

# Analysis on the Innovation and Development of the Electrical System Upgrade and Technical Management System of Hydropower Station

Guangshou Zhang

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

## Abstract

This study addresses the challenges of aging equipment and insufficient intelligence in hydropower station electrical systems, as well as the limitations of traditional technical management systems in meeting high-efficiency operation and maintenance demands. By exploring synergistic development pathways between electrical system upgrades and technical management innovation, the research aims to enhance operational reliability and economic efficiency. Key areas of focus include technological upgrades for generators and transformers, intelligent control system development, and management innovations such as lean management concepts, digital tools, and organizational restructuring. Case studies demonstrate the interactive relationship and implementation effectiveness of system upgrades and management innovation. The findings indicate that the deep integration of hardware upgrades and soft innovation in management systems serves as a critical driver for hydropower station modernization, significantly optimizing operational efficiency and resource allocation while providing robust support for sustainable development.

## Keywords

hydropower station; electrical system upgrade; technical management system; innovation and development; coordinated development

# 水电站电气系统升级与技术管理体系创新发展探析

张光寿

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南蒙自 661100

## 摘要

本文结合当前水电站电气系统面临设备老化与智能化不足的挑战以及传统技术管理体系难以适应高效运维需求的情况, 本文旨在通过探析电气系统升级与技术管理体系创新的协同发展路径, 来提升水电站运行可靠性与经济性, 围绕发电机与变压器技术改造、控制系统智能化等关键技术展开研究分析, 并探讨精益管理理念、信息化工具及组织变革等管理创新方法, 进而结合案例评估系统升级与管理创新的互动关系与实施效果。结果表明, 电气系统硬件升级与管理软性创新的深度融合作为水电站现代化发展的关键, 能够显著优化运维效率与资源配置, 为水电站可持续发展提供有效支撑。

## 关键词

水电站; 电气系统升级; 技术管理体系; 创新发展; 协同发展

## 1 引言

随着我国水电能源规模持续扩大且运行年限增长, 许多水电站电气一次设备与二次系统逐渐暴露出绝缘老化、技术标准滞后及自动化水平不高的问题。在电力系统加快清洁低碳转型且对灵活调节能力要求日益提高的背景下, 传统电气系统在运行效率、供电可靠性及快速响应能力方面面临严峻挑战。与此同时, 原有以定期检修和事后处置为主的技术管理模式, 因难以适应高比例新能源接入下电网对水电站精细化调控的需求, 管理流程存在信息孤岛、数据分析能力薄

弱、决策支撑不足等瓶颈。设备升级与管理系统升级不同步, 制约了水电站综合效益充分发挥。推动电气系统智能化改造并与现代技术管理体系协同创新, 成为提升水电站安全性、经济性与市场竞争力的必然路径以及行业实现高质量发展的核心议题。

## 2 水电站电气系统升级的关键技术分析

### 2.1 发电机与变压器升级技术

水电站电气系统升级的基石在于对核心能量转换与传输设备, 发电机和变压器进行深度技术革新。老旧发电机面临的共性问题为定子绕组绝缘严重老化, 其介电强度下降导致局部放电增加, 威胁主绝缘安全。现代升级方案采用全球领先的少胶 VPI 绝缘体系, 该体系使用耐电晕等级达到

【作者简介】张光寿(1983-), 男, 彝族, 中国云南石屏人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化技术研究。

NOMEX3 倍以上的聚酰亚胺薄膜烧结云母带，配合低粘度环氧树脂在真空压力下实现无隙浸渍，使得整个绝缘结构具有极高的电气强度、热态机械刚度与优异的防潮性能，能够承受频繁启停带来的热循环应力，将绕组寿命从传统的 20 年延长至 40 年以上<sup>[1]</sup>。转子励磁系统升级是提升动态响应性能的关键，传统直流励磁机被大功率晶闸管自并励静态励磁系统取代，其响应速度达到毫秒级，强励倍数提升至 3.5 倍以上，极大增强了电力系统的暂态稳定性。

### 2.2 控制系统智能化升级

控制系统智能化升级的本质是构建一个具备感知、分析、决策与执行能力的电站智能中枢，其核心在于实现从基于规则的自动化到基于数据的智能化的范式转移。该升级构建了分层分布式体系架构，在过程控制层，高可靠性可编程逻辑控制器与智能现地仪表单元构成坚实的控制基础，它们以微秒级精度执行机组启停、负荷调节等基本操作。数据感知层面发生质的飞跃，部署于水轮机导轴承、推力轴承上的高频振动传感器，其采样频率高达数十千赫兹，能够捕捉到叶道涡引发的高频微弱振动特征。安装在发电机电隙与变压器本体上的特高频局部放电传感器，可有效识别早期绝缘劣化产生的电磁波信号。

## 3 技术管理体系创新发展的实施路径

### 3.1 管理理念创新

技术管理体系创新的首要任务是实现管理理念的根本性转变，其核心是从传统的以事后维修和计划检修为特征的被动式管理，转向以预测性维护和全生命周期价值管理为核心的主动式、精益化管理模式。全生命周期管理理念要求将管理视野扩展到设备从规划设计、采购安装、运行维护到技术改造直至报废更新的整个跨度，建立覆盖资产全生命周期的成本效益评估模型，决策依据不再局限于初始采购成本，而是综合考量设备在特定运行环境下的能耗水平、维护成本、故障风险以及退役处置费用，从而在选择技术升级方案时做出更具长远经济性的判断。

### 3.2 信息化管理工具应用

管理理念的创新必须依托于先进的信息化管理工具才能落地生根，这些工具共同构成了水电站技术管理体系的数

字神经中枢。企业资源计划系统作为管理核心，整合了财务、物资、项目和人力资源模块，实现了从缺陷工单生成、备件库存查询、采购申请审批到维修成本归集的端到端流程化管理，当状态监测系统触发一个轴承振动超限警报时，ERP 系统能自动生成维修工单并触发备件领用流程，若库存不足则自动发起采购申请，同时将预估的维修成本与停机损失同步至财务模块进行成本效益分析<sup>[2]</sup>。资产绩效管理系统则更专注于设备可靠性管理，它通过整合实时监控数据、历史维护记录与设备台账信息，构建关键设备的可靠性模型，利用故障模式与影响分析识别薄弱环节，并自动推荐最优维护策略，例如针对主变压器，APMS 系统可基于其负荷历史、油色谱数据趋势和家族缺陷信息，计算出其在不同运行工况下的故障概率曲线，为制定精准的巡检、试验和维修计划提供量化依据。

### 3.3 人员培训与组织变革

先进技术与管理效能的充分发挥，最终依赖于高素质的人才队伍和与之相匹配的组织结构。人员技能转型是基础，传统的单一技能运维人员（如发电机检修工、二次保护工）需要向掌握机械、电气、控制和信息技术等多学科知识的复合型人才转变，培训体系需从传统的师徒模式升级为基于能力模型的系统化培训方案，利用增强现实技术创建虚拟的发电机电解体回装实训场景，使学员能够在无风险环境下反复练习关键工艺。建立故障案例库与应急处置仿真平台，模拟主变轻瓦斯动作、机组过速等典型故障，锻炼运维人员的快速诊断与协同处置能力。在组织架构层面，必须打破以往按专业划分的部门壁垒（如机械分场、电气分场），转向以价值流为核心的多功能融合团队模式，例如组建涵盖机、电、控各专业人员的“主机设备全生命周期管理团队”，该团队对被托管设备从日常巡检、定期维护、状态分析到大修技改的全过程绩效负责，拥有相应的决策权，这种模式有效消除了专业间的推诿扯皮，促进了知识和经验的共享<sup>[3]</sup>。人员能力的提升与组织结构的优化，确保了先进技术和管理工作不仅被安装，更能被深入理解和有效运用，从而真正转化为水电站的安全、效能和经济效益，主要信息化管理工具功能对比结果见表 1。

表 1 主要信息化管理工具功能对比

工具名称	核心功能	实施成本	适用场景	关键效益
企业资源计划系统	集成化业务管理（财务、物资、项目、人力）	高（数百至数千万元）	大型水电站，需要实现跨部门流程标准化与资源整合	提升流程效率，实现成本精细化管理
资产绩效管理系统	设备可靠性管理、维修策略优化、风险分析	中高（百万元级）	设备复杂、对可靠性要求极高的水电站	降低故障率，延长设备寿命，优化维护资源投入
数字孪生平台	三维可视化、实时仿真、预测性分析、方案预演	很高（千万元级以上）	作为智能化标杆的核心枢纽，用于深度优化运行与战略规划	实现前瞻性决策，优化运行方式，大幅降低试验风险

## 4 电气系统升级与管理体系统创新的协同探析

### 4.1 升级对管理体系的驱动影响

电气系统深度升级对技术管理体系产生的驱动影响是根本性和系统性的,这种驱动力源于技术能力跃升后与传统管理能力之间形成的巨大张力。当发电机定子绕组嵌入分布式光纤测温系统,能够以每秒数次的频率采集每根线棒轴向6个点的温度数据,当变压器油中溶解气体在线监测装置将乙炔、氢气的检测精度提升至 $0.1\mu\text{L/L}$ 且采样周期缩短至每小时一次时,设备状态数据的维度、精度和实时性发生了质变。这种数据环境的剧变首先驱动维修决策模式的革新,传统基于固定周期或简单阈值的报警机制显得过于粗放,管理体系必须发展出能够处理高维时间序列数据的预测性维护能力。例如,对于发电机定子线棒温差异常的分析,需要建立结合负荷历史、冷却水温和绝缘老化模型的多变量预测算法,这要求管理流程中嵌入数据清洗、特征工程和模型评估等全新环节。其次,智能设备产生的海量数据驱动组织架构向数据驱动型转变,传统按专业划分的部门壁垒被打破,取而代之的是围绕数据价值挖掘的跨职能团队<sup>[4]</sup>。这样的团队需要同时包含熟悉设备机理的域专家、掌握数据分析技能的数据工程师和负责决策执行的运维工程师,他们共同对关键设备的性能指标和健康状态负责。这种驱动还体现在管理重心的前移,数字孪生技术的应用使得管理活动从被动响应转向主动优化,运维人员可以在虚拟空间中对不同的调度指令进行推演,评估其对设备寿命的影响,从而实现运行方式的经济性与设备耐久性的最佳平衡。

### 4.2 创新发展的实践案例与效果评估

某大型混流式水电站的智能化改造项目为电气系统升级与管理创新协同提供了完整范本,该电站装有4台单机容量80MW的机组,在改造中实施了全方位的技术升级,发电机定子绕组采用全球领先的少胶VPI绝缘系统,转子磁极应用直接水冷技术。主变压器铁芯升级为非晶合金材料,并集成多通道油中溶解气体在线监测。全站部署超过500个智能传感器,构成覆盖振动、温度、局放、气隙等多物理量的监测网络。与之协同的管理体系创新更为深入,电站构建了基于工业互联网平台的统一数据中台,开发了机组全生命周期数字孪生系统,并重组了运维组织架构,成立了跨专业的设备管理中心。协同效应在机组状态检修中得到充分体现,数字孪生系统通过融合实时监测数据与历史运维记录,建立了推力瓦磨损预测模型,准确预警了2号机组推力轴承的异常磨损趋势。管理团队基于这一预警,提前82天制定

了精准检修方案,避免了可能导致机组停运15天以上的重大事故,直接减少发电损失约1000万元。在运行优化方面,基于数字孪生的协联关系优化模型,使机组在40%-100%负荷区间内的平均效率提升2.1%,年增发电量达450万千瓦时。管理流程的数字化重构成效显著,ERP系统与状态监测系统的集成,使备件库存周转率提高35%,维修工单处理效率提升40%<sup>[5]</sup>。移动巡检系统的应用使巡检数据录入时间减少70%,数据准确性达到100%。改造后全站关键指标发生显著变化,非计划停机时间从年均150小时降至18小时,设备综合效率从94.2%提升至98.5%,年均运维成本降低22%。这一案例充分证明,只有当技术升级产生的数据价值被管理体系有效吸收和转化,才能实现设备可靠性、运行经济性和管理效率的协同提升,这是水电站智能化建设的核心要义。

## 5 结语

本文通过系统探析水电站电气系统升级与技术管理体系创新的融合发展,明确指出唯有将先进的设备技术、数据驱动的管理理念以及与之适配的组织流程深度融合,才能实现安全性、经济性与可靠性的协同跃升,因为单纯的技术改造或管理优化均难以充分发挥现代化水电站的潜能。研究的核心价值在于揭示技术升级为管理体系创新提供数据基础和能力支撑、管理创新为技术效能释放构建制度保障和价值转化通道这种双向促进的协同关系,此为推动水电站从传统运维模式向智能化、精益化、高可靠性方向战略转型的根本路径。其具体实践意义在于为水电站的现代化改造提供系统性的实施框架与方法论指导,强调规划阶段即统筹技术方案与管理变革,通过构建“技术-管理”一体化解决方案,切实提升设备寿命周期价值、能源利用效率与电网支撑能力,为水电行业的可持续发展注入强劲动力。

### 参考文献

- [1] 林梦珂,申建建,艾显仁,等.水风光互补系统梯级水电站汛前蓄能控制风险分析方法[J/OL].水利学报,1-13[2025-11-26].
- [2] 陆波,徐定辉,薛联芳,等.雅鲁藏布江中游藏木水电站建库前后陆生植被变化研究[J/OL].水力发电,1-7[2025-11-26].
- [3] 舒启淦.国有企业深化改革背景下水电站内控评价指标体系优化研究[J].知识经济,2025,(33):132-134+138.
- [4] 李丽.大岗山水电站:破解“绿色密码”造就“无废工厂”[J].企业文明,2025,(11):27-28.
- [5] 闫文峰,郑明浩,党涛,等.水电站门式启闭机电气控制系统升级改造技术的应用[J].云南水力发电,2024,40(05):142-145.