

# 柔性直流输电系统换流阀冷却与运维关键技术实践研究

许增川

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

**【摘要】**：柔性直流输电由于具有可控性好、占地少、适合新能源并网和孤岛供电等特点，已经成为新型电力系统建设的主要技术之一，国家电网已经建成投运了张北±500kV 柔性直流输电工程，是我国目前柔直输电的标杆工程，也是高海拔、大容量柔直工程的实践典范。换流阀是柔性直流输电系统的主要设备，它的运行是否稳定直接关系到整个输电系统的安全可靠程度，冷却系统和运维技术是保证换流阀长期稳定运行的重要支撑。目前西藏还没有建成投运的柔性直流换流站，按照规划将在2026年下半年启动±800kV 柔直换流站建设，西藏高海拔地区空气稀薄、大气压强低、自然换热效率差，换流阀散热和运维管控难度比平原地区高很多，急需针对性的技术支撑。本文以张北±500kV 柔直工程为实践基础，结合工程实践梳理柔性直流换流阀冷却系统的主流架构和工作原理，分析冷却系统运行的核心控制要点，重点加入高海拔特殊工况的技术适配要求，提炼日常运维、故障处置、状态监测等关键技术，总结工程应用中优化实践和高海拔工况注意事项，从西藏后期柔直工程建设运维的前置探索角度出发，为西藏±800kV 柔直换流站及类似高海拔柔性直流输电工程换流阀安全运维和技术升级提供借鉴，提高柔性直流输电系统整体运行效率。

**【关键词】**：柔性直流输电；换流阀；冷却系统；运维技术；高海拔工况、

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.039

## 1 引言

随着新能源的大规模并网、分布式能源的大量接入以及跨区域输电需求的不断提高，柔性直流输电技术在电网建设中的应用范围也越来越大，电压等级和输送容量也逐渐提高，换流阀的功率密度也越来越大。西藏是我国重要的清洁能源基地，风光资源丰富，柔直输电是西藏当地清洁能源外送、跨区域调配的主要技术途径，目前西藏还没有建成投运的柔性直流换流站，按照国家电网建设规划，西藏将在2026年下半年启动±800kV 柔直换流站建设，高海拔特殊工况会成为换流阀安全稳定运行的主要难题。换流阀内部集成有大量的IGBT等功率半导体器件，在运行过程中会产生大量的损耗热量，如果热量不能及时有效地排出，就会导致器件的结温过高、性能下降，严重时还会引起设备故障、系统停运，直接危及电网的安全稳定运行；西藏高海拔地区空气稀薄、自然对流换热量小、昼夜温差大、冬季极端低温等特殊环境特点，常规冷却系统的散热效率会大大降低，运维管控难度也相应增大。冷却系统是换流阀的配套核心设备，起到散热控温、保证器件工作温度在合理范围内的作用，冷却系统运行可靠直接影响到换流阀以及整个柔性直流系统的安全。科学完备的运维技术体系可以及时发现冷却系统、换流阀存在的隐患，并且可以迅速处理运行故障，从而达到提高设备使用寿命的目的，进而减少全生命周期的运维成本。因此本文以张北±500kV 柔直工程为研究对象，结合实际工程运维经验，重点对西藏高海拔空气稀薄、换热量低的特殊工况下换流阀冷却核心技术及运维关键点进行系统的前置研究，为以后西藏±800kV 柔直换流站的建设、运维提供技术支持，促进相关技术在高海拔工程中的应用。

## 2 柔性直流换流阀冷却系统核心技术

### 2.1 冷却系统主流架构与工作原理

目前工程中广泛使用的柔性直流换流阀冷却系统，大多采用内冷水循环+外冷水循环的双层闭式水循环结构，部分大容量工程还结合喷淋冷却、相变冷却等技术来达到高效的散热效果，整体系统具有散热效率高、控温准确、运行稳定、绝缘性能好等优点，适合高压、大功率换流阀的散热需求，是张北±500kV 柔直换流站采用的主要冷却结构，对西藏高海拔工况有较好的适配优化空间。

内冷水系统为密闭式循环系统，用去离子水作为冷却介质，直接和换流阀阀塔内部散热器接触，循环流动吸收功率器件产生的热量，全程保持低电导率，防止漏电、短路等电气故障，是冷却系统的核心换热环节，不受外部海拔、气压的影响，可以保证换流阀核心器件基础散热的稳定性。外冷水系统属于二次散热环节，它将内冷水传来的热量接收到换热器上，然后利用闭式冷却塔、风冷或者喷淋的方式把热量散发到外面的环境中，从而保持内冷水的温度，该环节在高海拔工况中成为优化的重点，西藏地区的空气稀薄、大气压强低，常规风冷、闭式冷却塔的自然换热效率比平原地区低30%以上，单纯依靠常规外冷模式很难满足散热要求，需要通过设备冗余、变频调节升级、喷淋强化等方式来弥补换热不足。两套系统互相独立又相互配合，依靠温度、压力、流量等参数联动控制，使换流阀进阀温度、温差保持在设计范围内，满足高海拔、大功率柔直换流阀的严苛散热要求。

### 2.2 冷却系统核心组成与配置

换流阀冷却系统由内冷水回路、外冷水回路、水处理系统、

控制保护系统四大部分组成，各部分设备配置遵循冗余设计原则，保障单台设备故障时系统仍可正常运行，具体核心设备配置详见表1。

表1 柔性直流换流阀冷却系统核心设备配置表

系统模块	核心设备	功能说明	配置原则
内冷水回路	主循环泵、过滤器、膨胀罐、电加热器、离子交换器	循环输送冷却介质，过滤杂质，缓冲体积变化，维持水温与水质	主泵1用1备，过滤器1用1备，配套冗余控制单元
外冷水回路	闭式冷却塔、喷淋泵、换热器、变频风机	二次换热，释放内冷水热量，调节散热功率	冷却塔分组备用，喷淋泵、风机冗余配置
水处理系统	反渗透装置、加药装置、砂滤/碳滤设备	净化补水，抑制管路结垢、腐蚀，维持水质达标	单套主设备，配套旁路备用管路
控制保护系统	PLC控制器、传感器、报警装置	实时监测参数，自动调节设备运行，故障预警与保护	双冗余PLC，关键参数多点监测

### 2.3 冷却系统关键运行控制技术

换流阀冷却系统的运行控制核心是实现温度、压力、流量、水质四大关键参数的精准调控，确保换流阀全程工作在适宜温度区间，避免温度骤变、参数异常引发设备损坏。

温度控制方面，通过调节外冷水系统变频风机转速、喷淋泵出力，动态调整散热功率，适配换流阀不同负荷工况下的散热需求，冬季低温时段启动内冷水电加热器，防止冷却介质温度过低影响器件性能，同时避免管路冻裂。压力控制依托膨胀罐与氮气稳压系统，缓冲冷却介质因温度变化产生的体积波动，维持回路压力稳定，防止压力过高导致管路渗漏、压力过低引发气蚀。流量控制通过主循环泵变频调节，保障冷却介质循环流量满足散热需求，避免流量不足导致局部过热。水质控制是冷却系统稳定运行的核心，内冷水电导率需严格控制在极低范围，通过离子交换器持续净化，配合定期水质检测，防止杂质沉积、管路腐蚀，外冷水则通过反渗透处理与加药阻垢，避免换热器结垢降低换热效率。

### 2.4 新型冷却技术应用探索

针对大容量、高功率密度柔性直流换流阀的散热难题，相变冷却、风冷+水冷复合冷却等新型技术逐步开展工程试点。相变冷却利用介质相变吸热的原理，散热效率更高，可有效抑制器件结温波动，提升换流阀过载运行能力；复合冷却模式结合风冷与水冷优势，在极端环境下仍能保持稳定散热性能，适配海上风电柔直并网、偏远地区柔直工程等特殊场景，未来将逐步成为高端柔直工程冷却系统的发展方向。

## 3 换流阀冷却系统运维关键技术

### 3.1 运维体系构建与分级管控

柔性直流换流阀冷却系统运维遵循预防为主、防治结合的原则，构建日常巡检、定期维护、专项检修、故障应急处置四位一体的运维体系，结合设备运行状态实施分级管控，区分关键设备与辅助设备，针对性制定运维方案，全面覆盖系统运行全周期。

日常巡检以实时监测、外观检查为主，依托冷却系统控制平台与站端监控系统，24小时跟踪温度、压力、流量、水质等核心参数，检查管路有无渗漏、设备有无异响、仪表显示是否正常，发现参数偏离立即排查原因，做到隐患早发现、早处置。定期维护按照设备运行时长与工况，制定固定周期的保养计划，完成滤芯更换、润滑加注、仪表校准、水质化验等工作，避免设备长期运行出现性能衰减。专项检修结合换流阀停电检修窗口期，对冷却系统核心设备进行全面拆解检查、性能测试，排查隐蔽性隐患，恢复设备最佳运行状态。故障应急处置则针对渗漏、超温、泵机故障等常见问题，制定标准化处置流程，配备备用设备与抢修物资，缩短故障停运时间。

### 3.2 核心设备运维要点

#### 3.2.1 内冷水系统运维

内冷水系统直接关联换流阀电气安全与散热效果，是运维管控的重点。日常需重点监测内冷水电导率、进阀温度、回路压力，每周开展水质化验，确保电导率、酸碱度、杂质含量达标，一旦水质超标立即启动离子交换器净化，必要时更换冷却介质。主循环泵作为核心动力设备，每月检查运行电流、振动、噪音，定期加注润滑油，检查机械密封有无渗漏，备用泵定期切换运行，避免长期闲置故障。过滤器滤芯需根据压差变化及时更换，防止杂质堵塞管路、进入阀塔内部影响散热。膨胀罐与氮气稳压系统定期检查压力，氮气瓶压力不足时及时更换，确保系统压力稳定无泄漏。

#### 3.2.2 外冷水系统运维

外冷水系统运维核心是保障换热效率，重点检查闭式冷却塔风机、喷淋泵运行状态，清理冷却塔翅片灰尘、杂物，避免堵塞影响散热效果。冬季运行前检查管路防冻措施，确保喷淋水排空装置、电伴热装置正常投运，防止低温冻裂管路。换热器定期检查换热效果，若出现温差过大、换热效率下降，及时开展清洗除垢，恢复换热性能。喷淋水定期检测水质，通过加药装置抑制结垢与腐蚀，避免管路内壁结垢导致流量减小、散热变差。

#### 3.2.3 控制与监测系统运维

控制保护系统是冷却系统的“大脑”，定期检查PLC控制器、传感器、通讯模块运行状态，校准温度、压力、流量仪表精度，确保监测数据准确、控制指令执行到位。报警装置定期

测试,确保超温、超压、低液位、水质超标等异常情况能够及时发出声光报警,并上传站端监控系统,避免故障扩大。冗余控制单元定期切换测试,确保主备单元无缝切换,提升系统运行可靠性。

### 3.3 常见故障诊断与处置技术

结合工程运维实践,换流阀冷却系统常见故障主要分为温度异常、压力流量异常、水质超标、设备故障四大类,针对性诊断与处置方法如下。

(1) 进阀温度过高: 优先排查外冷水散热效率,检查冷却塔风机、喷淋泵是否正常运行,翅片是否堵塞,换热器是否结垢;再检查内冷水流量是否达标,主循环泵出力是否足够,过滤器是否堵塞,逐一排查并清理疏通,恢复散热性能。

(2) 系统压力异常: 压力过高多为冷却介质受热膨胀、排气不及时,开启排气阀排气即可;压力过低多为管路渗漏、氮气压力不足,全面检查管路接口、阀门、机械密封,查找漏点并修复,补充氮气维持压力。

(3) 内冷水水质超标: 电导率升高多为离子交换树脂失效、补水水质不达标,更换树脂并净化补水;杂质超标则更换过滤器滤芯,加强循环净化,直至水质达标。

(4) 泵机故障: 主泵、喷淋泵出现异响、振动过大、无法启动,立即切换备用设备,断电后检查电机绕组、轴承、机械密封,排查电路故障与机械损伤,修复完成后测试运行,合格后再投入使用。

### 3.4 智能运维技术应用

随着智能电网技术发展,换流阀冷却系统运维逐步向智能化、无人化转型。依托在线监测装置、物联网技术,实现冷却系统全参数远程实时监控,通过大数据分析建立设备运行模型,预判设备性能衰减趋势,实现预防性运维。部分工程引入

智能巡检机器人,替代人工完成阀厅与冷却设备区域的定期巡检,自动采集数据、识别隐患,提升巡检效率与精准度。同时,建立故障诊断专家库,通过算法自动匹配故障类型与处置方案,缩短故障排查时间,实现运维模式从被动抢修向主动预判、智能处置升级。

## 4 工程实践与优化效果

优化后,该工程换流阀冷却系统运行参数合格率提升至99.8%,设备故障频次下降70%以上,未发生因冷却系统异常导致的换流阀停运事件,换流阀器件运行温度始终稳定在设计区间,设备使用寿命显著延长,运维成本同比降低30%,充分验证了本文冷却与运维关键技术的实用性与有效性。同时,总结工程实践经验,提炼出不同季节、不同负荷工况下的冷却系统运维细则,为后续同类型工程提供可复制的实践方案。

## 5 结论与展望

柔性直流换流阀冷却系统是保障换流阀安全稳定运行的核心支撑,双层闭式水循环冷却技术成熟可靠,能够满足当前主流柔直工程的散热需求,而精细化、智能化的运维技术体系,是提升冷却系统运行可靠性、降低故障风险的关键。工程实践表明,通过构建全周期运维体系、精准管控核心运行参数、快速处置常见故障、推广智能运维技术,可有效保障换流阀冷却系统长期稳定运行,进而提升柔性直流输电系统整体安全水平。随着柔性直流输电技术向更高电压、更大容量、更特殊场景发展,换流阀散热需求将进一步提升,未来需持续优化新型冷却技术,推进相变冷却、复合冷却等技术的工程化应用;同时深化大数据、人工智能在运维领域的应用,打造全流程智能运维平台,实现设备状态全感知、故障全预判、运维全自动化,进一步提升柔性直流换流阀运维智能化水平,为新型电力系统安全高效运行提供更坚实的技术保障。

## 参考文献:

- [1] 薛士敏,鄢为豪,李博通,等.基于奇异熵的柔性直流输电线路新型单端量保护原理[J/OL].高电压技术,1-14[2026-03-16].
- [2] 刘金,杨盛杰,熊子豪.一起柔性直流输电系统启动电阻阻值异常分析[J].电力设备管理,2026,(02):20-22.
- [3] 陈百明,陈岗.大规模海上风电中柔性直流输电技术应用研究[J].电力设备管理,2026,(01):74-76.
- [4] 吴超.关于柔性直流输电系统最后断路器逻辑的策略分析[J].电工技术,2026,(01):139-141.
- [5] 卢佳琦,陈新,滕志远,等.柔性直流输电系统的中频稳定性分析及其幅相统一调控方法[J/OL].电工技术学报,1-14[2026-03-16].