

高压直流输电工程运行技术研究专题报告



中国南方电网有限责任公司超高压输电公司

2019年11月

知识产权声明

本文件的知识产权属南方电网公司所有。对本文件的使用及处置应严格遵循南方电网公司有关规定或获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经南方电网公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

Intellectual Property Rights Statement

This document is the property of and contains proprietary information owned by CSG and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of CSG.

目录

- 1 背景和意义
- 2 报告的主要内容
- 3 报告的亮点
- 4 展望与寄语



一、背景和意义

我国电力行业面临的重大任务和挑战

- ◆ 推动大范围的电力资源优化配置
- ◆ 促进可再生能源的高效开发利用
- ◆ 增强网架结构，推动各级电网协调发展
- ◆ 提高电力传输的安全可靠性
- ◆ 加大我国电工装备制造业结构调整力度
- ◆ 加快我国电网向坚强智能化转变
- ◆ 提升我国在世界电力领域的技术引领作用



我国水能资源分布图



电力科技的进步与创新对未来坚强智能电网的发展提供足够的支撑和保障，是一个非常现实和艰巨的挑战。



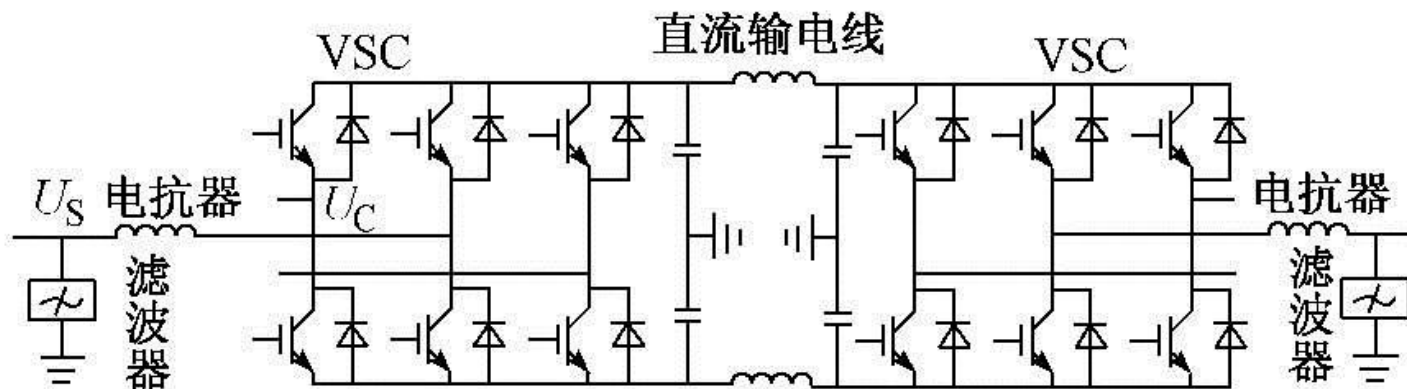
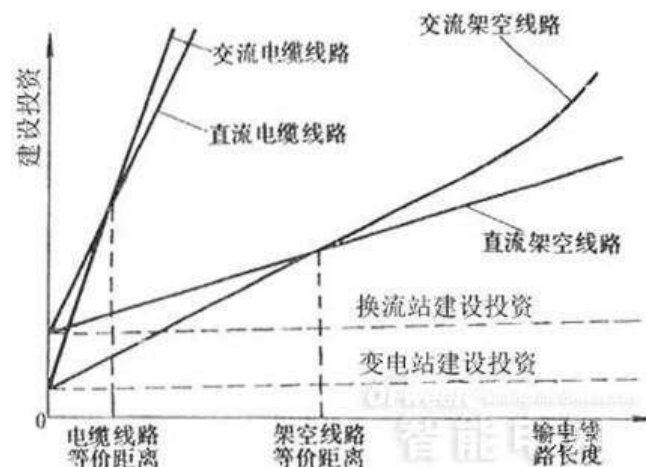
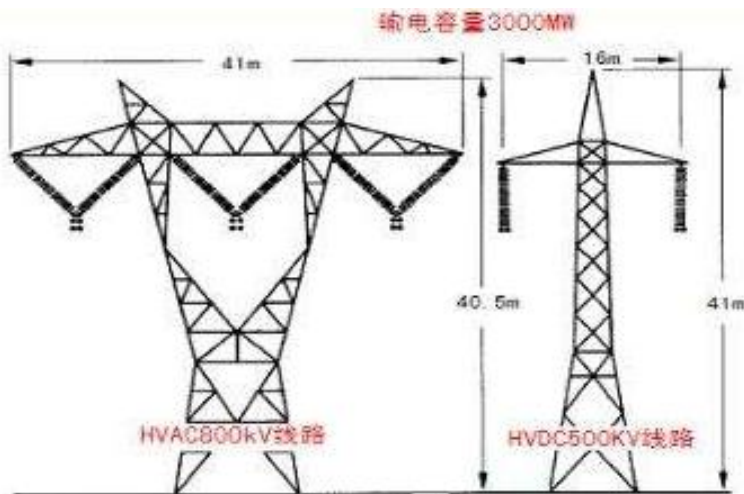
一、背景和意义

直流输电优势

节省输电走廊

适合远距离输电

高度灵活可控



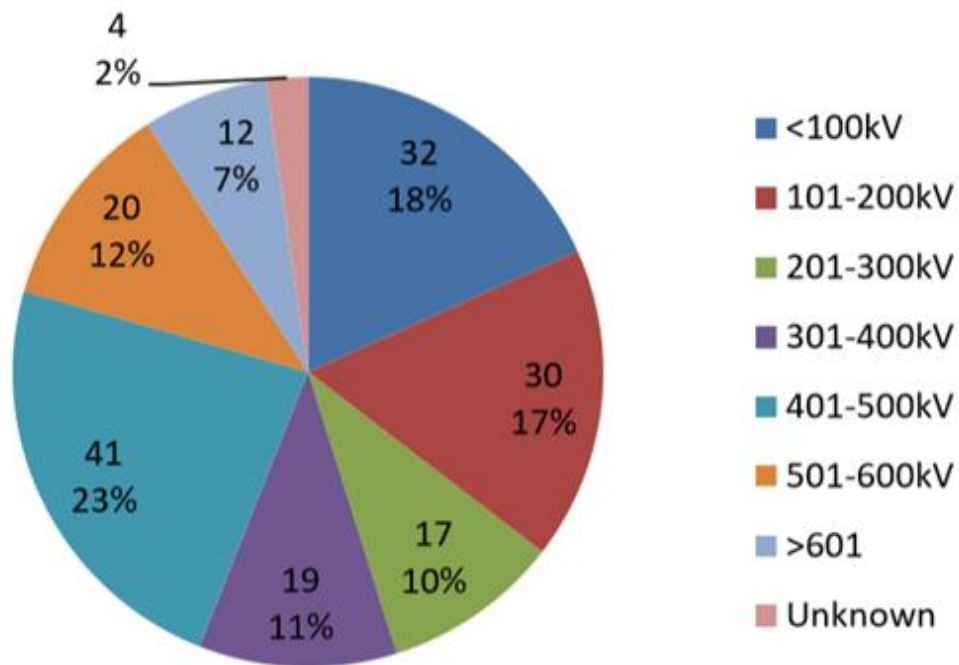


一、背景和意义

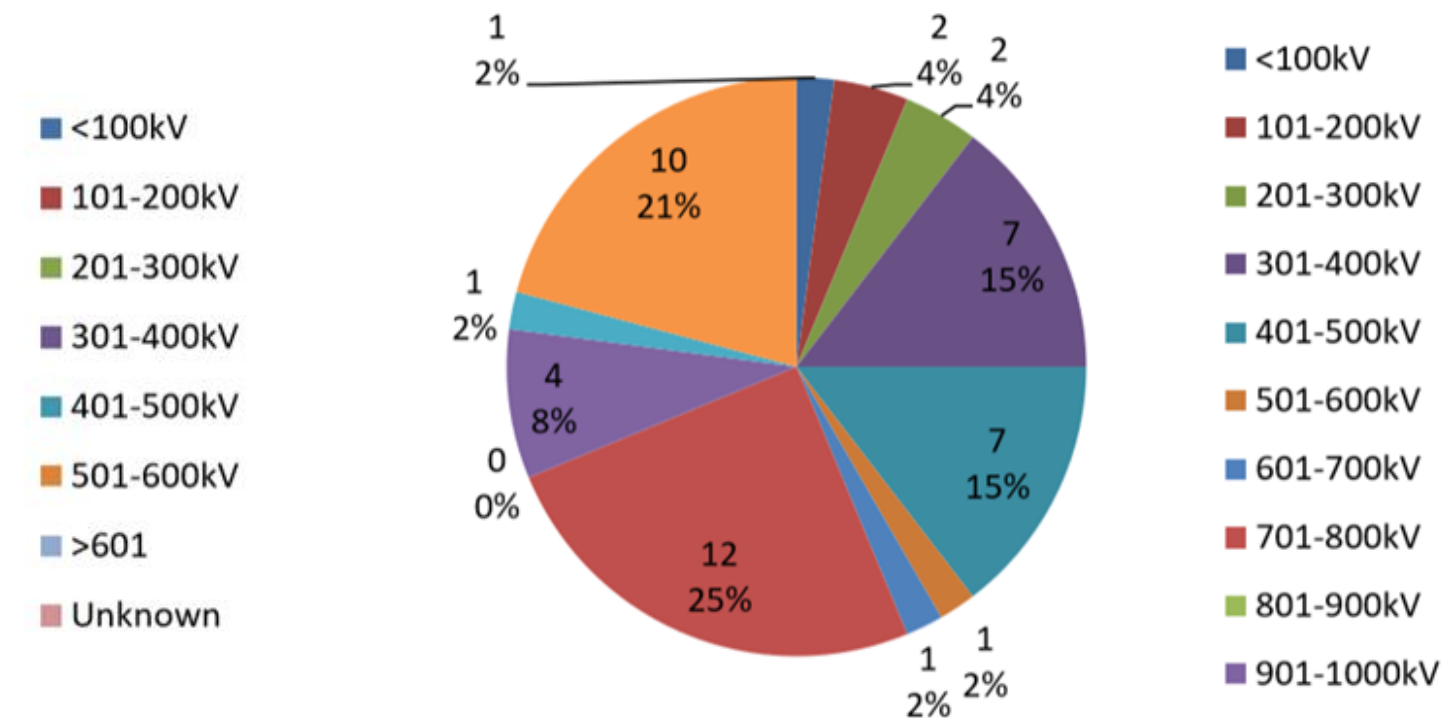
全球直流输电工程的总体情况：

2018 CIGRE 会议发布数据：

- 已运行的直流工程（统计175项），500kV以上直流工程数量仅占32%
- 规划建设中的直流工程（统计48项），500kV以上直流工程数量占62%



已运行直流工程



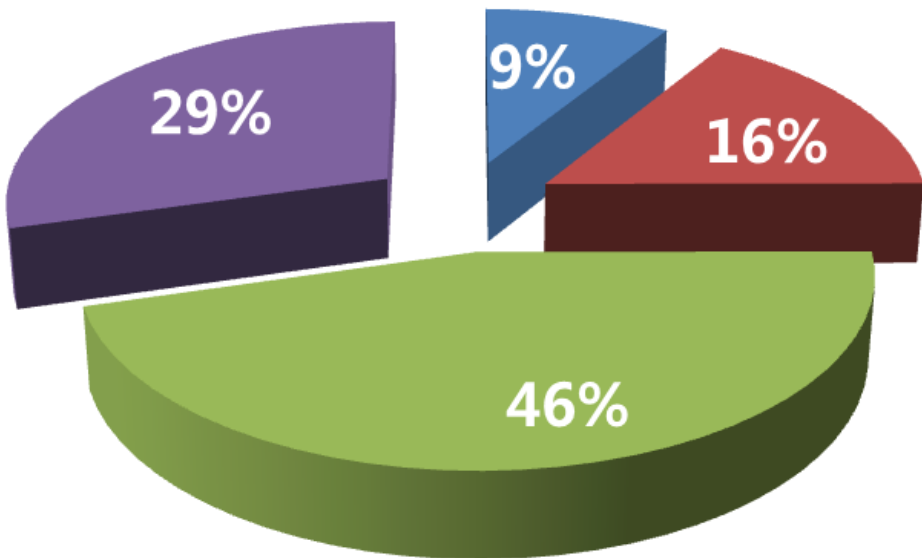
规划建设中直流工程

数据来源：CIGRE B4



一、背景和意义

全球直流输电工程分部情况：



■ 北美 ■ 欧洲 ■ 中国 ■ 其它
全世界投运直流输电变电容量

- 中国直流总容量超过200GW，占据世界总容量50%
- 中国已经建成13条特高压直流，总输送功率9060万千瓦

中国特高压工程列表

	序号	工程名称	电压等级	变电（换流）容量	输送功率	送电距离
			（千伏）	万千伏安（千瓦）	（万千瓦瓦）	公里
建成 (8交13直)	1	晋东南-南阳-荆门	1000	2400	500	640
	2	淮南-浙北-上海	1000	2100	1000	649
	3	浙北-福州	1000	1800	1000	603
	4	锡盟-山东	1000	1500	1000	730
	5	淮南-南京-上海	1000	1200	1000	780
	6	蒙西-天津南	1000	2400	1000	616
	7	榆横-潍坊	1000	1500	1000	1049
	8	锡盟-胜利	1000	600	1000	240
	9	向家坝-上海	±800	1280	640	1907
	10	锦屏-苏南	±800	1440	720	2059
	11	哈密南-郑州	±800	1600	800	2210
	12	溪洛渡-浙西	±800	1600	800	1669
	13	宁东-浙江	±800	1600	800	1720
	14	酒泉-湖南	±800	1600	800	2413
	15	晋北-江苏	±800	1600	800	1119
	16	锡盟-泰州	±800	2000	1000	1620
	17	上海庙-山东	±800	2000	1000	1238
	18	扎鲁特-青州	±800	2000	1000	1234
	19	云南-广东	±800	1000	500	1438
	20	糯扎渡-广东	±800	1000	500	1541
	21	滇西北-广东	±800	1000	500	1959
在建 (4交2直)	1	北京西-石家庄	1000	0	1000	228
	2	苏通 GIL	1000	0		5.9
	3	山东~河北环网	1000	1500	1000	819.5
	4	蒙西-晋中	1000	0	800	313
	5	淮东-皖南	±1100	2400	1200	3324
	6	乌东德-广东、广西	±800	1600	800	1489

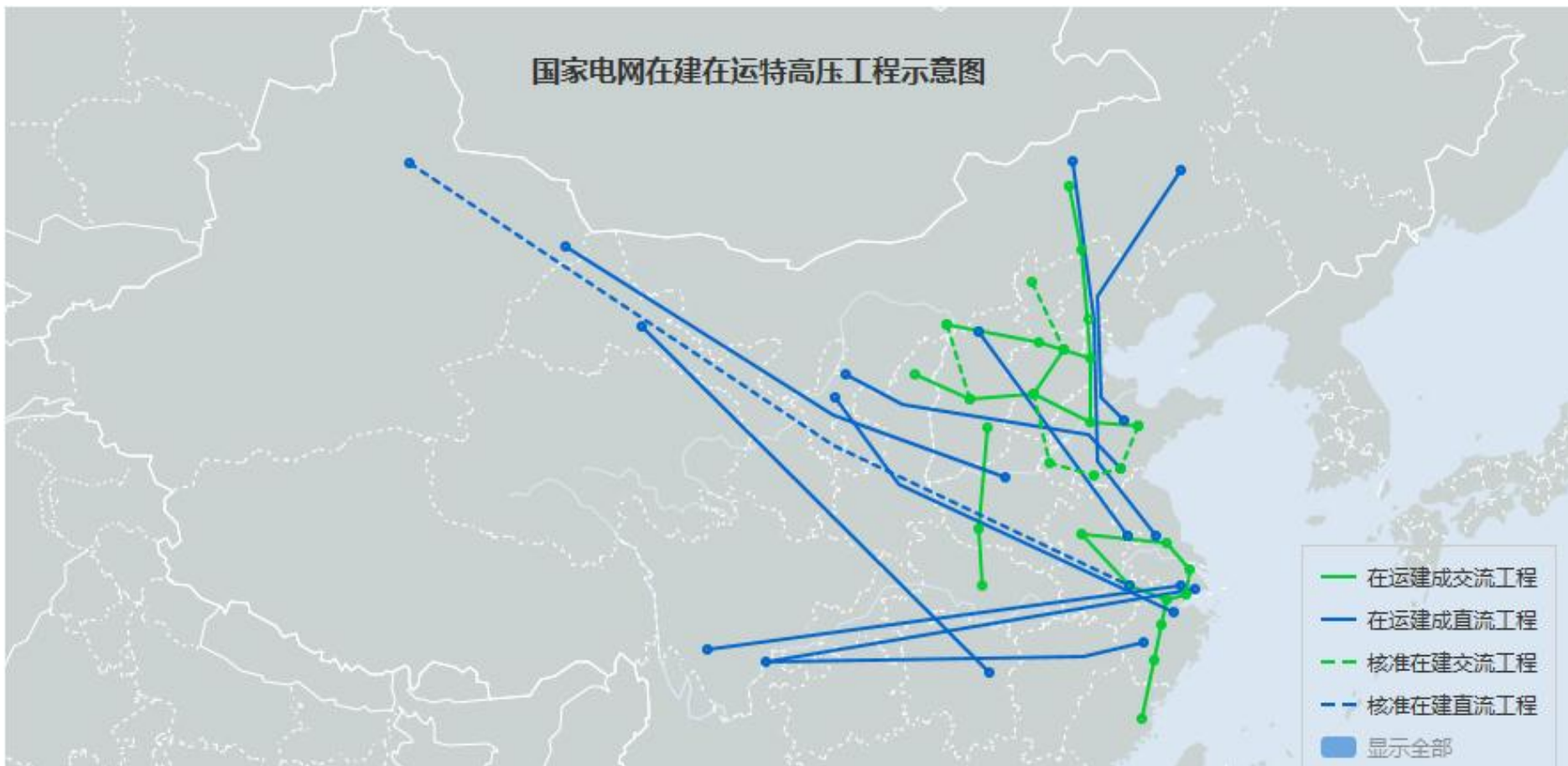
注：21 个建成项目中，上海庙-山东项目已经竣工，但尚未正式投运。



一、背景和意义

国家电网公司在建运特高压工程示意图

截至2019年6月，国网特高压建成“九交十直”、核准在建“三交一直”工程。





一、背景和意义

南方电网公司在建运直流工程示意图

截至2019年6月，南方电网西电东送已经形成“八条交流、十条直流”，直流送电规模超过3240万千瓦。





二、报告的主要内容





二、报告的主要内容

第一章 高压直流输电技术概述

常规高压直流输电技术、柔性高压直流输电技术的发展概况和技术特点



第二章 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电工程

天广、高肇、兴安、牛从、金中直流工程概况、系统结构、参数、运行情况、典型故障及分析、运维策略及工作经验



第三章 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程

楚穗、普侨、新东直流工程概况、系统结构、参数、运行情况分析、运维策略及工作经验



第四章 柔性直流输电工程

鲁西背靠背异步互联、南澳岛多端柔直工程概况、系统结构、参数、运行情况分析、运维策略及工作经验



第五章 总结与展望

世界范围内的发展趋势、最新的HVDC技术、电网安全可靠的要求



三、报告的亮点





三、报告的亮点

亮点一：十大标志工程简介

序号	工程名称	输电距离	输电容量
1	±500kV天广直流工程	960km	1800MW
2	±500kV高肇直流工程	883km	3000MW
3	±500kV兴安直流工程	1194km	3000MW
4	±500kV牛从直流工程	2 x 1223km	2 x 3200MW
5	±500kV金中直流工程	1105km	3200MW
6	±800kV楚穗直流工程	1387km	5000MW
7	±800kV普侨直流工程	1413km	5000MW
8	±800kV新东直流工程（最新投运）	1953km	5000MW
9	±500kV鲁西背靠背异步联网工程	-	3000MW
10	南澳岛柔性直流工程	-	200MW



三、报告的亮点

亮点一：十大标志工程

南方电网西电东送最大直流通道——牛从直流

世界上首次采用同塔双回建设、同址共建换流站、的设计方案，是世界上输电容量最大、输电距离最长的同塔双回直双回共用接地极流输电工程，也是目前南方电网西电东送的最大直流通道。



从西换流站远视图



三、报告的亮点

亮点一：十大标志工程

南方电网海拔最高、抗震等级最大的特高压换流站——新松换流站

- ◆ 新松换流站站址位于剑川县城西南的羊岑乡新松村，海拔2328米，站址地震基本烈度为8度。
- ◆ 根据《电力设施抗震设计规范》（GB 500260 - 2013）的规定，新松换流站站内电气设备抗震设计按提高一度，按照9度设防，达到抗震设防“小震不坏，中震可修，大震不倒”的三水准要求。



新松站远视图



三、报告的亮点



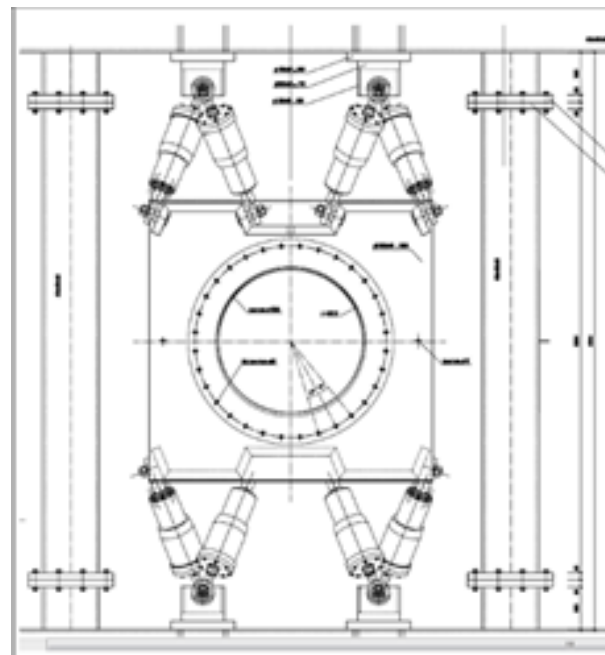
中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

亮点一：十大标志工程

- ◆ **穿墙套管抗震设计**： $\pm 800\text{kV}$ 直流穿墙套管采用首次柔性安装方式，提高直流穿墙套管的抗震性能。直流穿墙套管已通过0.4g真型地震试验。



穿墙套管减震缓冲器实物图



穿墙套管减震缓冲器结构图



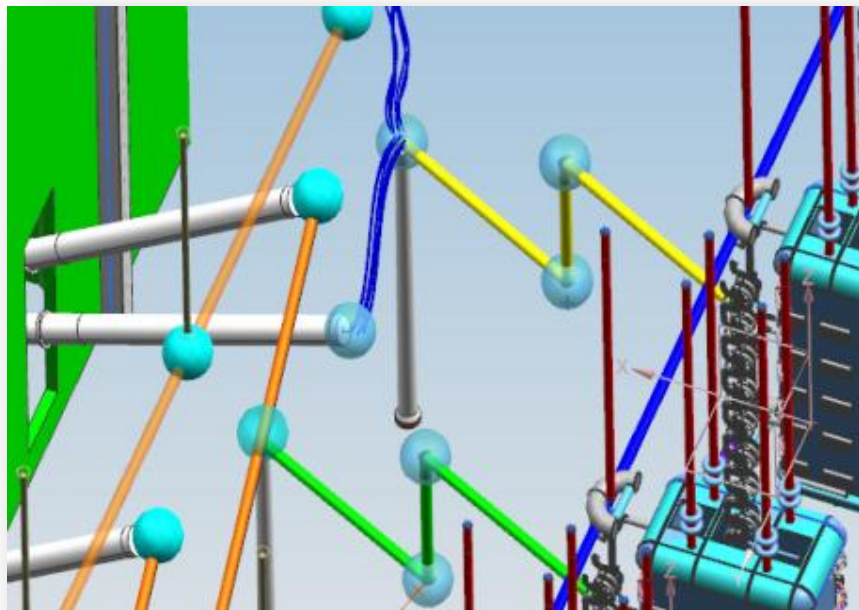
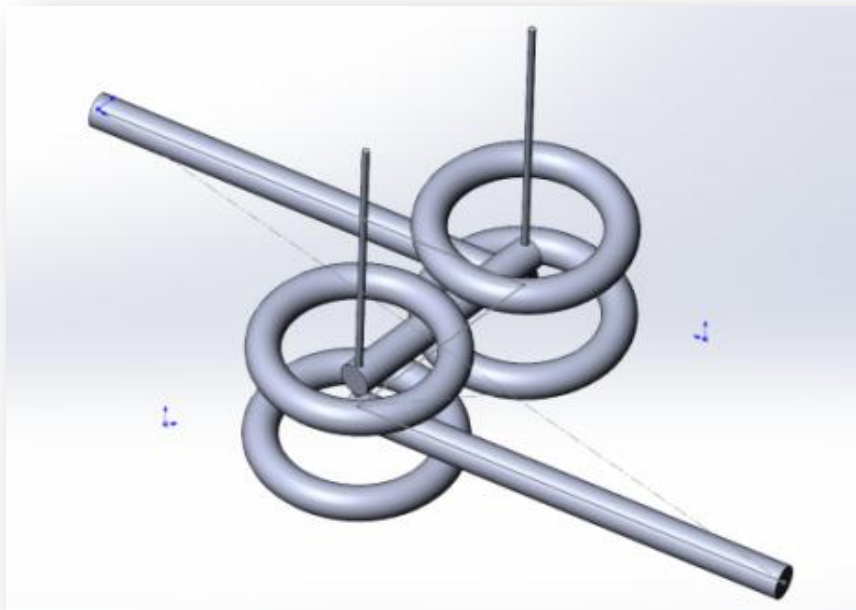
三、报告的亮点



中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

亮点一：十大标志工程

- ◆ **其他设计**：换流变阀侧套管与换流阀塔之间首次采用“Z”型连接金具，减小地震作用下换流阀塔位移对换流变阀侧套管的影响。



“Z”型金具结构图

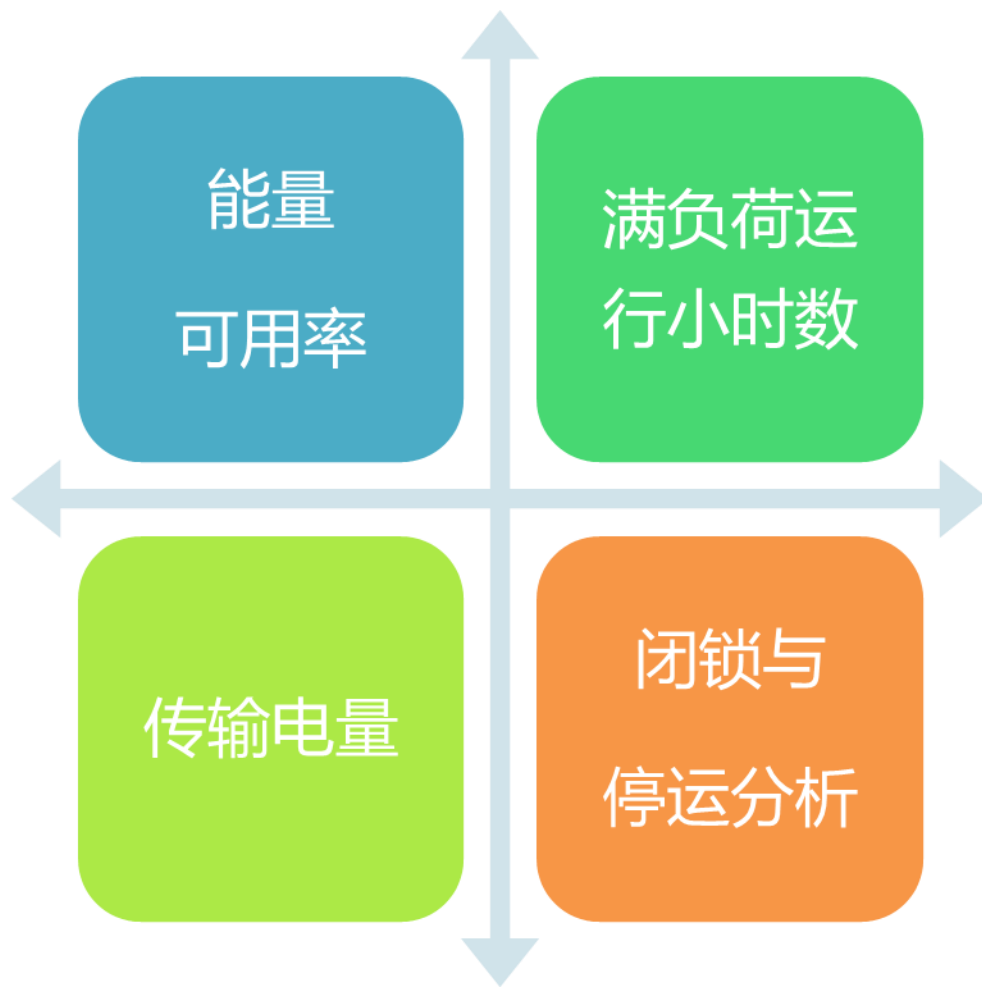


三、报告的亮点



中国南方电网
CHINA SOUTHERN POWER GRID

亮点二：直流系统四大运维指标

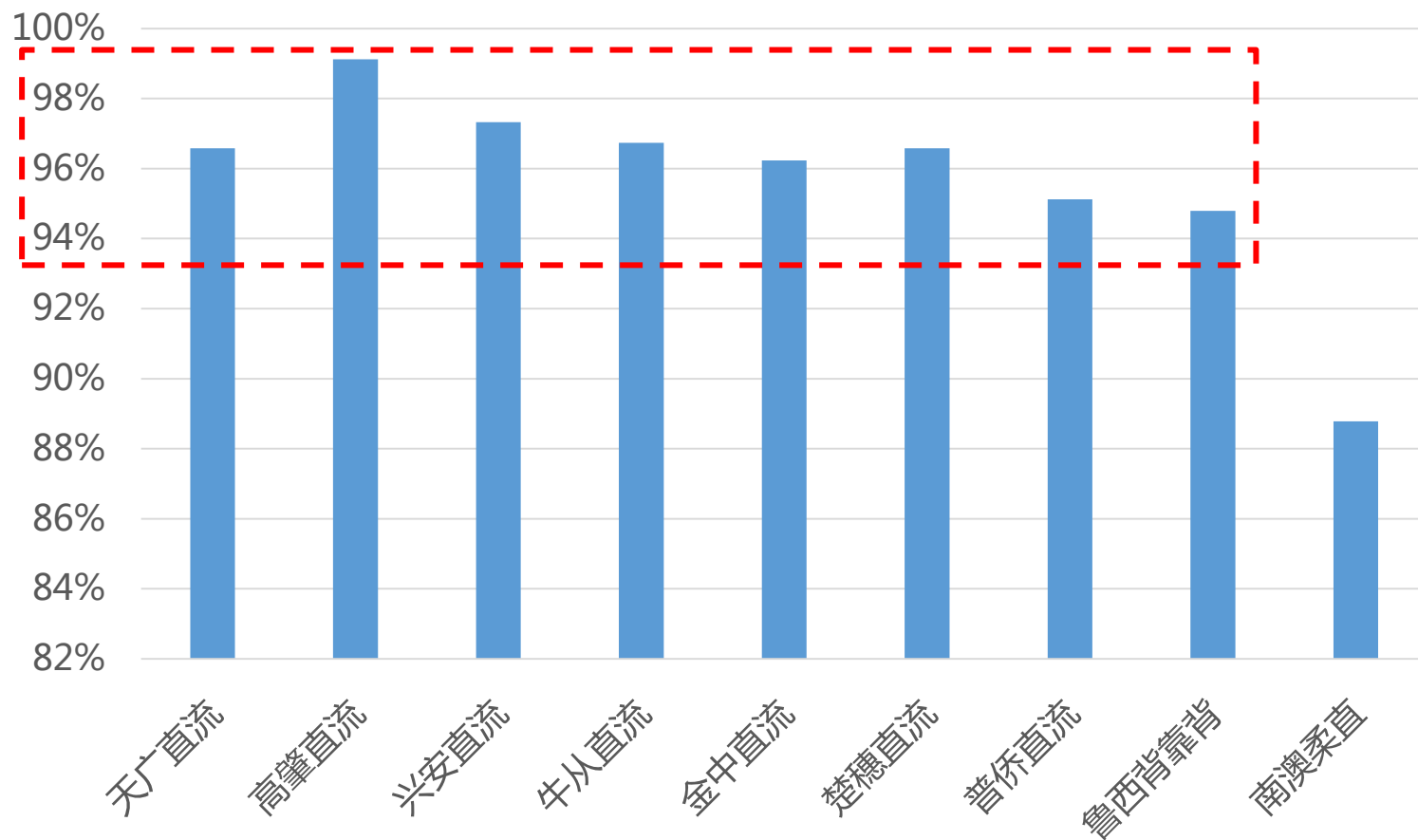




三、报告的亮点

亮点二：直流系统四大运维指标

能量可用率

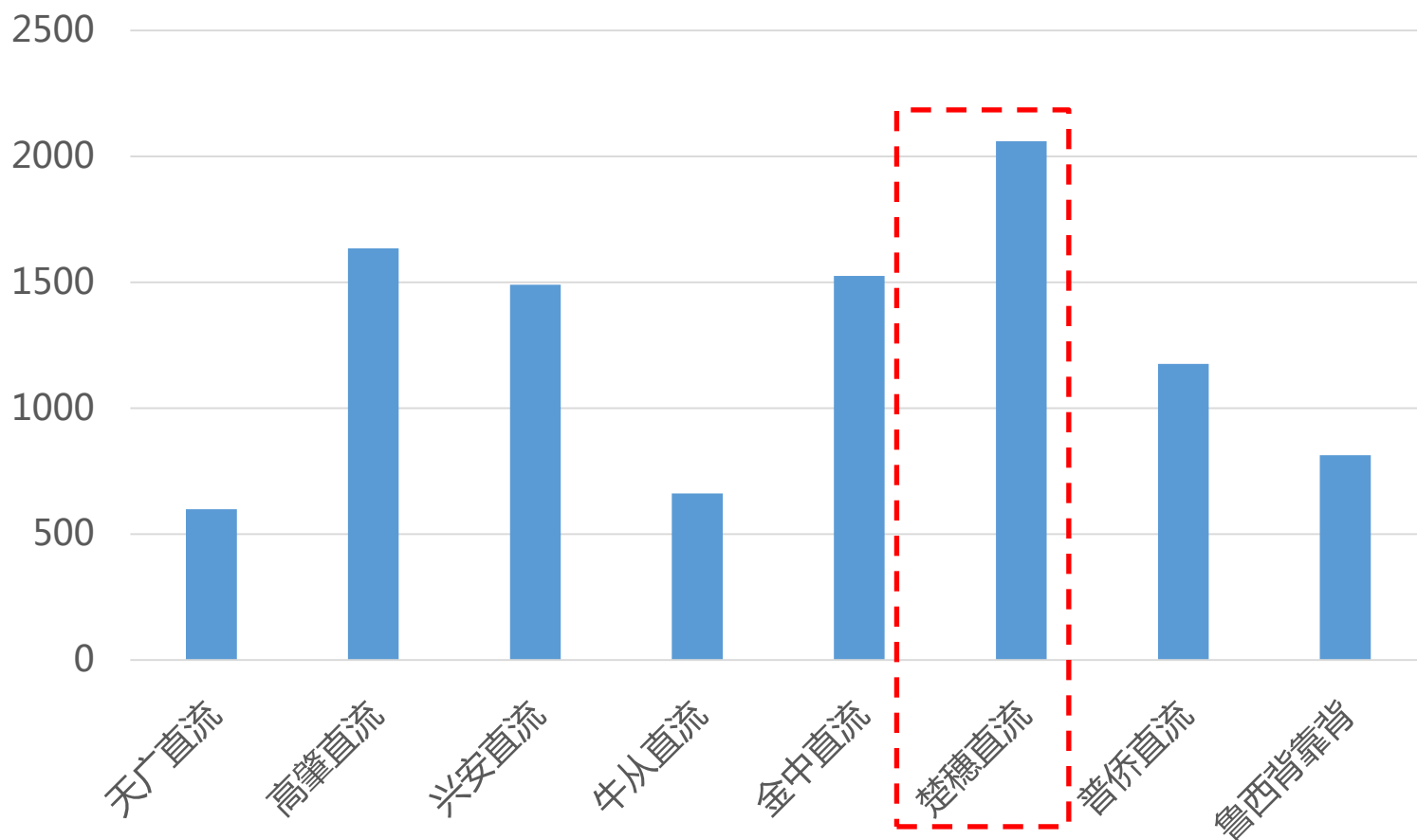




三、报告的亮点

亮点二：直流系统四大运维指标

满负荷运行小时数

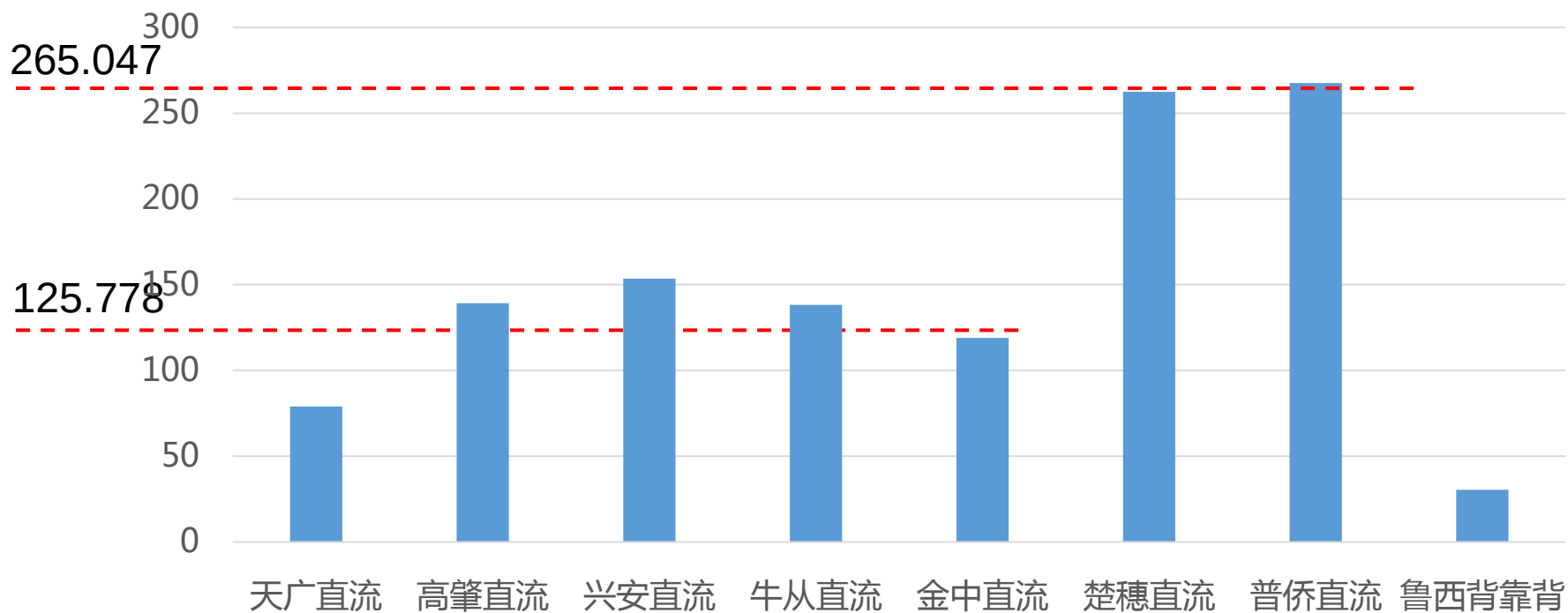




三、报告的亮点

亮点二：直流系统四大运维指标

传输电量（亿千瓦时）





三、报告的亮点

亮点二：直流系统四大运维指标

闭锁及停运分析

输电线路故障

- 直流线路雷击故障
- 接地故障
- 冰闪
- 外力因素（站外施工单位违规作业净空距离不足放电、爆破炸石导致光缆断股）

一次设备故障

- 分接开关油流继电器设计不合理
- 直流避雷器故障
- 晶闸管阀硅堆安装板有裂纹
- 高压直流穿墙套管复合外套破损
- 低端换流变有载调压开关故障

控制保护故障

- VBE系统板卡设备老化
- VBE系统设计不合理
- 400V站用电母线进线开关Ig保护设计不合理
- 极控主机板卡存在故障

阀及阀冷故障

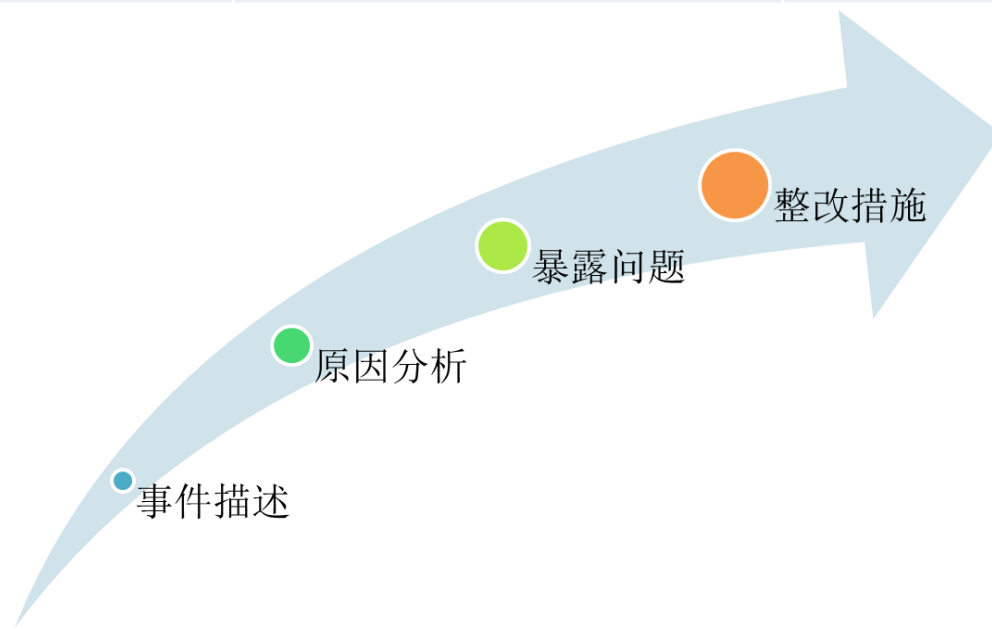
- 阀冷密封垫圈老化变形导致内冷水漏水
- 阀冷系统金属管与S型塑料管对接安装工艺不合格



三、报告的亮点

亮点三：典型故障分析案例

	一次设备	二次设备
高压直流输电工程	15	6
特高压直流输电工程	9	4
柔性直流输电工程	2	6
合计	26	16





三、报告的亮点

亮点三：典型故障分析案例

阀组件阳极电抗器内冷水管磨损事件

事件概述：某站监控系统报“P12VHA-B C相S侧第一阶段漏水警报报警”，“阀厅避雷器接口和漏水监测 报警2出现”，“阀厅避雷器接口和漏水监测报警1出现”。现场检查发现某极2阀厅C相R侧阀塔底盘中部有积水，某极2阀厅避雷器接口屏内K23、K25，K33、 K35系统一段告警继电器灯亮。



阀厅避雷器接口屏照片



三、报告的亮点

亮点三：典型故障分析案例

阀组件阳极电抗器内冷水管磨损事件

原因分析：经检查发现破损是由于阳极电抗器软管部分直接接触到阳极电抗器上金属构件及与另一根水管的黑色塑料壳直接接触，阳极电抗器运行时产生振动，接触硬质材料的水管久而久之便被磨损最终出现漏水。



磨损水管图



亮点三：典型故障分析案例

阀组件阳极电抗器内冷水管磨损事件

- ◆ **暴露问题：** 阀塔内冷却水管应注意软管不能接触硬质材料，如有接触应在软管表面用蛇皮管进行缠绕保护，并做好绑扎固定。
- ◆ **整改措施：** 现场更换破损的冷却水管，同时调整水管的交叉角度，确保黑色塑料壳与软水管不直接接触，并对该阀厅其他水管进行了排查。同时建议：
 - ✓ 在技术规范书中需对设备的设备材质、制造和安装工艺、抗振性能、水管安装布局进行说明。
 - ✓ 验收表单应包含对阳极电抗器冷却水管安装角度、走向、空间布局等相关内容，验收时应注意软管不能接触硬质材料，如有接触应在软管表面用蛇皮管进行缠绕保护，并做好绑扎固定。
 - ✓ 阀塔发现漏水时可以利用红外测温仪对漏水点进行初步的故障定位。



三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

高压直流输电工程



- ☐ 换流变冷却器清洗优化
- ☐ 阀冷冷却塔清洗优化
- ☐ 阀塔阳极电抗器水冷优化
- ☐ 阀厅温度控制
- ☐ 7S定置管理法
- ☐

特高压直流输电工程



- ☐ 阀冷外冷系统运维经验
- ☐ 建立运维数据多维度分析机制
- ☐ 智能锁控系统
- ☐ 全站排水管道隐患治理
- ☐

柔性直流输电工程



- ☐ MMC换流阀子模块快速更换平台
- ☐ 巡检机器人
- ☐ 仿真平台
- ☐

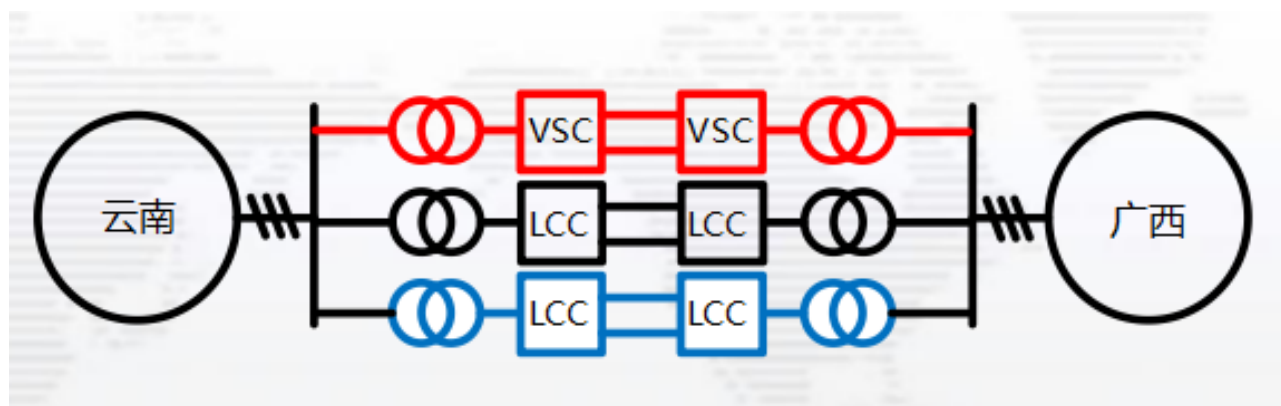


三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数

- ◆ 鲁西背靠背直流异步联网工程一端连接云南电网，一端连接南方电网主网架。工程规模为3000MW，其中常规直流单元为2000MW和柔性直流单元为1000MW，柔直单元的直流电压达 $\pm 350\text{kV}$ ，三个单元可同时或分别独立从云南电网向广西电网输送电量电压和容量均为当时世界最高水平。



鲁西换流站站内结构示意图



三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数

◆ **存在问题**：鲁西换流站自投运后多次发生直流单元闭锁事件，暴露出**直流控制保护系统**存在影响直流安全稳定运行的严重隐患。

序号	时间	故障情况	故障原因	直流
1	2016年10月12日	换流单元三云南侧直流保护系统A CPU2交流连接母线差动动作（测量故障，单CPU一取一出口跳闸）	软件逻辑不完善	柔直
2	2016年10月15日	换流单元二极控故障跳闸（MS48任务进程停止）	软件逻辑不完善	常直
3	2016年10月15日	换流单元三广西侧双套阀控系统上位机通讯故障跳闸	软件逻辑不完善	柔直
4	2016年10月22日	换流单元三广西侧直流保护2 动作（测量故障，合并单元断电，出口逻辑切换为“或”，出口跳闸）	软件逻辑不完善	柔直
5	2016年11月1日	换流单元三云南侧直流保护1跳闸测量异常，单个CPU中的“失灵启动远跳”保护启动，“或”逻辑跳闸	软件逻辑不完善	柔直
6	2016年11月22日	换流单元三云南侧阀控系统跳闸（脉冲分配箱切换板程序存在缺陷，10ms 开关频率超限故障，模块超限旁路跳闸）	软件逻辑不完善	柔直
7	2017年2月23日	换流单元三广西侧BU桥臂第121故障功率模块采样回路异常，导致阀控系统功率模块过压保护逻辑动作跳闸	软件逻辑不完善	柔直
8	2017年2月24日	工作站系统存在功能缺陷，顺控回退功能自动触发了常直顺控操作，导致正在运行的常直单元停运	软件逻辑不完善	常直
9	2017年3月5日	2017年3月5日鲁西站广西侧柔性直流阀控C相下桥臂第一个机箱通讯故障跳闸	软件逻辑不完善	柔直

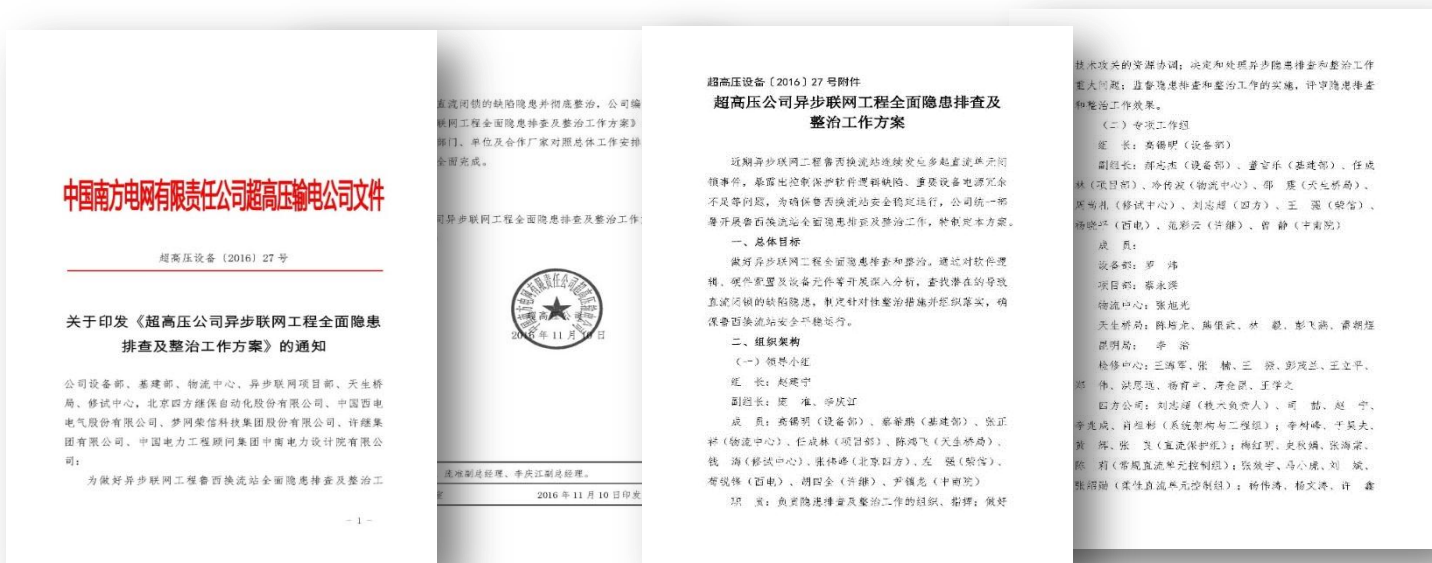


三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数

- ◆ **组织部署**：2016年11月超高压公司组织召开专题工作会，成立以公司总经理为组长，副总经理为副组长的专项工作组，编制并印发了《异步联网工程全面隐患排查及整治工作方案》，组织公司内外部技术力量，启动了鲁西换流站直流设备隐患排查与整改工作。





三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数





三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

◆运用SIPOC模型，界定项目的整体范围

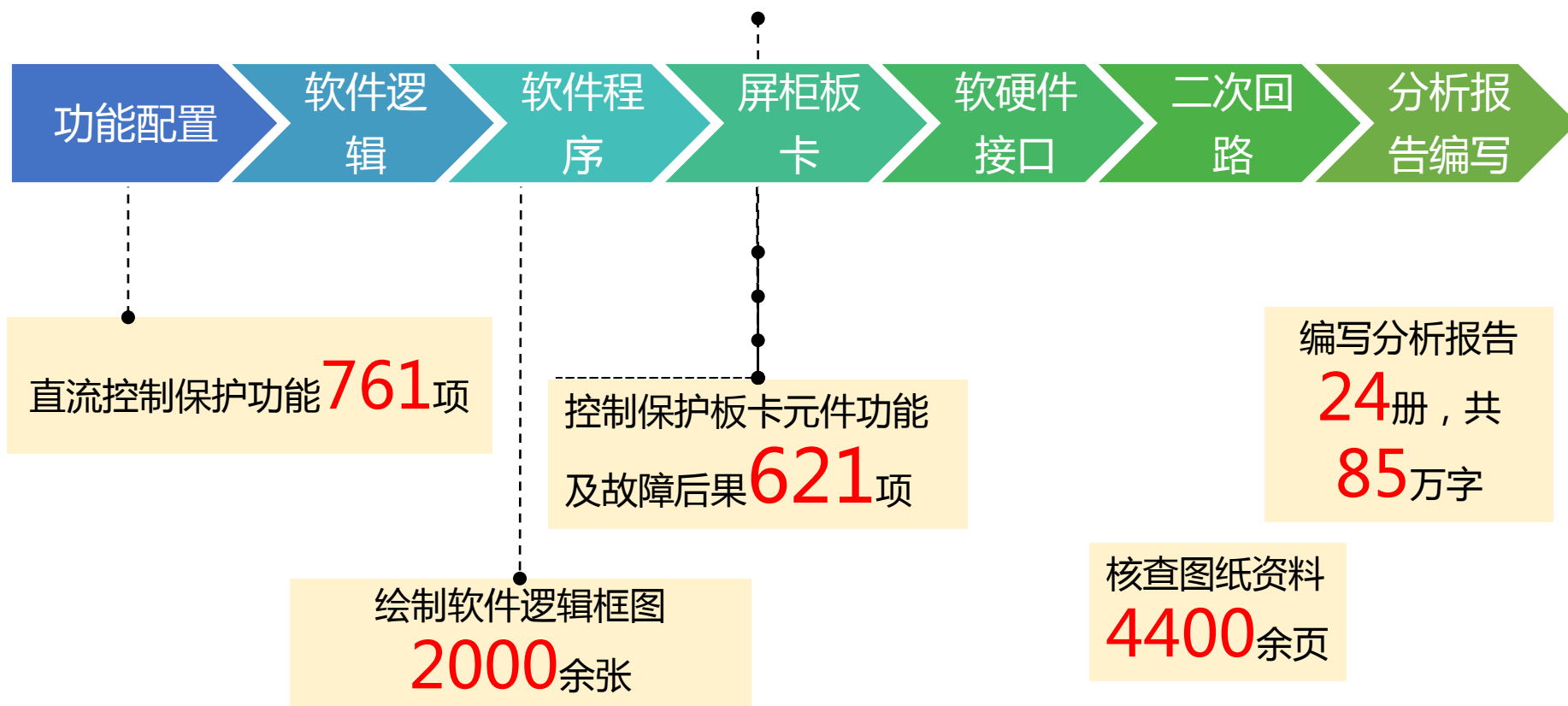
Suppliers 供应商	Inputs 输入	Process 流程	Outputs 输出	Customers 客户
南网系统运行部 超高压计划发展部 超高压生产技术部 天生桥局生产技术部 天生桥局变电管理所	年度运行方式计划 年度送电量计划 年度停电检修计划 临时停电计划 每日功率曲线 设备隐患通知书	调度下达柔直单元每日功率曲线 ↓ 按照功率曲线安排每日输电任务 ↓ 设备日常巡视 ↓ 设备异常处理 ↓ 计划停电检修	送电量 隐患处理报告 故障处理分析报告 年度停电检修方案	系统运行部 广西电网 广东电网



三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

◆ 实施过程





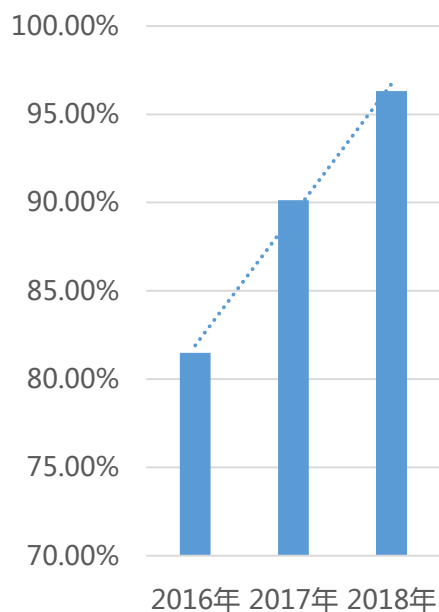
三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

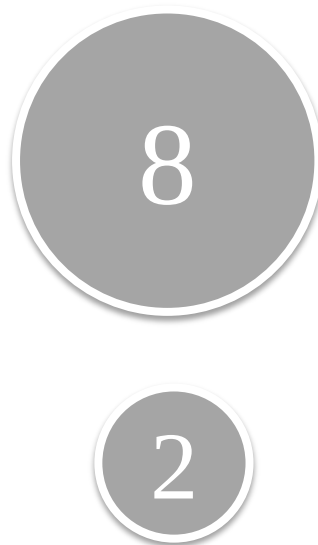
精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数

◆ **项目成果1**：柔直运行指标持续向好，创造良好的社会和经济效益

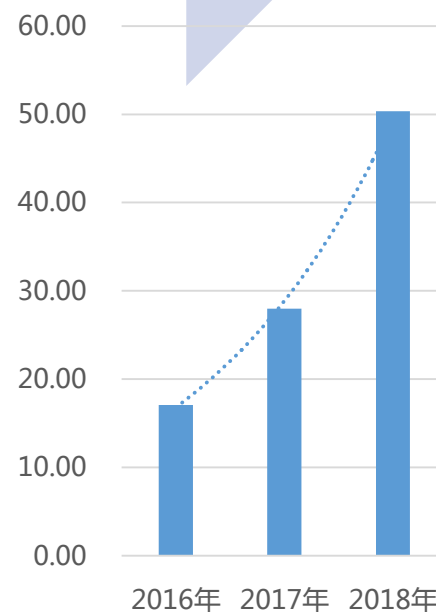
直流能量可用率大幅提高



直流闭锁次数显著下降



直流送电量大幅提高





三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

精益管理——提升鲁西柔直单元通道利用小时数

- ◆ **项目成果2**：积极推进柔直运维体系建立，提高整体运维水平
- ◆ **项目成果3**：推进了后续柔直技术在电力行业的应用与发展，成果已全面应用于世界首个800kV多端混合直流工程乌东德多端混合直流工程前期技术规范及设计
- ◆ **项目成果4**：增强了柔直专业技术人才发展，逐步形成一支懂技术、精技能、善创新的柔直运维专业化队伍，目前团队成员已发表及受理论文21篇，已授权及受理专利6项。

《鲁西站直流控制保护系统运行风险分析及运维策略》

《柔性直流输电现场实用技术问答》

柔直和常直混合运行功率协调控制设计规范、柔性直流功率模块运维规范

探索建立柔直设备预试监督和检修监督体系



三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

南方电网海拔最高、抗震等级最大的特高压换流站——新松换流站

- ◆ **抗震运维措施1**：对地震监测系统进行了日常巡视和维护，避免该系统因故障导致无法监测地震的发生。
- ◆ **抗震运维措施2**：在换流站内的综合楼和主控楼配备地震救援应急包，提升站内人员的地震后自救能力。



地震监测系统



地震应急包



三、报告的亮点

亮点四：若干运维经验

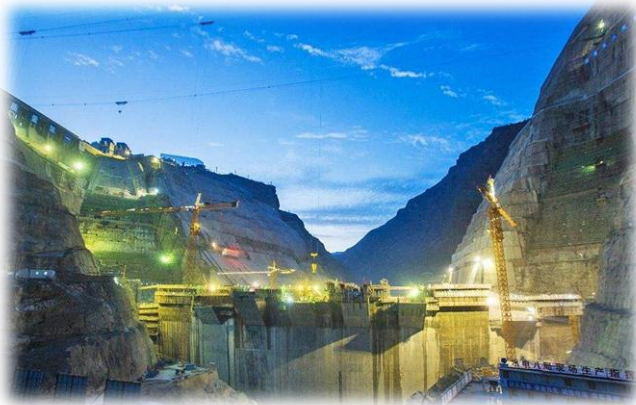
南方电网海拔最高、抗震等级最大的特高压换流站——新松换流站

- ◆ **抗震运维措施3**：每年开展**沉降观测**，对站内的设备基础的形变情况开展分析。
- ◆ **抗震运维措施4**：开展地震应急演练，完善地震应急处置预案，编制《**新松换流站地震灾害应急处置卡**》，确保地震发生时人员职责明确，处置措施得当。
- ◆ **抗震运维措施5**：编制《**大理局新松换流站地震后特殊巡视作业指导书**》，根据局安监部发布的地震信息对站内开展地震后特殊巡视，重点关注GIS、GIL等开关设备的形变情况。
- ◆ **抗震运维措施6**：结合最新的科技成果，立项开展《**基于北斗多星导航定位系统的换流站GIL设备基础位移/倾斜监测技术**》、《**基于GNSS技术的特高压换流站主设备地震灾害位移预警系统研究**》等项目研究，对站内设备因地震导致的实时位移情况进行在线监测和研究，为地震后快速恢复设备运行提供决策依据。



四、展望与寄语

世界范围内的发展趋势



最新应用的HVDC技术



电网安全可靠的要求





直流输电技术发展趋势

- 高电压、大容量、远距离输送
- 向柔性直流输电发展
- 配电系统的直流应用
- 构建直流电网
- 异同步互联
- 研发直流开关设备

携手为高压直流输电的发展，贡献各方力量！

欢迎各位学者，读者对本报告提出意见及建议！

谢谢！



万家灯火
南网情深
A Myriad of Twinkling Lights
Great Rapport of CSG