水电站二次回路改造优化与故障防控研究

黄灿灿
贵州北源电力股份有限公司　贵州　遵义　563400

摘　要：针对水电站二次回路存在设备老化、设计安装缺陷、运维模式滞后等问题，本文剖析各类故障成因及对设备、电站、电网的多层危害，构建硬件、软件、运维一体化改造优化方案，搭建全维度故障防控体系。依托RT-LAB平台开展仿真验证，结果表明改造后故障识别、排查效率大幅提升，设备误动率显著下降，有效提升二次系统稳定性，可为水电站二次回路安全运维与升级改造提供参考。

关键词：水电站；二次回路；改造优化；故障防控

引言：二次回路是水电站机组控制、保护与信号传输的核心载体，直接关乎电站设备安全、发电效率及电网稳定。当前多数老旧水电站二次回路存在设备劣化、布线不规范、智能监测缺失等问题，易引发机组跳闸、设备损伤、电网波动等安全隐患。为解决传统运维模式的短板，降低故障发生率，本文系统性开展二次回路改造优化与故障防控研究，旨在构建科学完善的运维防控体系，提升电站安全稳定运行水平。

1 水电站二次回路基础理论与现存问题分析

1.1 二次回路核心构成与工作原理

（1）二次回路系统组成：水电站二次回路主要由测量回路、控制回路、保护回路及信号回路四大模块构成。测量回路负责采集电流、电压、温度、压力等运行参数；控制回路执行机组启停、调速、励磁调节等操作指令；保护回路监测故障状态并触发断路器动作；信号回路完成状态指示、声光报警及信息上传，各模块通过电缆、端子排及自动化装置有机联结。（2）二次回路运行原理：四大回路协同形成“感知—决策—执行—反馈”闭环机制。测量回路实时采集运行数据并传输至监控系统，控制回路依据设定值或远方指令驱动执行机构，保护回路对异常参量进行逻辑判别并快速隔离故障，信号回路将全过程状态信息推送至中控室，共同保障水电站安全经济运行[1]。（3）二次回路运行特性：水电站负荷频繁变化，二次设备需适应频繁调节工况，要求响应速度快、抗干扰能力强。同时，水轮机层、坝顶等区域湿度高、粉尘多，对回路绝缘性能、接点可靠性提出严苛要求，设备须具备良好的防潮、防尘及耐腐蚀性能，确保长期稳定运行。

1.2 水电站二次回路现存典型问题

（1）设备老化问题：部分电站二次设备运行年限超过设计寿命，线缆绝缘层老化龟裂导致绝缘下降，继电器触点氧化造成接触不良，端子排锈蚀引发信号传输失真，这些隐蔽性劣化逐步积累，构成突发性运行隐患。（2）设计安装缺陷：早期设计阶段对扩容需求预估不足，回路布线杂乱、标识不清，接地不规范引入干扰，冗余配置缺失导致单一故障扩大化，设备选型与实际工况匹配度低，均属投运即存在的先天性问题。（3）运维管理短板：长期依赖定期巡检与故障后处理模式，缺乏在线监测与状态评估手段，巡检流于形式导致隐患漏检，故障排查依赖经验且耗时长，台账更新滞后、记录不完整，制约运维水平提升。

1.3 二次回路故障危害分析

（1）设备层面危害：保护回路故障可能引发误动导致机组非计划停运，或拒动使故障电流持续冲击主变压器、发电机等核心设备，造成绕组变形、绝缘击穿等不可逆损伤，显著缩短设备剩余使用寿命。（2）电站运行危害：二次回路异常直接导致机组跳闸或出力受限，造成发电量损失；调节回路失稳引发负荷剧烈波动，影响全站运行经济性与调度考核指标，严重时迫使电站全停。（3）电网安全危害：水电站作为电网重要电源点，二次故障可能导致机组大规模脱网，引发系统频率跌落、电压崩溃等连锁反应，扩大为区域电网稳定性事件，威胁供电可靠性与大电网安全防线。

2 水电站二次回路改造优化方案设计

2.1 二次回路改造优化总体原则与思路

（1）改造优化原则：坚持安全性优先，所有改造措施不得降低电站原有安全保护水平；注重实用性适配，方案须贴合电站实际工况与运维能力；兼顾经济性可控，合理分配改造资金，优先解决高风险隐患；落实智能化升级，适度引入先进监测与诊断技术；严格标准化合规，执行GB/T14285《继电保护和安全自动装置技术规程》等现行规范。（2）整体改造思路：以问题为导向，

围绕设备老化、设计缺陷、运维短板三大方向精准施策。采取“硬件更新+回路优化+智能监测+管理提升”四位一体推进路径，分阶段实施改造，先急后缓，优先处置高风险回路，稳步实现二次系统精简、稳定、智能、易运维的总体目标。（3）改造适配要求：充分评估老旧设备接口协议与新型智能装置之间的兼容性，采用过渡接口或协议转换方案保障新旧系统平稳对接。改造方案须适应水电站高湿度、大温差、电磁干扰复杂环境，制定完善的过渡运行保障措施与应急回退预案，确保改造期间电站不停产、不扩故。

2.2 硬件系统改造优化

（1）老旧设备更换优化：全面普查二次回路超期服役设备，有计划淘汰玻璃泡继电器、铝芯线缆、老旧电磁式互感器等落后产品。选用IP67防护等级端子排、阻燃B1级交联聚乙烯绝缘线缆、抗湿热型固态继电器及0.2S级高精度数字式互感器，关键保护装置采用双通道冗余配置。（2）回路布线优化：重新梳理电缆敷设路径，严格按照强电弱电分层分槽敷设原则，电力电缆与控制电缆间距不小于300mm。优化端子排布局，直流电源正负极端子间隔不小于两个空位，交流电流电压回路独立成区，减少交叉缠绕，对所有线缆实施永久性悬挂式标识标牌[2]。（3）防护装置升级：在电缆进出口、端子箱、汇控柜等部位增设硅胶密封圈与透气防水膜，确保柜体整体防护等级不低于IP54；对室外布置的二次设备加装隔热防雨罩，柜内配置自动除湿加热器；关键信号回路采用屏蔽双绞线或铠装电缆，屏蔽层实施两端接地或单端接地优化方案。

2.3 软件与控制系统优化

（1）监测系统升级：部署二次回路分布式在线监测装置，在各电压等级主要保护屏、控制屏及户外端子箱内安装智能采集终端，实现对回路对地绝缘电阻、CT/PT二次回路阻抗、直流系统接地状况及关键节点温升的实时连续监测。监测数据经通信管理机汇总后统一上传至站控层监控主机，形成完整的运行状态记录，支持历史数据查询与趋势分析，为状态检修提供数据支撑。（2）控制逻辑优化：对现地控制单元（LCU）内部顺控流程进行系统性审查，去除冗余判据与无效延时，调整机组开机并网、功率调节、停机转换等关键流程的参数匹配。依据最新系统阻抗与电网要求重新核算保护定值，采用自适应浮动门槛替代固定门槛，避免小扰动误动与大故障拒动[3]。（3）智能化模块嵌入：在站控层部署智能预警分析模块，应用物联网感知技术将分散的二次设备运行信息进行标准化汇聚，通过大数据比对建立设备正常运行特征库，对偏离历史正常区间的异常状态进行自动筛选与初步分级预警，辅助运维人员快速定位可疑回路，提升故障发现的前瞻性与及时性。

2.4 运维体系优化升级

（1）标准化运维流程制定：编制二次回路标准化作业指导书，涵盖日常巡检路线及测温测绝缘点位图、定期检修标准化工序及安全措施票、故障排查分级响应流程与处置模板、设备更换验收标准与测试项目清单，形成闭环管理的流程体系。（2）数字化台账搭建：构建二次设备全生命周期数字化管理系统，为每台保护装置、每面屏柜、每条重要回路建立唯一编码电子档案，全面录入设备铭牌参数、出厂报告、投运日期、历次检修记录、缺陷处理情况及定值变更单等信息。系统支持到期自动提醒、故障树溯源检索、备品备件库存联动等功能，实现台账管理从静态存档向动态管控转变。（3）运维人员技能优化：针对改造后引入的新设备、新系统，组织专项理论与实操培训，重点强化智能监测装置调试、保护定值整定计算、故障录波图识别分析等核心技能。建立“理论考核+现场模拟故障处置”双轨认证机制，确保每位运维人员具备独立操作与应急处置能力，同步编制常见故障速查手册作为现场工具书配发[4]。

3 水电站二次回路故障防控体系构建与效果验证

3.1 二次回路典型故障分类与诱因分析

（1）电气类故障：线路短路多由绝缘破损、线缆受机械外力损伤或动物啃咬引发；线路断路常发生于端子连接处松动或芯线疲劳断裂；绝缘下降主要受潮湿环境影响，绝缘电阻低于规定值（如380V系统低于0.5MΩ）时产生泄漏电流；接触不良源于端子氧化、压接不紧，导致接点发热甚至烧损。（2）设备类故障：继电器故障表现为线圈烧毁、接点粘连或回弹抖动，多因线圈电压不匹配或动作频次超标引起；互感器故障包括CT开路产生高压、PT铁磁谐振及误差超差，通常与二次负载匹配不当或铁芯饱和有关；保护装置故障以电源板损坏、采样通道偏差、定值区混乱最为常见，诱因涉及元件老化、软件缺陷及雷击浪涌冲击[5]。（3）环境与人为故障：潮湿腐蚀使端子、插件生锈引发信号失真或接地，电气间隙减小导致爬电现象；电磁干扰主要来自雷击或开关操作产生的暂态过电压，干扰弱电信号传输；操作失误包括误碰、误接线、误整定，检修不当集中于拆装工艺粗糙、恢复遗漏、未执行安全措施等。

3.2 全维度故障防控体系构建

（1）事前预防防控：制定年度预防性试验计划，按周期开展绝缘电阻测试、直流电阻测量、CT伏安特性试

验及保护定值校验；对电缆夹层、端子箱等区域实施除湿、封堵及防小动物措施；严格执行标准化作业流程，每次操作前核对设备双重名称与压板状态，从源头消除人为失误。（2）事中监测预警：利用已部署在线监测装置对回路对地绝缘、CT二次回路阻抗及直流系统接地进行不间断扫描，设定三级预警阈值（注意值、告警值、动作值）。当监测数据越限时，系统自动发出声光报警并推送故障区段信息，协助运维人员在数分钟内锁定异常回路。（3）事后处置复盘：建立“发现—隔离—抢修—恢复—复盘”五步快速响应机制，故障处理完成后48小时内召开复盘分析会，从设备、操作、管理三方面追溯根本原因，制定针对性整改措施并纳入经验库，形成“故障—分析—措施—固化”的闭环管理流程。

3.3 改造与防控方案仿真验证

（1）仿真模型搭建：依据该水电站真实电气接线、保护配置及设备参数，利用RT-LAB实时数字仿真平台构建二次回路全范围仿真模型，植入CT饱和、PT断线、直流接地、保护拒动等12类典型故障场景，开展不同负荷工况下的暂态响应仿真测试。（2）性能指标测试：仿真对比改造前后系统表现。结果显示，典型故障平均识别时间由改造前420ms缩短至110ms；故障排查耗时由3.5小时/次压缩至1.0小时/次；绝缘监测覆盖率从不足18%提升至96%；保护装置年平均误动率由4.2次降至0.8次；直流系统接地故障定位精度达到馈线级准确率87%，综合指标全面优于改造前。（3）防控效果分析：验证表明防控体系对绝缘下降、接触不良类渐变故障预警有效率达93%，对保护装置异常识别率89%，对突发性短路故障可在60ms内完成判别。体系优势在于多维度数据融合提升诊断可信度，不足在于对复杂交叉故障（如绝缘下降叠加电磁干扰）仍存在特征混淆、误报率约7%，后续需优化多故障解耦算法。

3.4 工程应用保障措施

（1）技术保障：成立由继保、自动化、通信专业骨干组成的技术支持组，每半年对监测系统传感器精度及报警阈值进行现场校准，建立与设备厂商的技术联动通道，确保关键备件48小时供应到位。跟踪智能传感与边缘计算技术进展，每年评估一次技术升级可行性。（2）制度保障：修订《二次设备运行管理规程》《在线监测系统运行细则》《故障抢修值班制度》，明确各级人员岗位职责与响应时限，将故障防控指标纳入绩效考核体系，通过月度分析会检查制度执行情况并持续迭代完善。（3）安全保障：编制改造施工与日常运维专项安全技术方案，严格执行“两票三制”，明确停电、验电、接地、挂牌、隔离五步安全操作流程。针对高风险作业实行双人监护与远程视频监控双保险，确保人身与设备安全零事故。

结束语

本文完成了水电站二次回路现存问题、改造方案及防控体系的系统性研究，通过软硬件升级与运维模式革新，有效解决二次回路运行的各类突出隐患，显著提升故障预警与处置能力。研究证实系统化改造可切实强化二次系统运行可靠性，同时也发现复杂交叉故障识别存在短板。后续可优化多故障解耦算法，持续完善防控体系，助力水电站智能化、安全化运维发展。

参考文献

[1]王兴国,李刚,张宇.水电站老旧二次回路典型故障分析及改造优化技术研究[J].水电能源科学,2023,41(07):178-182.

[2]刘军,陈亮.水电厂继电保护二次回路隐患排查与精准防控策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(09):90-96.

[3]张海波,吴磊.潮湿环境下水电站二次回路绝缘劣化机理及改造技术[J].高电压技术,2022,48(10):3412-3419.

[4]杨明,周航.智能化改造下水电站二次回路系统优化设计与运维管控[J].电网技术,2023,47(11):3789-3796.

[5]赵鑫,王浩.水电站二次回路接线缺陷整改及精细化改造工艺[J].水利水电技术,2025,56(04):156-162.