

罗布泊输水管线基站极端环境风光互补供电系统设计与应用

陈刚

国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6922

[摘要] 极端干旱、高频沙尘气候下,偏远地区工业基础设施持续电力保障一直是工程领域的大难题。本文以本单位米西输水管线基站为研究对象,针对目前老旧独立光伏供电系统在连续阴雨、沙尘暴天气下供电可靠性低、铅酸储能电池低温性能衰减严重、缺少远程智能监控等现实问题,提出一套高度适应极端环境的风光互补供电系统整体解决方案。通过对罗布泊地区风光资源时空互补特点的分析,本文提出了以单晶硅光伏发电为主、水平轴风力发电为辅的多能互补结构,并用低温自加热磷酸铁锂电池组代替传统的铅酸蓄电池,从根本上解决了由于极端低温造成的储能衰减问题。

[关键词] 极端环境; 风光互补供电系统; 磷酸铁锂电池; 智能分级负荷

中图分类号: U223.6 **文献标识码:** A

Design and Application of Wind-Solar Hybrid Power Supply System for Base Stations in Lop Nur Water Pipeline under Extreme Environment

Gang Chen

SDIC Xinjiang Luobupo Potash Co., Ltd

[Abstract] In remote areas with extreme drought and frequent sandstorms, ensuring continuous power supply for industrial infrastructure has always been a major challenge in the engineering field. This paper takes the base station of the Misi water transmission pipeline of our unit as the research object, Addressing the current practical issues of low power supply reliability of old independent photovoltaic (PV) systems during continuous rainy and sandstorm weather, severe performance degradation of lead-acid energy storage batteries at low temperatures, and the lack of remote intelligent monitoring, a comprehensive solution for a wind-solar hybrid power supply system highly adaptable to extreme environments is proposed. Through analyzing the spatial and temporal complementarity characteristics of wind and solar resources in the Lop Nur region, this paper proposes a multi-energy complementary structure dominated by monocrystalline silicon PV power generation and supplemented by horizontal-axis wind power generation. Additionally, low-temperature self-heating lithium iron phosphate battery packs are used to replace traditional lead-acid batteries, fundamentally solving the problem of energy storage degradation caused by extreme low temperatures.

[Key words] extreme environment; wind-solar hybrid power supply system; lithium iron phosphate battery; intelligent graded load

引言

水资源是干旱荒漠地区工业生产和人类生活的命脉。国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司位于新疆罗布泊腹地,由于当地极度缺少淡水资源,它的大规模钾肥生产以及人员生活用水主要依靠从数百公里以外调水的米西输水管线^[1]。该输水管线全长267公里,沿线每二十公里设一个无人值守基站,主要实现对管线运行数据的实时采集和远程阀门启闭控制,是保证输水大动脉安全平稳运行的重要枢纽^[2]。

1 极端环境下基站供电现状与困境分析

1.1 传统单一光伏供电系统的气象适应性瓶颈

罗布泊地区多年平均日照时数达六点八小时,为国家太阳能资源 I 类区,具有良好的光伏发电潜力,但是由于其气象条件极端不稳定,给单个光伏系统供电连续性造成严重威胁^[3]。现役输水管线基站的光伏组件大多建于2008年以前,所采用的早期多晶硅技术,初始的光电转换效率只有15%到18%,经过近18年的风吹日晒、强紫外线照射、频繁剧烈的热胀冷缩等环境因素的影响,组件封装材料已经出现了老化现象,背板开裂、接线盒密封失效的情况也时有发生,导致系统绝缘性能大大下降,发电效

率年均衰减率超过了行业标准^[4]。

1.2 铅酸储能设备在极端温差下的衰减机制

储能系统是平抑可再生能源波动,保证夜间和恶劣天气供电的最主要屏障。目前大部分基站所用的阀控式铅酸蓄电池,在罗布泊极端温度下工作情况不佳。铅酸电池的化学反应对温度非常敏感,罗布泊冬季常在零下二十摄氏度以下的极寒环境中,电池内部的硫酸电解液活性急剧下降,甚至在零下二十五到三十摄氏度的时候出现结晶现象,造成电池内阻大大增加,放电容量出现断崖式衰减,产生“一充就满,一放就没”的虚假满电现象^[5]。

1.3 缺乏在线监测与负荷分级管理的运行隐患

除了硬件设备老化、性能下降以外,现有的供电系统在软件管理上也存在着严重的滞后性。系统没有设置完善的在线监测和智能诊断功能,中央控制室只能被动地接收电池总电压这一项参数,不能对光伏组件真实的出力、单体电池的健康度(SOH)、核心逆变控制设备的运行状况等进行实时的监控。由于黑盒式的运行状态,运维人员不能进行预防性的维护工作,在基站完全断电、管线数据丢失之后才匆忙地组织抢修,大大提高了运营成本和安全风险。

2 风光互补供电系统主要设备选型及设计

2.1 基于时空互补特性的风光发电容量匹配

为了克服单一能源的脆弱性,本系统根据罗布泊地区风能和太阳能时间、季节上具有很强互补性的特点,设计出以光为主、以风为辅的互补结构。该地区年均风速为七米每秒,夜间和冬季风力比白天和夏季大得多,正好弥补了光伏夜间无出力、冬季日照短的不足。按照单基站通讯、控制和空调设备共计约十九点四二千瓦时日均总耗电量,结合灰尘遮挡、系统压降和逆变损耗等因素,计算得出需要配置约六点六千瓦的光伏装机容量。项目最终使用了十二块550瓦的高效单晶硅组件,用“四串三并”的方式接入系统,根据该地区北纬四十度左右的地理特点以及全年太阳高度角的变化情况,确定最优固定安装倾角为四十一度,以最大限度地提高冬季和春秋过渡季低角度阳光的捕获量。在风电匹配上,抛弃了容易产生动态失速、机械损耗大、两点五米每秒的垂直轴风机,选用了一种启动风速低、偏航对风能力强的一千瓦水平轴风力发电机。该种配置既不会因为追求大功率风机而造成低利用率、高塔架成本,又可以充分利用当地中低风速资源,在沙尘暴遮蔽阳光的时候仍然能持续给电网输送稳定的电力。

2.2 适用于极端温差的磷酸铁锂储能系统优化

由于传统铅酸电池在极寒条件下存在致命的缺点,因此本系统全部采用具有高能量密度、超强环境适应性的磷酸铁锂(LiFePO₄)电池储能系统。对基站连续三个无光照阴雨天或者沙尘天的极端生存工况进行严格的测算(按推荐的百分之八十放电深度计算),得到单基站储能容量的绝对安全基线是六十千瓦时。因此系统配置了四组五十一伏、三百安时的磷酸铁锂电池并联工作。为了解决罗布泊严寒的冬季问题,本电池系统中

设置了智能温控和自动加热模块,在极低温环境下可以微量自耗电启动加热,使电芯始终处在最佳活性温度区间,彻底解决了低温容量急剧下降的问题。

2.3 逆控一体化设备与多能协同管理架构

风光互补系统的核心就是将两种波动性很强的交流和直流电能进行高效的整合和稳压输出,这严重依赖于控制逆变设备的性能。本系统创新性地使用了三台五千瓦逆控一体机并机运行的协同管理架构,内部集成了最大功率点跟踪(MPPT)控制器、高频直流转交流逆变器和智能配电模块。MPPT控制器可以达到百分之九十九的追踪效率,实时动态地找到太阳能板阵列在不同的光照强度、温度下所能得到的最大功率输出点($P=U \times I$),比传统的PWM控制器要高百分之二十到三十。

3 智能化控制与三级负荷管理策略

3.1 基于SOC状态的三级负荷动态调度模型

为了防止基站由于整体电量耗尽而造成核心功能全部瘫痪的严重事故,本文提出了一种以储能系统实时荷电状态(SOC)反馈为基础的三级负荷智能分级切断调度模型。该模型把基站内所有的用电设备按照对管线安全运行重要程度分成绝对核心的通讯监控设备(第一级)、管路调控的电动阀门(第二级)和改善运行环境的工业空调等辅助设施(第三级)。从控制逻辑上看,当监控系统判断出磷酸铁锂电池组的SOC处于健康高位的时候,允许全负荷挂网运行;当连续几天出现极端无光无风天气,使得SOC降到设定的第一警戒阈值以下的时候,数控单元就会发出继电器断开指令,强制切断耗电大的第三级空调负荷,通过节流来尽可能地延长续航时间。如果恶劣天气继续,SOC再次跌至第二生存阈值之下,系统就会毫不犹豫地锁定第二级阀门控制回路,切断它的供电或者禁止它执行大功率动作指令,把最后剩下的宝贵电能无条件、排他性地供给第一级通讯和数据采集设备,在极限状态下保证中控室对管线水压、流量等生命体征信号的持续感知,为应急抢险争取黄金时间。

表1 输水管线基站三级负荷分级管理策略表

负荷级别	涵盖设备类别	日均耗电量(估算)	供电优先级	动态调度逻辑
第一级(核心保障)	远程通信网关、压力/流量传感器、PLC主控单元	9.6 kWh	绝对优先,全程保供	SOC任何阶段均不切断;仅电池硬件过放保护触发时被动停机。
第二级(按需调控)	电动调节阀执行器(含驱动与反馈模块)	1.0 kWh	条件性保障	SOC ≤ 50%: 禁用非必要动作,限制启停频率; SOC < 30%: 硬性断电,锁定执行回路。
第三级(柔性卸载)	工业空调、辅助照明、环境监测终端等非关键辅设	8.82 kWh	首选卸载对象	SOC < 70%: 自动切除空调主电源; SOC < 60%: 同步关闭照明及非必需辅设,确保前两级持续运行。

3.2 底层数据采集与SCADA远程监控体系融合

现代化的工业供电系统要打破信息孤岛,同现有的生产控制网络深度融合。本文所设计的是一套基于工业标准协议的层次化物联网通信结构。底层数据采集端用HP-DCU-4R高精度数控单元布置在光伏和风机的回路上,采用RS485串口和Modbus-TCP协议,对逆变器参数、MPPT实时功率、单体电池电压、内阻等大量运行特征数据进行高频采集。在数据传输和中枢交互层,对基

站内原有的二十四芯光缆进行尾纤重新熔接,形成到中央控制室的光纤宽带物理链路。为了保证异构系统之间可以顺利地进行交流,系统中部署了OPC UA协议转换服务器,把传统的Modbus报文转换成轻量级的MQTT物联网消息队列,然后推送到管线原来的SCADA综合监控平台上。这种深度信息融合不但可以让管理人员在几百公里之外用图形化的界面清楚地看到每一个基站的“微电网”健康状况,而且给中控室直接穿透下达指令远程干预基站用电负荷提供了强大的能力,实现了从被动抢修到预测性智能运维的跨越。

4 工程实施应用与成效评估

4.1 现场抗风沙与电气安全防护设计

在罗布泊这样一个狂风大作、暴沙肆虐、盐碱侵蚀严重的极端物理环境中,供电系统工程安全防护等级的好坏直接影响到整个项目的成败。在机械结构强度方面,光伏阵列的地基使用了深度锚固的C30商品混凝土预制基桩,上层金属支架全部采用经过热浸镀锌防腐处理(镀层厚度大于60微米),高强度Q235C型钢,经由精密力学计算,其抗风载能力可以承受当地最恶劣的十级及以上罕见狂风的强力冲击。电气安全上形成了一个严密的三级防雷、接地保护屏蔽网。第一级直击雷防护用滚球法计算出四五十米保护半径的避雷针,把所有的高耸组件和风机塔架都包含在内;第二级感应雷防护在交直流配电箱内安装了高规格的SPD浪涌保护器;第三级设备级防护要求所有外壳、支架通过铜导线汇入到一个统一的接地网,接地电阻控制在四欧姆以下。所有的户外交直流电缆都被深埋或者穿入加厚波纹管内进行铠装保护,在接头处用防水自粘带和硅酮结构胶做极致密封,防止极小的盐碱沙尘进入造成电气短路。

4.2 系统整体运行稳定性与经济管理效益展望

经过严格的单机测试和全系统模拟恶劣工况下七十二小时满载放电联调,该风光互补供电系统具有很强的稳定性、韧性。在切断全部自然光源输入的三天极限压测过程中,由于磷酸铁锂电池组能量足够大,三级负荷智能调度准确把控,基站一二类主要负载没有出现瞬间断电闪停的现象,SCADA监控数据的上传丢包率是零的。从经济和管理效益长远角度来讲,该系统成功部

署后立即消灭了长久以来困扰输水管线的能源顽疾。一方面,依靠风光自然资源高效互补捕获,完全消除以前因为断电而启用应急柴油发电机所造成的高化石燃料成本和人员奔波费用;另一方面,全透明的数字化智能监测体系把隐患排查提前到前面,大大延长了高价值电力装备的使用寿命,大幅削减了全生命周期内硬件更换折旧成本。

5 结语

因此,在极端干旱和频繁出现沙尘天气的情况下,无人值守基站供电属于新能源材料科学、智能电力电子调度和工业物联网技术相结合的综合性工程。本文以罗布泊米西输水管线真实痛点为出发点,量身打造出了以光伏为主、风机填谷、铁锂固能、分级智控的综合解决方案。经过科学的设备选择、严格的三级负载优先级划分和深度融入已有的SCADA系统数据互通,成功克服了恶劣天气条件下孤网供电的限制。该风光互补系统不但在物理结构上具有很强的抗逆性,在控制逻辑上也表现出很高的智慧化生存能力,给我国西北边疆以及全球其他类似极端地理环境下的工业基础设施长期能源供应提供了一个逻辑严密、论证充分、有标杆意义的工程实践指南。

【参考文献】

- [1]张 晓.风光互补供电系统在油田站场上的应用[J].石油石化节能与计量,2025(8).
- [2]黑向品.基于风光互补供电的输电线路在线监测系统研究[J].自动化应用,2024,65(15):159-161.
- [3]王俊翔,许天骄,刘畅,等.风光互补供电的分布式空调系统研究[J].能源新观察,2025(8):57-58.
- [4]管雅鹏.风光互补充电桩供电系统控制策略仿真分析[J].今日制造与升级,2024(6):80-82.
- [5]何立,杨静,杨正科.蓄电池作为储能设备在风光互补发电系统中的应用[J].科技与创新,2025(8):11.

作者简介:

陈刚(1985—),男,汉族,四川南溪人,大专,助理工程师,研究方向:电气系统及其自动化。