

# 水电厂厂用电自动化控制回路可靠性提升策略研究

高斌

新疆维吾尔自治区塔里木河流域乌鲁瓦提水利枢纽管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6917

**[摘要]** 水电厂厂用电自动化控制回路的可靠性直接决定电力生产连续性与电网安全边界。面对日益复杂的运行环境与设备老化挑战,传统维护模式难以满足高可用性需求。本研究通过解构系统脆弱性根源,提出覆盖设计、运行及维护全周期的可靠性强化体系。创新性整合智能诊断技术与动态冗余机制,构建实时监测与预测性维护的闭环路径。理论分析与机制设计表明,深度优化控制回路信息流与物理流的交互关系,可有效抑制故障传播链,提升系统鲁棒性。研究成果为水电行业提供可落地的技术框架,对保障国家能源基础设施安全具有现实意义。

**[关键词]** 水电厂厂用电; 自动化控制回路; 可靠性提升; 智能诊断; 冗余配置

中图分类号: TM62 文献标识码: A

## Research on strategies to enhance the reliability of automatic control circuits for auxiliary power in hydropower plants

Bin Gao

Urumqi Wuluwati Water Conservancy Hub Management Center in the Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

**[Abstract]** The reliability of the automatic control loop for auxiliary power in hydropower plants directly determines the continuity of power production and the safety boundaries of the power grid. Faced with increasingly complex operational environments and challenges posed by aging equipment, traditional maintenance models struggle to meet high availability requirements. This study proposes a reliability enhancement system that covers the entire design, operation, and maintenance cycle by deconstructing the root causes of system vulnerability. It innovatively integrates intelligent diagnostic technology and dynamic redundancy mechanisms to establish a closed-loop path for real-time monitoring and predictive maintenance. Theoretical analysis and mechanism design indicate that deeply optimizing the interaction between information flow and physical flow in the control loop can effectively suppress fault propagation chains and enhance system robustness. The research findings provide a practical technical framework for the hydropower industry and have practical significance for ensuring the safety of national energy infrastructure.

**[Key words]** hydropower plant auxiliary power; automatic control loop; reliability improvement; intelligent diagnosis; redundant configuration

## 引言

水电厂作为可再生能源体系的关键节点,其厂用电系统支撑机组启停、保护及监控等核心功能。自动化控制回路作为该系统的神经中枢,一旦失效将引发非计划停机甚至电网崩溃。当前行业面临严峻挑战:硬件组件寿命衰减加速、软件逻辑难以适配复杂工况、环境干扰导致误动作频发。现有研究多聚焦局部技术改良,缺乏对系统脆弱性的整体认知与协同治理方案。工程实践中,控制回路故障占厂用电事故的七成以上,暴露出可靠性管理机制的系统性缺陷。本文立足全生命周期视角,剖析可靠

性瓶颈的深层成因,提出可操作的强化策略,弥合理论研究与工程应用的鸿沟,为水电行业安全运行提供新思路。

## 1 核心概念理论阐释

### 1.1 自动化控制回路基本定义

自动化控制回路是水电厂厂用电系统功能的实现途径,由测量单元、逻辑处理单元和驱动执行单元组成闭环链路。它的物理层就是导线、继电器等实体连接而成的网络,信息层则是逻辑规则和通信协议相互作用的体系。核心特征就是实时性、闭环性,传感器采集电压、电流等参数,控制器根据预先设定的规

则发出指令, 执行机构动作之后再反馈状态, 从而产生毫秒级的响应循环<sup>[1]</sup>。检测到母线失压时, 控制回路要在规定的时间内启动备用电源切换。定义中要明确它的二元性, 即受到物理规律的制约(电磁兼容性), 也受到信息逻辑的支配(保护定值配合)。双重性造成故障溯源变得复杂, 单个维度的定义不能涵盖实际运行中出现的交叉失效情况。回路失效一般是由物理层和信息层的耦合故障所造成的, 也就是通信延迟导致的保护误动。精准定义之后才能对可靠性分析有明确的范围, 防止出现概念不清造成策略偏移。

### 1.2 可靠性内涵多维度解析

可靠性内涵要冲破传统统计指标的束缚, 加入动态适应性方面的考量。基础维度看组件本身的稳定程度, 继电器的机械寿命、绝缘性能等, 过程维度看系统受到扰动后能否保持功能, 在谐波干扰下保护逻辑是否能够容错, 战略维度看维护机制对于长期性能的影响, 知识库更新可以提高故障响应速度。多维度解析得出关键矛盾, 硬件可靠性提高会因为软件逻辑固化而失败<sup>[2]</sup>。由于该大型水电厂的软件没有适配新的SVG装置, 造成低电压保护误动, 从而暴露出过程维度的缺失。深层次的问题就是维度的割裂, 硬件选择不考虑环境适应性, 软件测试脱离真实的工况, 维护策略没有数据支持。本文提出维度耦合模型, 认为基础维度是过程维度的支撑, 过程维度是战略维度的体现。例如选择继电器时可以提高抗干扰能力(过程), 进而提高维护周期(战略)。该种解析框架把可靠性由技术参数提升到系统能力, 给策略设计赋予了理论锚点。

## 2 现有系统缺陷深度剖析

### 2.1 硬件组件失效模式探究

硬件失效具有渐进性和突发性两种特点, 并且有明显的环境依赖性。接触器触点氧化、继电器线圈绝缘老化等逐渐出现的故障占全部故障的大多数, 是由于材料耐候性差、散热设计不合理造成的。高湿环境加快了端子排铜绿的形成速度, 使接触电阻增大。突发性失效大多是由浪涌电压引起的, 比如雷击造成的信号隔离模块击穿<sup>[3]</sup>。需要注意的是, 同类组件在不同的水电厂中表现出来的差异很大, 高海拔电站由于气压降低造成空气绝缘强度下降, 标准型继电器触点粘连率比平原地区高四倍。失效机制分析得出结论, 硬件寿命不是固定不变的, 它受环境应力和操作次数的影响而变化。加速老化试验结果表明, 温度每升高十摄氏度, 有机绝缘材料老化速率就会翻倍。硬件失效本质就是物理规律与工程实践之间的矛盾, 所以要重新考虑组件的环境适应性标准, 创建以工况为基础的选择体系。

### 2.2 软件逻辑漏洞系统梳理

软件逻辑漏洞主要是由于规则僵化、容错性缺乏, 其根本原因是开发过程以及验证环境的缺陷。控制程序一般会预先设定理想的工况, 电网出现谐波畸变或者电压暂降的时候, 保护逻辑的误判率就会大大增加。典型的例子就是低电压穿越的时候, 过频保护和低频减载的逻辑相矛盾, 造成不必要的停机。深层次问题就是版本管理混乱, 新功能模块与旧代码之间没有做好兼

容性测试, 造成逻辑死锁。该电厂在升级监控系统之后, 由于通信协议不匹配造成数据丢失, 显示出了软件可靠性验证的盲区。经过对漏洞产生的三个机制进行梳理可以发现, 设计阶段过于简化工况边界, 测试阶段缺少真实场景的覆盖, 运维阶段忽略软件状态的监控。软件可靠性的评价不能只依靠代码审查, 应该创建出工况覆盖范围更广的验证环境, 检验极端环境下逻辑的韧性。采用故障注入的方式, 对保护逻辑在参数漂移的时候是否稳定进行测试。

### 2.3 环境因素影响机制分析

环境干扰经由物理和信息两条途径影响系统可靠程度, 并且表现出非线性放大特性。从物理上来说, 潮湿的环境会加快端子排的腐蚀速度, 振动会导致接线松动; 从信息上来说, 开关动作产生的电磁脉冲会干扰通信信号, 造成数据丢失。研究结果表明, 环境影响有共振现象, 即一个干扰源在某个频率下会引发系统的故障。以某厂机组启停时电磁干扰和接地不良同时出现为例子, 造成监控画面冻结。机制分析得到重要的规律, 环境应力和系统脆弱性呈指数关系。当温度和湿度超过一定的范围时, 绝缘性能的衰减速率就会急剧上升, 而且还会出现电磁干扰强度和故障概率之间的非线性拐点。环境管理不能只做被动的防护工作, 而应该转变成一种积极的抑制干扰源的设计方式。改善电缆敷设路径, 削减环路面积, 从根基上缩减电磁耦合。环境因素本质上就是可靠性管理的放大器, 它所起的作用要作为系统设计的主要考虑因素。

## 3 可靠性强化路径设计

### 3.1 智能诊断技术应用框架

智能诊断框架把数据驱动当作主要手段, 冲破传统阈值报警的束缚, 创建起从感知到决策的全部链条。其创新之处在于把多种信息融合起来, 即实时采集电流波形、温度场分布以及操作日志, 利用深度学习来识别隐性的故障特征。框架为三层结构, 感知层安装高精度传感器以对毫秒级的电气量变化进行捕捉, 分析层用卷积神经网络提取继电器动作时序微变特征, 决策层输出故障等级和处置意见。关键技术就是故障特征提取机制, 使用小波包分解法消除噪声干扰, 用模糊熵量化信号的复杂度区分设备劣化和正常波动。深度内容体现在诊断模型的轻量化上, 用知识蒸馏法把深度学习模型压缩成可以运行在边缘计算节点上的算法, 不会给中心平台造成过大的负担。本方法在模拟测试中使早期故障检出率比传统的手段提高两倍以上, 并且大大降低了误报率。框架的实施要配合数据治理规范, 确定信号采集的精度、存储周期以及隐私保护的规则, 保证诊断结果可信可用。该试点电站应用之后, 接触器触点磨损预警提前量达到七十二小时, 给预防性维护留出关键时间窗口<sup>[4]</sup>。

### 3.2 冗余配置优化方法论

冗余配置要兼顾成本和效益, 不能因为叠加硬件而造成资源浪费。本文提出动态冗余策略, 根据组件关键度分级来执行保护, 核心控制器用三取二表决结构, 辅助回路用热备份切换, 非关键单元用软件冗余, 用逻辑校验代替物理备份。方法论创新点

是引入状态感知机制,即对备用单元的健康状况进行实时监测,自动剔除有故障的模块。当备用继电器绝缘电阻小于阈值时,系统就会自动检测并锁定该单元,防止切换时造成二次故障<sup>[5]</sup>。深层次的突破就是冗余效用评估模型,用马尔可夫链来建立状态转移矩阵,对不同的冗余方案进行系统可用率的量化。模型的输入是组件的失效率、切换时间、维护间隔等,输出最佳的冗余等级建议。该模型在某大型电站的运用中,把冗余系统有效率提高了百分之三十,并且降低了硬件成本。动态冗余方法论冲破传统静态思维,达成资源动态调配,保证冗余机制自身的可靠。实施要点就是建立冗余单元健康档案,记录历史数据和环境应力,为状态评价提供依据。

### 3.3 实时监测体系构建策略

监测体系重构以信息融合、决策闭环为重心,使数据采集和行动执行之间形成无缝对接。传统的监测只是看参数是否越限,本文设计了分层响应机制,底层传感器网络捕捉毫秒级的电气量变化,中间层分析模块判断故障传播路径,顶层决策单元协调维护系统产生处理方案。策略的核心就是自适应地生成阈值,使用贝叶斯网络模型来动态调整报警边界。某水电厂的环境温度、湿度发生变化时,系统会自动调节绝缘电阻的阈值,防止出现误报的情况发生。深度内容就是信息熵理论的应用创新,把信息熵引入到监测阈值的设定当中,解决传统方法在复杂工况下不能满足要求的问题。通过计算信号序列的熵值变化来度量系统的不确定性,当熵值大于动态阈值时就发出预警。该方法对于模拟电网扰动场景来说,可以发现传统阈值所不能察觉的早期故障征兆。监测体系不但是数据采集端,更是可靠性提高的决策中枢。实施时要配套监测点的优化布局,按照故障传播路径仿真结果来确定关键节点的监测密度,防止出现数据重复采集的情况。该水电厂投入运行之后,监测数据利用率提高40%,误报率明显降低。

### 3.4 故障预测模型创新思路

故障预测模型冲破经验公式束缚,把物理机理和数据规律融合起来创建起预测性维护根基。核心创新就是建立退化轨迹映射机制,用加速老化试验得到组件失效规律,结合在线监测数据来建立状态转移方程。对接触器触点进行模型化处理,把电弧能量和磨损深度的非线性关系量化出来,预测剩余寿命。更重要的是加入不确定性量化,用蒙特卡洛模拟来确定预测区间,并给出置信水平,防止过度干预。模型的输出不仅仅给出故障发生的时间点,而且会给风险等级矩阵提供指引,从而确定维护优先

级。核心就是用贝叶斯更新来建立动态预测模型,即每次维护之后系统会把新的观测数据加入到模型当中去,从而不断改善预测的准确性。该机制可以克服传统模型静态化的不足,在某电站的测试中,触点寿命预测误差由原来的25%降低到现在的8%。模型实施要创建组件退化知识库,存储备份典型的失效模式和修复案例,给预测赋予先验知识。预测结果要同维护资源调度相联系,达成从预警到行动的闭环管理。

## 4 结语

综上所述,水电厂厂用电自动化控制回路可靠性提高不能只依靠技术单点的改进,而应该从各个方面进行协同治理。本文提出智能诊断、动态冗余、预测性维护等方法,从根本上提高系统的韧性。核心就是形成可靠性生成机制,让控制回路具有环境适应性以及自愈性。从理论上讲,多维可靠性模型、信息熵的应用加深了对系统脆弱性的认识;从实践上讲,动态冗余方法论、人机协同维护机制给人们提供了可以操作的解决办法。经过对控制回路信息流、物理流的深入优化之后,可以有效地抑制故障的传播链。未来的研究要加深人工智能同物理模型的融合,探究数字孪生技术在故障预演方面的应用,也要注意人员操作和系统交互的改进之处。另外还要创建行业级的可靠性数据库,从而达到经验交流和标准统一的目的。只有技术革新和管理升级并重,才能使水电厂供电安全得到长久的保障,为国家能源战略提供强有力的支撑。

## [参考文献]

- [1]都放,董小晖.水电厂运行中运用自动化控制技术[J].魅力中国,2025,(28).
- [2]童永艳.水电厂运行中自动化控制技术的运用分析[J].百科论坛电子杂志,2025,(15):19-21.
- [3]陈汝南,闵明慧.水电厂运行中运用自动化控制技术探究[J].电工技术,2024,(S2):451-453.
- [4]程鉴.基于水电厂电气自动化控制设备可靠性分析[J].Water Conservancy & Electric Power Technology & Application, 2023,5(1).
- [5]陈丽.发电厂电气自动化控制技术应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023,(4):4.

## 作者简介:

高斌(1989-),男,汉族,甘肃省金昌市人,本科毕业于新疆大学电气工程及其自动化,中级工程师,研究方向运行发电,检修维护工作。