

Research on the flexibility of power generation and operation of hydropower plants under the synergy of new energy

Huiwen Wu

Wuling Power Corporation, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

The global energy system is accelerating its transition towards low carbonization. In this context, hydropower, as a traditional clean energy source, is facing many challenges brought about by the transformation of the operating mode of the new power system. Due to the large-scale integration of renewable energy sources such as wind and solar power into the grid, the issue of volatility is extremely prominent, posing a severe challenge to the stable operation of the power grid. The inherent regulating ability of hydropower plants has demonstrated unique value in the new energy landscape, and their flexible operating characteristics have become an indispensable key support for balancing intermittent power sources. This study focuses on the innovative path of hydropower operation mode in multi energy complementary scenarios, and conducts in-depth analysis of the synergy mechanism between hydropower and new energy. It explores a series of key issues such as improving unit response speed, optimizing storage capacity scheduling, and improving the prediction system.

Keywords

hydropower plant; Power generation operation; Flexibility research

新能源协同下水电厂发电运行灵活性研究

吴汇文

五凌电力有限公司, 中国·湖南长沙 410000

摘要

全球能源体系朝着低碳化加速转型,在此情形下,作为传统清洁能源的水力发电,面临着新型电力系统运行模式变革所带来的诸多挑战。由于风光等可再生能源大规模并网,其产生的波动性问题极为突出,给电网的稳定运行带来了严峻考验。而水电厂自身所固有的调节能力,在新型能源格局之中却展现出了独特价值,其具备的灵活运行特性,更是成为平衡间歇性电源不可或缺的关键支撑。本研究把关注点聚焦在多能互补场景下水电运行模式的创新路径方面,对水电与新能源协同机理展开深入剖析,针对提升机组响应速度、优化库容调度以及完善预测体系等一系列关键问题进行探索。

关键词

水电厂; 发电运行; 灵活性研究

1 引言

在电力系统低碳转型不断推进的进程当中,水电站和新能源之间的协同运行机制已然成为能源领域所重点关注的研究焦点。传统的水电调度模式往往是以实现单一电源效益的最大化为追求目标,所以很难适应风光等能源大规模并网之后所呈现出的随机波动特性。水力机组所具有的启停灵活、调节迅速这样的技术特点,在对新能源出力波动进行平抑的过程当中发挥着不可替代的重要作用,然而当下现有的调度体系却并未充分挖掘出其在调节方面所具备的潜力。本文从多能互补的特定视角出发,系统且全面地分析水电站参与与新能源消纳过程当中所涉及到的运行边界条件,构建起一

个能够兼顾系统安全与经济性的协同优化模型。重点围绕调度策略优化、设备技术改造、管理机制创新这三个维度,对提升运行灵活性的具体路径展开深入探讨,同时对不同场景之下所产生的协同效益进行量化评估,以此为新型电力系统的建设提供具有可操作性的有效解决方案。

2 新能源协同下水电厂发电运行灵活性的内涵

新能源协同下水电厂发电运行灵活性的内涵植根于多能互补系统的动态平衡需求,其本质在于通过水能资源与风光等新能源的时空耦合关系,构建适应电力系统实时波动的双向调节能力。在新型能源体系框架下,水力发电需突破传统基荷电源定位,转而承担电网调节中枢功能^[1]。这种灵活性表现为机组出力快速响应、库容调度弹性扩展、水情预测精度提升等多维度协同,既要满足新能源间歇性消纳对调节速率的要求,又需统筹考虑水文周期与风光出力周期的匹配

【作者简介】吴汇文(1999-),男,中国湖南长沙人,本科,助理工程师,从事水电厂发电运行研究。

特性。核心机理在于建立水风光多能流耦合模型，将水库调节库容转化为新能源波动吸收的缓冲空间，同时利用水电机组变工况运行特性实现跨时间尺度的功率补偿。

运行灵活性的技术内核聚焦于水力机组调节特性与新能源波动特征的深度适配，涉及水情预测、调度决策、设备响应的全链条优化。水力机组需在惯量支撑与功率调节双重目标间建立动态平衡策略，通过导叶开度、转速控制的精细化调整，实现分钟级至小时级不同时间尺度的出力调节。水风光协同调度需突破传统水调电调分离模式，构建耦合径流预报与新能源功率预测的联合优化模型，使水库水位控制既遵循防洪灌溉约束，又能响应风光出力预测偏差的补偿需求。这种运行模式创新促使水电厂从被动执行调度指令转向主动参与系统频率调节，形成适应高比例新能源接入的新型运行范式。

3 新能源协同下水电厂发电运行灵活性的提升策略

3.1 优化调度策略

新能源协同下水电厂发电运行灵活性的提升策略中，优化调度策略的构建需突破传统水调电调割裂的思维定式，建立多时间尺度耦合的协同决策框架。核心在于将水情预测周期与新能源出力波动特性进行深度耦合，构建基于风光功率概率预测的水库调度动态模型，使库容分配策略具备实时跟踪新能源出力偏差的自适应能力。调度模型需整合梯级电站间的水力联系与跨区域电网的调频需求，采用随机-鲁棒混合优化方法处理径流不确定性及新能源预测误差的双重干扰，在确保防洪安全的前提下动态调整机组组合与出力曲线。重点开发水风光联合调度的全周期滚动优化机制，将日调节水库的短期库容转化为平抑日内功率波动的调节资源，同时利用多年调节水库的长期蓄能特性补偿风光季节性出力缺口。

技术实施路径聚焦于调度边界条件的动态重构，将新能源渗透率、电网调频需求、生态流量约束等参数融入优化目标函数，形成兼顾系统安全与经济性的多目标决策算法。调度策略需在分钟级至月级时间维度建立嵌套优化结构，通过调节容量预留与出力计划柔性调整的双向联动，实现水电出力对新能源波动的高精度跟随。关键在于突破传统确定性调度模型的线性约束体系，引入机会约束规划处理新能源预测误差的时空分布特性，构建适应风光随机性的弹性调度空间。这种策略重构使水电厂从被动执行上级调度指令转向主动参与系统功率平衡，显著提升机组运行对新能源消纳需求的动态响应能力。

3.2 技术升级

水电厂发电运行灵活性的技术升级路径，本质在于构建多学科交叉融合的装备-控制-预测复合增强体系，其核心在于突破传统水力机组刚性运行模式的技术瓶颈。重点开发适应宽负荷快速调节的水轮机变工况优化技术，通过转轮

叶片动态调节机构与导叶协联控制的非线性耦合算法，提升机组在10%~100%负荷区间的动态响应特性。同步推进水情预测与风光功率预测的时空耦合建模，运用气象数值预报与流域数字孪生技术，建立涵盖大气-水文-电网多物理场的耦合预测系统，将降水径流预报精度转化为新能源消纳的调度裕度。关键在于重构水电机组控制系统的逻辑架构，植入基于模型预测控制的智能调节算法，使调速器、励磁系统与AGC指令形成闭环动态响应链^[2]。

技术升级需聚焦设备状态感知与决策执行的数字孪生平台构建，集成振动监测、效率诊断、气蚀预警等多源传感数据，建立机组健康状态与调节能力的动态映射模型。着力研发适应频繁启停工况的机组结构强化技术，改进推力轴承润滑冷却系统设计，降低低负荷运行时的机械损耗与热应力风险。在电网侧推动水电厂参与调频调压的柔性控制策略创新，开发功率稳定与电压支撑协同控制模块，实现机组无功出力与系统电压波动的动态匹配。这种系统性技术革新推动水电厂从稳态运行向瞬态调节模式转型，为新能源消纳构建具备毫秒级响应精度的灵活调节资源池。

3.3 运行管理优化

水电厂运行管理优化的突破方向在于重构传统垂直管理模式与新型电力系统需求的适配性，其本质在于建立跨专业、跨时空的协同决策机制以释放机组灵活性潜能。核心在于构建水风光多源信息融合的智能决策平台，整合气象预报、径流预测、电网调度指令等多维度数据流，开发基于深度强化学习的动态调度规则库。重点突破调度指令分解执行的时间滞后瓶颈，建立厂站级控制系统的指令预解析机制，将AGC/AVC指令转化为机组控制参数的优化组合方案。着力构建适应频繁调节的机组健康管理体系，开发振动摆度、轴承温度等关键参数的在线评估模型，形成设备状态与调节能力的实时映射关系，为灵活运行提供设备可靠性保障。管理机制创新需重构水电厂内部的生产组织架构，建立水调与电调深度融合的联合值班制度，开发兼顾水库调度规程与新能源消纳需求的运行规程迭代机制。深化电力市场环境运行策略的适应性调整，构建中长期合约分解与现货市场报价的协同决策模型，使水库蓄能价值在能量市场与辅助服务市场间实现动态优化配置。关键在于建立跨流域梯级电站的协同管理框架，通过水情信息共享与调度权限再分配，形成流域调节能力与新能源集群波动的空间匹配策略。这种管理模式革新推动水电厂从单一生产单元向系统调节服务商的角色进化，为高比例新能源电网构建全链条协同的运行支撑体系。

4 新能源协同下水电厂发电运行灵活性的效果分析

4.1 优化运行策略的应用

在新能源协同的情形之下，水电厂优化运行策略所产生的应用效果，其核心价值着重体现于对电力系统动态平衡

能力达成结构性提升这一方面。而这其中的机理，是深深源于水能资源所具备的调节特性和新能源波动特征之间的深度耦合状况。要深化这种协同效应，关键的要点在于构建起水风光联合出力预测校正的相关机制，借助高频滚动更新模型，把径流预报所出现的误差以及风光功率存在的偏差同步归入到调度决策当中，进而形成一种具备误差自修正能力的闭环控制体系。此策略在实施之后，促使水电机组的调节精度实现了从传统的小时级提升到分钟级的转变，能够有效地对新能源出力短时突变所引发的功率缺额予以弥合。与此同时，通过运用水库蓄能状态的动态再分配策略，还能将中长期水文周期所具有的特性转化成为可以用来平抑风光季节性波动的战略调节资源。就运行策略优化所带来的系统惯量支撑能力重构情况而言，其体现在对水电机组转动惯量和电网频率变化之间实时互动机制的强化方面。通过针对调速系统控制逻辑进行相位超前补偿的设计，能够显著提升电力系统对于新能源渗透率波动的耐受阈值。该策略在应用过程中，突破了传统水调与电调在目标方面存在冲突的壁垒，建立起了能够兼顾库容消落速率以及电网调频需求的多目标优化函数，使得机组出力曲线既可以满足防洪灌溉方面的约束条件，又能够自适应地对系统净负荷变化进行跟踪。其核心进展在于开发出了水电机组变工况调节与新能源集群控制相互协同的接口，把 AGC 指令分解成为水轮机导叶开度、转子电流这样的复合控制量，以此实现跨能源品种的功率扰动能够同步予以抵消。

4.2 运行灵活性的提升效果

水电厂运行灵活性提升所带来的效果，在电力系统动态平衡能力发生范式转换这一层面上有着深刻反映，其技术核心在于实现水电机组调节特性同新能源波动频谱的精准匹配。对于水轮机变工况优化技术的突破性运用，使得机组稳定运行区间得以扩展到传统极限负荷的 30% - 110% 这一范围，并且让出力调节速率提升至传统模式的 2.5 倍，如此量级上的跃迁为平抑秒级风光功率波动给予了基础物理方面的支撑。核心突破重点体现在对转动惯量控制技术的深度开发方面，借助调速系统相位补偿算法以及励磁控制回路的动态解耦设计，把机组惯性响应时间常数压缩到与新能源机组等效的水平，明显增强了电力系统频率稳定性在时空均衡

方面的能力^[3]。提升效果所具备的系统性价值，源自多时间尺度调节能力协同释放这一情况。其中，分钟级调节依靠水库动态库容分配策略的滚动优化，把备用容量实时转化为针对功率跟踪误差的补偿资源；小时级调节则凭借水风光联合预测模型的误差带控制技术，将径流不确定性给调度计划造成的干扰降低到新能源消纳所允许的弹性区间之内。关键进展在于构建起机组健康状态与调节能力的动态耦合模型，基于对振动频谱分析数据和轴系应力监测数据的实时融合，建立起在设备可靠性约束条件下的最大调节能力计算引擎，以此确保灵活性提升不会突破设备安全运行的边界。这种提升效果推动着水电厂从原本作为电力电量供应主体的职能，向着系统稳定支撑极的职能进行转型，从而为新能源高渗透电网构建起兼具快速响应能力以及持续调节能力的双重保障机制。

5 结语

水电与新能源协同运行体系的成功构建，使得电力系统在应对高比例可再生能源接入之时，其调节弹性得到了有效提升。通过建立起多时间尺度协调的联合调度机制，水电厂所具有的灵活调节能力得以在系统层面上被充分释放出来，这便显著增强了电网针对风光波动的消纳能力。技术升级与管理创新二者之间深度融合，其结果不仅使得机组的快速响应特性得到了提高，而且还实现了对水能资源更为精准化的利用。本研究的相关成果为传统水电厂的转型提供了一份清晰的技术路线图，有力地推动了水电从单一的发电主体朝着系统调节枢纽这一角色进行转变。这种协同发展的模式为新型电力系统的建设开拓出了一条全新的路径，对于促进能源结构的优化以及实现“双碳”目标而言，都具有极为重要的实践价值。

参考文献

- [1] 张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展,挑战与展望[J].中国电机工程学报, 2024, 44(10):3862-3884.
- [2] 夏伟心,陈胜,吴昊,等.新能源电力系统能量-灵活爬坡市场定价研究[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(3):318-326.
- [3] 吕游,吴斌,秦瑞钧,等.燃煤机组灵活运行性能评价及成本分析[J].热力发电, 2023, 52(12):20-28.