

水电站调度优化中的数学模型与算法研究

李林春

152629*****4090

摘要: 水电站调度优化是水资源高效配置与能源稳定供给的关键环节, 对促进能源结构转型和实现“双碳”目标具有重要现实意义。当前, 水电站调度面临水文条件多变、电力需求波动及生态约束增强等多重挑战, 传统调度模式已难以满足精准化要求。本文以水电站调度优化为核心, 系统梳理调度过程中的目标与约束, 深入研究不同场景下的数学建模方法。通过对比分析各类优化算法的求解性能, 明确模型与算法的适配规律, 为提升水电站调度的经济性、科学性提供理论支持和实践方法。

关键词: 水电站调度优化; 数学模型; 算法设计; 水资源利用; 能源效率

DOI: 10. 64216/3104-9664. 25. 02. 068

引言

能源短缺与生态保护的双重挑战, 推动水电站调度从经验驱动向科学优化转型。传统调度依赖人工判断, 在应对复杂水文序列、动态电力负荷及严格生态要求时, 常出现资源浪费或调度失准问题。水电站作为清洁低碳能源的重要载体, 其调度优化直接影响能源系统效率与水资源利用水平。数学模型能精准刻画调度系统的内在关系, 算法则为求解优化问题提供有效路径。因此, 开展数学模型与算法的针对性研究, 是解决当前调度困境、推动水电站智能化发展的重要举措, 对行业高质量发展具有深远意义。

1 水电站调度优化的核心需求与约束体系

1.1 多元目标导向

水电站调度优化的目标体系呈现明显的多元性特征, 各目标既相互关联又存在一定冲突。发电效益最大化是水电站运营的基础目标, 直接关系到企业的经济效益和能源供给能力, 需通过合理安排机组运行方式实现发电量与供电质量的提升。防洪减灾是水电站的重要社会职能, 尤其在汛期, 需通过科学调度预留防洪库容, 有效拦蓄洪水, 保障下游区域人民生命财产安全。灌溉供水目标则与农业生产和民生需求紧密相关, 需根据农作物生长周期和居民用水规律, 保障稳定的供水量。

1.2 关键约束因素

水电站调度优化过程中, 受到多种约束因素的限制, 这些约束可分为硬性约束和柔性约束两类。硬性约束是保障水电站安全稳定运行的基本前提, 具有不可突破的特性。水文径流极限约束由自然水文条件决定, 水电站

的来水量和出库量必须在径流允许范围内, 避免出现断流或洪水漫溢等情况。水库库容限制是基于水库物理结构的约束, 调度过程中需确保库水位在正常蓄水位和死水位之间波动, 防止对水库大坝造成安全隐患。机组出力范围约束则与发电机组的性能相关, 每个机组的发电功率都有明确的上限和下限, 不能超出其运行能力。

1.3 动态变化特征

水电站调度环境处于持续动态变化中, 多种因素共同作用导致调度条件的不确定性。气候变化是影响调度环境的重要自然因素, 全球气候变暖导致极端天气事件频发, 使得水文径流序列呈现出更强的随机性和波动性, 给径流预测和调度方案制定带来困难。电力负荷波动是典型的人为因素影响, 随着社会经济发展和人们生活方式改变, 电力需求在一天内不同时段、一年中不同季节都会出现明显变化, 尤其是工业用电和居民生活用电的峰谷差异显著。

2 水电站调度优化的数学模型构建

2.1 单目标调度模型

单目标调度优化模型以单一核心目标为核心, 模型结构相对简洁, 求解过程高效, 在特定调度场景中具有较强的实用性。针对发电效益最大化这一最常见的单目标, 模型构建需以水文径流预测数据为基础, 结合发电机组的效率特性, 建立发电量与入库流量、机组出力之间的数学关系。通过合理分配各时段的机组出力, 实现整个调度周期内发电效益的最大化。在防洪安全为首要目标的场景中, 模型则以汛限水位为核心约束, 结合流域防洪标准和洪水演进规律, 构建水库水位与泄洪量的关系模型。通过提前预泄和错峰调度等方式, 确保在洪

水来临时水库能够有效拦蓄洪水，保障下游安全。单目标模型能够聚焦核心需求，快速给出明确的调度方案。

2.2 多目标调度模型

多目标调度优化模型能够综合考虑水电站调度的多元需求，是当前调度模型研究的重点方向。该模型基于多目标规划理论，将发电、防洪、灌溉、生态等多个目标同时纳入模型框架，通过科学的方法处理目标间的冲突关系。加权求和法是常用的多目标处理方法，根据各目标的重要程度赋予相应权重，将多目标问题转化为单目标问题进行求解。理想点法则是设定各目标的理想值，通过最小化实际解与理想点之间的距离来寻找最优调度方案。构建多目标模型时，需全面融合各类约束条件，确保模型的可行性。

2.3 随机与鲁棒模型

针对水电站调度环境中普遍存在的不确定性因素，随机调度模型与鲁棒调度模型应运而生，为应对复杂调度场景提供有效工具。随机调度模型主要用于处理具有概率分布特征的不确定性因素，如水文径流、电力负荷等。通过收集历史数据并进行统计分析，确定这些随机变量的概率分布函数，将其融入模型构建中，使调度方案能够适应不同概率场景的需求。鲁棒调度模型则更侧重于应对极端不确定性场景，如特大洪水、突发电力负荷增长等。该模型不依赖于变量的概率分布，通过构建最坏情况场景，确保调度方案在极端条件下仍能满足基本运行要求，提升调度系统的抗干扰能力和稳定性。

3 水电站调度优化的核心算法设计与分析

3.1 传统算法应用与改进

线性规划、动态规划等传统优化算法在水电站调度优化领域应用历史悠久，技术相对成熟。线性规划算法适用于目标函数和约束条件均为线性的调度问题，能够快速求解得到最优解，在简单的单目标调度场景中应用广泛。动态规划算法则在处理多阶段决策问题方面具有优势，能够将复杂的调度问题分解为多个相互关联的子问题，逐步求解得到全局最优解。然而，动态规划算法在处理多水库联合调度等复杂问题时，容易出现“维数灾”现象，即随着水库数量增加，计算量呈指数级增长，导致求解效率大幅降低。

3.2 智能算法适配与优化

遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法等智能优化算法，凭借其强大的全局寻优能力，在水电站调度优化中得到越来越多的应用。这些算法具有不依赖问题数学

性质、鲁棒性强等特点，能够有效求解调度问题中常见的非线性、多约束、非凸等复杂问题。在实际应用中，需结合具体调度问题的特征对智能算法进行适配与优化。针对调度问题的目标函数和约束条件，设计合理的适应度函数，确保算法能够准确评价解的优劣。同时，对算法的迭代规则进行优化，如调整遗传算法的交叉概率和变异概率、优化粒子群算法的惯性权重等，以平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力，提升求解精度与效率，避免算法陷入局部最优解。

3.3 混合算法构建与优势

传统优化算法与智能优化算法各有优势与不足，基于算法间的互补性构建混合求解框架，成为调度优化算法研究的重要方向。传统算法如线性规划、牛顿法等在局部搜索方面具有精度高、收敛快的优势，能够快速逼近最优解附近区域。智能优化算法则在全局寻优方面表现突出，能够有效探索整个解空间，避免错过全局最优解。混合算法通常采用“智能算法全局搜索+传统算法局部优化”的模式，先通过智能算法在解空间内进行广泛搜索，找到较优的解区域，再利用传统算法在该区域内进行精细搜索，得到更精准的最优解。

4 模型与算法的适配性评估体系

4.1 评估指标构建

模型与算法的适配性评估需要科学合理的评估指标体系作为支撑，评估指标的构建需遵循科学性、系统性与实用性原则。科学性原则要求指标能够准确反映模型与算法的本质性能，符合调度优化的客观规律。系统性原则要求指标体系涵盖模型与算法性能的各个方面，形成完整的评价维度。实用性原则要求指标定义清晰、数据易于获取，便于实际操作与应用。基于这些原则，评估指标体系通常包括多个核心维度。求解精度是衡量算法性能的重要指标，反映了求解结果与理论最优解的接近程度。计算效率通过计算时间和迭代次数来体现，关系到算法的实际应用价值。稳定性则考察算法在不同初始条件下的求解一致性。

4.2 场景适配性分析

不同水电站调度场景具有不同的特征，对模型与算法的要求也存在差异，因此开展不同场景下的适配性分析至关重要。常见的调度场景包括单一水电站调度、流域梯级水电站联合调度、丰水期调度、枯水期调度等。针对这些不同场景，可建立场景匹配矩阵，明确各场景的核心特征的目标、约束条件、不确定性程度等。在此

基础上,分析不同模型与算法在各场景下的适配效果。例如,单目标模型适用于目标明确的单一水电站调度场景,多目标模型则更适合梯级水电站联合调度等复杂场景;传统算法在简单场景中求解效率更高,智能算法则在不确定性强的复杂场景中更具优势。

4.3 适配性优化策略

基于适配性评估结果,针对模型与算法适配性不足的问题,提出针对性的调整策略与优化路径,是提升调度优化效果的关键环节。模型层面的优化主要包括参数调整和结构重构。参数调整通过修改模型中的关键参数,如目标权重系数、约束边界值等,使模型更符合当前调度场景的需求。当参数调整无法满足适配要求时,需进行模型结构重构,如增加或减少目标函数、调整约束条件的表达形式等。算法层面的优化可从算法结构和参数设置两方面入手,如改进算法的迭代机制、调整算法的控制参数等。整个优化过程遵循“模型重构—算法改进—效果验证”的闭环路径,通过不断迭代优化,提升模型与算法的适配性,确保调度方案的科学性与合理性。

5 调度优化技术的发展趋势与创新方向

5.1 大数据与 AI 融合

大数据与人工智能技术的快速发展,为水电站调度优化带来了新的发展机遇,两者的融合应用成为调度技术创新的重要方向。大数据技术能够对海量的水文监测数据、电力负荷数据、气象数据等进行高效处理与深度分析,挖掘数据中隐藏的规律和关联,为调度决策提供数据支撑。通过大数据分析,可以提高水文径流预测和电力负荷预测的精度,减少调度过程中的不确定性。人工智能算法如神经网络、深度学习等与传统调度模型的融合,能够实现调度模型的自适应与自学习能力。利用人工智能算法对模型参数进行动态调整,使模型能够适应不断变化的调度环境,提升调度优化的实时性和准确性,推动水电站调度向智能化方向发展。

5.2 多能源协同调度

在“源网荷储”一体化发展的背景下,单一能源的调度模式已难以适应能源系统发展需求,水电站与风电、光伏等新能源的协同调度成为技术突破的重点。风电和光伏能源具有间歇性、波动性的特点,大规模并网会对电力系统的稳定性造成影响。水电站具有调节性能好、响应速度快的优势,能够有效平抑风电和光伏的出力波

动。开展多能源协同调度研究,需建立考虑不同能源特性的协同调度模型,明确各能源的出力分配原则。探索多能源互补场景下的算法创新,针对多能源系统中更为复杂的目标函数和约束条件,设计高效的求解算法。通过协同调度,实现各类能源的优势互补,提升能源系统的整体运行效率和供电稳定性,促进可再生能源的消纳。

5.3 智能决策支持系统

基于数学模型与算法的研究成果,构建智能化调度决策支持系统,是实现调度优化理论落地应用的重要载体。该系统集数据采集、分析、优化、决策于一体,通过实时采集水文、电力、气象等各类数据,为调度优化提供实时数据输入。系统内部集成多种成熟的数学模型和优化算法,能够根据不同的调度场景和需求,自动选择合适的模型与算法进行求解。通过可视化界面,将调度方案以直观的形式呈现给调度人员,辅助调度人员做出科学决策。同时,系统具备调度方案的自动化生成与动态调整功能,能够根据实时数据的变化,快速更新调度方案,提升调度决策的及时性和智能化水平,为水电站的安全高效运行提供有力保障。

6 结论

本文围绕水电站调度优化中的数学模型与算法展开系统研究,梳理了调度优化的核心需求、约束体系及动态环境特征,为模型与算法研究奠定基础。在数学模型方面,分别探讨了单目标、多目标及随机与鲁棒模型的构建方法,各模型适用于不同的调度场景,能够满足多元调度需求。在优化算法方面,分析了传统算法的改进路径、智能算法的适配策略及混合算法的构建优势,形成了较为完整的算法体系。

参考文献

- [1] 陈倩. 梯级水电站运行调度方式优化策略研究[J]. 电力与能源, 2024, 45(06): 723-725.
- [2] 李壮壮. 电力市场环境下梯级水电站多时间尺度优化调度方法[D]. 华南理工大学, 2023.
- [3] 牛文静. 梯级水电站群复杂调度需求多目标优化方法研究[D]. 大连理工大学, 2017.
- [4] 毛忠华, 刘建华. 天生桥一级水电站中长期优化调度研究[J]. 红水河, 2018, 37(02): 12-14.
- [5] 黄河. 水库水电站联合优化调度研究[D]. 郑州大学, 2014.