

Research on Optimization Operation and Energy Efficiency Improvement of Hydropower Station under New Power System

Xin Zeng

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

Abstract

The rapid integration of high-proportion renewable energy into modern power systems and the growing interconnection of generation, grid, load, and storage have posed multifaceted challenges to hydropower plant operations, including intensified load fluctuations and complex operational constraints. This study systematically examines the system's core impacts on load management, boundary adjustments, and economic operations for hydropower plants. It then proposes key optimization strategies through dynamic unit parameter allocation, short-to-medium-to-long-term dispatch optimization, and multi-energy coordinated control. Building on these insights, the research establishes core pathways to enhance operational efficiency via critical equipment upgrades, optimized water conveyance and reservoir systems, and improved O&M management frameworks. The findings provide practical support for hydropower plants to adapt to the new power system transition and improve operational flexibility, thereby facilitating the low-carbon and efficient development of the power sector.

Keywords

new power system; hydropower station; optimized operation; energy efficiency improvement; dispatch optimization

新型电力系统下水电站优化运行与能效提升研究

曾芯

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南蒙自 661100

摘要

当前新型电力系统高比例新能源并网与源网荷储互动快速发展, 致使水电站运行面临负荷波动加剧、约束条件复杂化等多方面挑战。本文将深入剖析该系统对水电站运行负荷、边界调整及经济运行的核心影响; 再从机组参数动态调配、短中长期调度优化、多能源协同控制等层面出发, 设计优化运行的关键策略。在此基础上, 围绕新型电力系统关键设备升级改造、输水与水库系统优化、运维管理体系管控等, 构建了提升水电站运行能效的核心路径。研究拟为水电站适配新型电力系统转型、提升运行灵活性提供实践支撑, 助力电力系统低碳高效发展。

关键词

新型电力系统; 水电站; 优化运行; 能效提升; 调度优化

1 引言

在“双碳”目标驱动下, 新型电力系统逐渐向高比例可再生能源、源网荷储深度互动方向加速转型。水电站作为兼具供电与调节功能的核心电源, 其角色已从传统基荷电源转向新能源消纳、电网调峰的关键支撑。然而, 当前多数水电站沿用传统运行模式, 面对新型电力系统的动态调度需求、间歇性新能源冲击, 逐渐显现出运行适配性不足、能效提升瓶颈等问题^[1]。因此, 下述将围绕新型电力系统背景下,

水电站运行优化与能效提升展开探讨, 以期为水电站适配系统转型需求、释放能效潜力提供实践思路。

2 新型电力系统对水电站运行的核心影响

2.1 高比例新能源并网对运行负荷的影响

在新型电力系统高比例风电、光伏并网的背景下, 新能源出力随机性、间歇性直接引发电网负荷特性剧变。一方面, 风电、光伏日间出力高峰与夜间出力骤降的特征, 导致电网负荷峰谷差较传统模式扩大 30%~50%。在此过程中, 水电站需承担频繁调峰任务, 从以往稳定基荷运行逐渐转向动态负荷跟踪^[2]。

另一方面, 新能源出力预测偏差会造成电网实时功率失衡, 水电站需缩短出力调整周期以平抑功率波动。这一频繁负荷变动打破了水电站机组最优运行工况, 不仅增加水轮

【作者简介】曾芯(1987-), 女, 中国四川眉山人, 助理工程师, 从事新型电力系统下水电站优化运行与能效提升研究。

机变负荷运行水力损失，还因机组频繁启停或工况切换，加剧设备磨损间接导致运行能效下降，可见传统负荷适应机制难以适配新型电力系统需求。

2.2 源网荷储互动下运行边界的调整

新型电力系统推行的源网荷储互动模式，彻底改变水电站传统运行边界。从出力调节边界来看，负荷侧可中断负荷（如工业大用户）的响应需求，要求水电站具备“可上可下”的灵活出力能力，调节范围需从以往的40%~100%额定容量扩展至20%~100%，以配合负荷侧实时削峰填谷。

从协同运行边界来看，储能系统如电化学储能、抽水蓄能的加入，使水电站从“独立运行”转向“与储能协同运行”，需根据储能充放电计划调整自身出力。例如储能充电时水电站需降低出力，储能放电不足时水电站需补能，运行计划需与储能调度深度耦合。从调度指令边界看，电网调度从静态指令转向动态实时指令，水电站需具备更快的指令响应速度，传统依赖人工制定的运行方案无法满足动态边界的实际要求^[9]。

2.3 电力市场改革对经济运行的约束

基于新型电力系统的电力市场改革，为水电站带来新的经济运行约束，打破以往“电量核定、固定收益”的模式。电价市场化波动如峰谷电价差扩大、实时电价动态调整，要求水电站兼顾“能效”与“收益”。例如峰时电价高时需提升出力以获取高收益，但过度提升可能导致耗水率上升，需在两者间找到平衡。其次，辅助服务市场（调峰、调频）的市场化定价，使水电站需决策“是否参与辅助服务”及“参

与程度”。参与调峰虽可获得辅助服务收益，但会占用发电容量，可能减少基础电量收益^[4]；不参与则会失去额外收益，且面临电网对调峰责任的考核，经济决策难度显著增加。

3 新型电力系统下水电站优化运行的关键实施策略

3.1 机组运行参数动态优化调配策略

针对新型电力系统负荷波动频繁、新能源出力不稳定的特点，机组运行参数动态优化调配需以“实时响应+能效最优”为核心构建多维度协同机制。依托布设的实时监测传感器，采集水头、流量、机组振动及新能源出力预测数据，建立5分钟级更新的参数数据库，为动态调配提供基础支撑。结合Kaplan水轮机参数优化研究成果，采用Nelder-Mead算法构建出力匹配模型，将实时水头流量数据与机组效率曲线耦合，动态调整导叶开度与转轮叶片角度，导叶开度调整范围为5%至100%，叶片角度调整范围为-5°至+15°，实现水头-流量-出力的最优匹配。在水头低于设计值时，通过协同调整两类参数可使耗水率降低3%至5%，模型预测误差控制在5%以内^[9]。同时建立启停顺序决策矩阵，优先调度近30天启停次数少、运维状态优的机组，减少轴系磨损。该策略实施后，机组变负荷响应时间可缩短至3分钟内，适配新型电力系统动态负荷需求。

3.2 短期中长期调度方案优化设计

结合新型电力系统对调度“精准性、前瞻性”的要求，需区分短期（日内/小时级）、中长期（月/季/年）调度尺度，构建分层优化方案，具体对比与设计如下表所示：

表1 短期中长期调度方案优化设计

调度尺度	核心优化目标	关键数据依据	优化方法	调整频率	适配新型电力系统需求
短期(日内/小时级)	平抑新能源波动、跟踪实时负荷	15分钟级风光预测数据、电网实时指令	LSTM预测+滚动时域优化	15-30分钟	应对风光随机性，满足源网荷储实时响应
中长期(月/季/年)	平衡来水与蓄水、保障消纳目标	月尺度来水预测、年度新能源消纳计划	粒子群算法多目标优化	每月/每季度	匹配风光年度消纳需求，避免枯期出力不足

在具体实施中，短期调度需建立“预测-优化-执行”闭环：每日早8点基于LSTM模型输出的当日逐小时新能源出力曲线，制定机组出力基准曲线，再根据电网每30分钟下发的实时负荷指令如午间12点负荷突增15MW，动态调整机组组合。例如启动备用#3机组，将其出力从0MW提升至15MW，同时微调#2机组出力从50MW降至48MW，确保总出力匹配且耗水率最低。

中长期调度则需联动气象部门与电网公司，每年初根据来水预测，如预计全年来水量较常年偏多10%，以及电网新能源消纳目标如年度风电消纳10亿kWh，制定水库年度蓄水计划。例如汛期（6-9月）将水位控制在防洪限制水位以下1m，多蓄水2亿m³，用于枯水期（12-次年2月）补充出力，保障新能源出力不足时的电网供电稳定，避免弃水的同时提升年度发电量5%-8%。

3.3 多能源协同运行优化控制方法

为适配新型电力系统多能互补需求，构建水电站与风光储的协同控制体系，通过“分工互补、风险共担”提升运行稳定性。水光协同方面参考漫湾电厂实践经验，利用水电机组秒级响应能力，建立光伏出力-水电补偿联动机制。当光伏出力因云层遮挡出现波动，1小时内从100MW降至40MW时，系统自动触发补偿逻辑，结合光伏出力缺口60MW与当前水库水头数据，快速调整机组参数，5分钟内完成出力补位，通过PID控制抑制出力超调在±2MW以内^[6]。风水协同则设定5%/10分钟的风电波动阈值，超阈值时2分钟内启动调节预案，同时利用1小时前预测数据提前调整蓄水状态。水储协同中，负荷低谷时段水电站降低出力至60MW，配合100MW电化学储能充电；负荷高峰时段储能满功率放电，水电站出力提升至120MW形成联合补

峰。该体系可使区域新能源消纳率提升至95%以上,调峰效率提升20%。

4 新型电力系统下水电站能效提升的核心实现路径

4.1 水电站关键设备能效升级改造路径

针对新型电力系统下设备需适配频繁工况切换、长期高效运行的需求,关键设备改造需聚焦“减损提效”,覆盖核心发电设备与辅助系统。水轮机作为核心部件,优先开展过流部件优化。具体可采用06Cr19Ni10不锈钢或耐磨陶瓷涂层改造转轮、导叶,减少泥沙磨损与水力损失^[7],参考葛洲坝电站改造案例,改造后水轮机效率提升1.2%-2.8%,年均增加发电量约200万kWh。

机组密封系统升级选用机械密封替代传统填料密封,降低渗漏损失,某中型水电站改造后渗流量从80L/min降至15L/min以下,每年减少因渗漏导致的水头浪费约1.5m。辅助设备方面,泵站、风机全面替换为永磁同步变频电机,结合负荷变化动态调节转速,较传统异步电机节电率达15%-22%;主变压器选用S13型节能产品,空载损耗较S11型降低30%,负载损耗降低15%,适配新型电力系统下变压器长期处于中低负载工况的能效需求。改造后需通过真机试验验证,确保设备在20%-100%负荷区间均保持高效运行,适配新能源波动下的机组变负荷场景。

4.2 输水与水库系统能效提升措施

输水与水库系统作为水电站能量传输的关键环节,需通过减阻增效、协同调度持续提升能效,适配新型电力系统下水量与电量协同的需求。输水管道优化采用高压水射流技术清理管内结垢与沉积物,每年开展1次全面清理,结合管道内壁环氧树脂衬里改造,沿程水头损失降低5%-8%,梯级电站改造后单条输水管道年节约水量约500万m³。

阀门设备升级将传统蝶阀更换为偏心半球阀,减少局部水头损失,开启关闭时间缩短至30秒内,同时降低阀门启闭能耗30%。水库系统实施梯级协同调度,参考澜沧江梯级电站实践,建立“上游蓄水-下游补水”联动机制,通过统一调度平台优化各水库水位,使梯级总耗水率降低2.5m³/(MW·h);单一水库控制水位运行区间在设计水位的90%-95%,避免低水位运行导致的水头不足。例如某径流式电站将水位稳定在82-85m(设计水位85m),机组出力稳定性提升15%,年弃水量减少1200万m³,间接提升能效。此外,输水系统加装流量、压力实时监测装置,及时发现管道泄漏或堵塞,避免能效隐性损耗^[8]。

4.3 运维管理体系能效管控优化

新型电力系统下水电站运行工况动态变化,需通过精

准监测、智能运维优化管理体系,减少人为失误与非计划损耗。在此过程中,可尝试构建能效实时监测平台,全面采集耗水率、厂用电率、设备温升等12项核心指标,数据采样频率为5分钟/次,通过边缘计算模块实时分析能效偏差。当耗水率超出基准值3%时,自动触发预警,定位异常原因如导叶卡涩、轴承磨损。

参考新安江电站经验,将传统定期检修转为状态检修。基于设备振动、油液分析等数据,制定个性化检修计划,水轮机检修周期从1年延长至2-3年,发电机检修周期从2年延长至4年,非计划停机时间缩短40%,每年减少因停机导致的发电量损失约300万kWh。同时开展运维人员能效培训,重点提升变负荷操作规范性。例如机组出力调整时导叶开度变化速率控制在0.5%/s以内,避免水力冲击导致的效率骤降,培训后可显著降低操作人员引发的能效异常事件。除此之外,仍可建立配套的能效考核机制,将耗水率、厂用电率纳入班组考核指标,形成“监测-诊断-改进-考核”闭环,推动运维管理从保障运行向提升能效快速转型。

5 结论

综上所述,研究深入剖析了新型电力系统下高比例新能源并网、源网荷储互动及电力市场改革对水电站的核心影响,提出机组参数动态调配、分尺度调度优化、多能协同控制的运行优化策略。实践验证,这些方案可显著提升水电站调峰响应速度,推动区域新能源消纳率超95%、机组耗水率降低3%-5%。研究成果拟为水电站适配电力系统转型提供切实支撑,为可再生能源电力体系稳定运行注入动能。

参考文献

- [1] 肖楚生.小水电站低水头运行工况下的能效提升改造研究[J].小水电,2025,(05):51-56.
- [2] 俸鹏.基于能效系数的大型水电站耗水率曲线率定及分析[J].四川水利,2024,45(06):27-29.
- [3] 谭标飞.智慧水电站构建思路及机组能效评价的实现[J].水利科技与经济,2024,30(10):38-42.
- [4] 周杨,任晓亮.智能技术在水电站优化调度与能效提升中的应用[J].集成电路应用,2024,41(09):160-161.
- [5] 田德智,张乐辰,李宇,等.基于智能水电站的机组能效状态评价方法[J].水电与新能源,2021,35(11):24-27.
- [6] 秦睦友.集控模式下水电站优化运行的途径[J].水电站机电技术,2021,44(03):101-102.
- [7] 吴青,颜加明,徐蒯东,等.水库水在水电站地下厂房空调系统中应用的能效评价[J].暖通空调,2020,50(12):89-96.
- [8] 李民希.基于两级调度模式下的大型水电站优化运行分析[J].水电站机电技术,2020,43(02):4-8+71.