

水电系统运行优化与动态建模研究

况云儿

大唐陕西发电有限公司水电事业部石泉厂站 陕西 安康 725200

摘要: 本文围绕水电系统运行优化与动态建模展开研究, 首先系统梳理了水电系统运行的核心要素与典型问题; 其次, 构建了考虑水文随机性、机组启停特性、电网安全约束及生态流量要求的精细化动态数学模型; 在此基础上, 提出一种融合滚动时域优化 (RHO) 与改进粒子群算法 (IPSO) 的混合求解策略; 最后, 从多维实际需求出发, 系统阐述所提方法在典型电力与水资源管理场景中的应用价值。研究表明, 该模型与算法体系不仅具备理论严谨性, 更具有广泛的工程适用性, 可为高比例可再生能源电力系统的安全经济运行提供有力支撑。

关键词: 水电系统; 运行优化; 动态建模; 梯级调度; 滚动时域优化; 改进粒子群算法; 生态流量

引言

在全球气候变化加剧与能源结构转型的双重驱动下, 构建以新能源为主体的新型电力系统已成为国家战略。水力发电凭借其零碳排放、快速响应、储能调节等优势, 成为支撑风电、光伏等间歇性电源并网的关键“稳定器”和“调节器”。然而, 传统水电调度多基于确定性水文预报与静态优化模型, 难以应对日益复杂的运行环境: 一方面, 气候变化导致径流过程呈现更强的随机性与极端性; 另一方面, 电网对灵活性资源的需求激增, 要求水电系统具备更精细的分钟级乃至秒级调节能力^[1]。此外, 生态文明建设对河流生态流量、鱼类洄游等提出了刚性约束, 进一步增加了调度决策的维度与难度。因此, 亟需建立能够反映水电系统动态特性的精细化数学模型, 并开发高效鲁棒的优化求解算法, 实现“安全—经济—生态”多目标协同的智能调度。

1 水电系统运行特性与优化挑战

1.1 水电系统基本构成

一个典型的水电系统通常包括以下几个核心组成部分: 水库: 用于蓄水调节, 其库容特性 (日调节、周调节、年调节或多年调节) 直接影响调度灵活性; 水轮发电机组: 将水能转化为电能, 其效率曲线、振动区、启停时间、最小技术出力等物理特性构成运行约束; 引水系统: 包括压力管道、隧洞等, 水流惯性导致水击效应, 影响机组响应速度; 下游河道与生态敏感区: 需保障最小生态流量, 维持水生生态系统健康; 电网连接点: 受电网负荷需求、联络线计划、频率调节等电力系统运行规则约束。

1.2 运行优化面临的主要挑战

水电系统运行优化的复杂性源于其内在的多源不确定性与强非线性特征。(1) 水文不确定性: 入库径流

受降水、融雪、人类活动等多重因素影响, 具有高度随机性与时空变异性, 短期预报误差可达10%–30%, 长期预测更是充满不确定性。(2) 强非线性耦合: 水位–库容、水位–尾水位、水头–发电效率等关系均为非线性函数, 且梯级电站间存在复杂的水力联系 (如水流传播时间、回水影响)^[2]。(3) 多时间尺度协调: 调度需兼顾长期 (年/季)、中期 (月/周)、短期 (日/小时) 乃至实时 (分钟) 多个时间尺度, 各尺度目标与约束存在耦合与冲突。(4) 多目标冲突: 发电效益最大化、防洪安全、供水保障、生态保护、电网支撑等目标往往相互制约, 需进行权衡。(5) 计算复杂度高: 大规模梯级电站群包含数十至上百个决策变量, 传统动态规划易遭遇“维数灾”, 难以满足在线调度时效性要求。

2 水电系统动态优化模型构建

为应对上述挑战, 本文构建一个融合水文随机性、机组动态特性与电网约束的精细化动态优化模型。

2.1 模型假设与符号说明

考虑N座梯级水电站, 调度周期为T (如7天, 每小时1时段, 共168时段);

入库径流采用场景集表示, 共S个代表性场景, 概率为 p_s ;

忽略蒸发、渗漏等次要损失;

机组启停状态为0–1变量, 考虑最小启停时间约束。

主要符号如下:

表1: 符号说明

符号	含义
$I_{i,t}^s$	电站i在时段t、场景s下的入库流量
$Q_{i,t}^s$	电站i在时段t、场景s下的发电流量
$S_{i,t}^s$	电站i在时段t、场景s下的弃水流量
$V_{i,t}^s$	电站i在时段t末的水库蓄水量

续表:

符号	含义
$Z_{i,t}^s$	电站 <i>i</i> 在时段 <i>t</i> 的上游水位
$H_{i,t}^s$	电站 <i>i</i> 在时段 <i>t</i> 的净水头
$P_{i,t}^s$	电站 <i>i</i> 在时段 <i>t</i> 的发电功率
$u_{i,k,t}$	机组 <i>k</i> 在时段 <i>t</i> 的启停状态 (1 = 运行, 0 = 停机)
D_t	电网在时段 <i>t</i> 的负荷需求
R_t^{eco}	时段 <i>t</i> 的最小生态下泄流量要求

2.2 目标函数

以期望发电量最大化为目标, 同时引入惩罚项处理约束违反:

$$\max \sum_{s=1}^S p_s \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t}^s \cdot \Delta t - \lambda_1 \sum_{t=1}^T \max(0, R_t^{eco} - Q_{i,t}^s - S_{i,t}^s) - \lambda_2 \sum_{t=1}^T |P_t^{total,s} - D_t| \right]$$

其中, $P_t^{total,s} = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^s$, λ_1, λ_2 为惩罚系数。

2.3 约束条件

2.3.1 水库水量平衡方程 (动态核心)

$$V_{i,t}^s = V_{i,t-1}^s + (I_{i,t}^s - Q_{i,t}^s - S_{i,t}^s) \cdot \Delta t, \forall i, t, s$$

对于梯级电站, 下游电站入库流量需考虑上游电站下泄及水流传播时间 $\tau_{i,i+1}$:

$$I_{i+1,t}^s = Q_{i,t}^{s,t-\tau_{i,i+1}} + S_{i,t}^s$$

2.3.2 水库水位-库容关系

$$V_{i,t}^s = f_i(Z_{i,t}^s)$$

其中 $f_i(\cdot)$ 为非线性库容曲线, 可通过分段线性化或样条插值处理。

2.3.3 发电功率计算

$$P_{i,t}^s = \rho g \eta_i(Q_{i,t}^s, H_{i,t}^s) \cdot Q_{i,t}^s \cdot H_{i,t}^s / 10^6$$

其中 $\eta_i(\cdot)$ 为综合效率函数, 依赖于流量与水头, 通常通过机组特性曲线拟合为二次或三次多项式。

净水头计算:

$$H_{i,t}^s = Z_{i,t}^s - T_{i,t}^s$$

尾水位 $T_{i,t}^s$ 由总下泄流量决定: $T_{i,t}^s = g_i(Q_{i,t}^s + S_{i,t}^s)$

2.3.4 运行约束

水位限制: $Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t}^s \leq Z_{i,t}^{\max}$

流量限制: $Q_{i,t}^{\min} u_{i,t} \leq Q_{i,t}^s \leq Q_{i,t}^{\max} u_{i,t}$

机组启停约束:

$$\sum_{k=1}^{K_i} u_{i,k,t} \cdot Q_{i,k}^{\min} \leq Q_{i,t}^s \leq \sum_{k=1}^{K_i} u_{i,k,t} \cdot Q_{i,k}^{\max}$$

最小启停时间:

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{on}-1} u_{i,k,\tau} \geq T_{on} (u_{i,k,t} - u_{i,k,t-1})^+$$

2.3.5 生态与电网约束

生态流量: $Q_{i,t}^s + S_{i,t}^s \geq R_t^{eco}$

功率平衡 (简化): $|P_t^{total,s} - D_t| \leq \epsilon$

3 求解算法设计

由于模型包含混合整数、非线性、随机性等特征, 传统方法难以高效求解。本文提出一种滚动时域优化 (RHO) 与改进粒子群算法 (IPSO) 相结合的混合策略。

3.1 滚动时域优化框架

RHO通过将长周期问题分解为一系列重叠的短周期子问题, 每次仅优化未来*M*个时段 (如24小时), 执行首时段决策后滚动推进。其优势在于: 有效处理水文预报不确定性 (仅依赖短期高精度预报); 降低单次优化规模, 提升计算效率; 具备在线反馈校正能力^[3]。

3.2 改进粒子群算法 (IPSO)

标准PSO易陷入局部最优, 尤其在高维非凸空间。本文引入以下改进:

自适应惯性权重:

$$w(t) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot \frac{iter}{iter_{\max}}$$

平衡全局探索与局部开发。

混沌初始化: 利用Logistic映射生成初始粒子, 增强种群多样性。

精英保留与变异机制: 每代保留最优粒子, 并对部分个体进行高斯扰动, 避免早熟收敛。

约束处理: 采用可行性规则 (Feasibility-based Rule) 优先选择可行解; 对不可行解, 按约束违反程度排序。

算法流程如下:

Step 1: 初始化粒子群 (含*Q*、*u*等决策变量)

Step 2: 计算各粒子适应度 (目标函数值)

Step 3: 更新个体最优*pbest*与全局最优*gbest*

Step 4: 更新粒子速度与位置 (应用自适应*w*)

Step 5: 对*gbest*进行局部搜索 (如Nelder-Mead)

Step 6: 若未达最大迭代, 返回Step 2

Step 7: 输出最优调度方案

3.3 整体求解流程

获取最新水文预报 (生成*S*个场景); 设定滚动窗口长度*M* (如24h); 对当前窗口, 调用IPSO求解动态优化模型; 执行首时段调度指令; 推进至下一时刻, 更新状态变量 (实际水位、流量); 重复步骤3-5直至调度周期结束。

4 应用场景

4.1 新型电力系统中的灵活性支撑

在以风电、光伏为主体的新型电力系统中, 电源出力的强波动性与弱可控性对系统平衡能力构成严峻挑

战。水电系统凭借其快速启停、灵活调节与能量时移能力,成为不可或缺的灵活性资源。本文所构建的动态优化模型能够精准刻画机组分钟级爬坡特性与启停约束,在滚动优化框架下实时响应电网调频、调峰及备用需求。特别是在新能源大发导致负电价或低谷时段,模型可通过降低出力甚至临时停机,配合水库蓄水策略,将能量转移至晚高峰释放,实现“削峰填谷”与价值套利。此外,模型对水头-效率非线性的精细处理,有助于在低负荷时段选择高效率运行区间,避免“大马拉小车”造成的能效损失,从而在提供辅助服务的同时最大化自身经济效益。

4.2 多目标协同的流域综合管理

现代流域管理已从单一发电目标转向“水-能-粮-生态”多系统协同。水电调度不再孤立运行,而是需统筹考虑防洪、供水、灌溉、航运与生态保护等多重功能。本文模型通过引入生态流量硬约束与电网偏差软约束,为多目标权衡提供了量化工具。例如,在鱼类繁殖季节,调度方案可主动增加脉冲式下泄以模拟自然洪水过程,促进产卵行为;在干旱年份,则可在保障生态基流的前提下,优先满足城乡供水与农业灌溉需求,适度牺牲部分发电效益。滚动时域机制使得调度中心可根据实时水情与政策优先级动态调整目标权重,实现从“刚性调度”向“弹性协同”的转变。这种以模型为纽带的综合管理范式,有助于提升流域整体韧性与可持续发展能力。

4.3 电力市场环境下的经济调度

随着电力现货市场全面推行,水电企业需以市场主体身份参与竞价。本文方法可直接嵌入日前-日内市场流程:日前阶段基于多场景径流预报优化出力曲线并报价,日内阶段利用滚动更新机制修正计划以捕捉价格波动。模型兼顾启停成本、效率非线性与偏差考核风险,有助于企业在保障履约的同时最大化长期收益,提升市场竞争力^[4]。

4.4 极端气候事件下的应急调度

面对日益频发的极端干旱或暴雨事件,传统调度规则难以应对。本方法通过纳入历史极端情景或气候预测生成风险场景,并结合滚动反馈机制,实现“预泄腾库”“生态保底”等应急策略的动态优化。在灾害发生过程中,系统可依据实时水雨情持续调整运行方式,兼顾防洪安全、供水保障与后续发电潜力,显著增强水电系统在气候变化背景下的韧性与适应能力。

5 结语

本文针对水电系统运行优化难题,构建融合水文、机组动态与生态约束的精细化动态优化模型,并提出RHO-IPSO混合求解策略。该模型与算法兼具理论严谨性与工程适用性,能有效支撑水电系统在新型电力系统灵活性提供、流域多目标协同管理、电力市场竞价运营及极端气候应急响应等多元场景下的高效运行。未来研究可沿四个方向深化:一是融合LSTM或Transformer等深度学习技术,提升短期径流预测精度;二是拓展至水电-风电-光伏多能互补系统,探索联合优化机制;三是引入数字孪生理念,构建智能调度平台;四是探索基于深度强化学习的在线自适应调度策略。水电作为国家能源与生态安全支柱,其智能化、精细化运行水平的提升,将为构建现代能源体系提供有力支撑。

参考文献

- [1] 祁复兴. 水利水电发电站的优化运行与调度策略分析[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (17): 162-164.
- [2] 张迪, 樊博, 彭期冬, 等. 基于机器学习算法的大型水电工程分层取水设施优化运行技术研究[C]// 中国水利学会. 2023中国水利学术大会论文集(第五分册). 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室; 水利部科技推广中心; 2023: 273-284.
- [3] 魏加达, 王卫玉, 张培. 基于非线性建模的水电机组动态特性仿真研究[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(02): 12-17.
- [4] 徐瑞红, 孙学鹏, 刘世英, 等. 水电机组不同建模方法[J]. 云南水力发电, 2021, 37(01): 156-159.