

新一代高性能柔性直流背靠背技术及工程应用

侯婷¹, 刘涛¹, 杨柳¹, 袁智勇^{1,✉}, 朱博², 施世鸿³

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东广州 510663; 2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东广州 510000; 3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东广州 510663)

摘要: [目的] 广东电网区域由于负荷密集, 网架结构复杂, 电气联系紧密, 长期存在大面积停电风险、交直流相互影响、短路电流超标三大问题, 难以满足未来电源负荷发展和系统灵活调控的需求。[方法] 为解决上述问题, 在广东电网核心区域建设高性能柔性直流背靠背工程, 研究并采用新一代高性能柔性直流背靠背技术。在复杂电网柔性直流互联控制, 高可靠、高性能换流阀研发, 绿色高效换流站设计等方面开展了深入研究, 实现了柔性直流背靠背技术升级。[结果] 工程成功实现了异步潮流自动控制, 大幅降低了控制保护系统链路延时, 研制出了高性能、高可靠性柔性直流换流阀, 并在换流站降噪、降损、节水等方面做了优化设计, 建成换流站全景感知系统, 实现了智慧运维。目前该工程运行良好。[结论] 广东电网直流背靠背工程解决了多直流馈入受端电网长期以来面临的三大稳定问题, 增强了粤港澳大湾区电力长期安全可靠供应能力。

关键词: 柔性直流输电; 背靠背; 高性能; 高可靠性; 降噪; 降损; 节水; 数字化运维

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0001-08

开放科学(资源服务)二维码:



New Generation High-Performance VSC-HVDC Back-to-Back Technology and Application in Project

HOU Ting¹, LIU Tao¹, YANG Liu¹, YUAN Zhiyong^{1,✉}, ZHU Bo², SHI Shihong³

(1. State Key Laboratory of HVDC, CSG Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;

3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Due to the dense load, complex grid structure, and close electrical connections in the Guangdong power grid area, there are three major problems for a long time: the risk of large-scale power outages, the interaction between AC and DC, and the excessive short-circuit current, making it difficult to meet the needs of future power load development and flexible system regulation. [Method] To address the above issues, a high-performance VSC-HVDC (Voltage Source Converter-based High Voltage Direct Current) back-to-back project was constructed in the core area of Guangdong Power Grid, and a new generation of high-performance VSC-HVDC back-to-back technology was studied and adopted. The VSC-HVDC interconnection control of complex power grids, the development of highly reliable and high-performance converter valves, and the design of green and efficient converter stations were deeply studied. The upgrade of VSC-HVDC back-to-back technology was achieved. [Result] The project successfully achieved automatic control of asynchronous power flow, significantly reducing the link delay of the control and protection system, developed high-performance and highly reliable VSC-HVDC converter valves, and optimized the design in terms of noise reduction, loss reduction, water conservation, and other aspects of the converter station. A comprehensive perception system for the converter station was built, achieving intelligent operation and maintenance. At present, the project is running well. [Conclusion] The VSC-HVDC back-to-back project of Guangdong Power Grid has solved the three major stability problems faced by the multi DC feeder receiving end grid for a long time and enhanced the long-term safe and reliable power supply capacity of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Key words: VSC-HVDC; back-to-back; high performance; high reliability; noise reduction; loss reduction; water saving; digital operation and maintenance

收稿日期: 2023-07-15 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 中国能建广东院科技项目“高压大容量柔性直流换流站设计关键技术研究”(EV04701W)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

电力系统的发展势必走向联网。柔性直流背靠背工程是交流电网分区互联的典型应用。大湾区电网区域负荷密集,网架结构复杂,电气联系紧密,长期存在大面积停电风险突出、交直流相互影响、短路电流超标三大问题,难以兼顾未来适应电源负荷发展需求和提升系统灵活调控能力。在大电网核心区域建成世界领先的高性能柔性直流背靠背工程,解决了多直流馈入受端电网长期以来面临的三大稳定问题,增强了粤港澳大湾区电力长期安全可靠供应能力。广东电网直流背靠背工程分别在广州、东莞各建设 2 个 1500 MW 容量的柔性背靠背直流单元,额定直流电压为 ± 300 kV,在柔直多场景自适应控制、高性能装备研制以及绿色高效站设计等方面取得重大技术突破。工程建成投产后,可大幅降低广州、东莞等核心地区 500 kV 短路电流水平,可消除多回直流同时换相失败风险。

1 柔性直流背靠背系统简介

1.1 柔性直流背靠背技术

背靠背直流输电系统没有直流输电线路,可用于两个异步的交流电力系统之间的联网或送电。背靠背直流输电系统的整流侧和逆变侧通常布置在一个换流站内,可称为背靠背换流站^[1-2]。图 1 为柔性直流背靠背系统示意图(对称单极接线为例)。

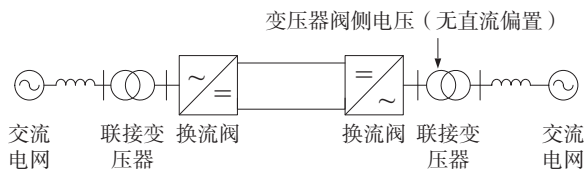


图 1 柔性直流背靠背系统示意图

Fig. 1 Wiring diagram of back-to-back VSC-HVDC system

1.2 柔性直流背靠背技术应用现状

柔性直流背靠背工程采用全控型功率器件,具有快速、独立的有功和无功控制能力,可作 STATCOM 运行等优点。随着电力系统联网运行要求的增多以及功率器件的快速发展,柔性直流背靠背技术将得

到更广泛的应用。目前已投运的国内外工程如表 1^[3-4]所示。

表 1 已投运的柔性直流背靠背工程(2022 年统计)

Tab. 1 Back-to-back VSC-HVDC projects (statistics for 2022)

工程名称	国别	功率/ MW	直流电压/ kV	投运年份
Eagle Pass B2B	美国 墨西哥	36	± 15.9	2000
Mackinac B2B	美国	200	± 70	2014
Clovis Tres Amigas SuperStation	美国 墨西哥	750	± 300	2014
云南电网与南网主网 背靠背异步联网工程	中国	1000	± 350	2016
渝鄂直流背靠背联网工程	中国	1250	± 420	2018
广东电网直流背靠背广州工程	中国	1500	± 300	2022
广东电网直流背靠背东莞工程	中国	1500	± 300	2022

2 广东直流背靠背系统设计

2.1 电气接线

每个背靠背换流站建设 2 个 1500 MW 柔性背靠背直流单元,每个柔直背靠背换流单元采用对称单极接线。换流器阀组采用半桥型模块化多电平拓扑结构,柔直变压器采用单相双绕组型式,接线组别为 YNyn0。启动回路设置在柔直变压器阀侧,启动电阻与隔离开关并联后,一端接至换流阀侧,另一端与柔直变压器相连。直流极线上不设置断路器,正负极母线均装设直流电压电流测量装置、避雷器、隔离开关等设备。电气接线如图 2 所示。

2.2 运行方式

本工程的主要运行方式有 3 种,分别为:直流正向运行方式、反向输送运行方式、STATCOM 运行方式。换流站两侧均能够调节无功输出,实现对换流站内无功的就地补偿和近区电网的动态无功补偿。

2.3 主设备参数及选型

2.3.1 柔性直流换流阀

本工程研发了基于压接型 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor,绝缘栅双极型晶体管)的高可靠、高性能柔性直流换流阀,具体参数如表 2 所示。

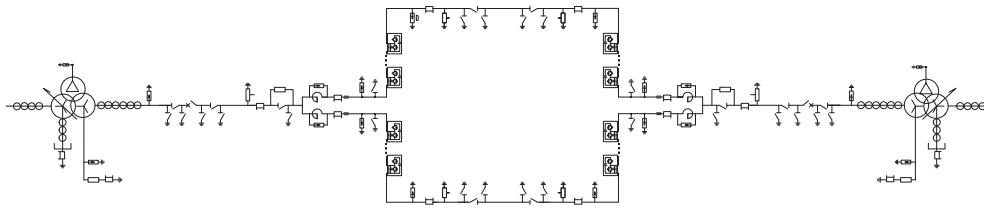


图2 柔性直流背靠背工程电气接线

Fig. 2 Electrical connection diagram of VSC-HVDC Back-to-Back project

表2 柔性直流换流阀参数
Tab. 2 Parameters of VSC valve

参数	数值
额定直流电压/kV	±300
直流电流/A	2500
直流模式无功支撑能力/Mvar	±450
STATCOM模式无功支撑能力/Mvar	±600
功率器件额定电压/V	4500
功率器件额定电流/A	3000
功率模块额定运行电压/V	2100
每桥臂功率模块数(含冗余/不含冗余)	310/286
功率模块电容容值/mF	15

2.3.2 柔性直流变压器

柔性直流变压器采用单相双绕组型式, 接线组别为YNyn0, 具体参数如表3所示。

表3 变压器参数
Tab. 3 Parameters of transformer

参数	数值
柔直变压器容量(单相双绕组)/MVA	575
柔直变压器短路阻抗UK	18%
柔直变压器网侧绕组额定(线)电压/kV	525
柔直变压器阀侧绕组额定(线)电压/kV	300
柔直变压器分接开关级数/档	+6/-6
分接开关的间隔	1.25%

2.3.3 桥臂电抗器

本工程桥臂电抗器为干式空心, 半户内布置, 自然风冷。设计上考虑了与柔性直流变压器漏抗的配合、桥臂环流限制、最大无功输出能力和电流迅速跟踪能力, 电感取值为60 mH。

2.4 控制保护系统

控制保护是直流输电系统的“大脑”, 直接决定

了工程运行的功能、性能和安全。控制保护系统的总体结构设计需要综合考虑可靠性、灵活性等因素, 为了提高直流运行的可靠性, 限制任一环节故障造成的影响, 通常采用分层分布式结构^[5-7]。

直流控制系统用于: 执行运行人员控制系统或远方调度中心的控制指令; 产生闭环参考波调节信号, 完成解锁、闭锁和变压器分接开关控制; 实现交、直流开关场的顺序控制、联锁和同期控制; 对交、直流回路开关及辅助设备的状态及测量参数进行监视和传输。

背靠背直流系统的控制设备根据功能划分为: 远动通信系统、运行人员控制系统、交流站控系统、单元控制系统和就地控制系统等, 各子系统间通过标准接口通信, 实现完整的控制功能。

直流保护系统应满足可靠性、选择性、灵敏性、速动性的基本要求, 并据此进行保护原理的设计与合理的冗余配置; 任一单一元件故障都不应引起保护误动或拒动; 在任何运行工况下都不应使某一设备或区域失去保护。

直流保护范围包括联接变压器及其阀侧交流引线、启动回路、换流器、直流场等。直流保护必须对保护区的所有相关的直流设备进行保护。相邻保护区之间应重叠, 不存在保护死区。

保护采用三重化配置, “三取二”逻辑出口。每重保护能独立地对所保护设备或区域进行全面、正确的保护。各重保护之间在物理上和电气上完全独立, 即有各自独立的电源回路, 测量回路, 信号输入/输出回路, 跳闸回路、通信回路, 主机, 以及相关通道和接口。任意一重保护因故障、检修或其他原因而完全退出时, 不应影响其他各重保护, 并对整个直流系统的正常运行没有影响。

3 广东直流背靠背工程关键技术

3.1 复杂电网柔性直流互联关键技术

围绕复杂电网柔性直流分区互联,针对柔性直流的交流化和快速功率支撑技术、超低全链路延时控制系统研制等关键技术进行了研究并在广东电网直流背靠背工程中成功应用。

3.1.1 异步潮流自动控制技术

提出了改善系统潮流分布、模拟交流联络线的异步潮流自动控制技术,首次实现了电网动态运行柔性直流模拟给定阻抗的交流联络线,主动根据两侧相角变化自动快速调节传输功率,发生交流故障时柔性直流又恢复直流特性,自动具备隔离故障特性,且能发出无功支撑交流系统电压快速恢复,或通过功率调节支撑频率稳定。柔性直流模拟交流联络线运行控制示意图如图 3 所示。柔性直流在交流故障后的穿越逻辑已有较多成熟的方案^[8-11],文章不再赘述。

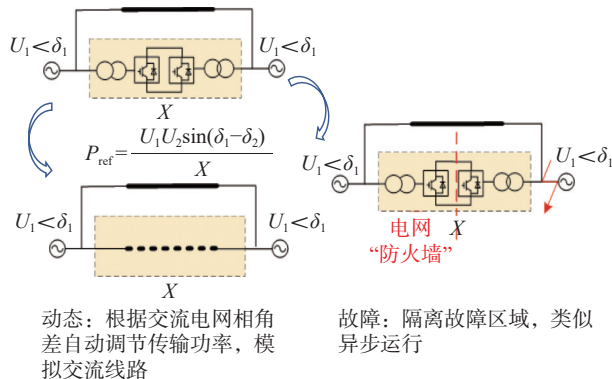


图 3 柔性直流模拟交流联络线运行控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of VSC simulated AC tie line operation

具备灵活的稳态柔直潮流翻转操作,功率参考值下发可正可负,运行人员可一键灵活潮流翻转,也可根据自动功率曲线自动潮流翻转。突破直流最小功率限制,通过柔直阀环流注入方法,背靠背柔直长时间零功率运行能力,可实现更加平滑的潮流翻转。在稳控装置触发时,具备 100 ms 的潮流满功率快速翻转能力。灵活快速的潮流翻转控制示意图如图 4 所示。

3.1.2 超低链路延时的控制系统研制

本项目实施前,鲁西工程控制链路延时为 600 μ s,昆柳龙直流工程控制链路延时为 300 μ s,柔直较长

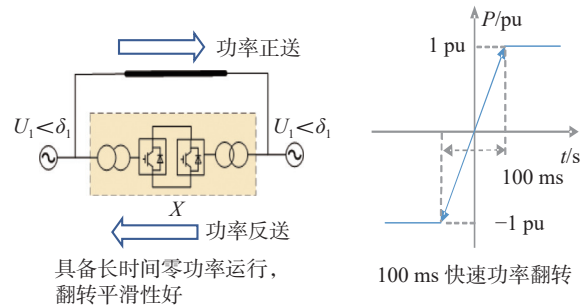


图 4 灵活快速的潮流翻转控制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flow reversal control

控制链路延时特征极大制约了交流故障下的桥臂电流抑制,以及柔直与电网负阻抗抑制,不利于柔直系统稳定运行。

本工程研制了基于纯光高速直传测量系统、新一代单元控制主机、多装置关键路径全链路千兆通讯等柔性直流超低链路延时控制系统,并攻克了新链路带来的可靠性、稳定性难题,首次将控制链路延时降低在 150 μ s 以内。其中,首次将电流内环的阀侧电流采取纯光式 CT,延时降低至 30 μ s;推动新一代控制主机工程应用,计算周期升级至 50 μ s;采取装置与控制装置、控制装置与阀控装置接口协议升级为全新的千兆以太网。控制流程的全链路延时对比图如图 5 所示。

交流故障下桥臂电流抑制速度提高 50%,实现了交流故障全穿越,故障下桥臂电流峰值距离暂时性闭锁定值裕度增大 500 A。交流系统故障时桥臂电流图如图 6 所示。

针对新链路带来的可靠性、稳定性难题,基于极控同步源,解决了光 CT 三相同步难题。针对千兆以太网板卡,全新控制主机开展了严苛的可靠性试验,全面检验并保障新控制链路的稳定性。

3.2 高可靠、高性能、自主可控换流阀关键技术

工程提出了一种采用国产 IGBT 的高可靠、高性能、自主可控柔直换流阀技术,研制出采用 100% 国产 IGBT 柔性直流换流阀和 100% 国产元部件的阀段并实现工程应用,主要包括下述关键技术。

3.2.1 4.5 kV/3 kA 国产压接 IGBT 功率模块可靠性提升技术

基于新型复合功能旁路保护晶闸管^[12],利用正向触发导通功能与反向转折击穿功能集成在单个晶闸管的技术优势,开发了应对双极短路和旁路拒动

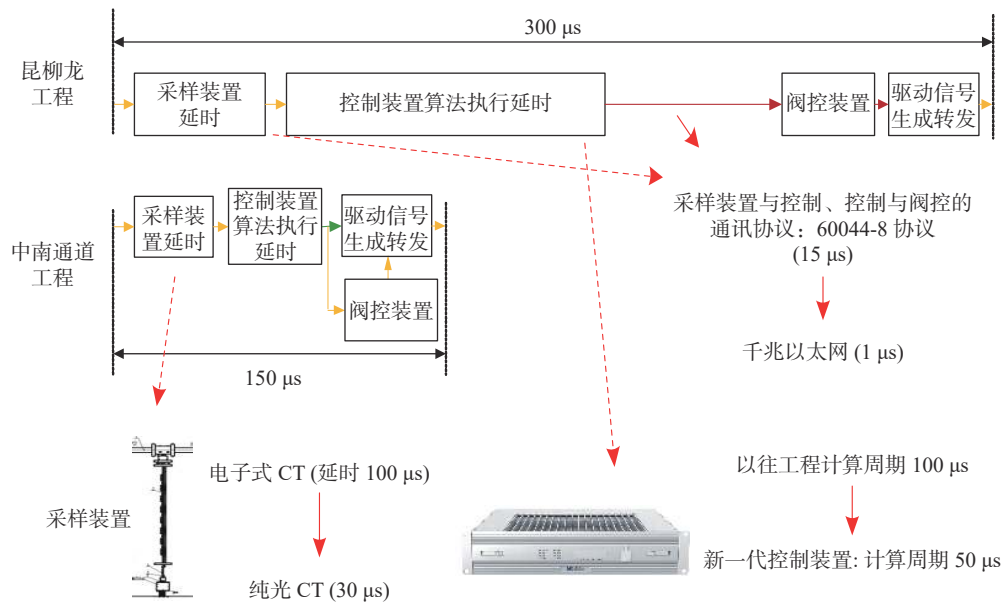


图 5 控制流程的全链路延时对比

Fig. 5 Comparison of full Link delay in control processes

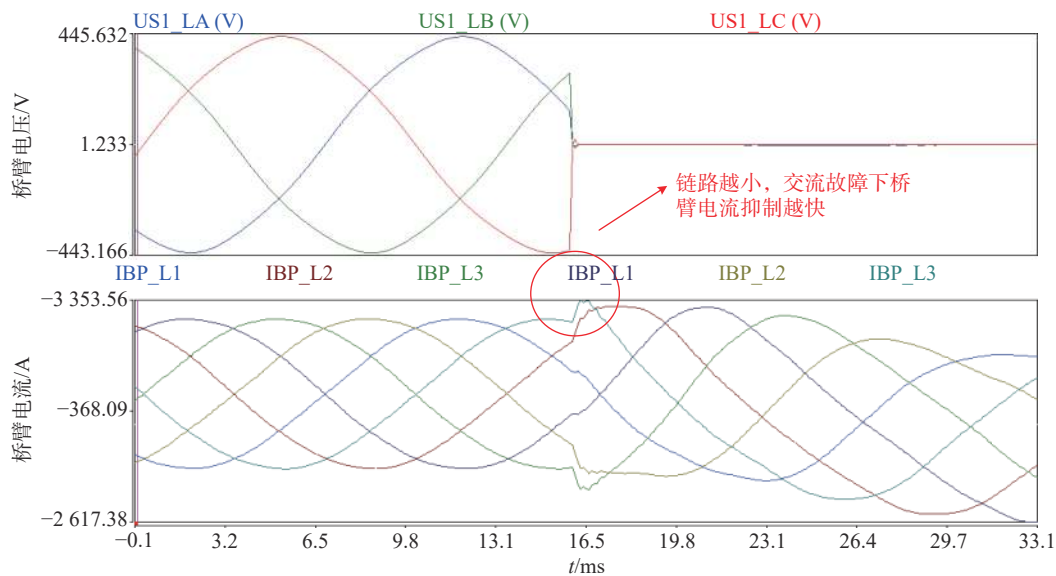


图 6 交流系统故障时桥臂电流快速抑制

Fig. 6 Fast suppression of bridge arm current during AC system failure

等极端工况的功率模块, 解决了单一故障引起系统闭锁跳闸的难题。与传统应用中同时采用两只不同功能晶闸管方案相比, 新型复合功能旁路保护晶闸管有效简化了功率模块电气结构设计, 提高了经济性和可靠性。为防止旁路开关概率极低的单机构失效问题, 采用了双机构毫秒级旁路开关技术, 两机构采用串列结构布局, 完全解耦, 可各自单独工作, 也可同时工作, 实现了对原有单机构方案的可靠性提

升, 解决了旁路开关单个机构失效导致拒动的问题, 提高了合闸可靠性。

3.2.2 国产气密柔性压接 IGBT 压力精确控制及压接效果智能评估技术

针对国产方形气密含弹簧柔性压接 IGBT 内部结构特点^[13-14], 从压接组件压力精确测量与控制系统、单轴线差异类器件高压传递及扩散结构、精密自校正压接工装平台及多样本压接试验等方面着手,

多角度保证压接组件中不同种类器件及其内部芯片压力的精确性、均匀性和同心度,进而确保 IGBT 器件内部芯片的均流以及温度均衡,实现国产 4.5 kV/3 kA 方形封装 IGBT 和圆形晶闸管的单压接组件压接,提高了功率模块的集成化程度和功率密度。研究了器件压力试纸的数字化识别和压接效果智能评估技术,开发了科学、准确、标准化的器件压接效果自动量化评估软件系统,极大改善了经验定性评估的误差。

3.2.3 脉冲箱交叉冗余控制技术

采用脉冲箱交叉冗余控制策略,硬件上实现了脉冲箱的冗余化设计,软件上基于功率模块交叉配对控制技术实现了功率模块上、下行直接通道和间接通道的双通道通信设计,解决了阀控系统单一脉冲板故障会导致功率模块旁路的难题,同时实现了在换流阀不停运情况下单一脉冲箱掉电及板卡在线更换的功能,提高了阀控系统可靠性和可维护性。

3.2.4 高静态电压均匀度五层结构紧凑型自主可控柔直换流阀阀塔研制技术

通过对换流阀分布参数、水路结构及等效电路的深入研究,建立了换流阀的静态宽频等效模型,应用 PSCAD 软件迭代仿真,精确分析阀塔层间、对地杂散电容、控制层间水路电阻分布,提高了换流阀全控型功率器件无任何开关动作时的静态电压均匀度。通过对功率模块、阀段、阀塔结构布局、机械性能的深入研究、力学迭代分析、材料性能试验验证,对换流阀阀塔进行了五层紧凑化结构设计,提高了换流阀的功率传输密度。

3.2.5 基于关键路径 5 Gbps 速率组网的换流阀子模块互联技术

为提高换流阀通信可靠性和阀控性能,基于国产 IGBT 的柔性直流换流阀需研究换流阀功率模块互联技术和高速阀控通信技术,研究关键路径 5 Gbps 速率组网的换流阀功率模块互联系统,阀控设备通过高速并行冗余通信拓扑,装置的硬件板卡实现运行时热备份,在换流阀控制设备之间采用高速通信,解决阀控设备与大量功率模块高速通信问题,实现功率模块交叉冗余通信功能。

3.2.6 100% 自主可控柔性直流换流阀阀段

研制了 100% 自主可控柔性直流换流阀阀段,实

现了柔直换流阀功率模块所有元部件自主可控,且功能、性能、可靠性需与进口产品一致;研制了基于国产芯片的多功能、宽输入、强输出的主可控数字式驱动,提出了基于国产芯片性能互补的高可靠取能与控制技术,达到与进口芯片二次板卡一致的控制效果;研制了高场强、低局放、低损耗、温升低的自主可控直流电容器研制^[15-16];研发了融合自主可控元部件特性的换流阀协同适配技术,综合优化回路杂散电感在 150 nH 左右,与进口换流阀处于同等水平,实现了关断过电压和电容放电峰值电流的平衡。

3.3 绿色高效柔直换流站关键技术

3.3.1 换流站综合降噪技术

由于本工程站址处于城市负荷中心居民区旁,为了降低换流站噪声影响,采取了一系列降噪措施,建成超静音绿色换流站,换流站整体噪声排放低于 48.5 dB(A),达到国家 1 类标准。具体如下:

1) 启动回路采用半户内布置方案,利用户内热压力差形成自然通风,相比户外布置可降低噪声约 18%;相比机械通风一年可节约 2.228 GWh 电量,通风散热、降噪效果好,绿色节能。

2) 常用的变压器冷却方式分为油浸自冷式、油浸风冷式和强迫油循环 3 种冷却方式^[17-19],本工程柔直变压器选用水冷散热方式,并采用户内布置,并在变压器外冷冷却塔加装隔声屏来实现降低噪声。

3.3.2 柔直变压器降损技术

本工程提出并采用了采用柔直变压器基于步进叠积磁密优化技术,优化铁芯截面,降低了 27% 的空载损耗,同时提出并采用了导线细线规密集并联的绕组结构优化技术,并结合油箱磁屏蔽、夹件磁屏蔽及铜屏蔽等电磁复合屏蔽技术,将负载损耗降低 31%。

3.3.3 节水技术

本工程采用柔直变压器与换流阀的外冷却系统一体化设计,共用喷淋水池和喷淋水处理系统,并采用一级二段反渗透处理工艺,共计可节约用水 8.07 m³/h,总排污量减少了 8.07 m³/h^[20]。

3.3.4 数字化运维技术

本工程基于智能传感技术,建成换流站全景感知系统,实现换流站系统故障、设备缺陷的快速准确定位和高效智能决策。数字化运维系统总体架构如图 7 所示。

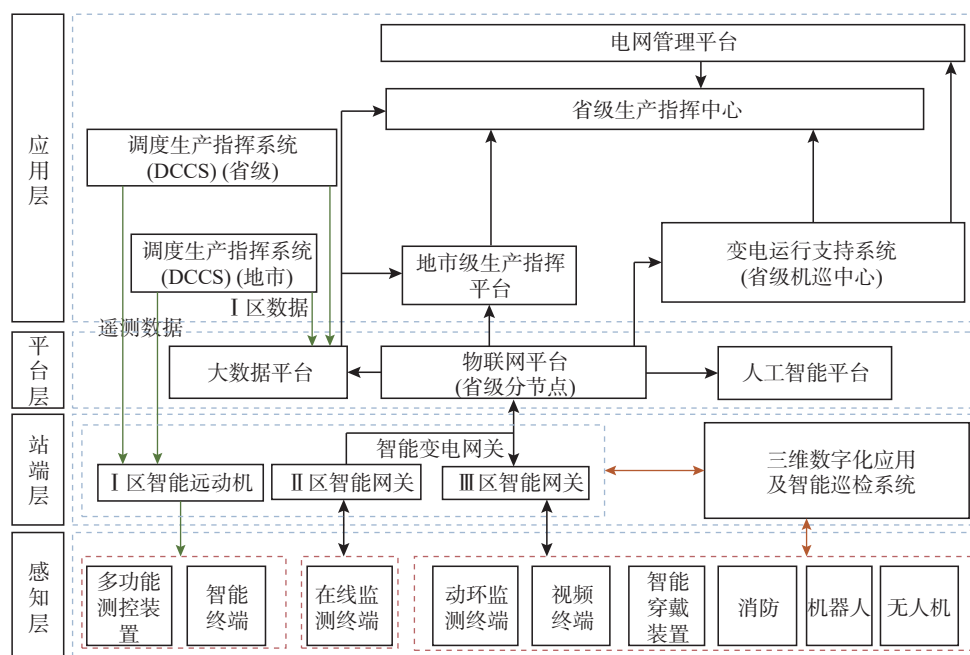


图7 数字化运维系统总体架构

Fig. 7 Overall architecture of digital operation and maintenance system

4 结论

文章结合南方电网新一代高性能柔性直流背靠背工程——广东电网直流背靠背工程,介绍了工程的系统方案,包括电气接线、主要运行方式、主设备参数、直流控制保护等,并总结了工程的关键技术及创新点。

该工程在柔直多场景自适应控制、高性能装备研制以及绿色高效站设计等方面取得重大技术突破,解决了多直流馈入受端电网长期以来面临的三大稳定问题。

参考文献:

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
TANG G F. High-voltage direct current technology based on voltage source converter [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO W J. High-voltage direct current engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 饶宏. 柔性直流输电 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
RAO H. Voltage-sourced converter based high voltage direct current transmission [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [4] 翟博龙. 直流背靠背联网技术在云南电网应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
ZHAI B L. Application research on DC back-to-back networking technology in Yunnan power grid [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2011.
- [5] 胡静, 赵成勇, 赵国亮, 等. 换流站通用集成控制保护平台体系结构 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 133-140. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.22.019.
HU J, ZHAO C Y, ZHAO G L, et al. System architecture of a universal integrated control and protection platform for converter station [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 133-140. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.22.019.
- [6] 周君文, 刘涛, 李少华. 云广特高压工程控制系统功能分布研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 70-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2009.10.015.
ZHOU J W, LIU T, LI S H. Research on control functions in UHVDC system [J]. Power system protection and control, 2009, 37(10): 70-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2009.10.015.
- [7] 刘涛, 李婧靓, 李明, 等. 南方电网鲁西背靠背直流异步联网工程控制保护系统设计方案 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 18-22. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.06.004.
LIU T, LI J J, LI M, et al. Control and protection system design of Luxi back-to-back asynchronous interconnection HVDC project of China southern power grid [J]. Southern power system technology, 2014, 8(6): 18-22. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2014.06.004.
- [8] CORONADO L, LONGÁS C, RIVAS R, et al. INELFE: main description and operational experience over three years in service [C]//2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC), Florence, Italy, May 9-10, 2019. Florence, Italy: IEEE, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740447.
- [9] 李婧靓, 黄伟煌, 刘涛, 等. 特高压多端混合直流输电系统的控制策略研究 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 47-55. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2018.02.007.
LI J J, HUANG W H, LIU T, et al. Research on control strategy of multi-terminal hybrid UHVDC transmission system [J]. Southern power system technology, 2018, 12(2): 47-55. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2018.02.007.

- 13648/j.cnki.issn1674-0629.2018.02.007.
- [10] 黄伟煌,李明,刘涛,等. 柔性直流输电受端交流侧故障下的控制策略 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 27-31. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.05.05.
- HUANG W H, LI M, LIU T, et al. Control strategy for VSCHVDC under AC system fault of receiving end [J]. Southern power system technology, 2015, 9(5): 27-31. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.05.05.
- [11] 胡兆庆,田杰,董云龙,等. 模块化多电平柔性直流输电系统网侧故障控制策略及验证 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 71-75,108. DOI: 10.7500/AEPS20130409008.
- HU Z Q, TIAN J, DONG Y L, et al. A control strategy for modular multilevel converter based HVDC flexible systems under system faults and its verification [J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(15): 71-75,108. DOI: 10.7500/AEPS20130409008.
- [12] YANG L, XU Y, YU Q, et al. Study on characteristics and application of bypass-protected thyristor in VSC valve [C]// 2022 Annual Meeting of CSEE Study Committee of HVDC and Power Electronics, Guangzhou, China, December 18-21, 2022. Hertfordshire, UK: IET, 2022: 72-77. DOI: 10.1049/icp.2023.0163.
- [13] 龙海洋,李辉,王晓,等. 纳米银烧结压接封装IGBT的长期可靠性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5779-5786. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200660.
- LONG H Y, LI H, WANG X, et al. Study on the long term reliability of nanosilver sintered press pack IGBT [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5779-5786. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200660.
- [14] B. 贾扬. 巴利加. 功率半导体器件基础 [M]. 韩郑生, 陆江, 宋李梅, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 510-515.
- BALIGA B J. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. HAN Z S, LU J, SONG L M, trans.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 510-515.
- [15] 陈才明. 金属化薄膜电容器的最新发展动态 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 1-4. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2011.04.002.
- CHEN C M. Development trend of metalized film capacitor [J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2011, 32(4): 1-4. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2011.04.002.
- [16] 郑媚媚. 金属化膜电容器失效物理建模及柔直换流阀组件可靠性评估 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.000787.
- ZHENG M M. Failure-physics modeling of metallized film capacitor and reliability evaluation of flexible converter valve module [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.000787.
- [17] 朱永利,郑瑞宏,虞礼辉. 海上风力发电水冷干式变压器冷却系统设计 [J]. 变压器, 2015, 52(7): 7-10. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2015.07.002.
- ZHU Y L, ZHENG R H, YU L H. Water-cooling system design for dry-type transformer in offshore wind power [J]. Transformer, 2015, 52(7): 7-10. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2015.07.002.
- [18] 钟思翀,祝丽花,王前超,等. 电力变压器振动噪声分析及其有源降噪 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊1): 11-21. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90341.
- ZHONG S C, ZHU L H, WANG Q C, et al. Electromagnetic vibration of power transformer and active noise reduction [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2022, 37(Suppl. 1): 11-21. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L90341.
- [19] 陈宇昇. 大型电力变压器冷却系统的技术改进 [J]. 广东输电与变电技术, 2010, 12(6): 32-34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2010.06.010.
- CHEN Y S. The innovation of large power transformer cooling system [J]. Guangdong power transmission and substation technology, 2010, 12(6): 32-34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2010.06.010.
- [20] 杨柳,张丽,周月宾,等. 柔性直流换流阀与水冷变压器外冷却系统一体化设计方案 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(6): 15-19,35. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.06.003.
- YANG L, ZHANG L, ZHOU Y B, et al. Integrated design scheme of external cooling system of VSC-HVDC converter valve and water-cooled transformer [J]. Southern power system technology, 2021, 15(6): 15-19,35. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.06.003.

作者简介:



侯婷

侯婷 (第一作者)

1981-, 女, 研究员, 正高级工程师, 华中科技大学电力电子与电力传动专业硕士, 主要从事高压直流输电技术研究(e-mail)houting7696@foxmail.com。

刘涛

1978-, 男, 研究员, 教授级高级工程师, 华北电力大学信息与计算科学学士, 主要从事直流输电控制保护技术研究(e-mail)liutao@csg.cn。

杨柳

1989-, 女, 研究员, 高级工程师, 华北电力大学电力系统及其自动化专业硕士, 主要从事柔性直流输电技术的研究(e-mail)yangliu3@csg.cn。

袁智勇 (通信作者)



袁智勇

1978-, 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为智能电网和综合能源系统(e-mail)yuanzy1@csg.cn。

朱博

1989-, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术、柔直换流阀相关技术(e-mail)zhub@guangzhou.csg.cn。

施世鸿

1984-, 男, 正高级工程师, 硕士, 从事变电站电气二次线设计(e-mail)xixihao84@163.com。

(编辑 叶筠英)