

高寒地区水文遥测站太阳能供电系统的优化与运维

唐加勒克·托合塔尔汗

阿勒泰水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6764

[摘要] 针对高寒地区严酷自然环境对水文遥测站太阳能供电系统稳定运行的严峻挑战,本文深入分析了低温、强辐射、大温差、风雪覆盖等多重环境胁迫因子的耦合影响机理。系统阐述了面向极端环境的水文遥测站太阳能供电系统优化设计理论,涵盖高效耐寒光伏组件选型、多目标优化的组件倾角与阵列布局、基于动态负荷与低温特性的储能系统配置以及智能充放电管理与低温保护策略。进一步提出了适应高寒地区特殊性的水文遥测站太阳能供电系统预防性、精细化运行维护体系。研究旨在构建适应高寒地域特色的水文遥测站能源保障技术方案,为提升国家水文站基础设施在极端环境下的可靠性与耐久性提供理论依据与实践参考。

[关键词] 高寒地区; 水文遥测站; 太阳能供电系统; 优化设计; 运行维护

中图分类号: P331 **文献标识码:** A

Optimization Design and Operation Maintenance of Solar Power Supply System for Hydrological Telemetry Stations in Alpine Regions

Tangjalek Tohtarkhan

Altay Hydrological Survey Center, Altay

[Abstract] In response to the severe challenges posed by harsh natural conditions in alpine regions to the stable operation of solar power supply systems for hydrological telemetry stations, this paper conducts an in-depth analysis of the coupled impact mechanisms of multiple environmental stress factors, including low temperatures, strong radiation, large temperature differences, and wind-snow coverage. It systematically elaborates on the optimization design theory for solar power supply systems in extreme environments, covering the selection of efficient cold-resistant photovoltaic modules, multi-objective optimization of module tilt angle and array layout, energy storage system configuration based on dynamic load and low-temperature characteristics, as well as intelligent charge-discharge management and low-temperature protection strategies. Furthermore, a preventive and refined operation and maintenance system tailored to the specific conditions of alpine regions is proposed. The study aims to develop an energy security technical solution for hydrological telemetry stations adapted to the characteristics of alpine regions, providing theoretical foundations and practical references for enhancing the reliability and durability of national hydrological infrastructure under extreme environmental conditions.

[Key words] Alpine regions; Hydrological telemetry station; Solar power supply system; Optimization design; Operation maintenance

引言

水文遥测站作为获取流域水文气象信息、支撑水资源管理、防汛抗旱及水生态保护的关键基础设施,其持续稳定运行至关重要。在电网难以覆盖的偏远地区,太阳能光伏供电系统已成为水文遥测站的主流自主供电方式。新疆地域辽阔,水文站点分布广泛,其中阿尔泰山、天山、昆仑山等山脉的高海拔区域及部分高原、盆地边缘属于典型的高寒地区,具有冬季漫长严寒、夏季短暂温凉、太阳辐射强烈、昼夜及年温差巨大、风雪频繁等显

著气候特征。这些严酷的自然条件对暴露于野外的水文遥测站太阳能供电系统构成了全方位、多层次的严峻考验:极端低温导致蓄电池容量骤减、充放电效率下降甚至电解液冻结;剧烈的温度循环引发材料老化、连接件松动与密封失效;强紫外辐射加速聚合物材料降解;积雪覆盖直接阻断光伏能量捕获;大风造成机械结构损伤等。目前,应用于常规环境的光伏系统设计与运维标准难以直接适用于新疆高寒地区水文站,普遍存在冬季供电可靠性不足、系统寿命显著缩短、维护成本高昂等问题,

直接威胁水文数据的连续性与完整性。因此,开展针对新疆高寒地域特性的水文遥测站太阳能供电系统优化设计与适应性运行维护研究,具有重要的现实意义与工程价值。

1 高寒地区水文遥测站太阳能供电系统面临的问题

1.1 低温与极端温度波动

新疆高寒地区年平均气温低,冬季极端最低气温普遍可达 -30°C 至 -40°C ,甚至更低,如阿勒泰地区富蕴县曾记录到 -50°C 以下的低温。持续低温对水文遥测站光伏供电系统的影响深远:(1)蓄电池性能严重恶化。铅酸蓄电池的可用容量在 -20°C 时会降至标称容量的60%以下,低温下内阻急剧增大,充电接受能力变差,若管理不当,极易导致充电不足(欠充)和深度放电,加速电池硫化与寿命衰减。锂电池虽低温性能相对较好,但也存在容量衰减和充电限制问题。(2)材料机械性能变化。塑料、橡胶等密封与绝缘材料脆化,弹性丧失,导致接线盒、电缆接头、蓄电池箱密封条等部位易出现开裂,引发密封失效、绝缘下降甚至短路。(3)物理应力损伤。不同材料(如玻璃、金属边框、EVA胶膜)的冷缩系数差异,在剧烈温度循环下产生交变热应力,导致电池片隐裂、焊带疲劳断裂、背板分层等故障。

1.2 紫外线辐射、积雪、风沙

新疆大部分地区太阳能资源丰富,年太阳总辐射量高达 $5400\sim 6700\text{MJ}/\text{m}^2$,属于太阳能资源最丰富区(I类区)。高寒地区空气稀薄洁净,紫外线强度尤其高。强烈的紫外线会加速水文遥测站光伏组件封装材料(如EVA、背板PET/氟材料)的老化、黄变,降低透光率与绝缘性能;同时加速电缆绝缘层、控制器及汇流箱外壳等聚合物材料的光氧化,导致其机械强度下降、粉化、开裂。

冬季降雪频繁且雪期长,积雪易于在水文遥测站光伏组件表面堆积。积雪覆盖直接阻挡太阳辐照,导致系统长期零输出或低输出。厚重的积雪产生额外静荷载,超出支架设计载荷。融雪-冻结循环易形成组件边缘的冰坝,破坏密封或导致水分渗入。此外,凝霜、雾凇等覆冰现象也会降低组件透光率。部分高寒地区(如山口、高原)大风天气频繁,对水文遥测站光伏支架的结构强度、抗风压与抗振动疲劳性能要求极高。大风还会卷起沙尘,附着在组件表面形成污垢,降低发电效率。

1.3 特殊的季节性与地理因素

新疆高寒地区存在显著的季节不平衡性:夏季日照时间长、辐射强、负荷相对较低(部分水文遥测站冬季需为传感器加热装置供电,负荷反而增大);冬季则相反,日照短、辐射弱、但环境温度低导致蓄电池效率低下且自放电减缓效应被低温掩盖,系统能量供需矛盾异常突出。此外,高寒地区水文遥测站点多地处偏远,交通可达性差,尤其在冬季大雪封山时,维护极为困难,对系统的可靠性、耐久性和远程可管理性提出了极高要求。

2 高寒地区水文遥测站太阳能供电系统的优化设计

针对上述挑战,水文遥测站太阳能供电系统的设计必须从“适应环境”转向“针对环境优化”,在组件、储能、控制、结构等各环节采取强化措施。

2.1 高寒地区水文遥测站太阳能供电系统光伏组件优化

(1)耐低温与抗紫外线组件。优选采用高品质、具有良好低温韧性的EVA封装胶膜和耐候性背板(如TPT、KPK结构)的光伏组件。双面双玻组件因其更强的结构稳定性、优异的耐候性和更低的衰减率,在高寒地区应用优势明显,其背面增益在雪地反射条件下能提升发电量。组件需通过严格的紫外线(UV)测试、湿热(DH)测试,尤其是热循环(TC)和湿冻(HF)测试认证,确保其在剧烈温度变化下的可靠性。

(2)倾角与方位角优化。不仅要考虑全年发电量最大化,更要着重考虑冬季(特别是最不利月)的发电量保障,以及利于积雪滑落。对于新疆高寒地区,可采取接近当地纬度甚至略大的倾角,以增加冬季太阳光入射角,减少积雪附着。理论计算需结合当地典型年气象数据(特别是冬季辐射与积雪数据),运用专业软件(如PVsyst)进行模拟,找到满足冬季最低发电需求与全年总收益平衡的最佳倾角。方位角一般正南设置。

(3)阵列布局与防积雪设计。支架采用热浸镀锌或更高防腐等级的钢材,结构设计需满足当地风荷载、雪荷载规范要求,并考虑地震荷载。为减少前排组件阴影对后排的影响(尤其在冬季太阳高度角低时),需适当增大阵列间距。可采用具有一定坡度的光滑表面组件或安装“防积雪边框”,或在支架上设计电加热融雪带(需谨慎考虑其能耗),以促进积雪自然滑落。

2.2 高寒地区水文遥测站太阳能供电储能系统优化

储能系统是高寒地区水文遥测站供电系统稳定的核心与薄弱环节,其配置需格外谨慎。

(1)类型选择。尽管成本较高,但宽温型磷酸铁锂电池(LiFePO₄)因其更优的低温性能(如 -20°C 下仍能保持较高放电容量,支持低温充电)、更长的循环寿命、更高的能量密度和更简单的维护,正逐步替代传统的阀控式铅酸蓄电池(VRLA),成为高寒地区的首选。若选用铅酸电池,必须采用具备良好低温性能的胶体(Gel)或吸液式玻璃棉(AGM)电池,并配备保温箱。(2)容量配置的特别考量。容量计算不能简单套用常温公式。必须基于最不利条件(通常是连续阴雪天、低日照、低温的环境下)进行。计算时需代入:①低温修正系数(根据电池厂家提供的温度-容量曲线确定);②低辐照条件下光伏方阵的日发电量;③包括加热设备在内的冬季最大负载功耗及连续工作天数(自治天数)。公式可表述为:

$$C_{\text{req}} = \frac{(L_{\text{day}} \times D)}{\eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{batt}} \times \text{DOD} \times K_{\text{temp}}}$$

其中, C_{req} 为所需蓄电池容量(kWh), L_{day} 为日平均负载(kWh), D 为自持天数, η_{inv} 为逆变器效率(如有), η_{batt} 为蓄电池充放电效率,DOD为允许放电深度, K_{temp} 为温度修正系数(<1)。计算结果通常远大于常温地区配置。

(3)保温与热管理:为蓄电池配备具有良好保温性能的机箱(箱体采用聚氨酯等材料填充,内衬保温棉)至关重要。对于极端寒冷地区,可集成低功耗、可控的恒温加热装置,由系统在必要

时(如充电阶段或温度低于设定阈值时)自动启动,确保电池工作在适宜温度范围(如5℃-25℃)。加热器的能耗必须计入系统总负载。

2.3 高寒地区水文遥测站太阳能供电系统电源控制优化

控制器(对于直流系统)或逆变器(对于交流系统)是系统的“大脑”,其智能化水平直接决定系统在恶劣条件下的生存能力。

(1)低温充电算法。控制器必须具备基于温度传感的充电电压补偿功能。当检测到蓄电池温度过低时,自动提高浮充和均充电电压,以克服电池内阻增大带来的充电困难,防止长期欠充。同时,必须设置温度上限保护,防止保温箱内过热。(2)多级负载管理与低电压保护(LVD)。根据负载重要性分级(如核心传感器、通信模块为一级,加热装置、辅助照明为二级),实施分路控制。在电力不足时,按优先级顺序切断次要负载,全力保障核心业务负载运行。LVD阈值应可设置且具有回差,防止电池在低温下因电压陡降而频繁保护与恢复。(3)状态监测与远程通信。集成数据采集模块,实时监测光伏电流电压、蓄电池电压电流及温度、负载状态、环境温度等关键参数。通过水文遥测站原有的通信链路(如北斗卫星、GPRS/4G)或独立的低功耗物联网(IoT)模块,将电源系统状态数据上传至监控中心,实现远程故障诊断、告警和参数设置。

3 高寒地区水文遥测站太阳能供电系统运维体系构建

优化设计是基础,适应高寒地区特点的精细化、预防性运行维护是水文遥测站太阳能供电系统长期可靠运行的保障。

3.1 周期性巡检与预防性维护

针对高寒地区水文遥测站太阳能供电系统制定详尽的巡检计划,重点安排在春季融雪后、入冬前等关键时间节点:(1)春季融雪后巡检。全面检查积雪、冰雹造成的物理损伤;清洁组件表面冬季积累的顽固污渍和灰尘;检查所有电气连接是否因冻融循环而松动或腐蚀;检查防水密封(组件接线盒、电缆入口、蓄电池箱等)是否完好;测量接地电阻。(2)入冬前专项维护。重点检查蓄电池状态,测量内阻和容量,连接件紧固;检查保温箱的密封与保温材料是否完好,测试加热装置功能;检查支架紧固件,确保结构稳固以抵御冬季大风雪;清理阵列周边被风吹起损坏组件的杂物;确认远程监控通道畅通。(3)定期(季度/半年度)检查。检查组件表面清洁度、有无热斑;检查电缆表皮有无老化、龟裂、动物啃咬痕迹;记录系统运行数据,进行趋势分析。

3.2 应急处理

对高寒地区水文遥测站太阳能供电常见故障的快速诊断流程和应急处理预案:(1)冬季供电不足。长期积雪覆盖、组件故障、蓄电池低温性能下降或老化、负载异常增大等。应急措施包括远程调整负载管理策略、尝试远程启动加热装置(如有),并规划在天气和交通允许时尽快前往现场处置。(2)通信中断。

首先通过电源远程数据判断是否为电源系统瘫痪所致(如蓄电池电压为零)。若电源数据无法传回,则需考虑现场检修。(3)现场应急检修。为维护人员配备适用于极寒环境的工具、仪表和备件(如低温性能优异的电池、专用密封胶、加热毯等)。制定严苛的现场安全操作规程,特别是在低温环境下进行电气作业和蓄电池更换时的防静电、防短路、防冻伤措施。

3.3 智能化运维

高寒地区水文遥测站太阳能供电系统远程监控应充分利用现代信息技术,构建“远程智能监控为主,现场巡检为辅”的运维模式。(1)数据深度分析与预测性维护。在监控平台建立系统模型,对上传的运行数据进行实时分析。例如,通过比较同一时段历史发电量与当前发电量,结合气象数据,智能判断组件是否存在覆雪或性能衰减;通过分析蓄电池的充放电曲线、电压变化趋势和内阻历史数据,预测其健康状态(SOH),提前预警电池失效风险,实现从“故障后维修”到“预测性维护”的转变。(2)专家系统与决策支持。集成故障知识库,当系统报警时,能自动关联故障原因并提供排查建议。结合天气预报(特别是降雪、大风预警),提前向运维人员发送风险提示和维护建议,如“预计未来三天有强降雪,请关注站点XX的发电量变化及远程负载管理”。

4 结束语

新疆高寒地区水文遥测站的太阳能供电系统,其稳定运行是一项涉及多学科、多技术领域的综合性工程挑战。单纯依靠提高设备规格或增加配置冗余不仅成本高昂,且未必能根本解决问题。本文系统性地提出了“环境适应性优化设计”与“精细化主动维护”相结合的技术路线。未来,随着技术的进步,以下方向值得进一步探索:适用于超低温环境(-40℃以下)的新型储能技术(如固态电池、超级电容器复合系统);基于相变材料(PCM)的被动式智能温控蓄电池舱;利用无人机(UAV)进行高寒偏远站点光伏阵列的自动化巡检与清雪作业;以及基于人工智能(AI)的发电量预测与故障自诊断算法。通过持续的技术创新与科学的运维管理,必将能够为新疆乃至全国高寒地区水文监测及其他野外无人值守设施的能源供应提供更加坚实的保障。

[参考文献]

- [1]王磊,张鹏,周育锋.高寒地区光伏电站运行特性及关键技术综述[J].太阳能学报,2021,42(5):350-357.
- [2]艾克拜尔·买买提,刘志辉,李诚志.新疆天山山区季节性积雪对水文过程的影响研究[J].冰川冻土,2018,40(2):370-379.
- [3]赵勇,杨涛,李兰海,等.我国高寒地区水文监测技术应用现状与展望[J].水文,2019,39(4):1-6.

作者简介:

唐加勒克·托合塔尔汗(1996--),男,哈萨克族,新疆阿勒泰市人,大学本科,初级工程师,研究方向为水文勘测。