

Practice of Power Engineering for Automation of New Energy Coupled Water Power Generation Machine Equipment

Ling Tong

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

Abstract

To address the intermittency challenges of renewable energy and overcome the limitations of traditional hydropower peak regulation, this study focuses on the automation and power engineering of renewable energy coupled with hydropower generation systems. The research first systematically examines the characteristics of renewable energy sources (e.g., solar and wind power), the operational principles of hydropower systems, and the energy balance and topology of integrated systems to establish theoretical foundations. Subsequently, it emphasizes practical engineering approaches, beginning with on-site resource assessment and technical parameter configuration. This process involves selecting and matching renewable energy equipment, hydropower electromechanical devices, and automation control systems, while developing multi-energy collaborative control strategies and construction commissioning plans. Through practical engineering validation, the system achieves increased power generation and optimized grid stability. The study aims to provide actionable pathways for deep integration of renewable energy with hydropower generation and the implementation of electromechanical equipment automation, thereby facilitating the green transition and efficient operation of energy systems.

Keywords

renewable energy; hydropower generation; electromechanical equipment automation; coupled systems; practical solutions

新能源耦合水利发电机电设备自动化动力工程实践

童玲

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南蒙自 661100

摘要

为破解新能源间歇性难题、突破传统水利发电调峰局限, 本文围绕新能源耦合水利发电机电设备自动化动力工程展开研究。先是系统地梳理新能源(光伏、风电等)特性、水利发电系统原理及耦合系统能量平衡与拓扑结构, 奠定理论基础。继而聚焦工程实践, 从现场资源勘察、技术指标设定入手, 完成新能源设备、水利机电设备及自动化控制设备的选型匹配, 设计多能源协同控制策略与施工调试方案。在此基础上, 通过工程实践验证实现系统发电量提升及电网稳定性优化。研究拟为新能源与水利发电深度耦合及机电设备自动化落地提供可行路径, 助力能源系统绿色转型与高效运行。

关键词

新能源; 水利发电; 机电设备自动化; 耦合系统; 实践方案

1 引言

在双碳目标推动能源结构转型的背景下, 新能源间歇性发电波动特性与传统水利发电的调峰局限形成突出矛盾, 机电设备自动化是破解这一矛盾的核心路径。当前, 单纯新能源发电面临出力波动大、并网稳定性差的问题, 传统水利发电则存在机电设备响应滞后、多能源协同能力不足的短板, 二者耦合并融入自动化技术, 成为提升能源系统效率与稳定性的关键方向。因此, 下述将从理论层面梳理耦合系统的构成与能量平衡逻辑^[1], 再聚焦工程落地, 系统设计勘察、

设备选型、控制策略及施工调试方案, 以期新能源与水利发电深度融合及机电设备自动化应用提供实践范式。

2 新能源与水利发电机电设备耦合的理论基础与系统构成

2.1 新能源特性与水利发电系统核心原理

新能源特性聚焦光伏、风电两类主流形式, 其中光伏依赖光照强度与时长, 存在昼夜出力差、多云天气波动大的特点, 其能量转换需经逆变器完成直流到交流的转换。风电受风速影响显著, 风速低于约3米每秒的切入值或高于约25米每秒的切出值时无法发电, 出力随机性强, 二者均需与稳定电源耦合以保障供电连续性^[2]。

水利发电系统核心依赖水轮机与发电机协同, 水轮机通过水头势能驱动转轮旋转, 将水能转化为机械能, 同步发电机再将机械能转化为电能。其中调速器控制导叶开度调节

【作者简介】童玲(1991-), 女, 中国贵州都匀人, 本科, 助理工程师, 从事新能源耦合水利发电机电设备自动化动力工程实践研究。

流量，励磁系统稳定输出电压，具备出力可控、调峰响应快的优势，可较好地弥补新能源间歇性短板，为二者耦合提供功能互补的理论前提。

2.2 耦合系统的能量平衡与拓扑结构

耦合系统能量平衡以供需动态匹配为核心，需实时协调新能源出力、水利发电出力与负荷需求。对于新能源出力，主要体现为光伏与风电随机性，水利发电出力具备可调控性，负荷需求涵盖用户用电与电网并网需求。系统通过储能设备如锂电池、抽水蓄能的充放电平抑新能源波动，新能源出力过剩时储能吸收，出力不足时水利机组提升出力或储能释放，确保总出力与负荷平衡。同时需精确计算能量传输中线路损耗、设备转换损耗，优化能量利用效率。

拓扑结构以三类典型形式为主，其中并联式将新能源与水利机组并列接入电网，适用于新能源资源稳定区域；串联式让新能源直接辅助水利设备，如光伏驱动水泵提水，适配山区小水电；混联式集成储能模块，用于大型水利枢纽，三类结构均需结合工程场景设计，为后续机电设备选型与自动化控制提供系统框架支撑^[3]。

3 新能源耦合水利发电机电设备自动化动力工程实践方案设计

3.1 工程前期勘察与基础参数确定

工程前期勘察与参数设定是耦合系统落地的前提，需围绕资源适配性、目标可行性展开，为后续设备选型与控制

设计提供依据。

现场资源与环境勘察需覆盖新能源、水利、电网三大核心维度。在新能源资源方面，光伏需测定项目区域年平均日照时数与辐照度分布，重点记录冬季低辐照、夏季多云天气的资源波动规律；风电需连续12个月监测年平均风速与风功率密度，标注风速骤升骤降的极端天气频次。水利条件勘察需跟踪流域枯水期、丰水期的来水量变化，测量净水头与毛水头的实际差值，评估现有水利机电设备的运行年限、额定功率及历史故障率。电网接入条件需明确并网电压等级，分析本地负荷占比与电网调峰要求，判断是否需预留负荷增长的扩容空间，避免后续并网时出现容量不匹配问题^[4]。

工程目标与技术指标设定需兼顾经济、技术、环保三重需求。经济目标设定为投资回收期不超过8年，通过新能源补充使年发电量提升率不低于10%，依托自动化减少人工干预，将运维成本降低率控制在15%以上。技术指标需保障系统供电可靠性不低于95%，电压波动范围控制在±2%内，频率稳定度维持在50Hz±0.2Hz，新能源消纳率不低于90%，避免能源浪费。环保指标需根据新能源装机容量测算年碳减排量，抽水蓄能类项目还需明确水资源利用率提升率，确保工程与生态保护协同推进。

3.2 耦合系统核心设备选型与匹配方案

设备选型需以参数匹配、功能协同为原则，确保新能源、水利、自动化设备形成高效耦合的动力系统，下表为核心自动化控制设备选型明细，其余设备选型如下：

表1 耦合系统核心设备选型方案

设备类型	选型规格	核心参数	适配场景
PLC 控制器	西门子 S7-1500	支持 1000 点 I/O 扩展，指令执行时间 0.01ms	多设备协同控制
边缘计算网关	华为 IE4000	数据处理延迟 ≤20ms，支持 5G/ 光纤传输	本地实时数据处理
人机交互界面 (HMI)	威纶通 MT8102iE	10.1 英寸触摸屏，支持多语言切换	现场设备状态监控与操作
关键传感器	温度 / 转速 / 电压传感器	温度测量精度 ±0.5℃，转速测量误差 ≤0.1%	设备运行参数采集
保护设备	过电压 / 过电流保护器	动作响应时间 ≤10ms，保护范围可调	电网与设备故障防护

3.2.1 新能源设备选型

光伏设备优先选用单晶硅组件，其转换效率不低于23%，抗衰减性满足10年衰减率≤5%，搭配组串式逆变器，最大跟踪效率不低于99%，适应电压范围覆盖组件工作电压波动区间；支架选用跟踪式，抗风等级不低于12级，追光精度控制在±0.5°，提升光能利用率。风电设备根据风功率密度选用永磁直驱式风机，单机容量匹配区域风资源，切入风速不高于3m/s，切出风速不低于25m/s，搭配全功率变流器，网侧变流效率不低于98.5%，具备低电压穿越能力^[5]。储能设备选用磷酸铁锂电池，循环寿命不低于10000次，充放电效率不低于90%，工作温度范围覆盖-20℃至50℃，满足极端环境下的储能需求。

3.2.2 水利机电设备选型与改造

水轮机根据流域水头与流量选型，高水头大流量区域选用混流式，额定出力需预留新能源补充后的负荷余量，效

率不低于90%；中低水头区域选用轴流式，重点优化启动响应速度。发电机选用同步发电机，额定电压与并网等级一致，励磁系统响应时间不超过0.1s，老旧发电机需加装智能励磁模块与转速监测模块，提升电压调节精度。辅助设备中，调速器选用电液调速器，调节精度不低于±0.01Hz，响应时间≤0.5s，适应新能源波动带来的负荷变化；主变压器选用节能型，损耗等级不高于11型，容量满足新能源与水利发电的总出力需求。

3.2.3 自动化控制设备选型

除上表所列设备外，还需配置SCADA服务器，支持1000点以上的数据采集与存储，硬盘容量不低于1TB，确保历史数据可追溯；通信设备选用工业级交换机，端口数量满足设备接入需求，传输速率不低于100Mbps，保障数据实时交互。所有自动化设备需支持Modbus、OPC UA等通用协议，避免出现协议不兼容导致的控制延迟问题。

3.3 自动化控制策略与系统搭建

自动化控制策略与系统搭建围绕协同调度、故障预警、远程管控核心设计。多能源协同控制通过储能实时充放电平抑新能源波动，出力不足时水轮机调速器动态调节导叶开度补充缺口；峰谷时段差异化调度，谷段优先新能源与储能满发，峰段水利机组满发配合补充，电网故障时自动切除非关键负荷。电压频率稳定依赖励磁系统调节无功功率，SVG设备快速补偿无功缺口，频率偏差超标时自动调整机组出力^[6]。

监控系统采用四层架构，数据采集层通过多类传感器收集参数，传输层以双链路保障通信，监控层部署 SCADA 服务器与 HMI 实现实时预警，调度层对接云端支持远程管控。软件集成实时监控、故障诊断与运维管理功能，通过振动与谐波分析定位故障源，自动生成维护计划。远程操作实行分级授权与关键操作双重确认，系统通过标准协议与电网协同调度，应急场景下自动切换离网模式或备用设备，双机冗余设计保障连续运行。

3.4 工程施工与调试方案

工程施工与调试遵循规范操作、分阶段验证、安全第一原则。施工分前期准备与现场施工，前期完成图纸会审、人员专项培训与设备验收，杜绝不合格材料入场。现场施工中，新能源设备安装需保障支架基础强度与组件倾角适配，风机吊装选适宜风速时段并做好基础温控；水利设备改造更换磨损部件后加装智能模块并做密封性测试；自动化布线区分动力与控制电缆，光缆敷设做好防护措施。

调试分单机与系统联调，单机测试新能源设备性能、水利设备空载状态及自动化设备逻辑，传感器校准误差严控标准。系统联调先空载运行验证通信与指令执行，再逐步提升负荷测试出力稳定性，最后模拟故障场景测试保护系统动作效率。试运行持续 30 天记录关键参数，邀请第三方检测出具报告，组织多单位联合验收，合格投运后三个月内每月全面巡检，确保系统稳定。

4 新能源耦合水利发电机电设备自动化动力工程实践

4.1 项目案例

研究以华能东方电厂戈枕水电站风雨连廊光伏耦合项目为例，该项目作为海南省首个分布式光伏与水电站耦合发电示范工程。依托戈枕水电站现有基础设施，构建“光伏+水电+交通”的创新耦合模式，完整实现新能源与水利发电机电设备的自动化协同运行。

4.2 项目实践

工程实践聚焦资源整合与自动化耦合两大核心。项目选址于戈枕水电站进场公路，利用 6.5 公里廊道空间铺设近 3 万块隆基高效 BC 光伏组件，直流侧装机容量达 18.8MW，通过水电站主变实现光伏与水电的并联式并网，无需额外建设独立并网设施，大幅降低耦合成本。设备选型上，BC 组件转换效率最高达 24.8%，功率可达 670W，在

同等空间下较传统组件多承载 6.4% 的装机容量，其弱光响应与低衰减特性，恰好适配热带地区多云天气的光照波动特点^[7]。

自动化控制系统是实现高效耦合的关键。项目搭建基于 SCADA 的协同调度平台，通过电压、电流传感器实时采集光伏阵列出力与水电站机组运行参数，经边缘计算网关处理后，采用 PID 控制算法调节主变负载分配。当光伏出力因云层遮挡骤降时，系统可在 0.2 秒内触发水轮机调速器动作，通过调整导叶开度补充出力缺口；当光伏出力过剩时，优先满足水电站辅助设备用电，剩余电能并入电网，实现“光随天变、水随光调”的自动化协同^[8]。此外，系统搭载故障诊断模块，可通过电流谐波分析识别组件或机组异常，故障响应时间较传统人工巡检缩短 80%。

4.3 实践成效

项目全容量并网后，年均上网电量达 2058.4 万 kWh，其中光伏出力占比约 35%，水电通过自动化调节实现新能源消纳率达 98% 以上。相较于单一水电运行模式，年新增发电量相当于减少二氧化碳排放 1.65 万吨，且 BC 组件的高效特性使项目投资财务内部收益率较传统组件方案提高 0.2%。同时，依托水电站现有自动化运维体系，项目未新增专职运维人员，仅通过原有 SCADA 系统扩展光伏监控模块，实现设备状态的集中管控，运维效率提升 40%。

5 结语

综上所述，研究中系统地梳理了新能源与水利发电耦合理论、设计工程实践方案，并结合戈枕水电站光伏耦合案例验证，证实二者耦合的技术可行性。合理设备选型、基于 SCADA 的自动化协同控制策略是核心支撑，可实现 98% 新能源消纳率，年减排 1.65 万吨且运维效率提升 40%。研究为同类工程提供可复制范式，有效助力能源系统绿色转型与高效运行。

参考文献

- [1] 米子阳,陈贝.水力发电与抽水蓄能技术对水利工程可持续发展的贡献研究[J].水上安全,2025,(16):61-63.
- [2] 张发宽.分布式光伏发电在大型水利枢纽输水渠道上的应用分析[J].水利水电工程设计,2025,44(02):34-37+43.
- [3] 林纪盛.关于PLC的机械设备电气自动化控制探讨[J].价值工程,2024,43(22):159-162.
- [4] 刘苏莹.水力发电机电设备物流安全运输线路评价模型设计[J].中国物流与采购,2024,(14):67-68.
- [5] 豆品鑫.新疆某水利枢纽发电引水系统水力过渡计算研究[J].广西水利水电,2023,(05):75-80.
- [6] 张云峰.基于新能源发电的水力发电技术研究[J].节能与环保,2023,(09):47-49.
- [7] 王翠玉.变频调速技术及其在工业电气自动化控制中的运用[J].中阿科技论坛(中英文),2021,(10):121-123.
- [8] 曹渊,宋杰,朱彬,等.浅析电厂水处理设备自动化控制系统设计[J].科技资讯,2021,19(21):23-25.