

梯级水电站群短期优化运行策略研究

邓 凯

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

摘要: 本文聚焦梯级水电站群短期优化运行策略。阐述其运行核心特性,包括整体性、耦合性与动态性等;明确短期优化运行的核心目标与约束条件。构建以多目标规划为核心的优化模型,制定基准、自适应及多目标协同优化策略。并提出从提升预报精度、建设协同监测与调度平台、构建统一调度机制、提升调度人员专业能力四方面保障策略实施,为梯级水电站群短期优化运行提供理论与技术支持。

关键词: 梯级水电站群; 短期优化运行; 多目标协同; 动态调控

引言: 随着能源需求增长与能源结构调整,梯级水电站群在电力供应中作用愈发关键。其运行涉及多电站协同,面临复杂的水力、电力及生态等多方面因素影响。短期优化运行需兼顾发电效益、供电可靠性、生态安全与运行稳定性等多目标,同时受诸多约束条件限制。研究梯级水电站群短期优化运行策略,对提高水资源利用效率、保障电力稳定供应、维护流域生态平衡意义重大,是当前水电领域的重要课题。

1 梯级水电站群短期优化运行核心理论基础

1.1 梯级水电站群运行核心特性

梯级水电站群运行核心特性体现在整体性、耦合性与动态性三大维度。整体性源于流域水资源的统一径流过程,各电站并非孤立运行,需依托流域水文连通性形成协同运行体系,上游电站泄流直接影响下游电站的来水条件、发电潜力及防洪压力。耦合性体现在水力、电力与经济的多维度关联,水力耦合表现为上下游水位、流量的传递效应,电力耦合体现为梯级整体出力与电网负荷的匹配关系,经济耦合则关联发电收益、水资源利用成本的统筹平衡。动态性主要由短期径流波动性、电网负荷随机性决定,日内及短时段内的径流变化、负荷峰谷交替,要求运行状态需实时调整^[1]。梯级电站还具有多目标兼容性,需兼顾发电、防洪、生态等多元需求,这些特性共同构成了短期优化运行的理论前提与约束基础,也是区别于单站运行的核心特征。

1.2 短期优化运行核心目标与约束条件

梯级水电站群短期优化运行核心目标以经济效益最大化为核心,兼顾供电可靠性、生态安全性与运行稳定性。经济效益最大化主要通过优化出力分配,降低弃水率、提升峰谷电价时段发电占比实现;供电可靠性要求梯级出力精准匹配电网短期负荷需求,保障电力供应连续稳定;生态安全性需满足最小生态流量约束,维系流

域生态平衡;运行稳定性则指向各电站设备工况安全、水位流量在合理区间波动。约束条件涵盖水力、电力、设备与生态四大类:水力约束包括上下游水位限值、河道流量约束及水流传播时间限制;电力约束涉及梯级总出力上下限、与电网的联络线功率约束;设备约束包含机组出力范围、启停次数限制及检修计划要求;生态约束核心为关键断面最小生态流量,同时需符合流域水资源调度管理规定,各类约束相互关联,共同界定优化运行的可行域。

2 梯级水电站群短期优化运行模型构建

2.1 模型构建目标

梯级水电站群短期优化运行模型构建目标需精准对接实际运行需求,以多目标协同优化为核心导向。首要目标是提升能源利用效率,通过科学分配各时段、各电站出力,最大化梯级短期发电总量,降低弃水损失,充分挖掘流域水资源的发电潜力。其次是保障供电质量,确保梯级出力能够动态匹配电网短期负荷变化,平抑负荷峰谷差,减少出力波动对电网稳定的影响,提升供电可靠性。同时,需兼顾生态保护目标,将最小生态流量保障纳入模型目标体系,避免过度发电对流域生态系统造成破坏^[2]。另外,模型还需兼顾运行经济性与安全性,在控制机组运行成本、提升发电收益的基础上,保障各电站水位、流量、机组工况均处于安全阈值内,规避设备故障与水力风险。

2.2 基础数据与预处理

基础数据与预处理是梯级水电站群短期优化运行模型构建的前提,数据质量直接决定模型精度与可靠性。核心基础数据涵盖水文、电力、设备与调度四类:水文数据包括短期径流预报数据、上下游流域雨情水情数据、河道断面流量数据;电力数据包含电网短期负荷预报数据、峰谷电价时段划分数据、梯级电站与电网络络线参数;设

备数据涉及各机组出力特性曲线、启停参数、检修计划、水位与出力限值；调度数据包括流域水资源管理规定、生态流量要求、防洪调度阈值等。预处理环节主要包括数据清洗、标准化与关联性分析：通过异常值剔除、缺失值补全处理水文与负荷预报的误差数据；对不同维度数据进行标准化转换，统一量纲；通过相关性分析识别径流与负荷的时空关联规律，明确上下游电站水力传递参数，构建数据关联矩阵。建立数据实时更新机制，保障短期运行数据的时效性，为模型精准运行提供数据支撑。

2.3 核心优化模型设计

核心优化模型设计以多目标规划为核心框架，结合水力动力学原理与智能优化算法，实现短期运行方案的科学求解。模型结构分为目标函数层、约束条件层与求解算法层三大模块：目标函数层采用加权求和法整合发电效益最大化、弃水损失最小化、供电可靠性最大化等目标，通过动态权重系数平衡各目标优先级；约束条件层嵌入前文界定的水力、电力、设备与生态约束，采用不等式约束与等式约束结合的方式，精准界定可行解范围，其中水力约束通过河道水流传播方程量化上下游水位流量关系，电力约束关联电网负荷平衡方程。求解算法层选用适应性强的智能优化算法，如改进粒子群算法、遗传算法等，针对短期优化的多变量、非线性特性，通过参数寻优实现目标函数最优解求解。模型嵌入实时校正模块，结合短期实测数据动态调整模型参数，提升模型对实际运行场景的适配性，确保优化方案的可行性与有效性。

3 梯级水电站群短期优化运行策略制定

3.1 基准运行策略（确定性场景）

确定性场景下的基准运行策略以短期径流与负荷预报精准为前提，核心是实现梯级出力的最优静态分配与时段匹配。策略制定以日或时段为单位，基于确定性径流预报数据，结合各电站机组出力特性，采用等微增率法进行出力分配，确保梯级总出力最大化且机组运行效率最优。针对电网负荷峰谷特性，实施峰谷差异化出力策略：高峰负荷时段，优先调度效率高、调节性能好的电站满发运行，提升高电价时段发电收益；低谷负荷时段，合理降低机组出力，避免弃水同时保障机组最低稳定运行工况。同时，基准策略需预设水力衔接方案，明确上游电站泄流时段与流量，确保下游电站来水稳定，规避水位大幅波动。另外，基准策略包含常规应急预案，针对设备小故障、小幅径流偏差等常见场景，制定标准化调整流程，为确定性场景下的稳定运行提供标准化指导，同时作为不确定性场景策略制定的基准参照。

3.2 不确定性场景下的自适应策略

不确定性场景下的自适应策略核心是应对短期径流预报误差、电网负荷波动等不确定性因素，实现运行状态的动态调整。策略采用“预测-决策-校正”闭环框架：基于概率径流预报与负荷概率分布，构建多场景预测集，量化不确定性因素的波动范围与概率特征；针对不同场景预设差异化出力方案，采用鲁棒优化方法确定方案的可行区间，确保方案对不确定性的包容度。实时运行中，通过监测上下游实际径流、电网实时负荷与预报值的偏差，启动自适应校正机制：当偏差较小时，微调各电站出力分配；当偏差超出阈值时，动态调整机组启停组合、泄流计划，同时联动电网调度部门，保障供电平衡。策略嵌入风险评估模块，实时评估不确定性因素引发的弃水风险、供电缺口风险，通过风险阈值控制实现策略的动态优化，提升短期运行的抗干扰能力^[3]。

3.3 多目标协同优化策略

多目标协同优化策略聚焦发电、生态、防洪等多元目标的平衡协调，突破单一发电目标的局限，实现梯级运行的综合效益最大化。策略构建多目标优先级动态调整机制：常规时段以发电效益与供电可靠性为核心，兼顾生态流量保障；汛期优先保障防洪安全，合理调控库容预留防洪空间，同时统筹发电需求；枯水期强化水资源高效利用，降低弃水损失，保障生态基流。在出力分配上，采用分层优化方法：上层明确各目标的约束阈值与权重系数，下层基于梯级水力耦合关系，优化各电站各时段的出力方案。针对生态目标，通过精准调控关键断面流量，保障流域生态系统的基本用水需求，避免发电与生态的冲突；针对防洪目标，结合短期暴雨预报，提前调整库容，实现防洪与发电的协同。

4 优化策略的保障措施

4.1 短期径流与负荷预报精度提升

短期径流与负荷预报精度是优化策略有效实施的核心前提，需从数据采集、模型优化、误差校正三方面构建保障体系。数据采集环节，完善流域水文监测网络，增设雨量站、水位站等监测站点，实现径流数据的实时采集与传输；整合电网负荷历史数据、气象数据、经济运行数据，构建负荷影响因素数据库。模型优化方面，采用机器学习与传统水文模型结合的混合预报模型，如LSTM与新安江模型耦合，提升径流预报的时效性与精度；针对负荷预报，结合用户用电特性、气象因素、节假日效应，优化负荷预测模型参数，增强模型对负荷波动的适配性。误差校正环节，建立实时误差分析机制，通过滚动预报更新预报结果，采用卡尔曼滤波等方法对预报

误差进行动态校正；构建预报精度评估指标体系，定期对预报模型进行校验与优化，同时加强预报人员的专业培训，提升预报数据的解读与应用能力，为优化策略制定提供精准的数据支撑。

4.2 梯级协同监测与调度平台建设

梯级协同监测与调度平台建设旨在实现梯级水电站群运行数据的集中管控与调度指令的高效传达，为优化策略实施提供技术支撑。平台构建“监测-分析-决策-执行”全流程闭环架构：监测层面整合水文、电力、设备、生态等多维度数据，通过物联网技术实现数据的实时采集、传输与存储，保障数据的时效性与完整性；分析层面嵌入数据挖掘与水力电力耦合分析模块，实时解析运行状态与优化策略的匹配程度，识别运行风险；决策层面集成优化模型求解模块，能够根据实时数据快速生成优化调度方案，支持调度人员的决策分析；执行层面实现调度指令的精准下达与实时反馈，联动各电站的监控系统，确保指令有效执行。同时，平台具备可视化展示功能，通过图表、地图等形式直观呈现梯级运行状态；强化平台的稳定性与安全性建设，采用冗余备份、加密传输等技术，保障平台持续稳定运行，实现梯级运行的协同管控。

4.3 梯级统一调度机制构建

梯级统一调度机制构建旨在打破各电站分散调度的壁垒，实现梯级运行的统筹协调，保障优化策略的顺利实施。机制建设需明确调度主体与权责划分，成立梯级统一调度中心，赋予调度中心统筹规划、指令下达、协调监督的核心职能，明确各电站、电网部门、水利部门的权责边界，避免多头管理引发的运行冲突。建立常态化协调沟通机制，定期召开调度协调会议，通报梯级运行状态、预报数据、优化策略实施情况，协调解决运行中的矛盾问题；建立跨部门联动机制，加强与电网调度、水利管理、生态环保等部门的协同，确保调度策略符合各部门的管理要求。完善调度规则体系，制定梯级短期运行调度规程，明确优化策略的实施流程、应急处置流程、考核评价标准；建立调度效果评估机制，定期对调度方案的实施效果进行评估，动态优化调度规则，提升统一调度的科学性与权威性。

4.4 调度人员专业能力提升

调度人员的专业能力直接影响优化策略的实施质量，需构建系统化的培训与提升体系。培训内容聚焦核心专业知识与实操技能，包括梯级水电站群水力耦合原理、短期优化运行模型原理、协同调度平台操作、应急处置流程等；结合实际运行案例，开展情景模拟培训，提升调度人员应对不确定性场景的决策能力^[4]。建立常态化培训机制，定期组织内部培训、外部交流、专家讲座等活动，及时传递最新的调度技术、管理规范；鼓励调度人员参与科研项目，提升对优化模型、预报技术的理解与应用能力。完善考核与激励机制，将调度人员的专业能力、调度方案实施效果纳入考核体系，设立专项奖励，激发调度人员的学习积极性与工作责任心。同时构建知识共享平台，促进调度人员之间的经验交流与知识传承，打造一支专业素养高、实操能力强的调度团队，保障优化策略的有效落地。

结束语

梯级水电站群短期优化运行策略研究，通过深入剖析运行特性、目标与约束，构建科学合理的优化模型，制定针对性运行策略，并从多方面提出保障措施。该研究有助于提升梯级水电站群运行的综合效益，实现能源、经济与生态的协调发展。未来，随着技术进步与实际需求变化，还需持续优化策略，以更好地适应复杂多变的运行环境，推动梯级水电站群可持续发展。

参考文献

- [1]赵珍玉,张一,李刚,李秀峰,蒋燕,周彬彬,程春田.风电并网条件下的梯级水电站长期优化调度[J].水力发电学报,2020,39(12):62-75.
- [2]张验科,刘源,纪昌明,张佳新.考虑水流时滞的梯级水电站水库群短期发电优化调度[J].电力系统自动化,2020,44(06):45-51.
- [3]吴慧军,李树山,唐红兵,等.耦合调峰与通航需求的梯级水电站群短期多目标优化调度的MILP方法[J].电力自动化设备,2024,44(1):103-110.
- [4]闻昕,刘凡,谭乔凤,等.复杂水利-电力约束下梯级水电站短期多层次多目标优化调度研究[J].水利学报,2023,54(4):392-404.