

水利工程中电气自动化技术的运用研究

李广鹏¹ 卫乐乐²

黄河明珠水利水电建设有限公司 河南三门峡 472000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18461

[摘要] 水利工程作为国家基础设施建设的重要支撑,其运行效率直接影响区域防洪排涝能力与水资源调配水平。电气自动化技术的深度融合正在重塑传统水利工程的运维模式,如智能化控制系统能够实时采集水位、流量、压力等多维度运行数据,自动调节泵组启停与闸门开度,显著降低人工操作的随意性,PLC控制柜、变频调速装置、远程监控平台构成了完整的技术架构,使得泵站在负荷波动时能够精准匹配出力曲线。同时,系统具备故障自诊断功能,异常状态触发声光预警机制,管理人员响应时间缩短。实践表明,自动化技术不仅提升了设备可靠性,更在节能减排方面产生了显著的经济效益与社会价值。

[关键词] 水利工程; 电气自动化; 技术应用

引言:

传统水利工程长期依赖人工巡检、手动操作的运维方式,已难以适应现代化管理需求,设备运行状态的实时监测需要消耗大量人力资源,且参数调节的滞后性容易导致能源浪费,电气自动化技术的引入为破解上述难题提供了系统性解决方案。从风阳泵站的智能调度到三峡水电站的精准控制,从江都枢纽的改造升级到众多中小型泵站的技术革新,实践证明电气自动化技术已成为提升水利工程运行效率、保障供水安全、降低运维成本的核心驱动力。

一、水利工程中电气自动化技术的核心体系

1. 数据采集与传感器网络

水利工程电气自动化系统的基础在于构建完善的数据采集体系,温度传感器布设于电机绕组、轴承等关键部位,实时监测设备热态特征,振动传感器安装在泵轴、联轴器处,捕捉异常振动信号以预判机械故障。同时,压力变送器置于管道关键节点,跟踪水流压力变化趋势,流量计则直接测量输水流量数据,这些传感器采用4-20mA标准信号输出,确保信号在长距离传输中保持稳定。另外,现场仪表的防护等级需达到IP65以上,以适应潮湿环境,数据采集频率根据参数特性差异化设定,水位变化相对缓慢可采用10秒间隔,电气参数波动较快则需1秒采样。此外,冗余配置的传感器互为备份,单个传感器失效不会造成监测盲区,所有采集数据经现场控制器初步处理后,上传至中央监控系统,形成完整的实时数据流。

2. 可编程逻辑控制器应用架构

PLC作为水利工程自动化的核心控制单元,承担着逻辑运算、顺序控制、定时计数等关键任务,其程序编写需遵循IEC 61131-3标准,采用梯形图、功能块图等符合工程习惯

的编程语言。泵组启停控制是PLC的典型应用场景,系统根据水位信号判断是否满足启泵条件,检查电机温度、轴承振动等保护参数是否在安全范围内,确认无误后输出启动指令至变频器或软启动器。运行过程中持续监测电流、电压、功率等电气参数,任一参数越限立即执行停机保护。同时,多台泵组的顺序启动与轮换运行策略也由PLC统筹调度,避免设备偏磨与疲劳损伤,闸门控制中PLC接收开度指令,驱动伺服电机精确定位,同时监测行程限位开关防止过行程^[1]。

3. 变频调速与节能优化技术

变频器的引入使水泵机组摆脱了工频运行的固定转速限制,能够根据实际工况需求动态调节电机转速。当下游用水量减少时,降低转速以匹配流量需求,避免了传统阀门节流方式造成的能量损耗。变频调速遵循流体力学相似定律,转速降低至额定值的80%时,轴功率理论上可降至51.2%,节能效果显著。而实际应用中,需设置合理的运行频率区间,过低频率会导致电机散热不良与效率下降,通常下限设定为30Hz。另外,变频器选型需考虑过载能力,水泵启动瞬间需承受1.5-2倍额定电流,防护等级应不低于IP54以适应泵房环境。此外,谐波抑制措施不可忽视,变频器产生的高次谐波会干扰其他电气设备,需配置交流电抗器或有源滤波器,软启动功能降低了启动冲击电流对电网的影响,延长了电机机械部件使用寿命。

4. SCADA 远程监控平台搭建

SCADA系统将分散在各泵站、闸门的现场控制器整合为统一监控体系。上位机软件提供图形化人机界面,工艺流程图实时显示设备运行状态,参数变化曲线直观反映历史趋势,报警信息以醒目颜色提示并记录至数据库,操作员在中控室即可远程下发控制指令,无需奔赴现场手动操作。通信网络

是 SCADA 平台的神经系统, 现场层与控制层之间多采用工业以太网或现场总线, 冗余链路设计保障通信可靠性。控制层与管理层之间, 可利用光纤专网或 4G/5G 无线网络。此外, 数据加密与访问权限管理确保信息安全, 历史数据库存储数年的运行记录, 为故障分析提供依据, 趋势预测算法基于历史数据建立设备健康度模型, 提前识别潜在故障风险, 报表生成功能自动统计能耗、流量等关键指标, 辅助管理决策^[2]。

5. 智能诊断与预警机制

电气自动化系统的智能化水平体现在故障预判能力上, 传统模式下设备损坏才会被发现, 而智能诊断技术则能够在故障萌芽阶段发出预警。如电机轴承振动信号的频谱分析可识别滚动体磨损、保持架缺陷等早期故障特征; 绕组温度异常上升, 提示散热系统堵塞或绝缘老化; 电流不平衡度超标, 反映电机内部相间短路风险; 系统内置专家诊断库, 将监测数据与故障特征库比对, 匹配度达到阈值时触发预警; 声光报警装置在现场给出提示, 短信、邮件同步推送至维护人员移动终端。而且, 预警信息包含故障类型、严重程度、建议处置措施, 历史故障案例库辅助快速定位问题根源, 维修记录与备品备件信息集成在平台内, 形成闭环管理, 这种主动式维护策略相比被动式抢修, 设备故障停机时间可减少 60% 以上, 延长了设备使用寿命, 降低了全生命周期成本。

二、水利工程对电气自动化技术的特殊要求

1. 防潮防腐的环境适应性

水利工程电气设备长期处于高湿度环境, 泵房内空气相对湿度常年维持在 80% 以上, 水雾弥漫的工况对电气元件构成严峻考验。控制柜需采用不锈钢材质并加装除湿装置, 柜内安装空间加热器保持温度高于环境露点, 防止凝露导致绝缘击穿。还有电缆接线端子需涂覆防锈脂并定期检查紧固情况, 尤其松动接触点在潮湿环境下易产生电化学腐蚀, 最终导致接触电阻增大甚至烧损。另外, 传感器外壳材质选用耐腐蚀的工程塑料或不锈钢, 接插件采用防水型号, 密封等级达到 IP67 标准, 长期浸泡在水中仍能正常工作。再者变频器散热风扇需加装过滤网, 避免水汽携带的杂质进入内部, 定期更换滤网保持散热效果。此外, 接地系统在潮湿环境下更为重要, 接地电阻应小于 $4\ \Omega$, 确保故障电流快速泄放, 保护人员安全。

2. 防洪防雷的可靠性设计

水利工程站点多位于江河湖泊沿岸, 地势低洼且空旷, 雷电灾害风险显著高于常规工业场所, 防雷系统需采用多级保护策略。建筑物顶部设置避雷针、避雷带构成直击雷防护,

电源进线端安装 B 级电涌保护器, 控制柜内配置 C 级浪涌保护器, 传感器信号线路加装 D 级防雷器, 形成逐级泄放雷电流的保护链。另外, 通信线路的防雷同样关键, 光纤虽不导电但其金属加强芯需接地, 网线接口处需串接以太网防雷器, 无线天线馈线需加装天馈防雷器。汛期是水利工程的关键时段, 电气设备的防淹设计至关重要, 控制柜安装高度需高于历史最高水位 1 米以上, 低洼区域的现场仪表应选用潜水型产品, 应急电源采用高位布置。即使一层被淹没仍可保障核心设备供电, 双路电源自动切换系统在市电中断时瞬间转至备用电源, 保障防汛期间监控系统不间断运行^[3]。

3. 长周期稳定运行的维护便利性

水利工程泵站多位于偏远地区, 专业维护人员配备不足, 自动化系统必须具备高度稳定性与便利的维护性。如元器件选型优先考虑工业级产品, 工作温度范围 -20°C 至 70°C , 平均无故障时间大于 10 万小时, 避免频繁更换。模块化设计使故障部件能够快速更换, PLC 采用插拔式 I/O 模块, 单个通道损坏仅需更换对应模块, 无需停运整个系统。另外, 人机界面提供在线参数修改功能, 运行人员可根据季节变化调整控制策略, 无需编程软件介入。另外, 远程诊断功能允许厂家技术人员通过 VPN 接入系统排查故障, 减少现场服务次数, 备品备件的标准化配置降低了采购难度, 常用型号的接触器、继电器、传感器在本地市场即可购得, 缩短停机等待时间。此外, 操作培训需面向一线员工, 界面设计直观易懂, 关键操作设置二次确认机制, 防止误操作, 设备维护提醒功能根据运行时长自动推送保养计划, 确保维护工作有序开展。

三、水利工程中电气自动化技术的运用

1. 泵站自动化控制系统的集成应用

泵站电气自动化系统的核心在于实现泵组启停的智能决策。水位传感器采集的数据, 直接传输至 PLC 控制单元, 控制程序依据预设水位阈值自动判断启泵时机。当水位上升至启泵线时, 系统会首先执行安全检查流程, 电机温度、轴承振动、绝缘电阻等参数必须全部处于正常区间, 任一项超标则阻止启动指令输出。检查通过后, 变频器接收频率给定信号, 电机从零频缓慢升速至目标转速。软启动过程持续 15-30 秒, 避免了传统星三角启动方式产生的 6-7 倍冲击电流。例如, 凤阳泵站的实践数据显示, 自动化系统投运后泵组启停准确率达到 100%, 操作人员无需现场值守, 出水流量波动幅度控制在 $\pm 2\%$ 以内。相比人工操作时, $\pm 8\%$ 的波动范围精度提升显著。且多泵并联运行时系统根据流量需求计算最优组合方案, 三台泵同时运行的总效率往往低于两台泵在高效区

运行。程序内置的性能曲线库, 支撑了精准的调度决策, 轮换启停策略使各台泵组累计运行时长趋于均衡, 避免了单台设备过度磨损, 电流、功率的实时监测数据为能耗分析提供基础, 管理平台自动生成日、月、年度能耗报表, 泵站运行成本实现量化管理。

2. 水电站发电调度的精确控制机制

水电站的发电过程需要协调水库调度、机组配置、电网负荷等多个维度因素。自动化系统构建了从水情预测到出力分配的完整控制链条, 上游来水流量、库区水位、下游河道水情等数据汇聚至调度中心, 水力计算模块根据实时水位推算可用水头, 结合机组效率曲线确定最优出力分配方案。如长江三峡水电站的自动化调度系统能够在 0.5 秒内完成 32 台机组的负荷重新分配, 在电网频率波动时动态调整机组出力维持系统稳定。同时, 机组转速波动控制在 $\pm 0.05\%$ 以内, 电压偏差不超过 $\pm 0.5\%$, 调速器接收功率指令后驱动导叶伺服机构动作, 开度调节精度达到 0.1 毫米级, 水流量与发电功率呈现精确的线性响应关系, 励磁系统的自动控制保障了机端电压恒定, 无功补偿装置根据功率因数需求自动投切。2024 年三峡电站通过优化调度方案, 实现多发水能资源发电 12 亿千瓦时, 相当于减少标准煤消耗 36 万吨, 自动化技术带来的经济效益与环境效益同步显现^[4]。

3. 闸门启闭的精确定位技术

闸门电气自动化控制要求启闭过程平稳且定位准确, 位置传感器实时反馈闸门开度数据, 伺服驱动系统接收目标开度指令后, 计算运动轨迹, 加速段、匀速段、减速段的速度曲线经过精心设计, 避免了突然启停造成的水锤效应。同时, 行程限位开关在闸门到达上下极限位置时切断动力电源, 机械限位装置作为最后一道保险防止过行程损坏设备, 负荷传感器监测启闭机的电流变化, 卡阻或超载情况触发立即停机。另外, 开度控制精度在大型闸门上达到 ± 10 毫米, 中小型闸门可达 ± 5 毫米, 上游水位波动时, 自动调节闸门开度维持下游流量稳定, 在泄洪工况下分步开启多道闸门, 既满足泄流需求又避免下游河道承受过大冲击。此外, 远程控制功能使操作人员在中控室即可完成闸门启闭, 视频监控画面实时显示闸门状态, 汛期应急调度时响应速度从人工操作的 30 分钟缩短至 5 分钟以内。

4. 流域水资源的协同优化调度

单个泵站或水电站的局部优化, 已无法满足流域水资源高效利用的要求。区域水网协同调度平台将流域内的多个水

利枢纽纳入统一管理体系, 将各站点运行数据上传至云端调度中心, 以大数据分析技术挖掘历史运行规律。同时, 机器学习算法可建立来水预测模型, 提前 72 小时预判流域水情变化趋势, 调度方案生成模块综合考虑防洪安全、供水需求、发电效益、生态流量等多目标约束条件, 求解出流域尺度的最优调度策略。如上游水库增加蓄水时, 下游泵站相应减少提水量, 避免了水资源的重复调配; 枯水期优先保障居民生活用水, 农业灌溉根据作物需水规律错峰调度; 丰水期则充分发挥水电清洁能源优势。调度指令自动下发至各站点的本地控制系统, 执行结果实时反馈形成闭环控制。长江流域的实践表明, 协同调度使水资源利用率提升 8%~12%, 弃水损失显著减少。未来数字孪生技术的引入, 将在虚拟环境中模拟调度方案的执行效果, 为实际操作提供决策支持。

结束语

综上所述, 电气自动化技术在水利工程领域的深度应用重塑了行业的技术范式。实践证明, 自动化技术显著提升了设备运行效率, 降低能源消耗, 增强故障预警能力。人工智能、数字孪生、边缘计算等前沿技术正在与传统自动化系统融合, 预示着智能水利时代的到来。未来系统将具备更强的自主学习能力, 根据历史数据优化控制策略, 预测性维护将替代计划性检修, 设备全生命周期管理更加精细, 区域水网的协同调度将打破单站优化的局限, 实现流域尺度的资源配置最优, 持续的技术创新与工程实践将推动水利事业迈向高质量发展阶段。

[参考文献]

- [1] 李玮华. 探讨水利枢纽工程中电气自动化技术的应用 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18 (01): 103-105.
- [2] 孟祥文. 探究电气自动化技术在水利工程中的运用 [J]. 水上安全, 2023, (02): 175-177.
- [3] 李盛达. 水闸工程项目的电气设备及电气自动化应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50 (11): 132-134.
- [4] 陈进锭. 水利工程电气自动化系统防雷技术研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35 (06): 73-75.

作者简介: 1. 李广鹏, (1983 年 10 月-), 男, 汉族, 河北沧州, 黄河明珠水利水电建设有限公司, 工程师, 大学本科, 电气工程及其自动化;

2. 卫乐乐, (1987 年 10 月-), 男, 汉族, 陕西渭南, 黄河明珠水利水电建设有限公司, 工程师, 本科, 水利工程。