

小型水电站电气二次设计的优化策略

孔言哲

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司，新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/WCEST.2026010009

摘 要：近年来，随着小型水电站运行年限的持续增长，电气二次回路系统缺陷日益突出。基于此，本文以新疆某小型水电站电气二次回路系统设计优化项目为例，结合当地低气温、多风沙、昼夜温差大的气候特征及无人值守、远程监控的运行需求，从自动化监控系统、继电保护系统、电源与通信系统三个层面出发，系统性阐述电气二次回路系统设计优化策略，旨在提高电气二次回路系统设计水平，为小型水电站稳定运行打下坚实基础。

关 键 词：小型水电站；电气二次回路系统；设计优化

Optimization Strategies for the Electrical Secondary Design of Small Hydroelectric Power Plants

Kong Yanzhe

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd. Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： In recent years, as the operating lifespan of small hydropower stations has continued to increase, the shortcomings of the electrical secondary circuit system have become increasingly prominent. Based on this, this paper takes the design optimization project of the electrical secondary circuit system of a small hydropower station in Xinjiang as an example. Taking into account the local climate characteristics of low temperatures, high wind and sand, and significant diurnal temperature variations, as well as the need for unattended and remote monitoring operations, it systematically discusses the design optimization strategies for the electrical secondary circuit system from three perspectives: automated monitoring systems, relay protection systems, and power and communication systems. The aim is to improve the design level of the electrical secondary circuit system and lay a solid foundation for the stable operation of small hydropower stations.

Keywords： small hydropower station; electrical secondary circuit system; design optimization

引言

新疆地区作为我国水力发电的重要补充区域，小型水电站在农业灌溉、民生供电等领域承担着不可替代的作用。但受特殊地理气候条件影响，当地小型水电站普遍面临低温、大风、强风沙等自然环境的持续侵蚀，加之部分电站建设年代较早，电气二次回路系统逐渐暴露出设备老化、性能衰减、智能化水平不足等问题。2023年水利部发布的《智能化小型水电站技术指南（试行）》，明确提出小型水电站需具备远程监控、自主控制能力，核心系统应设置冗余设计并强化风险防控。这一要求对新疆地区小型水电站电气二次回路系统的升级改造形成了硬性约束。在此背景下，单纯的设备更换已无法满足电站长期稳定运行与智能化发展的双重需求，必须结合区域气候特征与运行实际，从系统层面展开电气二次回路的优化设计研究。

一、工程概况

该小型水电站建于2010年，位于新疆天山北麓河谷地带。工程所处区域年平均最低气温为 -25°C ，最大风速达 18m/s 。该小型水电站中共有两台水轮发电机组，总装机容量为 5MW ，承担着周边地区农业灌溉及供电任务。在改造前，电气二次回路系统存在以下问题。其一，自动化监控系统为分散式结构，数据采集间隔时间 $>10\text{s}$ ，难以实现机组振动、油温等关键参数的实时监测。

运维人员需每隔 2h 进行一次现场巡检，冬季极端环境下巡检压力大。其二，继电保护装置为传统电磁型设备，多年未经校核。2024年春季曾因低温出现过流保护误动，导致了机组非计划停机。其三，操作电源仅为单组铅酸蓄电池，低温环境下电池容量仅为额定值的 60% 。同时未设置备用电源，电网波动易导致控制系统无法运行。针对上述问题，根据当地气候条件及智能化改造要求，项目团队秉持“可靠性、环境适配性及智能集约性”原则展开电气二次回路系统设计优化。

二、电气二次回路系统设计优化策略

（一）自动化监控系统优化设计

1. 硬件配置地域化改造

本项目淘汰传统民用级现地控制单元，引入工业级耐低温专用现地控制单元。该设备核心元件最低运行温度可达 -40°C ，可在新疆冬季极端低温至夏季极端高温环境下保持稳定的运行状态。设备箱体以厚度为 0.3cm 的冷轧钢板一体成型，表面涂装有防腐涂层，并结合当地气候条件进行了风沙防护处理，防护等级提高至IP55，可降低风沙粉尘等侵入影响。箱体内设置有 150W 自动恒温加热器及温度传感器，当箱内温度低于 0°C 时，自动恒温加热器可自动开启，当箱内温度大于 5°C 时，自动恒温加热器可自动关闭，以此避免低温环境导致元件性能衰减或发生结冰故障；在监测点位优化过程中，不仅保留原有的转速参数监测、电压参数监测及电流参数监测，还将监测对象延伸至水轮机导水机构、主轴及发电机轴承等关键部位，依托高精度振动传感器、铂电阻温度变送器准确获取相关参数^[1]。此外，还将局部放电传感器设置在高压开关柜内，从而实时监测局部放电量；数据采集模块应用高速AD转换器，采样达 100Hz ，从而保障各项关键参数的实时准确捕捉，有效解决了原系统监测盲区问题及数据滞后问题。

2. 软件功能智能化升级

项目团队引入基于Linux嵌入式操作系统的监控系统软件，该监控系统软件抗干扰能力强、稳定性优越，可实现智能化负荷调节及精准化故障诊断。针对项目所处区域来水不稳定、农业灌溉需求季节波动性大的特征，项目团队结合水位变化规律及雨量预测结果，开发自适应调节算法。并借助库区水位传感器实时获取水位数据，根据上游雨量站传输数据，构建来水趋势预测模型，提前 0.5h 预测来水变化，从而自动调节机组导叶开度及励磁电流，以此实现了负荷平滑调节。算法响应时间 $\leq 2\text{s}$ ，可有效避免来水突变或负荷波动造成机组震荡。新增设备全生命周期智能诊断模块，结合变压器绝缘电阻数值、断路器动作次数等数十项关键参数，构建了预测模型及趋势分析曲线。当实际参数超出正常范围或存在异常变化趋势时，可利用VPN专线向控制中心推送预警信息，并附带故障信息及故障处置流程等；针对新疆偏远地区可能存在的通信中断问题，项目团队在现场保留了独立的紧急停机按钮及手动操作回路，手动操作优先级高于远程控制，可构建“远程控制为主+实地操作为辅”的双重保障机制^[2]。此外现地控制单元还预留了充足的DI/DO接口，可为后续扩展提供便利条件。

（二）继电保护系统优化设计

1. 发电机保护系统优化

本项目中，原发电机差动保护为电磁型继电器，动作灵敏度低下、恶劣环境下易存在误动等问题突出。项目团队选择适用于低温环境的微型发电机差动保护装置，该装置具备运算效率快的优势，可精准区分发电机内部故障与外部故障，从而避免误动。结合新疆电网短路电流参数计算文件，重新制定差动保护启动电流、制动系数等参数，保障最小运行方式下短路事故发生后，区内保护装置动作可靠、区外短路时不会出现动作；新疆地

区冬季气温寒冷，项目团队使用工作温度范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 宽温型装置，内部各电阻元件均为金属氧化膜电阻。在低温环境下，金属氧化膜电阻的阻值漂移量 $\leq 2\%$ ，较传统碳膜电阻相比更为优越，可大幅降低低温因素引起的保护定值偏差。此外，新增了发电机定子接地保护，通过“三次谐波电压型保护+外加电源法”保障定子绕组100%接地保护全覆盖，有效解决了定子绕组80%接地保护的不足。同时还配置发电机失磁保护、过负荷保护及过电压保护，过负荷保护可结合过负荷电流大小，动态调节动作时限，不仅具备良好的保护灵敏度，还能够满足新疆农业灌溉季节的过载需求^[3]。

2. 变压器保护系统优化

在该项目中，原变压器仅配置油温继电器，无法实现绕组温度监测，且环境因素易导致油温继电器出现误判。为此，项目团队制定基于“油温+绕组温度”双重判断依据的过温保护方案，将油温传感器设置在变压器油箱顶部，将光纤绕组温度传感器设置在高压绕组首端及末端。保护装置可结合油温及绕组温度进行综合判断，如某一温度达到报警阈值（油温 85°C 、绕组温度 95°C ）时，即发出报警信号。如某一温度达到跳闸阈值（油温 95°C 、绕组温度 105°C ）时，可延时 0.5s 触发跳闸回路，从而避免变压器损坏。为降低外界风沙侵蚀，温度传感器探头由硅胶密封工艺制成，同时选用工作温度为 $-35^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 、阻燃等级为V0级的耐寒阻燃电缆。电缆还设置有穿管保护，进一步避免风沙磨损造成绝缘破损。此外，还新增了变压器瓦斯保护及差动保护，前者为双通道采集模式，可保障信号可靠，后者差动保护整定值可结合变压器参数及新疆电网短路电流特性调整，以保障故障问题发生后，故障点能够快速切除。

3. 线路与机组紧急保护优化

本项目中，原线路过流保护为单段式保护，易出现越级跳闸问题。项目团队将其改造为三段式过流保护，Ⅰ段为动作时限 0.1s 的速断保护，适用于线路近端的严重短路故障。Ⅱ段为动作时限 0.3s 的限时速断保护，可覆盖线路全长。Ⅲ段为动作时限 1.0s 的过负荷保护，适用于线路长期过负荷情况。由于新疆地区农业灌溉具有季节波动性特征，因此Ⅲ段保护定值预留了20%的裕量。项目团队还引入了负荷突变闭锁功能，避免负荷突变引起误动。在机组紧急停机保护设计中，由于原设计保护动作依赖监控系统触发，同时未设置独立回路，因此当监控系统出现故障时，无法做出保护动作。在优化后，项目团队增设了独立于监控系统以外的紧急停机保护回路，双线圈继电器可实现冗余触发，一路保护装置为输出信号触发，另一路由现场紧急按钮触发，两路信号互相独立；紧急停机回路电源与监控系统主电源相互独立，为蓄电池供电，可保障监控系统失电时紧急停机功能仍可正常实现^[4]。回路电缆为屏蔽双绞线，屏蔽层为单端接地，与动力电缆保持 50cm 以上的间距，交叉方式为垂直交叉，从而降低电磁干扰对回路运行所产生的不利影响。

（三）电源与通信系统优化

1. 操作电源系统冗余优化

本项目中原操作电源仅为单组铅酸蓄电池，在低温环境下，

铅酸蓄电池容量衰减问题极为严重。项目团队应用两组100Ah胶体蓄电池并联运行,该电池采取凝胶状电解质,不存在酸液渗漏风险,在-20℃低温环境下,容量保持率仍达85%,远高于铅酸电池的60%,且使用年限可达八年以上。蓄电池组为柜式安装形式,柜体中设置有保温层及自动恒温装置,从而为蓄电池营造5℃~25℃的工作环境,降低温度变化对蓄电池容量所产生的不利影响。配备智能充电模块,可结合蓄电池状态动态调节充电参数,同时具备过充保护功能、过放保护功能及过温保护功能;增设3kW柴油发电机组作为备用电源,从而构成“市电+蓄电池+发电机”相结合的重三重自动电源切换系统,切换装置为ATS双电源自动切换开关,响应速度 $\leq 0.2s$,以保障电源供应不间断;电源屏中设置有谐波滤波器及浪涌保护器,谐波滤波器可将电压总谐波畸变率控制在5%以下,从而避免电网谐波导致整流模块及保护装置等设备损坏,浪涌保护器为50kA的Ⅰ级浪涌保护器,可有效抵御电网波动及雷击所产生的浪涌电压。为降低后续运维工作压力,电源系统还配置有智能监测模块,可实现蓄电池电压、电流、温度等参数的实时监测,监测数据可实时上传至监控中心内,如监控数据存在异常,可及时发出报警信号。

2. 通信系统安全与稳定性强化

在该项目中,通信系统为“电力专线+4G工业路由器”相结合的双通道传输模式,监控数据保护装置动作信息等数据可由专线上传至区域控制中心内,传输速率高达100Mbps,延迟 $\leq 50ms$,可保障控制指令的高速传输。视频监控数据等非实时数据可由4G网络进行传输,路由器为支持新疆地区三大运营商的工业级4G路由器,同时具备自动选网功能及信号增强功能,即

使区域信号强度较弱,仍可保障信号连接稳定。两路通信通道具备自动检测功能及无扰切换功能,如某一路通道中断,可自动切换另一路通道,切换时间 $\leq 1s$,可保障数据传输连续;结合电气二次回路系统安全防护要求,通信链路中还配备有防火墙及正向隔离装置。防火墙采用状态检测技术,可阻断非法访问及攻击行为。正向隔离装置可隔离监控系统与外部网络,仅允许特定格式的数据单向传输,针对遥控、遥调等关键指令,选用SM4加密算法进行加密,保障指令传输安全,避免指令被非法篡改;通信设备天线设置有防风支架及防雷器,防风支架为不锈钢材质,可抵御18m/s的风速^[5]。防雷器为20kA的信号防雷器,防雷接地电阻为 2.5Ω ,可降低感应雷对通信设备运行所产生的影响;为进一步提高通信设备的抗风沙能力,箱体防护等级为IP65,整体密封性能优越。内部还设置有防尘风扇,可定期清理散热通道中积存的灰尘。

结语:与我国内陆地区相比,新疆地区气候环境特殊,对小型水电站电气二次回路系统设计提出更严格的要求,应确保设计方案能够抵御极端恶劣天气,后续维护便利,整体可靠性强。在水电站电气二次设计中,要重视自动化监控系统、继电保护系统、电源与通信系统三个层面,优化电气二次回路系统设计。同时,可将数字孪生技术、人工智能技术等融入至电气二次回路系统设计中,加强负荷预测算法优化及故障诊断模型优化,强化全生命周期成本管控,从而保障技术先进性及经济合理性,不断提高电气二次回路系统设计水平,为小型水电站稳定运行打下坚实基础。

参考文献

- [1] 赵文高. 基于人工智能的水电站电气二次设备故障预警系统设计[J]. 电工技术, 2025, (21): 268-270.
- [2] 周奇. 水电站电气二次设备智能化平台设计研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(07): 101-103.
- [3] 杨倩. 水电站电气一次设计方案的优化[J]. 四川水力发电, 2023, 42(04): 114-118.
- [4] 李甘, 张茜茹, 梁志开, 等. 水电站电气二次智能设计平台研究与应用[J]. 水利水电快报, 2022, 43(06): 53-57.
- [5] 何含芳. 谈水电站电气二次及通信系统设计要点[J]. 科学技术创新, 2020, (23): 189-190.