

电网负荷频繁波动下水电站负荷实时调整策略研究

方国华¹,任旭东¹,颜敏²

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 清华大学水利水电工程系)

摘要:针对水电站在电网负荷波动下易出现机组频繁启停及穿越振动区等运行不稳定问题,构建了一种应对电网不同量级负荷波动的负荷实时调整策略。该策略通过电站状态更新、不增减机组、增减机组及全局遍历4个模块,灵活选择参与调整的机组组合;建立以耗水量最小化为目标的负荷优化分配模型,并采用动态规划算法进行求解。以乌江流域东风水电站为例对提出的策略进行了验证。结果表明:优化后电站机组三日启停累计次数和穿越振动区次数分别减少了44.12%和67.21%,总耗水量减少约76万m³;该负荷实时调整策略可有效保证发电需求,显著提高电站运行的经济性与稳定性,从而为水电站在电网负荷频繁波动下的实时调度提供可靠的技术支撑。

关键词:负荷波动;实时调整;负荷分配;动态规划

Real-time load adjustment strategy for hydropower stations under frequent grid load fluctuations//Fang Guohua¹, Ren Xudong¹, Yan Min²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University)

Abstract: To address operational instability issues at hydropower stations, such as frequent unit start-stops and passage through vibration zones, under fluctuating grid loads, a real-time load adjustment strategy was developed to handle grid load fluctuations of varying magnitudes. This strategy flexibly selects the combination of units participating in the adjustment through four modules: power station status updating, maintaining the number of operating units, increasing or decreasing the number of operating units, and global traversal. A load optimization allocation model aimed at minimizing water consumption was established and solved using a dynamic programming algorithm. Taking the Dongfeng Hydropower Station in the Wujiang River Basin as an example, the proposed method was validated. The results indicate that, following optimization, the cumulative number of unit start-stop cycles over three days and the number of instances of crossing the vibration zone decreased by 44.12% and 67.21%, respectively, while the total water consumption decreased by approximately 7.6×10^5 m³. This real-time load adjustment strategy can effectively ensure power generation demand, significantly improve the economic efficiency and stability of hydropower station operations, and thus provide reliable technical support for the real-time dispatch of hydropower stations under frequent grid load fluctuations.

Key words: load fluctuation; real-time adjustment; load allocation; dynamic programming

随着可再生能源的规模化并网以及用电需求的多样化发展,电网负荷波动呈现高频次、大幅度的变化趋势^[1-2]。在此背景下,水电作为我国最成熟且规模最大的可再生能源之一,因其启停灵活、调峰能力强、与出力波动强的风光等新能源存在天然互补优势^[3-4]等特点,其作用正逐步由“电量供应”转向“电网调节”。水电站机组能够根据电网实际用电需求实时调整出力,快速响应电网负荷需求,实现电能供需的平衡^[5]。因此,构建高效、科学的水电站负荷实时分配策略,对于有效应对电网负荷波动,提升电站运行的灵活性和稳定性具有重要意义。

当前,针对水电站负荷实时分配的研究主要聚

焦于电站机组组合选定与负荷优化分配两个方面。在机组组合选定方面,相关学者围绕如何快速应对电网负荷波动、动态调整机组启停状态开展了广泛研究。例如:徐弘玮等^[6]使用预训练的深度学习策略网络快速调整机组启停组合,利用最新环境状态进行推理,在线生成了负荷分配决策;钟青祥等^[7]构建了以耗水量最小、水位平稳为双目标的站内实时负荷优化分配模型,提出了基于组合思想改进的负荷分配总表,以解决构建总表时的维数灾问题;刘瑞等^[8]引入分级振动区理念,使电站在负荷波动下优先将负荷分配至稳定运行区内的机组,通过惩罚机制使负荷分配更倾向于在安全区域运行,

基金项目:国家自然科学基金项目(52179012)

作者简介:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufgh@163.com

牺牲少量经济性以提升整体稳定性。在机组负荷优化分配方面,相关理论与方法研究已相对成熟,且在实际调度中得到了较为广泛的应用。现有负荷分配模型通常遵循“以电定水”优化准则^[9-10],即在既定负荷需求条件下,通过合理分配各机组出力,以耗水量最小化为目标,保障供电稳定性和快速响应能力。针对相关负荷分配模型,研究者已提出多种有效的求解方法。其中,等微增率法^[11]、拉格朗日松弛法^[12]、动态规划法^[13-14]等传统方法已形成较为完善的理论体系。同时,随着大数据分析和云计算平台的兴起,粒子群算法^[15]、蚁群算法^[16]、遗传算法^[17-18]等智能优化算法也被逐步应用于水库调度问题的求解中^[19-22]。

尽管上述研究在提升电站负荷实时响应能力和运行安全性方面取得了一定成果,但仍存在诸多不足。在当前水电站负荷分配模型的研究中,经济性方面侧重于耗水量优化,安全稳定方面则多聚焦于机组振动区,普遍忽略了实时调节过程中的安全稳定影响。一方面,受限于水库调度的复杂性和不确定性,现有研究多集中于短期调度策略的优化,常选用单一的负荷平均分配方法,采用离线计算得到静态负荷分配表,之后在实际运行中通过查表法或经简单在线修正后动态查表的方式,这种方式在面对突发性、大幅度负荷变化时,缺乏完整、科学的实时调整机制,调节精度有限,难以在多机组、复杂约束条件下实现经济性与安全性兼顾的目标。另一方面,在当前电网负荷快速变化、调频调峰任务日益繁重的背景下,水电站在不同量级负荷波动下的实时调节能力尚缺乏系统性研究,响应速度、调节稳定性与运行效益之间的协调机制亟须更加有效的模型和方法支撑。

综上,针对水电站运行过程中的实际需求,结合当前电网负荷日益复杂的发展趋势,本文提出了一种应对不同量级负荷波动的电站负荷实时调整策略,并以乌江流域东风水电站作为工程实例验证了所提策略的实用性与先进性。

1 基于逻辑判断的负荷实时调整策略

在水电站机组的实际运行过程中,一方面,受发电任务波动幅度大、周期长的影响,机组频繁穿越振动区^[23];另一方面,传统的负荷分配模型盲目追求机组总耗水量最小化,容易导致实际运行中机组负荷大面积转移、机组频繁启停。这不仅加速了设备老化,缩短了机组寿命,也对电站的运行稳定性构成了威胁。针对不同量级的电网负荷波动,按照尽量避免负荷转移过大、尽量避免穿越振动区、尽量避免

增减机组3个原则,构建了电站状态更新模块、不增减机组模块、增减机组模块以及全局遍历模块,提出了基于逻辑判断的负荷实时调整策略,流程如图1所示。

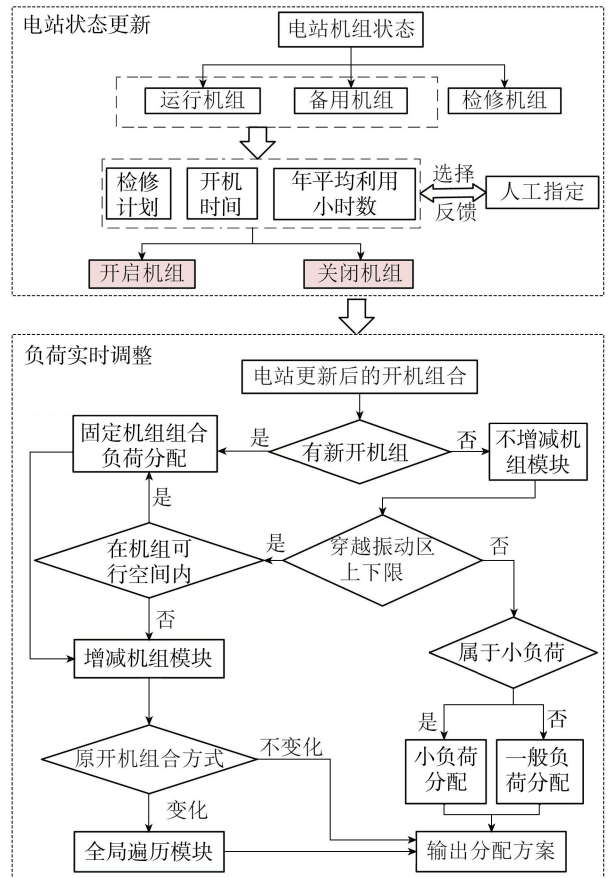


图1 基于逻辑判断的负荷实时调整策略流程

1.1 电站状态更新模块

由于机组状态的约束以及人工指定的选择,负荷调整前需要对当前机组(运行机组、备用机组、检修机组)状态进行更新,开启需要开启的机组,关闭需要关闭的机组。电站状态更新流程包括机组状态实时分析以及人工指定更新两个单元。

1.1.1 机组状态实时分析

根据机组的状态将电站机组分为运行机组、备用机组以及检修机组3个部分。运行机组是指当前正在运行的机组,从检修计划、开机时间、年平均利用小时数3个方面对运行机组进行分析。若机组进入检修计划,则需要关闭;若不在检修计划内,且开机时间小于最小开机时间,则机组需要继续开启;若开机时间大于最小开机时间,按照机组的年平均利用小时数判断开机或关机的优先级。备用机组是指当前关闭且不在检修计划内的机组。通过关机时间对备用机组进行分析,若关机时间小于最小关机时间,则机组需要关闭;若关机时间大于最小关机时间,则机组可以开启,此时根据备用机组的年平均利

用小时数判断开机或关机的优先级。检修机组在检修计划内,机组需要关闭。

1.1.2 人工指定更新

将机组状态约束下更新得到的机组组合反馈给人工进行指定更新,开启人工指定需要开启的机组,关闭机组状态约束下需要关闭以及人工指定需要关闭的机组,完成电站状态更新。

1.2 不增减机组模块

在电站实际运行过程中,机组的启停会造成耗水量额外增加,更新后的机组组合若能够分配下达的负荷要求,则不增减机组。不增减机组模块流程如图2所示,根据发电任务变化计算负荷波动,不增减机组模块可分为以下3种工况。

1.2.1 负荷波动较小,各机组不穿越振动区

此时若仍然按照常规方法操作可能会造成机组负荷大范围转移,电站实际调度难度和经济收益不平衡,因此提出以下实时调整策略:

当负荷波动在人工设定的小负荷阈值内时,若开机机组型号一致,负荷上升时按开机时间由短到长设定优先级,保证快速进入高效率区;负荷下降时按开机时间由长到短设定优先级,有利于及时关闭疲劳机组。若不一致,以单位耗水量为依据设定优先级,优先分配至耗水少的机组。按优先级排序机组后,选择尽可能少的机组承担负荷变化,若一台机组能够承担,则将变化负荷全部加在这一台机组上,否则增加到下一个优先级机组,以此类推。如果机组负荷波动范围不穿越振动区的界限且在设定的小负荷阈值外时,则按一般负荷来分配,采用固定机组组合下的负荷优化分配方法,具体见第2节。

1.2.2 负荷波动超出机组振动区上下限,但仍在机组出力可行空间内

此时理论上机组出力需要穿越振动区,但为了避免发生机组频繁穿越振动区的情况,需考虑负荷未来趋势变化,具体实时调整策略为:当前电网要求

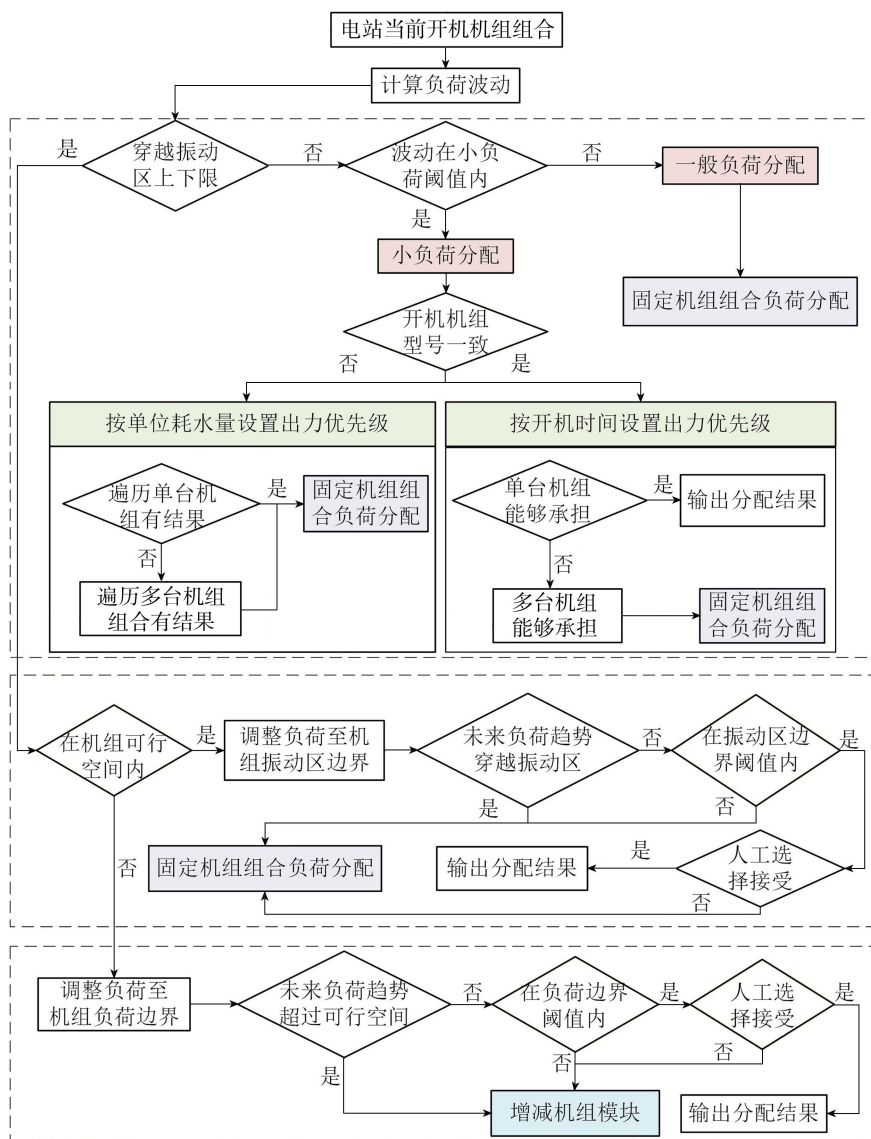


图2 不增减机组模块流程

电站增减负荷,但未来负荷没有相同的变化趋势,此时将所有机组负荷调至对应变化振动区边界,比较此时总负荷与电网要求负荷的差值,若差值在设定的振动区边界阈值内时按照此方案运行,否则采用固定机组组合下的负荷优化分配方法。

1.2.3 负荷波动超出当前机组组合的出力可行空间

此时理论上应增减机组,但为了避免机组频繁启停,同样考虑负荷未来趋势变化,具体实时调整策略为:当前电网要求电站增减负荷,但未来负荷没有相同的变化趋势,此时将所有机组负荷调至对应变化负荷边界,比较此时总负荷与电网要求负荷的差值,若差值在设定的负荷边界阈值内时按照此方案运行,否则根据实际情况,转入增减机组模块。

1.3 增减机组模块

在保证原开机机组启停状态不变的前提下,增减机组模块流程如图3所示。

1.3.1 负荷上升调整方案

当负荷波动上升时,首先判断可开启机组的型号是否一致,若不一致则遍历所有可行的开机组组合,

分别调用固定机组组合下的负荷优化分配方法;若一致则按照关机时间长短设定优先级,优先选择关机时间长的机组开启,直到负荷需求在机组可行出力空间内,之后进行固定机组组合下的负荷优化分配。

1.3.2 负荷下降调整方案

当负荷波动下降时,首先判断当前可关闭机组的型号是否一致,若不一致则遍历所有可行的关机组合,分别调用固定机组组合下的负荷优化分配方法;若一致则按照开机时间长短设定优先级,优先选择开机时间长的机组关闭,直到负荷要求在机组可行出力空间内,之后进行固定机组组合下的负荷优化分配。

1.4 全局遍历模块

上述增减机组模块是在维持原开机机组启停状态的基础上,调整其他机组,例如需要增加机组时,保证原开机机组不动,选择原关闭的机组进行开启。然而由于某些负荷的特殊性,使得需要大面积调整机组才能满足系统负荷需求,此时应调用全局遍历

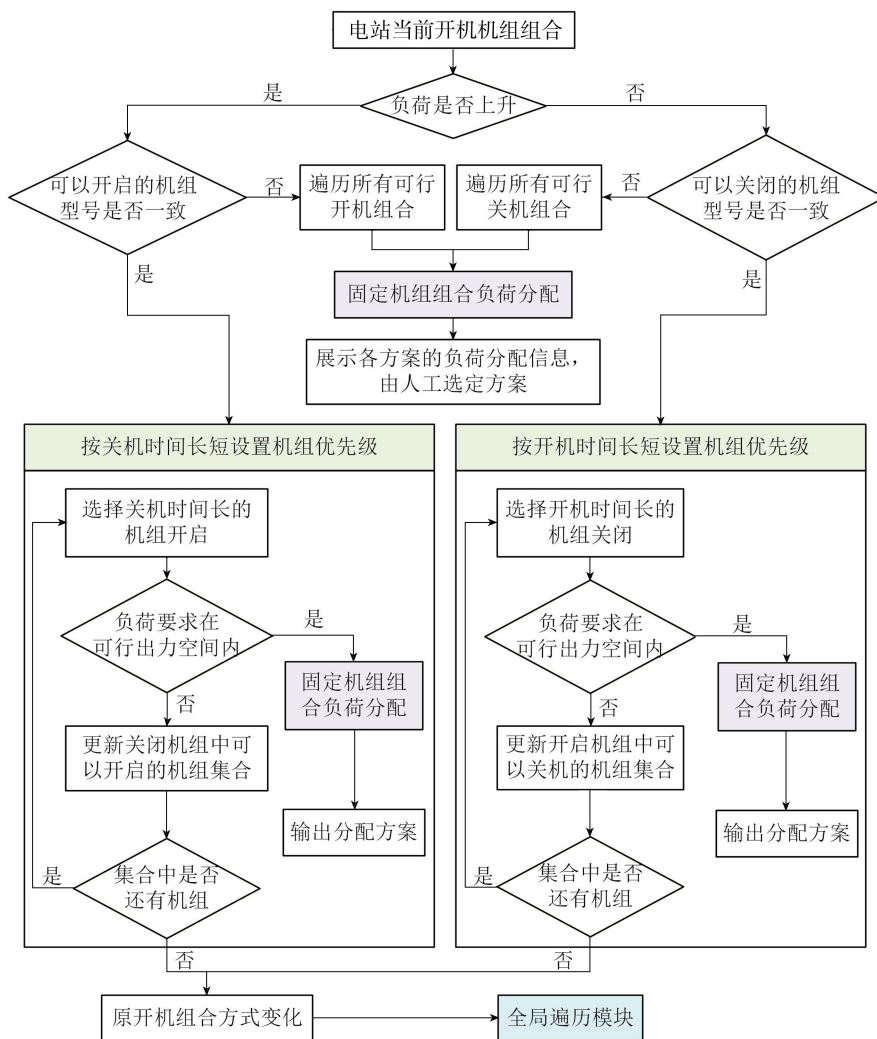


图3 增减机组模块流程

模块,该模块在遍历机组组合时可以改变原开机机组的启停状态,然后分别采用固定机组组合下的负荷优化分配方法,输出分配结果供人工进行选择。

2 固定机组组合下的负荷优化分配

2.1 负荷优化分配模型

采用“以电定水”优化准则,即在已知电站总出力需求的前提下,以发电耗水量最小化为目标,制定最优的负荷分配方案。该方案需综合确定机组的启停顺序、组合方式、投运机组数及各机组的具体出力分配。水电站优化目标可从空间维度与时间维度^[24]两个层面进行探讨,通过协调时间与空间两个维度的优化策略,可显著提高电站的整体运行经济性与水资源利用效率。

2.1.1 目标函数

在已选定的固定机组组合之间进行负荷的优化分配,以耗水流量最小为目标函数:

$$Q_t = \min \sum_{k=1}^N [X_{kt}Q_{kt} + X_{kt}(1 - X_{k,t-1})Q_{o,k} + X_{k,t-1}(1 - X_{kt})Q_{C,k} + C_k Q_{\Lambda,k}] \quad (1)$$

式中: Q_t 为 t 时段系统总最小耗水流量; N 为机组台数; X_{kt} 为第 k 台机组在 t 时段的开机状态,开机取1,关机取0; Q_{kt} 为 t 时段内第 k 台机组的耗水流量; $Q_{o,k}$ 、 $Q_{C,k}$ 分别为第 k 台机组的开机和停机惩罚流量; C_k 为第 k 台机组时段内负荷波动的穿越振动区次数; $Q_{\Lambda,k}$ 为第 k 台机组穿越振动区的惩罚流量。

2.1.2 约束条件

a. 电力系统约束:

$$\sum_{k=1}^N N_{kt} = N_{F,t} \quad (2)$$

式中: N_{kt} 为第 k 台机组在 t 时段的出力; $N_{F,t}$ 为 t 时段的电站发电任务。

b. 水库特性约束,包括水库水量平衡约束、库容曲线约束、库水位约束:

$$V_t = V_{t-1} + (Q_{R,t} - Q_{X,t})\Delta t \quad (3)$$

$$Z_{t+1} = f_{ZV}(V_{t+1}) \quad (4)$$

$$Z_{t+1,\min} \leq Z_{t+1} \leq Z_{t+1,\max} \quad (5)$$

式中: V_t 为 t 时段水库水量; $Q_{R,t}$ 为 t 时段水库入库流量; $Q_{X,t}$ 为 t 时段水库出库流量(包括弃水流量); Δt 为时段长度; Z_{t+1} 为 t 时段末水库水位; $f_{ZV}(\cdot)$ 为库容曲线函数; $Z_{t+1,\min}$ 、 $Z_{t+1,\max}$ 分别为 t 时段末水库允许最低和最高水位。

c. 水电站特性约束,包括机组水头限制、机组出力限制、机组发电流量约束:

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (6)$$

$$N_{k\min} \leq N_{kt} \leq N_{k\max} \quad (7)$$

$$Q_{k\min} \leq Q_{kt} \leq Q_{k\max} \quad (8)$$

式中: H_{\min} 、 H_{\max} 分别为维持电站稳定运行的最小和最大水头; H 为电站的计算水头; $N_{k\min}$ 、 $N_{k\max}$ 分别为第 k 台机组的最小和最大限制出力; $Q_{k\min}$ 、 $Q_{k\max}$ 分别为第 k 台机组的最小和最大发电流量。

d. 爬坡能力约束:

$$|N_{kt} - N_{k,t-1}| \leq \Delta P_k \quad (9)$$

式中: ΔP_k 为第 k 台机组的爬坡能力限制,根据实际机组的特性确定。

e. 启停机时间约束:

$$\begin{cases} T_{C,k} \geq T_{C,k,\min} \\ T_{O,k} \geq T_{O,k,\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{C,k}$ 、 $T_{O,k}$ 分别为第 k 台机组的实际关机和开机时间; $T_{C,k,\min}$ 、 $T_{O,k,\min}$ 分别为第 k 台机组最短关机和开机时间。

f. 振动区内运行约束:

$$(N_{kt} - N_{ktn,\max})(N_{kt} - N_{ktn,\min}) \geq 0 \quad (11)$$

式中: $N_{ktn,\max}$ 、 $N_{ktn,\min}$ 分别为第 k 台机组在 t 时段第 n 个出力的振动区上限和下限。

2.2 基于动态规划算法的模型求解方法

动态规划算法是求解厂内经济运行问题的经典方法,该算法利用最优性原理,将决策问题剖分为前后互相关联的多阶段问题,继而逐个进行解决,并准确找到全局的最优解。

2.2.1 空间维度的单一时段负荷优化分配

a. 阶段与状态变量:采用同一时段机组实际运行台数 k 为阶段变量,所有机组总负荷 S_k 为状态变量。

b. 决策变量与状态转移方程:采用电站各机组承担的时段出力 N_k 为决策变量,以负荷平衡方程为状态转移方程:

$$S_k = S_{k-1} + N_k \quad (12)$$

c. 求解步骤:①根据水头确定各机组的振动区范围,在最小和最大出力之间扣除振动区生成各机组可行出力空间;②以机组总负荷为状态变量,根据各机组的可行出力空间,生成各阶段机组总负荷的范围;③前向状态遍历,设置离散步长,根据可行空间生成负荷离散点,由各阶段机组总负荷范围生成状态离散点,以耗水流量最小为目标,从1号机组往 N 号机组进行遍历搜索;④后向状态回溯,从 N 号机组往1号机组检索最优负荷的分配方案,完成求解。

2.2.2 时间维度下不同时段间机组启停优化

完成时段内负荷分配计算后,继续进行不同时段间机组启停优化计算,具体步骤如下:

a. 取不同优化时段 t 为阶段变量,单一优化时

段机组组合 J_t 为状态变量, 机组启停调整策略 u_t 为决策变量。

b. 将计算时段 t 的状态变量 J_t 与时段 $t-1$ 的状态变量 J_{t-1} 按机组组合标记方式转换为二进制数 X_{kt} , 确定时段决策变量 u_t 后, 计算机组启停、穿越振动区约束设计相应的惩罚流量:

$$Q_{P,kt} = X_{kt}(1 - X_{k,t-1})Q_{0,k} + X_{k,t-1}(1 - X_{kt})Q_{C,k} + C_k Q_{A,k} \quad (13)$$

式中: $Q_{P,kt}$ 为第 k 台机组在 t 时段机组启停和穿越振动区约束总惩罚流量。

c. 将式(1)作为模型目标函数, 重复 2.2.1 节动态规划算法优化不同时段间的机组组合及负荷分配方案。

2.2.3 引入并行策略思想

随着多核技术的发展, 并行策略思想逐渐成为主流。并行策略思想是将一个整体的复杂目标分解成各个子目标, 子目标之间的关联性较弱, 此时便可以利用各个核心建立多个线程, 独立求解各个子目标的解, 最后再将这些解进行优化比较, 最终得到原目标的最优解。与单核串行计算过程相比, 多核并行计算显著提高了计算效率^[25]。

针对不同时段间的负荷分配最优化问题, 由于时段间的结果互相影响, 不易引入并行策略。但对于同一时段的负荷分配优化问题, 由于机组运行时的水库参数相同, 且时段内的发电任务已经确定, 需要遍历的是根据预设步长划分的各机组的实际出力情况, 故可以将遍历的各机组实际出力范围划分为多个部分, 引入并行策略, 同时计算范围内多个决策部分, 并将计算结果暂时存储起来, 待遍历结束后对各出力方案所对应的耗水量进行比较, 从而得出该阶段的最优分配结果。相比传统算法, 引入多核并行策略后, 有效解决了水头、负荷和机组组合之间的重叠耦合计算问题, 增强了模型在复杂工况下的求解能力, 可以在一定程度上避免“维数灾”问题。

3 实例验证

3.1 研究区概况

乌江流域东风水电站位于贵州省境内, 属于不完全年调节水库。电站原装机容量为 3×170 MW, 2004 年初至 2005 年 5 月电站进行了增容改造和扩机工程, 现共装有 4 台混流式水轮发电机组, 机组装

机容量 695 MW (3×190 MW + 1×125 MW), 4 台机组具体参数如表 1 所示, 机组的振动区范围一般与水位相关, 东风水电站机组不同水位下振动区范围已根据现场运行经验得到。

结合电站实际运行工程经验, 拟定开停机惩罚水量为 50 万 $\text{m}^3/(\text{台} \cdot \text{次})$, 穿越振动区惩罚水量为 10 万 $\text{m}^3/(\text{台} \cdot \text{次})$, 机组最小开停机时间拟定为 1 h, 不增减机组模块中小负荷波动阈值设为 10 MW, 未来负荷趋势预测时间定为之后两个时段, 振动区和负荷边界阈值均设为 20 MW。

3.2 结果与分析

选用东风水电站 2018 年 2 月 1 日至 2 月 3 日的实际运行数据进行优化计算, 划分每个时段长 10 min, 每日共 144 个时段, 将每个时段内的实际出力平均值视作各时段的负荷指令, 根据实时调整策略进行出力优化处理, 并运用已建立的负荷优化分配模型进行求解, 测试模型运行效果。

3.2.1 负荷分配及出力优化结果

电站机组出力对比如图 4~6 所示, 优化后的机组出力总体上较实际运行时更平稳, 有效减少了机组频繁启停和穿越振动区的不利情况。机组启停次数和穿越振动区次数的对比结果如下: 东风水电站在三日实际运行中机组启停共 34 次, 优化后机组启停 19 次, 降幅达 44.12% ; 穿越振动区次数包括机组进入、离开振动区的次数, 以及持续在振动区内运行的时段数, 实际运行中共穿越振动区 61 次, 优化后穿越振动区 20 次, 降幅达 67.21% , 其中 2 月 2 日穿越振动区次数减少最多, 达 28 次, 同时该日也是优化结果与实际结果偏差最大的一日, 注意到 1 号机组在当日 8 时至 12 时的实际出力位于振动区内, 主要原因在于该时段电网负荷频率变化较快, 且实际运行中采用的负荷指令为离散点, 导致机组频繁穿越振动区。而在优化过程中, 通过负荷实时调整策略, 避免了此类问题的发生, 保证了机组运行的连续性与稳定性。

负荷分配及总出力对比如图 7 和图 8 所示。东风水电站 2 月 1 日至 3 日绝大部分时段内优化出力和实际出力数值接近, 个别时段出现偏差, 主要原因在于实时调整策略中设定的负荷阈值及机组运行约束的共同作用, 导致优化方案在执行过程中未能完全匹配实际负荷指令。以 2 月 2 日 11 时为例, 优化方案在满足约束条件下给出合理出力, 若按照实际

表 1 东风水电站机组参数

机组	型号	额定出力/MW	单机额定流量/ (m^3/s)	最大工作水头/m	最小工作水头/m	设计水头/m
1~3 号	HLTF12-LJ-410	190	172.36	132	95	117
4 号	HLFN33B-LJ-350	125	115.04	132	95	117

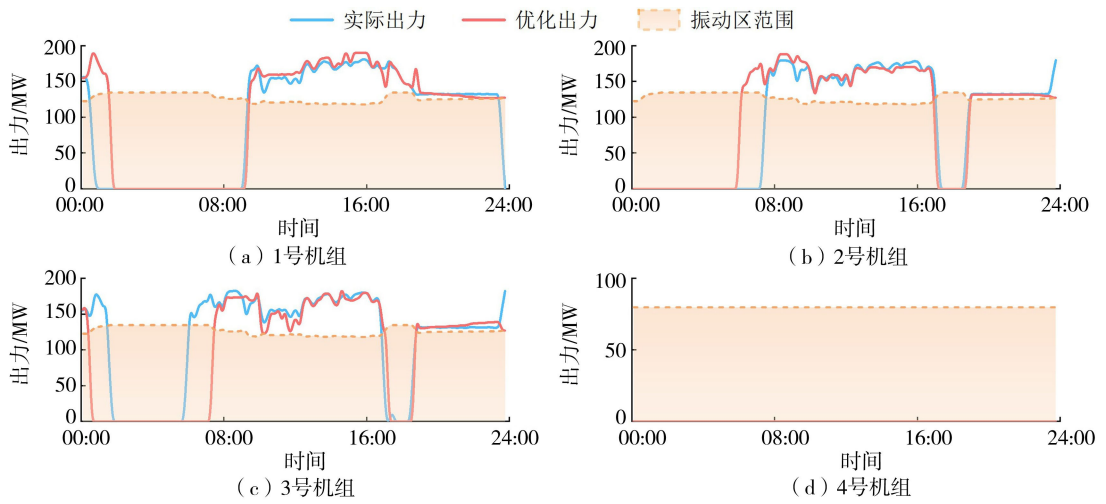


图4 2月1日电站机组出力对比

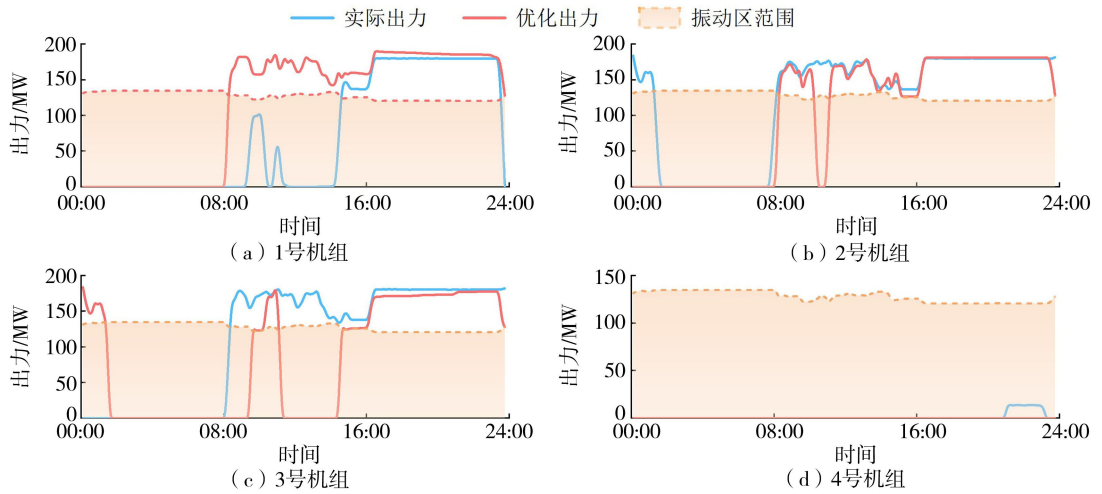


图5 2月2日电站机组出力对比

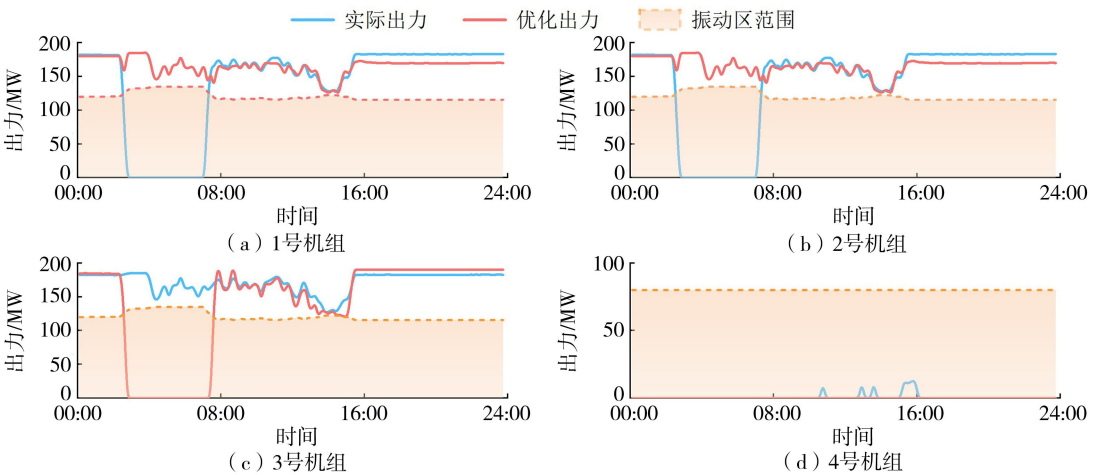


图6 2月3日电站机组出力对比

负荷指令继续加大负荷,将开启2号机组并使其在振动区内运行,为保证机组运行安全,最终选定优化方案出力。尽管如此,优化后的出力仍满足整体发电任务需求,且偏差控制在可接受范围内。

3.2.2 机组耗水流量和末水位结果

根据负荷分配结果,机组耗水流量及水位对比

如图9和图10所示,优化后的机组平均耗水流量整体呈明显下降趋势。统计结果表明,三日实际总耗水量为7748.71万 m^3 ,优化后总耗水量为7672.18万 m^3 ,累计耗水量减少约76万 m^3 ,节水效果显著。与此同时,电站末水位在三日均有所抬升,库容呈持续上升态势,蓄能能力有所提高。

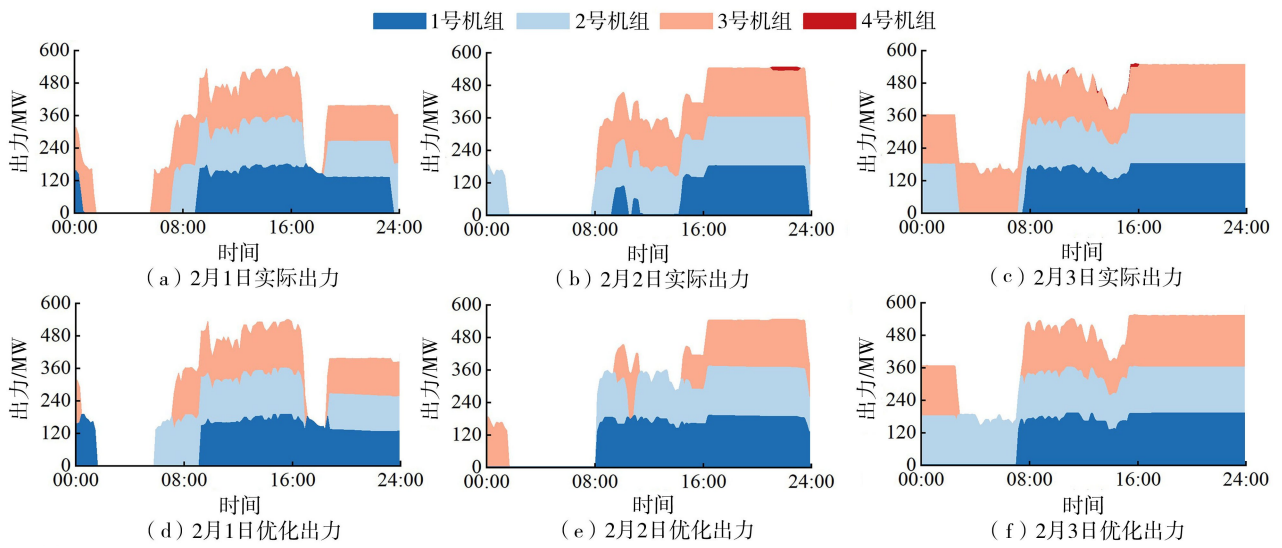


图7 机组负荷分配

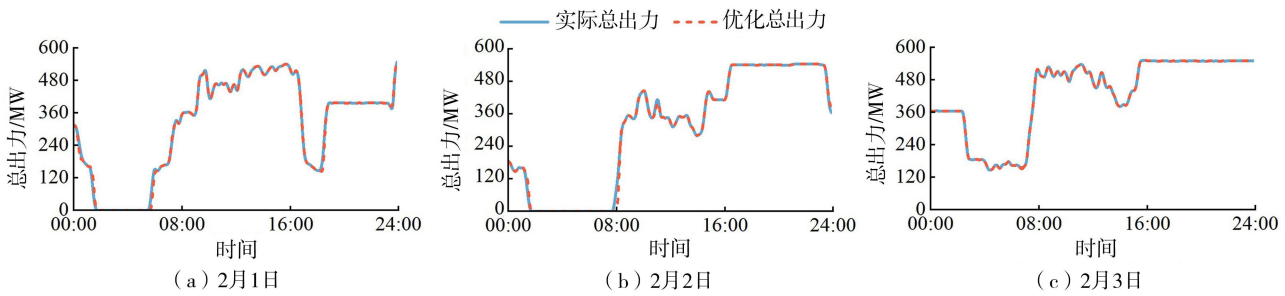


图8 机组总出力对比

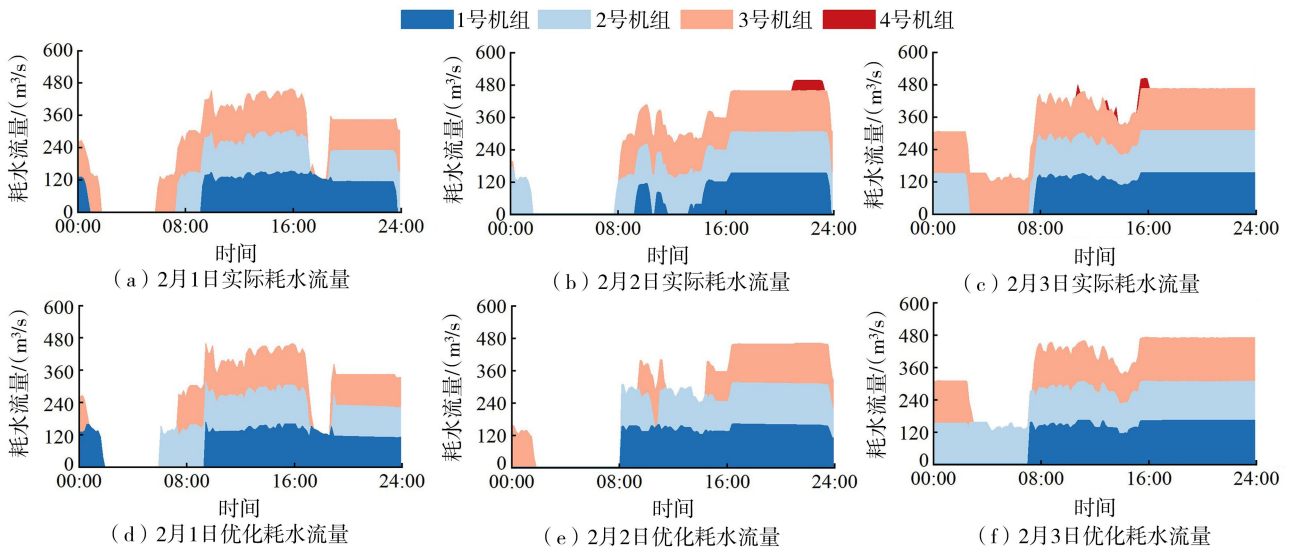


图9 机组耗水流量

3.2.3 不同量级负荷波动优化结果分析

不同量级负荷波动下的平均耗水流量优化结果如表2所示,实时调整策略在多数负荷波动区间均能实现节水效果。具体来看,当负荷波动处于0~40 MW范围时,平均耗水流量减少值在2.66~3.63 m^3/s 之间变化,节水幅度稳定,表明此阶段优化后的机组组合既能避免频繁启停,又能保持较高的水能利用效率。当波动幅度为40~60 MW时,节

水幅度显著提升,主要原因在于原运行方案在此区间的耗水效率较低,优化策略触发了较大规模的机组组合调整,使运行工况大幅向高效率区集中。当波动幅度超过80 MW时,平均耗水流量增加,表明在大幅波动下,受机组爬坡能力、振动区限制及稳定性约束影响,实时调整策略需要维持或启用部分高耗水机组,无法完全匹配最优分配调度方案,需牺牲部分经济性以保障运行安全。整体结果验证了负荷

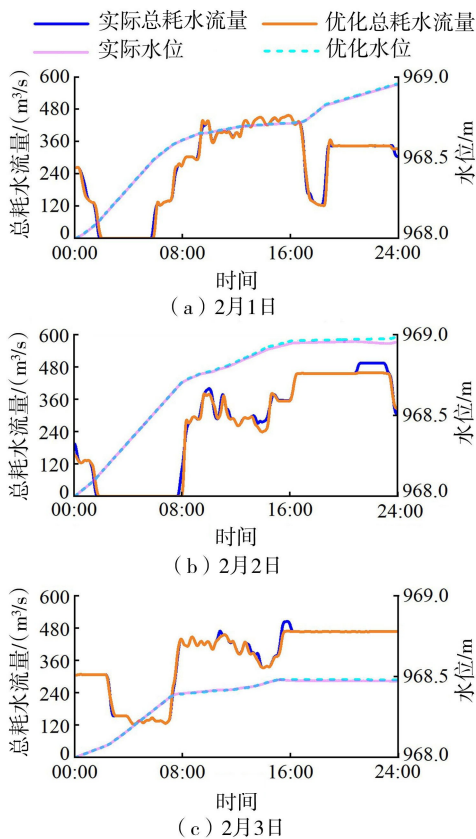


图 10 机组总耗水流量及水位对比

表 2 不同量级负荷波动优化结果

负荷波动 (MW)	0~10	>10~20	>20~30	>30~40	>40~50
平均耗水流量	3.23	2.66	2.87	3.63	11.85
减少值 (m ³ /s)					
负荷波动 (MW)	>50~60	>60~70	>70~80	>80~100	>100
平均耗水流量	37.36	2.58	-1.66	-8.37	-17.57
减少值 (m ³ /s)					

实时调整策略的实用性与先进性,优化效果达到了预期目标。

3.2.4 总体结果分析

优化结果与实际结果的对比如表 3 所示。结果表明:东风水电站 2 月 1 日、2 日、3 日的机组启停次数分别减少了 18.2%、27.3% 和 83.3%,穿越振动区次数分别减少了 35.7%、77.8% 和 72.7%,在完成负荷指令的同时,保证了电站运行的稳定性;总耗水量分别降低了 0.3%、2.4% 和 0.5%,末水位分别增加了 0.003 5、0.029 9、0.008 2 m,提高了电站运行的经济

表 3 优化结果与实际结果的对比

日期	分类	机组启停次数	穿越振动区次数	平均耗水流量/(m ³ /s)	总耗水量/万 m ³	末水位/m
02-01	实际	11	14	265.70	2297	968.9514
	优化	9	9	264.95	2289	968.9549
02-02	实际	11	36	264.93	2289	968.9539
	优化	8	8	258.51	2234	968.9838
02-03	实际	12	11	366.22	3164	968.4729
	优化	2	3	364.52	3149	968.4811

济性。综合来看,所提出的负荷实时调整策略与负荷优化分配模型在减少机组频繁启停和穿越振动区方面优化效果尤为突出,能够快速响应各类负荷波动指令,具有较强的适用性和较高的调度精度,兼顾电站运行的经济性与稳定性。

4 结语

针对机组频繁启停、穿越振动区等问题提出了负荷实时调整策略,通过逻辑判断灵活调整开机组合,并构建了基于动态规划的负荷分配模型,实现了水电站总耗水量最小化目标。乌江流域东风水电站实例结果表明:建立的负荷分配模型能够完成负荷分配任务,各时段优化出力与实际出力基本一致;提出的负荷实时调整策略可在减少机组启停次数和穿越振动区次数、降低耗水量方面进行进一步优化;负荷实时调整策略能够兼顾电站负荷分配过程中的经济性和稳定性,总体达到了预期效果。

未来研究将从当前单个电站负荷分配模型出发,进一步拓展至梯级水电站系统,构建多电站间协同调度与负荷分配机制。通过引入梯级间水量传递与负荷协调关系,可提升模型对实际工况的适应性和系统整体调节能力,为复杂梯级水电系统的实时调度提供理论支持与技术路径。

参考文献:

[1] 张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望[J].中国电机工程学报,2024,44(10):3862-3884. (Zhang Juntao, Cheng Chuntian, Yu Shen, et al. Progress, challenges and prospects of research on hydropower supporting the flexibility of new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3862-3884. (in Chinese))

[2] 周建平,杜效鹤,周兴波.面向新型电力系统的水电发展战略研究[J].水力发电学报,2022,41(7):106-115. (Zhou Jianping, Du Xiaohu, Zhou Xingbo. Study on hydropower development strategy for new power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 106-115. (in Chinese))

[3] 王立平,马实一,郭旭,等.风电-光伏发电-抽水蓄能联合优化调度方法[J].水利经济,2024,42(6):58-63. (Wang Liping, Ma Shiyi, Guo Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 58-63. (in Chinese))

[4] 方国华,刘畅,丁紫玉.基于备用流量的水风光多能互补优化调度[J].长江科学院院报,2025,42(4):36-44. (Fang Guohua, Liu Chang, Ding Ziyu. Optimization scheduling of hydro-wind-solar complementary systems

- based on standby flow [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42 (4): 36-44. (in Chinese))
- [5] 方国华,黄显峰,金光球,等. 水利水电系统规划与优化调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [6] 徐弘玮,徐刚,吴碧琼,等. 基于深度强化学习的三峡电站机组负荷分配实时决策方法[J]. 水力发电学报, 2024, 43 (8): 76-88. (Xu Hongwei, Xu Gang, Wu Biqiong, et al. Real-time decision-making method for unit commitment of Three Gorges Hydropower Station based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(8): 76-88. (in Chinese))
- [7] 钟青祥,李佳,牟时宇,等. 深溪沟水电站站内实时负荷优化分配[J]. 人民长江, 2023, 54 (12): 248-253. (Zhong Qingxiang, Li Jia, Mou Shiyu, et al. Optimization of real-time load distribution in Shenxigou Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2023, 54 (12): 248-253. (in Chinese))
- [8] 刘瑞,王义民,畅建霞,等. 考虑分级振动区的水电站厂内经济运行研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41 (2): 63-71. (Liu Rui, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. In-plant economical operation of hydropower stations considering graded hydro-unit vibration zones [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (2): 63-71. (in Chinese))
- [9] 纪昌明,俞洪杰,阎晓冉,等. 考虑后效性影响的梯级水库短期优化调度耦合模型研究[J]. 水利学报, 2018, 49 (11): 1346-1356. (Ji Changming, Yu Hongjie, Yan Xiaoran, et al. Study on the coupling model of cascade reservoirs' short-term optimal operation considering the influence of aftereffect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1346-1356. (in Chinese))
- [10] 梁树超,翟保豫,李星,等. 基于最优流量分配的水电站短期精细化调度研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42 (4): 188-191. (Liang Shuchao, Zhai Baoyu, Li Xing, et al. Research on short-term fine operation of hydropower station based on optimal flow allocation [J]. Water Resources and Power, 2024, 42 (4): 188-191. (in Chinese))
- [11] 孙耘,丁宁,卢敏,等. 等微增率法在厂级 AGC 节能负荷分配中的实用化研究[J]. 浙江电力, 2017, 36(9): 57-61. (Sun Yun, Ding Ning, Lu Min, et al. Study on application of equal incremental principle in energy conservation load distribution of plant AGC [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9): 57-61. (in Chinese))
- [12] 李保健,武新宇,申建建. 考虑滞时电量的水电中期调度拉格朗日松弛方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (4): 59-64. (Li Baojian, Wu Xinyu, Shen Jianjian. Lagrangian relaxation method for medium-term operation of hydropower systems considering delayed energy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 59-64. (in Chinese))
- [13] Xu Bin, Zhong Ping'an, Zhao Yunfa, et al. Comparison between dynamic programming and genetic algorithm for hydro unit economic load dispatch [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(4): 420-432.
- [14] 方国华,郑旺,吴承君,等. 梯级水库优化调度的改进 ODDDP 算法研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 179-184. (Fang Guohua, Zheng Wang, Wu Chengjun, et al. Study on improved ODDDP algorithm for cascade reservoirs optimal operation [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(9): 179-184. (in Chinese))
- [15] 周建中,李英海,肖舸,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41 (10): 1212-1219. (Zhou Jianzhong, Li Yinghai, Xiao Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (10): 1212-1219. (in Chinese))
- [16] 邓丽丽,杨侃,周佳佳. Memetic 算法在水电站负荷优化分配中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 50-55. (Deng Lili, Yang Kan, Zhou Jiajia. Application of Memetic algorithm to optimal load dispatch of hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 50-55. (in Chinese))
- [17] 黄显峰,黄晗,鲜于虎成,等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (2): 38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(2): 38-45. (in Chinese))
- [18] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 51-58. (in Chinese))
- [19] 张验科,罗笙月,卢垚键,等. 风-光-混蓄长周期互补发电优化调度研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (4): 60-66. (Zhang Yanke, Luo Shengyue, Lu Yaojian, et al. Research on optimal operation for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 60-66. (in Chinese))
- [20] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (4): 67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanwang, et

- al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 67-75. (in Chinese)
- [21] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [22] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [23] Pan Hong, Luo Zhengliang, Hang Chenyang, et al. Optimization of load distribution method for hydropower units based on output fluctuation constraint and double-layer nested model[J]. *Mathematics*, 2024, 12(5): 662.
- [24] 徐刚,张侃,韦能. 市场环境下梯级电站厂间-厂内负荷分配模型[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(7): 46-56. (Xu Gang, Zhang Kan, Wei Neng. Inter-plant and in-plant load allocation model for cascade hydropower stations under power market [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(7): 46-56. (in Chinese))
- [25] 纪昌明,马皓宇,李传刚,等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 649-661. (Ji Changming, Ma Haoyu, Li Chuangang, et al. Research on parallel dynamic programming based on feasible region search mapping [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 649-661. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-11 编辑:俞云利)

(上接第 109 页)

- [14] Mihailova P, Traykov I, Tosheva A, et al. Changes in biological and physicochemical parameters of river water in a small hydropower reservoir cascade [J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2013, 19(2): 286-289.
- [15] 任实,刘亮,张地继,等. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库水温分布特性[J]. *人民长江*, 2018, 49(3): 32-35. (Ren Shi, Liu Liang, Zhang Diji, et al. Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 32-35. (in Chinese))
- [16] 於孟元,陈孝兵,薛敬阳,等. 金沙江下游水电站梯级开发对下游水温的影响[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(5): 65-71. (Yu Mengyuan, Chen Xiaobing, Xue Jingyang, et al. Influence of cascade hydropower construction on water temperature downstream of Jinsha river [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 41(5): 65-71. (in Chinese))
- [17] 胡光洋,杨中华,白凤朋,等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(1): 293-303. (Hu Guangyang, Yang Zhonghua, Bai Fengpeng, et al. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(1): 293-303. (in Chinese))
- [18] 程帅,左新宇,黄蕙,等. 溪洛渡、向家坝库区及坝下水温分布特性及成因分析[J]. *水利水电快报*, 2019, 40(8): 35-39. (Cheng Shuai, Zuo Xinyu, Huang Hui, et al. Characteristics and causes analysis of water temperature distribution in the reservoir areas and downstream of Xiluodu and Xiangjiaba dams [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, 40(8): 35-39. (in Chinese))
- [19] 戴凌全,张青森,任玉峰,等. 来流变化条件下溪洛渡水库生态调度期水温分层特性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 132-139. (Dai Lingquan, Zhang Qingsen, Ren Yufeng, et al. Water temperature stratification characteristics of Xiluodu Reservoir in ecological regulation period under the condition of inflow change [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(5): 132-139. (in Chinese))
- [20] 杨宇,蒋定国,梁犁丽,等. 溪洛渡水库水温模拟与叠梁门分层取水效果分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(9): 143-155. (Yang Yu, Jiang Dingguo, Liang Lili, et al. Simulation of water temperature and analysis of stratified water intake effect of stoplog gates at Xiluodu Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(9): 143-155. (in Chinese))
- [21] 曾康,黄廷林,马卫星,等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 4979-4986. (Zeng Kang, Huang Tinglin, Ma Weixing, et al. Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 4979-4986. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-08 编辑:雷燕)