柔性直流换流站阀冷系统运行特性分析及优化控制

郭安琪，杜　杨，饶友元，周晓炜

（国网浙江省电力有限公司舟山供电公司，浙江 舟山 316000）

摘　要　柔性直流换流站阀冷系统是保障换流阀可靠运行的核心辅助系统，其设计优化与控制策略迭代对提升输电工程经济性与稳定性具有关键作用。本文系统梳理阀冷系统的基本定义与功能定位，深入剖析其工作原理、热流特性、典型工况参数特征，明确环境温度与负载波动对系统运行的影响规律。围绕主循环泵变频调节、冷却塔强化换热、水质在线监控等关键技术环节，结合两类典型故障案例深挖失效机理与处置路径，提出自适应变频优化与智能算法节能两类控制方案，仿真验证结果显示其可有效提升系统能效与工况适配能力，以期为阀冷系统结构优化与高效运维提供参考。

关键词　柔性直流换流站；阀冷系统；主循环泵变频调节技术；冷却塔；换热器

中图分类号：TM46　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.041

0　引言

随着柔性直流工程在新能源并网、海岛供电与城市电网互联场景中的大规模落地，换流阀热管理的可靠性与能效水平直接影响输电通道整体运行表现。当前，多数在运阀冷系统沿用传统定速控制模式，在轻负荷、低温等常规工况下普遍存在冷却能力冗余、能耗偏高的问题，已难以适配新型电力系统对辅助系统的精细化运行要求。本文从阀冷系统运行特性与典型故障机理切入，结合现场运维经验提出两类优化控制方案，可为换流站阀冷系统高效运维提供实用参考。

1　柔性直流换流站阀冷系统的定义

柔性直流输电是新一代直流输电技术的核心，换流站是实现电能灵活调控与高效转换的关键节点。换流阀作为核心功率设备，通断过程中会产生大量损耗并转化为热量，若热量无法及时排出，将导致 IGBT 等核心部件温度骤升，引发性能衰减、老化加速甚至永久损坏，直接威胁输电系统安全。柔性直流换流站阀冷系统作为独立密闭循环水冷系统，通过强迫循环将去离子水或水－乙二醇混合液送入换流阀内部，快速带走余热并将热量转移至外部环境，使阀塔核心部件始终维持在安全温度区间，是保障换流阀稳定运行的核心辅助系统，直接关系到整个工程的运行效率、经济性与抗风险能力。

2　柔性直流换流站阀冷系统运行特性分析

2.1　阀冷系统工作原理与热力流体特性

柔性直流换流站阀冷系统主要使用密封式内部循环水冷方法。其工作原理可表述为：主循环泵驱动冷却液体流动，流经换流阀时将功率器件产生的热量带走，使液体温度升高，成为高温工作介质。高温工作液体接着流入板式换热器，跟第二路冷却水发生间接热交换，将热量传递给第二路冷却水带走。第二路冷却水带走热量之后，温度降低下来，重新回到主循环泵的进水口，形成完整的循环过程[1]。整个系统的热力流体特点表现为一种强制对流传热的过程，其中最关键的操作数据包括工作液体的流量、进出换热器时的温度差以及整个系统的压力损失，这些数据都直接关系到换热效果的好坏和能耗水平的高低。

2.2　阀冷系统典型运行工况与参数特性

阀冷系统按照换流阀的运行状态，对应多类典型运行工况，主要包括满负荷工况、轻负荷工况、超负荷工况以及启动和停止的过程。满负荷工况下，系统供应的水量、进出阀门内部的水温差、全系统压力等重要指标均保持在设计范围内，能让冷却效果与换流阀热负荷实现精准匹配[2]。轻负荷工况下，换流阀散发出来的热量变少，系统进出水的温度差变小，但是为了满足最低流量的要求，主循环泵速运行，导致系

作者简介：郭安琪（1994-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：柔性直流换流站运维。

统整体能效水平偏低，存在不必要的泵组功耗浪费。超负荷或者临时突发负载的工况下，换流阀热负荷突然大幅增加，水温快速升高，对系统能否迅速适应变化和短时间内提供充足冷却能力提出了更高的标准。

2.3 环境温度与负荷变化对运行特性的影响

环境温度与换流阀运行负载是决定阀冷系统运行特性的两类核心外部边界条件。环境温度直接决定二次侧冷却水的理论冷却极限，进而对一次侧循环介质的最低稳态冷却温度形成刚性约束。夏季极端高温工况下，换热器对数平均换热温差显著收窄，为维持同等换热能力，需提升冷却介质流量或冷却塔风机转速，最终导致冷却塔单元及全系统整体能耗抬升[3]。换流阀运行负载直接决定阀冷系统的总散热负荷，负载升高时一次侧循环介质的温升速率同步加快，若维持原有循环流量不变，阀冷系统出阀水温将持续攀升；为保障换流阀核心器件温度处于安全阈值范围内，通常需上调主循环泵转速以提升系统循环流量，该操作将直接增大主循环泵的轴功率与运行能耗。

3 柔性直流换流站阀冷系统关键技术

3.1 主循环泵变频调节技术

主循环泵为阀冷系统动力核心，其能耗占比于系统总能耗较高。借助引入变频调节技术，可以根据换流阀实际热负荷和环境温度实时调控泵的转速与流量，达成按需供冷。这不但避免了常规定速泵在低负荷下节流运行造成的能量浪费，明显减少了系统运行能耗，并且能平稳启动，降低水锤冲击，延缓设备寿命，是实现系统节能优化与稳定运行的关键手段。

3.2 冷却塔与换热器强化换热技术

冷却塔和换热器属于阀冷系统热量散发的主要设备。为提升换热效能，需强化系统整体传热效率，这样就能更好地应对各种恶劣的工作环境或者节约能源的需求。可采用的技术路径主要包括：挑选高性能的换热管形状设计和表面处理工艺，增加整体换热面积，同时让空气流动更加顺畅[4]；改进冷却塔内部的填充材料结构和喷淋液体的分布方式，让空气和水之间的热量交换变得更加理想。另外，还可以安装防止脏东西堆积的涂层或者定期清理的装置，确保换热效果一直保持稳定可靠。

3.3 水处理与水质在线监测技术

柔性直流换流站阀冷系统内的循环冷却水水质会直接影响到换热器的工作效率和管道及阀门的使用寿命。水处理技术会向水中加入缓蚀剂、阻垢剂和生物抑制剂等多种化学药剂，同时使用过滤设备来阻止腐蚀的发生、防止结垢的形成以及抑制微生物的繁殖。水质在线监测技术能够随时检查水的电导率、pH值以及各种离子的浓度等关键数据，这样就能做到药剂投加的精准控制，并且提前发现水质异常问题。

3.4 阀冷系统控制保护与状态监测技术

该项技术成为保障阀冷系统正常运转的重要部分。控制保护系统会持续监控压力、温度、流量、水位等重要数据，利用逻辑判断完成主备泵切换、冷却塔风机启动停止、阀门联锁等一系列自动化操作，并且在数值超出正常范围时立即发出不同级别的警报或者直接停止整个系统的运行[5]。状态监测技术采用振动分析、局部放电检测、红外测温等多种方法，针对水泵、电机、阀门等关键部件进行全面检查和早期故障诊断，帮助维修工作从事后处理转变为提前预防的管理方式。

4 柔性直流换流站阀冷系统典型故障与案例分析

4.1 阀冷系统常见故障类型及故障机理

柔性直流换流站阀冷系统长期运行中，受电气、机械、化学与环境多因素耦合作用，故障可划分为机械电气类与热力水质类两类。机械电气故障涵盖主循环泵及变频器异常、管道阀门渗漏堵塞、传感与执行机构失灵等，诱因多为设备制造缺陷、长期机械磨损、元器件老化、电气干扰或保护误动作。热力水质故障表现为冷却塔散热衰减、换热器结垢堵塞、水质不达标引发腐蚀或电导率越限，根源为换热面污垢堆积导致热阻上升，或水质管控失当引发化学腐蚀与沉积物聚集，最终造成系统换热能力下降，直接威胁换流阀温度运行稳定性[6]。

4.2 案例分析：主循环泵变频器故障分析与处理

某柔性直流工程阀冷系统主循环泵运行过程中突发停运并触发系统级告警，站级监控后台精准上报变频器过流故障事件。现场排查确认，变频器输出电流阶跃式突增触发硬件过流保护动作，故障泵停运前已持续性输出异常低频振动异响。

现场处置严格执行柔性直流站阀冷系统一级故障“先通后复”标准化抢修管控流程：第一时间联锁投运备用主循环泵，快速重建阀冷系统额定流量闭式循环，第一时间恢复换流阀全工况连续散热能力，从根源上规避换流阀因超温触发降额运行或紧急停运的主系统风险，保障直流输电通道不中断。在确认主系统运行完全稳定、备用泵持续带载无异常的前提下，履行工作票审批流程后将故障泵停运隔离，开展离线拆解检修作业，更换磨损失效轴承，同步完成阀冷闭式循环全回路杂质冲洗。硬件消缺完成后，在设备额定

运行边界内优化变频器保护参数配置，合理上调过流保护整定值并延长动作延时，从控制逻辑层面规避短时负载波动引发的保护误动作。经带载全工况校验合格后将消缺后的主泵重新切回热备用状态，故障泵复启后运行工况平稳，全流程各项运行参数均处于设计允许区间，充分验证本次故障处置与优化措施的工程有效性。

4.3 案例分析二：冷却塔散热能力下降故障分析与处理

某换流站运行人员察觉，在环境温度和换流阀负荷接近的条件下，阀冷系统进出水温差比设计值显著变小，冷却塔出口水温一直偏高。性能测试显示，冷却塔的逼近度（出水温度与湿球温度之差）明显增加，散热能力不足。原因分析归结为两个方面：其一，冷却塔填料因为长期使用导致老化、结垢以及部分坍塌，引起气水接触面积下降，换热效率下降；其二，喷淋系统部分喷嘴堵塞，引发了水分布不均，进一步恶化了换热效果。借助计划停运窗口，对冷却塔填料实施了彻底更换，并且完全清理了喷淋管路与喷嘴。改进了水处理加药方案，加大了阻垢缓蚀药剂投放。改造之后，冷却塔散热性能回升到设计水平，系统温升恢复正常，有力保证了换流阀的运行安全。

5 柔性直流换流站阀冷系统优化控制策略

5.1 优化控制目标与总体技术路线

柔性直流换流站阀冷系统的改进控制目的就是同时完成节省能源并且提高效率以及保证运行安全并且保持平稳这两个最重要的目标。整个技术路线按照从基础研究到建立模型，再到生成智能决策，最后进行效果验证这个顺序来实施。详细做法是从系统实际运行规律的深入分析入手，在保证换流阀所有重要部位温度不会超出允许范围的前提下，依靠实时改变主循环泵的工作转速、合理调节冷却塔风扇的工作状态以及改进换热器的控制方式，尽量把整个系统的总耗电量降下来。技术路线把依靠物理化学原理建立自动调整方法和依靠大量数据训练出来的智能计算方法相结合，形成了分级分步骤的改进控制结构，为后续细化各类优化控制措施提供清晰的顶层框架支撑。

5.2 基于智能算法的阀冷系统节能优化控制

为了深入发掘节能空间，建议整合智能算法的系统级节能优化控制。该控制把系统总功耗最低化设定为目标函数，把各设备运作限制以及安全限值当作约束条件。运用深度确定性策略梯度之类的强化学习算法或者改进的粒子群优化算法，针对主循环泵、冷却塔风机、喷淋泵等设备的联合运转实施实时寻优。智能控制器借助不断学习过去运行数据和环境互动经验，可以自动探索各种工作条件下全局或近似全局最优设备组合的运转方案，达成从单独设备优化到多设备联合优化的飞跃。

5.3 优化控制策略的仿真验证与效果分析

为检验所提出的阀冷系统能效优化策略实际有效性，研究人员依托 MATLAB 和 Simulink 仿真框架，结合专业热流仿真工具，构建了精细化阀冷系统仿真模型。该模型覆盖换流站所在地全年典型的天气状况，以及换流阀从轻负荷到满负荷的多种运行状态。经过多场景比较和研究发现，根据实际工作环境自动调整频率的方法，在全年典型运行日可明显减少主泵的能源消耗。结果表明，改进后的方案能够在保障冷却系统安全运行的基础上大幅提升系统的能源利用效率和经济效益。

6 结束语

本文聚焦柔性直流换流站阀冷系统运行特性与控制优化，梳理其工作原理、热流耦合特征与典型工况规律，明确环境温度与负载波动的作用机制，为控制策略优化提供理论支撑。研究结合现场故障案例深挖失效机理与处置路径，提出自适应变频与智能算法节能两类控制方案，仿真验证表明其可在保障运行可靠性的前提下，有效提升系统能效与复杂工况适配能力，可为阀冷系统优化设计与智能运维提供参考。

参考文献：

[1] 齐荣臻，魏晓斌，周德才，等．高海拔地区 ±800 kV 柔性直流换流站紧凑型布置研究 [J]. 电力勘测设计，2026(05):1-7,86.

[2] 程建伟，吴泽华，黄克捷，等．柔性直流换流站阀厅典型金具电场分布仿真分析与优化研究 [J]. 电机与控制学报，2025,29(12):171-181.

[3] 王凤云，陈寅，姜文．海上柔性直流换流站抗震性能分析 [J]. 电力勘测设计，2025(10):20-25,52.

[4] 李元昊，陈卓，郝正航，等．基于 UREP 的大规模柔性直流换流站实时仿真建模 [J]. 供用电，2025,42(08):71-79.

[5] 尹永利，张利军，叶可，等．±10kV 柔性直流换流站换流阀冷却水自动监测及补充装置的研制 [J]. 电气技术与经济，2025(05):173-177.

[6] 周啸，阳岳希，寇龙泽，等．模块化多电平柔性直流换流器高频振荡抑制策略与参数优化设计 [J]. 中国电力，2025,58(01):50-60.