

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資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; 水資源利用; 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資源利用水平。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.