

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251151

基于径流预测的流域小水电群可调能力优化

何桂雄¹, 张新鹤¹, 谢学渊², 徐 勇²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 小水电具有小容量、多点分布、流域相关性强等特点,传统“随流发电”模式具有无序性,小水电群灵活可调价值未得到充分释放,可调能力评估与优化是流域小水电群支撑电网调峰、风光电消纳的关键。在流域小水电群径流预测基础上,提出以小水电当前水位最大发电流量下泄对应出力为可调出力上限,以生态装机容量对应出力为下限,确定了小水电可调节容量区间,进而构建了流域小水电群可调容量优化模型并提出改进粒子群求解算法。以金溪流域的良浅、大言、孔头、范厝、高唐5座串联径流式电站为例进行降雨—径流过程模拟,分析小水电群库容与其发电、入库流量耦合关系,计算流域小水电群最优出力及可调节出力区间并进行优化求解。结果表明,优化后可调容量区间增大,调节能力上限提高了12.1%,实际出力比优化前提高了14.6%。优化后出力方式可支撑电网在更大区间调整小水电出力,为电网调度部门挖掘小水电资源灵活性价值,发挥其调峰和消纳能力提供了决策支撑。

关键词: 径流预测; 小水电群; 可调能力; 改进粒子群算法; 优化调度

中图分类号: TV697.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0217-05

Optimization of Regulation Capability for Watershed Small Hydropower Clusters Based on Rnoff Forecasting

HE Gui-xiong¹, ZHANG Xin-he¹, XIE Xue-yuan², XU Yong²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Supply, Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Small hydropower has the characteristics of small capacity, multi-point distribution and strong basin correlation. The traditional follow-up power generation mode is disorderly, and the flexible and adjustable value of small hydropower groups has not been fully utilized. The evaluation and optimization of adjustable capacity is the key to support the peak regulation of power grid and the accommodation of wind, solar and electricity. Based on the runoff prediction of small hydropower groups in the basin, it is proposed that the output corresponding to the maximum power generation flow of the current water level of small hydropower is the upper limit of adjustable output, and the output corresponding to the ecological installed capacity is the lower limit. The adjustable capacity interval of small hydropower is determined, and then the adjustable capacity optimization model of small hydropower groups in the basin is constructed and an improved particle swarm optimization algorithm is proposed. Taking the five series runoff power stations of Liangqian, Dayan, Kongtou, Fancuo and Gaotang in Jinxi River Basin as an example, the rainfall-runoff process simulation is carried out to analyze the coupling relationship between the storage capacity of small hydropower group and its power generation and inflow flow, and the optimal output and adjustable output interval of small hydropower group in the basin are optimized. The results show that after optimization, the adjustable capacity interval is increased, the upper limit of the adjustment capacity is increased by 12.1 %, and the actual output is increased by 14.6 % compared with that before optimization. The optimized output mode can support the power grid to adjust the output of small hydropower in a larger interval,

收稿日期: 2025-06-28, 修回日期: 2025-09-09, 接受日期: 2025-09-18

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(5400-202323225A-1-1-ZN)

作者简介: 何桂雄(1984-),男,博士、正高级工程师,研究方向为分布式发电、负荷管理与综合能源技术研究与应用, E-mail: 2464799833@qq.com

通讯作者: 张新鹤(1990-),女,硕士、高级工程师,研究方向为分布式发电控制理论研究与实践, E-mail: zhangxinhe10@126.com

which can provide decision support for the power grid dispatching department to tap the flexibility value of small hydropower resources and give full play to its peak regulation and consumption capacity.

Key words: runoff prediction; small hydropower clusters; adjustable capacity; improved particle swarm optimization algorithm; optimal scheduling

1 引言

小水电在清洁能源开发与流域水资源利用中占有重要地位,装机容量占全国水电 1/4^[1],随着新型电力系统对灵活调节资源需求日益增长,小水电群若能精准预测并协同调度,可成为优质调峰和促消纳支撑资源。然而,径流式电站来水过程随机性强,径流预测精度直接影响电站出力安排与调度优化的可靠性,同时,小水电站分布分散、调节能力有限,发电出力受径流波动影响显著,电网调度难以准确评估其可调能力。因此,可调能力评估与优化是流域小水电群支撑电网调峰、风光电消纳的关键。近年来,随着水文模型优化和智能算法的发展,可调容量的预测精度和实用性逐步提升。高方明^[2]提出了一种以小水电微电网运行成本最低为目标的日前优化调度策略;宋兴荣等^[3]以猛洞河流域为例,建立了基于径流模拟的梯级小水电优化调度模型。这些研究为小水电优化提供了有益探索,但针对以径流式为主的小水电群,现有成果在可调容量区间识别和系统性建模方面仍显不足,限制了其调节潜力的发挥。鉴此,本文以金溪流域同一干流上的良浅、大言、孔头、范厝、高唐 5 座串联径流式电站为研究对象,结合径流预测提出小水电群可调容量优化方法,对于支撑电网保供调峰、促进风光电消纳具有重要意义。

2 小水电群可调能力

小水电群的可调能力是指其在电力系统中通过调节出力来响应负荷变化、维持系统稳定或提供辅助服务的能力。在新型电力系统背景下,新能源发电占比越来越大,需要水电承担更多的调频、调峰作用,水电将承担顶峰和负荷备用等,因此水电需要向上调节负荷和向下调节负荷,分别称为可调出力上限、可调出力下限。

(1)可调出力上限。以新安江水文模型^[4]模拟预测径流资料为基础,根据入库流量及水库蓄水情况,计算得入流后水库水位数据,水库由当前水位可下泄最大发电流量为可调出力最大工况,

按历时顺序逐时段进行水库水量蓄泄平衡的径流调节计算,计算可调容量最大工况所对应的出力值,以该数据作为可调出力上限,若出力值大于装机容量,则取装机容量作为可调出力上限。表达式为:

$$N_{i,\max} = \min \left\{ \frac{A_i q_i H_{i,s}}{P_i} \right\} \quad (1)$$

式中, $N_{i,\max}$ 为出力上限,kW; A_i 为第 i 个小水电的出力系数; q_i 为第 i 个小水电的最大发电流量, m^3/s ; $H_{i,s}$ 为第 i 个水电站最大发电流量对应的发电水头,m; P_i 为第 i 个水电站装机容量。

(2)可调出力下限。水库在保证防洪、发电等目标的情况下,还应兼顾河流生态需水的目标。本文进行流域小水电群出力容量预测时,为满足下游河道生态需求,发电量不得小于水电站生态装机容量^[5],故流域小水电群可调出力下限即为水电站生态装机容量。表达式为:

$$N_{i,\min} = E_{\text{EIC}} \quad (2)$$

式中, $N_{i,\min}$ 为出力下限,kW; E_{EIC} 为生态装机容量,MW。

(3)可调能力。小水电群可调能力是一个时间周期内可调容量区间,根据可调出力上限曲线与可调出力下限曲线包围的面积计算。

3 小水电群可调能力优化模型

3.1 模型目标函数

水库群优化调度模型可表述为:在已知水电站工程特性、调度期初始水位以及来水条件的前提下,确定一组满足多重约束的水位运行方案,使水库群在整个调度期内的综合效益达到最优。与库容大、调节性能强的大中型水电不同^[6],小水电群库容有限、调节能力较弱,不能直接套用大中型水电的长周期调度模型。考虑到小水电群与大中型水电在调节能力和运行特性上的差异,模型重点体现短期径流预测与动态可调区间,而非长周期水量均衡,更能反映其短期灵活调节特性。以一个调度周期内梯级串联水库的可调能力最大为目标函数,构建梯级水电站调度模型。目标函数为:

$$\max E = \max \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M N_{i,\max}^t - N_{i,\min}^t \right) \quad (3)$$

式中, E 为一个时段内的可调能力, $\text{kW} \cdot \text{h}$; T 为总调度时段; t 为时段变量, $t = 1, 2, \dots, T$; M 为小水电数量; i 为小水电序号, $i = 1, 2, \dots, M$ 。

3.2 模型约束条件

(1) 水量平衡约束。表达式为:

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (Q_{i,t} - Q_{\text{di},t})\Delta t - E_{i,t}S_{i,t} - D_{i,t} \quad (4)$$

式中, $V_{i,t-1}$, $V_{i,t}$ 分别为 t 时段初、末期的水库蓄水量, m^3 ; $Q_{i,t}$ 为 t 时段入库流量, m^3/s ; $Q_{\text{di},t}$ 为 t 时段下泄流量, m^3/s ; $E_{i,t}$ 为 t 时段蒸发深度, m ; $S_{i,t}$ 为 t 时段水库面积, m^2 ; $D_{i,t}$ 为 t 时段渗漏损失水量, m^3 。

(2) 水库及电站约束。表达式为:

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

$$Q_{t,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{t,\max} \quad (6)$$

$$N_{t,\min} \leq Aq_{i,t}H_{i,t} \leq N_{t,\max} \quad (7)$$

式中, $Z_{t,\min}$ 为 t 时段允许最低运行水位, 若无特殊要求则为死水位, m ; $Z_{t,\max}$ 为 t 时段允许最高运行水位, m ; $Q_{t,\min}$ 取 t 时段各水库的生态流量与水轮机最小引水需求之间的较小值, 以兼顾生态保护与机组运行约束, 在极端干旱情况下, 若天然入库来水不足以满足生态流量要求, 可用水库蓄水补足, 模型将优先保证生态下泄流量并减少发电出力; 若仍无法满足, 则判定为不可调度工况, 将天然来水全部下泄, m^3/s ; $Q_{t,\max}$ 为 t 时段最大允许引水流量, m^3/s ; $N_{t,\min}$ 为 t 时段水电站机组被允许的最小出力, kW ; $N_{t,\max}$ 为 t 时段允许的最大出力, 一般为装机容量, kW 。

(3) 上下游水力联系。表达式为:

$$q_{i,t} = Q_{i-1,t} + q_{\text{qi},i,t} \quad (8)$$

式中, $q_{\text{qi},i,t}$ 为第 $i-1$ 个水库与第 i 个水库间在第 t 时段的区间来水流量, m^3/s 。

4 模型求解算法

采用目前研究中使用频率较高的粒子群算法 (PSO) 求解水库多目标调度的可行解搜索阶段^[7]。该算法具有结构简单、收敛速度快等特点, 适用于短期径流预测下的小水电可调容量优化问题。以某水库优化调度问题的可行解搜索阶段为例, 此时可取任意目标函数为主适应度函数。运算流程图见图 1。

为验证本文提出的改进粒子群算法 (PSO) 的有效性与稳定性, 引入遗传算法 (GA)、差分进化 (DE) 和模拟退火 (SA) 三种典型智能优化方法作为对比对象。在相同的试验条件下, 以典型多峰

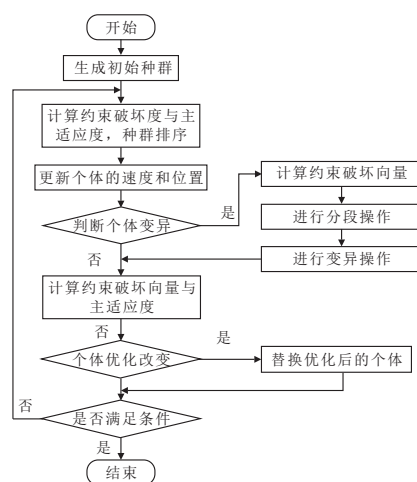


图 1 改进粒子群算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the improved particle swarm algorithm

函数 Rastrigin ($D=30$) 作为测试函数, 对四种算法进行性能对比。对比结果见图 2。结果表明, PSO 在搜索初期收敛速度较快, 并在中后期保持较好的全局寻优能力, 其均值与标准差优于对比算法, 稳定性突出。DE 在部分情况下表现接近, 但整体稳定性略逊; GA 与 SA 在复杂多峰问题上易陷入局部最优。通过基准函数对比, 进一步验证了改进粒子群算法在多峰复杂优化问题上的稳定性与优越性。

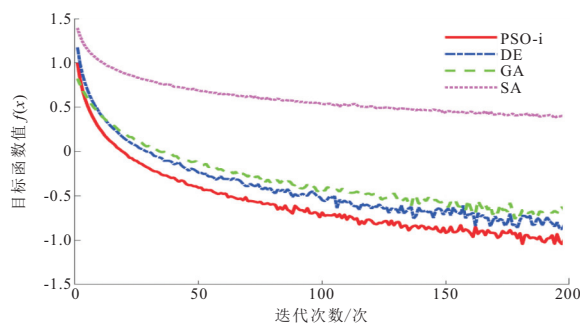


图 2 Rastrigin 函数上各算法的收敛曲线

Fig. 2 Convergence curves of each algorithm on Rastrigin function

5 实例研究

选取我国金溪流域处于同一干流的 5 座串联水库为研究对象, 雨量充沛, 但年内分配不均, 70%~80% 左右的降雨量发生在 4~9 月。流域多年平均降雨量 1 734.2 mm, 全流域集水面积约 7 130 km^2 , 河长 253 km, 平均比降 1.5%。5 座电站由上游至下游依次为良浅电站、大言电站、孔头电站、范厝电站、高唐电站, 均为径流式电站, 调节能力较弱, 各电站基本参数见表 1。

表 1 电站基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the power station

电站	正常蓄 水位/m	死水位 /m	调节库容 / 10^4 m^3	装机容 量/MW	保证出 力/MW
良浅电站	211.2	209.2	293	30	8.78
大言电站	197.8	196.3	267	32	8.40
孔头电站	175.8	174.0	699	40	10.10
范厝电站	161.0	160.0	400	30	10.16
高唐电站	146.0	144.8	516	42	9.91

5.1 径流预报

为验证水文模型在金溪流域的适用性,并为后续小水电可调容量计算提供完整的来水过程,首先基于原始 DEM 数据对流域地形进行洼地填充,计算水流方向与汇流累积量,并据此划分子流域范围。研究收集了流域上游 16 个水文站的多年实测逐日降水、蒸发及入库流量资料,并将对应数据驱动已构建的新安江模型,用于模拟电站入库径流过程,选取典型水文年进行参数率定与验证,验证期分别为 1991~1993 年(验证期 1)及 1997~1998 年(验证期 2),该时期的水文记录质量高、缺测少,包含偏枯年、平水年与偏丰年等典型水文组合,能够较全面地反映流域的产汇流规律和年际变化特征,覆盖偏枯年、平水年与偏丰年。表 2 为流域日径流过程率定与验证的模拟精度。由表 2 可知,新安江模型在该流域的径流模拟过程中精度较高,率定期与验证期 1 的模拟径流深结果较为接近,而验证期 2 模拟径流深与实测径流深结果相差较大,其原因可能与 1998 年属于偏丰年有关。除此之外,率定期与两个验证期的皮尔逊相关系数 R 均在 0.85 以上,Nash 效率系数均大于 0.75。

表 2 新安江模型日径流过程模拟精度

Tab. 2 Simulation accuracy of daily runoff process in Xinanjiang model

时间段	实测径 流深/mm	模拟径 流深/mm	相关 系数 R	Nash 效 率系数
率定期	7 813.1	7 737.3	0.88	0.764
验证期 1	3 266.4	3 094.0	0.91	0.808
验证期 2	3 239.9	2 714.3	0.91	0.785

5.2 可调出力计算

(1)正常最优出力。选用径流资料为金溪流域 1992 年 8 月 1~31 日的历史实测序列,该时段处于多年平均丰水期,来水过程完整且具有代表性,可用于评估梯级小水电群在典型工况下的可调节能力。调度计算以前一日 24 时的实测水位作为初始条件,各电站初始水位良浅 210.25 m、大言 185.22 m、孔头 174.94 m、范厝 160.51 m、高唐 145.40 m。在此基础上,模型按日进行水量

平衡与水位递推,并在满足水位上下限、生态下泄流量与引水流量约束的前提下,求解梯级小水电群的最优出力过程。计算结果见图 3。

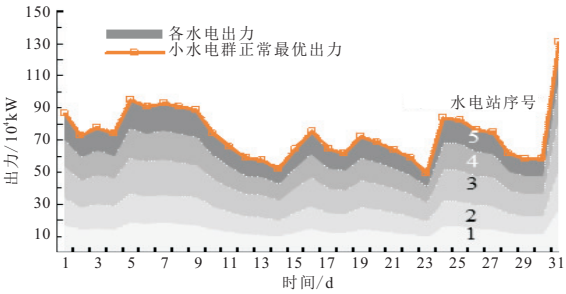


图 3 小水电群出力计算

Fig. 3 Output calculation of small hydropower group

模型中设置了严格的水位上下限约束,确保各电站在整个优化过程中水位始终处于安全运行区间,避免超过汛限水位或低于死水位的情况。调节后水位波动幅度有所减小,例如孔头电站优化前水位波动为 174.05~175.64 m,优化后为 174.09~175.62 m,波动幅度减小,调节更平稳。

(2)可调出力上限。根据当前水库来水情况,可调出力上限值以小水电当前水位最大发电流量下泄作为参考。计算其对应出力,该出力值即为出力上限,若超过电站装机容量,则取装机容量作为可调出力上限,对该流域 5 座电站进行水能计算,小水电群可调出力上限见图 4。

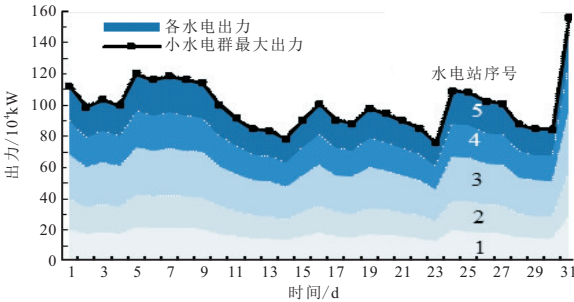


图 4 小水电群可调出力上限

Fig. 4 The upper limit of the adjustable output of the small hydropower group

(3)可调出力下限。根据流域生态目标,为保证下游河道生态和环境基本需水量,计算小水电出力时应考虑各电站生态调度目标,研究区域内的 5 座电站生态流量见表 3。结合流域生态需求、生态流量的保证、环境保护要求等多个因素来

表 3 各电站生态流量

Tab. 3 Ecological flow rate of each power station

电站	生态下泄流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	电站	生态下泄流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
良浅电站	23.77	范厝电站	28.81
大言电站	25.05	高唐电站	33.09
孔头电站	26.68		

进行生态装机容量的规划与设计,取生态装机容量为出力容量下限,研究区水电站群生态装机容量为 14.5 MW。

(4) 可调容量计算结果。根据出力上限和下限的计算结果,得出了流域小水电群的优化可调容量区间(见图 5)。受降雨径流变化影响,上限在月内波动明显,但区间总体能够满足日常出力需求。最优出力曲线始终位于上下限之间,曲线与上限的差距反映了电站群在当前调度下的灵活调节空间,为应对负荷波动提供了余量。为便于开展对比分析,优化前的可调容量以电站现行运行策略为基础计算得到。具体而言,在与优化情景完全一致的来水条件、初始水位和运行约束下,按照电站日常采用的梯级调度规则与机组出力安排流程,推算得到基准情景下的出力过程,并据此形成优化前的可调容量区间。优化后的可调容量由模型在同一水文边界与运行条件下,通过求解可调区间最大化目标而获得。两者仅在调度策略上存在差异,因此能够形成可重复、可验证的对照体系。由图 5 可知,优化后可调容量区间显著扩大,调节能力提高 14.6%,上限提升 12.1%;受生态流量约束,最小出力保持不变(14.5 MW)。可调容量的增加不仅增强了小水电群的灵活性,也提升了系统的可控性和可靠性。

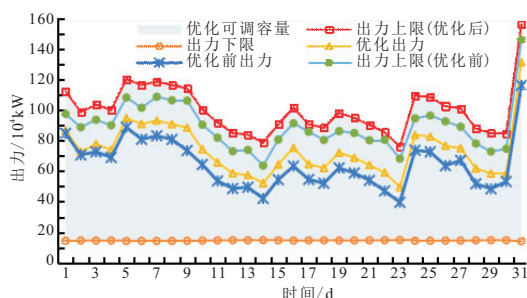


图 5 小水电群可调容量区间

Fig. 5 Adjustable capacity range of small hydropower group

6 结论

a. 提出了基于径流预测的小水电群可调容量区间定义与优化方法,并采用改进粒子群算法提升求解稳定性与效率。

b. 以金溪流域 5 座串联电站为例,结果表明优化后可调容量区间显著扩大,调节能力提高 14.6%,上限提升 12.1%,最小出力保持不变。

c. 研究为小水电群灵活可调能力的挖掘提供了新思路,对提升电网调峰能力和促进风光电消纳具有现实意义,未来可进一步研究与负荷侧

资源协同机制。

参考文献:

- [1] 许布哲,李黄强,舒征宇,等. 基于网格气象数据的 LLE-LSTM 小水电发电功率超短期预测[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 212-216. (XU B Z, LI H Q, SHU Z Y, et al. Ultra-short-term prediction of small hydropower generation power based on grid meteorological data and LLE-LSTM[J]. Water resources and power, 2022, 40(11): 212-216. (in Chinese))
- [2] 高方明. 分布式小水电微电网优化调度问题研究[D]. 广州: 广州大学, 2024. (GAO F M. Research on optimal scheduling problem of distributed small hydropower microgrid[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024. (in Chinese))
- [3] 宋兴荣,张弘强,田海平,等. 考虑区域小水电出力特征的预报调度研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 51-54, 138. (SONG X R, ZHANG H Q, TIAN H P, et al. Reservoir operation based on runoff forecast considering output characteristics of regional small hydropower[J]. Water resources and power, 2023, 41(9): 51-54, 138. (in Chinese))
- [4] 孙彤,王洁,梁峰铭,等. 改进的径流曲线数模型在洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 68-72. (SUN T, WANG J, LIANG F M, et al. The improvement of SCS-CN and its application in flood prediction[J]. Water resources and power, 2023, 41(12): 68-72. (in Chinese))
- [5] 余洋. 生态水电站装机容量合理确定方法探讨[J]. 小水电, 2024(2): 18-20. (YU Y. Discussion on reasonable determination method of installed capacity of ecological hydropower station[J]. Small hydro power, 2024(2): 18-20. (in Chinese))
- [6] 刘晨曦,李刚,程春田,等. 大小水电相关分析的地区小水电发电能力预测方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 63-66, 58. (LIU C X, LI G, CHENG C T, et al. Correlation analysis method of large and small hydropower for generation capacity forecasting of small hydropower stations[J]. Water resources and power, 2016, 34(8): 63-66, 58. (in Chinese))
- [7] 吴志远,黄显峰,李昌平,等. 基于分段粒子群算法的梯级水库多目标优化调度模型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 145-154. (WU Z Y, HUANG X F, LI C P, et al. Multi-objective optimal dispatch model of cascade reservoirs based on piecewise particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of water resources and water engineering, 2020, 31(3): 145-154. (in Chinese))