



■ 海外首个采用中国技术±800kV特高压直流工程建成投运

- 巴西美丽山±800kV特高压直流水电送出二期工程额定电压±800kV、额定输送功率400万千瓦，线路全长2539km，采用中国技术与装备，2017年8月全面开工建设，2019年8月投运。
- 充分发挥国家电网公司特高压直流工程建设的技术与管理优势，提前3个月高质量建成投运，得到巴西国调、电监会和能矿部等政府机构的高度赞誉。





1

特高压直流建设总体情况

2

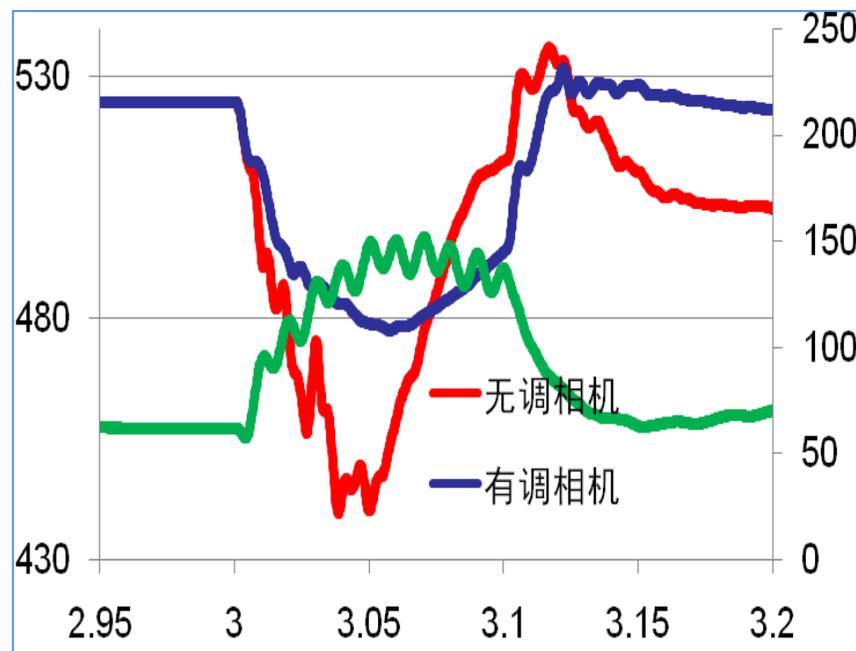
特高压直流输电创新成果

3

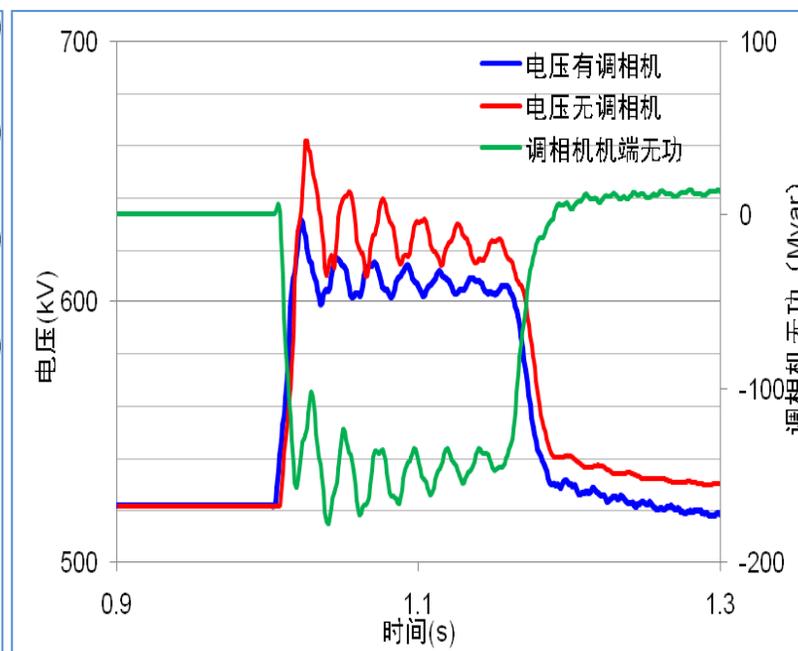
特高压直流输电发展展望

■ 发展新一代调相机技术，提高动态无功支撑能力和系统惯量

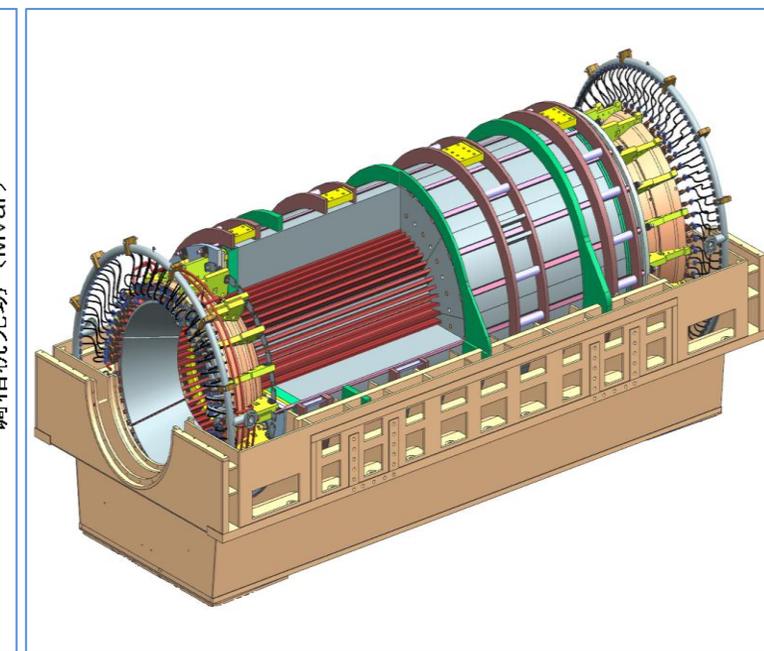
- 新一代调相机动态性能优越，暂态工况下，可在30ms内向系统注入最高1.5倍的电流；
- 受端电网，利用调相机的暂态电压支撑能力，降低连续换相失败概率，提高故障后的电压恢复速度；
- 送端电网，利用调相机提高系统短路容量，故障时吸收多余无功，抑制暂态过电压。



调相机作用下直流未发生换相失败



调相机作用下暂态过电压明显降低

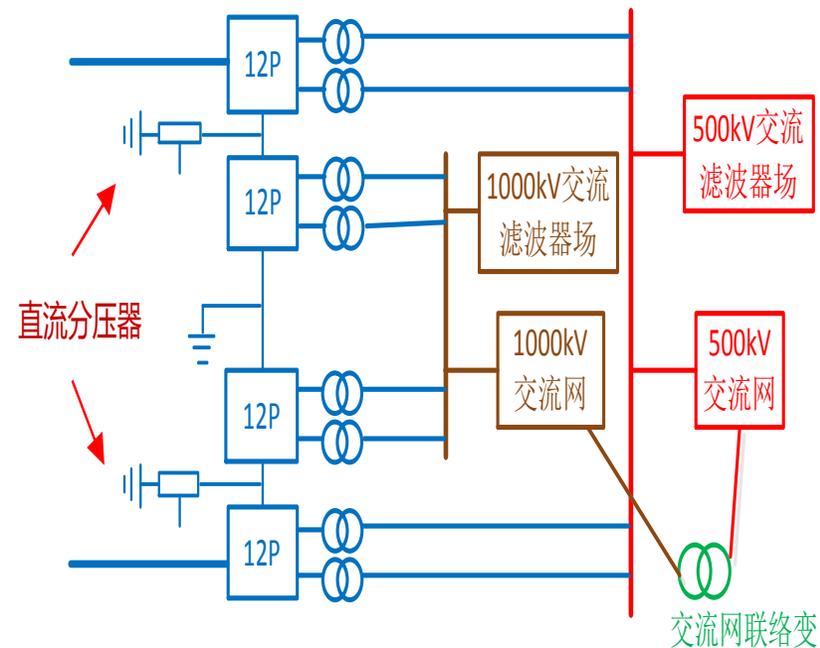


调相机主机结构

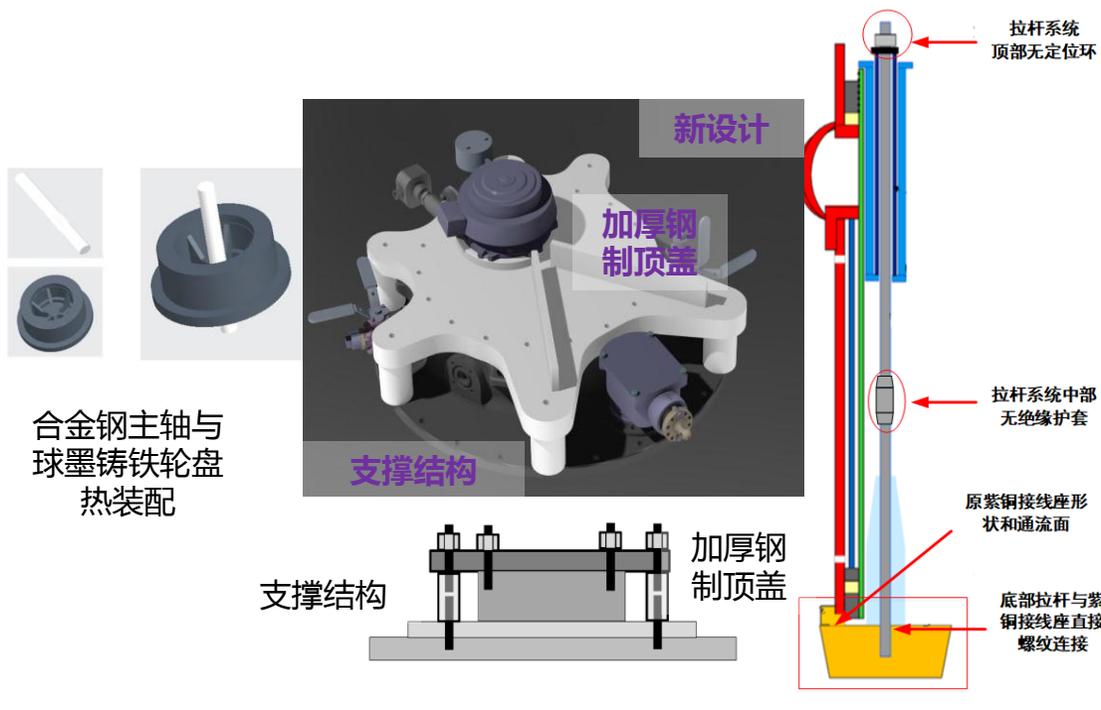
二、提升特高压直流性能

■ 提高直流工程可靠性，降低故障概率

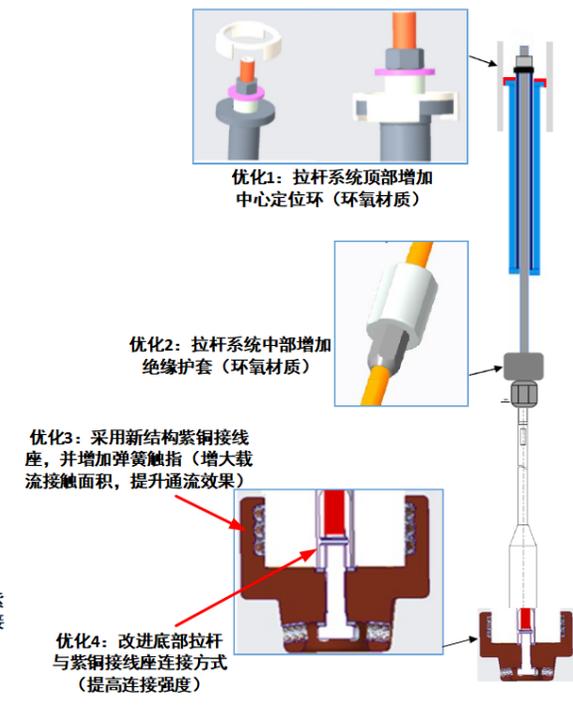
- ❑ 系统方面，直流工程受端分层接入500kV、1000kV电网，降低受端故障对直流的影响，降低直流故障对单一电网的冲击。
- ❑ 设计方面，单极采用双12脉动串联结构，运行方式灵活，能量可用率显著提高；控制双重化配置，保护三重化配置，同时大幅提升换流站消防能力。
- ❑ 设备方面，采取系统全面的提高可靠性、风险预控、反事故技术措施；合理提升直流设备绝缘、通流能力设计裕度，针对性提升换流变分接开关、套管等关键部件和区域的设计裕度，降低分接开关动作频率，提高防火防爆能力；充分合理配置备品备件，缩短故障修复时间。



分层接入特高压直流



ABB分接开关技术改进

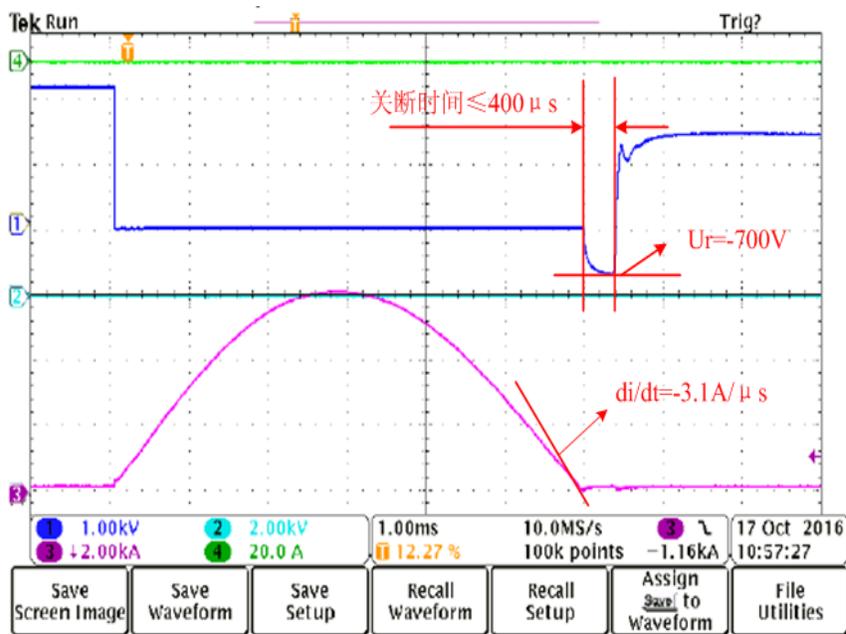


网侧套管技术改进

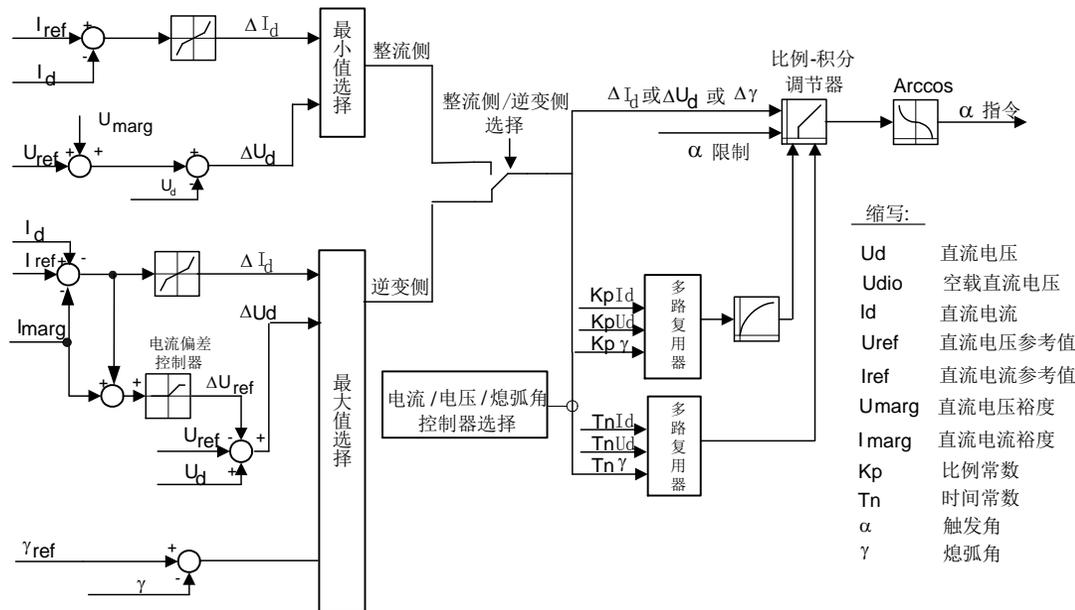
二、提升特高压直流性能

■ 改善直流工程动态性能，提高暂态工况系统支撑能力

- 提升直流工程抵御换相失败能力：优化晶闸管固有关断时间，加强换相失败预测，设置换相失败保护加速段，优化换相失败恢复特性。研究新型抑制换相失败策略，抑制送端交流系统的暂态电压升高，促进受端交流电压在扰动后快速恢复稳定。
- 提升直流工程无功支撑能力：提出了受端定直流电压控制策略，提升了电压暂降过程直流对系统的无功支撑能力，提高了系统电压稳定水平。
- 掌握了分层接入系统控制技术：掌握了分层接入系统阀组平衡控制、功率反转、交流滤波器分层独立控制等关键技术，研制了控制稳定、动态性能优越、容错机制先进的控制保护系统。



6250A晶闸管关断时间在550 μ s以内

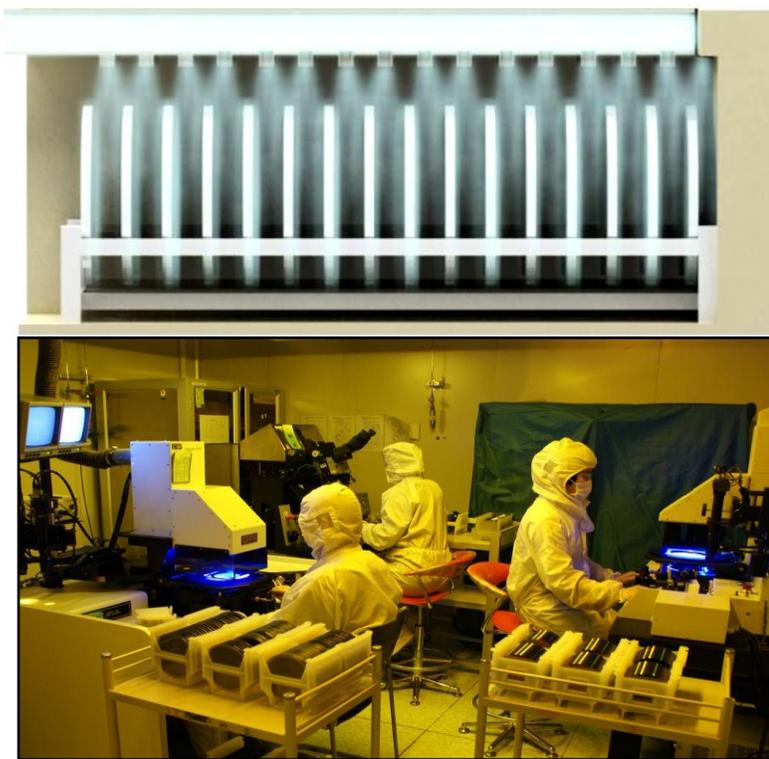


逆变侧定电压控制原理框图

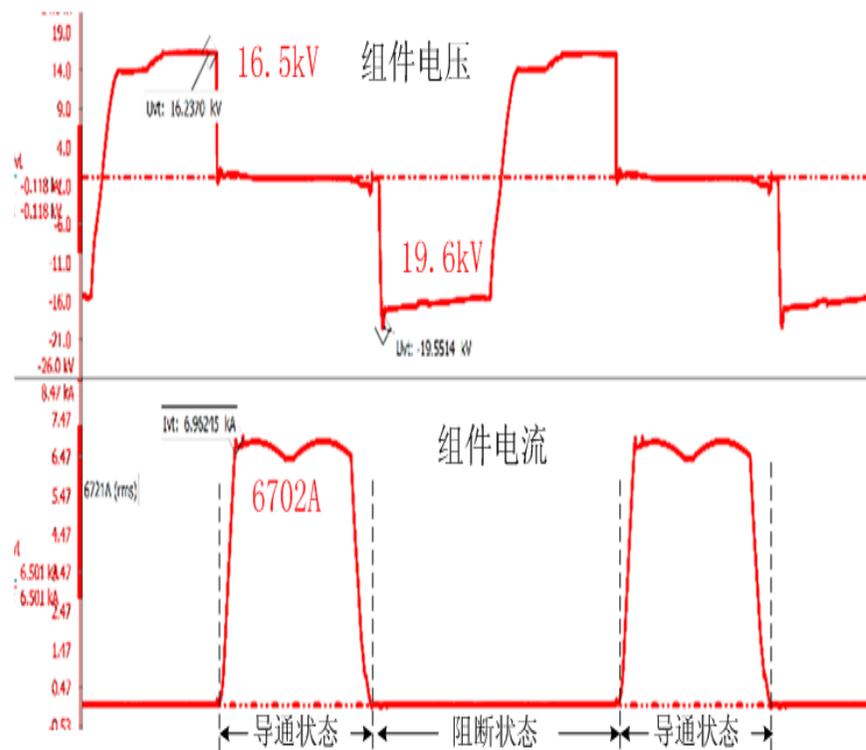
二、提升特高压直流性能

■ 提高特高压直流工程过负荷能力

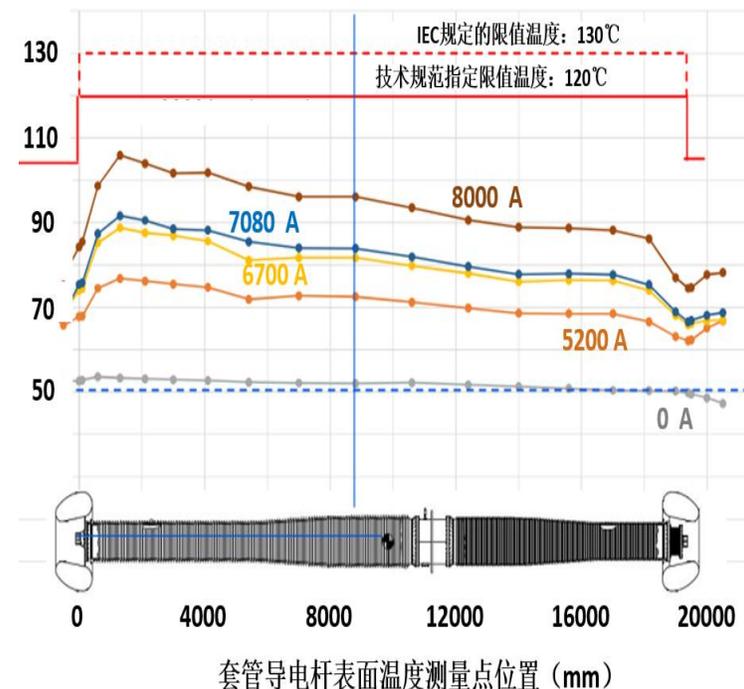
- 新一代“±800kV、8GW”特高压直流充分利用±800kV/10GW、±1100kV/12GW创新成果，充分挖掘6英寸晶闸管等组部件和设备技术潜力，具备1.1倍长期、1.2倍（2小时）、1.3倍的短时（3s）过负荷能力。
- 过负荷能力为直流工程的调峰、调频能力提供了技术基础，保证了单阀组故障、单极故障、单工程故障工况下，健全单元的功率转带能力，降低了直流故障造成的传输功率损失，降低了故障对系统的影响和冲击。



6英寸晶闸管研制



换流阀最大持续运行试验应力

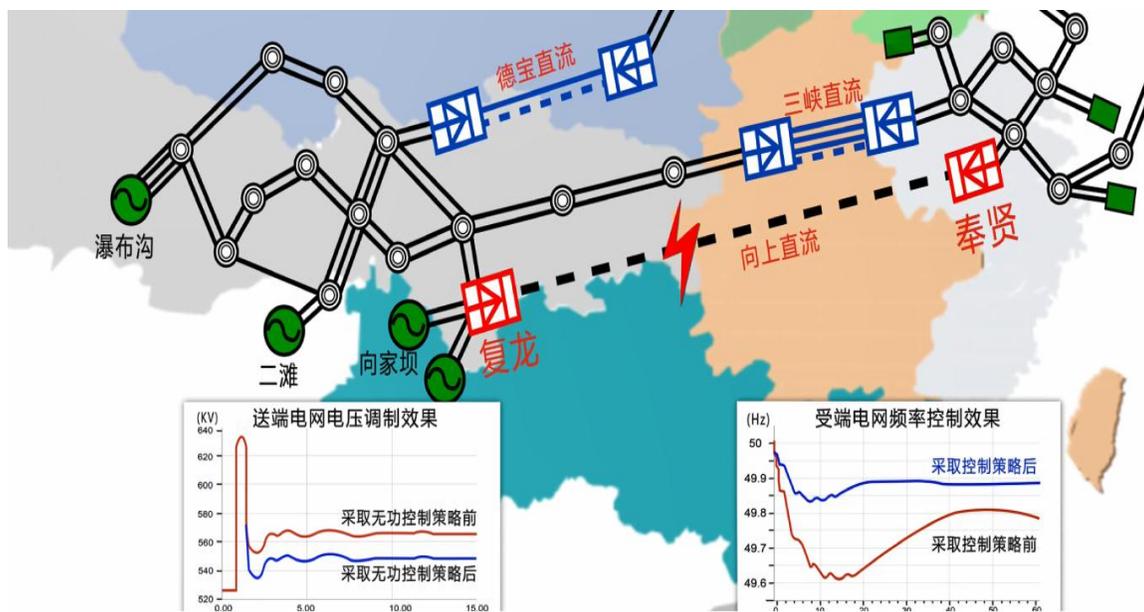


穿墙套管过负荷试验

三、全网综合控制和源网荷协同控制

■ 源、网、荷协同配合，提升大电网安全稳定控制水平

- 提出了源/网/直流多元协调优化控制策略和系统保护整体架构，建成了世界上规模最大、功能最强的电网稳定控制系统，确保了大容量直流接入下电网安全稳定，可实现200ms内直流调制、切机及切负荷，保持送受端交流电网电压、频率和功角稳定。
- 加强多回直流协调控制，利用直流快速调节能力，实现多回直流之间功率转带和紧急支援，降低故障对送、受端电网的冲击。
- 通过频率控制器调节直流输送功率，实现直流两端交流系统之间功率支援。通过与机组AGC协调配合，增加了系统一次调频能力，能够实现电网发生低频振荡时向系统提供“正阻尼”，从而实现对系统振荡的快速平抑。
- 提出了毫秒级精准负荷控制技术，提高了电网可中断负荷的容量，缩小了多直流换相失败和闭锁故障的不平衡功率冲击，提高了系统对直流的接纳能力。



源/网/直流多元协调控制系统

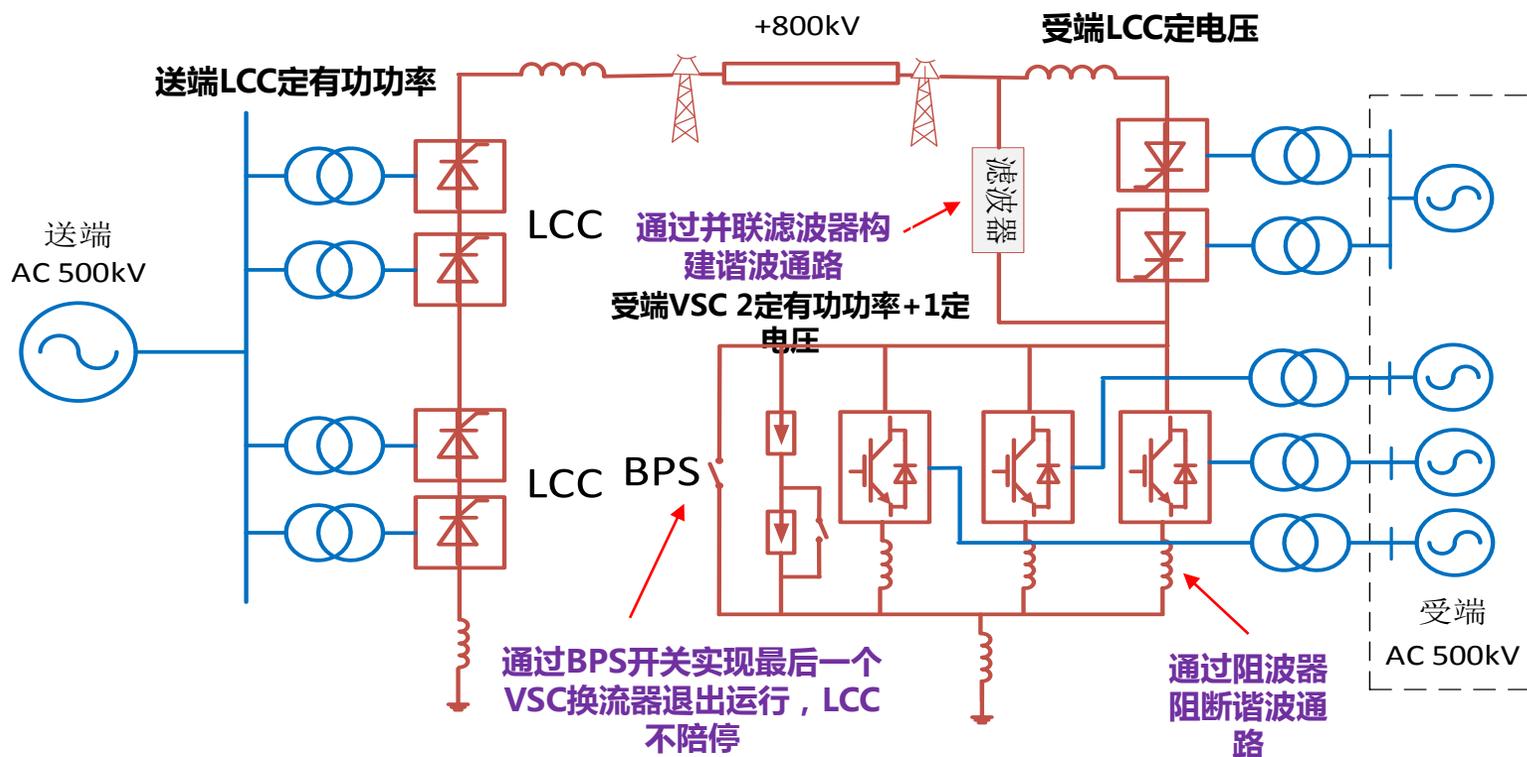


系统保护整体架构

四、特高压直流受端应用柔性直流技术

■ 特高压直流受端采用柔性直流输电技术

- 受端采用VSC，利用其自换相和有功无功独立调节特点，降低换相失败风险，提升暂态电压支撑能力；
- 受端采用VSC，可以通过低压电缆（架空线）向通道紧张的负荷中心实施多点供电；
- 特高压直流工程整体以LCC为骨干换流器，LCC基本控制策略与常规直流一致。



■ 白鹤滩-江苏±800kV混合级联多端特高压直流输电工程

- ±800kV/8GW，采用双极/每极400kV+400kV换流器串联接线；
- 送端每极两个LCC串联，受端高端采用LCC、低端3个VSC并联；
- 每个LCC额定功率2GW，VSC额定功率3×1000MW；
- 直流线路采用架空线路；VSC与LCC同站布置，无400kV直流线路。



Thanks for Your Attention!





Thanks for Your Attention!





国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

Thanks for Your Attention!





Thanks for Your Attention!

