

基于运行数据的水电站 MILP 模型 最优代表水头选取方法

王亮¹, 苗树敏¹, 滕予非¹, 王永灿¹, 张弛², 杜成锐², 王金龙²
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对采用设计水头的水电站混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 调度模型计算的出库流量与实际出库流量偏差较大的问题, 提出了基于运行数据的水电站 MILP 模型最优代表水头选取方法。首先, 基于运行数据采用 MILP 模型拟合出使模型计算出库流量过程与水电站实际出库流量过程偏差最小的代表水头; 然后, 在实际调度中, 以日平均入库流量和日平均出力作为该代表水头特征向量, 根据预测入库流量和日计划电量即可选取最优代表水头。计算实例表明, 相比于传统固定水头, 该方法能够更好地反应水电站实际的出库过程, 有利于提高电网制定调度计划中梯级水电站上下游水量匹配精度。

关键词: 水电; 混合整数线性规划; 短期; 水头优化

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.001

An Optimal Head Selection Method for MILP Model of Hydropower Plant Based on Operation Data

Wang Liang¹, Miao Shumin¹, Teng Yufei¹, Wang Yongcan¹, Zhang Chi², Du Chengrui², Wang Jinlong²
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the deviation between the actual discharge and the calculated discharge of hydropower plant by mixed integer linear programming (MILP) model with design head, an optimal head selection method for MILP model of hydropower plant based on operation data is proposed. Firstly, the MILP model of hydropower plant is used to obtain the optimal head which has the minimum deviation between the actual discharge and the calculated discharge. Then, the daily average reservoir inflow and the daily average output are taken as the optimal head eigenvectors. In the actual scheduling process, the optimal head can be selected according to the predicted reservoir inflow and the daily planned energy. The example shows that the proposed method can better reflect the actual discharge of hydropower plant, and is conducive to improving the matching accuracy of upstream and downstream water volume of cascaded hydropower plants in the formulation of power grid dispatching plan.

Key words: hydropower; mixed integer linear programming (MILP); short term; optimal head

0 引言

目前水电调度问题常用的求解方法有线性规划、非线性规划、混合整数线性规划、动态规划以及启发式现代智能算法等^[1], 其中混合整数线性规划

(mixed integer linear programming, MILP) 方法已经成为电网调度中求解水电调度问题的重要方法之一^[2-3]。经过多年的水电高速开发, 四川水电取得了巨大发展, 截止 2019 年年底, 四川电网全社会口径水电装机容量 78.403 GW, 在电源结构中占比超过 79%, 居全国省级电网第一位。四川电网高密度、超大规模的在运水电站, 使电网结构中出现很多同一通道接入多个流域电站和同一个流域接入多个送出通道的情况, 水力电气耦合关系十分复杂, 再加

基金项目: 国家重点研发计划项目(分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范 2018YFB0905200); 国网四川省电力公司科技项目(促进水电大范围消纳的送端电网水电调度关键技术研究及应用 52199718001B)

上水电调度本身大规模、高维、非线性的特征,给四川电网水电调度带了巨大挑战。

因此,在将混合整数线性规划应用于具有大规模水电的四川电网时,无法按照文献[4]所提方法对每个水电站都建立考虑水头影响的MILP调度模型,否则将出现变量过多而无法求解的情况。当前在实际调度过程中常用处理方式是将调节性能为日调节及以下水电站作为固定水头参与调度^[5],通常采用设计水头。然而,水电站运行过程中水头受上游坝前水位、下游尾水位等影响,仅采用设计水头难以准确描述水电站发电与出库流量间的关联关系,仿真精度较差。特别是受管理水平限制,部分电站还存在设计资料缺失、不完善等问题,进一步加大了传统固定水头模拟与实际运行工况间的偏差,易造成上下游水量不匹配,增加弃水、水库拉空风险。

针对上述问题,下面提出了基于运行数据的水电站MILP模型最优代表水头选取方法,以模型模拟的出库流量和弃水流量与实际数据偏差最小为目标,利用离散水头试算的方法确定当日MILP模型偏差最小的代表水头,建立逐日平均入库流量、平均出力、代表水头之间的对应关系。实际调度中,基于次日预测的水电站平均入库流量和平均出力可选取对应的MILP模型代表水头,与传统固定水头相比,所提方法可以更好地模拟实际运行工况,实现水电精细化调度。

1 基于运行数据拟合代表水头的水电站MILP模型

1.1 目标函数

水电站出库流量由发电流量和弃水流量组成,因此必须拟合出库、发电和弃水流量中的2个变量才能保证水电站模拟的水力特性与实际一致。考虑水电站上报数据一般为出库流量和弃水流量,因此采用出库流量和弃水流量模拟值与实际值之间偏差最小作为水电站MILP代表水头拟合模型的目标函数,具体如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T (|Q_t^{\text{real}} - Q_t| + |S_t^{\text{real}} - S_t|) \quad (1)$$

式中: Q_t^{real} 为 t 时段电站历史出库流量 m^3/s ; Q_t 为 t 时段电站模拟出库流量 m^3/s ; S_t^{real} 为 t 时段电站实际弃水流量 m^3/s ; S_t 为 t 时段电站模拟弃水流量 m^3/s ; T 为计算的时段总数。

• 2 •

1.2 约束条件

1) 出力约束

$$P_t = P_t^{\text{real}} \quad (2)$$

式中: P_t 为 t 时段水电站模拟出力 MW ; P_t^{real} 为 t 时段水电站历史出力 MW 。

2) 水量平衡约束

$$V_t = V_{t-1} + (I_t^{\text{real}} - Q_t) \Delta t \quad (3)$$

式中: V_t 为电站在 t 时段模拟末库容 m^3 ; I_t^{real} 为电站在 t 时段的实际入库流量 m^3/s ; Δt 为调度时段步长 s 。

3) 出库流量平衡约束

$$Q_t = q_t + S_t \quad (4)$$

式中 q_t 为电站在 t 时段的模拟发电流量 m^3/s 。

4) 电站出力特性约束

$$P_t = 1000 \times A \times q_t \times H \quad (5)$$

式中: A 为电站综合出力系数,可参考同类型电站获得; H 为电站代表水头 m 。

5) 出库流量约束

$$Q_t^{\min} \leq Q_t \leq Q_t^{\max} \quad (6)$$

式中 Q_t^{\min} 、 Q_t^{\max} 分别为 t 时段电站最小和最大出库流量 m^3/s 。

6) 发电流量约束

$$q_t \leq q_t^{\max} \quad (7)$$

式中 q_t^{\max} 为 t 时段电站的最大发电流量限制 m^3/s 。

7) 库容约束

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad (8)$$

式中 V_t^{\min} 、 V_t^{\max} 分别为 t 时段电站的最小和最大允许库容 m^3 。

2 水电站MILP调度模型最优代表水头选取步骤

步骤1:以等间距将电站最小水头 H^{\min} 和最大水头 H^{\max} 作为边界的水头区间,离散为 n 个代表水头; $H^{\min} = H_1 < H_2 < \dots < H_n = H^{\max}$ 。

步骤2:整理历史第 i 日水电站的逐时段出库流量、弃水流量、出力等数据,将离散得到的 n 个水头分别代入式(5),求解水电站代表水头拟合MILP模型,得到 n 个水头对应的流量偏差情况 $F_i^1, F_i^2, \dots, F_i^n$ 。

步骤3:选取第 i 日偏差最小 F_i^{best} 对应的最优代表水头 H_i^{best} ,计算当日平均入库流量 \bar{I}_i 、平均出力 \bar{P}_i ,组成该日代表水头特性向量 $(\bar{I}_i, \bar{P}_i, H_i^{\text{best}})$ 。

步骤4:重复步骤2和步骤3,获得下一日的代

表水头特征向量,设总共开展了 m 日的水头拟合计算,则可形成日平均入库流量、平均出力和代表水头的特征矩阵 M 。

$$M = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 & \bar{P}_1 & H_1^{best} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{I}_i & \bar{P}_i & H_i^{best} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{I}_m & \bar{P}_m & H_m^{best} \end{bmatrix}$$

步骤5:利用待确定代表水头调度日 x 的预测平均入库流量 \bar{I} 和平均出力 \bar{P}_i ,逐个计算 \bar{I} 、 \bar{P}_i 与矩阵 M 中历史已发生情况下日平均流量和平均出力之间的欧氏距离,选择最小欧式距离所对应代表水头的平均值 H^{best} 作为模型计算的代表水头。

步骤6:调度日 x 结束后,重复步骤2和步骤3,将该日数据更新到特征矩阵 M 中,重复步骤5开始下一日的调度曲线制定。

3 实例应用

3.1 研究对象基本情况

以四川电网某日调节水电站为研究对象,该电站基本参数如表1表示。以电站调度前30d的数据作为代表水头选取特征矩阵,以1h为调度时段步长,以2018年实际运行数据为基础,分别以枯水期2月和汛期6月为代表,开展模拟调度,以验证所提方法的有效性。

表1 水电站基本参数

调节性能	装机 /MW	最大库容 /($10^4 m^3$)	最小库容 /($10^4 m^3$)	最小水头 /m
日调节	60	1140	520	12
设计水头 /m	最大水头 /m	最大发电流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	最大出库流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	
16.4	21	417	9820	

3.2 计算结果及分析

在 Matlab 中搭建 MILP 模型,调用 Cplex 软件包分别对该电站2018年1月1日至2018年1月31日历史运行数据按照第2节步骤1至步骤4进行逐日模拟调度,形成初始特征矩阵1,并按照第2节步骤5至步骤6开展2月1日至2月28日的模拟调度。2月份设计水头和基于所提方法预测的代表水头计算出的逐日实际流量与模型计算流量偏差以及当日 MILP 模型最小流量偏差见图1;典型日实际出库流量、设计水头模拟出库流量以及优化代表水头模拟出库流量过程见图2至图4。

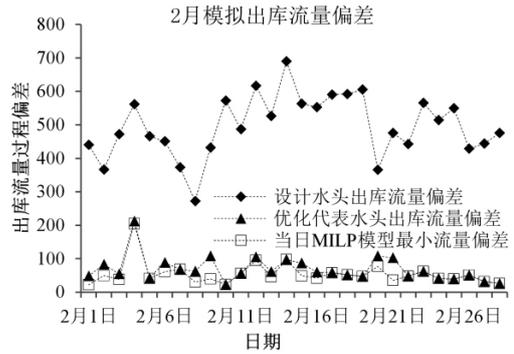


图1 2月模拟调度出库流量偏差

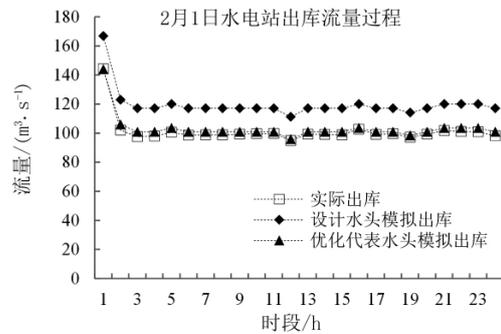


图2 2月1日逐时刻出库流量过程

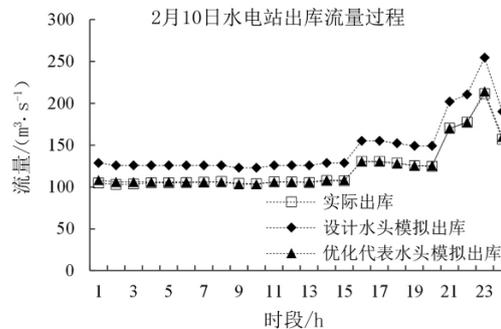


图3 2月10日逐时刻出库流量过程

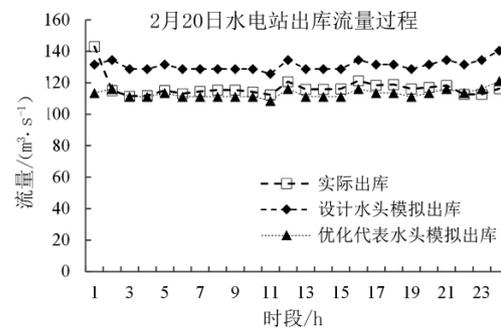


图4 2月20日逐时刻出库流量过程

如图1所示采用所提方法预测的代表水头进行水电站调度时,枯水期2月份出库流量计算偏差与当日 MILP 所拟合的最小流量偏差基本一致。如图2至图4的典型日逐时刻出库流量过程所示,在枯水期采用经所提方法优化后的代表水头能够较好地拟合实际出库流量过程。

对2018年1月1日至2018年5月31日的历史运行数据进行逐日模拟调度后,扩展原来的特征矩阵,并开展6月1日至6月30日的模拟调度。6月设计水头和基于所提方法预测的代表水头计算出的逐日实际流量与模型计算流量偏差以及当日MILP模型最小流量偏差见图5;典型日实际出库流量、设计水头模拟出库流量以及优化代表水头模拟出库流量过程见图6至图8。

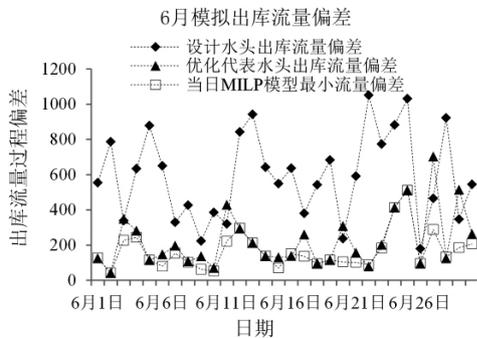


图5 6月模拟调度出库流量偏差

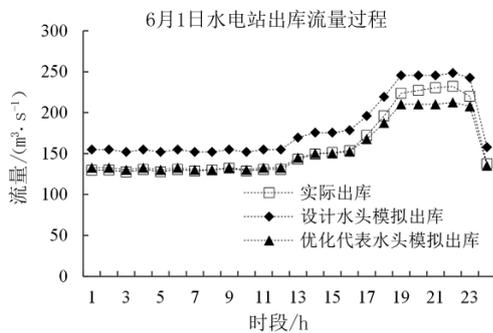


图6 6月1日逐时刻出库流量过程

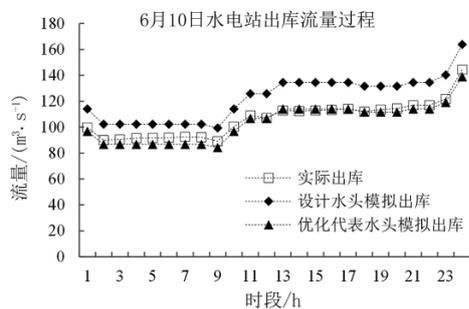


图7 6月10日逐时刻出库流量过程

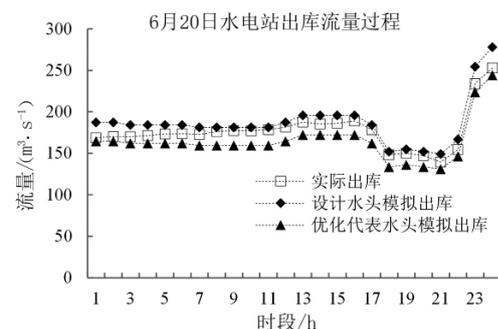


图8 6月20日逐时刻出库流量过程

如图5所示,采用所提方法的代表水头进行汛期水电站调度时,与实际流量过程的偏差多数情况下要小于采用设计水头的模拟偏差。如图6至图8的汛期典型日逐时刻出库流量过程所示,经所提方法优化后的代表水头能够较好地拟合实际出库。

总的来说,所提方法能够更好地反应水电站实际的出库过程,明显优于仅采用固定设计水头的水电站MILP模型调度结果,可有效提高调度计划可行性及精细化水平。

4 结 语

前面提出了基于运行数据的水电站MILP模型最优代表水头选取方法,构建了基于运行数据拟合代表水头的水电站MILP模型,给出了最优代表水头选取步骤,并以四川电网某日调节水电站为例进行了验证。结果表明,在采用固定水头的水电站MILP调度模型中,相比于采用固定设计水头的水电站MILP调度模型,基于历史运行数据选择最优代表水头的水电站MILP调度模型,在枯水期和汛期均能更好地拟合水电站实际出库流量过程,更好地反应水电站实际的出库过程,有利于提高电网制定调度计划中梯级水电站上下游水量匹配精度,实现水资源的优化利用。

参考文献

- [1] 程春田,武新宇,申建建,等. 大规模水电站群短期优化调度方法 I: 总体概述[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1017-1024.
- [2] 吴宏宇,管晓宏,翟桥柱,等. 水火电联合短期调度的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 82-88.
- [3] 贾江涛. 一种带抽蓄机组水电系统短期优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 41(5): 1597-1602.
- [4] 贾江涛,管晓宏,翟桥柱. 考虑水头影响的梯级水电站群短期优化调度[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 13-16.
- [5] 苏承国,王沛霖,武新宇,等. 考虑机组组合的梯级水电站短期调峰MILP模型[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1883-1891.

作者简介:

王亮(1990), 硕士, 工程师, 主要从事水电系统优化调度研究。
(收稿日期: 2020-03-02)