

水电及抽水蓄能助力区域电力系统低碳转型路径探讨

廖小亚

江西洪屏抽水蓄能有限公司, 江西 靖安 330603

摘要： 本文针对区域电力系统低碳转型需求，分析水电与抽水蓄能技术的协同作用。探讨水电灵活性提升、抽水蓄能调峰填谷、风光水储多能互补等实施路径，提出优化调度策略与设施改造方向，为构建清洁低碳的新型电力系统提供参考。

关键词： 水电；抽水蓄能；低碳转型；电力系统；多能互补

Discussion on the Low-Carbon Transformation Path of Regional Power System Assisted by Hydropower and Pumped Storage

Liao Xiaoya

Jiangxi Hongping Pumped Storage Co., LTD. Jing'an, Jiangxi 330603

Abstract： This paper analyzes the synergistic effect of hydropower and pumped storage technology for the low-carbon transformation needs of regional power system. The implementation paths of hydropower flexibility improvement, peak and valley regulation of pumped storage, and multi-energy complementarity of landscape water storage are discussed, and the optimized dispatching strategy and direction of facility transformation are proposed, so as to provide reference for the construction of a new clean and low-carbon power system.

Keywords： hydropower; pumped storage; low-carbon transformation; power system; multi-energy complementary

引言

电力系统面临化石能源占比过高问题，煤电依赖导致碳排放强度难以降低。新能源波动性对电网稳定性提出挑战，亟须灵活性调节资源支撑。水电机组具备快速启停特性，抽水蓄能拥有储能与调频双重功能，两者协同可提升电网可再生能源消纳能力，降低系统碳排放强度。

一、水电技术升级路径

(一) 机组运行优化

机组升级聚焦灵活性提升与响应速度突破。调节能力改造重点升级调速系统，采用数字电液调速器替代机械液压装置，调节精度提升至 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，响应时间缩短至10秒内完成全负荷调整。调速器油压系统改造为冗余双泵配置，故障切换时间 ≤ 2 秒。水库调度引入动态水位控制算法，建立发电量、生态流量、防洪库容的三维优化模型，枯水期维持最小下泄流量 $\geq$ 多年平均流量的30%。灵活响应机制构建基于AGC的自动发电控制体系，控制周期压缩至4秒/次，调节速率提升至2%额定容量/秒。备用容量管理实施旋转备用分层配置，10分钟内可调备用占比提升至装机容量的8%，参与调频辅助服务市场报价精度达 $\pm 1\text{MW}$ 。机组振动监测系统加装摆度传感器与频谱分析仪，实时预警轴系异

常，保障频繁调节工况下的设备安全^[1]。

(二) 梯级电站协同

梯级协同着力提升流域整体调节效能。联合调度系统采用分层控制架构：上层为流域调度中心，部署水电优化调度平台，集成72小时径流预报与电力需求预测功能；下层各电站配置本地控制器，执行调度指令并反馈实时数据。通信网络采用光纤专网与电力载波双通道，传输延时 $\leq 50\text{ms}$ 。负荷分配应用混合整数规划算法，考虑水头变化对机组效率的影响，求解最优出力组合，计算周期缩短至15分钟/次。跨流域互补依托区域电力交易平台，构建水文特性数据库，分析不同流域丰枯期重叠度^[2]。实施跨区互济时，通过联络线传输能力约束校核模块，确保输电断面不超限。枯水期优先调用调节性能好的水库电站承担峰荷，丰水期安排径流式电站多发基荷。建立容量置换机制，允许流域间备用容量共享，置换价格按边际成本核算。梯级生态调度统一设置鱼类

繁殖期联合放流方案，协调各电站下泄流量波动幅度 $\leq 20\%$ 。

二、抽水蓄能建设方向

(一) 站点布局优化

站点选址需综合考量能源供需地理特征，优先选择电力消费集中区域与清洁能源富集地带的交汇点。负荷中心邻近布局采用地下竖井结构设计，充分利用自然地形高程差形成上下水库的天然势能。库容配置依据地形测绘数据动态调整，确保上下库容量匹配度适应不同工况需求。既有水库设施改造时重点检测坝体渗漏情况与抗震性能，同步升级引水系统结构强度。双向水流通道建设时，发电工况沿用原有输水隧洞，抽水工况启用新建压力管道系统，实现两种模式独立运行互不干扰^[3]。

机组选型匹配地理条件特征，中高水头区间优先选用可逆式水泵水轮机，通过三维流体仿真优化转轮叶片型线，提升正反向运行效率。中小型站点开发侧重模块化设计，采用标准化预制组件缩短建设周期。山区微型抽蓄站点建设时，利用自然地势构建多级调节水池，通过智能调度系统实现梯级间水量平衡。废弃矿洞改造前实施全断面地质雷达探测，精准识别岩体裂隙发育状况。隧洞开挖采用硬岩掘进设备，根据围岩类别动态调整推进参数，同步实施喷锚支护与监测系统布设。

施工过程应用数字化管理平台，通过建筑信息模型预演设备吊装路径与施工时序，优化竖井开挖支护方案。地表变形监测网络布设高精度传感器，实时反馈岩体位移数据指导施工调整。生态环境保障方面，建设永久性生态泄放设施，配置独立的小型发电机组持续维持河道基流。水土保持工程同步实施边坡绿化与表土回填，施工废水分级沉淀处理后循环利用。站点运营期建立生态监测站，定期评估流域水文特征与生物群落变化，动态调整运行策略实现能源开发与生态保护的协同发展^[4]。

(二) 运行模式创新

电力系统调节需建立多层级响应机制，针对不同时间尺度的波动特征采取差异化的控制策略。秒级快速调节依托可变速机组技术，通过转子侧电力电子装置实现转速动态调整，调节速率与电网频率偏差形成实时联动。机组配备自适应控制系统，根据频率变化率自动匹配调节幅度，确保快速平抑瞬时功率波动。分钟级调节采用闭环跟踪模式，在中央控制器中植入改进型比例积分微分算法，实时对比实际出力与目标值的偏差，通过梯度下降法动态调整导叶开度与励磁电流。小时级调度引入滚动优化机制，结合气象预测与负荷趋势数据，每15分钟更新一次发电计划曲线，运用混合整数规划算法平衡抽蓄工况转换成本与市场收益。

备用容量管理实施动态配置策略，根据系统运行风险等级自动调整备用比例。旋转备用机组保持热备用状态，配置快速并网装置确保紧急情况下两分钟内达到满负荷输出。备用容量分配采用边际成本排序法，优先调用调节性能优良的机组。电力市场运营构建复合收益体系，容量市场侧重保障基本收益，采用可用容量竞标方式确定补偿标准。现货市场参与采用价格预测模型，结合历史价差规律与实时供需信息，制定最优充放电时间策略。电

量计量实施双轨制结算，容量电费依据核准装机容量按月支付，电量电费根据实际上网电量按日清算^[5]。

共享储能平台构建采用区块链技术，建立可信度量的调用记录系统。用户侧安装智能网关实时上传储能需求，平台通过匹配算法自动分配最优储能资源。调频服务交易引入性能指标考核，依据调节速率、精度与持续时间综合评定服务质量等级。金融创新方面，探索资产证券化路径，将电站固定资产与预期收益进行结构化设计，通过分级信托产品吸引多元投资。项目融资采用混合所有制模式，引入战略投资者分担前期开发风险。全生命周期成本管理实施精细化核算，建立设备健康状态评估模型指导运维资金分配，实现运行成本动态优化^[6]。

三、多能互补协同机制

(一) 风光水储联合运行

能源互补体系通过时间维度特性整合实现稳定出力。风电光伏的秒级波动由具备快速调节能力的水电进行平抑，水电机组通过调速器动态调整导叶开度，在5秒内响应功率变化需求。抽水蓄能电站承担分钟至小时级的功率偏差调节，在午间光伏大发时段启动抽水模式存储过剩电能，晚高峰时段转换为发电模式释放储能。多时间尺度控制架构分为三层：底层设备执行毫秒级频率支撑，中间层协调机组出力分配，上层优化系统运行模式。风光预测偏差通过滚动修正机制反馈至水电调度计划，形成闭环控制体系。跨能源协调控制器采用事件驱动型逻辑判断，当风光出力突变超过阈值时，优先调用抽蓄机组进行功率补偿，其次调整水电机组运行点^[7]。

容量规划遵循“源网荷储”协同原则，基于地理信息系统构建资源分布热力图。水电站选址侧重流域调节性能，优先布局具有年调节能力的水库作为基荷支撑。抽蓄电站容量按区域最大负荷峰谷差的30%配置，确保4小时持续调节能力。风光装机规模结合输电通道容量确定，通过灵敏度分析寻找消纳极限值。多能互补系统采用双层优化模型：外层求解年度容量配比，考虑设备投资成本与碳排放约束；内层进行小时级运行模拟，评估系统调节能力与可靠性指标。约束条件包含生态流量限制、旋转备用率要求及输电断面安全裕度，通过拉格朗日乘子法处理多重约束耦合问题^[8]。

(二) 智能调度系统建设

预测体系融合多源异构数据提升可靠性。气象预报数据接入欧洲中期预报中心与本地气象雷达资料，通过卡尔曼滤波算法进行偏差校正。水文预测模型耦合卫星遥感土壤湿度数据与历史径流序列，采用长短时记忆网络预测未来7日来水量。功率预测模块开发物理模型与统计模型混合架构，物理模型计算理论出力曲线，统计模型基于相似度分析修正天气影响因素。数据同化技术每6小时更新预测结果，滚动生成0-72小时发电计划。

实时控制系统构建“集中-分布”混合架构。集中控制层部署混合整数规划求解器，每15分钟刷新机组组合方案，优先调用边际成本低的清洁能源。分布控制层设置自适应规则库，当通信

中断时切换至本地自治模式，根据预设逻辑维持基本运行。多目标优化设置碳排放强度、运行成本、弃风弃光率三项指标，采用NSGA-II算法寻找帕累托最优解集^[9]。在线学习机制持续更新设备性能参数，建立机组响应速度、效率曲线的动态模型库。安全校核模块实施N-1故障预想校核，自动调整备用容量分布。人机协同界面开发三维可视化驾驶舱，支持调度员交互式调整优化权重参数。

四、实施挑战与对策

（一）生态保护约束

生态保护需构建全过程管控体系。环境影响控制采用动态水位控制模型，限制日水位变幅 ≤ 0.5 米，设置生态流量实时监控装置，通过超声波流量计与视频监控双重验证下泄水量。鱼类保护措施包括安装垂直竖缝式鱼道（宽度 ≥ 2 米），流速控制在0.8–1.2m/s吸引鱼类洄游，水轮机流道优化为六叶片斜击式设计，降低转轮区流速梯度。生态补偿机制建立多方共担模式，从发电收益提取3%–5%注入生态基金，用于增殖放流与栖息地修复。生态电价政策实施差异化定价，对保障生态流量的电站给予0.05元/kWh补贴^[10]。开发流域生态指数评价体系，将水质达标率、鱼类种群数量等指标纳入电站考核，未达标企业限制其发电计划申报。

（二）经济性提升路径

经济性优化需政策与技术双轮驱动。成本疏导机制设计阶梯式容量电价，调节性能优良电站获取1.2倍基准电价，建立辅

助服务成本分摊机制，通过输配电价附加回收抽蓄电站建设成本。绿色金融工具创新包括发行碳中和债券，定向支持电站技术改造，探索储能资产证券化模式。设备技术研发聚焦高水头机组（800米以上）整体铸造工艺，采用耐空蚀不锈钢转轮（硬度 $\geq$ HRC45），机组过流部件表面激光熔覆碳化钨涂层延长大修周期。可变速机组推广同步磁阻电机技术，转子设计为多层叠片结构，实现 $\pm 10\%$ 转速无级调节，效率曲线平坦区扩展至40%–100%负荷范围。智能运维系统开发叶片裂纹声发射监测装置，通过振动频谱分析预判设备劣化趋势，降低非计划停运风险。

五、结语

水电与抽水蓄能协同发展是推进区域电力系统低碳转型的核心支撑。通过机组灵活性改造与梯级调度优化，水电可有效平抑新能源波动；抽蓄电站的快速调节特性则为电网提供稳定缓冲。多能互补体系整合不同电源时空特性，形成“水电保基荷、抽蓄调尖峰、风光补电量”的协同格局，显著提升清洁能源消纳能力。当前实施过程中，需重点破解生态保护与经济效益的平衡难题；动态水位控制、鱼类洄游通道建设等技术措施可缓解环境影响，而容量电价机制与绿色金融创新则为项目经济性提供保障。未来发展方向应聚焦智能化升级，开发流域–区域两级协调调度平台，实现多源异构能源的精细管控。同时需完善市场机制，通过辅助服务交易体现调节资源价值，激发企业改造积极性。只有技术革新与制度创新双轨并进，才能构建安全高效、低碳环保的新型电力系统，为区域能源转型提供持久动力。

参考文献

- [1] 张博庭. 水电和抽水蓄能是实现碳中和的重要保障 [J]. 水电与新能源, 2023, (4): 1–5.
- [2] 张宗亮, 刘彪, 王富强, 等. 中国常规水电与抽水蓄能技术创新与发展 [J]. 水力发电, 2023, (11): 1–6, 114.
- [3] 杨凯. 现代水利水电抽水蓄能施工技术分析 [J]. 南北桥, 2023(24): 193–195.
- [4] 路振刚, 叶宏, 梁廷婷, 等. 新形势下我国抽水蓄能技术新突破与前景展望 [J]. 水电与抽水蓄能, 2023, (6): 15–19.
- [5] 任艳, 崔正辉. 全球能源转型背景下中外抽水蓄能发展分析研究 [J]. 水力发电, 2023, (10): 92–96, 115.
- [6] 程其云, 何鑫, 冷祥彪, 等. 基于可变速抽水蓄能的风—光—火—抽蓄的优化调度 [J]. 水电与抽水蓄能, 2023, (4): 109–113.
- [7] 杨书. 春厂坝抽水蓄能电站应用全功率变速恒频可逆式机组的可行性分析 [J]. 水电站机电技术, 2023, (4): 1–4, 46.
- [8] 侯公羽, 马晓赞, 杨振华, 等. 抽水蓄能电站全生命周期碳排放计算与分析 [J]. 中国环境科学, 2023, (1): 326–335.
- [9] 李学东, 赵晓柯. 春厂坝抽水蓄能电站职业健康与生态环境保护的探究 [J]. 水电站机电技术, 2023, (5): 134–136.
- [10] 李湘峰, 黄谨, 潘菊芳. 抽水蓄能电站建设征地移民安置工作不同阶段关注问题的探讨 [J]. 水力发电, 2023, (9): 12–15.