

Development and Application of High Reliability Uninterruptible Power Supply System for Gate Control System

Renping Huang Chengtong Cai

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Mengzi, Yunnan, 661100, China

Abstract

The gate control system at Nansha Power Plant suffers from single-power-supply operation and inadequate anti-interference capability, compromising emergency dispatch safety. This study investigates a distributed power architecture integrating industrial-frequency UPS and independent battery banks. It analyzes the technical pathways for automatic dual-power-switching devices, intelligent monitoring modules, and cabinet-integrated wiring, while evaluating operational stability and maintenance efficiency during power outages. The research outcomes significantly enhance the risk resilience of critical control systems, providing replicable technical solutions for power supply security under complex operational conditions.

Keywords

power frequency UPS; automatic switching power supply; backup battery pack; intelligent monitoring; gate control system

闸门控制系统高可靠不间断供电系统研发与应用

黄任萍 蔡成通

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南蒙自 661100

摘要

南沙电厂闸门控制系统存在单电源供电与抗扰能力差的问题, 影响应急调度安全, 文章研究了基于工频UPS与独立电池组的分布式供电架构, 分析了自动双电源切换装置、智能监控模块与机柜集成布线的工艺路径, 探讨了系统在断电工况下的运行稳定性与运维效率。研究成果有效提升了关键控制系统的抗风险能力, 为复杂工况下的供电安全提供可复制的技术方案。

关键词

工频UPS; 自动切换电源; 后备电池组; 智能监控; 闸门控制系统

1 引言

水电站闸门控制系统承担着调蓄、防洪和安全泄洪等核心功能, 其供电系统稳定性直接决定应急调度能力与运行安全。南沙电厂原有闸门控制柜存在单路供电、干扰敏感、后备时长不足等问题, 在极端气象或突发断电情况下无法持续保障关键控制动作。为提升六套闸门控制单元的供电连续性与系统抗干扰能力, 构建了基于工频UPS的高可靠不间断供电系统, 采用分布式隔离架构、集中后备储能与自动切换机制相结合的技术路径, 满足零中断、长续航、易运维的运行需求。文章围绕系统方案设计、关键技术构成、运行验证与应用效果展开技术分析, 明确其在电源保障与控制安全中的工程价值。

【作者简介】黄任萍(1985-), 女, 中国云南丽江人, 本科, 高级工程师, 从事水电站水库发电、防洪、排沙调度应用研究。

2 系统设计方案构成

2.1 UPS 分布式独立配置结构

控制系统供电结构基于关键闸门设备的独立运行需求, 采用全分布式架构进行配置。系统为南沙电厂6套关键控制柜, 包括进水口闸门、#1/#2/#3表孔闸门、#1/#2底孔闸门, 分别配置6台1kVA工频在线式UPS, 形成6个完全物理隔离的供电单元, 避免了并联共用电源所带来的短路风险和系统失效连锁反应。每套UPS独立供电, 具备自控充电和稳压输出能力, 可承受控制柜内感性负载如PLC、继电器、接触器在切换过程中的冲击电流, 输出电压稳定性高, 满足供电波动控制要求。独立配置方式不仅提升了整体系统的容错率, 还使得局部故障可定位至单台UPS单元, 无需影响其他控制柜运行, 具备较高的运维灵活性与故障隔离能力。在保障电源连续性的同时, 为后续模块化维护与智能化扩展提供了接口基础。

2.2 电池组后备持续能力参数

为满足闸门控制系统在外部电源中断时的稳定供电需求, 系统为每台UPS配置标准化的储能电池组, 形成独立后备单元, 具体参数如下:

(1) 每套 UPS 后端配置由 4 只 12V/65AH 铅酸蓄电池串联组成的 48V/65AH 电池组, 电压匹配 UPS 直流输入, 电池容量与输出功率匹配度高;

(2) 单套系统在满负荷运行条件下, 经现场测试可连续稳定供电超过 120 分钟, 满足现场人工干预或自动调度所需时间窗口;

(3) 储能系统各单元独立运行, 互不干扰, 不存在并联均流需求, 避免环流与不均衡充放电引发电池老化;

(4) 电池组布设采用独立托盘与通风间隔, 便于热管理与维护作业, 极端温度环境下可保持良好工作状态;

(5) 蓄电池管理结合 UPS 内置充电电路, 支持浮充维护和状态检测, 保障长期待机状态下的放电可靠性与后备启动响应速度。

2.3 双电源切换机制控制方式

整个系统在输入端配置一体化自动双电源切换装置 (ATS), 以实现市电与 UPS 输入端的高效联动控制。ATS 以市电作为主电源, UPS 市电侧作为备用电源或反向配置, 具备可定义主辅电逻辑的切换能力^[1]。输入电源状态监测采样周期不大于 5ms, 具备毫秒级无扰动切换响应速度, 切换过程中输出端波形不产生电压跌落或相位中断, 确保控制柜在切换瞬间维持供电连续性。ATS 支持干接点状态上报与切换记录存储功能, 可与系统监控模块对接, 实现切换事件远程监控与故障回溯。装置安装于系统总输入端前级, 采用抽屉式模块结构, 便于后期运维更换, 具备短路保护、欠压保护与过压旁路能力。在运行策略中, 市电状态良好时 ATS 保持主供电路径; 在电压异常、频率漂移或供电中断情况下, 自动切换至 UPS 电源输出端, 为系统输出段持续提供稳定能量。

3 关键技术与集成工艺

3.1 工频 UPS 输出电能稳定特性

工频在线式 UPS 采用低频隔离变压器输出结构, 可将市电经整流、逆变过程稳定为频率、电压恒定的正弦波电源, 输出波形总谐波畸变率 (THD) 控制在 2% 以内^[2]。在继电器吸合、接触器动作及 PLC 输入输出切换过程中, 感性负载常伴随突发电流冲击, 普通高频 UPS 在应对浪涌电流时可能出现输出波形削顶或压降, 从而引发控制逻辑误动作。工频 UPS 内部配置大容量 IGBT 驱动模块与缓启动保护电路, 具备优良的短时过载能力, 短时可承受 150% 额定功率的冲击负载, 维持稳定电压输出, 有效消除因启动冲击或动作电流干扰引起的电源扰动问题。

在系统搭建中, 6 台 UPS 分别独立供电, 每套 UPS 输出电压稳定在 AC 220V ± 1%, 频率保持 50Hz ± 0.1Hz, 确保每个控制柜的核心设备在不同电网波动条件下仍保持精准运行。系统运行数据显示, 在市电出现 1.5 秒闪断过程中, UPS 输出波动幅度小于 2V, 频率无跳变现象, 未出现任何一次控制指令中断或继电器失效记录。UPS 输出侧采用隔离变压器进行功率解耦, 同时设置输出滤波器用于二次整

形, 有效滤除高频尖峰噪声, 保证后端电气设备电磁兼容性能与长期稳定性。

3.2 智能监控模块状态感知功能

系统集成的智能监控模块为嵌入式数据采集与远程上报单元, 部署于 UPS 侧与 ATS 切换节点位置, 主要负责采集输入电压、输出电压、输出频率、电池组电压、电池温度、SOC 水平及 ATS 切换状态等运行关键参数^[3]。模块内设 Modbus RTU 协议通信接口, 可通过标准 RS485 总线与监控平台连接, 实现远程数据同步刷新与状态诊断。采集频率设置为每 10 秒一次状态采样, 每 60 秒进行数据平均滤波处理, 降低瞬时波动带来的误报概率。设备支持上下限参数设定, 当任意参数超过预警值时可自动触发本地声光报警与远程通信上报, 提升故障响应效率。

针对电池状态监测, 引入 SOC (State of Charge) 估算模型, 通过输出功率、电池电压与放电时间计算当前剩余电量。核心估算公式如下:

$$SOC = \left(1 - \frac{I \cdot t}{C}\right) \times 100\%$$

其中, SOC 表示当前荷电状态百分比, I 为实际负载电流 (单位: A), t 为放电时间 (单位: h), C 为电池组额定容量 (单位: Ah)。该公式可用于判断电池在当前负载下的剩余可用时长。配合模块内置的温度传感器, 系统可在电池温升超过 45°C 时进行预警提示, 防止过热失效。远程监控平台可基于该模型提供电池替换预警、UPS 运行时长评估等辅助决策信息, 为系统运维提供高效支撑。

3.3 机柜集成规范与布线结构

系统采用标准 19 英寸工控机柜进行集中集成, 每个 UPS 配套一套独立电气控制舱, 舱体内部分层布设 UPS 本体、配电保护模块、电池托盘及监控终端^[4]。机柜内部布线遵循“强弱电分离、上下出线、左右分隔”原则, 控制信号线与动力电源线分层穿管布设, 避免信号干扰。线缆端头使用工业级冷压端子, 压接部位采用套管标识与热缩套保护, 保证接触可靠性与识别清晰度。UPS 与电池组之间的连接采用短距离铜排或多股软电缆, 并在转接点设置防松接线端子, 防止高电流接点松动引发击穿。

柜体内设置母线汇流排及三极断路器保护装置, 对每一路输入与输出路径进行独立保护。ATS 模块设置在机柜上部, 便于与市电引入母线接驳, 输出端采用插接式防护模块, 支持运行中带电插拔与更换。柜体前后设有独立通风口与滤网, 可配备低噪轴流风机进行强制风冷, 保持舱内温度不高于 40°C。机柜前门安装透明观察窗与 LED 运行状态指示板, 便于现场巡视与故障初判, 提升了系统集成度与日常可操作性。

4 实际应用与运行效果

4.1 市电失效时的应急供电响应

在南沙电厂运行周期内, 系统在经历 4 次市电闪断与

1次计划外全停电事件中保持持续供电状态，所有控制柜未出现误动作或拒动记录。ATS检测到市电失压后启动无扰动切换流程，5ms内完成UPS接管，输出电压幅值偏差不超过1.2V，频率保持在50Hz±0.03Hz区间，控制柜内部PLC、继电器及接触器维持正常运行逻辑^[5]。现场#2底孔闸门控制柜在一次电网掉电测试中完整记录了UPS接管过程，输出电压曲线无明显跳变，继电器吸合状态未受影响。运行日志显示，UPS接入期间未发生指令重发或信号中断，SCADA系统监控数据未触发任何级别的供电故障报警。切换过程中无可感知闪断现象，控制端无程序复位操作，整体供电链路在电网故障下保持闭环稳定状态，保障了控制系统动作的连续性和准确性。

4.2 长时断电场景下的稳定运行验证

为验证供电系统在完全断电条件下的持续运行能力，对南沙电厂6套控制柜分别进行满负荷状态下的后备电池持续放电测试。测试环境设定为常温标准工况，运行模式为控制逻辑闭环驱动，控制器、继电器、信号采集模块均保持激活状态，电池终止放电电压设定为42V。测试期间，UPS输出电压、电流与频率数据同步采集，监测系统状态稳定性及输出波动情况。各控制柜平均负载功率保持在680W至730W区间，蓄电池运行期间未出现温升异常、掉电或切换失败现象。放电结束后采集持续供电时间作为主要评价指标，判断储能系统配置是否满足极端断电场景下的操作保障要求。为展示各控制柜在后备工况下的持续运行表现，可见下表1。

表1 控制柜断电状态下的持续运行时间测试表

控制柜编号	UPS输出功率 (W)	放电终止电压 (V)	持续运行时间 (min)
进水口闸门	730	42.2	129
#1表孔闸门	685	42.1	132
#2表孔闸门	710	42.3	127
#3表孔闸门	695	42	130
#1底孔闸门	715	42.1	128
#2底孔闸门	700	42.2	131

所有控制柜均维持了超过125分钟的持续运行能力，电池终止电压稳定，无过放现象。放电过程波动小，输出功率稳定无异常波峰。运行中未出现任何UPS掉线、异常报警或电压跌落现象，说明系统电池组容量配置充分、UPS输出效率高、电池内阻匹配良好。测试验证了系统在无外部供电环境下仍能提供高稳定性的运行保障，为现场极端环境下的手动干预与安全操作提供可控时间窗口。

4.3 故障处置流程与运维成本对比

模块化结构部署为每套控制柜配置专属UPS和电池组，具备故障点物理隔离特性。运维过程中一旦发现单套UPS报警或异常输出，仅需下电该控制柜对应单元，即可实现单元级检修，避免大范围停电或控制系统连锁中断。配套集中式监控平台可提供各UPS运行时长、电池健康状态、ATS

切换日志等关键维保数据，辅助运维人员进行预警更换与健康分析。蓄电池组采用标准65AH电芯，便于批量统一更换，避免因品牌、电压误差导致的串接失配。UPS为抽屉式安装结构，具备在线热备更换条件。

为对比两类供电架构在维保负荷上的差异，可引用模块化供电系统与传统集中供电系统的运行指标对比，如下图1所示：

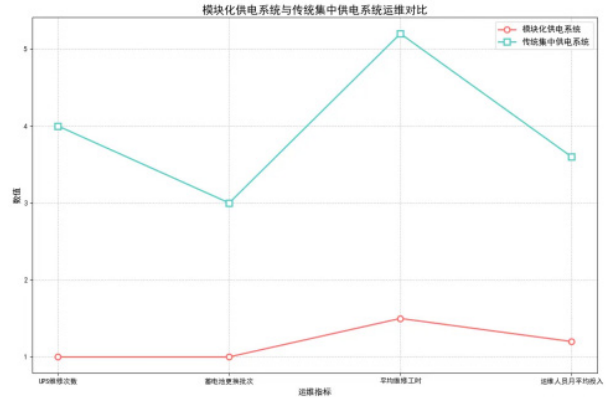


图1 运行一年内模块化系统与传统系统运维对比数据

模块化供电系统在UPS维修次数、蓄电池更换批次、平均维修工时和人员投入方面均显著低于传统集中供电系统，尤其在平均工时与人员占用上差异最为明显，反映其在运维效率与资源消耗控制上的优势。

5 结论

系统基于工频UPS独立架构、标准化电池组与自动切换机制构建了完整的闸门控制不间断供电方案，在市电波动、失压及长时断电环境下均验证了高可靠供电能力，控制柜运行状态稳定无中断。关键技术包括感性负载适配的正弦波输出、具备实时告警与状态采集能力的智能监控模块，以及符合运维标准的机柜集成工艺，形成了从电能保障到状态管理的闭环体系。运行结果显示系统切换无扰动、后备供电达标、故障隔离明确，运维强度与资源投入较传统系统明显降低。技术路径具备场景适配性与工程推广基础，可为水工、电厂等重要控制单元提供高可用供电支撑。未来可拓展至具备通信交互能力的数字化电源管理系统，实现区域级智能供电协同控制。

参考文献

- [1] 何锴君,余位权. 浅析黔中水利枢纽工程闸门控制系统设计及应用[J].中国水能及电气化,2024,(01):18-23.
- [2] 张金洋. 闸门自动化控制系统故障诊断研究[D].郑州大学,2023.
- [3] 黄子军. 自动化监控控制系统在插花枢纽节制闸闸门启闭及开度控制上的应用效果分析[J].陕西水利,2023,(02):108-109+113.
- [4] 许芝文. 闸门钢丝绳攀爬机器人漏磁检测与控制系统研究[D].杭州电子科技大学,2022.
- [5] 陈昕,贺诗涵. 基于Lonworks技术的水电站闸门智能控制系统[J].地下水,2021,43(06):277-278.