



黄 勇 国家电网有限公司 二〇一九年十一月



2 张北±500干伏柔直电网工程

3 白鹤滩-江苏±800干伏混合级联直流工程



1. 柔性直流优点及应用场景

柔性直流输电技术是基于电压源型全控器件(IGBT)的新一代直流输电技术

- **优点:**柔性直流输电技术具有黑启动能力、有功和无功独立解耦控制、不存在交流电网固有的同步稳定问题、能够实现大范围的潮流调节和控制、对可再生能源发电具有显著支撑作用等技术优势。
- 应用场景: 电网互联、新能源并网、城市供电、电力交易、海上平台供电等。







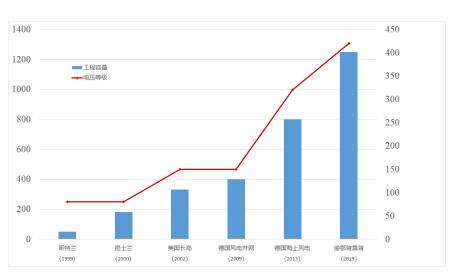
新能源并网

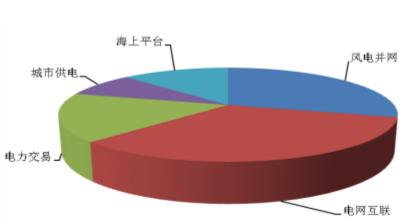
电网互联

海上平台供电



- □ 截至2019年,世界上已投运的柔性直流输电工程约有33项,其中单个换流器最大输送容量1250MW,最高电压等级±420kV,为我国2019年建成的渝鄂工程。
- □ 目前,国内外在建和规划的柔性直流项目约15回,工程的电压等级和容量迅速增大,系统损耗和造价不断降低,极大的促进了柔性直流技术的应用。





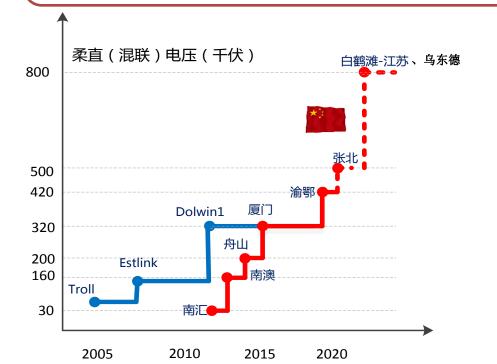
柔性直流输电工程容量及直流电压等级发展趋势

现有工程应用领域分布



2. 我国柔性直流发展情况

- □ 建成:2011至今,我国先后建成南汇、南澳、舟山、厦门、鲁西背靠背、渝鄂背 靠背等6个工程,电压从±30kV提升至±420kV,容量从20MW提升至1250MW。
- □ 在建和规划:张北±500kV多端柔直电网工程、白鹤滩-江苏±800kV混合级联直流工程、乌东德±800kV多端混合直流工程。



工程名称	参数	时间
上海南汇	±30kV/20MW	2011
广东南澳	±160kV/200MW	2013
浙江舟山	±200kV/400MW	2014
福建厦门	±320kV/1000MW	2015
云南罗平	±350kV/1000MW	2016
渝鄂互联	±420kV/1250MW	2019



3

1 柔性直流输电发展情况

张北±500干伏柔直电网工程

白鹤滩-江苏±800干伏混合级联直流工程



工程概况

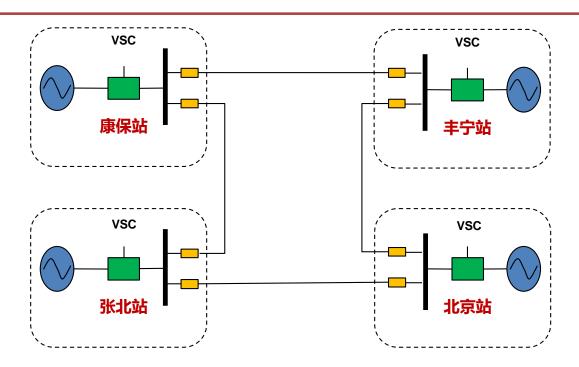
- 张家口地区风电、光伏发电资源富集,与丰宁抽蓄、北京负荷中心呈三角分布,均相距200km左右,是典型的多类型清洁能源互补开发与外送应用。
- 张北、康保换流站共规划接入新能源装机达6478MW利用接入丰宁换流站的抽水蓄能,可平抑新能源机组的出力波动,柔性直流电网在新能源接入方面优势巨大。





工程概况

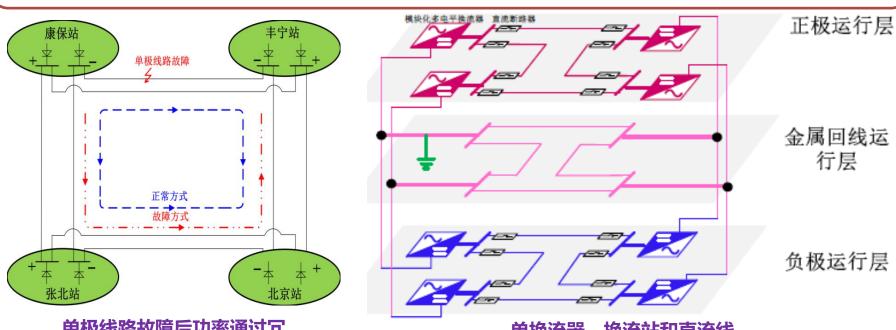
□ 张北柔性直流电网试验示范工程是汇集和输送大规模风电、光伏、储能、抽蓄等多种形态能源的四端柔性直流电网,是北京冬奥会的电网配套项目。系统电压±500kV、包括张北(3000MW)、康保(1500MW)两个送端换流站,北京受端换流站(3000MW)和丰宁(1500MW)调节换流站。





工程概况

- □ 张北柔直电网四端换流站采用 "**手拉手**" 环形接线方式,直流功率通过环形电网 传输,路由冗余,正负极功率可互相转带,功率输送可靠性高。
- □ 利用直流断路器和快速线路保护,换流器、直流线路等元件**故障可在线切除,功 率传输不中断**;换流器、直流线路等元件可实现在线投退。



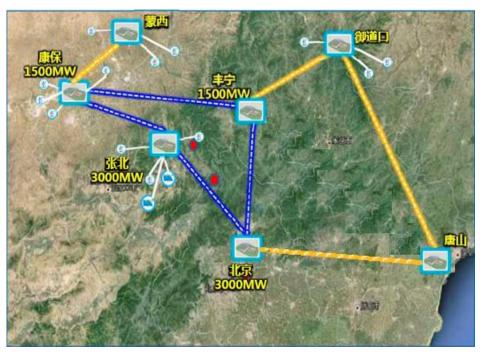
单极线路故障后功率通过冗 余回路继续传输

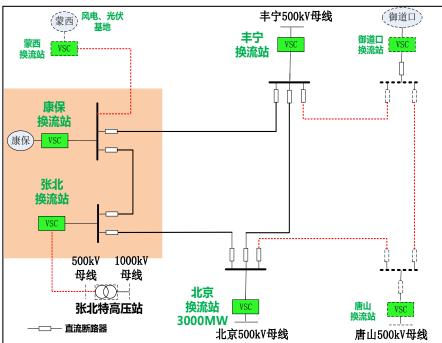
单换流器、换流站和直流线 路均可在线投退



工程概况

□ 未来蒙西、御道口等新能源基地也可通过柔直并入直流电网,唐山等京津唐负荷中心也可从直流电网获取清洁电力,工程远期**具备扩展成7端直流电网的潜力**,新能源消纳能力更强,供电可靠性更高。

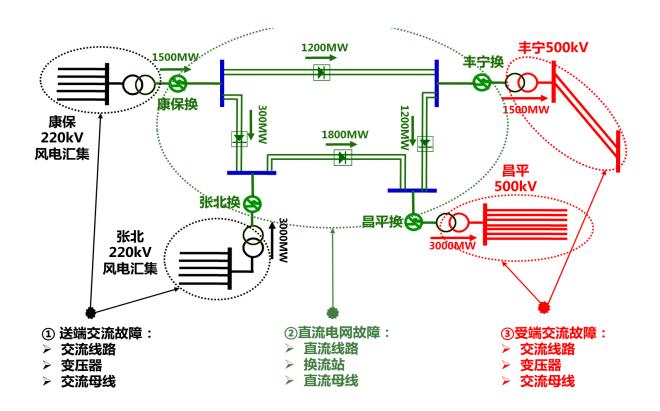






技术难点

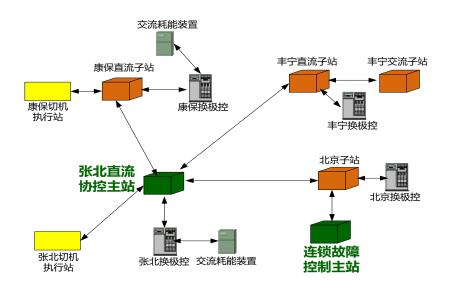
- (一)低惯性弱阻尼特性,多系统协调控制复杂。
- (二)器件支撑能力不足,柔直设备研制难度大。





(一)低惯性弱阻尼特性,多系统协调控制复杂

- □ 直流电网包含新能源机组、耗能装置、柔直换流器、直流断路器等设备,系统电力电子化特征明显,控制保护接口、功能、配合逻辑复杂,相互耦合关系强。
- □ 电力电子设备故障发展速度及控制保护响应时间均为毫秒级,设备耐受过流安全裕度仅为几百安培,必须精准配合。

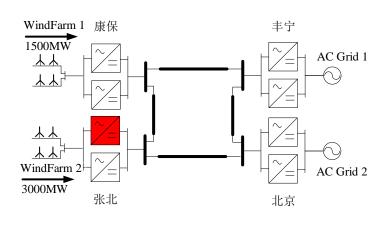


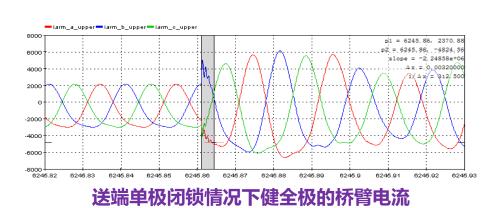
类别	时间
换流阀保护系统动作时间	3-7ms
换流阀控制系统响应时间	3-5ms
交流耗能装置投入时间	1.4ms
直流断路器动作时间	3ms
桥臂IGBT过流保护裕度	380A



<u>(一)低惯性弱阻尼特性,多系统协调控制复杂</u>

- □ 直流电网呈低惯性、弱阻尼特性,功率盈余情况下直流电网电压、电流变化的时间尺度为几毫秒至几十毫秒级,发展速度极快。
- □ 交流断路器动作时间约为40~60ms,安控策略切除风机时间约为150ms,因此 交流安控策略无法满足直流电网故障清除速度的要求。
- □ 满功率孤岛方式下,任何"风吹草动"都可能引起功率盈余,风机又无法快速切除或者速降功率,流入换流器的有功功率无法控制,将导致故障进一步扩大。







(二)器件支撑能力不足,柔直设备研制难度大

- □ 目前IGBT器件额定电流小,故障电流耐受能力弱,耐受时间短。
- □ 目前参数最高的IGBT器件额定电流3000A,最大关断电流仅为6kA/1ms,与晶闸管10倍于额定电流的故障电流耐受能力相差甚远。



IGBT器件

额定电流:3kA

最大关断电流:6kA



晶闸管器件

额定电流:6.25kA

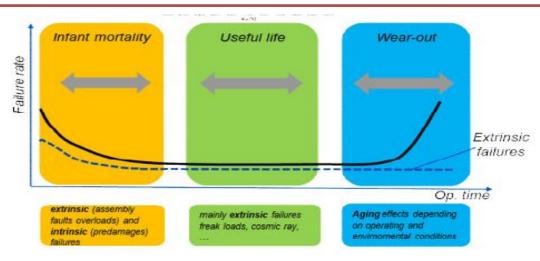
最大耐受电流: 63.5kA

工程名称	电压等级 (kV)	输送容量 (MW)	器件类型
HelWin2	±320	690	3300V/ 1500A
厦门工程	±320	1000	3300V/ 1500A
Skagerra k4	500	700	4500V/ 2000A
张北工程	±500	1500	4500V/ 3000A



(二)器件支撑能力不足,柔直设备研制难度大

- □ 目前IGBT器件早期失效率为500ppm,直流电网换流站数量多,同时需要配置大量直流断路器,以构建一个四端直流电网为例,约需要4万只IGBT器件,相当于投运初期有20只IGBT器件可能失效,影响工程可靠运行。
- □ 目前交流电网和常规直流输电系统的可靠性评估技术相对成熟,而柔性直流和直流电网的可靠性评估研究尚在起步阶段,相关评估模型、评估方法及可靠性指标等均需进行重新制定。

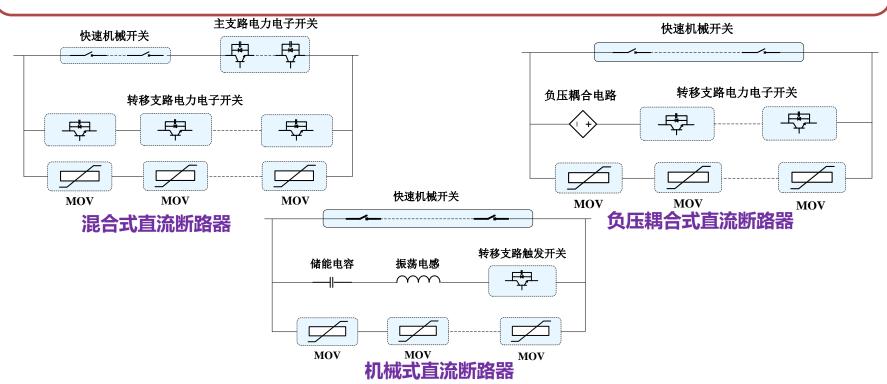




(二)器件支撑能力不足,柔直设备研制难度大

直流断路器难点:

- □ 直流系统中不存在自然过零点 , 开断直流电流困难大 ;
- □ 在开断直流电流后如何吸收直流系统中储存的MJ级的能量;
- □ 为避免故障扩散、直流系统解列,直流断路器需要微秒级动作及重合闸技术。





研究工作

(一)系统方案研究

针对系统低惯性弱阻尼特性,多系统协调控制复杂问题,为了确保故障穿越能力,采取配置耗能装置、优化控制策略、延缓桥臂过流等多种综合措施。

- 通过加装交流耗能装置之后,解决送端功率盈余问题,实现单一元件故障直流 电网保持稳定运行,其他元件不发生过载或者跳闸。
- □ 通过三次谐波注入、降低保护动作时间、分桥臂闭锁、加装接地电阻等技术手段,降低对IGBT稳态通流和暂态过压过流的要求。
- □ 通过站间协调控制、双VF下垂控制、直流断路器分级投入等技术手段,构建柔直电网、交流安控、耗能装置、新能源机组之间的协同控制系统。



研究工作

(二)直流断路器研制

- □ 成功研制混合式、负压耦合式、 机械式多种技术路线产品,额定 电压535千伏,开断能力达到25 干安、开断时间3毫秒、MOV容 量超过150兆焦。
- □ 提升快速机械开关、MOV、供能变压器等一次设备可靠性,细 化直流断路器二次控制板卡、二次控制保护动作逻辑设计要求。



混合式直流断路器样机研制



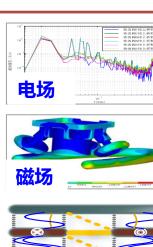
研究工作

(三)柔直换流阀研制

- □ 成功研制采用4500V/3000A压接式IGBT器件、额定电压535kV、单阀组容量 1500MW的柔直换流阀。相对渝鄂工程,电压提高27%,单元容量提高20%。
- 通过增加高电压暂时对地耐压试验、拉合隔离开关抗电磁干扰试验、子模块旁路开 关合闸试验等考核手段提高柔直阀可靠性。









工程进展

目前,工程所有设备均已研制成功并完成供货,现场建设接近尾声,已经进入交流启动调试阶段,直流系统启动调试即将开始。计划2020年6月正式投入运行。









3

1 柔性直流输电发展情况

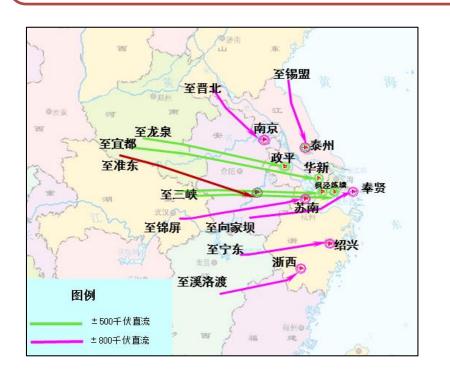
2 张北±500干伏柔直电网工程

白鹤滩-江苏±800干伏混合级联直流工程



工程概况

- ▶ 白鹤滩水电站位于金沙江下游,装机容量1600万千瓦,将白鹤滩水电输送至苏南 负荷中心,是"西电东送"的骨干输电线路点之一。
- ▶ 长三角区域已馈入区外直流多达11回,直流落点日益密集,换流站电气距离持续减小,受端电网支撑能力持续减弱。



长三角地区换流站间距离 单位:公里

换流 站	华新	枫泾	新余	奉贤	苏南	政平	绍兴
华新	1	45	40	63	68	120	175
枫泾	45	1	38	68	48	127	130
南桥	40	38	ı	33	82	150	160
奉贤	63	68	33	ı	113	180	183
同里	68	48	82	113	ı	84	125
政平	120	127	150	180	84		188
绍兴	175	130	160	183	125	188	_

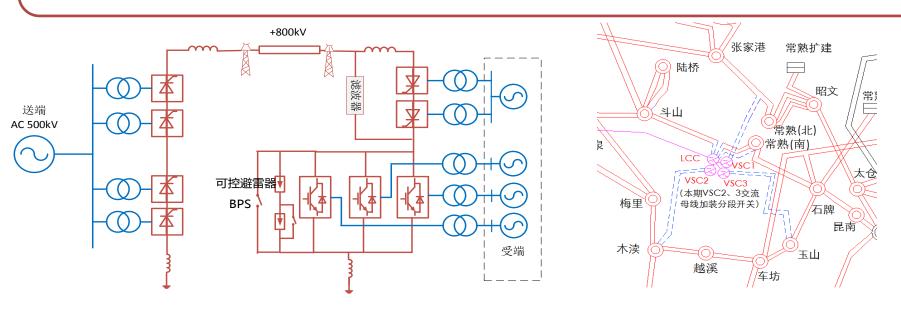


直流密集馈入导致交流电网支撑能力减弱,交直流相互影响复杂,交流系统故障造成多回直流同时换相失败的风险及范围都在逐渐扩大。结合了LCC和VSC各自技术优势的混合级联输电技术在缓解苏南地区交流电网对直流电压支撑压力、减少多回直流换相失败次数等方面有明显优势。



工程概况

- ➤ 额定电压±800千伏, 额定功率800万千瓦, 额定电流5000安培。
- 送端与特高压常规直流相同,采用双12脉动换流器串联结构。
- ▶ 受端采用混合级联技术方案,高端电流源换流器(LCC)串联低端3个电压源换流器(VSC),高、低端各疏散50%直流功率。
- 受端各换流器可接入负荷中心不同的落点。





方案优势

与常规LCC方案相比:

- (1)可有效降低直流换相失败影响,抑制送端过电压效果明显,有利于保障白 鹤滩水电大规模稳定可靠送出,有利于保障多直流密集馈入的华东电网的安全;
- (2)可实现VSC间通道功率互济,可充分发挥常规直流输电、柔性直流输电技术优势;
 - (3)缓解受端多馈入直流短路比的限制,提高区外受电能力;
 - (4)可作为STATCOM运行,发挥无功调节能力。

与全柔直全桥方案相比:

- (1)设备制造难度小,技术风险相对较低,创新技术基础好,总体可靠性高;
- (2)投资少、运行损耗低。



技术难点——成套设计

□ 电流源型LCC与电压源型VSC换流器特性不同,二者串联或者并联对直流系统的主接线设计、主设备参数等带来巨大挑战。

响应特性不同

故障耐受能力不同

控制维度不同

故障清除策略不同

- 1. LCC一个工频周期开关一次,受平波电抗器的影响,故障时电流 上升速度一般为几十毫秒;
- 2. VSC响应速度快,控制周期约100us,在功率盈余或者短路故障时,电流上升速度几个毫秒;
- 1. LCC耐受短路电流能力较强,可承受10倍以上额定电流60ms;
- 2.基于IGBT的VSC只能耐受约2倍额定电流1ms,故障穿越能力弱;
- 1. LCC通过调节触发角调整直流电压电流和功率,一个控制维度;
- 2. VSC可调整输电交流电压的相位和幅值,有功和无功相对解耦控 制,两个控制维度;
- LCC通过快速移相、闭锁触发脉冲、投旁通对等方式迅速清除故障 , 实现直流的快速再启动 ;
- VSC一般通过跳直流断路器、投入可控避雷器、全桥(混合桥)VSC降压、跳交流侧断路器等措施实现故障清除和重启;



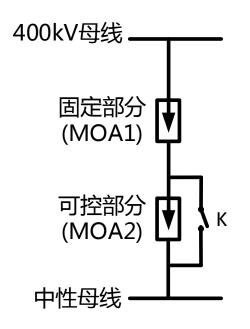
技术难点——设备研制

- □ 采用半桥式MMC子模块,可节约换流阀成本、降低损耗,半桥式MMC故障穿越 处理方式复杂。
- □ 采用可控避雷器实现交直流故障穿越,实现半桥MMC的盈余功率泄放,对可控避雷器的高速控制、大容量避雷器可靠性是个挑战。
- □ <mark>控制保护</mark>策略尚属首次开发,需遍历启停投退、故障穿越等各种运行工况,完整验证可行性难度大。
- □ LCC与VSC串联, LCC产生的<mark>谐波</mark>可能注入VSC, 直流滤波器设计难度大。
- □ 串并联拓扑结构可能存在<mark>谐振</mark>风险。



技术难点——可控避雷器

在混合级联直流系统中,可控避雷器阀片耐受波形已从限制暂态过电压变为相对长时吸能。可控避雷器的吸能增加为2-7倍,并联数增加为2-3倍,避雷器阀片个数增加为一万片规模。



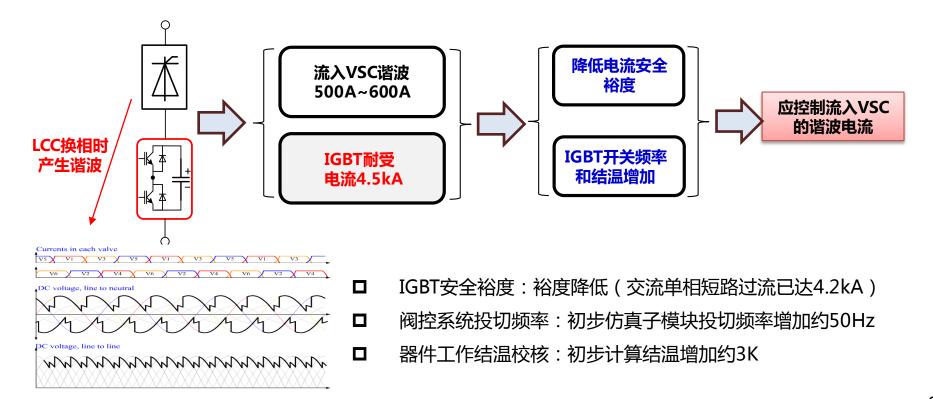
主要功能: VSC交直流故障时,快速旁路部分避雷器阀片,固定部分避雷器 提供泄能回路,深度抑制直流侧过电压,使得VSC实现故障穿越。

组成部分:固定部分(主要耗能部分)、可控部分、开关K。



技术难点——直流滤波器

- ▶ LCC与VSC串联旦VSC等效电容大,谐波易流入VSC。
- ▶ 滤波器设计不仅需要控制流入VSC谐波电流,而且兼顾控制极线谐波电压。



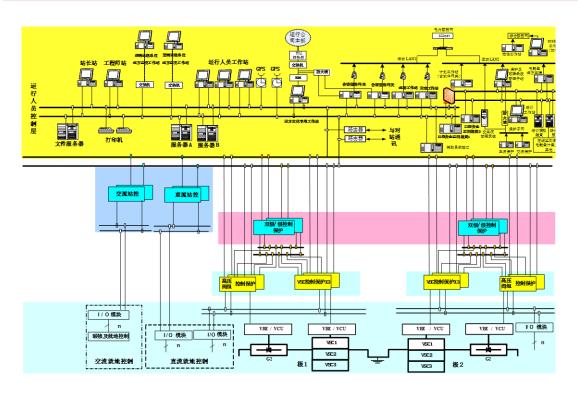


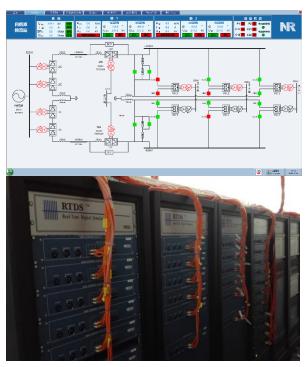
研究工作-控制保护系统

送端换流站:控保层级与常规特高压工程基本一致。

受端换流站:站控制层、极控制层、协调控制层(新增)、阀控层。

已完成控制保护架构设计和样机研制,并通过RTDS(实时仿真)验证。





受端控制保护系统架构

RTDS控制保护仿真试验平台



研究工作-可控避雷器

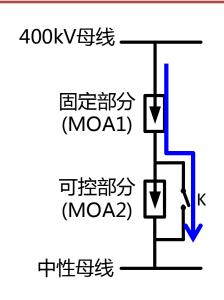
▶ 功能定位: VSC交直流故障时, 快速旁路部分避雷器阀片, 固定部分避雷器提供

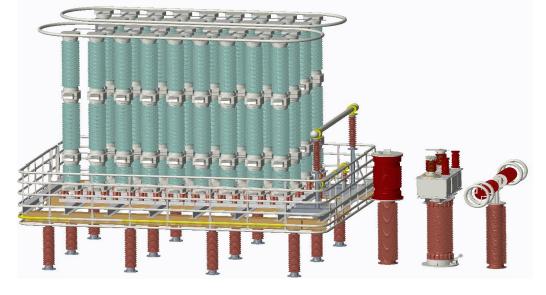
泄能回路,深度抑制直流侧过电压,使得VSC实现故障穿越。

▶ 组成部分:固定部分(主要耗能部分)、可控部分、快速开关K。

应用前景:造价低,通流能力强,未来可应用海上风电经柔直并网等场合。

> 研发进展:关键设备快速开关K已成功研制,通过定型试验,具备工程应用条件。





可控避雷器结构示意图

可控避雷器样机三维设计图



研究工作-直流滤波器

- ▶ 主要设计流程与常规/简化直流滤波器设计类似,但控制目标根据本工程特点变为控制流入VSC谐波电流,兼顾控制极线谐波电压。
- 采用滤波器+阻波器,"疏"、"阻"结合的滤波器配置方案。

常规直流 滤波器设计

> 控制线路等 效干扰电流

常规直流工程(绝 大多数工程) 简化直流 滤波器设计

> 控制极线谐 波电压

扎青工程、吉泉工 程等最近直流工程 混合直流滤波器设计

控制流入VSC谐 波电流,兼顾控 制极线谐波电压

本工程

性能指标1: VSC谐波电流<480A (每桥臂 < 160A)

性能指标2: 极线谐波电压峰值 <50kV

32



研究工作-混合级联动模

通过**缩比模型(动模)试验**硬件手段验证了混合级联方案,包括系统启停、阀组投退、交直流故障穿越、站内故障和设备安全等关键内容。

序号	论证项目	验证结果
1	系统启停	通过
2	阀组投退	通过
3	直流线路故障穿越	通过
4	交流系统故障穿越	通过
5	站内故障和设备安全性	通过



研究工作-混合级联动模

- ▶ 动模是实物等比模型,具有完善的一次系统和二次系统,能够准确验证混合级联直流系统特性,是创新工程可行性研究的重要验证手段。
- 一次系统模型详尽且精确。包括:交流电网、直流线路、LCC换流阀、VSC换流阀、可控避雷器、换流变压器、交流滤波器、直流滤波器、交直流场开关、平波电抗器、桥臂电抗器等。

动模一次系统参数

	原型	动模
直流功率(双极)	8000MW	21000W
直流电压(±)	800KV	1000V
直流电流	5KA	10.5A



动模直流输电线路

动模VSC换流阀



研究工作-混合级联动模

> 二次系统采用真实的控制保护系统

• 直流控制保护系统:实际控制保护装置,完整控保功能。

• 阀控系统:实际阀控装置,完整阀控功能。

• 测量系统:测量IO+合并单元,模拟量采集功能。



动模控制保护系统



动模阀控系统及测量系统



