水电站电气二次系统智能诊断与维护策略研究

伏文涛

（四川华电杂谷脑水电开发有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 在新型电力系统建设推进过程中，水电站电气二次系统的集成化与复杂化程度持续提升，传统运维模式的故障预判能力不足、检修针对性较差等缺陷逐步凸显，难以适配电站安全稳定运行的智能化发展需求。本文依托物联网、深度学习、数字孪生与PHM健康管理等前沿技术，构建覆盖数据采集、故障诊断、状态评估的一体化智能技术体系，结合二次设备故障机理搭建分级状态维护体系与专项运维方案，完善全流程运维闭环管控机制。结果表明，整套体系能够有效识别二次系统隐性渐变故障，提升故障定位精度与运维效率，保障水电站电气设备长期稳定运行，为行业智能运维升级提供技术参考。

关键词 水电站；电气二次系统；智能诊断；多源数据实时采集技术；智能故障诊断技术

中图分类号：TM62；TM76 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.008

0 引言

水电能源凭借清洁稳定、可调可控的优势，在新型电力系统的调峰调频与安全备用环节承担着重要支撑作用。电气二次系统作为水电站设备控制与故障防护的核心载体，其运行质量直接决定电站发电稳定性与电网供电安全性。现代化水电站二次设备的耦合程度不断加深，设备运行故障呈现隐蔽化、渐变化、耦合化的全新特征，传统人工巡检与定期检修模式无法精准甄别潜在隐患，容易引发设备异常与机组停机问题。智能化诊断与运维技术的落地应用能够彻底革新传统运维模式，大幅提升二次系统故障治理能力与设备健康水平，对推动水电站数字化、精细化运维发展具有重要的工程价值。

1 水电站电气二次系统构成及典型故障分析

1.1 电气二次系统核心构成

水电站电气二次系统设备功能划分清晰，整体由五大核心模块协同构成。继电保护系统为设备安全运行提供故障防护屏障；自动化监控系统负责机组工况数据采集与自动化调控；测控与通信系统承担站内及站网间的数据交互与指令传输；直流电源系统为二次设备提供不间断稳定供电；辅助二次回路作为信号与指令传输载体，保障整套二次系统有序、稳定运行。

1.2 二次系统典型故障类型及故障机理

1. 继电保护装置故障。作为水电站保障一次主设备安全运行、隔离系统故障的核心二次设备，继电保护装置的运行状态直接决定整套电气系统的故障处置能力与运行稳定性，其故障类型可统一划归为硬件本体缺陷与内部逻辑异常两大类别[1]。装置长期处于不间断带电运行状态，厂房温湿度波动与高强度电磁辐射会持续侵蚀板卡与电子元件，逐步引发电源模块损毁、采样板卡老化、AD采样精度偏移、继电器触点烧蚀等硬件问题，造成电气量采样数据失真。系统程序固有缺陷、现场参数误整定、外界电磁扰动会造成保护定值偏移、程序运行紊乱、逻辑闭锁失效等问题，隐蔽性极强的故障特征会大幅提升设备损毁与机组停机的发生概率。

2. 自动化监控系统故障。承担水电站机组工况实时监测、运行数据采集分析、设备自动化调控任务的自动化监控系统，是维系机组稳定启停与负荷精准调节的关键载体，设备运行过程中产生的各类异常问题会直接打破机组自动化运行的平衡状态。现场部署的采集终端与传感元件受运行年限与现场干扰影响会出现性能劣化问题，引发机组转速、设备温度、电气电压电流等运行参数出现跳变、缺失及波形失真现象。现地LCU控制单元逻辑架构异常与控制回路工况劣化，会造成远程操控指令无法正常执行，后台存储数据过载与软件适配性不足还会诱发系统卡顿、死机，彻底丧失机组调控功能。

3. 通信系统故障。贯穿水电站二次系统全部设备的通信系统，承担着站内设备数据交互、厂站与调度中心信息传输、远程控制指令双向传递的核心职能，

作者简介：伏文涛（1988-），男，本科，工程师，研究方向：电力生产管理。

通道运行质量直接决定二次系统整体可控性。水电站高压一次设备运行产生的高强度电磁辐射会持续干扰通信信号的正常传输路径，厂房内部潮湿多粉尘的特殊工况会加速光纤线路老化、设备端口氧化松动，进一步诱发链路衰减超标、交换机模块工作异常的现象。通信规约适配紊乱、数据传输丢包与延时超标问题会造成现地设备与监控后台数据脱节，引发远程操控失灵与系统运行失控隐患[2]。

4. 直流电源系统故障。为继电保护装置、自动控制设备与断路器操作机构提供不间断供电支撑的直流电源系统，是故障工况下保障二次设备可靠动作的核心供电基石，设备性能劣化会直接削弱系统安全防护能力。蓄电池组长期处于浮充、欠充或过充的非标准运行状态，会催生极板硫化、单体电池容量衰减、电池电压差值超标等内部损伤，严重工况下会出现电池鼓包失效的物理故障。厂房潮湿环境会逐步破坏直流回路绝缘结构，引发绝缘电阻下降、单点及多点接地故障，造成系统直流电压大幅波动，致使二次核心设备丧失动作能力。

5. 二次回路故障。由控制电缆、接线端子、信号及闭锁回路组成的二次辅助回路，是串联各类二次设备、传输电气信号与控制指令的物理载体，回路工况优劣直接影响整套二次系统的信号传输精度。水电站机组持续振动、厂房湿度偏高、空间电磁干扰密集的特殊运行环境，会持续影响端子排与接线部位的接触状态，逐步引发接线氧化、端子松动、接触电阻增大等隐性缺陷。电缆绝缘层长期受环境侵蚀会出现老化破损问题，催生回路短路或断路故障，这类无前置告警信号的隐蔽故障难以通过常规巡检发现，长期留存会诱发各类二次设备非正常动作。

2 水电站电气二次系统智能诊断关键技术

2.1 基于物联网的多源数据实时采集技术

完整且高精度的多源运行数据是支撑水电站电气二次系统智能诊断模型稳定运算、精准研判故障的核心基础。全域物联网感知架构能够覆盖二次系统所有核心设备与传输链路，实现全维度运行信息的精细化、高频次采集与规范化处理[3]。系统在继电保护装置、现地 LCU 单元、直流屏、工业交换机等关键设备部署采样频率 100 Hz 的高精度采集终端，持续收录 0～1 000 MHz 频段电磁干扰强度、4 mA～20 mA 标准模拟量电气信号、设备壳体温湿度等核心参数，同步归集链路衰减数值、数据传输延时、装置告警编码等运行信息。终端采集的原始数据接入边缘计算节点，完成 300 ms 周期内的数据清洗、噪声剔除与归一化标准化处理，依托工业千兆光纤专网完成稳定上行传输，为后续故障特征提取与设备状态评估提供规整、可靠的数据基底。

2.2 基于深度学习的智能故障诊断技术

具备高维特征挖掘与非线性数据拟合能力的深度学习架构，能够适配水电站二次系统设备耦合度高、故障机理复杂、隐性缺陷隐蔽性强的运行特征，完成海量时序运行数据的深度解析与故障精准甄别[4]。本研究搭建包含三层卷积层与两层池化层的轻量化 CNN 网络，对设备电气量波形、温度时序曲线、采样数值偏差进行像素级特征提取，精准捕捉板卡触点形变、采样回路偏移等细微硬件缺陷。模型搭配内置 128 维隐藏单元的双层 LSTM 网络，持续解析 72 h 连续时序运行数据，深度挖掘设备参数缓慢劣化的演变规律，甄别蓄电池内阻递增、绝缘阻值衰减等渐变故障。系统结合两千余条现场故障样本搭建专家知识库，融合模糊逻辑算法修正模型权重参数，提升复杂耦合故障的定位与溯源精度。

2.3 数字孪生可视化诊断技术

依托高精度三维建模与实时数据镜像映射构建的数字孪生体系，能够复刻水电站电气二次系统全设备、全链路的物理拓扑与运行状态，打破传统人工逐段排查故障的低效运维模式。技术人员依托建模软件按照 1:1 实景比例搭建二次系统虚拟模型，模型空间坐标精度控制在 ±2 mm，精准还原保护装置接线端口、LCU 逻辑回路、光纤传输路由的真实布局[5]。运维平台以 100 ms 为周期将现场设备运行参数、电气工况、链路状态数据同步映射至虚拟模型，实现物理设备与虚拟场景的状态实时同步。系统内嵌故障特征比对算法，参数偏离标准区间时自动高亮标记故障点位，推演故障信号传播路径，同时依托多工况仿真试验持续扩充故障样本，迭代优化诊断算法的适配性能。

2.4 PHM 故障预测与健康管理技术

聚焦设备全生命周期状态管控的 PHM 健康管理技术，推动水电站二次系统运维模式从故障后置处置转向状态前置预判，从技术层面解决传统定期检修模式盲目性强、针对性不足的行业痛点。技术体系归集设备出厂参数、投运时长、历史检修台账、实时运行工况等全维度数据，筛选绝缘电阻、链路损耗、元件内阻、设备温升等十二项核心特征指标，参照电力运维规程划定各级阈值区间。系统通过加权赋值算法核算设备实时健康度评分，结合多项式拟合算法追踪指标时序衰减规律，精准推演蓄电池、信号板卡、接线回路等易损部件的剩余服役时长，依托量化数据输出设备健

康梯度，为二次系统分级预维护、隐患提前治理提供精准的数据支撑。

3 水电站电气二次系统智能化维护优化策略

3.1 构建设备分级状态维护体系

依托PHM健康管理模型输出的全维度设备状态量化数据，结合电力二次设备运维技术规程与水电站设备实际服役工况，可搭建适配不同设备劣化程度的四级状态分级维护体系，精准匹配差异化运维作业标准，彻底规避传统运维模式下过度检修与检修缺位的行业问题。运维系统归集设备绝缘阻值、链路损耗、元件温升、内阻参数等核心量化指标，依据行业标准划定四级状态阈值区间，参数完全贴合基准区间且无时序劣化趋势的设备划定为健康状态，运维体系设定180天常态化巡检周期，依托智能终端完成24 h不间断状态监测。参数波动处于允许浮动区间、时序曲线呈现微弱劣化趋势的设备划定为亚健康状态，系统将数据采集周期压缩至2 h单次，开展端子扭矩校核、回路逻辑校验、设备除尘防潮等精细化预维护。关键参数逼近预警阈值、性能劣化趋势显著的设备划定为劣化状态，运维班组启动专项检测作业，全面排查设备内部元件损耗与回路异常问题并完成缺陷整改。设备功能失效、参数突破失效阈值的故障设备，现场立即启动抢修作业，同步归集故障全量数据迭代更新系统故障样本库。

3.2 分设备专项智能维护策略

结合水电站各类二次设备的结构特性、运行机理与差异化故障演化规律，依托智能诊断技术的量化研判结果制定专属化、精细化的设备运维方案，让各类二次设备的维护作业贴合设备运行实际，全面提升运维工作的精准度与专业性。继电保护装置以每日采样精度偏差、定值整定误差、触点电阻数值为核心监测指标，每季度开展一次完整传动试验与逻辑校核，针对板卡温升异常、触点阻值递增等隐性缺陷开展前置清洁与元件更替作业。自动化监控系统持续校核4 mA～20 mA模拟量采集精度与指令执行响应时长，按月完成系统缓存清理、漏洞修复与数据异地备份，针对LCU现地单元维持恒温恒湿防护环境，弱化电磁干扰对控制逻辑的影响。通信系统定时校验光纤链路损耗、端口延时、规约解析状态，依托数字孪生链路拓扑排查传输隐患，定期完成光纤端面清洁与交换机模块性能检测。直流电源系统逐小时采集蓄电池单体电压与内阻数据，借助PHM模型推演设备服役周期，按半年周期开展均充浮充试验与回路绝缘检测。二次回路依托智能检测仪器排查接线阻值与电缆绝缘参数，结合厂房振动与温湿度数据开展回路防护优化作业。

3.3 建立运维闭环管控机制

依托一体化智能运维平台的数据交互与流程管控功能，串联二次系统从状态监测、故障研判、隐患处置到效果复盘的全作业流程，搭建标准化、流程化、数字化的运维闭环管控体系，规范水电站二次设备智能运维的全链条作业标准。平台以100 ms为最小数据刷新周期，实时归集全维度设备运行参数并完成智能研判，针对不同等级的设备异常匹配对应的运维方案与标准化作业流程，逐级推送运维任务至专属作业终端。现场运维人员严格遵循电力二次设备运维规范开展缺陷治理、设备检修与参数校准工作，全程留存作业时序数据、检修参数调整记录与设备工况变化信息。单组运维作业完成后，平台自动比对设备检修前后的参数阈值、运行稳定性与数据传输精度，完成运维效果的量化核验。系统将历次故障台账、运维作业数据、设备状态演变信息同步录入云端故障知识库，持续迭代智能诊断算法的权重参数与阈值体系，稳步提升二次系统故障诊断精度与运维决策的科学性。

4 结束语

水电站电气二次系统的稳定运行始终是保障机组安全发电与电网可靠供电的核心前提，复杂的厂区运行环境与长期不间断的服役状态会持续诱发各类隐性及渐变故障，传统运维模式的技术短板会进一步放大设备运行的安全风险。本文研究的智能诊断技术体系与差异化运维策略能够精准适配二次设备的故障演化规律，有效弥补传统运维方式预判能力弱、检修精度低的缺陷，整套闭环管控体系能够持续提升设备健康水平与运维标准化程度。未来行业研究可深度融合自适应算法与无人值守运维理念，持续优化故障耦合判别模型与智能决策机制，进一步提升水电站二次系统运维的自动化与智能化层级，适配新型电力系统的发展建设需求。

参考文献：

[1] 崔凯.基于智能算法的水电站电气设备故障诊断与预测分析[J].电气技术与经济,2025(08):392-394.
[2] 谭军.基于深度学习的水电站电气一次设备故障检修系统[J].电气技术与经济,2025(05):199-201,204.
[3] 肖飞,薛林锋,叶志华.水力发电中的设备状态智能诊断技术分析[J].电子技术,2024,53(11):168-169.
[4] 谭承真.水电站电气工程自动化技术及其应用[J].工程技术研究,2024,09(13):81-83.
[5] 吴明祥.水电站电气装置故障运行状态自动捕捉方法研究[J].电气技术与经济,2024(06):25-27.