

水利发电自动化技术分析

吴玉青

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

摘要: 能源结构转型与智能化发展浪潮中, 自动化技术是提升水利发电效率、保障运行安全的核心支撑。本文系统剖析其核心内涵与应用价值, 梳理关键技术体系, 涵盖数据采集与监控、智能控制、优化调度等模块。探讨自动化系统集成设计与典型应用场景, 以及与可再生能源协同模式。结合趋势展望前沿技术融合应用前景。研究表明, 自动化技术深度应用可精准管控水利发电全流程、高效运行, 降低运维成本与安全风险, 为行业自动化升级提供参考, 助力清洁能源体系构建。

关键词: 水利发电; 自动化技术; 智能控制; 系统集成

引言: “双碳”目标推进下, 水利发电作为清洁能源核心, 规模化、高效化发展需求迫切。传统模式依赖人工操作与经验判断, 有响应滞后、调控精度低、运维成本高等问题, 难满足现代能源体系要求。自动化技术引入升级为破解难题提供有效路径, 可实现发电全流程实时监测、智能调控与精准运维。当前国内外该技术有发展, 但在系统集成度、多技术融合深度上有提升空间。本文全面剖析其要点、架构与实践, 展望趋势, 为水电企业转型提供指导。

1 水利发电自动化技术概述

1.1 水利发电基本原理与系统组成

水利发电作为清洁能源发电的重要方式, 其核心原理在于巧妙地借助水的势能与动能实现向电能的转化。具体而言, 先通过修建水库来蓄水, 进而形成一定的水位差。当开启闸门, 水流便以强大的力量冲击水轮机的转轮, 驱动其迅速旋转。由于水轮机与发电机同轴连接, 水轮机的旋转带动发电机一同转动, 此时发电机内的线圈切割磁感线, 从而产生感应电动势, 最终输出电能, 再经输电系统输送至电网, 为千家万户提供电力支持。一个完整的水利发电系统犹如一个精密协作的有机整体, 由枢纽工程、发电系统、输电系统及运维系统共同构成。枢纽工程包含大坝、溢洪道、进水口等关键设施, 承担着水资源存储与精准调控的重任; 发电系统涵盖水轮机、发电机、调速系统、励磁系统等核心设备, 是能量转化的关键环节, 其性能优劣直接影响发电效率; 输电系统由变压器、输电线路等组成, 负责将发电机产生的电能进行升压处理后远距离传输; 运维系统则如同系统的“守护者”, 时刻对设备运行状态进行监测, 及时安排检修, 并科学调度管理, 确保各系统紧密关联、协同工作, 任何一个环节出现状况, 都会对整体发电效率与安全产生直接

影响, 这也为自动化技术的广泛应用提供了丰富场景。

1.2 自动化技术的定义与范畴

自动化技术是指通过各类技术手段, 实现设备或系统在无人或少人干预的情况下, 按预设目标自动完成运行、调控、监测等任务的技术体系。其在水利发电领域的范畴极为广泛, 核心涵盖三大类技术: 一是监测类技术, 包括各类传感器、数据采集设备等, 实现对水流参数、设备运行状态、环境参数的实时采集; 二是调控类技术, 通过智能控制算法、执行机构等, 实现对水轮机开度、发电机励磁、机组负荷等的自动调节; 三是管理类技术, 涵盖优化调度、故障诊断、运维管理等, 依托大数据、人工智能等技术提升管理效率。通信技术、网络安全技术等作为支撑, 保障自动化系统的稳定运行与数据安全, 形成完整的技术闭环^[1]。

1.3 自动化技术在水利发电中的核心作用

自动化技术在水利发电中发挥着不可替代的核心作用, 主要体现在三个方面: 一是提升发电效率, 通过实时监测水头、流量等参数, 智能调控机组运行状态, 使机组始终运行在最优效率区间, 同时优化水库调度, 最大化利用水资源, 提升电能产出; 二是保障运行安全, 实现对设备运行状态的24小时不间断监测, 及时捕捉振动异常、温度超标等故障早期信号, 触发自动预警与应急处理, 避免故障扩大, 降低安全风险; 三是降低运维成本, 减少人工干预环节, 提升运维工作的精准性, 避免过度检修或检修不足, 延长设备使用寿命, 同时通过远程监控与智能运维, 降低现场运维人员投入, 显著提升运维经济性。此外, 自动化技术还能提升电能质量, 确保电压、频率等参数稳定达标, 保障电网安全。

2 水利发电自动化关键技术分析

2.1 数据采集与监控系统 (SCADA)

数据采集与监控系统（SCADA）是水利发电自动化的基础核心技术，负责实现全系统运行数据的采集、传输、处理与监控。该系统由远程终端单元（RTU）、传感器、通信设备及监控中心组成：传感器部署在大坝、水轮机、发电机等关键部位，采集水头、流量、转速、振动、电压、电流等多维度参数；RTU负责将传感器采集的模拟信号转换为数字信号，进行初步处理与缓存；通信设备通过光纤、工业以太网等方式，将数据稳定传输至监控中心；监控中心通过可视化界面，实时展示系统运行状态，同时具备数据存储、历史查询、故障报警等功能。SCADA系统的核心优势在于实时性与可靠性，数据采集周期可达到毫秒级，能精准捕捉参数细微变化，为后续智能调控与故障诊断提供高质量数据支撑，是自动化系统运行的“感知中枢”。

2.2 智能控制技术

智能控制技术是提升水利发电调控精度的核心，涵盖模糊控制、神经网络、模型预测控制等多种算法，适配水利发电系统的非线性、时变特性。在水轮机调速系统中，模糊控制算法可根据水头、负荷的实时变化，自适应调整导叶开度，避免传统PID控制的超调与滞后问题，提升转速稳定性；在发电机励磁控制中，神经网络算法可精准控制励磁电流，应对负荷波动引发的电压变化，保障电能质量；模型预测控制则用于水库调度，结合水文预测数据，精准预测未来水资源变化，制定最优调度方案^[2]。智能控制技术的核心优势在于无需依赖精确的数学模型，能自适应复杂工况变化，实现精准调控，同时具备自学习能力，可结合运行数据不断优化控制策略。

2.3 优化调度与能量管理

优化调度与能量管理技术聚焦于提升水资源与电能的利用效率，核心包括水库优化调度与机组能量管理两大模块。水库优化调度技术结合气象预报、水文监测数据，通过优化算法制定中长期与短期调度方案，在满足防洪、生态流量等约束条件的前提下，最大化蓄水与发电效益；机组能量管理技术则实时监测各机组运行状态与电网负荷需求，通过负荷均衡分配、机组启停优化等策略，提升多机组协同运行效率，降低厂用电率。该技术依托大数据分析 with 优化算法，实现“水资源-机组-电网”的协同优化，不仅能提升单座水电站的发电效益，还能为梯级水电站的联合调度提供技术支撑，实现区域水资源的高效利用。

2.4 预测与维护技术

预测与维护技术是实现水利发电设备“预知性维护”的核心，通过融合状态监测数据与人工智能技术，实现

故障预测与运维优化。该技术的核心流程为：通过传感器实时采集设备振动、温度、油液等状态参数，借助大数据分析技术挖掘参数与故障的关联规律；基于机器学习算法构建故障预测模型，精准预判设备剩余使用寿命与潜在故障风险；结合故障风险等级，制定个性化维护计划，实现“按需检修”。例如，通过分析水轮机轴承振动数据，可提前预测轴承磨损故障；通过监测发电机绝缘参数，预判绝缘老化风险。该技术能有效避免传统定期检修的盲目性，减少非计划停机时间，降低维护成本，延长设备使用寿命。

2.5 通信与网络安全技术

通信与网络安全技术是保障自动化系统稳定运行的关键支撑。通信技术方面，采用“光纤通信为主、无线通信为辅”的混合通信架构，光纤通信保障大数据量、高实时性数据的稳定传输，无线通信（如5G）则用于偏远监测点位的数据传输与应急通信，确保通信链路的冗余与可靠。网络安全技术针对自动化系统的网络架构，构建多层次安全防护体系：采用防火墙、入侵检测系统（IDS）抵御外部网络攻击；通过数据加密技术保护传输数据的安全性；实施网络分区隔离，将监控系统与办公网络、外部网络隔离，避免交叉感染；建立安全审计与应急响应机制，实时监测网络异常行为，及时处置安全事件。随着自动化系统的网络化程度不断提升，通信与网络安全技术的重要性愈发凸显，直接关系到系统运行安全。

3 水利发电自动化系统集成与应用

3.1 系统架构设计

水利发电自动化系统采用分层分布式架构设计，分为感知层、传输层、处理层与应用层，确保系统的稳定性、可扩展性与可维护性。感知层由各类传感器、RTU等设备组成，负责数据采集与信号转换，是系统的“感知末梢”；传输层采用光纤、5G等通信技术，实现各层级数据的稳定传输，保障数据实时性与可靠性；处理层部署边缘计算节点与云端服务器，边缘节点负责实时数据预处理与本地决策，降低云端压力，云端服务器负责大数据存储、复杂算法运算与全局优化；应用层涵盖监控调度、智能控制、故障诊断、运维管理等多个功能模块，通过可视化界面为用户提供多样化服务^[3]。该架构采用模块化设计，各层级相对独立又相互协同，可根据水电站规模与需求灵活扩展功能模块，适配不同类型水电站的自动化需求。

3.2 典型应用场景分析

水利发电自动化技术在不同场景下均有广泛应用，典型场景包括大型常规水电站、梯级水电站与抽水蓄能

电站。在大型常规水电站中,自动化系统实现大坝监测、机组调控、电能传输的全流程自动化,通过SCADA系统与智能控制技术,保障机组在高负荷下的稳定高效运行;在梯级水电站中,通过系统集成实现多座水电站的联合调度,共享水文、负荷数据,优化整体发电与防洪效益,提升区域水资源利用效率;在抽水蓄能电站中,自动化技术实现发电与抽水工况的智能切换,精准调控机组运行状态,适配电网调峰填谷需求,同时通过预测维护技术,保障机组在频繁工况切换下的运行可靠性。此外,自动化技术还在小型水电站改造中发挥重要作用,通过低成本自动化方案提升老旧电站的运行效率与安全性。

3.3 自动化技术与可再生能源的协同

自动化技术是实现水利发电与其他可再生能源协同运行的核心纽带,助力构建稳定的清洁能源体系。在水电与风电、光伏的协同中,自动化系统通过实时监测风电、光伏的出力波动数据,结合水电的调节灵活性,智能调控水电机组出力,平抑风电、光伏的出力波动,保障电网电压与频率稳定;通过能量管理系统,优化水电、风电、光伏的出力分配,最大化利用清洁能源,提升整体供电可靠性。此外,自动化技术还能实现水利发电与储能系统的协同,在电能盈余时通过抽水蓄能或电化学储能存储电能,在电能短缺时释放电能,提升能源供需平衡能力。这种协同模式不仅能提升可再生能源的消纳率,还能充分发挥水电的调节优势,推动清洁能源体系的规模化发展。

4 未来发展趋势展望

4.1 数字孪生与虚拟电厂技术的融合

数字孪生与虚拟电厂技术的融合将成为水利发电自动化的核心发展方向。数字孪生技术通过构建水电站的高精度虚拟模型,实现物理设备与虚拟模型的实时数据同步,可模拟设备在不同工况下的运行状态,预判潜在故障风险,优化检修方案与运行策略,减少现场试验对设备的影响。虚拟电厂技术则将分散的水电站、风电、光伏等电源聚合为一个虚拟电源整体,通过自动化系统实现出力的统一调度与优化,提升清洁能源在电网中的话语权。两者融合后,可通过数字孪生模型模拟虚拟电厂

的整体运行状态,优化各电源的协同运行策略,实现“物理实体-虚拟模型-电网调度”的深度协同,大幅提升清洁能源的调度灵活性与运行可靠性,为能源互联网的构建提供核心支撑^[4]。

4.2 人工智能与区块链在能源交易中的应用

人工智能与区块链技术的融合应用,将重塑水利发电的能源交易模式。人工智能技术可基于历史交易数据、能源供需预测数据,精准预测电能价格走势与供需关系,为水电站的电能交易提供决策支撑;同时,通过智能合约自动执行交易条款,提升交易效率。区块链技术则为能源交易提供去中心化的信任机制,实现交易数据的不可篡改与全程追溯,保障交易的安全性与透明度。在分布式能源交易场景中,水电站可通过区块链平台与周边用户、小微企业直接开展电能交易,减少中间环节,提升交易收益;人工智能则负责优化交易匹配与定价策略,实现供需双方的利益最大化。这种技术融合不仅能提升能源交易的效率与安全性,还能推动能源市场的多元化发展,为水利发电行业开辟新的盈利空间。

结束语

水利发电自动化技术是推动水电行业智能化、高效化发展的核心动力,其深度应用实现了发电全流程的精准管控与优化升级。本文通过梳理自动化技术的核心范畴与作用,剖析关键技术体系,探讨系统集成与应用场景,展望未来发展趋势,形成了对水利发电自动化技术的全面认知。未来,需进一步加强关键技术研发与系统集成创新,完善技术标准与安全体系,推动自动化技术向更智能、更可靠、更协同的方向发展。

参考文献

- [1]赵玺,何广牧.水力发电站运行中的主要问题与策略探析[J].今日自动化,2021,(2):214-216.
- [2]李新军.水利发电工程建设与管理的有效措施探讨[J].科技风,2022(07):80-82.
- [3]覃正敏.微机继电保护在水力发电中的应用分析[J].技术与市场,2021,28(03):106-107.
- [4]刘挺.水利发电厂电气自动化技术及误操作原因的对策分析[J].建筑工程技术与设计,2021(33):1885-1886.